



Disertasi - RE143561

**PERPINDAHAN MASSA FASE CAIR PADA
PENGOLAHAN LINDI TPA SAMPAH KOTA
DALAM BIOREAKTOR ANAEROBIK**

**ABDUL KAHAR
3313301001**

**DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.**

**PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



Dissertation - RE143561

**LIQUID PHASE MASS TRANSFER AT
LEACHATE TREATMENT OF MUNICIPAL
WASTE LANDFILL IN ANAEROBIC
BIOREACTOR**

**ABDUL KAHAR
3313301001**

**SUPERVISOR
Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.**

**DOCTORATE PROGRAM
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

Halaman Pengesahan

PERPINDAHAN MASSA FASE CAIR PADA PENGOLAHAN LINDI TPA SAMPAH KOTA DALAM BIOREAKTOR ANAEROBIK

LIQUID PHASE MASS TRANSFER AT LEACHATE TREATMENT OF MUNICIPAL WASTE LANDFILL IN ANAEROBIC BIOREACTOR

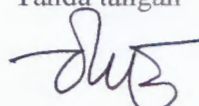

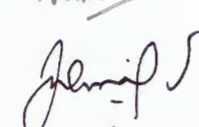
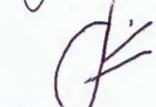
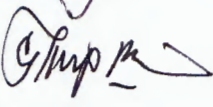
Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr.)

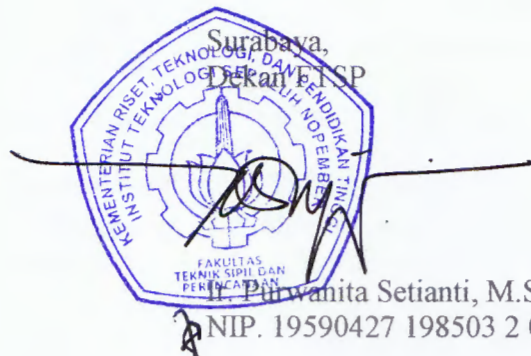
Di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Oleh:
ABDUL KAHAR
NRP: 3313301001

Tanggal ujian:
Periode wisuda:

Disetujui oleh Tim PPUKD, sebagai berikut:

No.	Nama dan Gelar		Tanda tangan
1.	Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D. NIP. 19600618 198803 1 002	Promotor	
2.	IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D. NIP. 19750212 199903 2 001	Co-Promotor	
3.	Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc. NIP. 19530706 198403 2 004	Penguji Internal TL	
4.	Prof. Dr. Ir. Tri Widjaya, M.Eng. NIP. 19611021 198603 1 001	Penguji Internal ITS	
5.	Dr. rer. nat. Ganden Supriyanto, Dipl. EST, M.Sc. NIP. 19681228 199303 1 001	Penguji Eksternal	



Dr. Diah Wanihita Setianti, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19590427 198503 2 001

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahiim.
Assalamu ‘alaikum war, wab.

Alhamdulillah Robbil ‘alamiin, puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas berkah rahman dan rahim-Nya sehingga kita semua dapat melaksanakan segala aktifitas keseharian kita.

Banyak tantangan yang penulis hadapi dalam menyusun disertasi ini, mulai dari proposal penelitian, menyelesaikan penelitian dan penulisan disertasi ini, namun berkat taufiq dan hidayah-Nya jugalah serta bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga disertasi kami yang berjudul ”Perpindahan Massa Fase Cair Pada Pengolahan Lindi TPA Sampah Kota Dalam Bioreaktor Anaerobik” dapat terselesaikan. Sebagai salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan studi Program Doktor Teknik Lingkungan ITS. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat dan memberikan sumbangan dalam perkembangan ilmu pengetahuan serta referensi pengolahan limbah cair khususnya lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D. sebagai promotor dan IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D. sebagai Co-promotor yang telah memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian disertasi ini, serta yang terpenting adalah suri tauladan yang diberikan dalam meningkatkan kualitas dan sikap akademik kepada penulis. Sumbangsih beliau berdua ini tidak mungkin bisa terbalaskan oleh penulis. Semoga Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, membalas dan memberikan ganjaran pahala yang berlimpah. Aamiin yaa Robbal ‘alamiin.

Pengorbanan yang sangat luar biasa dan do’a dari kedua orang tua, ayanda Mansur Makkulahu bin Kulahu Dg. Mattone dan ibunda Indo Tang binti Jabe Dg. Pahata (alm), isteri tercinta Sinto Windarti, ananda Yusuf Khalifah Arkhab dan Dzakiy Muhammad Alfadhil, serta saudara-saudara dan ponakan-ponakan penulis yang selalu memberikan rasa rindu akan kehadiran mereka. Semangat, motivasi dan do’a yang kuat dari merekalah sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini. Semoga do’a dan pengorbanan yang tak terkira ini dilipatgandakan Allah SWT dengan rahmat dan limpahan barokah-Nya di dunia dan akhirat.

Berkenaan dengan penyusunan disertasi ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi, Dirjen Dikti, atas bantuan hibah penelitian yang penulis terima selama menyusun disertasi.
2. Rektor ITS, Direktur Program Pascasarjana ITS, Dekan FTSP, Ketua Jurusan Teknik Lingkungan, dan segenap dosen, staf dan karyawan di Jurusan Teknik Lingkungan atas bantuan dan keramahan yang telah diberikan.

3. Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc., Prof. Dr. Tri Widjaya, M.Eng., dan Dr. rer. nat. Ganden Supriyanto, Dipl. EST, M.Sc. selaku dosen penguji disertasi yang telah memberikan koreksi, arahan, perbaikan dan saran yang sangat yang bagi penulis dalam penyusunan disertasi ini.
4. Pemerintah Propinsi Kalimantan Timur dan Pengelola Beasiswa Kaltim Cemerlang atas Program Beasiswa 100 Doktor Unmul Kaltim Cemerlang.
5. Dekan FT Unmul, Kepala Laboratorium Rekayasa Kimia dan Laboratorium Rekayasa Lingkungan FT Unmul, Rahmat Saleh (Laboran Lab. Teknologi Kimia), sebagai tempat penulis melakukan penelitian.
6. Kepala Satker Penyehatan Lingkungan Pemukiman (PLP) Kementerian Pekerjaan Umum (PU) Propinsi Kalimantan Timur, Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Samarinda, Kepala UPT TPA Sambutan dan TPA Bukit Pinang, Samarinda.
7. Rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Teknik Lingkungan ITS, Pak Junaidi, Pak Kota, Pak Elmi, Pak Andy, Bu Evi, Bu Iva, dan Bu Ranti dan lain-lain, atas segala bantuan, kritik dan diskusinya.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Lingkungan FT Unmul; Lukman Malik, Gusti Aspianur, Gradian Reza, Yeyen Ekandari, Dwi Ariani K.H., Nonie Novelya, Megahapsari Martaningtyas, Nur Awalia, Citra Dwijayanti, Novia Wulandari, dan Samuel Krismanto, serta Setia Budi, Dodik Okta Rian, Ika Novdianti dan Sirojul Munir; atas segala kerjasama dan peran sertanya dalam Group Riset Lindi TPA Samarinda.
9. Rekan-rekan Asrama Mahasiswa Kalimantan Timur (AMKT) Mawar Surabaya.

Akhir kata, tak lupa pula penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya atas segala salah dan khilaf selama menempuh studi di ITS. Mungkin ada perkataan, tingkah laku, sikap dan perbuatan yang disengaja ataupun tidak disengaja menyinggung perasaan semuanya, sekali lagi penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Wassalamu 'alaikum war, wab.

Surabaya, Agustus 2017

Penulis

PERPINDAHAN MASSA FASE CAIR PADA PENGOLAHAN LINDI TPA SAMPAH KOTA DALAM BIOREAKTOR ANAEROBIK

Nama : Abdul Kahar
NRP : 3313301001
Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
Co-Pembimbing : IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Lindi TPA sampah kota merupakan limbah cair heterogen yang mengandung substrat organik dan anorganik kompleks terlarut yang *biodegradable* dan *non-biodegradable*. Perpindahan massa merupakan fenomena penting dalam rekayasa bioproses, yang tidak dapat diselesaikan secara lengkap dengan metode teoritis atau metode matematik. Penelitian ini bertujuan menganalisis perpindahan massa fase cair dan menentukan korelasi empirik koefisien perpindahan massa fase cair pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.

Penelitian ini adalah eksperimen skala pilot dengan sistem *batch*. Perpindahan massa fase cair dianalisis menggunakan konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD. Difusi zat terlarut diekspresikan sebagai VFA. Penelitian ini menggunakan bioreaktor anaerobik dengan volume total 160L. Setelah dilakukan karakterisasi dan analisis kualitas lindi, selanjutnya perancangan bioreaktor anaerobik dengan desain sesuai kebutuhan penelitian. Kemudian dilakukan uji kebocoran dan kalibrasi dari sistem bioreaktor anaerobik. Perbandingan volume lindi:biogas pada bioreaktor adalah 70:30. Mikroorganisme yang digunakan berasal dari rumen sapi dan lindi dengan perbandingan 1 : 3 dan disaring untuk diambil ekstraknya. *Seeding* dan aklimatisasi dilakukan, masing-masing selama 10 hari. Kemudian dilanjutkan dengan pengolahan anaerobik selama 21 hari. *Seeding*, aklimatisasi dan pengolahan lindi dilakukan dalam bioreaktor anaerobik pada variasi temperatur *ambient*, temperatur 35°C dan temperatur 45°C, variasi pH: *ambient*, 7.2 dan 8.0 dan variasi laju alir resirkulasi lindi 0 L/menit, 6L/menit dan 24L/menit. Pengambilan data dan analisis parameter dilakukan setiap dua hari sekali. Proses pengolahan lindi dihentikan jika persentase penurunan COD ($COD_{removal}$) telah mencapai 60-80 %.

Pada penelitian ini diperoleh adanya ketergantungan terhadap konsentrasi substrat (COD) terlarut dalam lindi. Perubahan konsentrasi substrat akan mempengaruhi densitas, viskositas, tekanan biogas, BOD, VFA, laju perpindahan massa fase cair; r_{KL} dan laju difusi zat terlarut; r_{DL} . Oleh karena itu, konsentrasi substrat merupakan gaya dorong pada perpindahan massa fase cair. Kinerja bioreaktor anaerobik penelitian ini mampu menurunkan COD pada perlakuan pH, Q, T, dan kombinasi pH, Q, T berturut-turut adalah 81.43%, 81.55%, 81.73% dan 85.31%.

pH, laju alir resirkulasi Q dan temperatur T berpengaruh terhadap perpindahan massa fase cair pada pengolahan anaerobik lindi dalam bioreaktor

anaerobik. Perpindahan massa fase cair pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik sangat bergantung pada konsentrasi massa substrat (COD) terlarut dalam lindi. Koefisien perpindahan massa yang diperoleh pada kombinasi pH-Q-T, pH, T, and Q, berturut-turut adalah 0,07875 cm/s, 0.07733 cm/s, 0.07300 cm/s, dan 0.07057 cm/s. Sedangkan koefisien difusi zat terlarut D_L , yang diperoleh pada pH, T, Q, dan kombinasi pH-Q-T, berturut-turut adalah $2.333 \cdot 10^{-06} \text{ cm}^2/\text{s}$, $2.05 \cdot 10^{-06} \text{ cm}^2/\text{s}$, $2.029 \cdot 10^{-06} \text{ cm}^2/\text{s}$ dan $1.525 \cdot 10^{-06} \text{ cm}^2/\text{s}$.

pH, laju alir resirkulasi Q dan temperatur T berpengaruh terhadap perpindahan massa fase cair pada pengolahan anaerobik lindi. pH, Q dan T mempengaruhi konsentrasi substrat organik terlarut yang selanjutnya berpengaruh terhadap perpindahan massa fase cair lindi. Laju perpindahan massa rata-rata, r_{kL} merupakan jumlah substrat organik terlarut yang terbiodegradasi setiap hari. r_{kL} rata-rata per hari meningkat dengan menurunnya COD. Hanya saja diatas hari ke-31, penurunan COD rata-rata mencapai > 64.5%, konsentrasi substrat telah banyak berkurang. Laju difusi zat terlarut rata-rata, r_{DL} menurun dengan semakin meningkatnya tekanan. Tetapi pada “batas” tekanan tertentu r_{DL} meningkat, sehingga dapat dikatakan bahwa ada batas optimal tekanan.

Konsentrasi substrat (COD) merupakan gaya dorong pada perpindahan massa. Oleh karena itu, konsentrasi substrat (COD) akan mempengaruhi densitas, viskositas, tekanan biogas, BOD, VFA, laju perpindahan massa fase cair; r_{kL} dan laju difusi zat terlarut; r_{DL} .

Korelasi empirik bilangan tak-berdimensi ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh N_{Re} dan N_{Sc} terhadap k_L lindi dalam bentuk N_{Sh} . Korelasi empiris pengolahan lindi merupakan persamaan yang menunjukkan pengaruh variabel-variabel terhadap perpindahan massa zat terlarut yang terjadi dalam bioreaktor anaerobik. Korelasi empirik untuk pengaruh pH, laju alir resirkulasi Q, dan temperatur T, yang berlaku pada rentang pH 6.2-8.0, temperatur 27-45°C dan laju alir resirkulasi lindi, Q 0-24 L/mnt, serta konsentrasi substrat COD antara 6155,9 mg/L – 7445,11 mg/L dan BOD 3248,5 mg/L – 4104,18 mg/L, sebagai berikut:

$$\left(\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \right) = 0.536833 \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{-0.30} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right)^{0.901}$$

Kata kunci: perpindahan massa, lindi, viskositas, densitas, bioreaktor anaerobik.

LIQUID PHASE MASS TRANSFER AT LEACHATE TREATMENT OF MUNICIPAL WASTE LANDFILL IN ANAEROBIC BIOREACTOR

Name : Abdul Kahar
NRP : 3313301001
Promotor : Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
Co-Promotor : IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Leachate is liquid waste resulted from physical, biological, and chemical decomposition of waste landfill. Leachate is the heterogeneous liquid waste containing dissolved complex organic and inorganic substrate that is biodegradable and non-biodegradable. Anaerobic treatment, in principle, utilizes anaerobic bacteria to degrade the dissolved organic materials. Mass transfer is an important phenomenon in bioprocess engineering, which cannot be solved completely by theoretical or mathematical methods. This study is to analyze the mass transfer of liquid phase and determine the empirical correlation of mass transfer coefficient of liquid phase in leachate treatment in anaerobic bioreactor.

This study was a pilot-scale experiment using batch systems. The mass transfer of liquid phase was analyzed using substrate concentrations expressed as COD. Diffusion of the solute was expressed as VFA. This study used anaerobic bioreactors with a total volume of 160L. After it was performed characterization and analysis of leachate quality, the next was designing anaerobic bioreactor with the design appropriate to the research needs. Then, it was performed leak test and calibration of anaerobic bioreactor system. Seeding and acclimatization was performed respectively 10 days. Further, it was followed by anaerobic treatment for 21 days. Seeding and acclimatization were conducted in anaerobic bioreactor at ambient temperature with pH variations: ambient, 7.2 and 8.0. The ratio of leachate and biogas volume is 70:30. Microorganisms used were from cow's rumen and leachate with a ratio of 1: 3 then filtered to take the extract. Data collection and parameter analysis were performed once every other day. Leachate treatment process was terminated if the percentage of COD (COD_{removal}) reduction reached 60-80%.

In this study, it is obtained dependence on substrate (COD) concentration dissolved in leachate. Changes in substrate concentration will affect the density, viscosity, biogas pressure, BOD, VFA, liquid phase mass transfer rate; r_{kL} and rate of diffusion of solutes; r_{DL} . Therefore, the substrate concentration is a thrust force in the mass transfer of liquid phase. In this study, anaerobic bioreactor performance is able to decrease the COD at the treatments of pH, Q, T, and the combination of pH, Q, T respectively 81.43%, 81.55%, 81.73% and 85.31%.

pH, flow rate of recirculation Q and temperature T affect the mass transfer of liquid phase in anaerobic treatment of leachate. pH, Q and T affect the substrate concentration of dissolved organic substrate which then affects the liquid phase mass transfer of leachate. The mass transfer coefficient obtained in the

combination of pH-Q-T, T, Q, and pH was 0,07875 cm/s, 0,07733 cm/s, 0,07300 cm/s, dan 0,07057 cm/s, respectively. The diffusion of solutes coefficient obtained in pH, T, Q, and combination pH-Q-T was $2.333.10^{-06}$ cm²/s, $2.05.10^{-06}$ cm²/s, $2.029.10^{-06}$ cm²/s dan $1.525.10^{-06}$ cm²/s, respectively.

pH, flow rate of recirculation Q and temperature T affect the mass transfer of liquid phase in anaerobic treatment of leachate. pH, Q and T affect the substrate concentration of dissolved organic substrate which then affects the liquid phase mass transfer of leachate. The average rate of mass transfer, r_{kL} is the amount of biodegradable dissolved organic substrates each day. The average r_{kL} per day increases along with decreasing COD. However, over the 31st day, the average COD reduction reaches > 64.5%, the substrate concentration has been greatly reduced. The diffusion rate of average solutes, r_{DL} decreases along with the increasing pressure. However, at certain pressure "limit," r_{DL} increases, so that it can be said that there is an optimum limit pressure.

Substrate concentration (COD) is driving force on mass transfer. Thus, the substrate concentration (COD) will affect the density, viscosity, biogas pressure, BOD, VFA, the mass transfer of liquid phase rate; r_{kL} and the rate of diffusion of solutes; r_{DL} .

This dimensionless number empirical correlation is aimed at studying the effects of N_{Re} and N_{Sc} on leachate k_L in the form of N_{Sh} . Empirical correlation of leachate treatment is an equation which shows the effects of variables on the mass transfer of solute occurring in anaerobic bioreactor. Empirical correlation for the combination effects of pH, flow rate of recirculation Q and temperature T, which is applicable to the pH range of 6.2-8.0, the temperature of 27-45°C and the leachate recirculation rate, Q 0-24 L/mnt, and the COD substrate concentration between 6155.9 mg/L - 7445,11 mg/L and BOD 3248,5 mg/L - 4104,18 mg/L, is as follows:

$$\left(\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \right) = 0.536833 \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{-0.30} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right)^{0.901}$$

Keywords: mass transfer, leachate, viscosity, density, anaerobic bioreactor.

DAFTAR ISI

	Hal.
Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Kata Pengantar	vii
Abstrak	ix
Abstract	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xxiii
Daftar Singkatan Dan Istilah	xxvii
Daftar Lampiran	xxix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.3.1. Tujuan Penelitian	3
1.3.2. Manfaat Penelitian	4
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1. Lindi	5
2.2. Karakteristik Dan Komposisi Lindi TPA Sampah Kota	6
2.3. Pengolahan Anaerobik	7
2.3.1. Reaksi Biokimia pada Pengolahan Anaerobik	9
1. Hidrolisis	11
2. Asidogenesis	12
3. Asetogenesis	13
4. Metanogenesis	14
2.3.2. Faktor-Faktor Mempengaruhi Proses Anaerobik	16
1. Temperatur	16
2. pH	17
3. Organic Loading Rate (OLR)	17
4. Konsentrasi Substrat	18
5. Long-Chain Fatty Acids (LCFA)	19
6. Volatile Fatty Acids (VFA)	21
7. Ketersediaan Unsur Hara Bakteri	22
8. Penghambat Nitrogen dan Ratio Carbon Nitrogen	22
9. Zat Beracun	23
10. Hidrogen	24
11. Hydraulic Retention Time	25
2.3.3. Bioreaktor Anaerobik	26
2.3.4. Biomassa Rumen Sapi sebagai Inokulum	28
2.4. Biodegradasi Substrat pada Sistem Multikomponen	32
2.4.1. Perpindahan Massa	33

2.4.2. Koefisien Perpindahan Massa	35
2.4.3. Difusivitas Zat Terlarut	36
2.4.4. Faktor Yang Mempengaruhi Perpindahan Massa	37
1. Temperatur	37
2. pH	38
3. Laju Alir Resirkulasi	38
2.5. Teknik dan Analisis Pengolahan Data	40
2.6. Korelasi Empirik dalam bentuk Analisis Bilangan Tak-Berdimensi	41
2.7. Kebaharuan Penelitian	43
2.8. Desain Faktorial Tiga Level (3^k)	49
BAB 3 METODE PENELITIAN	51
3.1. Jenis dan Rancangan Penelitian	51
3.2. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional	52
3.3. Waktu dan Tempat Penelitian	53
3.4. Bahan Dan Alat	53
3.5. Prosedur Penelitian	55
3.5.1. Tahap 1: Karakterisasi Lindi dan Desain Bioreaktor	55
1. Karakterisasi dan Analisis Kualitas Lindi	55
2. Perancangan Bioreaktor Anaerobik	55
3. Uji Coba Kebocoran dan Kalibrasi	55
3.5.2. Tahap 2: Persiapan Lindi dan Proses Pengolahan	55
1. Persiapan Lindi	55
2. Persiapan Peralatan	56
3. Penentuan pH dan Waktu Optimum Seeding Dan Aklimatisasi	56
4. Pengolahan Lindi Dalam Bioreaktor Anaerobik	57
5. Analisis Hasil Pengolahan Lindi	58
6. Analisis Data	59
3.5.3. Tahap 3: Penentuan Koefisien Perpindahan Massa Pengolahan Lindi Pada Bioreaktor Anaerobik	60
3.6. Korelasi Empirik Bilangan Tak-berdimensi	60
3.7. Kerangka Penelitian	62
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1. Tahap Pra-Pengolahan Lindi	63
4.1.1. Karakteristik Lindi TPA Sambutan	63
4.1.2. Penentuan pH dan Waktu Optimum Seeding Dan Aklimatisasi	63
4.1.3. Saponifikasi dan <i>Foaming</i>	70
4.2. Tahap Pengolahan Lindi	75
4.2.1. Pengaruh pH, Temperatur dan Laju Alir Resirkulasi	76
4.2.1.1. Pengaruh pH	76
4.2.1.2. Pengaruh Laju Alir Resirkulasi	89
4.2.1.3. Pengaruh Temperatur	101
4.2.1.4. Pengaruh Kombinasi pH, Temperatur dan Laju Alir Resirkulasi	114
4.3. Hubungan COD, Densitas dan Viskositas	128
4.4. Hubungan COD, BOD dan VFA	133

4.5. Pembahasan	139
4.5.1. Laju Perpindahan Massa, Laju Difusi Zat Terlarut dan Bilangan Tak-Berdimensi	140
4.5.2. Koefisien Perpindahan Massa Fase Cair dan Koefisien Difusi Zat Terlarut	177
4.6. Analisis Dimensional Bilangan Tak-berdimensi	181
4.7. Korelasi Empirik Koefisien Perpindahan Massa	198
4.8. State Of The Art: Aplikasi Korelasi Empirik	201
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	203
5.1. Kesimpulan	203
5.2. Saran	205
DAFTAR PUSTAKA	207
LAMPIRAN	227

DAFTAR GAMBAR

	Hal.
Gambar 2.1. Mekanisme terbentuknya lindi	5
Gambar 2.2. Tahapan konversi bahan organik dalam bioreaktor anaerob	10
Gambar 2.3. Bagan model (alur material, inhibisi). Monomer organik (S_1) dan propionat asidogen turunannya (S_2) dan asidogen turunannya (X_2), butirrat(S_3) dan asidogen turunannya (X_3), asam asetat (S_4) dan metanogen asetoklastik (X_4), hidrogen (S_5) dan metanogen hidrogenotropik (X_5). Karbondioksida (S_6) dan Metana (S_7). Penjelasan Sampel: monomer organik (S_1) diurai oleh kelompok asetogen (X_1) kedalam S_4 , S_2 , S_3 , S_5 dan S_6 . Reaksi ini diinhibisi oleh hidrogen, S_5 .	24
Gambar 2.4. Pembagian zona dalam bioreaktor anaerobik	27
Gambar 2.5. Keseimbangan Massa Substrat pada Sistem Multikomponen	33
Gambar 2.6. Perpindahan massa dari fase padat ke fase cair ke fase gas	34
Gambar 2.7. Diagram Moody	39
Gambar 2.8. Posisi penelitian ini pada peta penelitian perpindahan massa dalam bioreaktor anaerobik	44
Gambar 3.1. Tampak Geometrik Desain 3^3 dengan Faktor T, pH dan v	51
Gambar 3.2. Rangkaian bioreaktor seeding dan aklimatisasi	55
Gambar 3.3. Rangkaian bioreaktor anaerobik yang digunakan	55
Gambar 3.4. Kerangka penelitian perpindahan massa fase cair pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik	62
Gambar 4.1. pH pada penentuan pH dan waktu optimum	68
Gambar 4.2. Tekanan biogas pada penentuan pH dan waktu optimum	69
Gambar 4.3. Penurunan COD (a) dan BOD (b) pada Aklimatisasi	70
Gambar 4.4. <i>Foaming</i> pada: a. awal <i>seeding</i> ; b. temperatur <i>ambient</i> , c. temperatur 35°C, dan d. temperatur 45°C.	71
Gambar 4.5. <i>Foaming</i> pada bioreaktor anaerobik.	72
Gambar 4.6. Siklus penurunan efisiensi proses akibat akumulasi VFA dan LCFA	73
Gambar 4.7. Kondisi pH pada variasi pengaruh pH	81
Gambar 4.8. Tekanan biogas pada pengaruh pH	83
Gambar 4.9. COD pada variasi pengaruhn pH	85
Gambar 4.10. BOD pada variasi pengaruhn pH	85
Gambar 4.11. Penurunan densitas pada pengaruh pH.	86
Gambar 4.12. Penurunan viskositas pada pengaruh pH.	87
Gambar 4.13. Konsentrasi VFA pada pengaruh pH	88
Gambar 4.14. Kondisi pH pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	95
Gambar 4.15. Tekanan biogas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	96
Gambar 4.16. COD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	96
Gambar 4.17. BOD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	97
Gambar 4.18. Penurunan densitas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	97
Gambar 4.19. Penurunan viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	98

Gambar 4.20. Konsentrasi VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	99
Gambar 4.21. pH pada pengaruh temperatur T	108
Gambar 4.22. Tekanan biogas pada pengaruh temperatur T	109
Gambar 4.23. Penurunan COD pada pengaruh temperatur T	110
Gambar 4.24. Penurunan BOD pada pengaruh variasi temperatur	110
Gambar 4.25. Penurunan densitas pada pengaruh variasi temperatur	111
Gambar 4.26. Penurunan viskositas pada pengaruh variasi temperatur	111
Gambar 4.27. Konsentrasi VFA pada pengaruh variasi temperatur T	112
Gambar 4.28. pH pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	121
Gambar 4.29. Tekanan biogas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	122
Gambar 4.30. Tekanan biogas pada keseluruhan pengaruh pH, Q, T dan kombinasi pH-Q-T	123
Gambar 4.31. COD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	124
Gambar 4.32. BOD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	125
Gambar.4.33.Densitas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	126
Gambar.4.34.Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	126
Gambar.4.35. Konsentrasi VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	127
Gambar 4.36. COD vs Densitas pada pengaruh pH	130
Gambar 4.37. COD vs Densitas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	130
Gambar 4.38. COD vs Densitas pada pengaruh temperatur T	131
Gambar 4.39. COD vs Densitas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	131
Gambar 4.40. COD vs viskositas pada pengaruh pH	132
Gambar 4.41. COD vs viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	132
Gambar 4.42. COD vs viskositas pada pengaruh temperatur T	133
Gambar 4.43. COD vs viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	133
Gambar 4.44. COD vs VFA pada pengaruh pH	134
Gambar 4.45. COD vs VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	135
Gambar 4.46. COD vs VFA pada pengaruh temperatur T	135
Gambar 4.47. COD vs VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	136
Gambar 4.48. BOD vs VFA pada pengaruh pH	136
Gambar 4.49. BOD vs VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	137
Gambar 4.50. BOD vs VFA pada pengaruh temperatur T	137
Gambar 4.51. BOD vs VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	138
Gambar 4.52. Laju perpindahan massa pada pengaruh pH	143
Gambar 4.53. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh pH	144
Gambar 4.54. Bilangan <i>Reynolds</i> pada pengaruh pH	144
Gambar 4.55. Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh pH	145
Gambar 4.56. Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh pH	145
Gambar 4.57. Laju perpindahan massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	148
Gambar 4.58. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	149
Gambar 4.59. Bilangan <i>Reynolds</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	149
Gambar 4.60. Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	150
Gambar 4.61. Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	150
Gambar 4.62. Laju perpindahan massa, r_{kL} pada pengaruh temperatur T	154
Gambar 4.63. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh temperatur T	155

Gambar 4.64. Bilangan <i>Reynolds</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	155
Gambar 4.65. Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	156
Gambar 4.66. Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	156
Gambar 4.67. Laju perpindahan massa, r_{kL} pada pengaruh Kombinasi pH-Q-T	160
Gambar 4.68. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	160
Gambar 4.69. Bilangan <i>Reynolds</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	161
Gambar 4.70. Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	161
Gambar 4.71. Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	162
Gambar 4.72. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh pH	164
Gambar 4.73. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	164
Gambar 4.74. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh temperatur T	165
Gambar 4.75. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	165
Gambar 4.76. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh pH	167
Gambar 4.77. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	168
Gambar 4.78. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh temperatur T	168
Gambar 4.79. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	169
Gambar 4.80. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh pH	170
Gambar 4.81. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	170
Gambar 4.82. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh temperatur T	171
Gambar 4.83. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	171
Gambar 4.84. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pengaruh pH	172
Gambar 4.85. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	172
Gambar 4.86. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pengaruh temperatur T	173
Gambar 4.87. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	173
Gambar 4.88. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh pH	174
Gambar 4.89. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	175
Gambar 4.90. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh temperatur T	175
Gambar 4.91. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	176
Gambar 4.92. Laju Difusi Zat Terlarut, D_L vs Laju Perpindahan Massa k_L	

	pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik	179
Gambar 4.93.	Hubungan Bilangan <i>Reynolds</i> N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh pH	182
Gambar 4.94.	Hubungan Bilangan <i>Reynolds</i> N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	182
Gambar 4.95.	Hubungan Bilangan <i>Reynolds</i> N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh temperatur T	183
Gambar 4.96.	Hubungan Bilangan <i>Reynolds</i> N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	183
Gambar. 4.97.	Bilangan <i>Schmidt</i> vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh pH	185
Gambar. 4.98.	Bilangan <i>Schmidt</i> vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	185
Gambar. 4.99.	Bilangan <i>Schmidt</i> vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh temperatur T	186
Gambar. 4.100.	Bilangan <i>Schmidt</i> vs laju difusi zat terlarut pada kombinasi pH-Q-T	186
Gambar 4.101.	Bilangan <i>Sherwood</i> dan Laju perpindahan massa pada pengaruh pH	187
Gambar 4.102.	Bilangan <i>Sherwood</i> dan Laju perpindahan massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	188
Gambar 4.103.	Bilangan <i>Sherwood</i> dan Laju perpindahan massa pada pengaruh temperatur T	188
Gambar 4.104.	Bilangan <i>Sherwood</i> dan Laju perpindahan massa pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	189
Gambar 4.105.	Bilangan <i>Sherwood</i> vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh pH	189
Gambar 4.106.	Bilangan <i>Sherwood</i> vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh laju lair resirkulasi Q	190
Gambar 4.107.	Bilangan <i>Sherwood</i> vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh temperatur T	190
Gambar 4.108.	Bilangan <i>Sherwood</i> vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	191
Gambar 4.109.	Bilangan <i>Reynolds</i> dan Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh pH	192
Gambar 4.110.	Bilangan <i>Reynolds</i> dan Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	192
Gambar 4.111.	Bilangan <i>Reynolds</i> dan Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh temperatur T	193
Gambar 4.112.	Bilangan <i>Reynolds</i> dan Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	193
Gambar 4.113.	Bilangan <i>Reynolds</i> vs Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh pH	194
Gambar 4.114.	Bilangan <i>Reynolds</i> vs Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	194
Gambar 4.115.	Bilangan <i>Reynolds</i> vs Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh temperatur T	195

Gambar 4.116. Bilangan <i>Reynolds</i> vs Bilangan <i>Sherwood</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	196
Gambar 4.117. Bilangan <i>Sherwood</i> vs Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh pH	197
Gambar 4.118. Bilangan <i>Sherwood</i> vs Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh laju alir resirkulasi Q	197
Gambar 4.119. Bilangan <i>Sherwood</i> vs Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh temperatur T	198
Gambar 4.120. Bilangan <i>Sherwood</i> vs Bilangan <i>Schmidt</i> pada pengaruh kombinasi pH-Q-T	198

DAFTAR TABEL

	Hal.
Tabel 2.1. Kualitas Lindi pada <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> TPA Bukit Pinang Samarinda	6
Tabel 2.2. Karakteristik lindi berdasarkan perbedaan umur timbunan	7
Tabel 2.3. Perbedaan system pengolahan aerobic dan anaerobic	8
Table 2.4. Kondisi Optimum dan Tertinggi Bioreaktor Anaerobik	27
Tabel 2.5. Tahap dan kondisi optimum dalam biorekator anaerobik	30
Tabel 2.6. Perbandingan Tipe Bioreaktor Anaerobik	31
Tabel 2.7. Penelitian perpindahan massa yang telah dilakukan	45
Tabel 2.8. Beberapa Penelitian Terkait Yang Telah Dilakukan	45
Tabel 3.1. Desain Eksperimen Perpindahan Massa dengan Interaksi Tiga-Faktor	52
Tabel 4.1. Karakteristik Lindi TPA Sambutan, Samarinda	64
Tabel 4.2. pH dan Waktu optimum <i>seeding</i> -aklimatisasi pada temperatur Ambient	66
Tabel 4.3. pH dan Waktu optimum <i>seeding</i> -aklimatisasi pada temperatur 35 °C	66
Tabel 4.4. pH dan Waktu optimum <i>seeding</i> -aklimatisasi pada temperatur 45 °C	67
Tabel 4.5. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur dan pH <i>Ambient</i> ; Tanpa Resirkulasi	76
Tabel 4.6. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada pH 7.2	77
Tabel 4.7. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada pH 8.0	77
Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH <i>Ambient</i> ; Tanpa Resirkulasi lindi	78
Tabel 4.9. Pengolahan Anaerobik pada pH 7.2	79
Tabel 4.10. Pengolahan Anaerobik pada pH 8.0	80
Tabel 4.11. Uji Anova pengaruh pH terhadap densitas	88
Tabel 4.12. Uji Anova pengaruh pH terhadap viskositas	88
Tabel 4.13. Uji Anova pengaruh pH terhadap BOD	89
Tabel 4.14. Uji Anova pengaruh pH terhadap COD	89
Tabel 4.15. Uji Anova pengaruh pH terhadap VFA (Asam asetat)	89
Tabel 4.16. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt	90
Tabel 4.17. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt	91
Tabel 4.18. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0	91
Tabel 4.19. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt	92
Tabel 4.20. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt	93
Tabel 4.21. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0	94
Tabel 4.22. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap densitas	99
Tabel 4.23. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap viskositas	99
Tabel 4.24. Uji Anova pengaruh Laju alir resirkulasi terhadap BOD	100

Tabel 4.25. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap COD	100
Tabel 4.26. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap VFA (Asam asetat)	100
Tabel 4.27. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 35°C	101
Tabel 4.28. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 45°C	102
Tabel 4.29. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 35°C dan pH 7.2	102
Tabel 4.30. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 45°C dan pH 8.0	103
Tabel 4.31. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C	104
Tabel 4.32. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C	105
Tabel 4.33. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C dan pH 7.2	106
Tabel 4.34. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C dan pH 8.0	107
Tabel 4.35. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap densitas	112
Tabel 4.36. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap viskositas	113
Tabel 4.37. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap BOD	113
Tabel 4.38. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap COD	113
Tabel 4.39. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap VFA (Asam asetat)	113
Tabel 4.40. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	114
Tabel 4.41. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	115
Tabel 4.42. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH <i>Ambient</i>	116
Tabel 4.43. <i>Seeding</i> dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0	116
Tabel 4.44. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	117
Tabel 4.45. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	118
Tabel 4.46. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH <i>Ambient</i>	119
Tabel 4.47. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0	120
Tabel 4.48. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap densitas	127
Tabel 4.49. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap viskositas	127
Tabel 4.50. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap BOD	128
Tabel 4.51 Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap COD	128
Tabel 4.52. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap VFA (Asam asetat)	128
Tabel 4.53. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada T dan pH <i>ambient</i> ; Tanpa Resirkulasi	141
Tabel 4.54. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada pH 7.2	142
Tabel 4.55. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada pH 8.0	142
Tabel 4.56. Uji Anova pengaruh pH terhadap bilangan <i>Schmidt</i>	145
Tabel 4.57. Uji Anova pengaruh pH terhadap bilangan <i>Sherwood</i>	146
Tabel 4.58. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt	146
Tabel 4.59. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt	147
Tabel 4.60. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH	

8.0	148
Tabel 4.61. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan <i>Reynolds</i>	150
Tabel 4.62. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan <i>Schmidt</i>	151
Tabel 4.63. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan <i>Sherwood</i>	151
Tabel 4.64. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35°C	152
Tabel 4.65. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45°C	152
Tabel 4.66. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35°C dan pH 7.2	153
Tabel 4.67. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45°C dan pH 8.0	154
Tabel 4.68. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap bilangan <i>Schmidt</i>	156
Tabel 4.69. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap bilangan <i>Sherwood</i>	157
Tabel 4.70. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	157
Tabel 4.71. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	158
Tabel 4.72. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45°C; Q 24 L/mt dan pH Ambient	159
Tabel 4.73. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0	159
Tabel 4.74. Uji Anova pengaruh kombinasi pH Q T terhadap bilangan <i>Reynolds</i>	162
Tabel 4.75. Uji Anova pengaruh kombinasi pH Q T terhadap bilangan <i>Schmidt</i>	162
Tabel 4.76. Uji Anova pengaruh kombinasi pH Q T terhadap bilangan <i>Sherwood</i>	163
Tabel 4.77. Koefisien perpindahan massa fase cair, k_L , dan Koefisien Difusi zat terlarut; D_L	178
Tabel 4.78. Perbandingan antara Penelitian Tentang Perpindahan Massa	180
Tabel 4.79. N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} pada pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T	200
Tabel 4.80. Korelasi empirik koefisien perpindahan massa berdasarkan analisis dimensional	201

DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

ABR	=	<i>Anaerobic Baffled Reactor</i>
ACD	=	<i>Anaerobic Contact Digester</i>
AF	=	<i>Anaerobic Filters (Fixed Film Bioreactor)</i>
AFBR	=	<i>Anaerobic Fluidized Bed Reactor</i>
AGD	=	<i>Attached Growth Digester</i>
AHR	=	<i>Anaerobic Hybrid Reactor</i>
ASBR	=	<i>Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>
BOD	=	<i>Biological Oxygen Demand, mg/L</i>
CAL	=	<i>Covered Anaerobic Lagoon</i>
CMAD	=	<i>Completely Mixed AD</i>
COD	=	<i>Chemical Oxygen Demand, mg/L</i>
CSTR	=	<i>Continuous-Stirred Tank Reactor</i>
d_i	=	Diameter dalam bioreaktor, cm atau m
D_L	=	Difusi fase cair zat terlarut dan pelarut, cm^2/s
HAIB	=	<i>Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Biomass</i>
HRT	=	<i>Hydraulic Retention Time, jam (h) atau hari (d)</i>
K_h	=	Tingkat koefisien hidrolisis, s^{-1}
k_L	=	Koefisien perpindahan massa fase cair; cm/s
LCFA	=	<i>Long-Chain Fatty Acids</i>
MABR	=	<i>Modified Anaerobic Baffled Reactor</i>
MAS	=	<i>Membrane Anaerobic System</i>
M_B	=	Berat molekul pelarut air, 18 g/gmol
MPFD	=	<i>Mixed Plug Flow Digester</i>
N_L	=	Fluks perpindahan massa fase liquid, $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$
N_{Re}	=	Bilangan <i>Reynolds</i>
N_{Sc}	=	Bilangan <i>Schmidt</i>
N_{Sh}	=	Bilangan <i>Sherwood</i>
OLR	=	<i>Organic Loading Rate, Laju pembebanan organik, kg COD/m³.d</i>
P	=	Tekanan, mm H ₂ O
PFD	=	<i>Plug Flow Digester</i>

pH	= Derajat keasaman
pH-Q-T	= pH-Laju alir resirkulasi lindi-Temperatur
POME	= <i>Palm Oil Mill Effluent</i>
Q	= Laju alir volumetrik limbah per 24 jam, m ³ /d,
r	= Fungsi konsentrasi substrat persatuan waktu
RPH	= Rumah Pemotongan Hewan
S	= Konsentrasi substrat yang dapat dihidrolisis, massa/volume
[S] ₀	= Konsentrasi substrat (COD) pada t = 0, mg/L
[S] _t	= Konsentrasi substrat (COD) pada t = t, mg/L
SASBR	= <i>Stirred Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>
S _b	= Konsentrasi substrat pada bulk liquid, mg COD/L
S _h	= Konsentrasi dari substrat yang terhidrolisis, mg/L
S _i	= Konsentrasi substrat pada <i>solid-liquid interface</i> , mg COD/L
S _o	= Konsentrasi substrat (<i>chemical oxygen demand</i>), mg/L
T	= Temperatur, °C atau K
TPA	= Tempat Pemrosesan Akhir
UAF	= <i>Upflow Anaerobic Filter</i>
UAF-B	= <i>Upflow Anaerobic Fixed-Bed</i>
UASB	= <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UASFF	= <i>Up-Flow Anaerobic Sludge Fixed Film</i>
V	= Volume bioreaktor, L atau m ³
V _A	= Volume molar zat terlarut pada titik didih normal, cm ³ /gmol
VFA	= <i>Volatile Fatty Acids</i> , mg/L
v _R	= <i>Superficial velocity</i> lindi, cm/s atau m/s
μ	= Viskositas, g/cm.s
Ψ _B	= Parameter asosiasi pelarut, air = 2,6
ρ	= Densitas, g/cm ³

DAFTAR LAMPIRAN

	Hal.
Lampiran A.	227
1. Penentuan T, pH; dan v_R .	227
2. Penentuan Volume Bioreaktor	229
Lampiran B.	233
1. Pembuatan Larutan <i>Buffer</i>	233
2. Analisis COD	234
3. Analisis BOD ₅	237
4. Analisis VFA	239
5. Pengukuran densitas dan viskositas lindi	240
Lampiran C. Contoh Perhitungan	243
1. Perhitungan densitas dan viskositas	243
2. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Fase Cair, k_L	244
3. Perhitungan Koefisien Difusi Fase Cair Zat Terlarut Dan Pelarut, D_L	248
4. Perhitungan viskositas kinematik lindi dan bilangan <i>Reynolds</i> , N_{Re} tanpa resirkulasi	252
5. Perhitungan bilangan <i>Reynolds</i> , N_{Re}	254
6. Perhitungan bilangan <i>Schmidt</i> , N_{Sc}	258
7. Perhitungan bilangan <i>Sherwood</i> , N_{Sh}	260
8. Analisis Bilangan Tak-Berdimensi (<i>Dimensionless Number Analysis</i>)	263
Lampiran D. Dokumentasi Penelitian	267
Lampiran E. Hasil Penelitian	272
1. Karakteristik Lindi TPA Bukit Pinang dan TPA Sambutan, Samarinda	272
2. Penentuan pH dan Waktu <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi Optimum	274
3. <i>Seeding</i>	277
4. Aklimatisasi	281
5. Hasil Penelitian Pengolahan Anaerobik	285
Lampiran F. Analisis Data Statistika	299
Lampiran G. Biografi Penulis	353

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Masalah esensial pada skala keteknikan dalam pengembangan bioreaktor adalah hidrodinamika, fenomena perpindahan massa antar fase, kinetika, dan penurunan panas. Hal ini merupakan hasil evaluasi pengaruh temperatur, pencampuran, konsentrasi substrat yang tinggi dan stabilitas mikroorganisme dalam bioreaktor (Leib *et al.*, 2001). Walaupun bukan merupakan faktor utama pada bioproses, perpindahan massa adalah krusial dalam bioreaktor anaerobik (Leib *et al.*, 2001; Doble, 2006; Benz, 2011). Banyak faktor yang mempengaruhi perpindahan massa pada bioproses, seperti: temperatur, tekanan, konsentrasi, difusivitas, viskositas, densitas, pH, laju alir fluida, geometri bioreaktor, tegangan permukaan (Monit, 2009).

Perpindahan massa (fase tunggal ataupun multi fase) merupakan suatu fenomena penting dalam teknik dan rekayasa bioproses (Zaiat *et al.*, 2000; Mirwan, 2013; Abdelgadir *et al.*, 2014). Perpindahan massa sangat berperan pada perilaku difusi dan kinetika bioproses. Fenomena perpindahan merupakan proses yang sangat rumit. Perpindahan massa dalam bidang teknik dan rekayasa bioproses, tidak dapat diselesaikan secara lengkap dengan metode teoritis atau metode matematik (Treybal, 1984; McCabe *et al.*, 1990; Williams, 2002; Dunn *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2013; Abdelgadir *et al.*, 2014). Persamaan-persamaan fundamental untuk proses perpindahan di dalam bioreaktor jarang sekali diperoleh. Untuk itu metode empirik, analisis dimensional dan analogi semiteoritis dijadikan patokan untuk mendapatkan persamaan yang dapat digunakan (McCabe *et al.*, 1990; Welty *et al.*, 2007; Russell *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2013).

Lindi TPA sampah kota merupakan limbah cair yang mengandung bahan-bahan organik dan anorganik heterogen. Pengolahan lindi lebih kompleks dibandingkan dengan pengolahan limbah cair yang homogen. Pada limbah cair yang homogen, reaksi biologis terjadi dalam fase tunggal, maka pada lindi reaksi terjadi pada dua atau tiga fase. Proses pengolahan lindi secara anaerobik dapat

dilihat dari kandungan substrat organik yang terbiodegradasi dari satu fase ke fase lain atau dalam fase tunggal.

Perpindahan massa terjadi karena gerakan perpindahan molekul-molekul bahan organik yang disebabkan perbedaan konsentrasi. Perbedaan konsentrasi ini merupakan gaya dorong (*driving force*) dari proses perpindahan massa. Adanya perubahan konsentrasi terjadi akibat reaksi-reaksi biokimia dan metabolisme sel selama berlangsungnya bioproses. Bersamaan dengan hal ini terjadi pertumbuhan mikroorganisme, juga menyebabkan perubahan densitas, viskositas dan sifat fisik lindi dalam bioreaktor. Untuk itu perubahan densitas dan viskositas lindi merupakan suatu hal yang penting diperhatikan selama berlangsungnya bioproses dalam bioreaktor.

Sifat dan karakteristik lindi bergantung langsung pada sifat dan keadaan alami bahan-bahan yang membentuknya. Komponen-komponen bahan (organik dan anorganik) yang terlarut akan mempengaruhi sifat dan karakteristik lindi yang terbentuk. Makin banyak substrat (organik dan anorganik) terlarut, maka makin kompleks pula sifat dan karakteristik lindi tersebut. Oleh karena itu, penting juga mengetahui pengaruh massa substrat yang terlarut karena akan mempengaruhi sifat-sifat fisik, kimia dan biologis lindi. Yang pada akhirnya, sifat dan karakteristik lindi akan mempengaruhi proses pengolahan, kualitas hasil olahan dan kinerja bioreaktor yang digunakan.

Penelitian perpindahan massa pengolahan limbah cair telah banyak dilakukan, tetapi sebagian besar menggunakan *synthetic wastewater* dan pada skala laboratorium (Zaiat *et al.*, 2000; Cho and Young, 2001; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005; Cubas *et al.*, 2007). Sedangkan penelitian ini menggunakan lindi TPA sampah kota dan skala pilot. Parameter yang dianalisis adalah parameter kimia dan biologis saja, seperti; pH, COD, BOD, amoniak, nitrat, nitrit dan mikroorganisme yang terlibat dan berperan didalamnya. Dan tidak ada studi yang menganalisis parameter fisik seperti; densitas dan viskositas dari limbah cair yang diolah. Sementara dalam banyak persoalan, data densitas dan viskositas merupakan informasi penting, seperti perpindahan massa.

Mekanisme bioproses dan kinerja bioreaktor anaerobik dalam pengolahan lindi ditentukan oleh reaksi biokimiawi dan fenomena perpindahan massa yang

terjadi. Analisis kedua hal tersebut dilakukan secara terpadu dalam suatu sistem bioreaktor. Sebagian besar perpindahan massa dalam bioproses yang terjadi pada fase cair relatif lamban. Pemahaman tentang fenomena perpindahan massa adalah essensial untuk memberikan alternatif pemecahan pada pengolahan lindi yang mengandung bahan organik heterogen.

1.2. Perumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah temperatur, pH dan laju alir resirkulasi berpengaruh terhadap densitas, viskositas, BOD, COD, dan VFA pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.
2. Bagaimana perpindahan massa yang terjadi pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.
3. Bagaimana korelasi empirik antara koefisien perpindahan massa terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1. Tujuan Penelitian

Adapun yang menjadi tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan berapa besar pengaruh temperatur, pH dan laju alir resirkulasi terhadap BOD, COD, VFA, densitas dan viskositas pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.
2. Menentukan koefisien perpindahan massa pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.
3. Menentukan korelasi empirik koefisien perpindahan massa terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik.

1.3.2. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini merupakan data empirik yang sangat penting dan diperlukan pada pra-rancangan dan perencanaan alat proses, analisis awal untuk peningkatan produksi dan faktor-faktor yang mempengaruhi dalam skala keteknikan (*technical scale*). Dimana data koefisien perpindahan massa sangat dibutuhkan dalam pekerjaan-pekerjaan pemisahan, seperti distilasi, absorpsi dan ekstraksi. Sedangkan data densitas dan viskositas juga merupakan informasi yang penting pada pekerjaan seperti laju alir fluida, perpipaan dan lain-lain.

Manfaat dari penelitian ini juga adalah biogas yang dihasilkan dari pengolahan air lindi dapat dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar TPA Sambutan sebagai energi alternatif.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Dengan alasan luas cakupan dan kompleks penelitian ini maka diperlukan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini merupakan skala pilot dengan sistem *batch*, dimana bioreaktor anaerobik yang digunakan memiliki volume ± 160 L.
2. Pengaruh temperatur yang diamati dalam penelitian ini adalah temperatur *ambient*, *mesophilic* pada temperatur 35°C sedangkan *thermophilic* pada temperatur 45°C.
3. Analisis koefisien perpindahan massa fase cair, k_L menggunakan data konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD.
4. Resirkulasi air lindi hanya dilakukan selama $\pm 6-8$ jam dalam sehari.
5. Pengaruh berkurangnya volume lindi dalam bioreaktor diabaikan karena sampling yang dilakukan setiap dua hari sekali.
6. Lindi TPA Sampah kota yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Sambutan, yang baru beroperasi pada Mei 2015 dengan kisaran konsentrasi COD ± 2000 mg/L.
7. Setiap kali *running* bioreaktor anaerobik menggunakan lindi baru yang diambil dari TPA, sehingga konsentrasi awal parameter tidak sama.

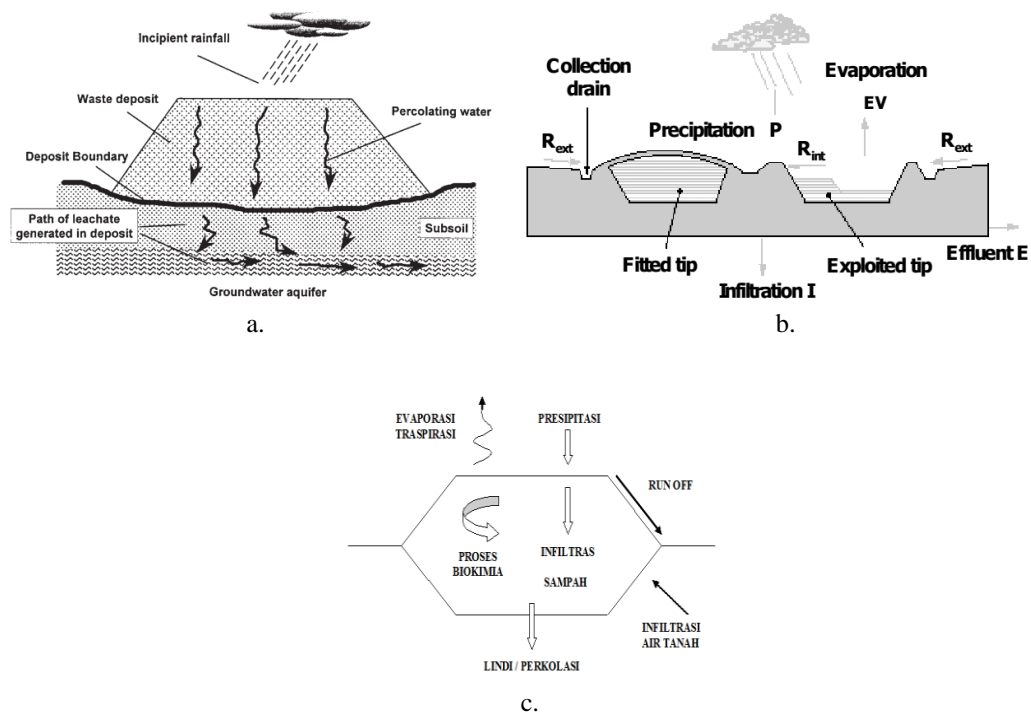
BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Lindi

Lindi (*leachate*) TPA sampah kota adalah limbah cair yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah. Kemudian melarutkan dan membilas materi-materi organik dan anorganik kompleks terlarut maupun tersuspensi dalam sampah. Proses dekomposisi sampah ini terjadi secara fisis, biologis, dan kimia (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Kumar *et al.*, 2013). Oleh karena itu, lindi TPA sampah kota merupakan campuran kompleks yang terdiri dari bahan-bahan organik terlarut dan kontaminan-kontaminan anorganik.

Mekanisme terbentuknya lindi TPA sampah seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 : Mekanisme terbentuknya lindi (sumber a. Petersen and Petrie, 2000; b. Renou *et al.*, 2008; c. Anonym, 2012)

Lindi TPA sampah kota mengandung: VFA, LCFA, senyawa fulvat dan humat, amonia-nitrogen, fosfat, sulfat, logam berat, organik xenobiotik (XOCs);

aromatic hydrocarbons, *phenols* dan *chlorinated aliphatics*, garam-garam anorganik dan mikroorganisme (Christensen *et al.*, 2001; Renou *et al.*, 2008; Zainol *et al.*, 2012; Kawai *et al.*, 2012; Hassan and Xie, 2014); serta *biorefractory contaminants* (Tatsi *et al.*, 2003). Oleh karena itu, dalam lindi TPA sampah kota terkandung substrat organik dan anorganik terlarut kompleks yang *biodegradable* dan *non-biodegradable* (Christensen *et al.*, 2001; Gossett dan Belser, 1982).

2.2. Karakteristik Dan Komposisi Lindi TPA Sampah Kota

Samarinda memiliki 2 TPA, yaitu; TPA Bukit Pinang dan TPA Sambutan. TPA Bukit Pinang Samarinda, telah beroperasi sejak tahun 1990an, berjarak \pm 5 km dari pusat kota, dengan luas 9,5 Ha berupa jurang dengan kedalaman \pm 15 - 30 meter. Instalasi pengolahan lindi TPA Bukit Pinang, Samarinda sudah tidak berfungsi dengan baik. Pengolahannya menggunakan bak penampung yang terdiri lima bak kemudian dialirkan ke sungai (Kahar *et al.*, 2012). Sedangkan TPA Sambutan, mulai beroperasi pada Mei 2015, berjarak \pm 15 km dari pusat kota, dengan luas \pm 30 Ha. TPA Sambutan sudah menggunakan geo-membran. Instalasi pengolahan lindi TPA Sambutan juga tidak berfungsi dengan baik.

Kualitas Lindi pada *inlet* dan *outlet* TPA Bukit Pinang Samarinda, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kualitas Lindi pada *inlet* dan *outlet* TPA Bukit Pinang Samarinda

Parameter	Satuan	Hasil analisa	
	mg/L	Inlet	Outlet
pH		8,29	8,15
Temperatur	°C	32,2	31,8
DO	mg/L	2,73	2,79
TSS	mg/L	491	485
Kekeruhan	FTU	67	67
NH ₃	mg/L	15,52	15,33
Minyak	mg/L	8,14	8,05
BOD	mg/L	1.818	1.807
E. Coli	Jml/100 ml	6.767	6.567

Sumber: Kahar *et al.*, 2012.

Umumnya lindi TPA sampah kota memiliki karakteristik yang khas, yaitu tingginya kandungan bahan organik, *phenol*, amonia-nitrogen, *phosphat*, sulfat, logam berat, asam, garam-garam anorganik, dan mikroorganisme serta zat racun

yang lain (Renou *et al.*, 2008; Zainol *et al.*, 2012). Karakteristik tersebut menyebabkan lindi menjadi sangat berbahaya untuk lingkungan dengan potensial kontaminasi melebihi dari beberapa limbah industri (Zainol *et al.*, 2012; Hassan and Xie, 2014). Konsentrasi bahan organik lindi, seperti terlihat pada Tabel 2.2.

Karakteristik dan kuantitas lindi TPA sampah kota dipengaruhi oleh: karakteristik dan komposisi sampah, jenis tanah penutup *landfill*, musim, pH dan kelembaban; serta umur timbunan (usia *landfill*) (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Zainol *et al.*, 2012; Hassan and Xie, 2014). Variasi komposisi lindi TPA sampah kota tergantung pada beberapa faktor, antara lain: komposisi dan umur *landfill*, desain dan pengoperasian serta kondisi *landfill*, iklim dan kondisi hidrogeologi, kelembaban, temperatur, dan tingkat stabilisasi (Renou *et al.*, 2008).

Tabel 2.2. Karakteristik lindi berdasarkan perbedaan umur timbunan

Parameter	Konsentrasi rata-rata		
	Muda (< 5 tahun)	Sedang (5-10 tahun)	Tua (>10 tahun)
pH	6,5	6,5-7,5	>7,5
BOD ₅ (mg/L)	10.000-20.000	-	50-100
COD (mg/L)	>10.000	4.000-10.000	<4.000
BOD ₅ /COD	>0,3	0,1-0,3	<0,1
VFA (as acetic acid) mg/L	9.000-25.000	-	50-100

Sumber: Renou *et al.*, 2008; Anonym, 2012; Zainol *et al.*, 2012; Hassan and Xie, 2014

Hasil perombakan bahan organik oleh mikroorganisme yang berupa gas (CH₄, CO₂, NH₃, dan H₂S) merupakan sumber penyebab bau, sedangkan bahan anorganik yang terdapat dalam lindi dapat berupa logam-logam terlarut (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

2.3. Pengolahan Anaerobik

Pengolahan anaerobik pada prinsipnya memanfaatkan bakteri anaerobik untuk mendegradasi bahan-bahan organik atau soluble chemical oxygen demand (SCOD) menjadi biogas (Abdelgadir *et al.*, 2014). Proses penguraian anaerobic mendegradasi polimer alami, seperti polisakarida, protein, asam nukleat, dan lipid menjadi metan dan karbondioksida, berlangsung dalam reaksi bertahap dan parallel (Sugiyana, 2008). Efisiensi pengolahan bioreaktor anaerobik sensitif

terhadap komposisi air limbah, temperatur dan pH (Dinopoulou *et al.*, 1988; Merlin *et al.*, 2012).

Perbandingan beberapa aspek pada pengolahan limbah cair menggunakan sistem aerobik dan anaerobik dapat dilihat pada Tabel 2.3. dan perbandingan tipe beberapa bioreaktor anaerobik disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.3. Perbedaan system pengolahan aerobic dan anaerobic

No.	Kriteria	Aerobik	Anaerobik
1.	Kemampuan mereduksi	BOD : 80 – 95% COD : 70 – 90%	BOD : 70 – 80% COD : 60 – 80%
2.	<i>Volumetric Loading</i> (VL)	Dapat menurunkan <i>organic load</i> sampai 90% atau lebih. Waktu tinggal yang lama pada kolam dan <i>constructed wetlands</i> . Sangat aman terhadap fluktuasi <i>inflow</i> dan <i>organic load</i>	Biasanya menurunkan <i>organic load</i> 40 – 70% dan membutuhkan pengolahan lanjutan Agak sensitif terhadap variasi <i>inflow</i> dan <i>loading</i> .
3.	Kualitas Buangan	BOD rendah	BOD tinggi
4.	Produksi <i>Sludge</i>	Besar 30-60% Produksi lumpur 0,2-0,3 kg VSS/kg COD	Kecil 5-10% Produksi lumpur 0,05-0,15 kg VSS/kg COD
5.	Kebutuhan <i>Nutrient</i>	Tinggi terutama limbah industri C:N:P = 100:5:1	Kebutuhan nutrisi dan bahan kimia rendah C:N:P = 250:5:1
6.	Penurunan <i>Nutrient</i>	N turun, P tetap	N dan P tetap
7.	Energi	Membutuhkan Mengonsumsi 20-30 W/kg COD.hari	Menghasilkan energi alternatif (CH ₄) Menghasilkan energi 35 W/kg COD.hari
8.	Biaya aerasi	Mahal	Tidak ada
9.	Bau	Bisa berbau, terutama jika terjadi overload	Kondisi yang tertutup dapat menghindari masalah bau
10.	Kebutuhan Lahan	Membutuhkan lahan yang luas. • 0,06 m ² per orang untuk <i>activated sludge</i> . • Lebih dari 3 m ² per orang untuk kolam <i>facultative</i> dan <i>constructive wetland</i>	Mengurangi pemakaian lahan sehingga biaya investasi lahan lebih rendah.

Sumber: Lettinga *et al.*, 1984; Eckenfelder *et al.*, 1989; Ammary, 2004; Sugiyana, 2008; van Lier *et al.*, 2008; Najafpour and Sadeghpour, 2012.

Bioreaktor anaerobik sangat cocok untuk pengolah limbah yang mengandung karbon organik konsentrasi tinggi seperti limbah pabrik kelapa sawit (Faisal dan Unno, 2001; Abdurahman *et al.*, 2013), air limbah Rumah Pematangan Hewan (Padilla dan Alberto., 2010), pupuk kandang (Lubken *et al.*,

2007), air limbah tekstil (Sugiyana, 2008), sampah kota (Nopharatana *et al.*, 2006), dan limbah makanan (Choi *et al.*, 2003). Proses pengolahan anaerobik cukup efektif untuk lindi dengan rasio BOD : COD tinggi yang dihasilkan pada tahap awal *landfill* (Li *et al.*, 2010).

Pengolahan anaerobik merupakan proses kompleks yang memerlukan kondisi anaerob yang ketat potensial reduksi oksidasi (ORP) <-200 mV. Kondisi ini tergantung pada terkoordinasinya mikroorganisme kompleks untuk mendegradasi substrat organik menjadi CO₂ dan CH₄. Meskipun langkah-langkahnya berurutan, tahap hidrolisis dianggap sebagai laju pembatas (*rate limiting*) (Ghyoot *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1999; Tiehm *et al.*, 2001; Vavilin *et al.*, 2002; Aquino *et al.*, 2008; Appels *et al.*, 2008).

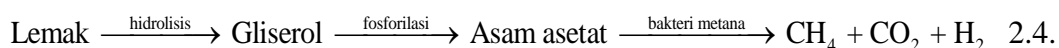
2.3.1. Reaksi Biokimia pada Pengolahan Anaerobik

Pengolahan anaerobik bahan organik merupakan reaksi biokimia kompleks dan spesifik. Biodegradasi bahan organik pada bioreaktor anaerobik melalui tahapan reaksi; hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis yang terjadi secara seri maupun paralel (Faisal dan Unno, 2001; Zinatizadeh *et al.*, 2006; van Lier *et al.*, 2008; Deublein dan Steinhauser, 2008; Appels *et al.*, 2008; Abdelgadir *et al.*, 2014).

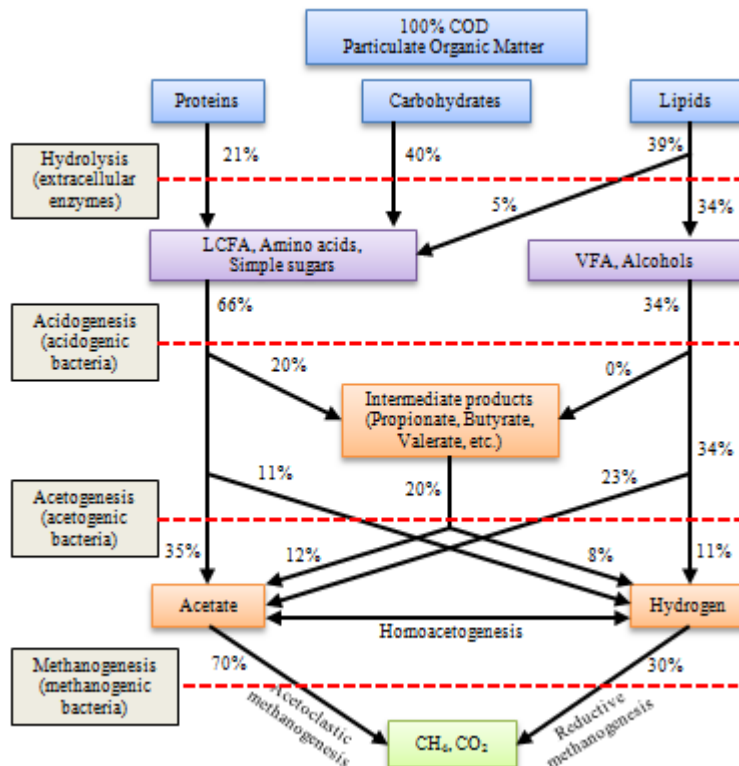
Secara umum, reaksi biokimia pada pengolahan anaerobik adalah sebagai berikut:



Reaksi biodegradasi substrat organik (Price dan Cheremisinoff, 1981; Abdelgadir *et al.*, 2014), sebagai berikut:



Proses biodegradasi bahan organik dan anorganik terlarut yang terjadi dalam bioreaktor anaerobik meliputi empat tahap yaitu: hidrolisis, asidogenesis, aseto-genesis dan metanogenesis. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 dan 2.3.



Gambar 2.2. Tahapan konversi bahan organik dalam bioreaktor anaerob (Modifikasi dari Gujer dan Zehnder, 1983; Stronach, 1986; Pavlosthatis dan Gomez, 1991; Batstone *et al.*, 2002; Gerber dan Roland, 2008; van Lier *et al.*, 2008; Abdelgadir *et al.*, 2014).

Bakteri yang berperan pada keempat tahap tersebut bekerja secara spesifik dan saling ketergantungan (Mosey, 1983; Massé and Droste, 2000; Batstone *et al.*, 2002; Sötemann *et al.*, 2005; Hossain *et al.*, 2009). Dalam bioreaktor anaerobik terdapat dua kelompok besar mikroorganisme yang berperan yaitu bakteri pembentuk asam dan bakteri pembentuk metana. Bakteri pembentuk asam dan pembentuk metana memiliki kemampuan berkembang biak yang sangat berbeda berturut-turut adalah 0.5-3 jam dan 3-30 hari (Padmono, 2007; Suryawanshi *et al.*, 2013). Biodegradasi anaerobik substrat organik adalah proses yang melibatkan banyak kelompok bakteri dan enzim yang spesifik. Tahap akhir reaksi biokimia spesifik substrat organik ini menghasilkan CO₂ dan CH₄, yang

merupakan produk utama dari proses anaerobik (Nealson, 1997; Demirel dan Scherer, 2008; Ziemiński dan Frac, 2012).

1. Hidrolisis

Hidrolisis merupakan tahap pertama penguraian anaerobik. Tahap ini merupakan liqiuifaksi bahan-bahan organik menggunakan enzim ekstra-seluler yang diproduksi oleh bakteri hidrolitik (Faisal dan Unno, 2001; Zinatizadeh *et al.*, 2006; Deublein dan Steinhauser, 2008; Appels, 2008). Hidrolisis dari polimer bahan-bahan organik seperti; protein, karbohidrat dan lipid akan membentuk asam amino, gula sederhana, asam lemak (Gujer dan Zehnder, 1983; Shin dan Song, 1995; van Lier *et al.*, 2008), alkohol (Rinzema *et al.*, 1994; Zonta *et al.*, 2013) dan lipid menjadi asam lemak rantai panjang (LCFA) (van Lier *et al.*, 2008). Tahap biodegradasi ini melibatkan bakteri hidrolisis yang menghasilkan enzim ekstraseluler dari kelompok hidrolase (amilase, protease, lipase) (Gujer dan Zehnder, 1983; Shin dan Song, 1995; van Lier *et al.*, 2008), dan *cellulase* (Abdelgadir *et al.*, 2014).

Bahan organik dalam bentuk selulosa lebih mudah dicerna oleh bakteri anaerob (Price dan Cheremisinoff, 1981). Protein dihidrolisis menjadi asam amino oleh protease yang berfungsi sebagai exo-enzim (Wiesmann *et al.*, 2007). Lipid dihidrolisis oleh enzim lipase, merupakan ester yang terbentuk dari gliserin, alkohol dengan tiga valensi, dan asam lemak. Gliserin dapat digunakan sebagian untuk reaksi anabolik dan dikonversi sebagian menjadi alkohol rendah (katabolisme). Asam lemak tidak dapat digunakan oleh bakteri asidogenik dan dikeluarkan. Hidrokarbon polimer dihidrolisis menjadi monomer (glukosa dan gula lainnya) oleh sebagian besar bakteri anaerob fakultatif melalui exo-enzim (McInerney dan Bryant, 1981; Wiesmann *et al.*, 2007).

Hidrolisis dari polimer yang sulit terurai yaitu, selulosa dan *cellucottons* dianggap tahap pembatas laju biodegradasi. Selama penguraian limbah padat, hanya 50% senyawa organik terbiodegradasi. Bagian yang tersisa dari senyawa ini tetap dalam kondisi awal, karena kurangnya enzim yang terlibat pada proses biodegradasi (Conrad, 1999; Parawira *et al.*, 2008; Gerber and Roland, 2008; Ziemiński dan Frac, 2012).

Tingkat hidrolisis tergantung pada parameter seperti: ukuran partikel, pH, produksi enzim, difusi dan adsorpsi enzim pada partikel limbah yang mengalami proses penguraian (Bryant, 1979; Ziemiński dan Frac, 2012), konsentrasi substrat dan temperatur (Veeken dan Hamelers, 1999; Gerber dan Roland, 2008).

Produksi metana menurun dengan tingginya kandungan total solids dan particle size. Kandungan total solids dapat mempengaruhi hidrolisis khususnya, dan langkah disintegrasi substrat organik kompleks. Dimana kandungan total solids mempengaruhi pemutusan ikatan bahan organik kompleks dan biodegradasi bahan organik kompleks menjadi organik terlarut, dan ini merupakan *rate-limiting process* (Liotta *et al.*, 2104).

Bakteri selulolitik memegang peranan dalam tahap hidrolisis. Temperatur optimum bakteri *thermophilic* adalah 50-60°C dan temperatur bakteri *mesophilic* 30-40°C. Kedua kelompok selulolitik ini bekerja pada kisaran pH 6-7. Pada proses ini kemungkinan penurunan pH bisa terjadi dikarenakan terbentuknya asam-asam organik (Fry, 1974).

2. Asidogenesis

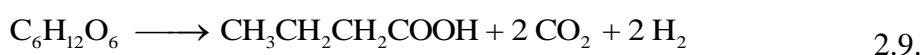
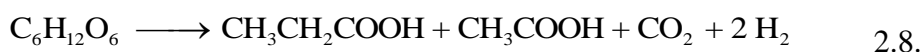
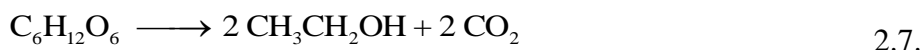
Tahap asidogenesis merupakan tahapan perombakan bahan organik hasil hidrolisis menjadi berbagai produk asam-asam organik rantai-pendek, meliputi asam-asam format, asetat, propionat, butirrat, laktat, suksinat, etanol, karbondioksida, dan gas hidrogen (Ziemiński dan Frac, 2012). Asidogenesis, adalah tahap pembentukan asam amino dan gula sederhana serta asam lemak volatil (VFA), asam laktat, CO₂, H₂, NH₃, H₂S, dan alkohol oleh bakteri pembentuk asam (van Lier *et al.*, 2008). Selain karbon dioksida, air dan hidrogen terutama asetat, propionat, butirrat dan asam valerat akan menumpuk (Batstone *et al.*, 2002).

Bakteri *acidogenesis* memiliki laju pertumbuhan yang tinggi dibandingkan dengan bakteri *methanogens* (30-40 kali lipat) dan mampu hidup pada kondisi ekstrim seperti pH rendah, temperatur tinggi dan OLR tinggi (Ahring *et al.*, 2001; Amani *et al.*, 2010).

Bakteri yang berperan pada tahap asidogenesis umumnya famili *Streptococcaceae* dan *Enterobacteriaceae*. Bakteri pembentuk asam (*Acid forming bacteria*) menguraikan senyawa glukosa menjadi asam asetat, asam

butirat, dan asam propionat (Sekiguchi *et al.*, 2001; Schink, 2002; Wiesmann *et al.*, 2007; O'Flaherty *et al.*, 2010; Mitchell dan Ji Dong, 2010; Abdelgadir *et al.*, 2014).

Reaksi biokimia oleh bakteri asidogenik, sebagai berikut:



Dalam suatu sistem yang seimbang, substrate organik yang telah terbiodegradasi dirubah menjadi asam lemak rantai pendek atau alkohol. Dan sekitar 30% dari produk ini, (asetat, hidrogen, dan karbondioksida) akan melalui tahap asetogenesis dan dimanfaatkan langsung oleh bakteri methanogenik pada tahap metanogenesis (Kangle *et al.*, 2012; Abdelgadir *et al.*, 2014).

3. Asetogenesis

Tahap asetogenesis yaitu tahap pembentukan senyawa asetat, karbondioksida dan hidrogen (Schink, 1997; Ziemiński dan Frac, 2012). Oksidasi anaerobik senyawa antara (*intermediate acid product*) seperti VFA (terutama propionat dan asam butirat) menjadi asam asetat dan hidrogen oleh bakteri asetogenik disebut asetogenesis (Mosey, 1983; Schink, 1997; van Lier *et al.*, 2008). Glukosa dan etanol juga dikonversi menjadi menjadi asetat pada tahap asetogenesis (Abdelgadir *et al.*, 2014). Bakteri *acetogenic*, berperan dalam mengkonversi VFAs dan alkohol menjadi asam asetat, H₂, asam format, dan CO₂, yang akan dimanfaatkan oleh *methanogens* pada tahap selanjutnya (Amani *et al.*, 2010). Bakteri asetogenesis hanya menggunakan sumber-sumber energi sederhana, misalnya asetat, metanol, metilamin, CO₂, dan H₂ (Schink, 1997; Ziemiński dan Frac, 2012).

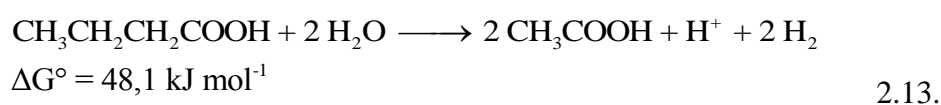
Umumnya laju pertumbuhan, bakteri *acetogenic* ($\mu_{max} = 1 \text{ h}^{-1}$) lebih cepat dari pada bakteri *methanogens* ($\mu_{max} = 0.04 \text{ h}^{-1}$) (Amani *et al.*, 2010). Bakteri *acetogenic* tumbuh agak lambat dengan waktu penggandaan minimal 1,5 sampai 4

hari bahkan di bawah kondisi optimum seperti konsentrasi rendah dari hidrogen terlarut (Lawrence dan McCarty, 1969).

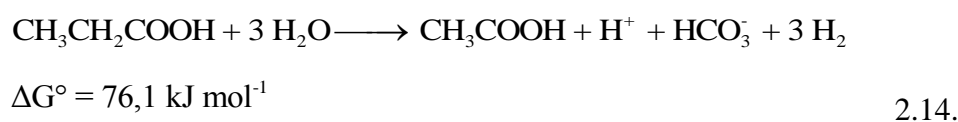
Pada tahap asetogenesis sebagian asetat yang terbentuk secara langsung selama proses fermentasi. Sebagian besar adalah dibentuk oleh reaksi sintropik (Wiesmann *et al.*, 2007). Dan akumulasi hidrogen harus dihindari karena penghambatan sub-proses ini oleh hidrogen (Mosey, 1983; Schink, 1997).

Proses reaksi biokimia oksidasi- β oleh bakteri asetogenesis (reaksi sintropik) (Sekiguchi *et al.*, 2001; Schink, 2002; Wiesmann *et al.*, 2007; O'Flaherty *et al.*, 2010; Mitchell dan Ji Dong, 2010), sebagai berikut:

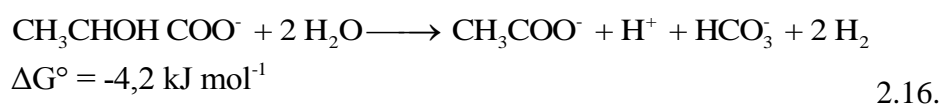
Asetogenesis butirat:



Asetogenesis propionat:



Asetogenesis etanol:



4. Methanogenesis

Tahap terakhir dalam biodegradasi anaerobik adalah methanogenesis. *Methanogens* adalah archaea anaerobik yang dapat dibagi menjadi dua kelompok: (1) spesies *hydrogenophilic* atau *hydrogenotrophic*, yang membentuk metana dengan mereduksi CO_2 dan H_2 sebagai donor elektron dan (2) metanogen asetoklastik atau asetotropik, yang menghasilkan metana dengan cara dekarboksilasi asetat (Sekiguchi dan Kamagata, 2004).

Methanogens juga dapat memanfaatkan sejumlah substrat lain untuk menghasilkan metana, seperti metanol, metilamin, dan format (Ferry, 1999). *Methanogens hydrogenotrophic* mengurangi CO_2 melalui formil, metenil, dan

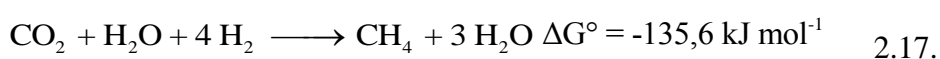
metil, bekerjasama dengan ko-enzim tertentu untuk menghasilkan metana. Sekitar 70% dari metana dihasilkan selama biodegradasi anaerobik melalui jalur asetoklastik (Lettinga, 1995; van Lier *et al.*, 2008; O'Flaherty *et al.*, 2010; Mitchell dan Ji-Dong, 2010). Bakteri penghasil metana antara lain; *Methanococcus*, *Methanobacteria*, dan *Methanosarcina*. Kebanyakan bakteri methanogens bersifat mesofilik dengan kisaran temperatur 28-42 °C dan pada temperatur termofilik dengan kisaran 55-72 °C (Ziemiński dan Frac, 2012) dan Bakteri *methanogens* optimum berada pada rentang pH 7,2 – 8,0 (Suryawanshi *et al.*, 2013). Bakteri *methanogens* tidak dapat menggunakan hasil dari tahap asidogenesis dengan atom karbon lebih dari dua untuk pertumbuhannya (Abdelgadir *et al.*, 2014).

Selama proses metanogenesis, karbondioksida direduksi menjadi metana dan air, asetat dikonversi menjadi metana dan karbondioksida (van Lier *et al.*, 2008; Ziemiński dan Frac, 2012). Metana dalam tahap proses ini dihasilkan dari substrat yang merupakan produk dari tahap sebelumnya, yaitu asam asetat, H₂, CO₂ dan format dan metanol, dimetil sulfida atau metilamin. Hanya sedikit bakteri yang mampu menghasilkan metana dari asam asetat. Sebagian besar CH₄ adalah hasil dari konversi asam asetat oleh bakteri metana heterotrofik (Demirel dan Scherer, 2008; Ziemiński dan Frac, 2012).

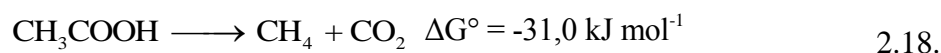
Hanya 30% dari metana dihasilkan dari reduksi CO₂ dan H₂ yang dilakukan oleh bakteri metana autotropik. Disamping itu, H₂ dimanfaatkan juga untuk menjaga kondisi yang baik bagi perkembangan bakteri pembentuk asam. Sebagai akibatnya, terjadi H₂ yang terlalu rendah dalam fase asetogenik. Konsekuensi dari konversi tersebut adalah biogas yang dihasilkan kaya CO₂ karena hanya bagian kecil yang akan dikonversi menjadi metana (Griffin *et al.*, 2000; Karakashev *et al.*, 2005; Ziemiński dan Frac, 2012).

Proses reaksi biokimia pembentukan CH₄ oleh bakteri *methanogenic* (reaksi sintropik) (Wiesmann *et al.*, 2007), sebagai berikut:

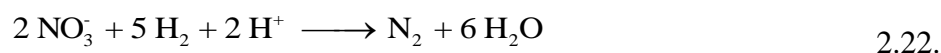
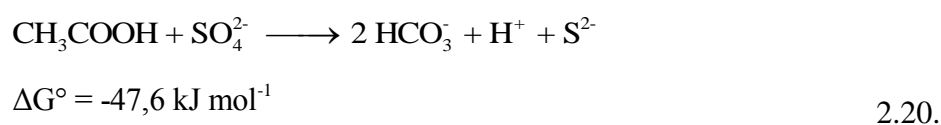
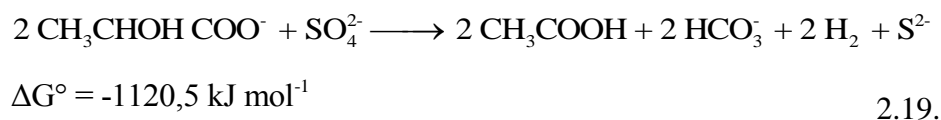
Metanogenesis hidrogenotropik:



Metanogenesis asetoklastik:



Lebih lanjut, reaksi respirasi proses biokimia (Wiesmann *et al.*, 2007 O'flaherty *et al.*, 2010; Mitchell dan Ji-Dong, 2010; Schink, 2002; Sekiguchi *et al.*, 2001) sebagai berikut:



2.3.2. Faktor-Faktor Mempengaruhi Proses Anaerobik

Aktivitas metabolisme mikroorganisme penghasil metana tergantung pada faktor-faktotr sebagai berikut:

1. Temperatur

Proses penguraian anaerobik sangat dipengaruhi oleh temperatur, dengan rentang temperatur sesuai dengan bakteri yang hadir, yaitu *psychrophilic* pada temperatur 0-20 °C, *mesophilic* pada temperatur 30-45 °C sedangkan *thermophilic* pada temperatur 55-60 °C (Fry, 1974; Lettinga, 1995; O'Flaherty *et al.*, 2010; Mitchell dan Ji-Dong, 2010), untuk *hyperthermophilic* pada temperatur > 65 °C (Tchobanoglous *et al.*, 2003).

Bioreaktor yang beroperasi pada temperatur *thermophilic* lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan dari temperatur *mesophilic*, dan juga menunjukkan *soluble* COD (CODs) *removal* yang lebih tinggi dari pada temperatur *mesophilic* (Kim *et al.*, 2006).

Proses yang berlangsung pada temperatur rendah diketahui dapat menurunkan pertumbuhan mikroba, laju pemanfaatan substrat dan produksi biogas (Kim *et al.*, 2006; Khalid *et al.*, 2011). Biodegradasi anaerobik sebaiknya berlangsung pada temperatur dibawah 65°C sebab temperatur diatas 65°C menyebabkan terjadinya denaturasi enzim (Briski *et al.*, 2007). Namun, kondisi

thermophilic memiliki keuntungan, seperti laju biodegradasi bahan organik, biomassa dan produksi biogas tinggi, *effluent* yang tidak terlalu kental serta destruksi pathogen tinggi (Zhu *et al.*, 2009; Khalid *et al.*, 2011).

Bioreaktor anaerobik umumnya berlaku dua rentang temperatur optimal: yaitu *mesophilic* dengan suhu optimum sekitar 35°C dan *termophilic* dengan temperatur optimum sekitar 55°C. Namun, sebagian besar sistem bioreaktor anaerobik dirancang untuk beroperasi pada rentang temperatur *mesophilic* sekitar 35°C (Merlin *et al.*, 2012). Kinerja proses biodegradasi pengolahan air limbah dalam bioreaktor anaerobik stabil pada temperatur *mesophilic* (35-37 °C) (Bolzonella *et al.*, 2005).

2. pH

Setiap mikroorganisme bekerja optimum pada rentang pH yang berbeda. pH berpengaruh terhadap aktifitas biologis mikroorganisme dalam bioreaktor dan umumnya berkisar pada pH antara 5 sampai 9. Dan nilai pH yang dibutuhkan bioreaktor antara 7 sampai 8,5 (Fry, 1974) dan dapat berfungsi dalam rentang pH yang luas antara 4,0 – 8,5 (Hwang *et al.*, 2004; Amani *et al.*, 2010). Bakteri pembentuk metana sangat sensitif pada pH yang rendah. Penurunan pH ini akan mengganggu kinerja bakteri pembentuk metana yang belum sempat berkembang (Padmono, 2007).

Bakteri anaerobik, termasuk bakteri pembentuk metana, *methanogenic bacteria* sangat sensitif terhadap pH dan bekerja dengan optimum pada rentang 6,5 sampai 7,2 (Gerardi, 2003; Appels *et al.*, 2008), dan terjadi pada pH 6,8-7,2 (Merlin *et al.*, 2012). Dilaporkan bahwa metanogenesis dalam bioreaktor anaerobik efisien pada pH 6,5-8,2 (Lee *et al.*, 2009), sedangkan hidrolisis dan asidogenesis berturut-turut pada pH 5,5 dan 6,5 (Kim *et al.*, 2003)

Untuk eksperimen sistem *batch*, kisaran pH pada tahap asidogenesis *thermophilic* adalah 6-7 (Park *et al.*, 2008). Dan kisaran pH terbaik untuk mencapai hasil biogas maksimal dalam bioreaktor anaerobik adalah 6,5-7,5 (Liu *et al.*, 2008; Khalid *et al.*, 2011). Dan dilaporkan bahwa kisaran pH yang ideal untuk bioreaktor anaerobik adalah 6,8-7,2 (Ward *et al.*, 2008).

Pada kondisi OLR umpan tinggi cenderung mempercepat terjadinya pembentukan VFA sehingga menurunkan pH. Pada kondisi tanpa *buffer* pH, maka

pada pH dibawah 6 aktivitas bakteri metan akan mulai terganggu dan bila pH mencapai 5.5, maka aktivitas bakterial akan terhenti sama sekali (Padmono, 2007).

3. Organic Loading Rate (OLR)

Organic Loading Rate (OLR), yaitu massa substrat per meter kubik air limbah per hari (Chaisri *et al.*, 2007). Dengan pembebanan yang diberlakukan berdasarkan HRT yang telah ditetapkan didapat OLR. Laju pembebanan organik atau *volumetric loading* (VL), didefinisikan sebagai hasil kali konsentrasi *influent* dengan debit air limbah yang diolah dibagi volume reaktor (Padmono, 2003). Setiap bahan mempunyai karakteristik lama proses tertentu, sebagai contoh untuk kotoran sapi diperlukan waktu 20-30 hari. Sebagian gas diproduksi pada 10 sampai dengan 20 hari pertama (Fry, 1974).

Kebutuhan *nutrient* untuk bioreaktor anaerobik bervariasi sebagai fungsi OLR (Suryawanshi *et al.*, 2013). OLR bervariasi karena perubahan konsentrasi *influent* dan oleh perubahan laju air (Abdelgadir *et al.*, 2014). Sehingga perubahan pada laju alir secara tak langsung merubah HRT. OLR dapat diekspresikan dengan persamaan 2.23.

$$OLR = \frac{Q \cdot S_0}{V} \quad 2.23a.$$

$$OLR = \frac{S_0}{HRT} \quad 2.23b.$$

Dimana OLR adalah laju pembebanan organik (kg COD/m³.d), Q adalah laju alir volumetrik limbah per 24 jam (m³/d), S₀ adalah *chemical oxygen demand* (mg/L) dan V adalah volume bioreaktor (m³) (Abdelgadir *et al.*, 2008).

Sehingga persamaan 2.23 menjadi persamaan 2.24c.

$$HRT = \frac{COD}{OLR} \quad 2.23c.$$

4. Konsentrasi Substrat

Konsentrasi substrat dapat mempengaruhi proses kerja mikroorganisme. Dimana kondisi optimum dicapai jika jumlah mikroorganisme sebanding dengan konsentrasi substrat. Laju pengolahan anaerobik dipengaruhi oleh ketersediaan dan kompleksitas substrat (Khalid *et al.*, 2011).

BOD, COD dan VFA merupakan parameter konsentrasi substrat organik terlarut yang *biodegradable*. Proses biodegradasi bahan organik yang mudah didegradasi (*biodegradable organic*) menjadi biogas oleh bakteri anaerobik, biasanya dinyatakan dalam BOD, COD terlarut atau TVS. Besaran ini hanya mencapai 80–90 % dari TSS (Padmono dan Susanto, 2007). Substrat untuk menunjukkan COD yang dapat terbiodegradasi (Batstone *et al.*, 2002; Tchobanoglous *et al.*, 2004). Membedakan antara substrat yang *biodegradable* yang tersedia dan total substrat (SCOD) sangat penting karena fraksi yang cukup besar dari umpan COD yang masuk mungkin *non-biodegradable* secara anaerobik (Gossett dan Belser, 1982; Christensen *et al.*, 2001; Deublein and Steinhauser, 2008). Selama pengolahan anaerobik COD hanya “ditata-ulang”. Substrat organik kompleks terbiodegradasi menjadi produk antara (*intermediate product*) kemudian menjadi CH₄ dan CO₂ (van Lier *et al.*, 2008). Dan pada proses anaerobik 90% COD terkonversi menjadi metana (Franco *et al.*, 2007).

‘*Surface active agents*’ adalah *surfactants* (lemak, minyak, lemak, VFA, detergen, protein and bahan partikulat) yang disintesis secara kimia atau dihasilkan secara biologis (*bio-surfactants*). Umumnya limbah perkotaan mengandung 1–20 mg/L surfaktan tetapi akan meningkat jika bioreaktor anaerobik *overloaded* (Vardar-Sukan, 1998; Barber, 2005).

Lipid adalah substrat yang sangat menjanjikan untuk biodegradasi anaerobik dalam hal produksi metana bila dibandingkan dengan karbohidrat dan protein. Sehingga lipid dapat dianggap sebagai sumber energi potensial (Hanaki *et al.*, 1981; Angelidaki *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2006; Alves *et al.*, 2009). Lipid (lemak, minyak, lemak) merupakan bagian utama dari limbah bahan organik domestik yang menyumbang 25-35 % dari total COD dari air limbah baku (Quemeneur *et al.*, 1994; Raunkjaer *et al.*, 1994; Chipasa *et al.*, 2006; Noutsopoulos *et al.*, 2012). Lebih dari 90% COD berasal dari lipid, yang telah terhidrolisis dalam bentuk asam lemak rantai panjang (Hanaki *et al.*, 1981).

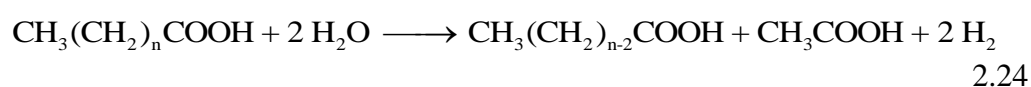
5. Long-Chain Fatty Acids (LCFA)

Asam lemak rantai panjang (LCFA) adalah asam-asam karboksilat dengan jumlah atom karbon C₁₆-C₁₈ atau lebih (El Hajjouji *et al.*, 2008). LCFA merupakan zat antara utama dari proses biodegradasi lipid (lemak, minyak).

Akumulasi LCFA dalam bioreaktor anaerobik seringkali dihubungkan dengan masalah seperti *sludge flotation*, *washout* biomassa dan penghambat pada aktivitas mikroorganisme (Rinzema *et al.*, 1994; Zonta *et al.*, 2013). Biodegradasi LCFA dilakukan oleh komunitas sintrofik dari bakteri anaerob dan *archaea methanogens*. Untuk kinerja optimal, diperlukan komunitas sintrofik yang kompak, yang sering sulit dicapai dengan limbah cair yang mengandung lemak dan lipid (Alves *et al.*, 2009). Beberapa riset membuktikan bahwa penghambat reversibel LCFA juga terkait dengan pengaruh pembatasan transportasi fisik (Pereira *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2005; Alves *et al.*, 2009; Zonta *et al.*, 2013).

Mekanisme utama toksisitas LCFA adalah melalui adsorpsi ke dinding sel mikroorganisme sehingga menghambat fenomena transportasi (Hwu *et al.*, 1998; Cirne *et al.*, 2007) dan toksisitas akut aktivitas mikroorganisme metanogen pada asetoklastik dan hidrogenotrofik (Angelidaki *et al.*, 1992; Rinzema *et al.*, 1994; Noutsopoulos *et al.*, 2012).

Lipid dalam air limbah, terutama terdiri dari trigliserida dan LCFA yang terbiodegradasi menjadi asetat dan hidrogen, melalui reaksi β -oksidasi pada kondisi anaerobik (Appels *et al.*, 2008; Noutsopoulos *et al.*, 2012). Biodegradasi anaerobik LCFA melalui jalan β -oksidasi menjadi asetat dan H_2 (Long *et al.*, 2012).



Pada sistem *batch*, menunjukkan bahwa inhibisi yang disebabkan oleh konsentrasi lipid tidak hanya laju hidrolisis tetapi juga karena hal ini bersifat reversibel (Cirne *et al.*, 2007).

Pengaruh inhibisi LCFA terhadap aktifitas bakteri hidrolisis, *acidogens*, *acetogens* dan *methanogens* dalam konsorsium anaerobik telah terdokumentasikan dengan baik. Perbedaan antara laju hidrolisis lipid dan β -oksidasi LCFAs dapat menghasilkan ketidakseimbangan reaktan-produk dan akumulasi LCFAs, menyebabkan inhibisi pada aktifitas mikroorganisme (Angelidaki dan Ahring, 1992; Alves *et al.*, 2001; Hanaki *et al.*, 1981; Lalman dan Bagley, 2002). *Methanogens* lebih rentan terhadap inhibisi LCFA dibandingkan dengan *acidogens* (Lalman dan Bagley, 2002; Pereira *et al.*, 2003), sedangkan,

acetotrophic methanogens lebih keras terpengaruhnya daripada *hydrogenotrophic methanogens* (Hanaki *et al.*, 1981; Lalman dan Bagley, 2000). Dan jika populasi mikroorganisme terganggu oleh inhibisi LCFA, kinerja bioreaktor dapat menurun, biodegradasi akan terhambat, VFA dipastikan terakumulasi dan menekan produksi metana (Nielsen dan Ahring, 2006; Ma *et al.*, 2015).

6. Volatile Fatty Acids (VFA)

Asam-asam karboksilat dengan massa molekul rendah (C_2 - C_7 asam monokarboksilat aliphatik) adalah zat antara (*intermediates*) dan *metabolites* penting dalam proses biologis (Siedlecka *et al.*, 2008). Asam-asam karboksilat ini dikenal sebagai VFA atau asam lemak rantai pendek (SCFA). VFA berperan penting dalam pengolahan anaerobik (Appels *et al.*, 2008). VFA adalah kelompok asam organik dengan berat molekul rendah yang larut dalam air dan lumpur (*sludge*). Tujuh VFA paling umum ditemukan dalam bioreaktor anaerobik adalah asam format, asam asetat, asam propionat, asam butirat, asam valerat, asam iso-valerat dan asam kaproat (Gerardi, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Ganidi *et al.*, 2009). Kehadiran VFA dalam limbah mengindikasikan adanya aktifitas bakteri (Siedlecka *et al.*, 2008).

Beberapa studi melaporkan kegagalan bioreaktor atau kinerja yang tidak baik karena penurunan pH yang disebabkan oleh akumulasi VFA dalam sistem pengolahan anaerobik (Visser *et al.*, 1993; Fabián dan Gordon, 1999; Poh and Chong, 2009; Tabatabaei *et al.*, 2011). VFA dapat menghambat pertumbuhan bakteri *methanogens* jika peningkatan konsentrasinya melebihi batas yang ditentukan (Amani *et al.*, 2010). Rentang total konsentrasi VFA pada bioreaktor biasanya bervariasi antara 50 dan 300 $mg.l^{-1}$. Asam asetat adalah asam yang dominan dan menyumbang sekitar 85% dari kandungan asam volatil dalam bioreaktor anaerobik (Gerardi, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Ganidi *et al.*, 2009).

Akumulasi yang tak seimbang antara H_2 dan VFA, dapat disebabkan oleh variasi temperatur, OLR, senyawa toksik dan lain-lain. *Methanogens* yang tidak dapat menurunkan H_2 dan VFA, menyebabkan akumulasi VFA dan penurunan pH (Appels *et al.*, 2008). Produksi VFA yang tinggi dapat meracuni mikroorganisme, khususnya *methanogens* pada konsentrasi 6,7-9,0 mol/m^3 (Batstone *et al.*, 2000).

Peningkatan konsentrasi VFA dalam bioreaktor sistem *batch*, memberi pengaruh yang berbeda pada tahap hidrolisis, asidogenesis dan metanogenesis (Appels *et al.*, 2008). Konsentrasi VFA yang tinggi, sebagai *intermediate product* akan menghambat hidrolisis, asidogenesis dan metanogenesis. Sehingga, proses perpindahan massa dan seeding mikroorganisme yang memadai merupakan hal penting dalam bioreaktor anaerobik (Vavilin *et al.*, 2002).

7. Ketersediaan Unsur Hara Bakteri

Kebutuhan nutrisi untuk pengolahan air limbah yang dilaporkan dalam literatur untuk rasio C:N:P adalah 100:5:1 untuk pengolahan aerobik dan 250:5:1 untuk pengolahan anaerobik (Henze *et al.*, 1997; Maier, 1999; Ammary, 2004). Untuk pengolahan biologis optimal, rasio C:N:P dilaporkan sebagai 100:2,5:0,5 untuk pengolahan anaerobik (Rajeshwari *et al.*, 2000).

Rasio maksimum yang dilaporkan dalam literatur sebagai rasio yang dibutuhkan adalah 250:5:1 sampai 500:5:1, tergantung pada tingkat pembebanan atau konsentrasi COD *influent* (Droste, 1997). Pada pengolahan limbah cair ratio nutrisi C:N:P sangat berpengaruh terhadap removal COD. Kandungan nutrisi yang dibutuhkan untuk pengolahan anaerob air limbah, dengan rasio COD:N:P = 100:2,5:0,5 (Widjaya dan Lindu, 2007), COD:N:P = 911:5:1,7 (Ammary, 2004) atau COD:N:P = 1000:7:1 (Suryawanshi *et al.*, 2013). Rata-rata rasio COD terhadap konsentrasi nitrogen (COD:N) dan konsentrasi fosfor (COD:P) berturut-turut adalah 180 dan 530.

8. Penghambat Nitrogen dan Ratio Carbon Nitrogen

Nitrogen amonia pada konsentrasi yang tinggi dapat menghambat proses anaerob. Konsentrasi yang baik berkisar antara 200-1500 mg/L. Pada konsentrasi 560-568 mg/L proses methanogenesis akan terhambat pada pH 7,6 sedang konsentrasi di atas 4000 mg/L akan bersifat toksik pada pH manapun (Appels *et al.*, 2008).

Proses anaerobik akan optimal bila diberikan bahan makanan yang mengandung karbon dan nitrogen secara bersamaan. CN ratio menunjukkan perbandingan jumlah dari kedua elemen tersebut (Ammary, 2004). Ratio C:N = 30, akan menciptakan proses penguraian yang optimum, bila kondisi yang lain juga mendukung. Bila terlalu banyak karbon, nitrogen akan habis lebih dahulu.

Hal ini akan menyebabkan proses berjalan dengan lambat. Bila nitrogen terlalu banyak (CN ratio rendah; misalnya 30/15), maka karbon habis lebih dulu dan proses anaerobik berhenti (Fry, 1974).

Jika rasio C/N tinggi, ada risiko kekurangan nutrisi, dan kapasitas buffer yang rendah akan menghasilkan proses yang lebih sensitif, sedangkan jika kandungan nitrogen tinggi, masalah inhibisi amonia mungkin timbul. Kemampuan biodegradasi limbah yang mengandung karbohidrat tinggi dapat ditingkatkan dengan mencampur limbah tersebut dengan limbah yang mengandung jumlah nitrogen tinggi. Pencampuran limbah ini dilakukan untuk meningkatkan rasio C/N (Ahring *et al.*, 1992; Kaparaju *et al.*, 2002; Macias-Corral *et al.*, 2008; O'Flaherty *et al.*, 2010; Mitchell and Ji-Dong, 2010).

9. Zat Beracun

Salah satu unsur yang bersifat toksik yang terkandung pada lindi adalah logam berat. Logam berat yang hadir dalam berbagai jenis limbah/limbah termasuk air limbah industri, TPA lindi dan lumpur (Appels *et al.*, 2008). Meskipun banyak logam yang dibutuhkan dalam jumlah esensial untuk memberikan pertumbuhan yang cukup pada metanogens, aktivitas metanogenik dalam bioreaktor anaerobik sangat dipengaruhi oleh jumlah logam berat. Efek toksik dari logam pada proses biologis terutama karena inhibisi aktivitas enzim (Tabatabaei *et al.*, 2011).

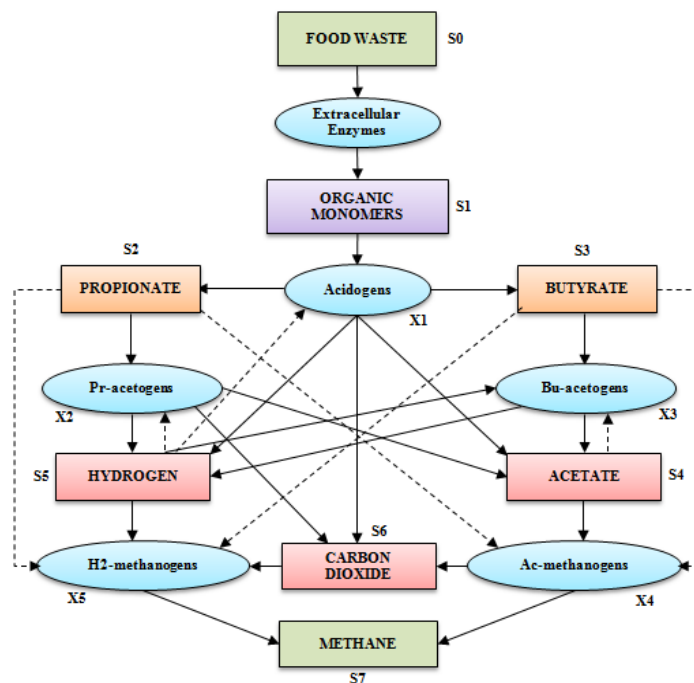
Zat organik maupun anorganik pada konsentrasi tinggi, baik yang terlarut maupun tersuspensi dapat menjadi penghambat ataupun racun bagi pertumbuhan mikroorganisme. Beberapa senyawa organik terlarut yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme antara lain: *formaldehyde*, *chloroform*, *ethyl benzene*, *ethylene*, *kerosene*, detergen. Sedang senyawa anorganik antara lain: Na, K, Ca, Mg, NH₃, S, Cu, Cr(VI), Cr (III), Ni, Zn dan lain-lain (Chen *et al.*, 2008; Moertinah, 2010).

Awalnya senyawa-senyawa anorganik diberikan untuk merangsang pertumbuhan mikroorganisme sebagai *nutrient*. Pada konsentrasi rendah sampai sedang dapat menstimulasi pertumbuhan mikroorganisme, namun pada konsentrasi tinggi akan menyebabkan beberapa hambatan atau toksisitas (Chen *et al.*, 2008).

10. Hidrogen

Bagan untuk anaerobik bioreaktor seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Pada bagan tersebut terlibat lima kelompok bakteri: *acidogens* yang mengurai monomer organik (X_1), *acidogens* mengurai propionat (X_2), *acidogens* yang mengurai butirrat (X_3), *methanogens* asetoklastik (X_4) dan *methanogens* hidrogenotrofik (X_5) (Gujer and Zehnder, 1983; Choi *et al.*, 2003).

Inhibisi hidrogen pada tahap *acidogens* harus diperhatikan karena aktifitas bakteri *acidogenic* (Mosey, 1983; Choi *et al.*, 2003). Inhibisi hidrogen juga pada tahap *acetogenic* termasuk sejumlah pemblokiran reaksi pada tekanan parsial hidrogen tinggi (Kalyuzhnyi and Davlyatshina, 1997; Kalyuzhnyi, 1997). Disamping inhibisi hidrogen, inhibisi asetat pada tahap pengurai butirrat (Appels *et al.*, 2008) dan inhibisi yang disebabkan oleh *intermediate* produk, seperti asam propionat dan butirrat, pada tahap *methanogenic* juga harus dipertimbangkan (Kalyuzhnyi and Davlyatshina, 1997; Kalyuzhnyi, 1997; Choi *et al.*, 2003).



Gambar 2.3. Bagan model (alur material, inhibisi). Monomer organik (S_1) dan propionat asidogen turunannya (S_2) dan asidogen turunannya (X_2), butirrat (S_3) dan asidogen turunannya (X_3), asam asetat (S_4) dan metanogen asetoklastik (X_4), hidrogen (S_5) dan metanogen hidrogenotropik (X_5). Karbondioksida (S_6) dan Metana (S_7). Penjelasan Sampel: monomer organik (S_1) diurai oleh kelompok asidogen (X_1) kedalam S_4 , S_2 , S_3 , S_5 dan S_6 . Reaksi ini diinhibisi oleh hidrogen, S_5 . (Choi *et al.*, 2003).

Acetogenesis asam-asam lemak hanya berfungsi jika hidrogen tidak terakumulasi, tetapi dikonsumsi oleh *methanogens*. Dalam bioreaktor, konsentrasi hidrogen berkurang oleh pembentukan asetat dari CO₂ dan H₂ (Appels *et al.*, 2008).

Beberapa penelitian menemukan pengaruh tekanan parsial hidrogen, p_{H₂} pada produksi asam asetat, asam propionat dan asam butirat (Masse dan Droste, 2000; Appels *et al.*, 2008). Dimana konversi asam propionat dan asam butirat menjadi asam asetat, secara termodinamika hanya mungkin terjadi jika p_{H₂} kurang dari 10⁻⁴ atm untuk asam butirat dan p_{H₂} 10⁻⁵ atm untuk asam propionat. Dan terindikasi juga bahwa jika p_{H₂} lebih tinggi daripada 10⁻⁴ atm, perubahan energi bebas Gibbs lebih besar untuk reduksi CO₂ daripada asetat, malahan menghasilkan reduksi CO₂ daripada penguraian asetat. Dapat disimpulkan bahwa penurunan konsentrasi H₂ akan memberikan konversi asam asetat membentuk metana (Rehm *et al.*, 2000; Masse dan Droste, 2000; Appels *et al.*, 2008). Jadi bioreaktor berfungsi baik dan stabil jika konsentrasi hidrogen terlarut sangat rendah dan konversi substrat organik lebih banyak menjadi asam asetat (Masse dan Droste, 2000; Appels *et al.*, 2008).

11. Hydraulic Retention Time

Hydraulic Retention Time (HRT), didefinisikan sebagai lamanya waktu tinggal air limbah dan berkontak dengan mikroorganisme didalam bioreaktor anaerobik. Semakin lama waktu tinggal antara air limbah dengan mikroorganisme, maka proses biodegradasi bahan-bahan organik oleh mikroorganisme dapat berlangsung dengan baik dan optimal (Firdha *et al.*, 2010).

Secara matematis, HRT merupakan hasil bagi antara volume bioreaktor dengan debit air limbah yang diolah. Dimana HRT biasanya diekspresikan dalam jam atau hari (d), V volume bioreaktor dalam m³; dan Q debit air limbah yang diolah dalam m³/d (Abdelgadir *et al.*, 2014).

$$HRT = \theta = \frac{V}{Q} \quad 2.25.$$

Bakteri metanogen merupakan bakteri yang lambat pertumbuhannya dan merupakan faktor pembatas didalam proses pengolahan secara anaerob. Oleh

karena laju pertumbuhannya lambat, bakteri metanogen memerlukan SRT yang panjang. Dengan demikian berarti memerlukan HRT yang lama pula. SRT yang diperlukan bervariasi antara 3-5 hari pada 35 °C. Untuk memperoleh pengontrolan yang tepat dan hasil pengolahan yang baik, waktu detensi biasanya 10-30 hari pada 35 °C. Penyempurnaan sistem konvensional yang utama adalah dengan memisahkan SRT dan HRT. Dengan pemisahan, volume reaktor yang diperlukan lebih kecil dan beban organik yang diolah akan lebih besar (Moertinah, 2010).

2.3.3. Bioreaktor Anaerobik

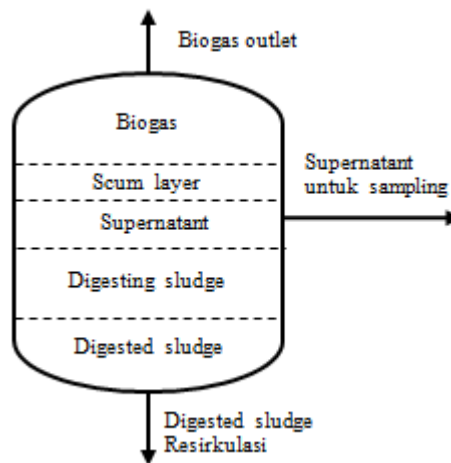
Bioreaktor merupakan suatu sistem biokonversi substrat organik melalui reaksi biokimia spesifik. Bioreaktor berbeda dengan reaktor kimia konvensional, karena utilitas, kontrol biologis, dan faktor-faktor yang mempengaruhi serta sensitifitasnya yang tinggi dan kurang stabil terhadap bahan kimia (Williams, 2002).

Umumnya bioreaktor anaerobik dibagi dalam tiga kategori (Gerardi, 2003; Wilkie, 2005; Wiesmann *et al.*, 2007; van Lier *et al.*, 2008), yaitu :

1. Passive Systems; merupakan jenis bioreaktor anaerobik paling sederhana dan hanya memiliki sedikit kontrol terhadap kondisi operasi. Umumnya digunakan untuk limbah cair dan kurang cocok untuk limbah padat. Contoh: *Covered Lagoon*.
2. Low Rate Systems; jenis bioreaktor anaerobik yang telah memiliki utilitas tambahan seperti pencampur, pengaduk dan sumber utama mikroorganisme pembentuk metana adalah aliran substrat yang diumpankan ke dalam reaktor. *Solid retention time* (SRT) sama dengan *hydraulic retention time* (HRT). Contoh: *Continuous-Stirred Tank Reactor* (CSTR), *Plug Flow Digester* (PFD), *Mixed Plug Flow Digester* (MPFD).
3. High Rate Systems; jenis bioreaktor anaerobik yang memiliki utilitas seperti pencampur, pengaduk dan resirkulasi sludge serta mikroorganisme pembentuk metana ditahan dalam waktu yang cukup lama di dalam reaktor untuk meningkatkan efisiensi kerja reaktor. SRT lebih besar daripada HRT. Contoh: *Anaerobic Contact Digester* (ACD), *Attached Growth Digester* (AGD) dan *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) digester.

Disamping itu, hal yang penting untuk didefinisikan adalah pembagian zona dalam bioreaktor anaerobik dengan sistem *batch* (Gerardi, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Appels *et al.*, 2008), seperti terlihat pada Gambar 2.4. Pembagian zona ini terbagi atas sebagai berikut;

1. Biogas keluar pada bagian atas,
2. Scum layer adalah lapisan buih
3. Lapisan supernatant sebagai hasil pengolahan anaerobik, pada bagian inilah diletakan port sampling
4. Digesting sludge
5. Digested sludge adalah lumpur yang akan di resirkulasi



Gambar 2.4. Pembagian zona dalam bioreaktor anaerobik (sumber: Appels *et al.*, 2008; Tchobanoglous *et al.*, 2004).

Beberapa kondisi optimum yang diharapkan pada proses pengolahan limbah dalam bioreaktor anaerobik, disajikan pada Tabel 2.4., dan Tabel 2.5.

Table 2.4. Kondisi Optimum dan Tertinggi Bioreaktor Anaerobik

Parameter	Satuan	Optimum	Maksimal
pH		6.8–7.4	6.2–8.2
Temperatur			
<i>Mesophilic</i>		32–37	20–42
<i>Thermophilic</i>		50–60	45–65
OLR			
<i>Mesophilic</i>	kg VS m ⁻³ d ⁻¹	0.8–2.0	0.4–6.4
<i>Thermophilic</i>	kg VS m ⁻³ d ⁻¹	1.5–5.0	1.0–7.5

Parameter	Satuan	Optimum	Maksimal
Rasio COD:N:P			
Kandungan organik tingg		1000:7:1	Ttb
Kandungan organik rendah		250:5:1	Ttb
Rasio C:N		25:1	Ttb
HRT	hari	12–18	7–30
VFA	mg/L	50–500	500–2000
	as acetic acid		
Pengadukan		<i>Intermittent-minimal</i>	<i>Continuous-vigorous</i>
	L/hari	4–6	8–12
Potensial Redox	mV	–520 to –530	–490 to –550
Alkalinitas	mg CaCO ₃ /L	1300–3000	1000–5000
Komposisi Biogas			
CH ₄	vol.%	65–70	60–75
CO ₂	vol.%	30–35	25–40

Sumber: Deublein and Steinhauser, 2008; Amani *et al.*, 2010.

Catatan: Ttb: Tak terbatas

2.3.4. Biomassa Rumen Sapi sebagai Inokulum

Rumen berupa rumput yang belum terfermentasi dan tercerna sepenuhnya, yang merupakan limbah rumah potong hewan yang berpotensi dapat mencemari lingkungan. Rumen adalah salah satu bagian lambung ternak ruminansia (memamah biak) seperti sapi, kerbau, kambing dan domba. Rumen atau perut besar merupakan bagian terbesar dari susunan lambung rumenansia. Mikroorganisme utama yang terdapat dalam rumen adalah bakteri, protozoa, jamur (*yeast*) dan kapang (*mould*) (Das and Qin, 2012). Rumen dapat digunakan sebagai sumber bakteri metanogenik (Gamayanti *et al.*, 2012), dan inokulum untuk meningkatkan laju produksi biogas (Budiyono *et al.*, 2010; Budiyono *et al.*, 2014).

Temperatur rumen cocok untuk pertumbuhan bakteri berada pada kisaran 36-42 °C. Bakteri dalam rumen hidup pada pH 5.5 - 7 dengan kondisi anaerobik pada temperatur 39-40 °C (Hungate, 1966).

Beberapa kelompok mikroorganisme berperan dalam keseluruhan proses biodegradasi secara anaerob. Kelompok mikroorganisme yang berperan dalam perombakan anaerobik, seperti terdapat dalam sedimen tanah, lahan terendam air, tumpukan manure atau rumen ternak ruminansia, dapat digunakan sebagai sumber bakteri metanogenik (Stams *et al.*, 2003; Gamayanti *et al.*, 2012).

Dalam rumen ternak ruminansia terdapat mikroorganisme, yang terdiri dari protozoa, bakteri dan fungi. Kelompok bakteri yang sangat penting dalam rumen

adalah bakteri selulolitik. Enzim selulase yang dihasilkan bakteri selulolitik dalam perut ternak ruminansia mampu memecah selulosa (Gamayanti *et al.*, 2012). Rumen sapi kaya akan kandungan selulase, amilase, protease, xilanase dan lain-lain (Budiansyah *et al.*, 2010). Rumen mengandung enzim protease/deaminase yang menghidrolisis protein atau peptide, amylase yang menghidrolisis pati, selulase yang menghidrolisis selulosa, hemiselulase (*xylanase*) yang menghidrolisis hemiselulosa (*xylan*), lipase yang menghidrolisis lemak (Kung *et al.*, 2000).

Kandungan mikroba di dalam media rumen lebih besar dibandingkan di dalam feses. Populasi mikroba dalam media/cairan rumen sangat padat yaitu mengandung sekitar 10¹⁰ bakteri/mL, 10⁶ protozoa/ml dan 10³ fungi/mL (Rode, 2000; Kusuryani dan Kosasih, 2015). Bakteri lignoselulolitik diyakini terdapat di dalam saluran pencernaan ternak ruminansia. Umumnya kelompok bakteri selulolitik dominan pada rumen ternak yang mengkonsumsi hijauan (Peres *et al.*, 2002). Tiga spesies bakteri selulolitik terdapat dalam jumlah hampir seimbang, berkompetisi mendegradasi selulosa di dalam rumen dengan kondisi jumlah substrat cukup tersedia (Chen dan Weimer, 2001).

Tabel 2.5. Tahap dan kondisi optimum dalam bioreaktor anaerobik

No.	Kondisi	Tahap			
		Hidrolisis	Asidogenesis	Asetogenesis	Metanogenesis
1.	Fase	Padat		Cair	Gas
2.	Sifat	Tak-terlarut		Terlarut	Tak-terlarut
3.	Mikroorganisme	<i>Hydrolytic bacteria: Streptococcus, Enterobacteriu: yang dapat menghasilkan enzim ekstraseluler (amilase, protease, lipase) dan cellulase.</i>	<i>Acidogenic bacteria: Pseudomonas, Bacillus, Clostridium, Micrococcus, Flavobacterium.</i>	<i>Acetogenic bacteria: Syntrophomonas, Syntrophobacter, Methanobacterium suboxydans,</i>	<i>Methanogenic bacteria: Methanobacterium, Methanothermobacter, Methanobrevibacter, Methanotherums, Methanothermococcus, Methanococcus, Methanomicrobium, Methanolacinia, Methanosarcina</i>
4.	Fungsi	Hidrolisis polimer organik kompleks	Biodegradasi zat organik terlarut		Pembentuk metana
5.	Bahan/Produk	Polimer kompleks, lipid, polisakarida, protein, LCFA.	LCFA, VFA, monosakarida, asam amino, etanol, asetat, gliserin, CO ₂ , H ₂ .	Asetat, CO ₂ , H ₂	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ , CO, H ₂ S
6.	pH optimum	5,5-6		5,5-7,2	6,5-8,2
7.	Temperatur optimum, °C		30-35 (<i>mesophilic</i>) dan 55-60 (<i>thermophilic</i>)		30-45 (<i>mesophilic</i>) dan 55-83 (<i>thermophilic</i>)
8.	Laju pertumbuhan		15 menit–1.5 jam	1.5–3 jam	3–30 hari
9.	Rasio C:N		10 – 45		20 – 30
10.	Potensial Redox, mV		+400 - -300		< -250
11.	Rasio C:N:P:S		500:15:5:3		600:15:5:3
12.	Logam berat		Tdk ada persyaratan		<i>Essential: Ni, Co, Mo, Se</i>

Sumber: Deublein and Steinhauser, 2008; Suryawanshi *et al.*, 2013.

Tabel 2.6. Perbandingan Tipe Bioreaktor Anaerobik

Kriteria	Tipe Bioreaktor Anaerobik						
	<i>Passive Systems</i>	<i>Low Rate Systems</i>			<i>High Rate Systems</i>		
Jenis Bioreaktor	CAL, <i>Septic tank</i> , <i>imhoff tank</i>	CSTR, CMAD	PFD	MPFD	ACD, ASBR, ABR.	AGD, AF	UASB
HRT (hari)	35 - 60	20 - 25	20 - 30	15 - 30	24 - 120 jam	10 - 85 jam	2 - 72 jam
SRT (hari)	55 - 105	20 - 30	15 - 30	15 - 30	10 - 25	20 - 30	15 - 48
Total solids (%)	< 2	3 - 10	10 - 15	15 - 45	< 15	2 - 5	< 2
Temperatur	<i>Ambient</i>	<i>Meso/</i> <i>Termophilic</i>	<i>Mesophilic</i>	<i>Meso/</i> <i>Termophilic</i>	<i>Ambient/</i> <i>Mesophilic</i>	<i>Ambient/</i> <i>Mesophilic</i>	<i>Mesophilic</i>
<i>Organic load</i> (kg COD/m ³ .hari)	0.5 - 2	1 - 5	1 - 5	1 - 5	2 - 5	1 - 15	2 - 30
COD <i>removal</i> (%)	50 - 60	60 - 80	60 - 80	50 - 60	70 - 95	80 - 95	80 - 95
Biogas Production (m ³ CH ₄ /kg COD _{rem.})	-	0,23-0,37 m ³ CH ₄ /kgCOD			0,28-0,49 m ³ CH ₄ /kgCOD		
Biogas (%CH ₄)	< 50	< 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50

Sumber: Rajeshwari *et al.*, 2000; Wilkie, 2005; Polprasert, 2007; Mojiri *et al.*, 2012; Spellman, 2013; Garaffa and Gröll, 2013; Hassan *et al.*, 2013.

Keterangan:

CAL : *Covered Anaerobic Lagoon*
 CSTR : *Continuous-Stirred Tank Reactor*
 CMAD : *Completely Mixed AD*
 PFD : *Plug Flow Digester*
 MPFD : *Mixed Plug Flow Digester*
 ACD : *Anaerobic Contact Digester*
 ASBR : *Anaerobic Sequencing Batch Reactor*
 ABR : *Anaerobic Baffled Reactor*
 AGD : *Attached Growth Digester*
 AF : *Anaerobic Filters (Fixed Film Bioreactor)*
 UASB : *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

Kelompok bakteri yang berperan dalam biodegradasi anaerob (Ahring, 2003); sebagai berikut:

1. Bakteri hidrolisis, berperan dalam biodegradasi polimer organik menghasilkan monomer, asetat dan hidrogen, serta sejumlah VFA seperti propionat, butirat dan alkohol,
2. Bakteri obligat asetogenik, berperan dalam biodegradasi propionat dan butirat menjadi asetat dan hidrogen.
3. Bakteri metanogenik, berperan dalam biodegradasi asam asetat dan hidrogen menghasilkan metana.

Proses biodegradasi bahan yang mengandung selulosa sangat ditentukan oleh kemampuan mikrobial selulolitik untuk menghasilkan enzim selulase yang mempunyai aktivitas tinggi (Asenjo *et al.*, 1986). Populasi bakteri yang terdapat dalam rumen, usus besar, dan feses ternak ruminansia, merupakan famili *Bacteriodes*, *Fusobacterium*, *Streptococcus*, *Eubacterium*, *Ruminococcus* dan *Lactobacillus* (Omed *et al.*, 2000). Jenis bakteri metanogen dari ordo *Methanobacteriales* adalah yang paling umum ditemukan dalam rumen sapi (Skillman *et al.*, 2004).

2.4. Biodegradasi Substrat pada Sistem Multikomponen

Mekanisme biodegradasi substrat pada tahap *hydrolisis* dalam bentuk persamaan kinetika (Chen dan Hashimoto, 1980; Barthakur *et al.*, 1991; Faisal dan Unno, 2001; Zinatizadeh *et al.*, 2006; Crites *et al.*, 2006). Dimana persamaan laju reaksi biodegradasi keseluruhan (r) yang diperoleh adalah fungsi konsentrasi substrat persatuan waktu (Zaiat *et al.*, 2000), adalah:

$$r = \frac{dS}{dt} \quad 2.26.$$

Dimana pada tahap pertama hidrolisis, solubilisasi padatan dan/atau minyak/lemak, diasumsikan menjadi reaksi tingkat pertama sehubungan dengan konsentrasi substrat yang dapat dihidrolisis, S (massa/volume) sebagai:

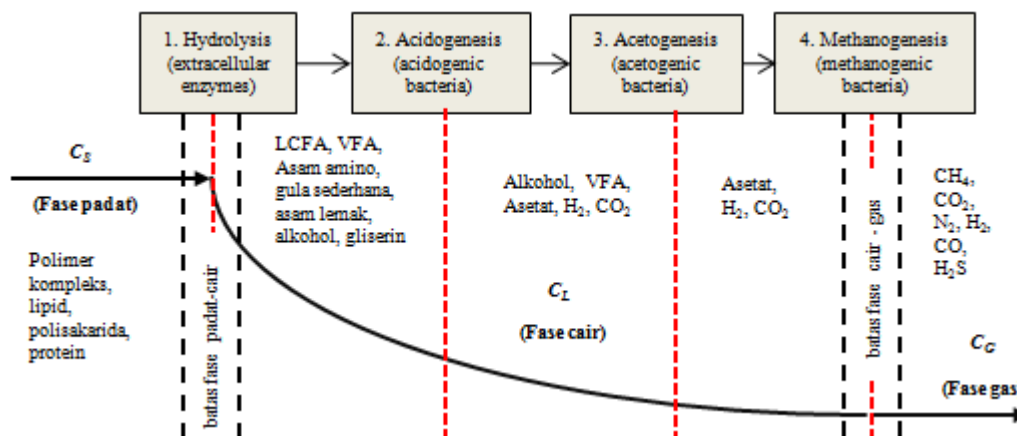
$$\frac{dS_h}{dt} = K_h (S - S_h) \quad 2.27.$$

Dimana S_h adalah konsentrasi dari substrat yang terhidrolisis dan K_h adalah tingkat koefisien hidrolisis (s^{-1}).

Dalam kasus substrat organik kompleks, yang umumnya diekspresikan sebagai COD (Zaiat *et al.*, 2000; Cho and Young, 2001; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005; Cho and Young, 2001; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005; Cubas *et al.*, 2007). COD suatu bagian substrat yang susah terdegradasi (Faisal and Unno, 2001). Semakin besar reduksi COD, berarti bahan organik yang terdegradasi menjadi asam-asam organik juga semakin besar. Asam-asam organik inilah yang kemudian terkonversi menjadi gas metana, artinya jika reduksi COD semakin besar maka laju pembentukan gas metana juga semakin besar (Widjaja, *et al.*, 2008). Tahap metanasi merupakan tahap yang dapat mereduksi COD air limbah paling tinggi. Pada temperatur dan tekanan standard 0,454 kg COD dapat menghasilkan 0,16 m³ gas metana (Eckenfelder, 1980).

2.4.1. Perpindahan Massa

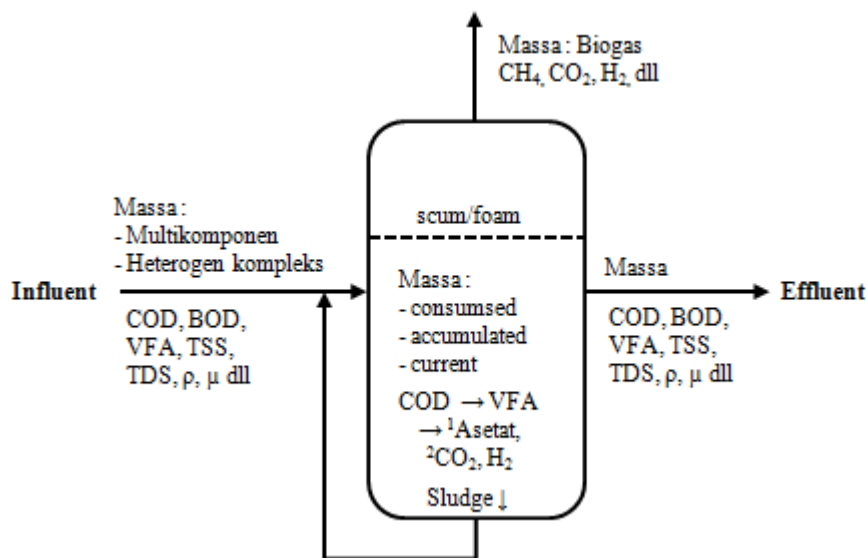
Perpindahan massa antar fase (cair-gas) terjadi karena adanya beda konsentrasi antar kedua fase, sebagaimana pada Gambar 2.5. Perpindahan massa dapat terjadi pada fase cair, fase gas, atau pada kedua fase secara bersamaan. Dan dapat terjadi dengan sistem multi-fasa ataupun sistem satu fasa (Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990; Thibodeaux, 1996; Geankoplis, 2003).



Gambar 2.5. Perpindahan massa dari fase padat ke fase cair ke fase gas

Pada campuran fluida yang terdiri atas dua komponen atau lebih akan terjadi perbedaan konsentrasi. Perbedaan konsentrasi ini akan menyebabkan perpindahan ke arah yang akan menurunkan perbedaan konsentrasi tersebut. Proses ini dikenal sebagai proses perpindahan massa (Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990).

Penggunaan COD sebagai parameter kontrol dan operasi pada proses pengolahan anaerobik sangat beralasan karena biodegradasi yang sangat berbeda. Dimana substrat organik kompleks dalam fase padat “ditata-ulang” dengan memutus dan menyambung ikatan organiknya menjadi CH_4 dan CO_2 dalam fase gas (van Lier *et al.*, 2008). Pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, proses perpindahan massa antar fase yang terjadi dijabarkan seperti terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Kestimbangan Massa Substrat pada Sistem Multikomponen (modifikasi dari: Batstone, 2006; van Lier *et al.*, 2008)

Pada sistem multikomponen, keadaan proses perpindahan massa difusi zat terlarut adalah sangat kompleks. Dimana fluks sebuah komponen akan bergantung pada gradien $n - 1$ buah komponen lain (Reid *et al.*, 1991). Dan setiap komponen “berpindah” dengan kecepatan yang berbeda-beda; sehingga membutuhkan perhitungan kecepatan masing-masing komponen (Welty *et al.*, 2007). Sangat sulit menjabarkan sebuah komponen zat terlarut secara parsial tanpa melihat

keseluruhan proses biodegradasi dekomposisi fisis, kimia dan biologis multikomponen terlarut tersebut. Sehingga dibutuhkan suatu konsentrasi substrat yang mewakili keseluruhan komponen zat terlarut dalam campuran tersebut. Dan konsentrasi substrat diekspresikan dengan *dissolved organic matter* sebagai COD (Christensen *et al.*, 2001; Hassan and Xie, 2014). Dimana konsentrasi substrat dan parameter yang menggambarkan keseluruhan komponen, dibutuhkan untuk memprediksi koefisien perpindahan massa, dan korelasi empiris yang terkait variabel-variabel peubah dan bilangan tak-berdimensi.

2.4.2. Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa (k_L) merupakan tingkat kemudahan suatu massa senyawa untuk berpindah dari suatu fase ke fase yang lain (Mirwan, 2013). Koefisien perpindahan massa fase liquid adalah suatu fungsi sifat fisik liquid dan kecepatan superfisial liquid (Zaiat *et al.*, 2000; Abdelgadir *et al.*, 2014). Koefisien perpindahan massa keseluruhan dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu dari perhitungan dan eksperimen. Nilai koefisien perpindahan massa dipengaruhi oleh sifat fisis cairan, viskositas, densitas, tegangan permukaan, difusivitas zat terlarut dalam cairan, bentuk dan ukuran alat, kecepatan putar pengaduk, dan turbulensi (Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990; Thibodeaux, 1996; Geankoplis, 2003; Mirwan, 2013).

Penelitian tentang koefisien perpindahan massa amonia pada limbah cair peternakan babi dilaporkan bahwa k_L meningkat dengan meningkatnya temperatur limbah (Arogo *et al.*, 1999). Jika perpindahan massa fase cair sebagai pembatas laju proses keseluruhan, maka k_L dapat diperkirakan dengan persamaan (Zaiat *et al.*, 2000; Cho and Young, 2001), sebagai berikut:

$$N_L = k_L(S_b - S_i) \quad 2.28.$$

Dimana, N_L : fluks perpindahan massa fase liquid, (mg/cm².h); k_L : koefisien perpindahan massa fase liquid; S_b : konsentrasi substrat pada bulk liquid, (mg COD/L); dan S_i : konsentrasi substrat pada solid-liquid interface, (mg COD/L). Beberapa penelitian perpindahan massa yang mengekspresikan COD sebagai konsentrasi substrat terlihat pada Tabel 2.7.

k_L adalah kecepatan spesifik dari perpindahan massa. k_L dinyatakan dalam konsentrasi substrat yang terdegradasi per unit waktu, per unit luas kontak, per unit beda konsentrasi. k_L bergantung pada sifat fisik dari sistem dan dinamika fluida. k_L pada kenyataannya merupakan faktor yang proposional antara fluks massa dari substrat (N_s) dan gradien konsentrasi yang dinyatakan dengan persamaan dibawah ini (Haryani dan Widayat, 2011):

$$N_s = k_L(C_1 - C_2) \quad 2.29.$$

Di dalam persamaan 2.29, notasi 1 dan 2 mengindikasikan dua titik massa yang berpindah dari satu fase ke fase lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Dalam kondisi riil perbedaan konsentrasi ini terjadi secara simultan, sehingga nilai konstanta perpindahan massa sangat berpengaruh.

Pada keadaan setimbang, perpindahan masa melalui fase cair akan sama dengan perpindahan masa pada fasa gas (McCabe *et al*, 1990; Thibodeaux, 1996; Geankoplis, 2003). Dengan demikian, sehingga diperoleh:

$$N_L = N_G \quad 2.30.$$

$$k_L(C_L - C_{Li}) = k_G(P_G - P_{Gi}) \quad 2.31.$$

2.4.3. Difusivitas Zat Terlarut

Dari mekanisme perpindahan massa, akan bergantung pada difusivitas dan variabel-variabel yang mengendalikan karakter aliran fluida yaitu: laju alir, viskositas, densitas, dan suatu dimensi linier (Treybal, 1984; Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990).

Difusi yang didasarkan pada modifikasi empirik dilaporkan oleh Wilke-Chang (McCabe *et al.*, 1990; Reid *et al.*, 1991). Dimana difusivitas larutan dapat dihitung dengan persamaan 2.32.

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B \cdot M_B)^{1/2} T}{\mu_L \cdot V_A^{0,6}} \quad 2.32.$$

Dimana:

D_L = difusi fase cair zat terlarut dan pelarut, cm^2/dt

T = temperatur, K

μ_L = viskositas larutan, cP

V_A = volume molar zat terlarut pada titik didih normal, cm^3/gmol

Ψ_B = parameter asosiasi pelarut (air = 2,6; metanol = 1,9; etanol = 1,5)

M_B = berat molekul pelarut ($18 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}$)

2.4.4. Faktor Yang Mempengaruhi Perpindahan Massa

Biodegradasi substrat organik yang tak diinginkan dalam pengolahan anaerobik dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses perpindahan massa adalah sebagai berikut:

1. Temperatur

Pada dasarnya temperatur berpengaruh pada sifat-sifat fisik liquid (viskositas, densitas dan diffusivitas massa zat terlarut) yang berpengaruh pada dispersi zat terlarut dalam liquid (Arogo *et al.*, 1999). Temperatur mempengaruhi aktivitas metabolisme mikroorganisme, laju biodegradasi (terutama laju hidrolisis dan metanogenesis), kecepatan perpindahan dan karakteristik *biosolids* (Stronach, 1986; Tchobanoglous *et al.*, 2004), serta berpengaruh terhadap viskositas air limbah dan aktivitas mikroorganisme (Mahmoud *et al.*, 2003; Abdelgadir *et al.*, 2014). Dan temperatur juga berpengaruh penting pada sifat kimia fisik substrat organik yang terdapat dalam bioreaktor (Appels *et al.*, 2008), serta mempengaruhi biodegradasi substrat melalui viskositas air limbah dan konversi bahan organik (Abdelgadir *et al.*, 2014).

Penelitian tentang densitas dan viskositas lindi pada temperatur yang berbeda, diperoleh bahwa densitas dan viskositas menurun dengan meningkatnya temperatur. Dimana densitas lindi pada temperatur 30°C, 35°C, 40°C dan 45°C berturut-turut adalah 1,00098; 0,99933; 0,99748 dan 0,99544 g/cm^3 . Sedangkan viskositas lindi pada temperatur 30°C, 35°C, 40°C dan 45°C berturut-turut adalah 0,842415; 0,755405; 0,707945 dan 0,652575 cSt (Souza *et al.*, 2014).

Penelitian pengaruh temperatur terhadap koefisien perpindahan massa pada proses ekstraksi dilakukan secara *batch*, menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa, k_L meningkat dengan semakin meningkatnya temperatur 30°C, 45°C dan 60°C, berturut-turut adalah 0,0177 menit^{-1} , 0,0205 menit^{-1} dan 0,0235 menit^{-1} (Mardina *et al.*, 2012). Dan pada penentuan koefisien perpindahan

massa pada proses pelarutan, pada temperatur 20°C dan 53°C, berturut-turut adalah $25,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ dan $32,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (Tamas *et al.*, 2007).

2. pH

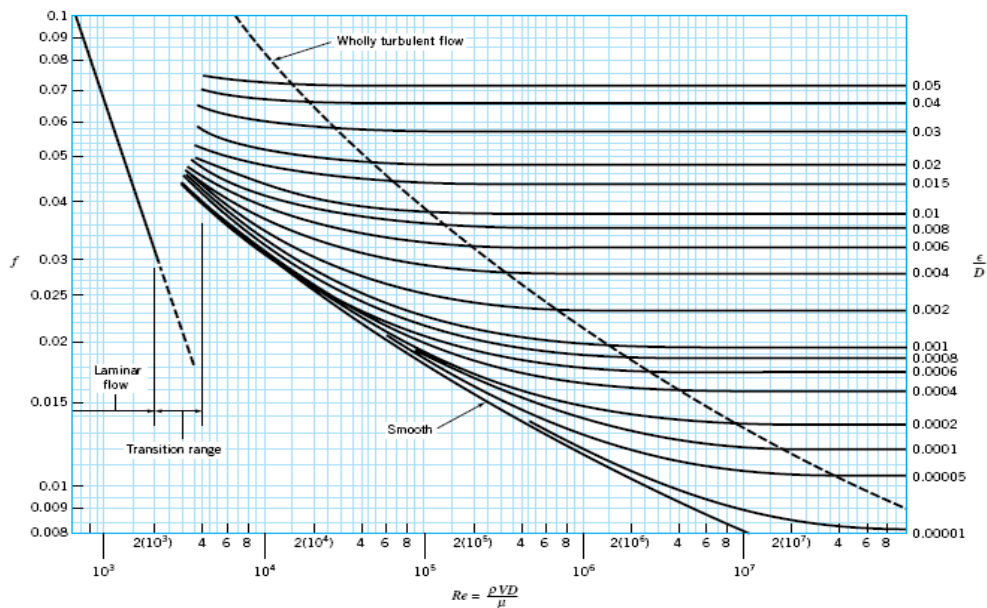
Penelitian tentang pengaruh pH pada bioreaktor anaerobik dua-fase, melaporkan bahwa bioreaktor asidogenik yang dipertahankan pada pH 6,0-7,0; menghasilkan penurunan SCOD dari 6.000 mg/L menjadi 1,000-1,500 mg/L, sehingga efisiensi $\text{COD}_{\text{removal}}$ meningkat dari 50% menjadi 80%. Dan produksi metana $0,32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg COD}_{\text{removed}}$ dengan kandungan metana pada bioreaktor metanogenik 80-90%. Sedangkan pada tanpa kontrol pH, kondisi pH pada bioreaktor asidogenik meningkat sampai 8,2; konversi asam menurun tetapi penurunan COD hampir serupa dengan pH yang dikontrol pada 6,0-7,0. Hanya saja tanpa kontrol pH, kandungan metana dari bioreaktor metanogenik meningkat lebih 90% (Jung *et al.*, 2000).

Penelitian lain melaporkan bahwa konstanta laju hidrolisis tergantung pada pH tetapi tidak berhubungan dengan total dan konsentrasi VFA (Veeken *et al.*, 2000).

3. Laju Alir Resirkulasi

Peningkatan perpindahan massa pada bioreaktor sistem batch juga dapat ditingkatkan dengan sirkulasi. Pada kebanyakan operasi perpindahan massa, aliran *turbulent* diperlukan untuk meningkatkan laju perpindahan massa per satuan luas atau untuk membantu mendispersikan fluida yang satu di dalam fluida yang lain sehingga memberikan lebih banyak lagi antarmuka. Karakteristik dan sifat aliran berpengaruh terhadap perpindahan massa (Treybal, 1984; McCabe *et al.*, 1990; Thibodeaux, 1996). Karakteristik dan sifat aliran dinyatakan dengan Bilangan *Reynolds*, N_{Re} . N_{Re} menyatakan batasan antara aliran laminar dan aliran *turbulent*, sebagai berikut: aliran laminar dengan $N_{Re} \leq 2000$; aliran transisi aliran *laminar* dan *turbulent* dengan $N_{Re} = 2000-4000$; dan aliran *turbulent* dengan $N_{Re} \geq 4000$, seperti terlihat pada Gambar 2.7. Namun untuk laju alir fluida yang mengandung bahan organik volatil tidak berada pada kisaran *turbulent* tetapi berada pada aliran

laminer dengan kisaran bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 100 - 400$ (Crites *et al.*, 2006; US EPA, 2006).



Gambar 2.7. Diagram Moody (sumber: McCabe *et al.*, 1990).

Penelitian ini menghasilkan bahwa resirkulasi air limbah juga dapat mempercepat penurunan COD ($COD_{removal}$), dari 116 mg COD/L tanpa sirkulasi menjadi 52-60 mg COD/L dengan sirkulasi. Sehingga efisiensi penyisihan substrat meningkat dari 72% tanpa sirkulasi menjadi 87% dengan sirkulasi (Ramos *et al.*, 2003).

Pada bioreaktor, resirkulasi memberikan keuntungan, pada kapasitas *steady-state* bioreaktor dapat dicapai walaupun laju pertumbuhan maksimum rendah dan stabilitas *steady-state* dapat ditingkatkan dengan resirkulasi (Leib *et al.*, 2001). Dilaporkan juga bahwa resirkulasi *effluent* (dengan ratio 6,7) diperlukan dalam meningkatkan pencampuran dan sebagai *buffer* pada pH ekstrim (2-4) (Visser *et al.*, 1993), memastikan pencampuran yang sempurna dalam bioreaktor (Appels *et al.*, 2008) dan mempercepat peningkatan aktivitas populasi mikroorganisme *methanogenic* (Tabatabaei *et al.*, 2011).

Pada penelitian variasi resirkulasi lindi, ditemukan bahwa resirkulasi lindi yang kontinyu adalah tidak menguntungkan. Karena pada proses *start-up* beresiko tinggi pada asidifikasi dan akibatnya menghambat produksi metana, sehingga

disarankan dengan cara *intermittent*, selama *start-up* dan pada saat proses berlangsung (Kusch *et al.*, 2012).

Penelitian tentang pengaruh resirkulasi lindi dan pH melaporkan bahwa resirkulasi mempercepat laju pembentukan VFA dan produksi metana bila dibandingkan antara yang diresirkulasi dengan yang tidak diresirkulasi (Vavilin *et al.*, 2002).

2.5. Teknik dan Analisis Pengolahan Data

Analisis perpindahan massa yang dilakukan menggunakan data konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD (Zaiat *et al.*, 2000; Cho and Young, 2001; Crites *et al.*, 2006; Haryani dan Widayat, 2011). Beberapa penelitian terkait terdahulu dengan konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD, disajikan pada Tabel 2.7.

Perpindahan massa antar fase cair-gas terjadi karena adanya beda konsentrasi antar kedua fase. Dalam penelitian ini perpindahan massa terjadi yaitu substrat organik yang terbiodegradasi dari fase cair ke fase gas. Kecepatan perpindahan massa ini dapat ditentukan dengan koefisien perpindahan massa. Koefisien perpindahan massa substrat dapat diukur dengan metode dinamik. Metode ini didasarkan pada konsentrasi substrat dalam lindi sebagai fungsi waktu. Data analisis COD yang diekspresikan sebagai konsentrasi substrat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa fase cair, k_L berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{dS}{dt} = k_L S \quad 2.33.$$

Persamaan 2.33 dapat diintegrasikan secara langsung. Karena pada awalnya, pada $t = 0$, konsentrasi substrat S adalah $[S]_0$, maka pada $t = t$, konsentrasi substrat S adalah $[S]_t$, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$-\int_{[S]_0}^{[S]_t} \frac{d[S]}{[S]} = \int_0^t k_L dt \quad 2.34a.$$

Hasil integrasi dari persamaan 2.32 diperoleh:

$$-\ln \frac{[S]_t}{[S]_0} = k_L \cdot t \quad 2.34b.$$

Persamaan ini ditata ulang menjadi:

$$\ln \frac{[S]_0}{[S]_t} = k_L \cdot t \quad 2.35a.$$

$$[S]_t = [S]_0 \cdot e^{-k_L \cdot t} \quad 2.35b.$$

Persamaan 2.35a. menunjukkan bahwa jika $\ln \frac{[S]_0}{[S]_t}$ dialurkan terhadap t ,

maka akan menghasilkan garis lurus. Jika grafik tersebut berupa garis lurus maka membuktikan bahwa reaksi ini adalah orde kesatu dan harga k dapat diperoleh dari kemiringannya (yang sama dengan $-k_L$). Persamaan 2.33.b. menunjukkan bahwa konsentrasi substrat berkurang secara eksponensial terhadap waktu, dengan laju yang ditentukan oleh k_L .

2.6. Korelasi Empirik dalam bentuk Analisis Bilangan Tak-Berdimensi

Untuk sistem kompleks, perpindahan massa biasanya dideskripsikan dengan analisis bilangan tak-berdimensi (*dimensionless number analysis*) dalam bentuk korelasi empirik antar bilangan terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh (Jördening and Buchholz, 2005). Keuntungan menggunakan bilangan tak-berdimensi adalah dapat dipergunakan untuk beberapa skala sistem. Dan bilangan yang biasa digunakan dalam korelasi perpindahan massa adalah Bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; Bilangan *Schmidt*, N_{Sc} , dan Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} (Arogo *et al.*, 1999).

Koefisien perpindahan massa k_L , bergantung pada diffusivitas dan variabel-variabel yang mempengaruhi karakteristik aliran, yaitu: laju alir, viskositas, densitas, dan suatu dimensi linier (Treybal, 1984; Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990). Sehingga dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$k = f(D_v, di, v, \mu, \rho) \quad 2.36.$$

Analisis dimensional menghasilkan persamaan (Treybal, 1984; Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990; Arogo *et al.*, 1999) sebagai berikut:

$$N_{Sh} = f(N_{Re}, N_{Sc}) \quad 2.36a.$$

$$N_{Sh} = C_K (N_{Re})^a (N_{Sc})^b \quad 2.36b.$$

$$\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} = k_1 \cdot \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu}, \frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right) \quad 2.37.$$

Bilangan *Reynolds*, N_{Re} didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia dengan gaya kekentalan, dalam lapis batas kecepatan. Untuk harga N_{Re} yang tinggi, gaya inersia akan lebih berpengaruh daripada gaya kekentalan. Untuk harga N_{Re} yang rendah, gaya kekentalan akan lebih berpengaruh dari gaya inersia. N_{Re} menggambarkan keadaan atau rezim aliran resirkulasi fluida (Treybal, 1984; Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990).

$$N_{Re} = \frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad 2.38.$$

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc} : yaitu sifat fluida untuk korelasi difusivitas massa.

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} \quad 2.39.$$

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} merupakan bilangan tak berdimensi yang umum digunakan untuk menunjukkan perpindahan massa yang terjadi pada fluida isothermal, dalam hal ini perpindahan masa antara zat organik dan anorganik terlarut dengan pelarut. N_{Sh} ini tidak hanya berkaitan dengan koefisien perpindahan massa, tetapi juga merupakan fungsi dari N_{Re} dan N_{Sc} (Treybal, 1984; Bennet and Myers, 1985; McCabe *et al.*, 1990).

$$N_{Sh} = \frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \quad 2.40.$$

dimana:

k_L = koefisien perpindahan, $\text{kgmol/mnt.m}^3 \cdot \text{atm}$ atau cm/s

d_i = diameter dalam bioreaktor, cm atau m

D_L = diffusivitas, cm^2/s

v = laju alir, cm/s

ρ = densitas, g/cm^3

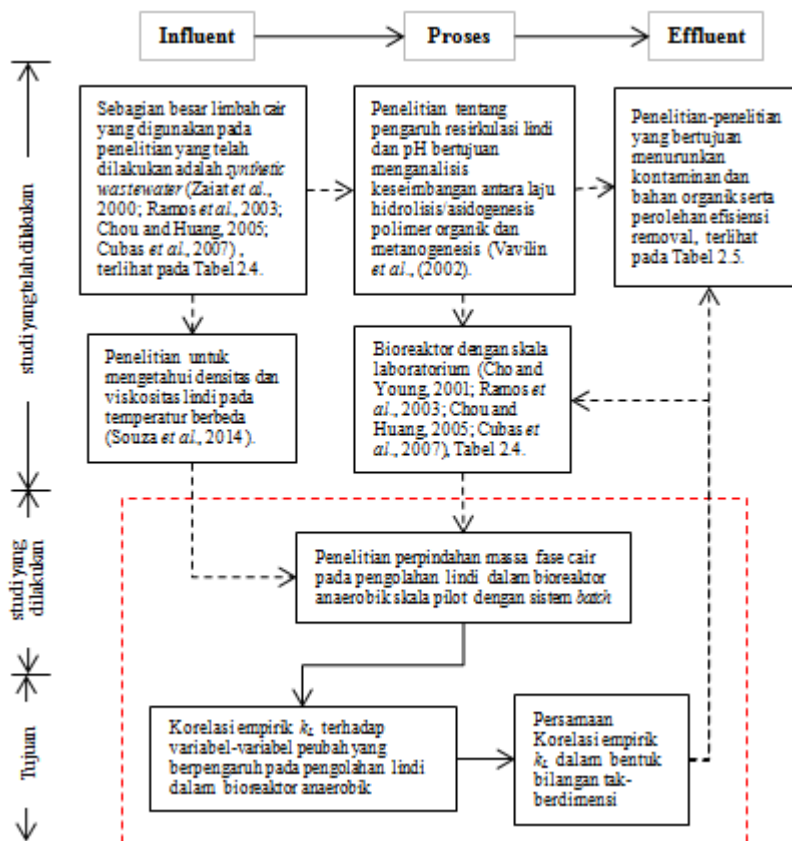
μ = viskositas, $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$

2.7. Kebaharuan Penelitian

Penelitian tentang perpindahan massa dalam bioreaktor dengan melibatkan mikroorganisme belum banyak dilakukan (Widayat *et al.*, 2011). Sedangkan penelitian perpindahan massa yang mengekspresikan konsentrasi substrat sebagai COD pada pengolahan limbah cair secara anaerobik telah banyak diteliti. Seperti terlihat pada Tabel 2.7. Hanya saja, sebagian besar limbah cair yang digunakan pada penelitian perpindahan massa terdahulu adalah *synthetic wastewater* (Zaiat *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005; Cubas *et al.*, 2007) dan pada skala laboratorium (Cho and Young, 2001; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005; Cubas *et al.*, 2007). Sedangkan penelitian ini limbah cair yang digunakan adalah lindi dari TPA Sambutan, Samarinda dan dalam skala pilot.

Penelitian Souza *et al.* (2014), bertujuan untuk mengetahui densitas dan viskositas lindi pada temperatur yang berbeda. Sedangkan penelitian Vavilin *et al.* (2002), mengenai bioreaktor anaerobik limbah padat tentang pengaruh resirkulasi lindi dan pH bertujuan menganalisis keseimbangan antara laju hidrolisis/asidogenesis polimer organik dan metanogenesis. Begitu juga penelitian terkait yang terlihat pada Tabel 2.8. Dimana penelitian-penelitian tersebut berusaha menurunkan kontaminan dan bahan organik serta memperoleh efisiensi removal tanpa menganalisis korelasi empirik variabel-variabel peubah yang berpengaruh dalam bentuk bilangan tak-berdimensi.

Hingga saat ini penelitian tentang perpindahan massa dan korelasi empirik k_L pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik belum pernah dilakukan dan belum ada publikasi ilmiahnya. Hal inilah yang menjadi kebaharuan (*novelty*) penelitian ini, seperti terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Posisi penelitian ini pada peta penelitian perpindahan massa dalam bioreaktor anaerobik

Penelitian ini juga berusaha menyamakan persepsi dalam pengolahan lindi, yaitu pandangan antara kualitas hasil olahan dan kualitas proses. Serta memposisikan penelitian ini sebagai pengembangan dan jembatan penghubung dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Tabel 2.7. Penelitian perpindahan massa yang telah dilakukan

Bioreaktor	Air Limbah	V _R , L	HRT	Temp. (°C)	COD _{Inf.} (mg/L)	COD _{Rem.} (%)	Koefisien Perpindahan Massa, k _L	References
HAIB (pilot-scale)	Glucose-based synthetic substrate	237	8 h	30	2.090-41	98	3.40.10 ⁻² cm/h	Zaiat <i>et al.</i> , 2000
	Domestic Sewage		8 h	30	341-71	79.2	2.23.10 ⁻¹ cm/h	Zaiat <i>et al.</i> , 2000
Two-stage Anaerobic Filter	Brewery wastewater	7.45 dan 6.55	0.5-6 d	35	1.500-2.500 (OLR 0,5-20 g SCOD/L.d)	98.2	1.4-2.2 d ⁻¹	Cho and Young, 2001
Fixed-Bed ASBR	Synthetic Wastewater (Polyurethane Foam)	1.2	8 h	30	500-68	72-87	1.98-1.85 h ⁻¹	Ramos <i>et al.</i> , 2003
UASB	Synthetic Wastewater (phenol)	3.78	0.97-1.03 d	35	10.53-12.61 kg COD/m ³ .d	99.3-96.3	19.2 mg phenol/L	Chou and Huang, 2005
SASBR	Synthetic Wastewater (Polyurethane Foam)	5	8 h	30	508±22	84-89	0.48-0.60 h ⁻¹	Cubas <i>et al.</i> , 2007

Keterangan:

HAIB : *Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Biomass*UASB : *Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactors*ASBR : *Anaerobic Sequencing Batch Reactor*SASBR : *Stirred Anaerobic Sequencing Batch Reactor*

Tabel 2.8. Beberapa Penelitian Terkait Yang Telah Dilakukan

Bioreaktor	Air Limbah	HRT (hari)	Temp. (°C)	COD _{Inf.} (mg/L)	COD _{Rem.} (%)	Biogas Production (Nm ³ /kg COD _{rem.})	References
UASB	RPH	24	30	4.175	90	0,34	Manjunath <i>et al.</i> , 2000.
MABR	POME	3-10	-	16.000	87,4-95,3	0,32-0,42	Faisal dan Unno, 2001
<i>Two-stage Anaerobic Filter</i>	<i>Brewery wastewater</i>	0,5-6 d	35	1.500-2.500 (OLR 0,5-20 g SCOD/L.d)	98,2	0,04 mg VSS/mg COD	Cho and Young, 2001
<i>Fluidized-Bed</i>	<i>Extracted Sunflower Flour</i>	4,5-20	15-19	11.300	69-95.9	0,32	Borja <i>et al.</i> , 2002.
UASB	RPH	2-7	30-33	6.037	75	0,3	Torkian <i>et al.</i> , 2003.
AFBR	Lindi	1	35	10.000-50.000 (OLR 2,5-37 kg COD/m ³ .d)	80-90	0,50-0,52 L/g COD _{rem}	Gulsen and Turan, 2004.
UASB	<i>Simulated Textile Wastewater</i>	100-6 h	37	4.214 (OLR 1-15,8 kgCOD/m ³ .d)	80-29.5	1.330-7.115 mL/d	Isik and Sponza, 2005
UASB	Lindi	5,1-6,6	37 (pH 7,1-8,5)	15.700 (OLR 1-2,4 g COD/l d)	66-90	0,053 g VSS/g COD _{removed}	Fang <i>et al.</i> , 2005
UASFF	POME	1-6	38	5.260-3.472,5	80,6-98,6	0,287-0,348	Zinatizadeh <i>et al.</i> , 2006.
Anaerobik	Industri Kertas	14-28	-	2.196-509	76,8	0,14 L/g VSS	Purwati dan Soetopo, 2006.
UASB		5	35	2,7-5,2 (OLR (gCOD/L.d)	94-98	0,24-0,32 (L CH ₄ /gCOD)	
UASB	<i>Food-Processing Wastewater</i>	2,5-1,25	35	1,3-8,0 (OLR (gCOD/L.d)	84-89	0,24-0,48 (L CH ₄ /gCOD)	Jeganathan <i>et al.</i> , 2006.
PBR+UASB		2,5-1,25	35	1,3-4,2 (OLR (gCOD/L.d)	86-90	0,18-0,42 (L CH ₄ /gCOD)	
<i>Anaerobic</i>	<i>Food Waste</i>	10-12	40-55	9.800	83	119-223	Kim <i>et al.</i> , 2006.

Bioreaktor	Air Limbah	HRT (hari)	Temp. (°C)	COD _{Inf.} (mg/L)	COD _{Rem.} (%)	Biogas Production (Nm ³ /kg COD _{rem.})	References
<i>Digestion</i>						L CH ₄ /kg	
UASFF	POME	3-1,5	38	1,8-23,2 (OLR (gCOD/L.d)	89-97	sCOD _{degraded} 0,31-0,35 (L CH ₄ /gCOD)	Najafpour <i>et al.</i> , 2006.
UASB	<i>Synthetic Wastewater</i>	24,4-1,9	35	20 (OLR 0,82-10,4 gCOD/L.d)	83-99	112-322 L CH ₄ g COD _{rem}	Wong <i>et al.</i> , 2007
UASFF	<i>Dairy Wastewater</i>	3-4 (36-48 jam)	36	50.000-70.000	97,5	3,6-3.75 L/d	Najafpour <i>et al.</i> , 2008.
<i>Anaerobic Digestion (Two-phase)</i>	<i>Swine Feces</i>	16-12	-	3,6-4,9 (OLR kg-VS m ⁻³ .day ⁻¹)	60-50	468-423 (L/kg VS _{added})	Feng <i>et al.</i> , 2008.
	<i>Garbage</i>	13-10	-	3,1-5,4 (OLR kg-VS m ⁻³ .day ⁻¹)	81-91	845-511 (L/kg VS _{added})	
Fluidized-Bed Bioreaktor	<i>Sugar Industry</i>	8h	40	95.785 (OLR 39.513 kgCOD/m ³ .h)	76,82	0,835 m ³ /kgCOD/m ³ .h	Hossain <i>et al.</i> , 2009.
UASB	<i>Sugar Mill</i>	-	33-36	-	>90	0,355	Nacheva <i>et al.</i> , 2009.
UASB	<i>Domestic</i>	5-10	33	522	80	0,40	Sunny <i>et al.</i> , 2010.
UAF	RPH	24-48	35	6.196,75	85	-	Padilla dan López, 2010.
MAS	POME	400,6-5,7	70 (55 bars)	18.302-43.500	94,8-96,5	0,25-0,58	Abdurahman <i>et al.</i> , 2011.
<i>Anaerobic Two-Stage Anaerobic Bioreaktor</i>	Lindi	40	35	24.840	94	-	Safari <i>et al.</i> , 2011.
<i>Anaerobik AHR</i>	Industri Kertas	1-20	55	31.700	52,21	4,07-15,82 L/hari	Soetopo <i>et al.</i> , 2011.
	POME	14-6,5	35-45	15.000 – 66.000	70-65	0,35 m ³ CH ₄ /kgCOD	Chotwattanasak and Puetpaiboon, 2011.
	<i>Pharmaceutical</i>	30-3 h	30-35	32.256	91,25-68	1,2-8,7 L/d	Pandian <i>et al.</i> , 2011.

Bioreaktor	Air Limbah	HRT (hari)	Temp. (°C)	COD _{Inf.} (mg/L)	COD _{Rem.} (%)	Biogas Production (Nm ³ /kg COD _{rem.})	References
	<i>Wastewater (Penicillin-G Unit)</i>			(OLR 3,20-16,05 kg COD/m ³ .d)			
<i>Anaerobic Digestion (Batch)</i>	<i>Cow Dung</i>	10	53	2.200	48,5	0,15 L/kgVS	Abubakar and Ismail, 2012.
AFBR	<i>Dairy Wastewater</i>	1-5,5	<i>Ambient</i>	39.000 (OLR 24-4,4 kgCOD/m ³ .d)	24,2-82,1	0,07-0,18 L CH ₄ /g COD _{added}	Nikolaeva <i>et al.</i> , 2013.
ABR	<i>Algae-Laden Water</i>	10	30	3.000-7.000	80	99-293 mL/(L.d)	Yu <i>et al.</i> , 2014.

Keterangan:

HAIB : *Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Biomass*

UASB : *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UAF : *Upflow Anaerobic Filter*

RPH : *Rumah Pematangan Hewan*

MABR : *Modified Anaerobic Baffled Reactor*

POME : *Palm Oil Mill Effluent*

UASFF : *Up-Flow Anaerobic Sludge Fixed Film*

MAS : *Membrane Anaerobic System*

ABR : *Anaerobic Baffled Reactor*

AHR : *Anaerobic Hybrid Reactor*

UAF-B : *Upflow Anaerobic Fixed-Bed*

AFBR : *Anaerobic Fluidized Bed Reactor*

2.8. Desain Faktorial Tiga Level (3^k)

Desain penelitian faktorial 3^k adalah rancangan eksperimen faktorial yang terdiri atas k faktor, dimana setiap faktornya terdiri atas tiga level interaksi, yaitu: level lemah/rendah, level sedang/menengah dan level kuat/tinggi. Desain faktorial ini juga disebut desain faktorial 3^k dengan jumlah percobaan sebanyak 3^k . Penggunaan rancangan desain faktorial 3^k ini biasanya untuk menyelesaikan masalah optimasi (Berthouex and Brown, 2002; Montgomery, 2004).

Notasi-notasi yang digunakan dalam desain faktorial ini adalah:

1. Interaksi lemah dinotasikan dengan -1 atau $(-)$ atau 0 .
2. Interaksi sedang dinotasikan dengan 0 atau 1 .
3. Interaksi kuat dinotasikan dengan $+1$ atau $(+)$ atau 2 .

Pada desain faktorial 3^k terdapat tiga faktor yaitu faktor A, B dan C. Faktor A mempunyai jumlah level 3, faktor B mempunyai jumlah level 3, faktor C mempunyai jumlah level 3 dan jumlah replikasi yang harus dilakukan sebanyak n kali (Berthouex and Brown, 2002; Montgomery, 2004). Selanjutnya dengan *Half-Replicate Design* (Rancangan Setengah-Ulangan), diperoleh $(1/2) 3^k = n$ kelompok penelitian yang akan dilaksanakan (Berthouex and Brown, 2002; Montgomery, 2004).

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

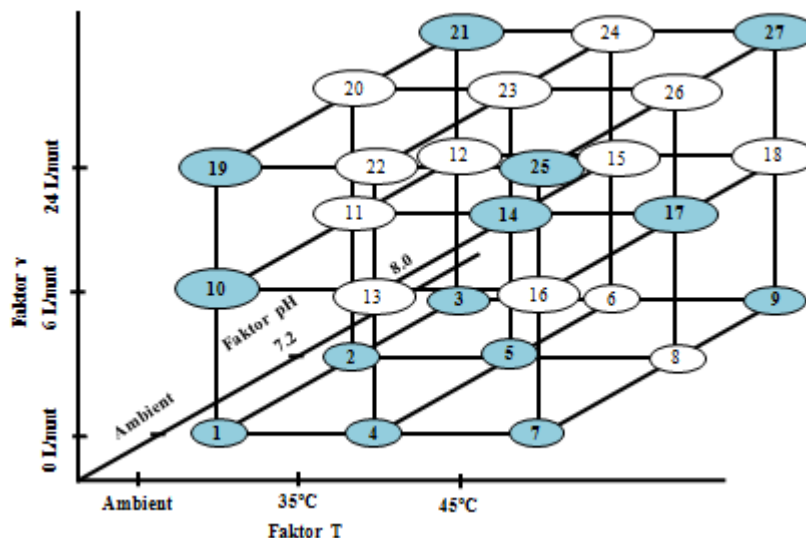
METODE PENELITIAN

3.1. Jenis dan Rancangan Penelitian

Jenis penelitian ini *experiment study* skala pilot dengan sistem *batch*. Subyek penelitian adalah lindi yang berasal dari TPA Sampah Sambutan, Samarinda, yang diambil dari bak penampungan yang akan masuk ke kolam anaerobik.

Rancangan penelitian yang digunakan adalah desain eksperimen faktorial 3^3 , interaksi tiga-faktor sehingga diperoleh 27 kelompok. Dimana temperatur sebagai Faktor A, pH sebagai Faktor B dan laju alir resirkulasi sebagai Faktor C. Selanjutnya dengan *Half-Replicate Design* (Rancangan Setengah-Ulangan), diperoleh $(1/2) 3^3 = 14$ kelompok penelitian yang akan dilaksanakan (Berthouex and Brown, 2002; Montgomery, 2004).

Adapun rancangan penelitian faktorial yang akan dilakukan dalam penelitian perpindahan massa biodegradasi substrat pengolahan lindi pada bioreaktor anaerobik adalah seperti pada Gambar 3.1. dan rancangan penelitian perpindahan massa dengan interaksi tiga-faktor pada Tabel 3.1.



Gambar 3.1. Tampak Geometrik Desain 3^3 dengan Faktor T, pH dan v

Pada pemilihan kelompok perlakuan, pertimbangan yang penting adalah interaksi lemah, sedang dan kuat antar tiga-faktor tersebut. Dimana kelompok interaksi ini adalah 1, 3, 7, 19, dan 27 (yang berwarna orange). Kemudian dipilih 9 (sembilan) kelompok dari 27 kelompok secara random (acak) dan diperoleh kelompok: 21, 25, 14, 17, 4, 10, 9, 2, dan 5 (yang berwarna biru), seperti terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Desain Eksperimen Perpindahan Massa dengan Interaksi Tiga-Faktor

Laju Alir Resirkulasi, v (Faktor C)	Temperatur, T (Faktor A)								
	T ₁			T ₂			T ₃		
	Derajat Keasaman, pH (Faktor B)								
	pH ₁	pH ₂	pH ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃
v_1	111 (1)	121 (2)	131 (3)	211 (4)	221 (5)	231 (6)	311 (7)	321 (8)	331 (9)
v_2	112 (10)	122 (11)	132 (12)	212 (13)	222 (14)	232 (15)	321 (16)	322 (17)	332 (18)
v_3	113 (19)	123 (20)	133 (21)	213 (22)	223 (23)	233 (24)	313 (25)	323 (26)	333 (27)

Sehingga kelompok penelitian yang akan dilaksanakan adalah kelompok penelitian 1, 3, 7, 19, 27, 21, 25, 14, 17, 4, 10, 9, 2, dan 5.

3.2. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Temperatur, T yang terdiri dari temperatur *ambient* (T₁) pada temperatur 27-30°C, *mesophilic* (T₂) pada temperatur 35°C sedangkan *thermophilic* (T₃) pada temperatur 45°C.
2. pH yang terdiri dari pH₁ = pH *ambient* lindi (6,3-8,0), pH₂ = 7,2; dan pH₃ = 8,0.
3. Laju alir volumetrik resirkulasi lindi, Q yang terdiri dari: Q_{R1} = tanpa resirkulasi 0 L/menit, Q_{R2} = 6 L/menit, dan Q_{R3} = 24 L/menit.

Dimana masing-masing variabel temperatur, pH dan laju alir resirkulasi akan berinteraksi, untuk melihat pengaruhnya terhadap perpindahan massa pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik. Pada pelaksanaan penelitian masing-masing variabel akan dipertahankan atau dibuat konstan terhadap

variabel-variabel lain pada setiap pengolahan lindi berlangsung. Dengan desain eksperimen faktorial 3^k , interaksi tiga-faktor, yaitu: T, pH dan v_R .

Penentuan temperatur dan pH didasarkan pada penelusuran pustaka. Untuk temperatur dipilih rentang yang sesuai dengan temperatur mikroorganisme anaerobik. Untuk pH dipilih yang optimum pada pengolahan anaerobik. Pada penelitian ini dipilih laju alir resirkulasi lindi adalah sebagai berikut:

1. v_{R1} adalah 0 L/s, dengan $N_{Re} = 0$.
2. v_{R2} adalah aliran laminar dengan $N_{Re} = 100$.
3. v_{R3} adalah aliran laminar dengan $N_{Re} = 400$.

Sedangkan variabel terikat dalam penelitian ini adalah pH, temperatur lindi ($^{\circ}\text{C}$), temperatur biogas ($^{\circ}\text{C}$), tekanan biogas (mm H_2O), densitas, ρ (g/cm^3), viskositas, μ ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$), COD (mg/L), BOD (mg/L) dan VFA (mg/L).

3.3. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 30 (tiga puluh empat) bulan, mulai dari pengajuan proposal, ujian kualifikasi doctoral, pelaksanaan penelitian, seminar kemajuan (*progress*), penilaian kelayakan disertasi, ujian disertasi tertutup sampai dengan sidang terbuka promosi doktor. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Lingkungan dan Laboratorium Operasi Teknik Kimia Fakultas Teknik Unmul, Samarinda.

3.4. Bahan Dan Alat

Bahan utama yang diperlukan adalah lindi dari TPA Sampah Sambutan, Samarinda. Bahan-bahan kimia untuk analisis COD metode dikromat. Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan metode refluks tertutup secara titrimetri, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) menggunakan metode *Winkler* berdasarkan prinsip titrasi iodometri, dan analisis VFA menggunakan Metode *Steam Distillation*. Densitas dan viskositas lindi diukur dengan menggunakan piknometer dan viskosimeter *Ostwald*.

Peralatan yang digunakan pada tahap penentuan pH dan waktu optimum *seeding* dan aklimatisasi, seperti pada Gambar 3.2. sedangkan peralatan yang digunakan pada tahap pengolahan lindi adalah bioreaktor anaerobik dengan perlengkapannya, seperti terlihat pada Gambar 3.3.

3.5. Prosedur Penelitian

3.5.1. Tahap 1: Karakterisasi Lindi dan Desain Bioreaktor

1. Karakterisasi dan Analisis Kualitas Lindi

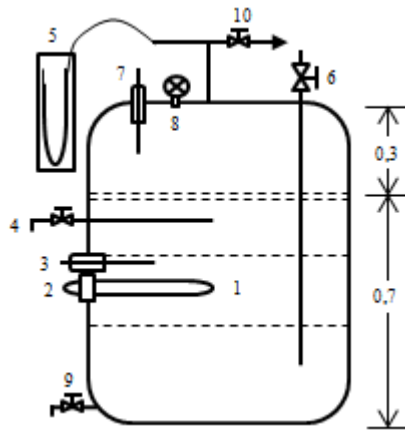
Parameter untuk karakterisasi meliputi parameter: pH, TSS, COD, BOD₅, amonia, nitrat, nitrit, densitas, viskositas dan VFA.

2. Perancangan Bioreaktor Anaerobik

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bioreaktor anaerobik dengan volume total ± 160 L. Setelah dilakukan karakterisasi dan analisis kualitas lindi, tahap selanjutnya adalah perancangan bioreaktor anaerobik dengan desain sesuai kebutuhan penelitian berdasarkan informasi yang diperoleh dari hasil studi literatur. Bioreaktor anaerobik dilengkapi dengan port sampling, gas holder sehingga, biogas yang dihasilkan diarahkan menuju biogas *collector* dan volumenya diukur dengan mengamati beda ketinggian dari manometer.

3. Uji Coba Kebocoran dan Kalibrasi

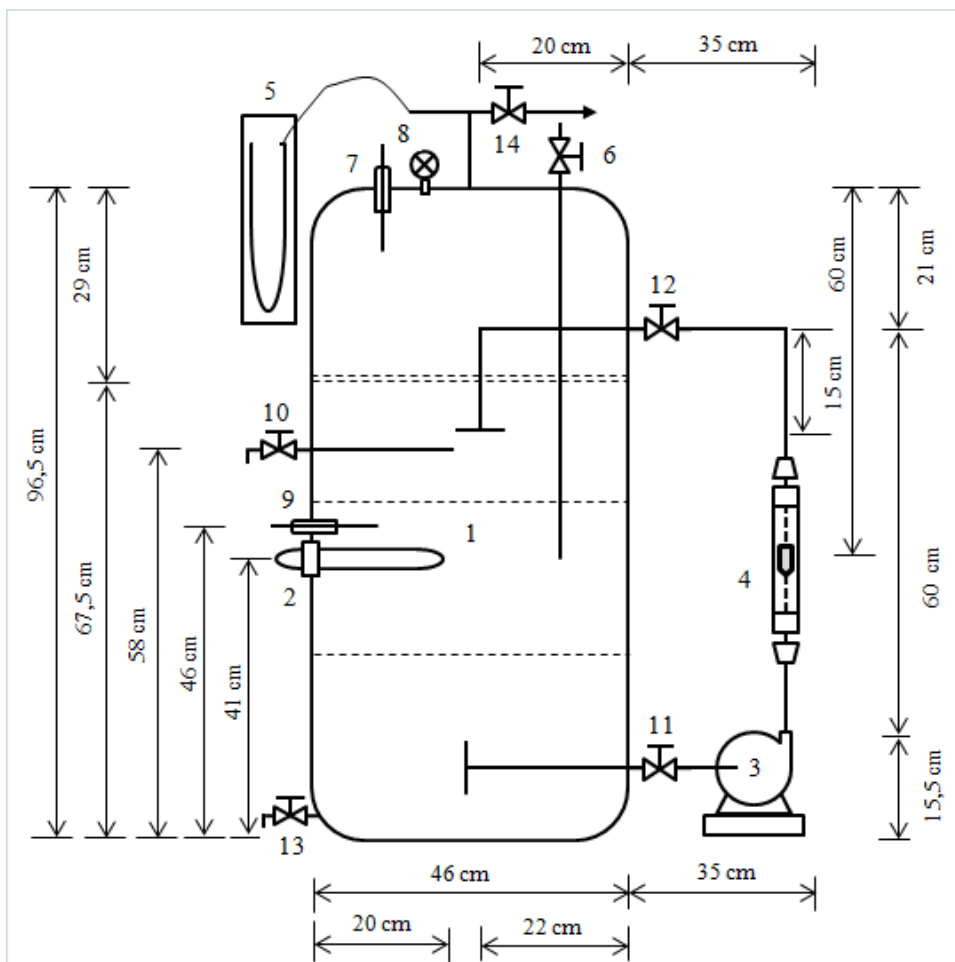
Setelah perancangan selesai, selanjutnya dilakukan uji kebocoran dan kalibrasi dari sistem bioreaktor anaerobik ini. Setelah dapat dipastikan bahwa sistem bioreaktor anaerobik yang dirancang tidak mengalami kebocoran, dengan cara meniupkan (memompakan) udara ke dalam biorektor. Pastikan bahwa tekanan udara awal pada manometer menunjukkan angka yang kurang lebih sama (± 400 mm H₂O), kemudian diamkan selama 24 jam (1 hari). Selanjutnya kalibrasi dapat dihentikan jika penurunan tekanan udara manometer pada masing-masing bioreaktor menunjukkan perbedaan $\pm 10\%$.



Gambar 3.2. Rangkaian bioreaktor *seeding* dan aklimatisasi

Keterangan:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Bioreaktor anaerobik | 6. Inlet umpan masuk lindi |
| 2. Pemanas | 7. Termometer biogas |
| 3. Termometer lindi | 8. <i>Pressure gauge</i> |
| 4. <i>Sampling port</i> | 9. <i>Effluent</i> lindi |
| 5. Manometer | 10. <i>Valve</i> biogas keluar |



Gambar 3.3. Rangkaian bioreaktor anaerobik yang digunakan

Keterangan:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Bioreaktor anaerobik | 8. <i>Pressure gauge</i> |
| 2. Pemanas | 9. Termometer lindi |
| 3. Pompa resirkulasi lindi | 10. <i>Sampling port</i> |
| 4. <i>Flowmeter</i> resirkulasi lindi | 11. Kran masuk resirkulasi lindi |
| 5. Manometer | 12. Kran keluar resirkulasi lindi |
| 6. Inlet umpan masuk lindi | 13. <i>Effluent</i> lindi |
| 7. Termometer biogas | 14. Ktan biogas keluar |

3.5.2. Tahap 2: Persiapan Lindi dan Proses Pengolahan

1. Persiapan Lindi

Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini adalah lindi yang diperoleh dari unit pengolahan limbah kolam anaerobik TPA Sambutan, Samarinda.

2. Persiapan Peralatan

Bioreaktor anaerobik yang digunakan dilengkapi dengan *settler* agar *sludge* tidak terikut keluar dari sistem, serta dilengkapi dengan termometer untuk mengukur temperatur dan manometer air untuk mengukur tekanan. Bioreaktor juga dilengkapi dengan tangki penampung biogas (*biogas collector*), untuk menampung biogas yang terbentuk serta termometer dan manometer air untuk mengukur temperatur dan tekanan biogas.

3. Penentuan pH dan Waktu Optimum *Seeding* dan Aklimatisasi

Penentuan pH dan waktu optimum ini dilakukan dalam bioreaktor anaerobik dengan volume total 27 L. Dimana 70% volume untuk lindi dan 30% untuk bagian biogas. Sehingga diperoleh perbandingan volume dalam bioreaktor untuk lindi : biogas = 19 L : 8 L.

Sebelum tahap *running*, mikroorganisme dimasukkan ke dalam bioreaktor anaerobik agar terjamin keberadaan bakteri. Dimana *seeding* bertujuan untuk menumbuhkan dan mengembangkan populasi mikroorganisme di dalam substrat yang akan diolah dalam bioreaktor. Sedangkan aklimatisasi bertujuan untuk mengadaptasikan dan penyesuaian diri mikroorganisme pada kondisi lingkungan yang baru, termasuk sumber makanannya.

Mikroorganisme yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari rumen sapi dan lindi dengan perbandingan 1 : 3 dan disaring untuk mendapatkan ekstraknya. Biomassa yang berasal dari ekstrak rumen sapi dan lindi diambil sebanyak 5 L, kemudian setiap hari ditambahkan 1,4 L lindi. Penambahan lindi ini

berlangsung selama 10 hari, sehingga volume totalnya 19 L (Firdha *et al.*, 2010; Priyono, 2012). Sebelum memasukkan ke dalam bioreaktor anaerobik, lindi dipanaskan pada temperatur 50°C, kemudian diumpankan ke dalam bioreaktor dan dipertahankan temperatur bioreaktor sesuai kebutuhan (Zaiat *et al.*, 2000). Pada tahap ini semua kondisi dilakukan pada pH *ambient* dan variasi temperatur *ambient*, 35°C dan 45°C. Proses aklimatisasi dapat dihentikan jika laju produksi biogas bertambah $\pm 10\%$ (Priyono, 2012).

Penentuan pH dan waktu optimum diambil dari rata-rata kondisi operasi terbaik. Dan hasil yang diperoleh pada tahap ini akan diterapkan pada bioreaktor dengan volume 160 L skala pilot.

4. Pengolahan Lindi Dalam Bioreaktor Anaerobik

Setelah diperoleh waktu optimum *seeding* dan aklimatisasi maka selanjutnya pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik skala pilot dengan volume 160 L. Sistem yang digunakan untuk proses pengolahan lindi adalah sistem batch. Dengan perbandingan yang sama untuk lindi dan biogas : 70:30, sehingga diperoleh volume untuk lindi : biogas = 112 L : 48 L. Selanjutnya $\pm 70\%$ dari 112 L yaitu 80 L digunakan untuk *seeding* dan aklimatisasi. Kemudian diambil sebanyak 8 L biomassa dari ekstrak rumen sapi dan lindi (1:3) diumpankan ke dalam bioreaktor. Selanjutnya setiap hari, sebanyak 7.2 L lindi dipanaskan pada temperatur 50°C dan diumpankan ke dalam bioreaktor. Langkah ini dilakukan selama 10 hari sehingga total volume *seeding* dan aklimatisasi adalah ± 80 L. Kemudian sisa 32 L lindi diumpankan pada kondisi tekanan biogas $\geq 10\%$. Sebanyak 8 L lindi dipanaskan pada temperatur 50°C dan kemudian diumpankan ke dalam bioreaktor. Langkah ini dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari keadaan pengumpanan lindi pada kondisi tekanan biogas berada pada keadaan eksponensial.

Dari tahap penentuan waktu optimum *seeding* dan aklimatisasi, diperoleh waktu *seeding* dan aklimatisasi masing-masing adalah 10 hari. Sehingga total waktu *seeding* dan aklimatisasi adalah 20 hari. Kemampuan pengolahan anaerobik dalam menurunkan substrat (COD) berkisar 60-80% dalam waktu 14 hari yang

direncanakan. Jika pada tahap pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik belum mencapai 60-80% dalam waktu 14 hari, maka waktu pengolahan akan ditambah 7 hari. Sehingga total waktu yang digunakan setiap kali *running* pengolahan lindi adalah 41 hari.

Umpan lindi yang sudah siap kemudian dimasukkan ke dalam bioreaktor melalui bagian atas. Lindi diresirkulasi dengan laju tertentu melalui bagian bawah masuk ke dalam bioreaktor melalui bagian atas. Laju alir resirkulasi lindi diatur dengan *flowmeter*. pH campuran diatur dengan larutan *buffer* untuk mengatur dan mempertahankan pH yang dikehendaki. *Thermocouple* digunakan untuk mempertahankan temperatur yang kehendaki pada pengolahan lindi dalam bioreaktor. Tekanan biogas yang dihasilkan volumenya diukur dengan mengamati perbedaan ketinggian pada manometer.

Adapun ketentuan proses pengolahan lindi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran, temperatur, tekanan bioreaktor dan produksi biogas dilakukan setiap hari.
2. Pengukuran volume biogas dilakukan setiap hari, sehingga total volume biogas adalah akumulasi produksi biogas harian.
3. Sampling dan pengambilan data (pH, temperatur, temperatur biogas, dan tekanan biogas) dilakukan pada waktu yang sama.
4. Resirkulasi lindi dilakukan selama ± 6 jam per harinya.
5. Sampling dilakukan minimal setelah ± 1 jam pompa resirkulasi dimatikan.
6. Analisis COD dilakukan setiap dua hari sekali.
7. Proses pengolahan lindi dihentikan jika persentase penurunan COD ($\text{COD}_{\text{removal}}$) telah mencapai 60-80 % ($\text{COD}_{\text{removal}}$ optimum rata-rata dari proses anaerobik) atau telah menunjukkan penurunan yang stasioner (tetap).

5. Analisis Hasil Pengolahan Lindi

Selama proses pengolahan lindi berlangsung, analisis sampel dilakukan pada effluent, meliputi parameter: pH, BOD, COD, VFA (asam asetat), densitas lindi, viskositas lindi, temperatur lindi, temperatur biogas, dan tekanan biogas.

Karakterisasi dan analisis kualitas lindi dilakukan dengan *standard method* (APHA, 1989). Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD) menggunakan metode kalium dikromat dengan refluks tertutup secara titrimetri, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) menggunakan metode *Winkler* berdasarkan prinsip titrasi iodometri, dan analisis VFA menggunakan metode *Steam Distillation*. Densitas dan viskositas lindi diukur dengan menggunakan piknometer dan viskosimeter *Ostwald*.

6. Analisis Data

Sebelum dilakukan analisis pengaruh, data penelitian terlebih dahulu dilakukan uji normalitas dan uji homogenitas. Uji normalitas data dilakukan untuk mengetahui distribusi atau sebaran data penelitian. Sedangkan uji homogenitas bertujuan untuk mengetahui varians data bersifat homogen atau heterogen berdasarkan faktor-faktor tertentu yang dilakukan pada penelitian.

Uji normalitas menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Uji normalitas data dilakukan dengan metode *Kolmogorov-Smirnov*. Sedangkan untuk uji homogenitas data dilakukan dengan metode *Levene test*. Pada uji homogenitas dengan *Levene test*, data tidak harus berdistribusi normal namun harus kontinue.

Selanjutnya, apabila data tidak terdistribusi normal atau tidak homogen maka harus ditransformasi terlebih dahulu sehingga data menjadi normal dan homogen. Transformasi data umumnya dilakukan dengan metode *Box-Cox*.

Setelah data terbukti normal dan homogen, maka uji pengaruh masing-masing perlakuan terhadap pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik akan dianalisis secara statistik dengan metode *analysis of variance* (ANOVA), dapat dilakukan. Kemudian analisis dilanjutkan dengan uji Berganda Duncan pada variasi perlakuan yang berpengaruh nyata dari hasil uji ANOVA. Uji Berganda Duncan bertujuan untuk menentukan kondisi optimum pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.

Pengujian statistik (uji normalitas, uji homogenitas dan uji ANOVA) untuk mengetahui berapa besar interaksi antar variabel-variabel peubah pada rancangan penelitian faktorial 3^k ini dilakukan dengan menggunakan Minitab 16.1.

3.5.3. Tahap 3: Penentuan Koefisien Perpindahan Massa Pengolahan Lindi Pada Bioreaktor Anaerobik

Selanjutnya dari data-data COD, densitas lindi, viskositas lindi, temperatur lindi, temperatur biogas, dan tekanan biogas, yang dihasilkan digunakan untuk menganalisis: 1. Menentukan pengaruh temperatur, pH dan laju alir resirkulasi terhadap densitas, viskositas, BOD, COD dan VFA pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobic; 2. Menentukan koefisien perpindahan massa pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobic, 3. Menentukan korelasi empirik koefisien perpindahan massa terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.

Penentuan korelasi empirik koefisien perpindahan massa terhadap variabel-variabel yang berpengaruh pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik digunakan analisis dimensional bilangan tak-berdimensi.

Diskusi yang akan dikembangkan dalam pembahasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh T, pH dan v_R terhadap perpindahan massa pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, seperti grafik hubungan antara T vs perpindahan massa, pH vs perpindahan massa dan v_R vs perpindahan massa.
2. Pengaruh konsentrasi substrat terhadap perpindahan massa pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.
3. Pengaruh perubahan konsentrasi substrat terhadap viskositas dan densitas pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.
4. Pengaruh temperatur terhadap viskositas dan densitas lindi pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik.
5. Pengaruh variabel-variabel peubah yang berpengaruh terhadap koefisien perpindahan massa fase cair dalam bentuk analisis bilangan tak-berdimensi, seperti pengaruh sifat aliran terhadap koefisien perpindahan massa.

3.6. Korelasi Empirik Bilangan Tak-berdimensi

Data perpindahan massa fasa cair pengolahan lindi akan diringkas menjadi sebuah persamaan empirik dalam bentuk bilangan tak-berdimensi. Analisis dimensi dapat diselesaikan menggunakan metode *Buckingham's π Theorem* (Geankoplis, 2003; Prasetyo dan Yosephine, 2012; Klöckner *et al.*, 2013).

Koefisien pangkat pada bilangan tak berdimensi ditentukan dengan metode menggunakan metode *Buckingham's π Theorem*. Oleh karenanya, nilai bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} , dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} yang diperoleh ditransformasi ke dalam bentuk logaritma, sehingga diperoleh persamaan 3.1.

$$N_{Sh} = C_K N_{Re}^a N_{Sc}^b \quad 2.36b.$$

$$\ln N_{Sh} = \ln C_k + a \ln N_{Re} + b \ln N_{Sc} \quad 3.1.$$

Tahapan untuk menyelesaikan persamaan 3.1, sebagai berikut:.

Langkah 1, penyelesaian hubungan N_{Sh} vs N_{Re} , sebagai berikut:

$$N_{Sh} = C_k N_{Re}^a N_{Sc}^b \quad 3.2.$$

$$N_{Sh} = p_1 N_{Re}^a \quad 3.3.$$

Dimana:

$$p_1 = C_k N_{Sc}^b \quad 3.4.$$

Hubungan antara N_{Sh} (y) dan N_{Re} (x) pada persamaan 3.3, diselesaikan dengan persamaan regresi linier. Hasil plot antara N_{Sh} vs N_{Re} , diperoleh nilai p_1 dan a.

Langkah 2, penyelesaian persamaan $N_{Sh} N_{Re}^{-a}$ vs N_{Sc} , sebagai berikut:

Kemudian substitusi persamaan 3.4 ke persamaan 3.5, diperoleh:

$$N_{Sh} N_{Re}^{-a} = p_1 \quad 3.5.$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{-a} = C_K N_{Sc}^b \quad 3.6.$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{-a} \frac{1}{p_1} = p_2 N_{Sc}^b \quad 3.7.$$

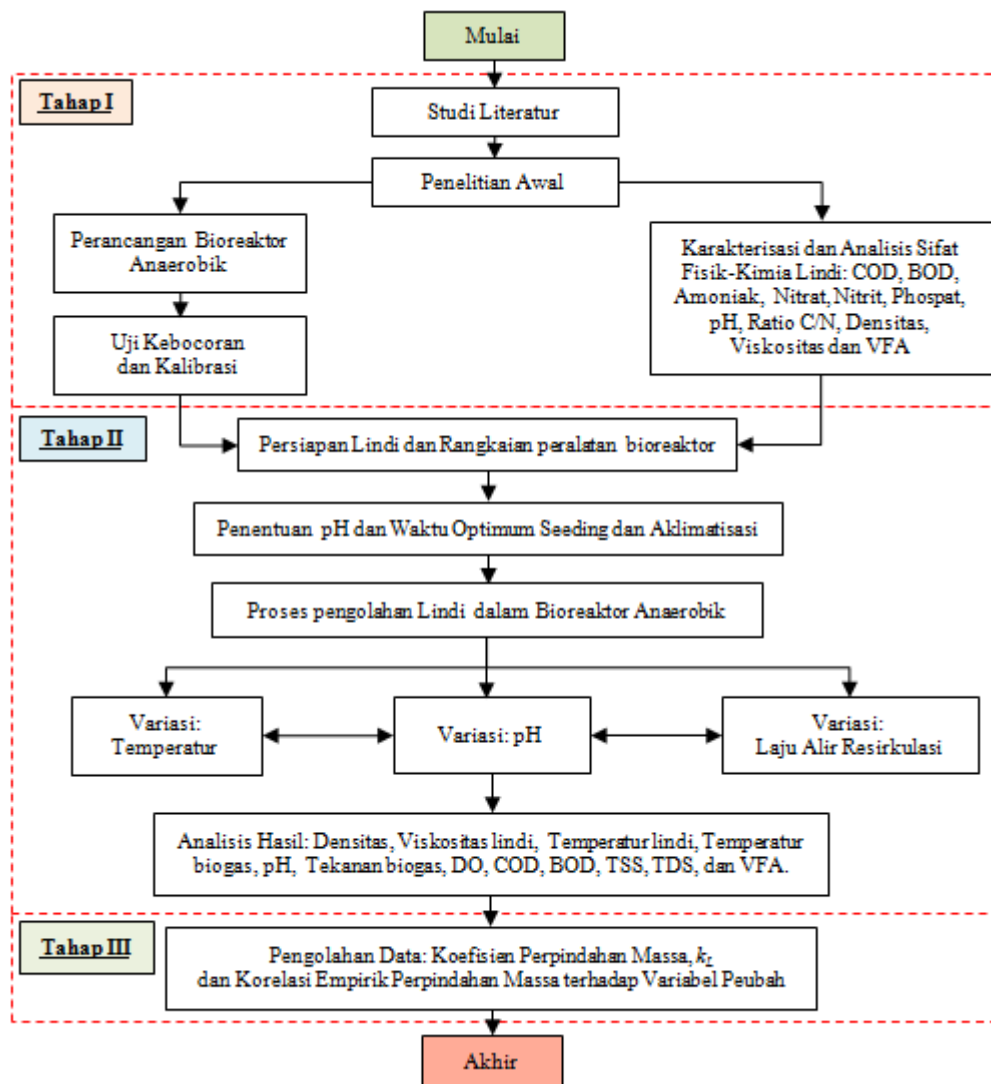
Dimana: $C_k = p_2$

3.8.

Hubungan antara $N_{Sh}.N_{Re}^{-a}$ (y) dan N_{Sc} (x), diselesaikan dengan persamaan regresi linier. Hasil plot antara $N_{Sh}.N_{Re}^{-a}$ (y) terhadap N_{Sc} (x), diperoleh nilai p_2 dan b.

3.7. Kerangka Penelitian

Adapun kerangka penelitian perpindahan massa pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, seperti terlihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Kerangka penelitian perpindahan massa fase cair pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Tahap Pra-Pengolahan Lindi

Adapun hasil penelitian analisis karakteristik lindi TPA Sambutan, Samarinda dari bulan Mei 2015 sampai bulan Agustus 2015. Seperti terlihat pada Tabel 4.1.

4.1.1. Karakteristik Lindi TPA Sambutan

Karakterisasi lindi menyangkut karakteristik parameter pencemar yang terkandung di dalam limbah cair tersebut. Hasil karakterisasi lindi selengkapnya disajikan pada Tabel 4.1.

Dari Tabel 4.1., terlihat bahwa ratio BOD/COD rata-rata = 0.515, sedangkan untuk ratio C : N : P = 1044.35 : 30.81 : 17.24. Densitas lindi berkisar antara 0.91221 – 0.9316 g/cm³. Viskositas lindi berkisar antara 0.8230 – 0.8475 g/cm.s. COD dan BOD rata-rata adalah 929.25 mg/L dan 490.5 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa lindi kekurangan substrat dan kelebihan nutrient (N dan P), namun masih berada pada tingkat biodegradabilitas yang baik. Sehingga masih memenuhi syarat untuk pengolahan secara anaerobik.

Lindi TPA sampah kota mengandung suatu campuran organik kompleks yang mudah terlarut dan sulit-terlarut. Material organik yang sulit-terlarut tersebut terakumulasi dengan meningkatnya umur *landfill*. Lindi TPA sampah yang tua mengandung logam berat, material organik dan anorganik, seperti fraksi asam humat dan fulvat yang tinggi (Renou *et al.*, 2008, Kawai *et al.*, 2012).

Proses pengolahan anaerobik cukup efektif untuk lindi dengan rasio BOD:COD tinggi yang dihasilkan pada tahap awal *landfill* (Li *et al.*, 2010). Pengolahan lindi tergantung pada karakteristiknya. Sedangkan karakteristik lindi sangat tergantung bagaimana lindi tersebut terbentuk dan terakumulasi (Abbas *et al.*, 2009).

Tabel 4.1. Karakteristik Lindi TPA Sambutan, Samarinda

Parameter	Satuan	Bulan												Rata-rata
		Mei 2015	Jun 2015	Jul 2015	Ags 2015	Sept 2015	Okt 2015	Nop 2015	Des 2015	Jan 2016	Febr 2016	Mar 2016	Apr 2016	
Sifat Fisik														
TSS	mg/L	73	125	74	21	73	48	68	22	26	5	2	14	45.92
TDS	mg/L	2423	1010	258	819	1127	1539	950	2671	2319	1370	1343	1358	1432.25
Potensial Redoks (eH)	mV	-62	-18	-4	-3	-21.75	-56	-20	-49	-72	-48	-59	-42	-37.90
Densitas	g/cm ³	0.9186	0.91444	0.91221	0.91387	0.9148	0.9133	0.9138	0.9245	0.91221	0.91387	0.9316	0.9213	0.9170
Viskositas	g/cm.s	0.84224	0.82632	0.823	0.8242	0.8289	0.8247	0.8256	0.8274	0.8239	0.8624	0.8435	0.8475	0.8333
Sifat Kimia														
pH		7.98	6.88	6.9	6.84	7.15	7.91	7.13	7.33	7.95	6.93	7.13	7.3	7.29
BOD ₅	mg/L	725	523	303	411	490.5	680	481	707	213	625	558	742	538.21
COD	mg/L	1505	877	543	792	929.25	1112	850	1615	433	1114	934	1828	1044.35
Ammonia (NH ₃ -N)	mg/L	19.82	4.35	0.21	4.01	7.1	4.05	3.94	9.08	0.19	10.03	9.45	9.75	6.83
Nitrite	mg/L	3.12	1.26	4.58	0.08	2.26	0.23	1.68	2.750	0.14	2.09	0.3	3.71	1.85
Nitrate	mg/L	39.14	18.16	12.77	0.63	17.68	2.11	10.27	39.04	12.77	22.77	39.55	50.69	22.13
Phosphate	mg/L	2.62	19.56	38.08	2.74	15.75	5.01	16.23	41.46	5.01	3.21	5.08	52.18	17.24
Sulfat	mg/L	0.23	21.75	26.3	41.4	22.42	22.79	26.93	145.25	34	150.47	343	316.7	95.94
Minyak dan Lemak	mg/L	27.5	2.04	0.15	0.09	7.45	0.07	1.96	2.17	0.001	2.44	1.9	49.94	7.98
Logam Berat														
Fe	mg/L	1.598	1.761	1.746	2.053	0.165	0.143	0.07	0.031	0.7745	0.415	0.3276	0.5411	0.8021
Mn	mg/L	0.039	nd	0.026	nd	nd	nd	nd	nd	0.059	0.775	0.582	0.584	0.3442
Cu	mg/L	0.079	nd	0.017	nd	0.037	0.051	0.08	0.076	0.092	0.139	0.01	0.15	0.0731
Zn	mg/L	0.241	0.077	0.363	0.029	0.367	0.317	0.339	0.324	0.987	1.776	1.700	1.339	0.6549
Cr	mg/L	nd	0.89	0.101	0.854	nd	nd	nd	nd	1.327	0.75	0.801	1.674	0.9139
Cd	mg/L	0.013	0.251	1.412	0.245	0.036	0.043	0.038	0.046	0.987	1.114	1.389	1.444	0.5848
Pb	mg/L	2.308	nd	0.976	nd	0.715	0.774	0.758	0.723	0.955	1.129	0.855	1.021	1.0214
Total akumulasi	mg/L	4.278	2.9790	4.6410	3.1810	1.3200	1.3280	1.2850	1.2000	5.1815	6.0980	5.6646	6.7531	4.3944

Sedangkan lindi, adakah limbah cair yang merupakan campuran heterogen dari bahan organik dan anorganik terlarut kompleks. Lindi mengandung: VFA, LCFA, senyawa fulvat dan humat, amonia-nitrogen, fosfat, sulfat, logam berat, organik xenobiotik (XOCs); *aromatic hydrocarbons*, *phenols* dan *chlorinated aliphatics*, garam-garam anorganik dan mikroorganisme (Christensen *et al.*, 2001; Renou *et al.*, 2008; Zainol *et al.*, 2012; Hassan and Xie, 2014); serta *biorefractory contaminants* (Tatsi *et al.*, 2003). Lindi juga mengandung *nutrient* dan NH_4^+ dan H_2 , serta zat beracun potensial (Xie *et al.*, 2012; Shewani *et al.*, 2015) dan anorganik klorida, sulfat, ammonia-N, *phosphate* dan natrium (Aziz *et al.*, 2010). Sehingga dalam lindi terkandung substrat organik dan anorganik terlarut kompleks yang *biodegradable* dan *non-biodegradable* (Christensen *et al.*, 2001; Gossett dan Belser, 1982).

4.1.2. Penentuan pH dan Waktu Optimum *Seeding* Dan Aklimatisasi

Data hasil penelitian tahap penentuan pH dan waktu optimum *seeding* dan aklimatisasi disajikan pada Tabel 4.2. – Tabel 4.4.

Pada temperatur *ambient*, pH *seeding* mengalami penurunan dari 7.8 menjadi 7.3 dan pada aklimatisasi naik dari 6.9 menjadi 7.7. Pada temperatur 35°C, pH *seeding* mengalami kenaikan dari 6.3 menjadi 6.7 dan pada aklimatisasi meningkat dari 7.0 menjadi 7.5. Pada temperatur 45°C, pH *seeding* mengalami penurunan dari 6.3 menjadi 6.2 dan pada aklimatisasi meningkat dari 7.5 menjadi 7.6.

Secara keseluruhan tekanan biogas pada proses *seeding* (1-10 hari), walaupun ada peningkatan tekanan tetapi tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Sedangkan pada proses aklimatisasi, tekanan biogas mengalami kenaikan. Pada temperatur *ambient*, tekanan biogas mengalami kenaikan mulai dari 21 mm H₂O menjadi 210 mm H₂O. Pada temperatur 35°C, tekanan biogas mengalami kenaikan mulai dari 41 mm H₂O menjadi 359 mm H₂O. Sedangkan Pada temperatur 45°C, tekanan biogas mengalami kenaikan mulai dari 0 mm H₂O menjadi 310 mm H₂O.

Secara keseluruhan proses aklimatisasi, COD dan BOD mengalami penurunan, seperti terlihat pada Tabel 4.2. Pada temperatur *ambient*, COD mengalami penurunan sekitar 48,5%, mulai dari 4732,56 mg/L menjadi 2437,9 mg/L. Pada temperatur 35°C, COD mengalami penurunan sekitar 64,8%, mulai dari 4732,56 mg/L menjadi 1666,0 mg/L. Sedangkan Pada temperatur 45°C, COD mengalami penurunan sekitar 63,5%, mulai dari 7715,68 mg/L menjadi 2810,88 mg/L.

Pada temperatur *ambient*, BOD mengalami penurunan sekitar 61,7%, mulai dari 810,0288 mg/L menjadi 310,29 mg/L. Pada temperatur 35°C, BOD mengalami penurunan sekitar 21,23%, mulai dari 810,0288 mg/L menjadi 638,0 mg/L. Sedangkan Pada temperatur 45°C, BOD mengalami penurunan sekitar 74,18%, mulai dari 4414,2336 mg/L menjadi 1139,59 mg/L.

Tabel 4.2. pH dan Waktu optimum *seeding*-aklimatisasi pada temperatur Ambient

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28	27,5	7,8	0		
	2	27	26	7	0		
	3	27,5	26,5	7,5	0		
	4	27,4	26,7	7,3	0		
	5	27,5	26,7	7,2	0		
	6	27,6	26,7	7,2	0	-	-
	7	27,8	26,8	7,1	0		
	8	28	27	6,9	3		
	9	29	27,5	7	4,5		
	10	28,5	26	7,3	8		
Aklimatisasi	1	28	27,5	6,9	21	810.0288	4732.56
	2	28	27	7,0	49		
	3	28,5	27,5	7,1	57	729.3082	5351.953
	4	28,2	27,9	7,2	80		
	5	28,2	27,9	7,2	72	601.8969	6627.04
	6	28,2	27,7	7,2	79		
	7	28,3	27	7,3	83	286.3256	5279.357
	8	28,5	27,2	7,3	94		
	9	28,5	27	7,4	110	363.5	4587.3704
	10	28,2	27,8	7,5	121		
	11	28,3	27,5	7,5	135	333.0	3457.7
	12	28,5	28	7,6	142		
	13	28,4	27,8	7,7	184	310.29	2437.9
	14	28,4	27,9	7,7	210		

Tabel 4.3. pH dan Waktu optimum *seeding*-aklimatisasi pada temperatur 35 °C

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29.9	28.5	6.3	0		
	2	30	28	6.3	0	-	-
	3	29.9	28.3	6.4	0		

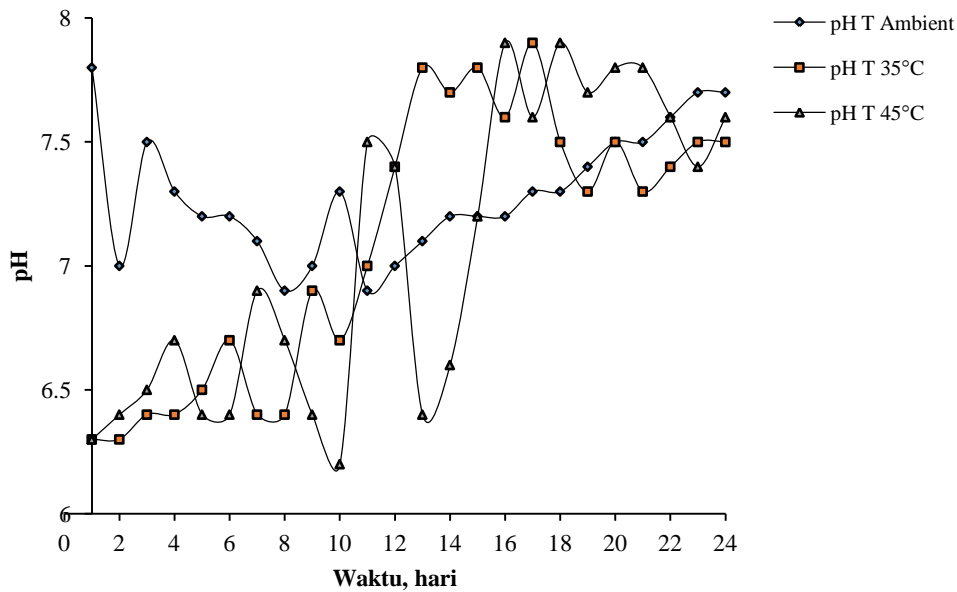
Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L	
		T lindi	T biogas					
	4	30	28.8	6.4	27			
	5	30.2	29	6.5	20			
	6	30.5	29.3	6.7	2			
	7	31	29.5	6.4	6			
	8	28.5	28.5	6.4	10			
	9	28.2	28.5	6.9	21			
	10	28.5	28.5	6.7	15			
	Aklamatisasi	1	35	34	7.0	41	810.0288	4732.56
		2	35	35	7.4	44		
		3	35	34.5	7.8	55	688.0204	6611.68
4		35	34	7.7	53			
5		35	35	7.8	64	685.440	4558	
6		35	34.8	7.6	74			
7		35	34.9	7.9	87	621.254	3892.8	
8		35	35	7.5	100			
9		35	36	7.3	114	573.49	3227.6	
10		35	36	7.5	128			
11		35	36	7.3	145	761.080	2562.4	
12		35	35.5	7.4	177			
13		35	34.5	7.5	250	638.000	1666.0	
14		35	34	7.5	359			

Tabel 4.4. pH dan Waktu optimum *seeding*-aklimatisasi pada temperatur 45 °C

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.3	28	6.3	1		
	2	28.5	28	6.4	4		
	3	29.5	28	6.5	7.5		
	4	28	29.5	6.7	4		
	5	29.3	28	6.4	18.5		
	6	28.5	28	6.4	0	-	-
	7	28.5	28	6.9	24.5		
	8	28.3	29.5	6.7	22		
	9	28.5	29	6.4	10		
	10	29.5	29.5	6.2	0		
Aklamatisasi	1	45	44.5	7.5	0	4414.2336	7715.68
	2	45	43	7.4	22.5		
	3	45	43.5	6.4	29.5	4405.2368	7417.6
	4	45	45.5	6.6	38.5		
	5	45	45.2	7.2	55	3136.896	3979.124
	6	45	45.3	7.9	72		
	7	45	45.5	7.6	82.5	3528	3836.97
	8	45	47	7.9	80		
	9	45	46.7	7.7	122	1916.83	3729.5
	10	45	46	7.8	147		
	11	45	46.5	7.8	125	1107.993	3075.2
	12	45	46	7.6	145		
	13	45	44	7.4	213	1139.59	2810.88
	14	45	44.5	7.6	310		

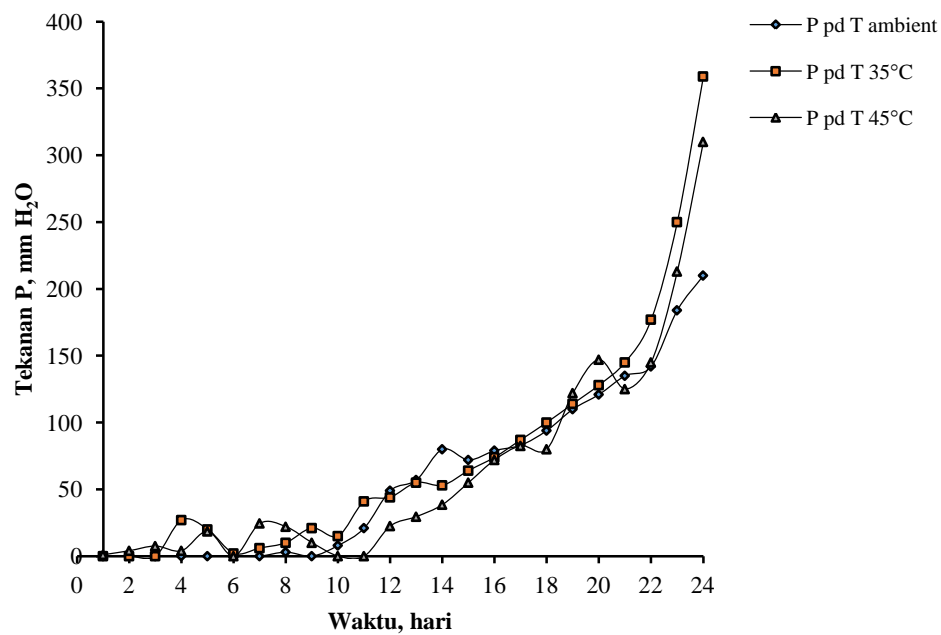
Seperti terlihat pada gambar 4.1., pada tahap ini terlihat bahwa pH meningkat, dari yang terendah 6.2 meningkat sampai 7.9. Pada lindi yang memiliki pH basa, seiring berjalannya proses pH akan menurun, terlihat pada *seeding* hari ke-1 sampai ke-10 pada pH ambient. Sedangkan lindi yang memiliki

pH asam, seiring berjalannya seeding terus mengalami kenaikan pH, terlihat pada pH temperatur 35°C dan temperatur 45°C.



Gambar 4.1. pH pada penentuan pH dan waktu optimum

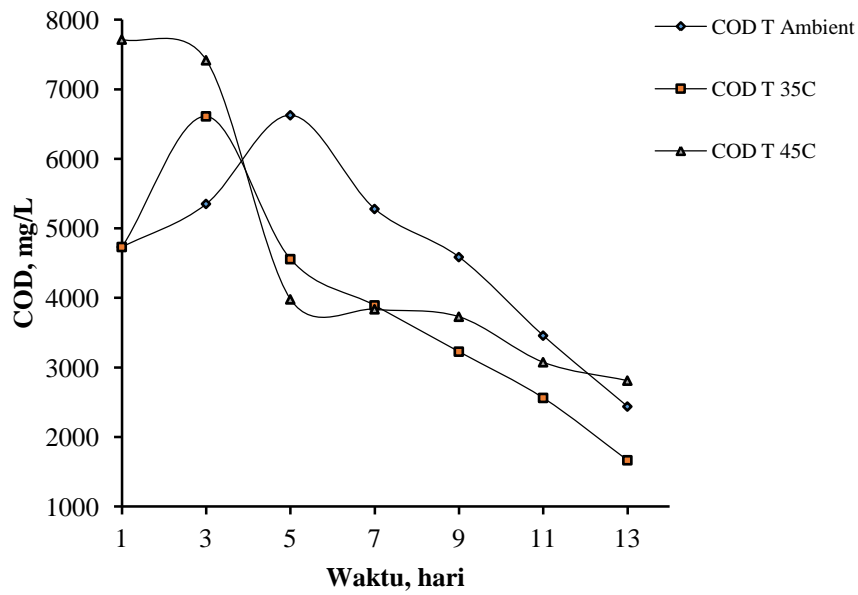
Pada gambar 4.2., Tekanan biogas pada temperatur *ambient* lebih rendah daripada temperatur 35°C dan temperatur 45°C, namun tekanan biogas pada T 35°C lebih besar daripada T 45°C. Hal ini terjadi karena T 35°C merupakan temperatur optimum *mesophilic* pertumbuhan bakteri, sedangkan T 45°C merupakan temperatur minimum pertumbuhan bakteri *thermophilic*. Kenaikan tekanan biogas terjadi pada proses aklimatisasi, pada semua temperatur, ambient, 35°C dan 45°C, mulai pada hari ke-10 sampai hari ke-20 hari kenaikan tekanan terlihat landai. Namun diatas hari ke-20 kenaikan tekanan biogas bersifat eksponensial.



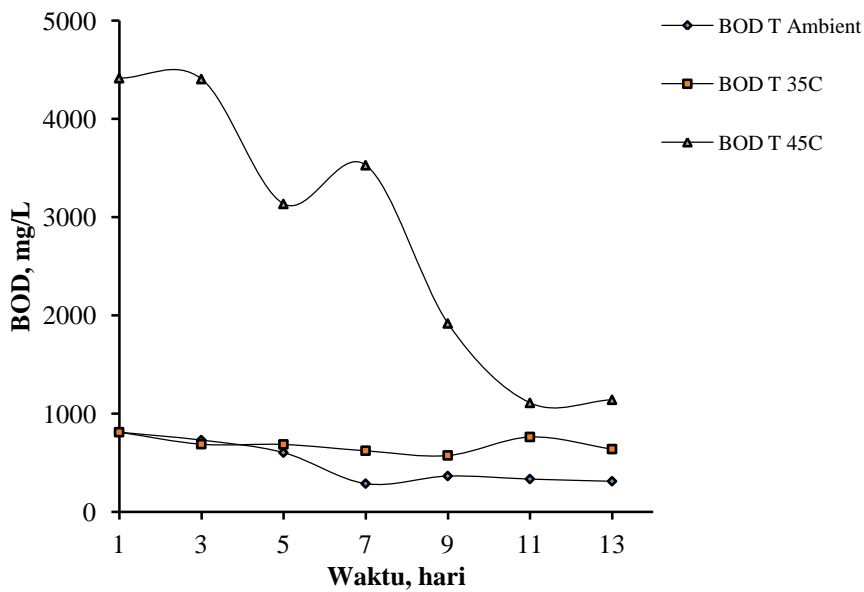
Gambar 4.2. Tekanan biogas pada penentuan pH dan waktu optimum

Pada gambar 4.3, penurunan COD dan BOD pada aklimatisasi. Tahap penentuan pH dan waktu optimum *seeding*-aklimatisasi berakhir pada kondisi *steady state* tercapai yaitu dimana kinerja bioreaktor berada pada fase eksponensial. Faktor penentu untuk melihat kondisi *steady state* dari penentuan waktu optimum adalah persentasi penyisihan substrat (BOD dan COD *removal*) dan fluktuasi kenaikan tekanan biogas > 10%.

Pada tahap penentuan pH *seeding* dan aklimatisasi diperoleh rentang pH *seeding* antara 6.2 – 7.8 dan pH aklimatisasi antara 6.3 – 7.9. pH rata-rata keseluruhan tahap ini adalah 7.2, sehingga nilai pH 7.2 inilah yang digunakan sebagai pH pada tahap pengolahan anarobik. Sedangkan waktu optimum untuk *seeding* dan aklimatisasi adalah masing-masing 10 hari.



a.



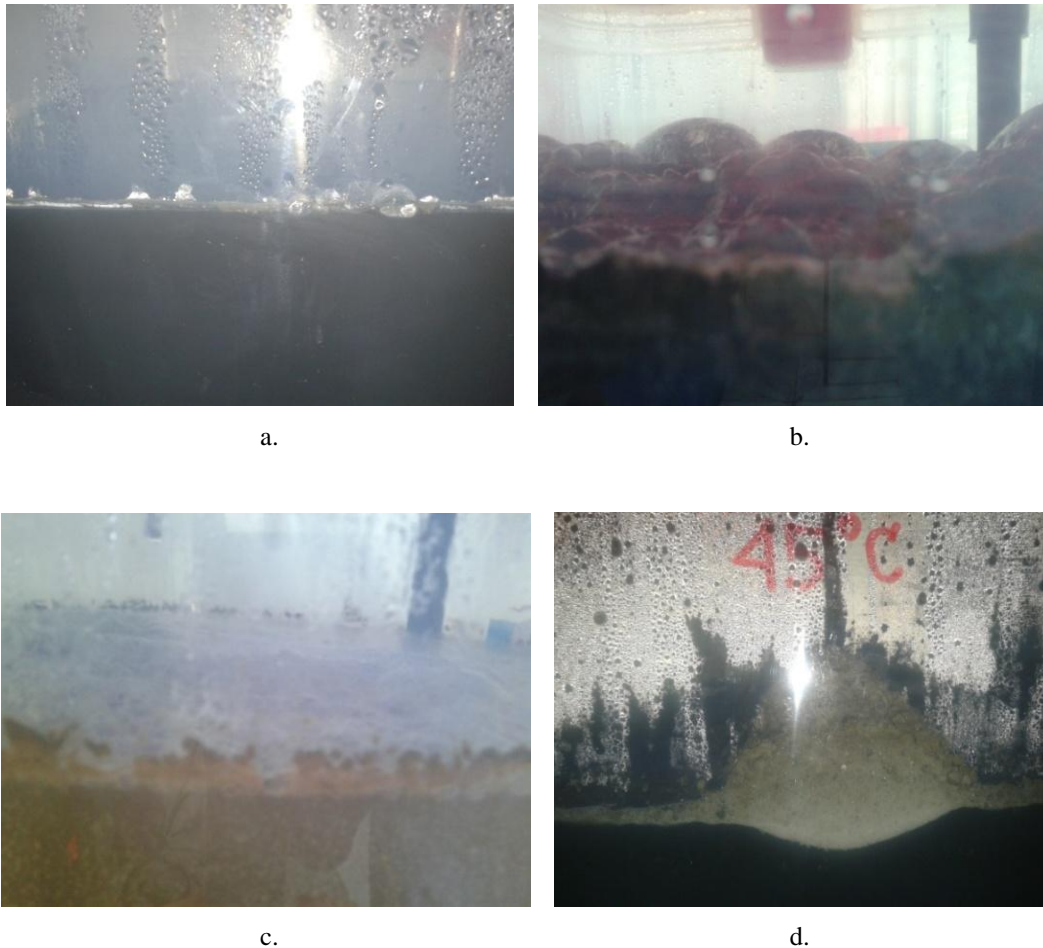
b.

Gambar 4.3. Penurunan COD (a) dan BOD (b) pada Aklimatisasi

4.1.3. Saponifikasi dan *Foaming*

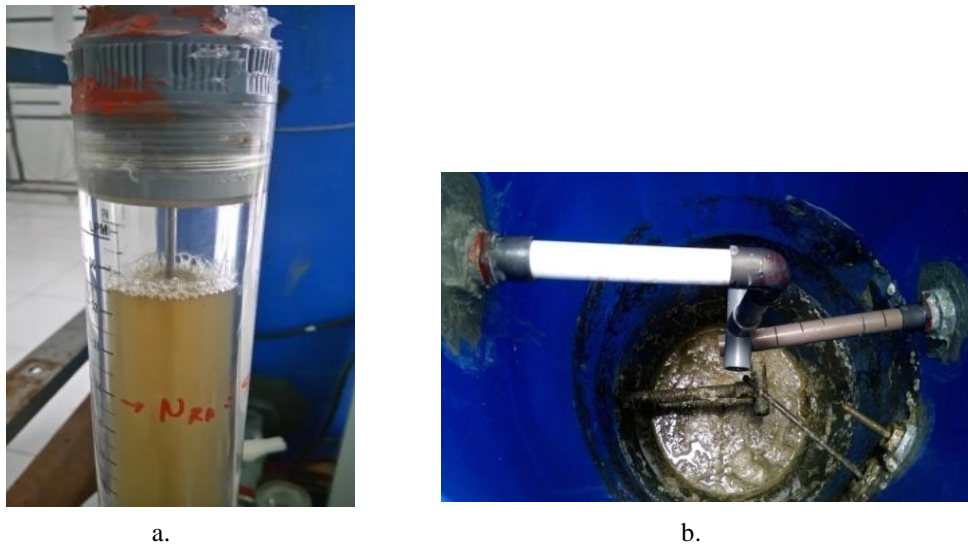
Saponifikasi (Reaksi penyabunan) terjadi antara asam lemak rantai panjang (LCFA) yang terkandung dalam lindi dengan basa, sehingga membentuk sabun. Saponifikasi ditandai dengan terbentuknya busa di bagian atas bioreaktor. *Foaming* (pembentukan busa) telah terjadi sejak awal proses seeding tetapi tidak

terlalu banyak, berukuran sangat kecil dan tidak terlalu tampak. Makin lama makin banyak dan menumpuk membentuk lapisan busa yang terakumulasi diatas permukaan lindi dalam bioreaktor. Seperti terlihat pada Gambar 4.4. dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4. *Foaming* pada: a. awal *seeding*; b. temperatur *ambient*, c. temperatur 35°C, dan d. temperatur 45°C.

Hasil hidrolisis trigliserida, yaitu asam-asam lemak rantai panjang (LCFA) bila bereaksi dengan basa, lazim disebut saponifikasi, akan menghasilkan gliserol dan campuran garam yang berasal dari asam-asam lemak rantai panjang. Asam lemak rantai panjang ini akan bereaksi dengan basa menghasilkan sabun, sehingga terbentuk buih dibagian atas bioreaktor (Battimelli *et al.*, 2009; Battimelli *et al.*, 2010; Affes *et al.*, 2013).



Gambar 4.5. *Foaming* pada bioreaktor anaerobik.

Hidrolisis dari polimer organik lipid akan membentuk asam lemak rantai panjang (LCFA) (Gujer dan Zehnder, 1983; Rinzema *et al.*, 1994; Shin dan Song, 1995; van Lier *et al.*, 2008; Zonta *et al.*, 2013) dan gliserol (Battimelli *et al.*, 2009; Battimelli *et al.*, 2010). Pada kondisi anaerobik, lipid dihidrolisis oleh enzim lipase ekstraselular menjadi LCFA dan gliserol. Kemudian LCFA didegradasi melalui mekanisme β -oksidasi menjadi asam asetat dan hidrogen, yang selanjutnya dikonversi menjadi biogas, campuran metana dan karbondioksida. Gliserol dapat dengan mudah didegradasi menjadi asam lemak volatil (VFA) yang selanjutnya menjadi biogas (Battimelli *et al.*, 2009; Battimelli *et al.*, 2010; Affes *et al.*, 2013).

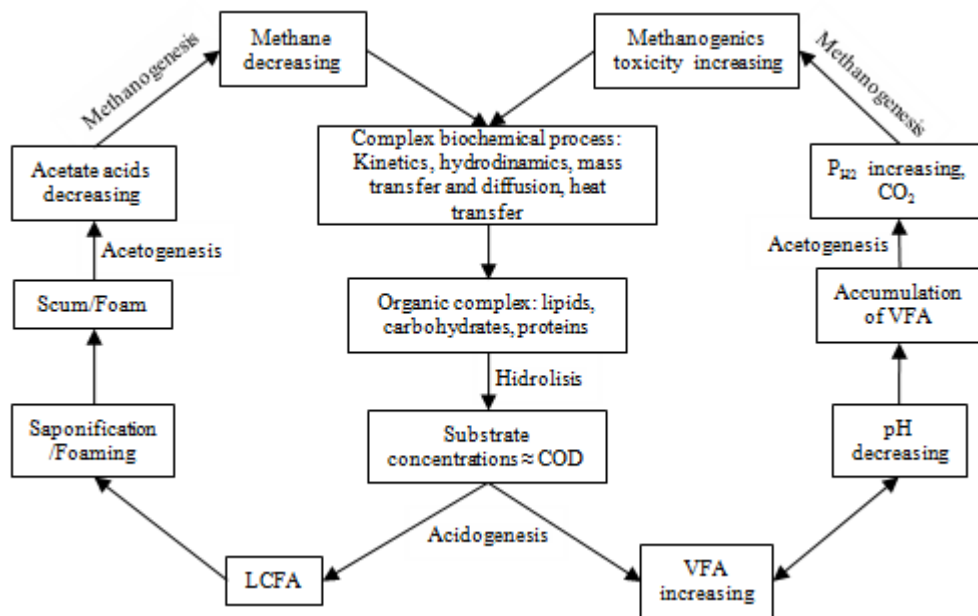
Beberapa peneliti mengidentifikasi bahwa *foaming* disebabkan oleh bahan-bahan *hydrophobic* dalam bioreaktor yang membentuk gelembung-gelembung gas dan menumpuk pada bagian atas bioreaktor membuat lapisan busa (Barjenbruch *et al.*, 2000, Bates, 2006; Pagilla *et al.*, 1997, and Westlund *et al.*, 1998).

Foaming dan akumulasi busa yang dihasilkan dalam bioreaktor menyebabkan masalah operasional yang luas dan serius seperti: penyumbatan pompa, gangguan pada *biogas-handling system*, dan penurunan produksi biogas serta penurunan padatan volatil (Dalmau *et al.*, 2010; Alfaro *et al.*, 2014), berkurangnya volume efektif bioreaktor, kerusakan struktur, luapan busa, dan

penurunan produksi biogas hingga 40% (Subramanian and Pagilla, 2015; Kanu *et al.*, 2015).

Filamentous bacteria penyebab *foaming*, dapat hidup dan tetap tumbuh dibawah kondisi anaerobik *mesophilic* meskipun merupakan *obligate aerobes* (Ganidi *et al.*, 2009; Alfaro *et al.*, 2014). *Foaming* pada temperatur *thermophilic* lebih resisten dari pada temperatur *mesophilic* (Dohanyos *et al.*, 2004; Ganidi *et al.*, 2009). Hal ini menunjukkan pengaruh temperatur tinggi dalam menurunkan tegangan permukaan dan viskositas serta peningkatan buih (Barber, 2005; Ganidi *et al.*, 2009). Oleh karena itu, temperatur bioreaktor *thermophilic*, secara efektif dapat mengurangi dan atau menghancurkan buih yang terus-menerus terbentuk (Ganidi *et al.*, 2009).

Keadaan hubungan sebab akibat akumulasi VFA dan LCFA yang terjadi pada pengolahan limbah dalam bioreaktor anaerobik, seperti terlihat pada Gambar 4.6.



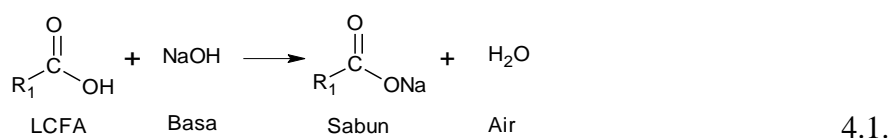
Gambar 4.6. Siklus penurunan efisiensi proses akibat akumulasi VFA dan LCFA

Foaming dalam bioreaktor anaerobik dipengaruhi oleh mikroorganisme berfilamen, akumulasi VFA dan pengadukan yang kurang baik (Pagilla *et al.*, 1997; Barjenbruch *et al.*, 2000; Bates *et al.*, 2006), fats/oil/grease (FOG) dan

kualitas lumpur umpan (Moeller *et al.*, 2010; Kanu *et al.*, 2015), zona pengumpanan bioreaktor, kelebihan FOG and scum dalam umpan masuk bioreaktor, fluktuasi temperatur bioreaktor (Barber, 2005; Kanu *et al.*, 2015). Disamping itu, faktor non-biologis seperti OLR, pencampuran, dan ratio padatan *primary/activated sludge*, juga mempengaruhi *foaming* dalam bioreaktor anaerobik (Subramanian and Pagilla, 2014; Alfaro *et al.*, 2014).

Beberapa masalah yang disebabkan oleh polimer bahan-bahan organik, lipid, saponifikasi dan *foaming* serta *scum* pada pengolahan limbah secara biologis anaerobik adalah penyumbatan (*clogging*), *flotation*, transfer massa substrat terlarut, pengurangan lumpur, aktifitas *methanogenic* dan produksi metana (Cammarota *et al.*, 2001; Pereira *et al.*, 2004; Demirel *et al.*, 2005; Hatamoto *et al.*, 2007; Valladão *et al.*, 2011). Saponifikasi dan *foaming* juga menyebabkan pertumbuhan mikroorganisme yang kurang baik dan bersifat inhibitor LCFA (Carrere *et al.*, 2012), perolehan biogas yang tidak efisien, terbentuknya *dead zone* dan biaya tambahan produksi (Ganidi *et al.*, 2009), serta kehilangan produksi biogas 20 – 50% (Kougias *et al.*, 2014).

Disamping itu, *buffer* yang digunakan untuk mempertahankan pH lindi, juga berpengaruh pada proses saponifikasi. Kandungan basa (NaOH) pada *buffer* akan bereaksi dengan asam lemak rantai panjang (LCFA) membentuk sabun.



Ketika substrat di *pretreatment* dengan basa, salah satu hal penting yang harus diperhatikan adalah bahwa biomassa dapat mengkonsumsi basa tersebut. Sehingga basa yang diperlukan harus diperhitungkan untuk meningkatkan kinerja bioreaktor (Carrere *et al.*, 2015). Beberapa peneliti mengusulkan, agar OLR sebagai volatile solids benar-benar diperhitungkan, karena dapat menyebabkan *foaming* (Pagilla *et al.*, 1997, Barjenbrugh *et al.*, 2000; Barber, 2005; Carrere *et al.*, 2015). Selama biodegradasi *mesophilic* dalam bioreaktor anaerobik, proses saponifikasi dan *foaming* ditemukan secara luas, dengan dampak yang sangat besar pada efisiensi proses dan biaya operasi (Pagilla *et al.*, 1997; Westlund *et al.*,

1998; Barjenbruch *et al.*, 2000; Barber, 2005; Ganidi *et al.*, 2009, Dalmau *et al.*, 2010).

Saponifikasi dan *foaming* dapat mengganggu proses pengolahan jika busa atau buih yang dihasilkan besar (ukuran dan jumlah). Akibatnya pembacaan tekanan biogas pada manometer menjadi tidak stabil. Hal ini terjadi karena busa dan scum mendesak volume biogas yang akibatnya mengurangi volume efektif bioreaktor. Jika tekanan yang ditimbulkan busa tersebut makin meningkat, maka akan menekan volume bioreaktor dan dapat mendorong keluar air yang ada pada manometer.

Jadi saponifikasi prosedur *pretreatment* yang berpeluang untuk meningkatkan tahap *hydrolysis* dan laju biodegradasi awal, serta menurunkan waktu proses biodegradasi. Disamping itu, keuntungan yang diperoleh adalah dapat membatasi kelebihan akumulasi LCFA (Carrere *et al.*, 2015). Oleh karena itu busa dan *scum*, yang ditimbulkan oleh proses saponifikasi dan *foaming* sebaiknya di-*treatment* terlebih dahulu karena menghambat proses pengolahan dan tahap proses selanjutnya.

4.2. Tahap Pengolahan Lindi

Setelah diperoleh waktu *seeding* dan aklimatisasi optimum pada skala laboratorium, yaitu masing-masing adalah 10 hari. Sehingga total waktu *seeding* dan aklimatisasi adalah 20 hari. Selanjutnya penelitian dilakukan dalam bioreaktor pada skala pilot dengan volume total bioreaktor adalah 160 L. Kemudian dengan perbandingan volume bioreaktor antara lindi : biogas = 70% : 30%, diperoleh volume lindi yang digunakan = 112 L. Sebelum mengumpulkan lindi ke dalam bioreaktor anaerobik, lindi dipanaskan pada temperatur 50°C.

Tahap pra pengolahan *seeding* dan aklimatisasi dilakukan selama 20 hari. Dimana *seeding* dilakukan pada hari ke-1 samapai dengan hari ke-10, dilanjutkan dengan aklimatisasi pada hari ke-11 sampai dengan hari ke-20.

Setelah pra pengolahan tahap *seeding* dan aklimatisasi, dilanjutkan dengan tahap pengolahan anaerobik lindi selama 21 hari, yaitu hari ke-21 sampai dengan hari ke-41.

4.2.1. Pengaruh pH, Temperatur dan Laju Alir Resirkulasi

4.2.1.1. Pengaruh pH

Seeding dan aklimatisasi

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur dan pH *ambient* serta tanpa resirkulasi, seperti terlihat pada Tabel 4.5. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 27.4-29°C, temperatur biogas 26-27.5°C, pH menurun dari 7.5-7.3, dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-9, sebesar 1-1.5 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi mulai dari 28.2-28.5°C, temperatur biogas 27-27.9°C, pH meningkat dari 7.2-7.7, dan tekanan biogas meningkat dari 4-21 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.58.

Tabel 4.5. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur dan pH *Ambient*; Tanpa Resirkulasi

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	27.4	26.7	7.5	0		
	2	27.5	26.7	7.3	0		
	3	27.6	26.7	7.2	0		
	4	27.8	26.8	7.2	0		
	5	28	27	7.1	0		
	6	29	27.5	6.9	0	-	-
	7	28.5	26	7	0		
	8	28	27.5	7.3	0		
	9	27	26	6.9	1		
	10	27.5	26.5	7.0	1.5		
Aklimatisasi	11	28.2	27.9	7.2	4	4332.56	7098.84
	12	28.2	27.7	7.2	8		
	13	28.3	27	7.3	10	4187.37	6881.06
	14	28.5	27.2	7.3	14		
	15	28.5	27	7.4	12	3057.7	5186.55
	16	28.2	27.8	7.5	13		
	17	28.3	27.5	7.5	14	2037.9	3656.85
	18	28.5	28	7.6	16		
	19	28.4	27.8	7.7	19	1528.66	2893.00
	20	28,4	27,9	7.7	21		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur *ambient*, pH konstan pada 7.2 dan tanpa resirkulasi, seperti terlihat pada Tabel 4.6. Dimana pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.2 - 29°C, dan temperatur biogas 27.5 – 28.5°C, dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-6, dengan fluktuasi naik turun antara 1 sampai dengan 5 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi mulai dari 27-27.5°C, temperatur biogas 26-27.5°C, dan tekanan biogas meningkat dari 7-29 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.70.

Tabel 4.6. *Seeding* dan aklimatisasi pada pH 7.2

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.9	28.5	7.2	0		
	2	28.2	27.5	7.2	0		
	3	28.9	28.5	7.2	0		
	4	29	28.5	7.2	0		
	5	28.3	27.5	7.2	0		
	6	28.5	28	7.2	2	-	-
	7	28	27.5	7.2	1		
	8	28.2	27.5	7.2	0		
	9	28	27.5	7.2	2		
	10	28.5	27.8	7.2	5		
Aklimatisasi	11	27.9	26.6	7.2	7	3855.75	6111.7
	12	27.8	27.5	7.2	11		
	13	27.8	27.6	7.2	12	2377.7	4638.8
	14	27.5	27	7.2	16		
	15	26.5	26	7.2	18	1999.5	2397.6
	16	27.2	27	7.2	20		
	17	27	26.5	7.2	18	1555	2044.72
	18	27.2	27	7.2	22		
	19	27.2	27	7.2	23	1160.75	1557.57
	20	27.8	27	7.2	29		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur *ambient*, pH konstan 8.0 dan tanpa resirkulasi, seperti terlihat pada Tabel 4.7. Dimana pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 27–28.5°C, temperatur biogas 26–27.9°C, dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-8, sebesar 1 – 2 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi mulai dari 27-28.5°C, temperatur biogas 26-27.9°C, dan tekanan biogas meningkat dari 3-17 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.65.

Tabel 4.7. *Seeding* dan aklimatisasi pada pH 8.0

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.5	27.2	8.0	0		
	2	28.4	27.9	8.0	0		
	3	27	26	8.0	0		
	4	27	26	8.0	0		
	5	27.5	26.5	8.0	0		
	6	27.4	26.7	8.0	0	-	-
	7	27	26	8.0	0		
	8	27.6	26.7	8.0	1		
	9	27.8	26.8	8.0	1		
	10	28.5	27	8.0	2		
Aklimatisasi	11	28.5	27.8	8.0	3	3845	6303.3
	12	28.4	27.9	8.0	4		
	13	28.4	26	8.0	5	2887.75	4284.84
	14	28.3	26.5	8.0	8		
	15	28.5	28	8.0	9	2022.25	3150.5
	16	28.4	27.8	8.0	11		

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
	17	28.4	27.9	8.0	12	1490.45	2205.1
	18	27	26	8.0	14		
	19	27.5	26.5	8.0	15	1326.32	2007.65
	20	27.4	26.7	8.0	17		

Pengolahan anaerobik

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur dan pH *ambient* serta tanpa resirkulasi, seperti terlihat pada Tabel 4.8. Pada, temperatur lindi berada pada kisaran dari 27-28.5°C, temperatur biogas 26-28°C, pH naik turun dengan kisaran 6.9-7.8. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 23 mm H₂O sampai dengan 40 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai hari ke-41, dari 36 mm H₂O sampai dengan 7 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98612 - 0.98547 g/mL. Viskositas juga menurun dari 0.93291 - 0.87388 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 68.91%, yaitu mulai dari 4050.14-1259.0 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 71.84%, yaitu mulai dari 6625.40–1866.03 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.63. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, dimana pada hari ke-21 yaitu 227.94 mg/L, naik pada hari ke-25 menjadi 370.63 mg/L, dan selanjutnya pada hari ke-41 turun menjadi 94.5 mg/L.

Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi lindi

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	28.3	27	7.3	23	0.98612	0.93291	4050.14	6625.40	227.94
22	28.5	27.2	7.2	24					
23	28.5	27	7.2	31	0.98607	0.92354	3646.54	5280.38	335
24	28.2	27.8	7.1	36					
25	28.3	27.5	6.9	36	0.98587	0.91858	3009.49	4587.37	370.63
26	28.5	28	7	40					
27	28.4	27.8	7.3	40	0.98577	0.89901	2431.63	3457.78	333
28	28.4	27.9	7.4	36					
29	28.3	27.5	7.5	31	0.98567	0.89623	1982.50	3399.34	313.52
30	28.5	28	7.5	28					
31	28.4	27.8	7.6	26	0.98562	0.89369	1665.00	2928.98	210.12
32	28.4	27.9	7.7	22					
33	27	26	7.7	19	0.98569	0.89106	1551.45	2437.90	192.3
34	27.5	26.5	7.8	20					
35	27.4	26.7	7	18	0.98566	0.88896	1414.20	2371.64	156.51
36	27.5	26.7	7.5	16					
37	27.6	26.7	7.3	13	0.98562	0.88582	1254.25	2103.45	138.86
38	27.8	26.8	7.3	14					
39	28.5	27	7.4	9	0.9856	0.88373	1329.60	2120.64	85.25
40	28.2	27.8	7.5	8					
41	28.3	27.5	7.5	7	0.98547	0.87388	1259.0	1866.03	94.5

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur ambient, pH 7.2 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.9. Pada, temperatur lindi berada pada kisaran dari 28-31°C, temperatur biogas 28-30°C, pH konstan 7.2. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-23, yaitu dari 34 mm H₂O sampai dengan 42 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-24 sampai hari ke-41, dari 40 mm H₂O sampai dengan 9 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98726 - 0.98562 g/mL. Viskositas juga menurun dari 0.93814 - 0.85242 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 80.29%, yaitu mulai dari 4055.00-799.33 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 81.43%, yaitu mulai dari 6457.65–1199.2 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.69. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, dimana pada hari ke-21 yaitu 87.00 mg/L, naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-29 menjadi 370.63 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 91.15 mg/L.

Tabel 4.9. Pengolahan Anaerobik pada pH 7.2

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	30.5	29	7.2	34	0.98726	0.93814	4055.00	6457.65	87.00
22	29.5	29	7.2	39					
23	29	28.7	7.2	42	0.98655	0.90806	3474.82	5540.56	225.00
24	29.5	28.5	7.2	40					
25	30	28.5	7.2	35	0.98625	0.88742	2860.00	3947.33	257.00
26	29	28.5	7.2	34					
27	29	29	7.2	33	0.98612	0.86751	2476.10	3236.4	156.00
28	29	28.3	7.2	30					
29	29	28.5	7.2	28	0.98585	0.85971	2006.56	2618.56	370.63
30	28	28	7.2	26					
31	29	28	7.2	24	0.98571	0.8574	1383.00	1945.36	187.00
32	28.4	28.5	7.2	23					
33	29.5	28.5	7.2	21	0.98569	0.85522	1270.00	1778	235.00
34	29	28.5	7.2	20					
35	29	28.5	7.2	19	0.98568	0.8552	1157.35	1665.3	177.00
36	28.8	28.3	7.2	17					
37	29	28.5	7.2	15	0.98566	0.85514	838.80	1278.5	85.25
38	29	28	7.2	13					
39	29	28	7.2	11	0.98563	0.85486	821.5	1272.7	138.86
40	28.5	28.9	7.2	10					
41	31	30	7.2	9	0.98562	0.85242	799.33	1199.2	91.15

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur ambient, pH 8.0 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.10. Pada, temperatur lindi berada pada kisaran dari 27-28.5°C, temperatur biogas 26-28°C,

pH konstan 8.0. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 18 mm H₂O sampai dengan 32 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai hari ke-41, dari 29 mm H₂O sampai dengan 6 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.9859-0.98485 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.01043 - 0.8797 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 79.91%, yaitu mulai dari 3809.6 - 765.18 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 80.55%, yaitu mulai dari 6200 – 1205.9 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.62. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 83.33 mg/L, naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-31 yaitu 370.63 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 185.25 mg/L.

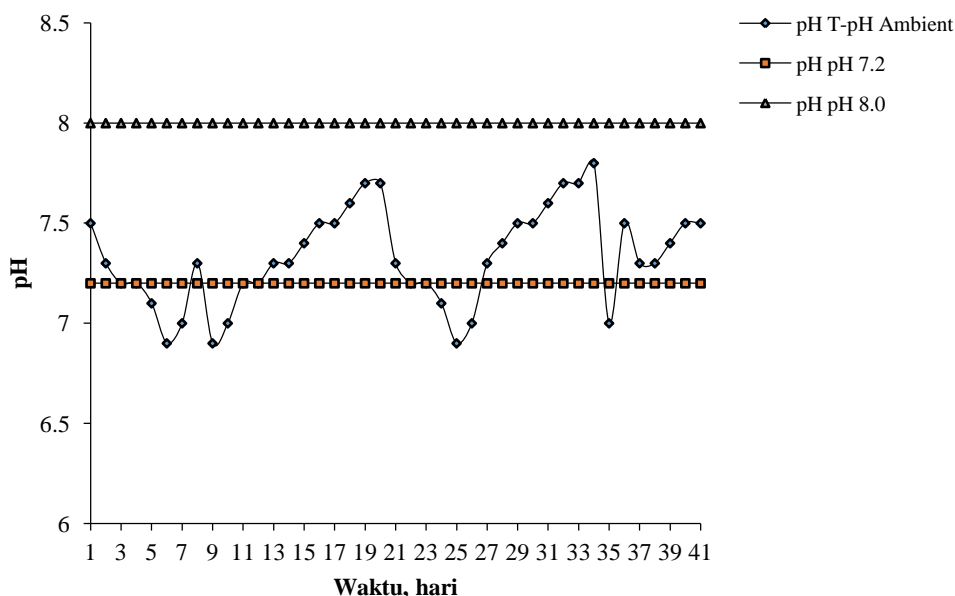
Tabel 4.10. Pengolahan Anaerobik pada pH 8.0

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	28.5	28	8	18	0.9859	1.01043	3809.6	6200	83.33
22	28.4	27.8	8	20					
23	27	27.9	8	22	0.98576	0.97299	2960.7	5450.4	89
24	27.5	26	8	24					
25	27.4	26.5	8	27	0.98547	0.95991	2546	5056.55	156
26	27.5	26.7	8	31					
27	27.6	26.7	8	32	0.98531	0.94748	2280.7	4133.35	138.86
28	27.8	27.8	8	29					
29	28.5	27.9	8	26	0.9852	0.9452	2142.2	3757.9	166.53
30	27.4	27.5	8	24					
31	27.5	28	8	23	0.98509	0.92159	1825.9	3013.81	370.63
32	27.6	27.8	8	21					
33	27.8	27.9	8	20	0.98507	0.91185	1493.89	2443.65	187
34	28.5	27.8	8	17					
35	28.2	27.5	8	16	0.98506	0.899	1352.5	1936.2	253.5
36	28.3	28	8	14					
37	28.5	27.8	8	12	0.98501	0.8896	1199.85	1490.22	225
38	28.2	27.9	8	11					
39	28.3	27.5	8	9	0.98487	0.8854	825.7	1279.4	124.9
40	28.5	28	8	7					
41	28.4	27.8	8	6	0.98485	0.8797	765.18	1205.9	185.25

pH merupakan salah satu parameter penting pada pengolahan anaerobik karena bakteri metanogenik sangat sensitif terhadap perubahan pH. Bakteri pembentuk-metana hidup dengan baik pada kondisi netral ke sedikit basa. pH dalam bioreaktor secara langsung bergantung pada waktu tinggal (*retention time*) (Kigozi *et al.*, 2014).

Proses *seeding* dilaksanakan selama 10 hari dan dilanjutkan dengan aklimatisasi selama 10 hari. Pada penelitian ini terlihat bahwa secara keseluruhan proses pH *seeding* dan aklimatisasi, dari yang terendah 6,3 meningkat sampai 7,9.

Pada Gambar 4.7., dimana tahap *seeding* dan aklimatisasi dilakukan pada hari ke-1 sampai hari ke-20. Terlihat bahwa tahap *seeding* pada pH *ambient* berada pada kisaran 6.2 sampai dengan 7.8. Sedangkan tahap aklimatisasi pada pH *ambient* berada pada rentang 6.3 sampai dengan 8.0. dan pada tahap pengolahan anaerobik, pada hari ke-21 sampai hari ke-41, terlihat bahwa pada keseluruhan pH *ambient* pengolahan anaerobik berada pada kisaran 6.9 sampai dengan 7.9.



Gambar 4.7. Kondisi pH pada variasi pengaruh pH

pH pada kedua tahapan tersebut, tahap *seeding*-aklimatisasi dan pengolahan anaerobik, terlihat ada perbedaan kisaran pH. Dimana pH *seeding*-aklimatisasi berada pada pH sedikit asam sedangkan pH pengolahan anaerobik berada pada pH sedikit basa. Hal ini terjadi karena tahap biodegradasi ini melibatkan bakteri hidrolisis yang menghasilkan enzim ekstraseluler (Gujer dan Zehnder, 1983; Shin dan Song, 1995; van Lier *et al.*, 2008), dan cellulase (Abdelgadir *et al.*, 2014). Kelompok bakteri selulolitik ini optimum berperan pada kisaran pH 6 – 7. Protein dihidrolisis menjadi asam amino oleh protease yang

berfungsi sebagai *exo-enzim*. Lipid dihidrolisis menjadi gliserol dan asam lemak. Hidrokarbon dihidrolisis menjadi glukosa dan gula sederhana lainnya. Hidrolisis ini dilakukan oleh bakteri anaerob fakultatif melalui *exo-enzim* (McInerney dan Bryant, 1981; Wiesmann *et al.*, 2007). Pada proses ini kemungkinan penurunan pH bisa terjadi dikarenakan terbentuknya asam-asam organik (Fry, 1974). pH dalam bioreaktor sangat dipengaruhi oleh jumlah VFA, ammonia, dan CO₂ yang dihasilkan (Eckenfelder, 1989; Padmono, 2007).

Sedangkan pada tahap pengolahan anaerobik, dimana biodegradasi anaerobik yang berperan adalah kelompok bakteri metanogenesis; yaitu *hydrogenophilic* atau *hydrogenotrophic*, yang membentuk metana dari CO₂ dan H₂ dan metanogens asetoklastik atau asetotropik, yang menghasilkan metana dengan cara dekarboksilasi asetat (Sekiguchi dan Kamagata, 2004). Kelompok bakteri *methanogens* ini memanfaatkan hasil dari tiga tahap pertama (hidrolisis, asidogenesis dan asetogenesis) untuk menghasilkan campuran biogas (Ferry, 1999). Bakteri *methanogens* bersifat mesofilik optimum pada kisaran temperatur 28 – 42 °C (Ziemiński dan Magdalena, 2012) dan optimum pada rentang pH 7.2 – 8.0 (Suryawanshi *et al.*, 2013).

Pada tahap awal, sejumlah besar asam-asam organik diproduksi oleh bakteri pembentuk asam, pH dalam bioreaktor dapat turun sampai dibawah 5. Kondisi seperti ini dapat menghambat atau menghentikan proses dalam bioreaktor. Bakteri *methanogenic* sangat sensitif terhadap perubahan pH dan tidak dapat berkembang dibawah pH 6.5. Meskipun proses masih dapat berjalan pada rentang pH 6.0 – 8.0 (Kigozi *et al.*, 2014). Jadi walaupun bakteri pembentuk metan sangat sensitif terhadap pH, tetapi pH dalam bioreaktor tidak harus dikendalikan secara ketat. Pengaturan pH dapat dilakukan dengan menjaga umpan agar tidak terlalu asam serta menjaga kesetimbangan reaksi pada tahap asidogenik dan metanogenik dengan baik (Padmono, 2007).

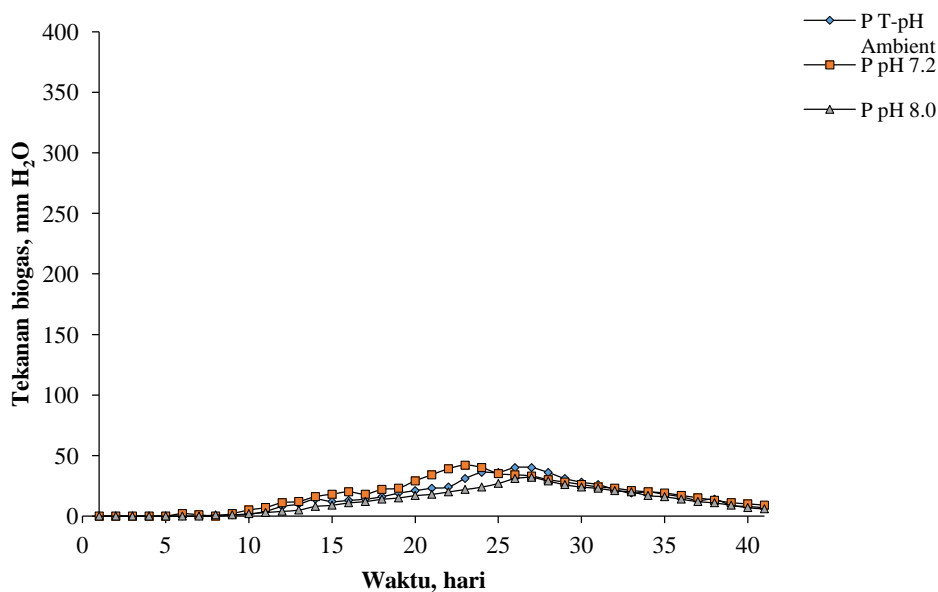
Tekanan Biogas

Tekanan biogas juga menunjukkan jumlah pembentukan biogas yang dihasilkan. Secara keseluruhan tekanan biogas pada proses *seeding* (hari ke-1

sampai dengan 10), walaupun ada peningkatan tekanan tetapi tidak mengalami kenaikan yang signifikan.

Secara keseluruhan tekanan biogas pada tahap *seeding*, pada hari ke-1 sampai dengan hari ke-10, walaupun ada peningkatan tekanan tetapi tidak mengalami kenaikan yang signifikan, yaitu $>10\%$. Sedangkan pada tahap aklimatisasi (hari ke-11 sampai dengan 20), tekanan biogas mengalami kenaikan secara signifikan $>10\%$. Seperti terlihat pada Gambar 4.9.

Pada Gambar 4.8, tahap aklimatisasi pada variasi pH, Q dan T, kenaikan tekanan biogas, pada hari ke-10 sampai dengan hari ke-20, terlihat landai. Dimana kenaikan tekanan biogas $>10\%$ pada variasi pH, laju resirkulasi lindi; Q dan temperatur lindi; T, terjadi pada hari ke-12 – 15. Namun sampai akhir tahap aklimatisasi pada hari ke-20, kenaikan tekanan biogas tetap landai dan tidak ekponensial. Secara keseluruhan tahap *seeding*-aklimatisasi pada variasi pH, Q dan T, adalah bahwa tekanan biogas pada pH 7.2 $>$ pH *ambient* $>$ pH 8.0, berturut-turut adalah 42 mm H₂O, 40 mm H₂O dan 32 mm H₂O.



Gambar 4.8. Tekanan biogas pada pengaruh pH

Konsentrasi Substrat (COD dan BOD)

Indikator keberhasilan mikroorganisme dalam biodegradasi adalah menurunnya konsentrasi substrat pada lindi. Dimana konsentrasi substrat terlarut

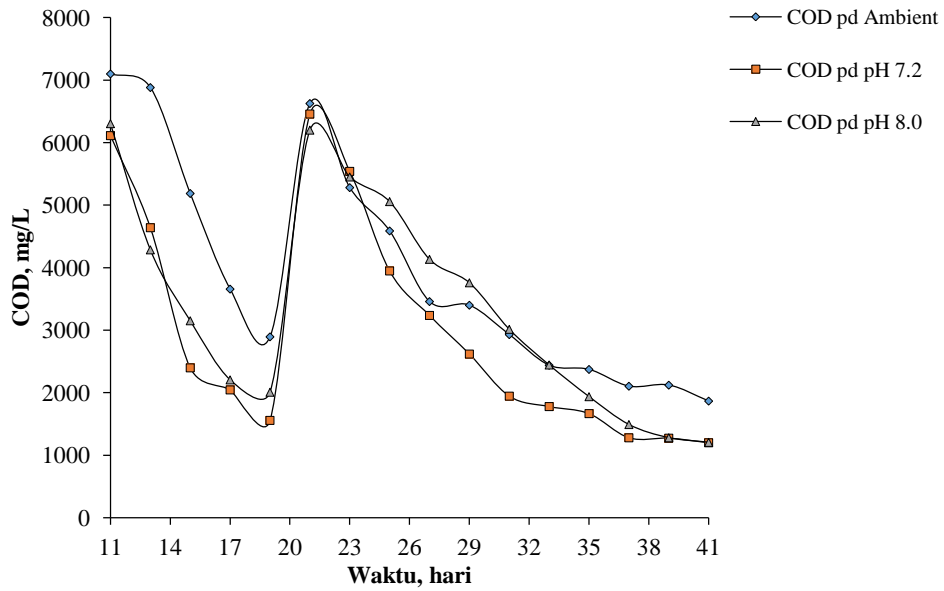
(COD dan BOD) dalam lindi setelah proses (aklimatisasi dan pengolahan anaerobik) mengalami penurunan. Seperti pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.

Konsentrasi substrat (COD dan BOD) pada tahap aklimatisasi, hari ke-11 sampai hari ke-21, menurun, seperti terlihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10. Penurunan COD minimal adalah 40.42% dan maksimal 75.07%. Sedangkan Penurunan BOD minimal adalah 41.97 % dan maksimal 72.78%. Penurunan COD dan BOD pada tahap aklimatisasi, disebabkan penurunan konsentrasi substrat terlarut yang dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk bertumbuh, berkembang biak dan beradaptasi dalam lindi. Jadi pada tahap ini, substrat molekul-molekul organik kompleks tak-larut dihidrolisis menjadi molekul-molekul sederhana yang terlarut dalam lindi. Hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan bakteri berjalan dengan baik. Juga terlihat pada nilai biodegradabilitas ratio BOD/COD berkisar antara 0.43 – 0.70.

Setelah tahap aklimatisasi masuk ke tahap pengolahan anaerobik, dilakukan penambahan lindi pada hari ke-21, COD dan BOD meningkat lagi. Peningkatan tersebut, terjadi karena bertambah pula bahan-bahan organik dan anorganik terlarut pada lindi dalam bioreaktor. Jadi COD dan BOD meningkat, karena dilakukan penambahan konsentrasi substrat dalam lindi.

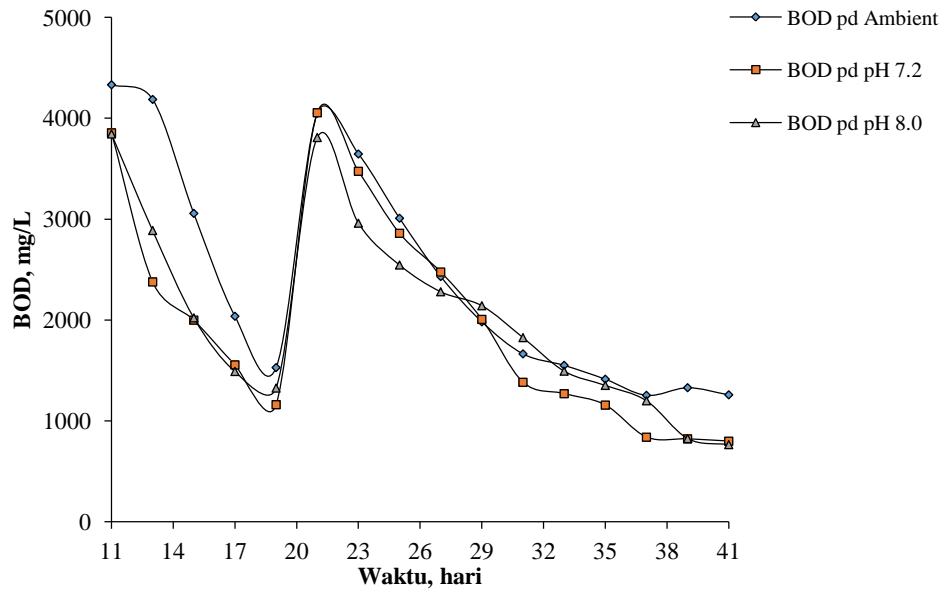
Pada tahap pengolahan anaerobik, hari ke-21 sampai dengan hari ke-41. Secara keseluruhan, diperoleh COD removal berkisar antara 71.84 % sampai dengan 85.31 %. Sedangkan BOD removal diperoleh berkisar antara 68.91 sampai dengan 84.15 %. Dengan COD dan BOD removal rata-rata berturut-turut sebesar 80.74 % dan 80.44%. Penurunan COD dan BOD tertinggi terjadi pada hari ke-21 – 29.

pH juga berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi substrat. Presentasi penurunan COD pada pH ambient, pH 7.2 dan pH 8.0 berturut-turut adalah 71.84%, 81.43% dan 80.55%. Jadi COD removal pada pH 7.2 > pH 8.0 > pH ambient. Seperti terlihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. COD pada variasi pengaruhn pH

pH juga berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi substrat. Penurunan BOD pada pH ambient, pH 7.2 dan pH 8.0 berturut-turut adalah 68.91%, 80.29% dan 79.91%. Jadi BOD removal pada pH 7.2 > pH 8.0 > pH ambient. Seperti terlihat pada Gambar 4.10.

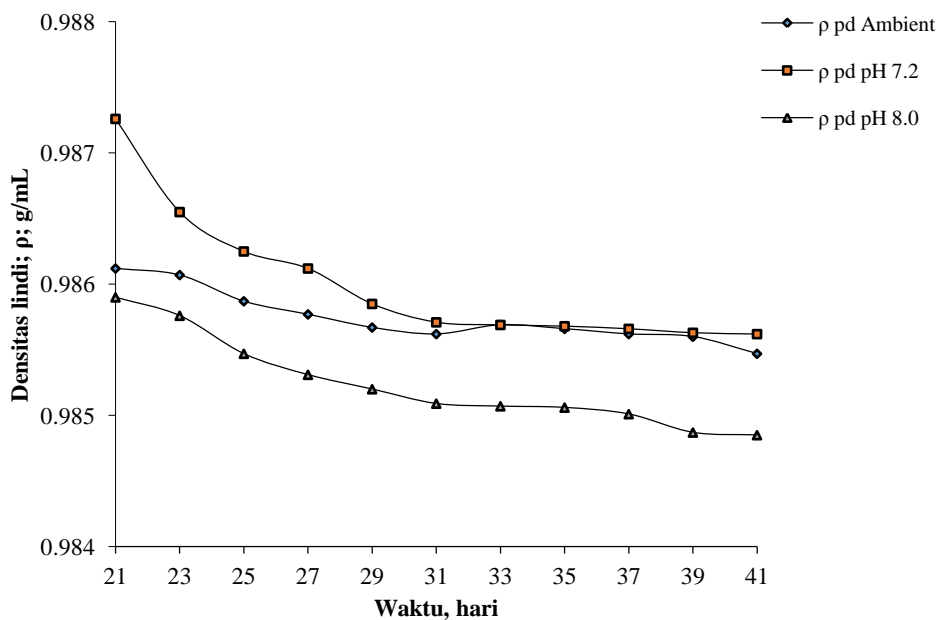


Gambar 4.10. BOD pada variasi pengaruhn pH

Densitas dan viskositas

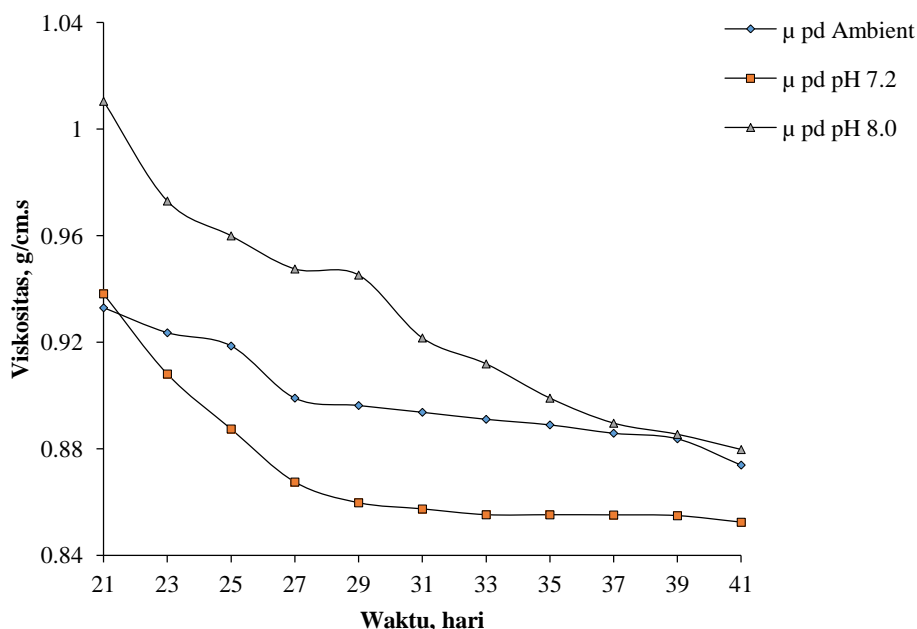
Densitas dan viskositas juga mengalami penurunan, pada seluruh perlakuan variasi pH, laju alir resirkulasi dan temperatur, maupun kombinasi pH, laju alir resirkulasi dan temperatur. Seperti terlihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, densitas dan viskositas pada lindi semakin menurun setelah proses pengolahan anaerobik. Dimana penurunan densitas berkisar antara 0.066% sampai dengan 0.613%, dengan rata-rata penurunan densitas adalah 0.307%. Begitu juga dengan viskositas, mengalami penurunan berkisar antara 6.33% sampai dengan 19.91%. Dengan rata-rata penurunan viskositas adalah 15.44%.

Pada gambar 4.11, jika dilihat dari persentase penurunan densitas pada pengaruh pH, Q, dan T adalah bahwa penurunan densitas pada pH 7.2 > pH 8.0 > pH ambient.



Gambar 4.11. Penurunan densitas pada pengaruh pH.

Pada gambar 4.12, jika dilihat dari persentase penurunan viskositas pada pengaruh pH, Q, dan T adalah bahwa penurunan viskositas pada pH 8.0 > pH 7.2 > pH ambient.



Gambar 4.12. Penurunan viskositas pada pengaruh pH.

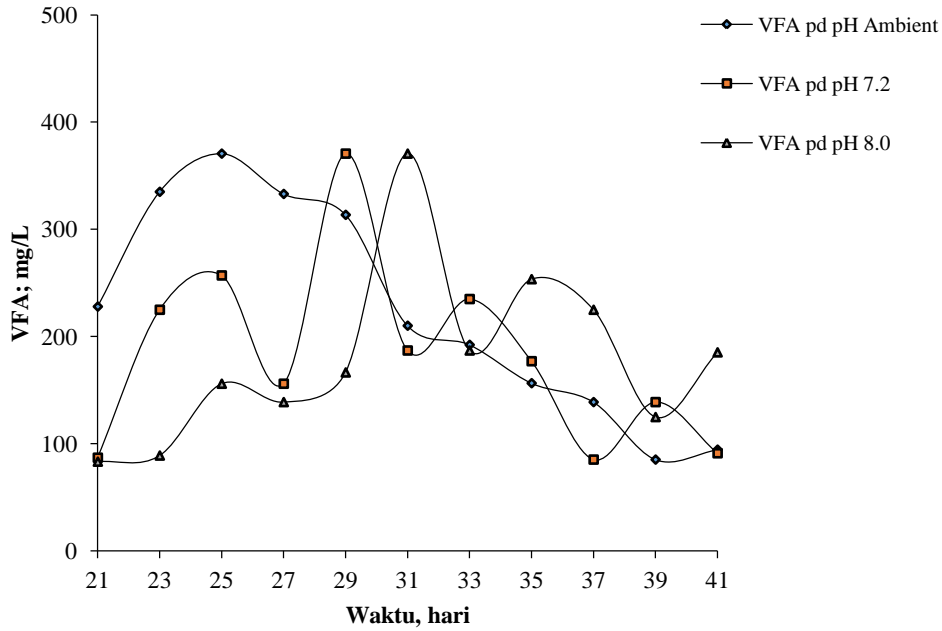
Konsentrasi VFA

Konsentrasi VFA ditentukan sebagai parameter untuk mengetahui sejauh mana tahap asidogenesis dan asetogenesis berlangsung. Dimana konsentrasi VFA merupakan salah satu parameter yang baik untuk memonitor dalam menentukan stabilitas bioreaktor anaerobik. VFA dianalisis sebagai asam asetat, karena asam asetat merupakan zat antara utama yang dominan dengan kandungan sekitar 85% dari VFA total. Pada tahap asetogenesis, semua asam-asam organik yang terbentuk akan terkonversi menjadi asam asetat (Gerardi, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Ganidi *et al.*, 2009).

VFA merupakan *intermediate product* (Appels *et al.*, 2008) yang akan dikonversi menjadi asam asetat pada tahap asetogenesis (Gerardi, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 2004; Ganidi *et al.*, 2009), CO₂ dan H₂ (Schink, 1997; Ziemiński dan Frac, 2012).

Konsentrasi VFA yang diperoleh dari terendah 76.71 mg/L dan tertinggi 1699.7 mg/L. Pada pengaruh pH diperoleh konsentrasi VFA berkisar antara 83.33 – 370.63 mg/L. Konsentrasi VFA dipengaruhi oleh pH. Makin tinggi pH makin tinggi pula konsentrasi VFA yang diperoleh. Namun tetap mempertimbangkan kondisi pH optimum mikroorganisme yang terlibat dalam biodegradasi tersebut.

Konsentrasi VFA tertinggi pada pH *ambient* = pH 7.2 = pH 8.0, adalah 370.63 mg/L. Seperti terlihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.13. Konsentrasi VFA pada pengaruh pH

Uji Anova pengaruh pH

Densitas.

Tabel 4.11. Uji Anova pengaruh pH terhadap densitas

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	0.0000033	0.0000017	11.75	0.000
Error	30	0.0000043	0.0000001		
Total	32	0.0000076			

S = 0.0003771 R-Sq = 43.92% R-Sq(adj) = 40.19%

Nilai p-value menunjukkan kurang dari alfa 5%, sehingga pH mempengaruhi densitas.

Viskositas

Tabel 4.12. Uji Anova pengaruh pH terhadap viskositas

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	0.018183	0.009092	9.59	0.001
Error	30	0.028452	0.000948		
Total	32	0.046635			

S = 0.0307959 R-Sq = 38.99% R-Sq(adj) = 34.92%

P-value menunjukkan nilai kurang dari alfa 0.05, sehingga pH berpengaruh signifikan terhadap viskositas.

BOD

Tabel 4.13. Uji Anova pengaruh pH terhadap BOD

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	355524	177762	0.17	0.847
Error	30	31986833	1066228		
Total	32	32342357			

S = 1032.58 R-Sq = 1.10% R-Sq(adj) = 0.00%

Tabel 4.13, menunjukkan nilai p-value lebih dari 0.05, artinya pH tidak berpengaruh signifikan terhadap BOD.

COD

Tabel 4.14. Uji Anova pengaruh pH terhadap COD

Source	DF	SS	MS	F	P
Ph	2	1990190	995095	0.34	0.713
Error	30	87355653	2911855		
Total	32	89345843			

S = 1706 R-Sq = 2.23% R-Sq(adj) = 0.00%

P – value menunjukkan nilai lebih dari 0.05, sehingga tidak terdapat pengaruh yang signifikan.

Asam Asetat

Tabel 4.15. Uji Anova pengaruh pH terhadap VFA (Asam asetat)

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	13015	6507	0.8	0.46
Error	30	244792	8160		
Total	32	257807			

S = 90.33 R-Sq = 5.05% R-Sq(adj) = 0.00%

Tabel diatas menunjukkan nilai p-value pada pH sebesar 0.46, nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan alfa 0.05. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan pH tidak memberi pengaruh terhadap asetat.

4.2.1.2. Pengaruh Laju Alir Resirkulasi

Seeding dan aklimatisasi

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur dan pH *ambient* dan resirkulasi lindi; Q 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.16. Pada

seeding, temperatur lindi mulai dari 28–28.5°C, temperatur biogas 27 – 27.8°C, pH naik turun antara 6.9-7.4, dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-3, dengan fluktuasi kenaikan antara 6-11 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi mulai dari 28.2-29°C, temperatur biogas 27.5-28°C, pH berfluktuasi naik turun antara 6.9-7.8 dan tekanan biogas meningkat dari 15-67 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.64.

Tabel 4.16. *Seeding* dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.5	27.5	7.1	0		
	2	28.5	27	6.9	0		
	3	28.2	27	7	6		
	4	28.3	29	7.3	6.5		
	5	28.2	28	6.9	6		
	6	28.3	27.8	6.9	7	-	-
	7	28.5	27.5	7	7.5		
	8	28.5	27	7.3	9		
	9	28.2	27	7.4	10		
	10	28	27.8	7.4	11		
Aklimatisasi	11	28.3	27.5	7.2	15	3508.35	6155
	12	28.2	27.5	7.2	18		
	13	28.3	28	7.2	23	2765.6	4123.65
	14	28.2	28	7.1	30		
	15	28.3	27.5	6.9	35	2057.4	3077.5
	16	28.2	28	7.0	44		
	17	28.3	27.5	7.4	47	1899.56	2815.6
	18	28.5	28	7.8	55		
	19	28.3	28	7.6	60	1755.5	2769.7
	20	29	27.5	7.5	67		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur dan pH *ambient* dan resirkulasi lindi; Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.17. Pada *seeding*, temperatur lindi dari 28.2-28.5°C dan temperatur biogas 27–28°C. pH naik dari 6.3-7.4 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-3, dengan naik turun fluktuasi antara 4 sampai dengan 15 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi mulai dari 28.2-29°C, temperatur biogas 26-28°C, pH meningkat dari 7.1-8.0 dan tekanan biogas meningkat dari 19-93 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.56.

Tabel 4.17. *Seeding* dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.2	28	6.3	0		
	2	28.3	27.8	6.9	0	-	-

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
	3	28.5	27.5	6.8	4		
	4	28.5	27	6.9	9		
	5	28.2	27	6.8	5		
	6	28.3	28	6.9	10		
	7	28.5	27.5	7	10		
	8	28.2	27.8	7.3	15		
	9	28.3	28	7.1	9		
	10	28.5	28	7.4	11		
	11	28.3	26	7.1	19	3753.94	6489
	12	28.2	26.5	7.4	22		
	13	28.3	27.8	7	33	3631.55	6279
	14	28.5	27.5	7.8	43		
Aklimatisasi	15	28.3	27	7.4	55	2577.76	4572.67
	16	28.2	27.5	7.7	60		
	17	28.3	27.5	8	64	2295.1	4200.12
	18	28.5	28	7.8	76		
	19	28.3	28	7.6	81	2003.53	3642.95
	20	29	28	7.3	93		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T *ambient*, pH 8.0 dan resirkulasi lindi; Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.18. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.2–29°C, dan temperatur biogas 26.5–29°C. pH turun dari 7.8-6.5 dan naik dari 6.5-7.2 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-4, dengan fluktuasi naik turun antara 4 sampai dengan 13 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi dari 28.2-29°C, temperatur biogas dari 26-28.5°C, pH naik 7.5-8.0 dan selanjutnya konstan pada 8.0 dan tekanan biogas meningkat dari 18-84 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.57.

Tabel 4.18. *Seeding* dan aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
	1	29	26.5	7.8	0		
	2	28.5	28	7.6	0		
	3	28.3	28	7.3	0		
<i>Seeding</i>	4	28.5	28	7.1	4		
	5	28.2	27	6.9	8		
	6	28.2	27	6.7	6	-	-
	7	29	29	6.5	11		
	8	28	26.5	6.6	14		
	9	28.3	28	6.8	12		
	10	28.5	28	7.2	13		
	11	28.3	26	7.5	18	3703.9	6448.9
	12	28.5	26.5	7.8	23		
	13	28.3	28	7.9	25	3315.5	6227.9
Aklimatisasi	14	28.2	28	8.0	29		
	15	28.3	26.5	8.0	42	2557.7	4357.27
	16	28.2	28	8.0	51		
	17	28.3	26.5	8.0	55	2291.5	4120

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
	18	28.2	28	8.0	63		
	19	28.3	26.5	8.0	73	2030.5	3462.9
	20	29	28	8.0	84		

Pengolahan anaerobik

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur dan pH ambient, dan laju resirkulasi lindi, Q 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.19. Pada, temperatur lindi berada pada kisaran dari 28.5-29.9°C, temperatur biogas 27-29°C, pH naik turun dengan kisaran 6.9-7.8. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-25, yaitu dari 76 mm H₂O sampai dengan 101 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-26 sampai hari ke-41, dari 97 mm H₂O sampai dengan 10 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98702 - 0.98526 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.01158 - 0.87307 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 78.71%, yaitu mulai dari 3616.3 - 769.9 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 79.25%, yaitu mulai dari 6235 - 1293.7 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.70. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 194.95 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-31 yaitu 380 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 99.8 mg/L.

Tabel 4.19. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	29.3	27.0	7.2	76	0.98702	1.01158	3616.3	6235	194.95
22	29.0	27.5	6.9	89					
23	29.8	27.4	7	95	0.98656	0.97378	2853.02	3875.00	365.65
24	29.9	28,4	7.3	99					
25	29.8	27.0	7.4	101	0.98627	0.95068	2240.50	3005.85	448.98
26	29.3	27.5	7.5	97					
27	29.0	27.4	7.5	83	0.98617	0.9443	2104.40	2575.80	409.63
28	29.0	27.5	7.5	72					
29	29.0	28.3	7.3	64	0.9861	0.9346	1614.78	2150.70	356.32
30	29.0	28.5	7.5	61					
31	28.8	28,4	7.3	54	0.98599	0.92143	1455.32	1945.00	480
32	28.5	28,4	7.4	43					
33	29.8	29.0	7.5	39	0.98592	0.90064	1318.80	1786.05	475.1
34	28.8	28.3	7.5	35					
35	28.5	28.0	7.6	33	0.98582	0.88979	1245.70	1709.34	336.1
36	29.8	27.5	7.7	30					
37	29.9	27.5	7.7	26	0.98554	0.87746	1022.34	1557.70	180.7
38	29.8	27.4	7.8	23					
39	29.3	27.5	7.6	20	0.98531	0.87518	878.75	1414.50	123.5
40	29.0	28.3	7.9	17					

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
41	29.0	28.5	7.5	10	0.98526	0.87307	769.9	1293.7	99.8

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur dan pH ambient, dan laju resirkulasi lindi, Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.20. Temperatur lindi berada pada kisaran dari 29-32°C, temperatur biogas 28.8-30.7°C, pH naik turun dengan kisaran 7.0-7.9. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-24, yaitu dari 101 mm H₂O sampai dengan 116 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-25 sampai hari ke-41, dari 115 mm H₂O sampai dengan 10 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98743 - 0.98524 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.012 - 0.87201 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 81.54%, yaitu mulai dari 3835.8 - 708.2 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 81.55%, yaitu mulai dari 6555.71 - 1209.22 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.56. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 153.05 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-29 yaitu 1209.22 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 76.71 mg/L.

Tabel 4.20. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	30	29.3	7.3	101	0.98743	1.012	3835.8	6555.71	153.05
22	30	29	7.7	108					
23	30	29	7.8	113	0.98682	0.99063	2929.29	4351.90	338.13
24	30.8	28.8	7.8	116					
25	30.2	29	7.8	115	0.98662	0.9645	2496.17	4080.00	567.32
26	31	30.5	7.0	112					
27	30.9	29.8	7.4	104	0.98638	0.94851	1817.1	3708.45	828.26
28	30.5	29.9	7.8	90					
29	30.5	29.8	7.7	77	0.9861	0.94606	1615.5	3680.00	872.88
30	30.5	30	7.8	65					
31	30	29.7	7.6	60	0.98597	0.92552	1610	2800.00	814.6
32	30.3	30	7.9	55					
33	30.2	30	7.5	47	0.98587	0.91259	1316.21	2294.73	697.72
34	30	29.5	7.3	44					
35	30.5	30.5	7.5	42	0.98577	0.89632	1121.6	1955.44	512.7
36	32	30.7	7.3	32					
37	30.5	29.8	7.4	27	0.98552	0.87765	810.82	1666.30	244.54
38	30.5	30	7.5	24					
39	29	30	7.5	17	0.98532	0.87416	767.00	1311.20	326.2
40	30	29.8	7.4	18					
41	30.5	29.5	7.3	10	0.98524	0.87201	708.2	1209.22	76.71

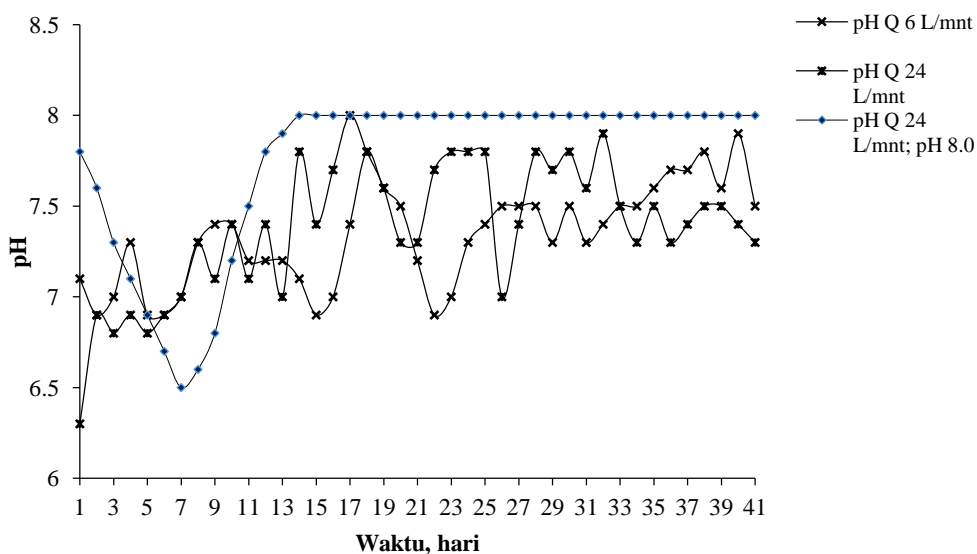
Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur *ambient*, pH 8.0 dan laju resirkulasi lindi, Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.21. Temperatur lindi naik turun dengan kisaran 27.5-30.5°C, temperatur biogas 26.5-30°C, pH konstan 8.0. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-26, yaitu dari 92 mm H₂O sampai dengan 117 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-27 sampai hari ke-41, dari 110 mm H₂O sampai dengan 11 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98602 - 0.98182 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.07689 - 0.8792 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 81.39%, yaitu mulai dari 3850.75 - 716.8 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 80.94%, yaitu mulai dari 6255.70 - 1192.22 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.62. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 153.05 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-27 yaitu 828.26 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 176.7 mg/L.

Tabel 4.21. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	27.4	26.5	8.0	92	0.98602	1.07689	3850.75	6255.70	153.05
22	27.5	26.7	8.0	99					
23	27.6	26.7	8.0	103	0.98542	1.0362	2929.9	4351.90	567.32
24	27.8	27.8	8.0	107					
25	28.5	27.9	8.0	115	0.98532	1.0248	2249.67	3580.00	338.13
26	29.7	27.5	8.0	117					
27	27.5	28	8.0	110	0.98513	0.9495	1717.5	3008.45	828.26
28	29.7	27.8	8.0	99					
29	29.7	27.9	8.0	85	0.98477	0.945	1651.5	2680.00	497.72
30	29.7	27.8	8.0	63					
31	30	29.7	8.0	57	0.98387	0.9435	1451.8	2100.00	671.46
32	30.3	30	8.0	48					
33	30.2	30	8.0	45	0.98337	0.9245	1316.21	1894.73	497.72
34	30	29.5	8.0	41					
35	28.5	27.9	8.0	39	0.98292	0.90546	1125.6	1755.44	551.27
36	29.7	26.7	8.0	32					
37	29.7	27.8	8.0	28	0.98262	0.8925	818.20	1566.63	244.54
38	30.5	27.9	8.0	24					
39	29.7	27.5	8.0	20	0.98242	0.8875	756.70	1312.50	362.2
40	30	28	8.0	18					
41	30.5	27.8	8.0	11	0.98182	0.8792	716.8	1192.22	176.7

Kondisi pH pada pengaruh laju alir resirkulasi, seperti terlihat pada Gambar 4.14. Secara umum, pada saat *seeding* pH mengalami penurunan dan kemudian meningkat lagi pada saat aklimatisasi. Dimana rentang pH *seeding*,

aklimatisasi dan pengolahan anaerobik berturut-turut adalah 6.2 – 7.7; 6.3 – 8.0 dan 7.2 – 8.0.



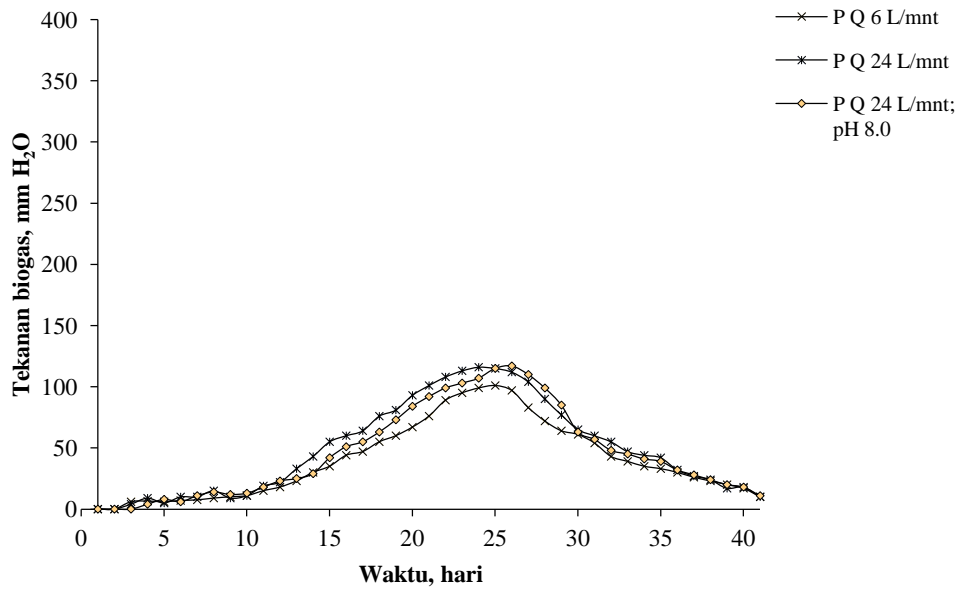
Gambar 4.14. Kondisi pH pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Tekanan Biogas

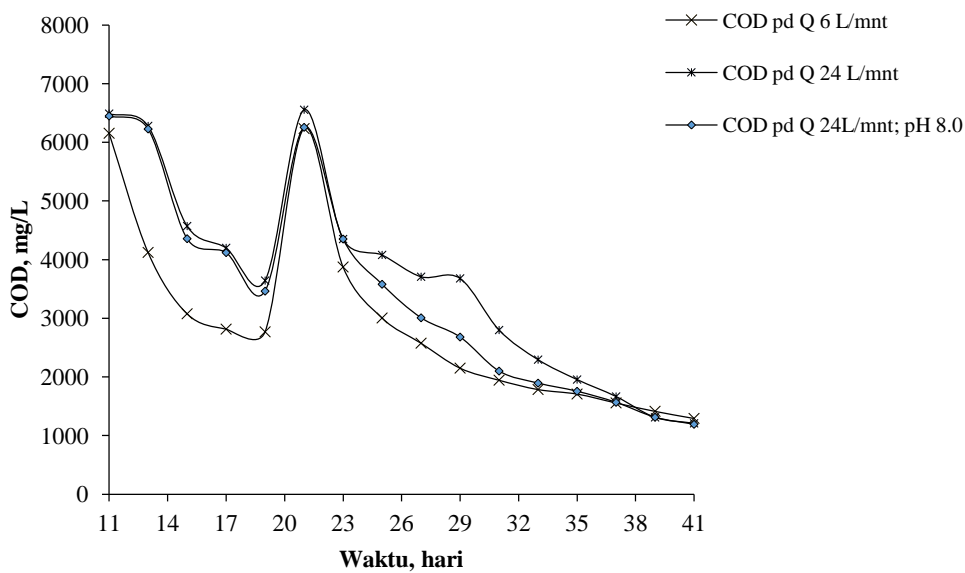
Pada perlakuan laju alir resirkulasi, diperoleh tekanan biogas pada $Q\ 24\ \text{L/mnt} > Q\ 6\ \text{L/mnt} > \text{Tanpa resirkulasi}$, berturut-turut adalah 115 mm H₂O, 101 mm H₂O dan 40 mm H₂O. Seperti terlihat pada Gambar 4.15. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa resirkulasi mempercepat laju pembentukan produksi biogas bila dibandingkan antara yang diresirkulasi dengan yang tidak diresirkulasi (Vavilin *et al.*, 2002).

Konsentrasi Substrat (COD dan BOD)

Resirkulasi pada reaktor juga dapat meningkatkan kontak antara mikroorganisme dengan substrat (Beux *et al.*, 2007). Makin tinggi laju alir juga meningkatkan efisiensi penurunan konsentrasi substrat (COD dan BOD removal). Presentasi penurunan COD pada tanpa resirkulasi, laju alir resirkulasi 6L/mnt, laju alir resirkulasi 24 L/mnt dan laju alir resirkulasi berturut-turut adalah 71.84%, 79.25%, 81.55 dan 80.94%. Jadi COD removal pada $Q\ 24\ \text{L/mnt} > Q\ 6\ \text{L/mnt} > Q\ 0\ \text{L/mnt}$. Seperti terlihat pada Gambar 4.16.

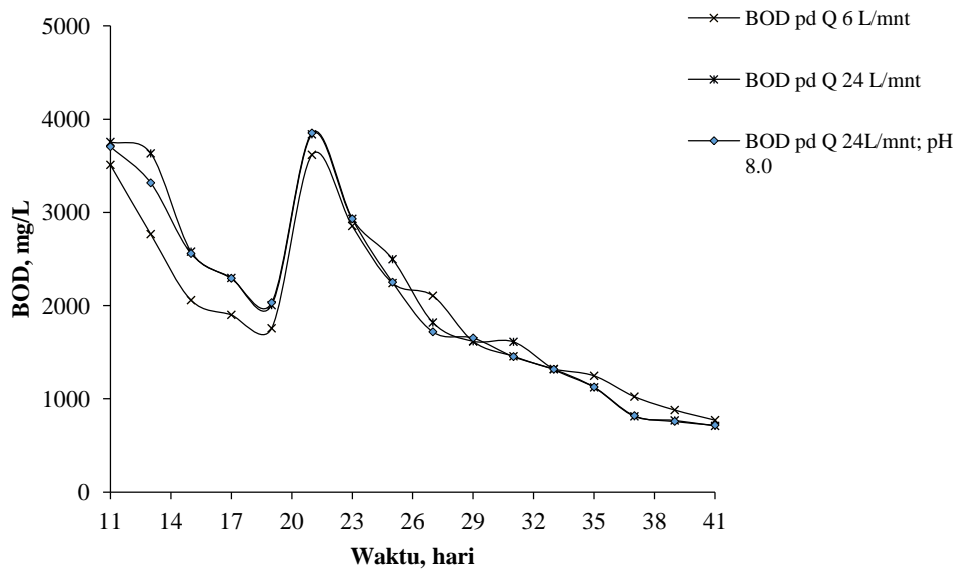


Gambar 4.15. Tekanan biogas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.16. COD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

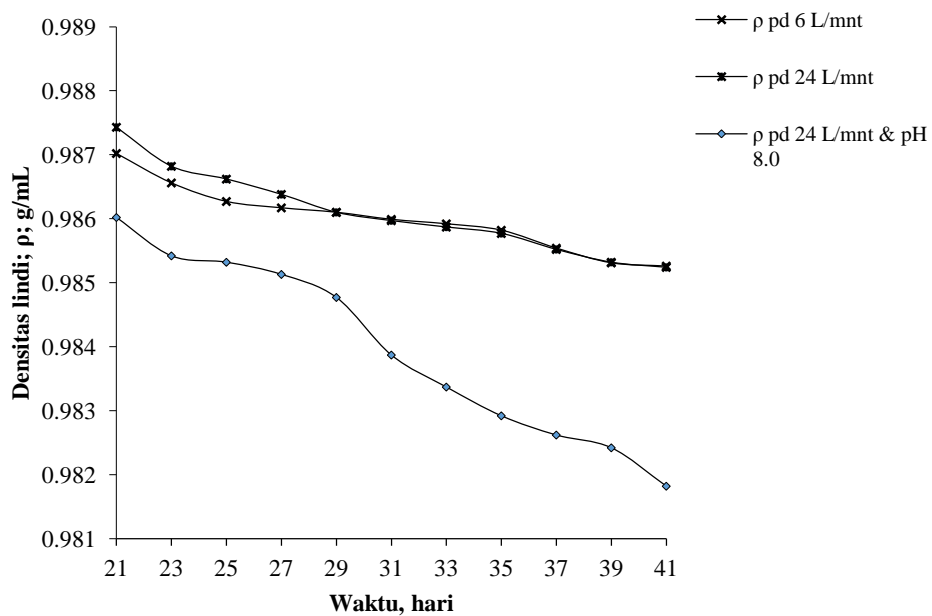
Laju alir resirkulasi lindi juga berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi substrat. Presentasi penurunan BOD pada laju alir resirkulasi 6L/mnt, laju alir resirkulasi 24 L/mnt dan laju alir resirkulasi Q 24L/mnt, pH 8 berturut-turut adalah 78.71%, 81.54 dan 81.39%. Jadi BOD removal pada Q 24L/mnt > Q 24L/mnt, pH 8.0 > Q 6L/mnt. Seperti terlihat pada Gambar 4.117.



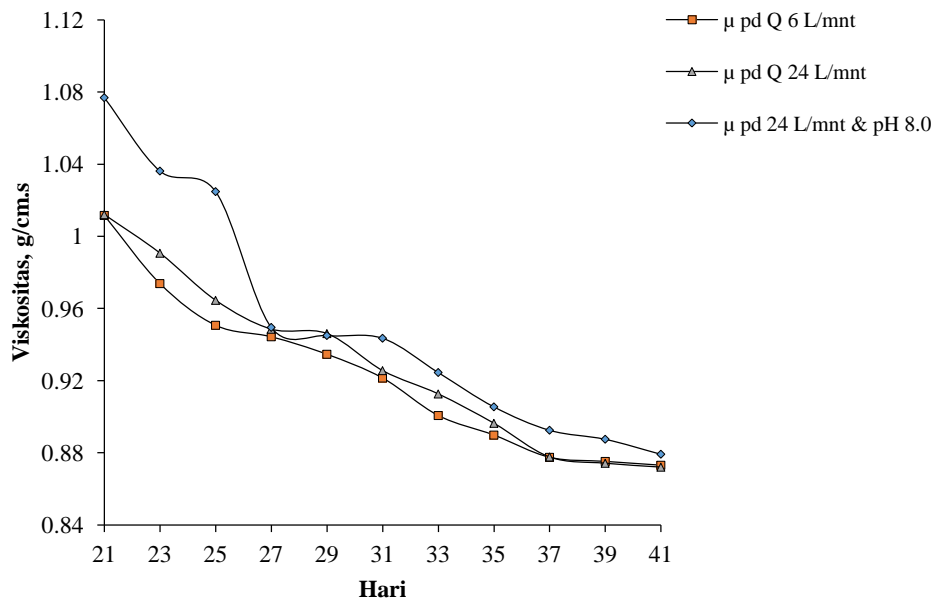
Gambar 4.17. BOD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Densitas dan viskositas

Laju alir juga berpengaruh terhadap penurunan densitas, makin tinggi laju alir resirkulasi makin besar pula penurunan densitas lindi. Penurunan densitas pada $Q\ 24\ \text{L/mnt} > Q\ 6\ \text{L/mnt} > Q$ tanpa resirkulasi. Seperti terlihat pada Gambar 4.18. dan Gambar 4.19.



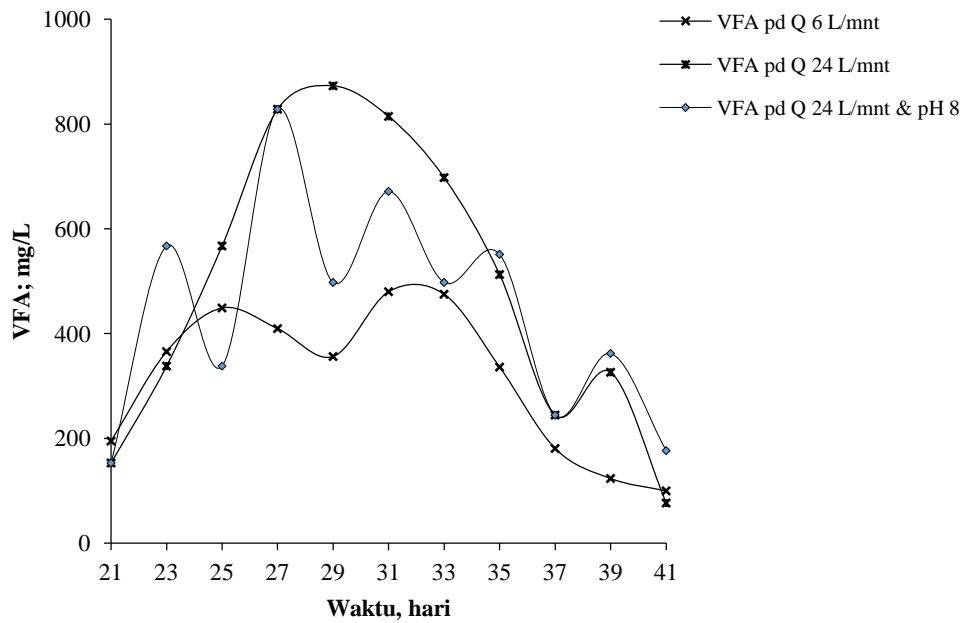
Gambar 4.18. Penurunan densitas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.19. Penurunan viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Konsentrasi VFA

Laju alir resirkulasi juga mempengaruhi konsentrasi VFA. Makin tinggi laju alir resirkulasi makin tinggi konsentrasi VFA yang diperoleh. Hal ini disebabkan makin intensifnya tumbukan antara mikroorganisme dengan substrat terlarut dalam lindi. Konsentrasi VFA pada $Q\ 24\text{L/mnt} > Q\ 6\text{L/mnt} > Q\ 0\text{L/mnt}$ (tanpa resirkulasi), berturut-turut adalah 872.88 mg/L, 475,1 mg/L dan 370,6 mg/L. Seperti terlihat pada gambar 4.20. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa resirkulasi mempercepat laju pembentukan VFA (Vavilin *et al.*, 2002). pada pengaruh Q diperoleh konsentrasi VFA sebesar 76.71 – 872.88 mg/L;



Gambar 4.20. Konsentrasi VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Uji Anova Pengaruh Laju Alir Resirkulasi

Densitas

Tabel 4.22. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap densitas

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Alir	2	0.0000316	0.0000158	17.14	0.000
Error	30	0.0000277	0.0000009		
Total	32	0.0000593			

$S = 0.0009604$ $R-Sq = 53.32\%$ $R-Sq(adj) = 50.21\%$

Tabel anova diatas menunjukkan nilai p-value kurang dari 0.05, sehingga laju air berpengaruh signifikan.

Viskositas

Tabel 4.23. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap viskositas

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Alir	2	0.00492	0.00246	0.85	0.439
Error	30	0.08713	0.0029		
Total	32	0.09205			

$S = 0.05389$ $R-Sq = 5.34\%$ $R-Sq(adj) = 0.00\%$

P value lebih dari 0.05, sehingga hasil uji hipotesis terkait laju air terhadap viskositas ternyata tidak berpengaruh signifikan.

BOD

Tabel 4.24. Uji Anova pengaruh Laju alir resirkulasi terhadap BOD

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Alir	2	14885	7443	0.01	0.992
Error	30	27326290	910876		
Total	32	27341175			

S = 954.4 R-Sq = 0.05% R-Sq(adj) = 0.00%

Hasil pengujian hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.992, yaitu lebih besar dari 0.05. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat pengaruh antara laju air dengan BOD

COD

Tabel 4.25. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap COD

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Alir	2	1718908	859454	0.36	0.698
Error	30	70847481	2361583		
Total	32	72566389			

S = 1537 R-Sq = 2.37% R-Sq(adj) = 0.00%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.698 lebih besar dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa laju air tidak berpengaruh signifikan terhadap COD.

VFA (Asam Asetat)

Tabel 4.26. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap VFA (Asam asetat)

Source	DF	SS	MS	F	P
Laju Alir	2	186435	93218	1.92	0.164
Error	30	1455924	48531		
Total	32	1642360			

S = 220.3 R-Sq = 11.35% R-Sq(adj) = 5.44%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.164 yakni lebih besar dari 0.05, maka laju air tidak mempengaruhi asam asetat.

4.2.1.3. Pengaruh Temperatur

Seeding dan aklimatisasi

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 35°C, pH *ambient* dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.27. Pada *seeding*, temperatur lindi dari 28.2-31°C, dan temperatur biogas 28-30°C. Dan pH meningkat dari 6.8-7.3 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-4, dengan fluktuasi naik turun antara 1 sampai dengan 4 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 35°C, temperatur biogas 33-34.8°C, pH berfluktuasi naik turun antara 7.2-7.5 dan tekanan biogas meningkat dari 7-22 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.60.

Tabel 4.27. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 35°C

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29.9	28.5	6.8	0		
	2	30	29	6.9	0		
	3	30.2	30	6.9	0		
	4	30.5	29	6.8	4		
	5	31	30	7	4		
	6	28.5	28	7.3	0	-	-
	7	28.2	28	7	1		
	8	28.5	28	7.2	2		
	9	30	28	7.1	4		
	10	30.2	29	7.3	3		
Aklimatisasi	11	35	34	7.5	7	4183.8	7320.0
	12	35	33.5	7.7	8		
	13	35	34.8	7.2	9	3820.0	6480.0
	14	35	34.9	7.4	9		
	15	35	34.5	7.2	11	2220.4	3760.00
	16	35	33	7.2	13		
	17	35	33.5	7.3	15	1650	2579.35
	18	35	33.5	7.3	17		
	19	35	34	7.3	19	1150.07	1873.0
	20	35	34.5	7.4	22		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 45°C, pH *ambient* dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.28. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.3–29.5°C, dan temperatur biogas 28–29°C. pH naik turun antara 7.3-7.5 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-2, dengan fluktuasi naik turun antara 1 sampai dengan 4 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 44-44.5°C, pH

berfluktuasi naik turun antara 7.4-7.6 dan tekanan biogas meningkat dari 0-25 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.56.

Tabel 4.28. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 45°C

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29.3	29	7.3	0		
	2	28.5	28	7.5	1		
	3	28.5	28.5	7.5	1		
	4	28.3	28	7.4	1		
	5	28.5	28	7.6	3		
	6	29.5	29	7.5	0	-	-
	7	29.3	28.5	7.5	4		
	8	28.5	28	7.4	4		
	9	28.5	28	7.5	2		
	10	28.3	28	7.5	0		
Aklimatisasi	11	45	42.5	7.5	0	4,095.90	7131.25
	12	45	43.5	7.5	4		
	13	45	44.5	7.5	5	3,930.33	6640.46
	14	45	44	7.5	7		
	15	45	44	7.4	9	2,750.71	5060.82
	16	45	44.5	7.6	12		
	17	45	44.5	7.5	14	2,540.98	4700.61
	18	45	43.5	7.5	14		
	19	45	44	7.4	21	1530.44	2748.4
	20	45	44.5	7.5	25		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 35°C, pH 7.2 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.29. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.2–31°C, dan temperatur biogas 28–30°C. pH naik turun dari 7.8-6.4 naik 6.4-6.9 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-4, dengan fluktuasi naik turun antara 1 sampai dengan 4 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 35°C, temperatur biogas 34-34.8°C, pH konstan 7.2 dan tekanan biogas meningkat dari 6-23 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.62.

Tabel 4.29. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29.9	28.5	7.8	0		
	2	30	29	7.7	0		
	3	30.2	28	7.5	0		
	4	30.5	29	7.4	2		
	5	31	30	7.1	3	-	-
	6	28.5	28	6.8	1		
	7	28.2	28	6.4	0		
	8	28.5	28.5	6.6	1		
	9	30	29	6.9	2		

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
Aklimatisasi	10	30.2	28	7.2	4		
	11	35	34	7.2	6	4123	7154.8
	12	35	34	7.2	7		
	13	35	34.5	7.2	11	3778.5	6234.2
	14	35	34.8	7.2	13		
	15	35	34	7.2	14	2123.45	3670.25
	16	35	34.5	7.2	15		
	17	35	34.8	7.2	13	1559.9	2272.5
	18	35	34	7.2	19		
	19	35	34.5	7.2	21	1122.45	1783.7
	20	35	34.5	7.2	23		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 45°C, pH 8.0 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.30. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.3–29.3°C, dan temperatur biogas 27.5 – 29°C. pH turun dari 7.7-6.3 dan naik dari 6.3-7.4 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-7, dengan fluktuasi naik turun antara 1 sampai dengan 3 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 44-44.6°C, pH naik dari 7.8-8.0 dan selanjutnya konstan pada 8.0 dan tekanan biogas meningkat dari 4-22 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.67.

Tabel 4.30. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29.3	28.5	7.7	0		
	2	28.5	28	7.5	0		
	3	28.5	28	7.2	0		
	4	28.3	27.5	6.9	0		
	5	28.5	28	6.8	0		
	6	29.5	29	6.5	0	-	-
	7	29.3	28.5	6.3	1		
	8	28.5	28	6.6	2		
	9	28.5	28	6.9	1		
	10	28.3	27.5	7.4	3		
Aklimatisasi	11	45	44.5	7.7	4	4,045.48	6131.25
	12	45	44.5	7.9	6		
	13	45	44	8.0	10	2,831.50	4640.46
	14	45	44	8.0	11		
	15	45	44	8.0	12	2,150.71	3060.82
	16	45	44	8.0	13		
	17	45	44.5	8.0	14	1,840.98	2700.61
	18	45	44.6	8.0	17		
	19	45	44	8.0	19	1213.44	1748.4
	20	45	44.5	8.0	22		

Pengolahan anaerobik

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur, T 35°C, pH *ambient* dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.31. Temperatur lindi kosntan 35°C, temperatur biogas 34-35°C, pH cenderung turun dengan kisaran 7.9-7.3. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 25 mm H₂O sampai dengan 199 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai hari ke-41, dari 163 mm H₂O sampai dengan 8 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98715 - 0.98434 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.03496 - 0.87122 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 81.99%, yaitu mulai dari 3850.32 - 693.50 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 79.64%, yaitu mulai dari 6520 – 1327.45 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.71. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 166.5 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-25 yaitu 1698.97 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 331.85 mg/L.

Tabel 4.31. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	35	34.5	7.9	25	0.98715	1.03496	3850.32	6520	166.5
22	35	34	7.7	30					
23	35	35	7.6	42	0.98617	0.99205	3645.10	5827.35	557.78
24	35	34.8	7.6	61					
25	35	34.9	7.7	72	0.98587	0.96895	3517.47	4965.74	1698.97
26	35	34	7.8	189					
27	35	34.5	7.8	199	0.9856	0.94776	3126.34	4231.5	1467.7
28	35	34.5	7.9	163					
29	35	34	7.6	133	0.98555	0.94066	3021.00	4640	1040.8
30	35	34.9	7.9	109					
31	35	35	7.8	88	0.98509	0.92469	2211.83	3072.7	947.22
32	35	35	7.8	86					
33	35	34	7.6	73	0.98487	0.91167	1972.00	2618.4	450.88
34	35	34.8	7.4	49					
35	35	34.5	7.6	40	0.98482	0.89545	1822.83	2320	334.83
36	35	34	7.6	36					
37	35	35	7.6	26	0.98465	0.87687	1553.50	1901.35	218.95
38	35	34.8	7.4	23					
39	35	34.9	7.4	19	0.98439	0.87333	1270.29	1440	500.79
40	35	35	7.5	16					
41	35	34.6	7.3	8	0.98434	0.87122	693.50	1327.45	331.85

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur, T 45°C, pH *ambient* dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.32.

Temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42-44.5°C, pH cenderung turun dengan kisaran 7.3-7.9. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-26, yaitu dari 21 mm H₂O sampai dengan 152 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-27 sampai hari ke-41, dari 146 mm H₂O sampai dengan 5 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98622 - 0.98342 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.03357 - 0.8704 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 78.00%, yaitu mulai dari 4104.18 - 902.88 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 79.00%, yaitu mulai dari 7445.11 - 1563.45 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.73. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 166.5 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-27 yaitu 1232.1 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 80.78 mg/L.

Tabel 4.32. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	45	44.5	7.3	21	0.98622	1.03357	4104.18	7445.11	166.5
22	45	44	7.4	26					
23	45	43	7.4	36	0.98537	0.98399	4035.80	4530	486.18
24	45	44	7.6	53					
25	45	43.5	7.5	92	0.98512	0.96511	2882.35	3806.00	780.88
26	45	44	7.7	152					
27	45	44	7.6	146	0.98492	0.93592	2606.41	2984.1	1232.1
28	45	44.5	7.2	138					
29	45	44	7.9	113	0.98487	0.92138	2405.87	2657.42	166.5
30	45	43	7.6	100					
31	45	44	7.9	100	0.98464	0.89839	2239.32	2400.55	749.25
32	45	43.5	7.7	84					
33	45	43	7.8	60	0.98437	0.88987	1755.34	2220	576.09
34	45	43	7.8	63					
35	45	44.5	7.6	52	0.98407	0.88422	1290.73	2194.24	281.39
36	45	42	7.4	30					
37	45	43	7.6	23	0.98369	0.87374	1178.51	2003.5	165.5
38	45	43.5	7.5	17					
39	45	43	7.5	7	0.98349	0.87212	1025.54	1743.42	83.26
40	45	43	7.4	7					
41	45	43	7.4	5	0.98342	0.8704	902.88	1563.45	80.78

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur, T 35°C, pH 7.2 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.33. Temperatur lindi konstan 35°C, temperatur biogas 34-34.9°C, pH konstan 7.2. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 27 mm H₂O sampai dengan 201 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai

hari ke-41, dari 185 mm H₂O sampai dengan 12 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98618 - 0.98377 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.0395 - 0.8765 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 82.44%, yaitu mulai dari 3925.50 - 689.50 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 81.73%, yaitu mulai dari 6155.9 - 1124.5 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.64. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 234.8 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-27 yaitu 1678.5 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 338.5 mg/L.

Tabel 4.33. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	35	34	7.2	27	0.98618	1.0395	3925.50	6155.9	234.8
22	35	35	7.2	31					
23	35	34.8	7.2	39	0.98607	0.97323	3155.25	4872.5	457.65
24	35	34.8	7.2	59					
25	35	34.9	7.2	99	0.98587	0.93931	2615.49	3965.75	397.5
26	35	34	7.2	162					
27	35	34.5	7.2	201	0.98577	0.91844	2126.34	3311.1	1678.5
28	35	34.5	7.2	185					
29	35	34	7.2	143	0.98567	0.91141	1553.50	2618.4	940.8
30	35	34.9	7.2	121					
31	35	34	7.2	105	0.98557	0.89717	1270.29	1901.35	1125.4
32	35	34.5	7.2	88					
33	35	34	7.2	73	0.98547	0.89294	1120.33	1640	450.9
34	35	34.8	7.2	65					
35	35	34	7.2	53	0.98507	0.88822	899.75	1315.78	875.75
36	35	34.5	7.2	44					
37	35	34.5	7.2	35	0.98447	0.88065	775.90	1210.25	349.5
38	35	34	7.2	27					
39	35	34.5	7.2	18	0.98397	0.87813	726.88	1173.25	557.78
40	35	34	7.2	14					
41	35	34.5	7.2	12	0.98377	0.8765	689.50	1124.5	338.5

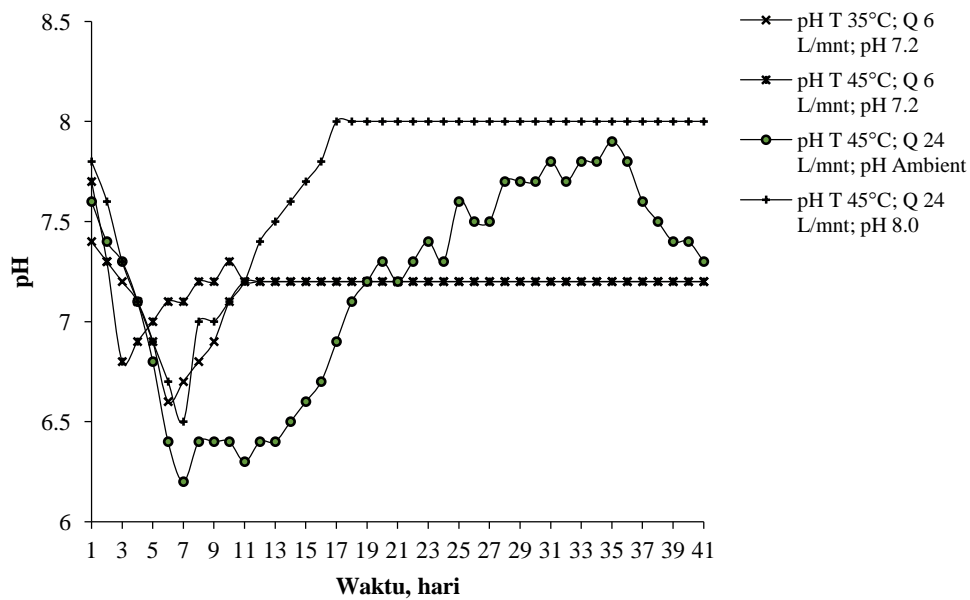
Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur, T 45°C, pH 8.0 dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.34. Temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42-44.5°C, pH konstan 7.2. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 25 mm H₂O sampai dengan 155 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai hari ke-41, dari 140 mm H₂O sampai dengan 9 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98727 - 0.98122 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.05854 - 0.86949 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 82.00%, yaitu mulai dari 3904.20 - 702.68 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 80.00%, yaitu mulai

dari 6531.1 – 1306.35 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.62. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 266.5 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-29 yaitu 1566.5 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 168.7 mg/L.

Tabel 4.34. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	45	44.5	8.0	25	0.98727	1.05854	3904.20	6531.1	266.5
22	45	44	8.0	29					
23	45	43	8.0	36	0.98542	1.04619	3035.80	4453.2	486.18
24	45	44	8.0	52					
25	45	43.5	8.0	90	0.98487	1.0042	2582.50	3808.50	1232.1
26	45	44	8.0	136					
27	45	44	8.0	155	0.98477	0.9287	2006.40	2989.41	680.9
28	45	44.5	8.0	140					
29	45	44	8.0	121	0.98391	0.90983	1755.34	2400.55	1566.5
30	45	43	8.0	110					
31	45	44	8.0	92	0.98282	0.90015	1290.73	2174.24	879.25
32	45	43.5	8.0	81					
33	45	43	8.0	68	0.98277	0.88895	1178.51	2003.45	1023.45
34	45	43	8.0	59					
35	45	44.5	8.0	49	0.98262	0.88519	1025.54	1721.42	550.6
36	45	42	8.0	39					
37	45	43	8.0	30	0.98162	0.87397	945.00	1545.45	660.4
38	45	43.5	8.0	21					
39	45	43	8.0	13	0.98152	0.87182	832.90	1443.42	383.6
40	45	43	8.0	11					
41	45	43	8.0	9	0.98122	0.86949	702.68	1306.35	168.7

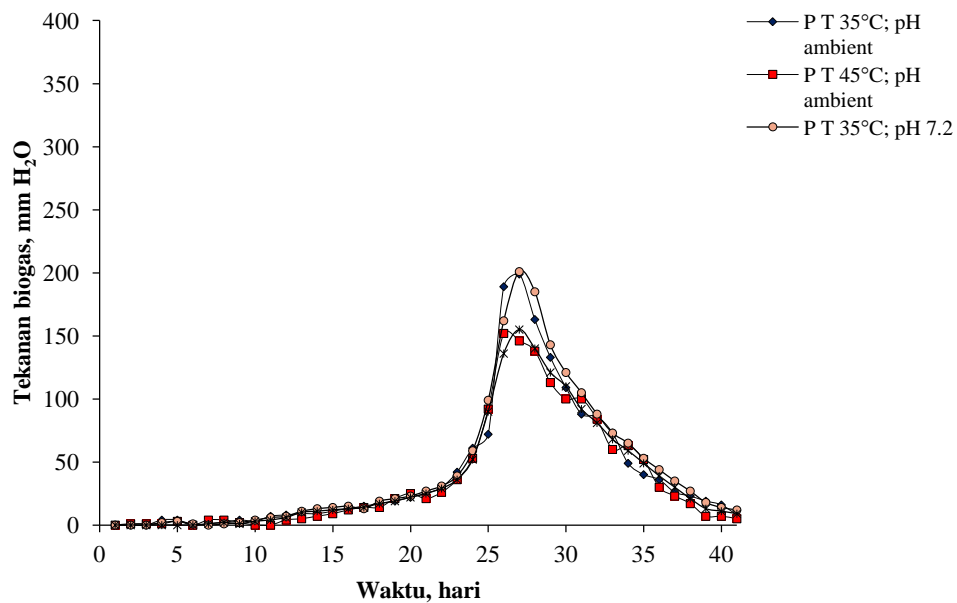
Kondisi pH pada pengaruh temperatur, seperti terlihat pada Gambar 4.21. Secara umum, pada saat *seeding* pH mengalami penurunan dan kemudian meningkat lagi pada saat aklimatisasi. Dimana rentang pH *seeding*, aklimatisasi dan pengolahan anaerobik berturut-turut adalah 6.3 – 7.8; 6.4 – 8.0 dan 7.2 – 8.0.



Gambar 4.21. pH pada pengaruh temperatur T

Tekanan Biogas

Pada pengaruh temperatur, diperoleh tekanan biogas pada $T\ 35^{\circ}\text{C} > T\ 45^{\circ}\text{C} > T\ \text{ambient}$, berturut-turut adalah 199 mm H₂O, 146 mm H₂O dan 40 mm H₂O. Pada variasi temperatur lindi; T, terlihat tekanan biogas T *ambient* lebih rendah daripada T 45°C dan T 35°C, namun tekanan biogas pada T 45°C lebih rendah daripada T 35°C. Seperti terlihat pada Gambar 4.22. Hal ini terjadi karena T 35°C merupakan temperatur optimum *mesophilic* pertumbuhan bakteri, sedangkan T 45°C merupakan temperatur minimum pertumbuhan bakteri *thermophilic*. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa, kebanyakan bakteri *methanogens* bersifat *mesophilic* dengan kisaran 28-42°C dan *thermophilic* dengan kisaran 55-72°C (Ziemiński dan Frac, 2012). Temperatur optimum pertumbuhan bakteri *mesophilic* adalah 35°C (Indriyati, 2007). Temperatur optimum yang disyaratkan pada pengolahan anaerobik oleh mikroorganisme adalah pada rentang 25-37°C (Reynolds and Richards, 1996).

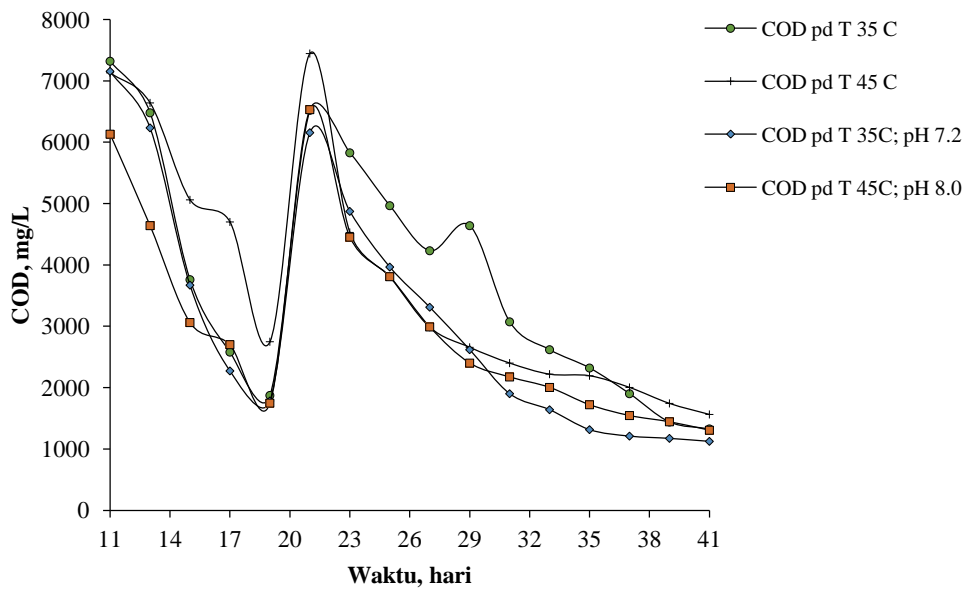


Gambar 4.22. Tekanan biogas pada pengaruh temperatur T

Konsentrasi substrat (COD dan BOD)

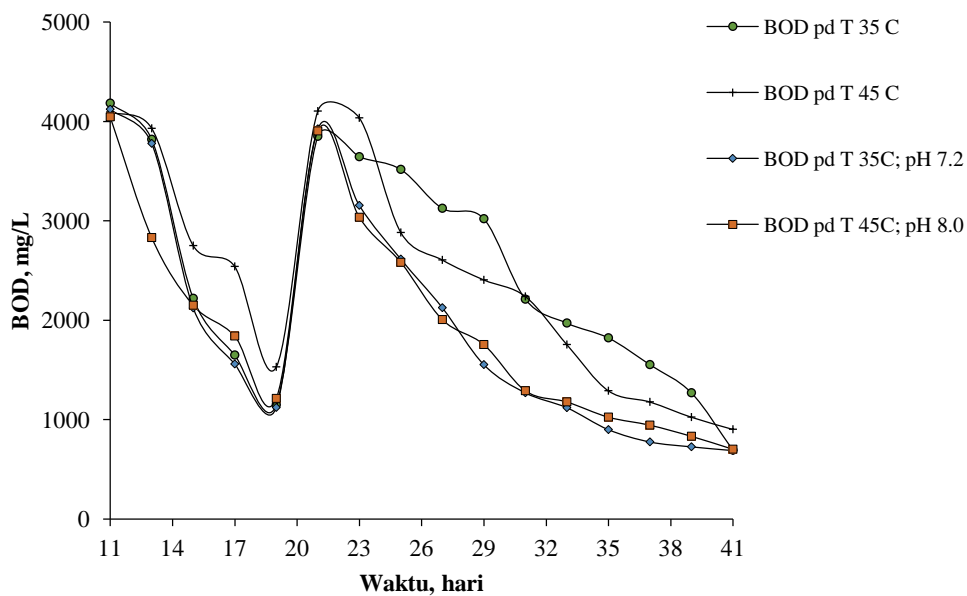
Persentase penurunan COD pada temperatur *ambient*, temperatur 35°C, temperatur 45°C, temperatur 35°C dan pH 7.2 dan temperatur 45°C dan pH 8.0 berturut-turut adalah 71.84%, 79.64%, 79.00%, 81.73% dan 80.00%. Jadi COD removal pada T 35°C; pH 7.2 > T 35°C > T 35°C; pH 8.0 > T 45°C > T *ambient*. Seperti terlihat pada Gambar 4.23. Kondisi ini sesuai dengan pernyataan bahwa kinerja bioreaktor anaerobik pengolahan air limbah stabil pada temperatur *mesophilic* (35-37°C) (Bolzonella *et al.*, 2005).

Pada penelitian ini juga terlihat bahwa kondisi temperatur pengolahan yang lebih tinggi biodegradasi bahan organik semakin besar. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa pada kondisi *thermophilic* laju biodegradasi bahan organik, biomassa dan produksi biogas tinggi (Zhu *et al.*, 2009; Khalid *et al.*, 2011).



Gambar 4.23. Penurunan COD pada pengaruh temperatur T

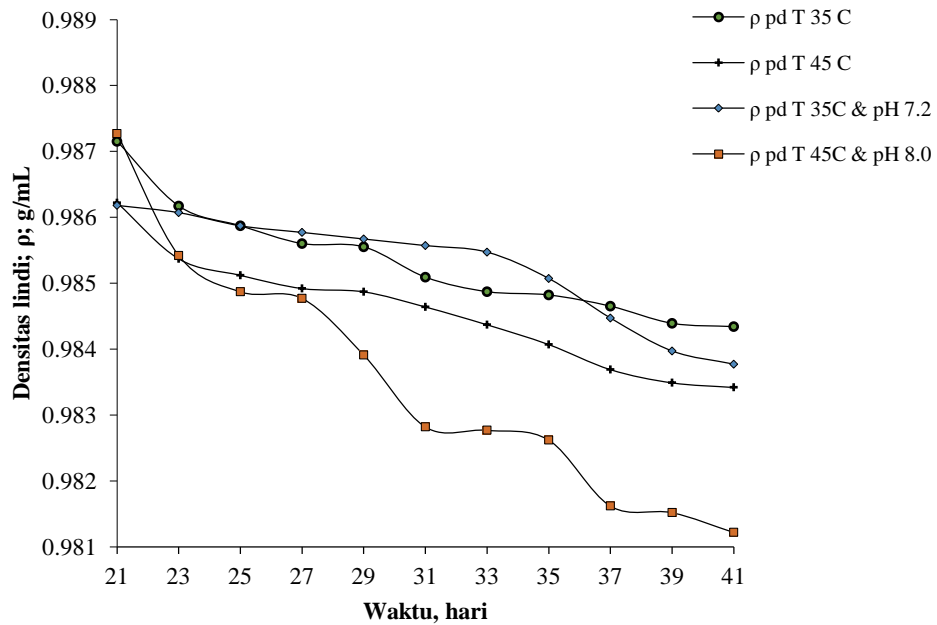
Penurunan BOD pada *T ambient*, T 35°C, T 45°C, T 35°C, pH 7.2; dan T 45°C, pH 8.0 berturut-turut adalah 68.91%, 81.99%, 78.00%, 82.44% dan 82.00%. Jadi BOD *removal* pada T 35°C; pH 7.2 > T 45°C, pH 8.0 > T 35°C > T 45°C > T *ambient*. Seperti terlihat pada Gambar 4.24.



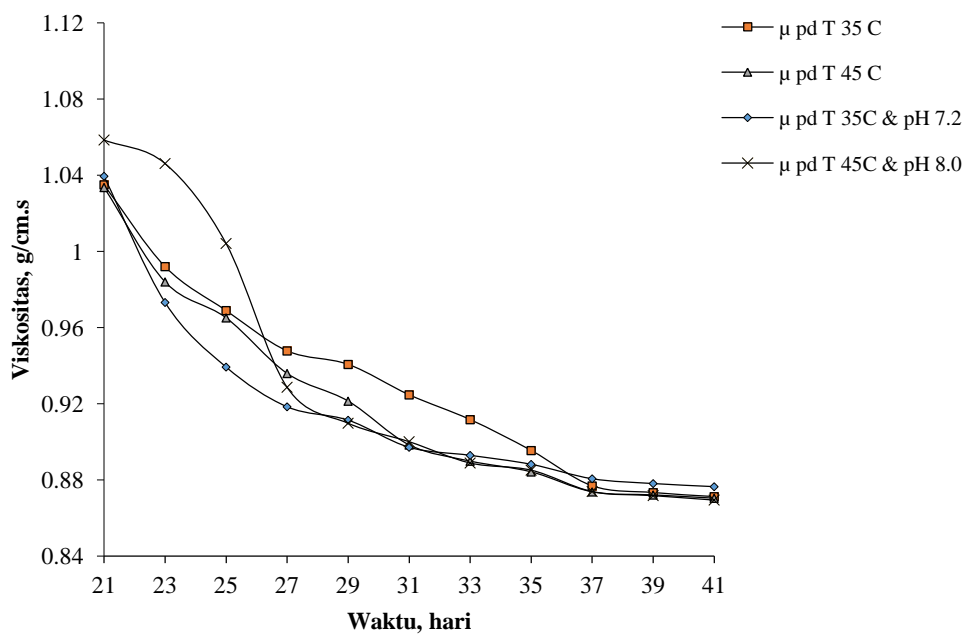
Gambar 4.24. Penurunan BOD pada pengaruh variasi temperatur

Densitas dan viskositas

Temperatur mempengaruhi penurunan densitas dan viskositas lindi. Sedangkan penurunan densitas pada temperatur 35°C > temperatur 45°C > temperatur ambient. Seperti terlihat pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26.



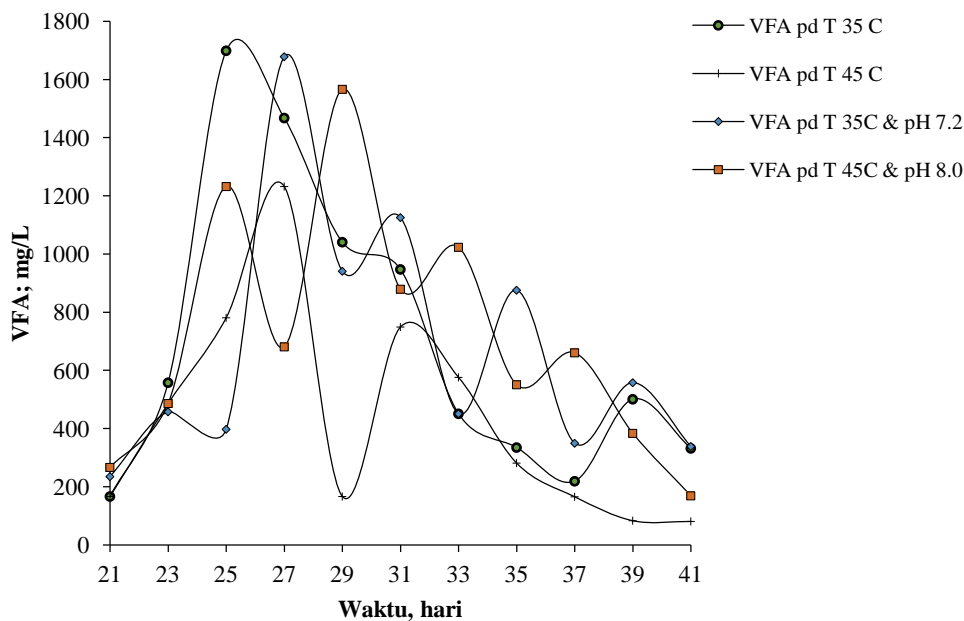
Gambar 4.25. Penurunan densitas pada pengaruh variasi temperatur



Gambar 4.26. Penurunan viskositas pada pengaruh variasi temperatur

Konsentrasi VFA

Konsentrasi VFA dipengaruhi oleh temperatur. Makin tinggi temperatur makin tinggi pula konsentrasi VFA yang diperoleh. Namun tetap konsisten pada temperatur optimum mikroorganisme yang berperan didalamnya. Pada pengaruh temperatur diperoleh VFA sebesar 80.78 – 1698.97 mg/L. Konsentrasi VFA pada $T\ 35^{\circ}\text{C} > T\ 45^{\circ}\text{C} > T\ \text{ambient}$, berturut-turut adalah 1698,97 mg/L, 1232,1 mg/L dan 370,63 mg/L. Seperti terlihat pada gambar 4.27. Jadi ditinjau dari perlakuan variasi masing-masing pH, Q dan T yang terbaik berturut-turut adalah pH *ambient*, Q 24L/mnt dan T 35°C.



Gambar 4.27. Konsentrasi VFA pada pengaruh variasi temperatur T

Uji Anova Pengaruh Temperatur

Densitas

Tabel 4.35. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap densitas

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	0.0000229	0.0000076	5.3	0.004
Error	40	0.0000577	0.0000014		
Total	43	0.0000806			

S = 0.001201 R-Sq = 28.46% R-Sq(adj) = 23.09%

Tabel 4.35, menunjukkan nilai p-value kurang dari 0.05, sehingga laju air berpengaruh signifikan.

Viskositas

Tabel 4.36. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap viskositas

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	0.00148	0.00049	0.15	0.93
Error	40	0.13235	0.00331		
Total	43	0.13382			

S = 0.05752 R-Sq = 1.10% R-Sq(adj) = 0.00%

Tabel 4.36, menunjukkan nilai p-value lebih besar dari 0.05, sehingga laju air tidak berpengaruh signifikan.

BOD

Tabel 4.37. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap BOD

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	4075547	1358516	1.16	0.337
Error	40	46854660	1171366		
Total	43	50930207			

S = 1082 R-Sq = 8.00% R-Sq(adj) = 1.10%

Tabel 4.37, menunjukkan nilai p-value lebih besar dari 0.05, sehingga laju air tidak berpengaruh signifikan terhadap BOD.

COD

Tabel 4.38. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap COD

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	5031236	1677079	0.58	0.634
Error	40	116496875	2912422		
Total	43	121528111			

S = 1707 R-Sq = 4.14% R-Sq(adj) = 0.00%

Tabel 4.38, menunjukkan nilai p-value lebih besar dari 0.05, sehingga laju air tidak berpengaruh signifikan terhadap COD.

VFA (Asam Asetat)

Tabel 4.39. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap VFA (Asam asetat)

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	586760	195587	1.01	0.4

Error	40	7766665	194167		
Total	43	8353425			

S = 440.6 R-Sq = 7.02% R-Sq(adj) = 0.05%

Tabel 4.39, menunjukkan nilai p-value sebesar 0.4 lebih besar dari 0.05, sehingga laju air tidak berpengaruh signifikan terhadap VFA (Asam asetat).

4.2.1.4. Pengaruh Kombinasi pH, Temperatur dan Laju Alir Resirkulasi *Seeding* dan aklimatisasi

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur 35°C, pH 7.2 dan resirkulasi lindi 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.40. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 29–30.5°C, dan temperatur biogas 28 – 29°C. pH turun dari 7.4-6.6 kemudian naik dari 6.6-7.1 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-6, dengan fluktuasi naik turun antara 4 sampai dengan 13 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 35°C, temperatur biogas 32.5-34.5°C, pH konstan 7.2 dan tekanan biogas meningkat dari 10-95 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.57.

Tabel 4.40. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29	28.5	7.4	0		
	2	29	28	7.3	0		
	3	30	29	7.2	0		
	4	30	29	7.1	0		
	5	29.5	28	6.9	0		
	6	29	28	6.6	4	-	-
	7	29	28.5	6.7	8		
	8	29.5	28.8	6.8	7		
	9	30	29	6.9	10		
	10	30.5	29	7.1	13		
Aklimatisasi	11	35	33	7.2	10	3873	7455
	12	35	32.5	7.2	17		
	13	35	34	7.2	18	3315	6479
	14	35	32.5	7.2	20		
	15	35	33	7.2	23	2877	4327
	16	35	33	7.2	25		
	17	35	34	7.2	35	2295	4250
	18	35	32.5	7.2	50		
	19	35	33	7.2	65	2235	3529
	20	35	34	7.2	95		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 45°C, pH 7.2 dan resirkulasi lindi; Q 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.41. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28–30°C, dan temperatur biogas 27.5–29°C. pH awalnya turun dari 7.7-6.8 kemudian naik dari 6.8-7.3 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-3, dengan fluktuasi kenaikan antara 2 sampai dengan 15 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42.5-44.5°C, pH konstan 7.2 dan tekanan biogas meningkat dari 12-116 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.48.

Tabel 4.41. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	28.5	27.5	7.7	0		
	2	28	27.8	7.3	0		
	3	29	28	6.8	2		
	4	29.5	28.5	6.9	4		
	5	29.5	28.5	7.0	0		
	6	29	27.9	7.1	4	-	-
	7	29	29	7.1	7		
	8	29.5	28.9	7.2	8		
	9	30	28	7.2	9		
	10	29	27.9	7.3	15		
Aklimatisasi	11	45	42.5	7.2	12	3499	7489
	12	45	43.5	7.2	15		
	13	45	44	7.2	19	3235	6229
	14	45	43.5	7.2	22		
	15	45	43	7.2	23	2775	5457
	16	45	44	7.2	32		
	17	45	43.5	7.2	45	2291.5	5120
	18	45	43	7.2	59		
	19	45	44.5	7.2	79	2030.5	4462
	20	45	43.5	7.2	116		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 45°C, pH ambient dan resirkulasi lindi; Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.42. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 28.5–30°C, dan temperatur biogas 26.5–29°C. pH menurun dari 7.6-6.4 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-4, dengan fluktuasi naik turun antara 9 sampai dengan 14 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 43.5-44°C, pH meningkat dari 6.3-7.3 dan tekanan biogas meningkat dari 23-105 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.47.

Tabel 4.42. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	29	28.5	7.6	0		
	2	29.5	28	7.4	0		
	3	30	29	7.3	0		
	4	29.5	29	7.1	9		
	5	29.5	28.3	6.8	0		
	6	29	26.9	6.4	10	-	-
	7	29	27	6.2	10		
	8	29.5	26.5	6.4	12		
	9	30	28	6.4	14		
	10	28.5	27.8	6.4	13		
Aklimatisasi	11	45	43.5	6.3	23	3433.56	7398.5
	12	45	44	6.4	25		
	13	45	43.5	6.4	35	3587.4	6581.6
	14	45	44	6.5	47		
	15	45	43	6.6	53	3357.5	5486.5
	16	45	43.5	6.7	58		
	17	45	43.5	6.9	62	2375	3756.5
	18	45	43	7.1	68		
	19	45	43.5	7.2	85	1452.5	2789.50
	20	45	44	7.3	105		

Kondisi *seeding* dan aklimatisasi yang dilakukan pada temperatur; T 45°C, pH 8.0 dan resirkulasi lindi; Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.43. Pada *seeding*, temperatur lindi mulai dari 30–31.5°C dan temperatur biogas 29.5–30.5°C. pH menurun dari 7.8-6.5 kemudian meningkat dari 6.5-7.1 dan tekanan biogas mulai meningkat pada hari ke-5, dengan fluktuasi naik turun antara 2 sampai dengan 13 mm H₂O. Sedangkan pada aklimatisasi, temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42.5-43.5°C, pH naik dari 7.2-8.0 kemudian konstan pada 8.0 dan tekanan biogas meningkat dari 19-95 mm H₂O, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.43.

Tabel 4.43. *Seeding* dan aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
<i>Seeding</i>	1	31	30	7.8	0		
	2	31.5	30.5	7.6	0		
	3	31	30.5	7.3	0		
	4	30	29.5	7.1	0		
	5	31	30.5	6.9	2		
	6	30	29.5	6.7	4	-	-
	7	30.5	30	6.5	3		
	8	30	29.5	7.0	8		
	9	30	29.5	7.0	11		
	10	31	30	7.1	13		
Aklimatisasi	11	45	42.5	7.2	19	2630.6	7448.9
	12	45	43.5	7.4	23		
	13	45	43	7.5	30	1832.6	4558.3

Tahap	Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
	14	45	42.5	7.6	33		
	15	45	43	7.7	36	1545	3507
	16	45	42.5	7.8	39		
	17	45	42.5	8.0	42	1482.5	3267.8
	18	45	43.5	8.0	62		
	19	45	42.5	8.0	85	1496	3125
	20	45	43.5	8.0	95		

Pengolahan anaerobik

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur T 35°C, pH 7.2 dan laju resirkulasi lindi, Q 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.44. Temperatur lindi konstan 35°C, temperatur biogas 32.5-34°C, pH konstan 7.2. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-25, yaitu dari 152 mm H₂O sampai dengan 345 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-26 sampai hari ke-41, dari 309 mm H₂O sampai dengan 24 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98802 - 0.98387 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.0795 - 0.87184 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 81.99%, yaitu mulai dari 3875.00 - 698.00 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 83.24%, yaitu mulai dari 6557.00 - 1099.00 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.60. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 182.00 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-33 yaitu 509.00 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 156.0 mg/L.

Tabel 4.44. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	35	33	7.2	152	0.98802	1.0795	3875.00	6557.00	182.00
22	35	34	7.2	195					
23	35	32.5	7.2	259	0.98609	1.0259	2799.00	4459.00	225.00
24	35	32.5	7.2	323					
25	35	32.5	7.2	345	0.98582	0.9896	2267.00	3850.00	257.00
26	35	33	7.2	309					
27	35	34	7.2	257	0.98537	0.91243	1775.00	3084.50	450.00
28	35	34	7.2	224					
29	35	33.5	7.2	183	0.98507	0.90189	1615.50	2468.00	335.00
30	35	33.5	7.2	154					
31	35	34	7.2	125	0.98487	0.8956	1458.00	2255.00	215.00
32	35	33.5	7.2	103					
33	35	33	7.2	92	0.98452	0.8853	1216.50	1854.00	509.00
34	35	32.5	7.2	83					
35	35	33.5	7.2	78	0.98452	0.8869	955.00	1754.00	332.00
36	35	33.5	7.2	67					
37	35	34	7.2	55	0.98415	0.876	804.00	1536.00	185.25
38	35	33.5	7.2	45					

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
39	35	33	7.2	37	0.98402	0.8714	757.00	1311.50	139.00
40	35	32.5	7.2	31					
41	35	34	7.2	24	0.98387	0.87184	698.00	1099.00	156.00

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur T 45°C, pH 7.2 dan laju resirkulasi lindi, Q 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.45. Temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42-44.5°C, pH konstan 7.2. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-25, yaitu dari 176 mm H₂O sampai dengan 358 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-26 sampai hari ke-41, dari 322 mm H₂O sampai dengan 36 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98762 - 0.98382 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.0864 - 0.872 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 82.16%, yaitu mulai dari 3475.00 - 620.00 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 82.88%, yaitu mulai dari 6535.00 - 1119.00 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.57. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 182.00 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-29 yaitu 1147.00 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 166.0 mg/L.

Tabel 4.45. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	45	44	7.2	176	0.98762	1.0864	3475	6535.00	182.00
22	45	44.5	7.2	224					
23	45	44	7.2	265	0.98612	1.0494	2997.00	5149.00	245.00
24	45	43	7.2	334					
25	45	44	7.2	358	0.98592	0.9957	2244.00	3985.00	357.00
26	45	43.5	7.2	322					
27	45	43	7.2	268	0.98562	0.92167	1677.00	2985.00	977
28	45	43	7.2	245					
29	45	44.5	7.2	198	0.98537	0.8987	1561.00	2346.00	1147
30	45	42	7.2	178					
31	45	43	7.2	145	0.98527	0.8865	1245.00	2225.00	1048
32	45	44	7.2	121					
33	45	44.5	7.2	110	0.98517	0.8834	1025.00	1785.00	922
34	45	44	7.2	99					
35	45	43	7.2	89	0.98508	0.8827	885.00	1575.00	458
36	45	44	7.2	73					
37	45	43.5	7.2	62	0.98487	0.87986	778.00	1356.00	334
38	45	43	7.2	54					
39	45	43	7.2	47	0.98402	0.8744	675.00	1235.00	139.00
40	45	44.5	7.2	41					
41	45	42	7.2	36	0.98382	0.872	620	1119.00	166.00

Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur T 45°C, pH *ambient* dan laju resirkulasi lindi, Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.46. Temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 42.5-44.5°C, pH naik turun, pada hari ke-21 sampai hari ke-34 pH naik dari 7.2-7.9, kemudian turun sampai hari ke-41 menjadi 7.3. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-27, yaitu dari 123 mm H₂O sampai dengan 359 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-28 sampai hari ke-41, dari 346 mm H₂O sampai dengan 44 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98822 - 0.98394 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.05955 - 0.87086 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 82.73%, yaitu mulai dari 3547.5 - 612.50 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 83.06%, yaitu mulai dari 6445.00 – 1091.9 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.58. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 yaitu 179.00 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-29 yaitu 1114.00 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 166.50 mg/L.

Tabel 4.46. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	45	42.5	7.2	123	0.98822	1.05955	3547.5	6445.00	179.00
22	45	43	7.3	128					
23	45	42.5	7.4	137	0.98637	1.03683	2799.50	4909.00	345.00
24	45	43.5	7.3	245					
25	45	44	7.6	273	0.98587	1.02905	2140.00	3850.00	974
26	45	43.5	7.5	298					
27	45	44	7.5	359	0.9856	1.00639	1775.00	2855.00	457.00
28	45	44	7.7	346					
29	45	43.5	7.7	296	0.98555	0.98417	1456.50	2234.60	1114.00
30	45	43.5	7.7	246					
31	45	44.5	7.8	215	0.98509	0.963	1224.50	2005.00	848
32	45	43.5	7.7	198					
33	45	44	7.8	131	0.98487	0.94001	1005.00	1725.00	1042
34	45	43.5	7.8	109					
35	45	43	7.9	92	0.98482	0.89442	758.50	1357.50	658
36	45	42.5	7.8	78					
37	45	43.5	7.6	67	0.98465	0.8746	678.00	1235.60	398
38	45	44	7.5	55					
39	45	43.5	7.4	50	0.98439	0.87292	625.50	1123.50	237.00
40	45	44	7.4	44					
41	45	44	7.3	44	0.98394	0.87086	612.50	1091.9	166.50

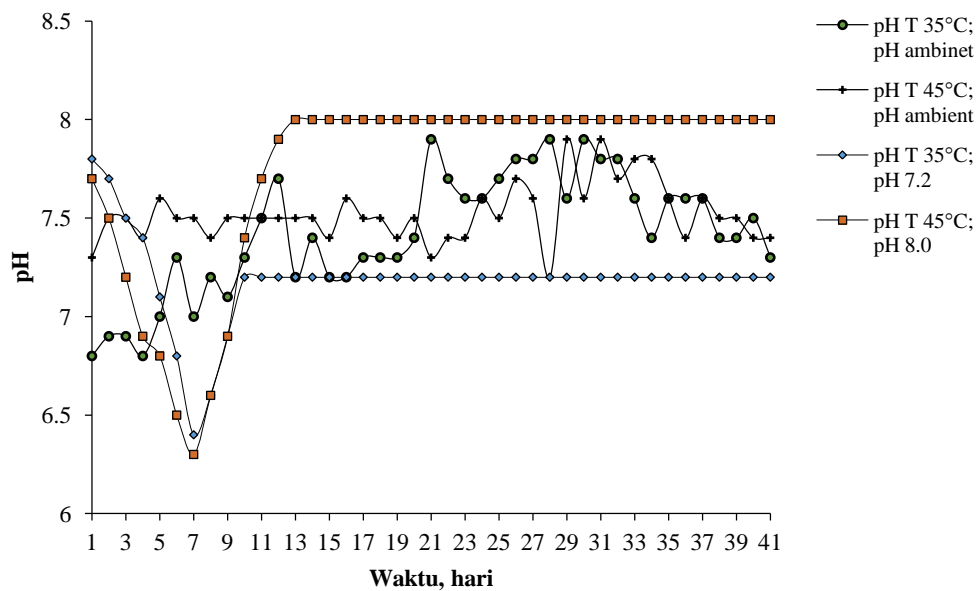
Data hasil analisis pengolahan anaerobik yang dilakukan pada temperatur T 45°C, pH 8.0 dan laju resirkulasi lindi, Q 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel

4.47. Temperatur lindi konstan 45°C, temperatur biogas 41.5-44.5°C, pH konstan 8.0. Tekanan biogas meningkat pada hari ke-21 sampai hari ke-26, yaitu dari 123 mm H₂O sampai dengan 364 mm H₂O, kemudian menurun pada hari ke-27 sampai hari ke-41, dari 360 mm H₂O sampai dengan 58 mm H₂O. Densitas mengalami penurunan dari 0.98812 - 0.98345 g/mL. Viskositas juga menurun dari 1.05841 - 0.84769 g/cm.s. BOD mengalami penurunan sekitar 85.22%, yaitu mulai dari 3482.5 - 514.8 mg/L, COD mengalami penurunan sekitar 85.31%, yaitu mulai dari 6351.00 – 932.7 mg/L, dengan nilai rata-rata BOD/COD 0.56. Sedangkan konsentrasi VFA naik turun, pada hari ke-21 sebesar 227.94 mg/L, kemudian naik dengan konsentrasi tertinggi pada hari ke-25 yaitu 1699.70 mg/L, dan selanjutnya naik turun sampai pada hari ke-41 menjadi 166.50 mg/L.

Tabel 4.47. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0

Hari	Temperatur, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viskositas g/cm.s	BOD mg/L	COD mg/L	Asam Asetat, mg/L
	T Lindi	T Biogas							
21	45	42.5	8.0	123	0.98812	1.05841	3482.5	6351.00	227.94
22	45	43.5	8.0	177					
23	45	43	8.0	245	0.98552	0.94167	2322.3	4367.30	947.00
24	45	43.5	8.0	290					
25	45	41.5	8.0	346	0.98477	0.90058	1624	2587.15	1699.70
26	45	42	8.0	364					
27	45	42.5	8.0	360	0.98465	0.89551	1176.6	2086.00	1232.10
28	45	43.5	8.0	343					
29	45	43	8.0	331	0.98439	0.88885	1009.4	1567.80	780.90
30	45	44	8.0	305					
31	45	43.5	8.0	284	0.98425	0.87838	831.09	1456.95	1040.80
32	45	43	8.0	262					
33	45	42.5	8.0	202	0.98402	0.87631	718.6	1343.60	486.20
34	45	42	8.0	176					
35	45	43.5	8.0	132	0.98387	0.87142	653.13	1208.74	749.30
36	45	43	8.0	98					
37	45	44.5	8.0	89	0.98381	0.86599	584.8	1108.15	576.10
38	45	44	8.0	75					
39	45	43.5	8.0	65	0.98372	0.86343	539.90	1010.90	281.40
40	45	42	8.0	61					
41	45	44	8.0	58	0.98345	0.84769	514.8	932.7	166.50

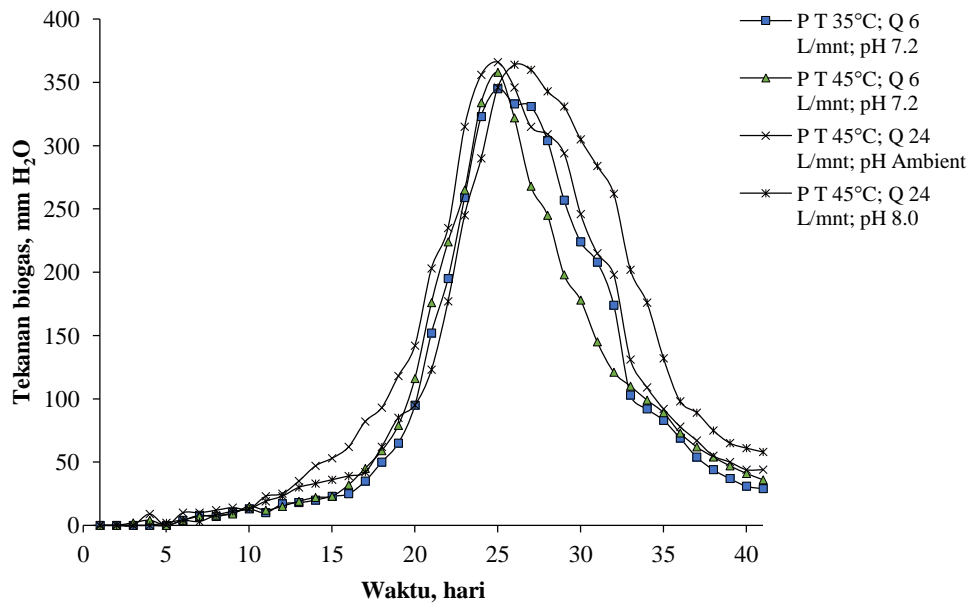
Kondisi pH pada pengaruh kombinasi pH, temperatur dan laju alir resirkulasi (pH-Q-T), seperti terlihat pada Gambar 4.28. Secara umum, pada saat *seeding* pH mengalami penurunan dan kemudian meningkat lagi pada saat aklimatisasi. Dimana rentang pH *seeding*, aklimatisasi dan pengolahan anaerobik berturut-turut adalah 6.2 – 7.7; 6.3 – 8.0 dan 7.2 – 8.0.



Gambar 4.28. pH pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Tekanan Biogas

Sedangkan pada gambar 4.29, tahap aklimatisasi pada kombinasi pH-Q-T, tekanan biogas mulai mengalami kenaikan secara signifikan. Dimana kenaikan tekanan biogas >10% pada kombinasi pH-Q-T, terjadi pada hari ke-11 – 14. Dan pada tahap aklimatisasi, kenaikan tekanan biogas terus meningkat secara eksponensial terlihat pada hari ke-15 - 17 dan seterusnya. Tekanan biogas keseluruhan tahap *seeding*-aklimatisasi pada kombinasi pH-Q-T, adalah tekanan biogas pada kombinasi pH-Q-T > T dan pH > Q dan pH. Setelah tahap *seeding*-aklimatisasi, masuk ke tahap pengolahan anaerobik, yaitu hari ke-21 sampai dengan hari ke-41. Diatas hari ke-21, rata-rata peningkatan tekanan biogas terjadi secara eksponensial. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan aktivitas mikroorganisme.

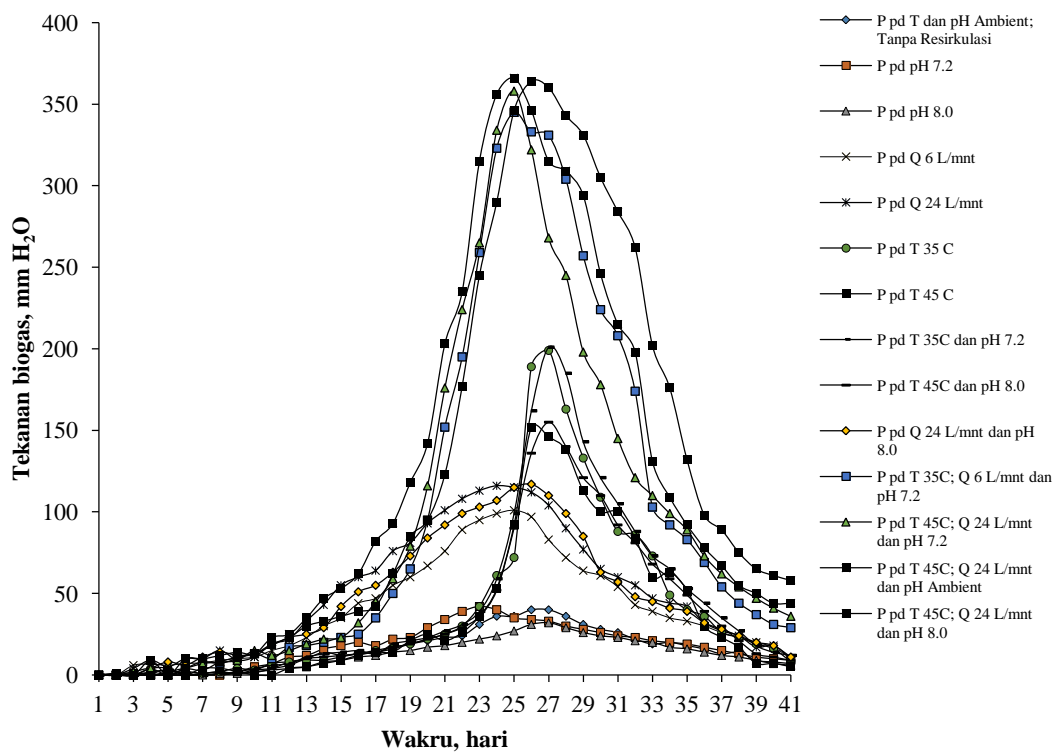


Gambar 4.29. Tekanan biogas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Adapun kondisi tekanan biogas secara keseluruhan, pengaruh pH, pengaruh laju alir resirkulasi, pengaruh temperatur dan kombinasi pH-Q-T, sebagaimana pada Gambar 4.30. Pada Gambar 4.30, tekanan biogas membentuk 4 (empat) pola garis yang tegas, sebagai berikut:

1. Tekanan biogas yang dipengaruhi oleh pH;
2. Tekanan biogas yang dipengaruhi oleh Q;
3. Tekanan biogas yang dipengaruhi oleh T; dan
4. Tekanan biogas yang dipengaruhi oleh kombinasi pH-Q-T.

Dimana terlihat tekanan biogas tertinggi diperoleh berturut-turut adalah tekanan biogas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T; pengaruh temperatur T; pengaruh laju alir resirkulasi Q dan pengaruh pH. Dimana puncak tekanan biogas tertinggi berada pada hari ke-23 sampai dengan hari ke-27. Hal ini juga menunjukkan bahwa dilihat dari kenaikan tekanan biogas yang diperoleh, secara keseluruhan pengaruh kombinasi pH-Q-T lebih optimum dari pada variasi pH, Q dan T.



Gambar 4.30. Tekanan biogas pada keseluruhan pengaruh pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T

Tekanan pada manometer berasal dari tekanan biogas yang terbentuk pada tahap *seeding*, aklimatisasi dan pengolahan anaerobik. Biogas yang terbentuk sedikit demi sedikit menekan manometer. Buih-buih kecil biogas lebih banyak terbentuk pada zona *digesting sludge*, kemudian bergerak perlahan naik dan terakumulasi pada bagian atas bioreaktor anaerobik. Akumulasi biogas yang dihasilkan ini, perlahan-lahan memberikan tekanan pada manometer bioreaktor. Pengukuran tekanan biogas dilakukan untuk mengetahui perkembangan mikroorganisme selama tahap *seeding*-aklimatisasi (Firdha *et al.*, 2010).

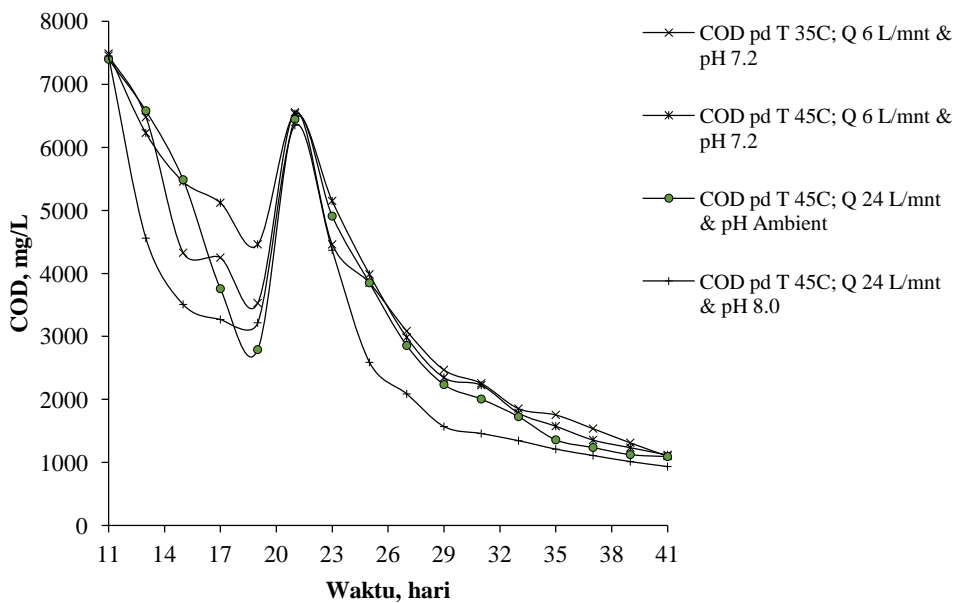
Persamaan gas ideal dapat diterapkan untuk tekanan biogas yang dihasilkan pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik. Tekanan biogas merupakan massa total dari campuran biogas yang terbentuk dalam satuan volume bioreaktor, yang dinyatakan dalam konsentrasi molar. Pada kondisi dimana hukum gas ideal berlaku ($pV = nRT$), maka konsentrasi molar gas dapat dinyatakan dalam tekanan ($p = \frac{nRT}{V}$) (Welty *et al.*, 2007). Oleh karenanya,

tekanan total biogas pada manometer merupakan tekanan dari seluruh tekanan parsial masing-masing komponen biogas yang dihasilkan.

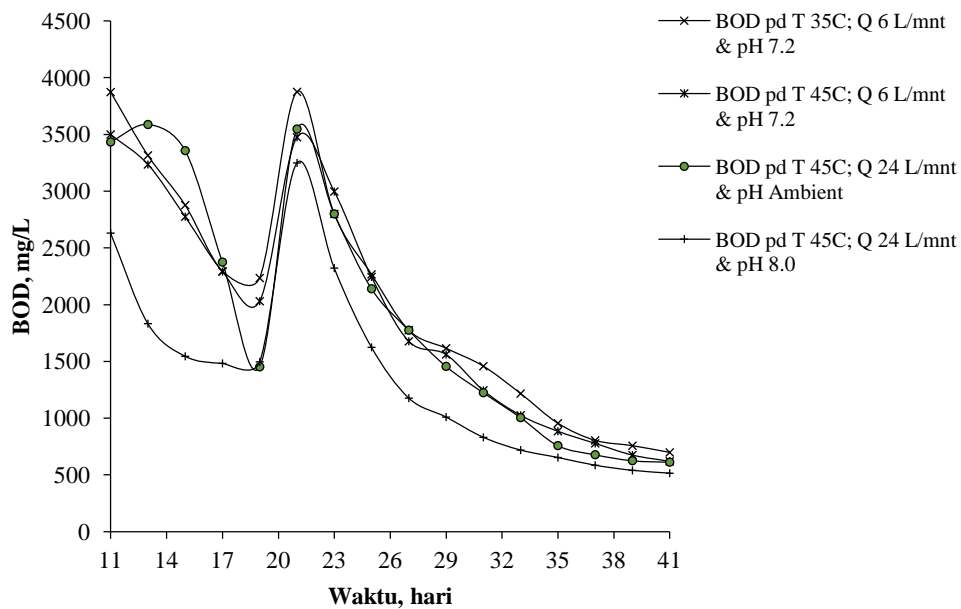
Konsentrasi substrat (COD dan BOD)

Konsentrasi substrat pada pengaruh kombinasi pH-Q-T, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.31. Sedangkan pada kombinasi pH; Q dan T, penurunan COD pada T 35°C; Q 6 L/mnt; dan pH 7.2; T 45°C; Q 6 L/mnt dan pH 7.2; T 45°C; Q 6 L/mnt dan pH Ambient; dan T 45°C; Q 24 L/mnt dan pH 8.0 berturut-turut adalah 83.24%, 82.88%, 83.06%, dan 85.31%. Jadi COD removal pada T 45°C; Q 24 L/mnt; pH 8.0 > T 35°C; Q 6 L/mnt; pH 7.2 > T 45°C; Q 6 L/mnt dan pH Ambient T 45°C > Q 6 L/mnt dan pH 7.2.

Sedangkan pada kombinasi pH-Q-T, penurunan BOD pada T 35°C, Q 6L/mnt, pH 7.2; T 45°C, Q 6L/mnt, pH 7.2; T 45°C, Q 6L/mnt, pH *Ambient*; dan T 45°C, Q 24L/mnt, pH 8.0 berturut-turut adalah 81.99%, 82.16%, 82.73%, dan 84.15%. Jadi BOD removal pada T 45°C, Q 24L/mnt, pH 8.0 > T 45°C, Q 6L/mnt, pH *Ambient* > T 45°C, Q 6L/mnt, pH 7.2 > T 35°C, Q 6 L/mnt, pH 7.2. Seperti terlihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4.31. COD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



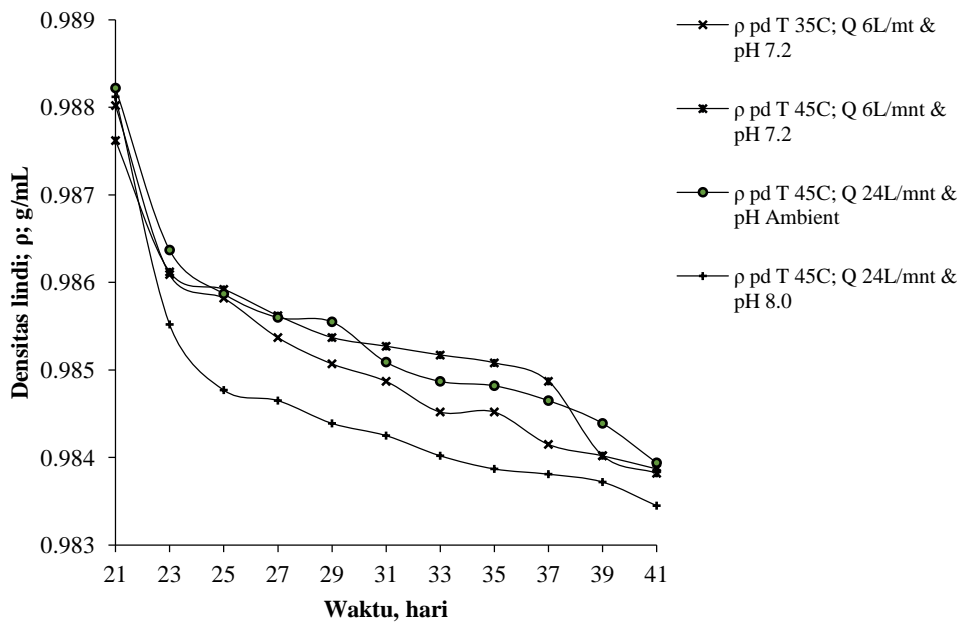
Gambar 4.32. BOD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Densitas dan viskositas

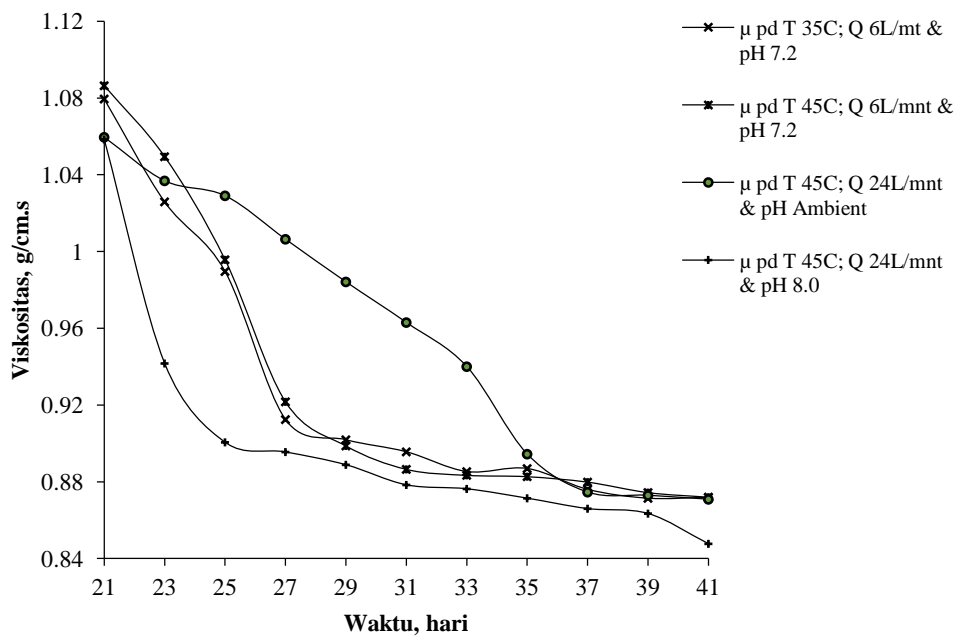
Pengaruh kombinasi pH, temperatur dan laju alir resirkulasi mempengaruhi penurunan densitas dan viskositas lindi. Seperti terlihat pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34. Namun jika dilihat dari persentase penurunan rata-rata densitas pada variasi pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T adalah penurunan rata-rata densitas pada kombinasi pH-Q-T > T > Q pH. Dengan penurunan pH, Q, T dan pH, Q, T berturut-turut adalah 0.113%, 0.275%, 0.356% dan 0.428%.

Konsentrasi VFA

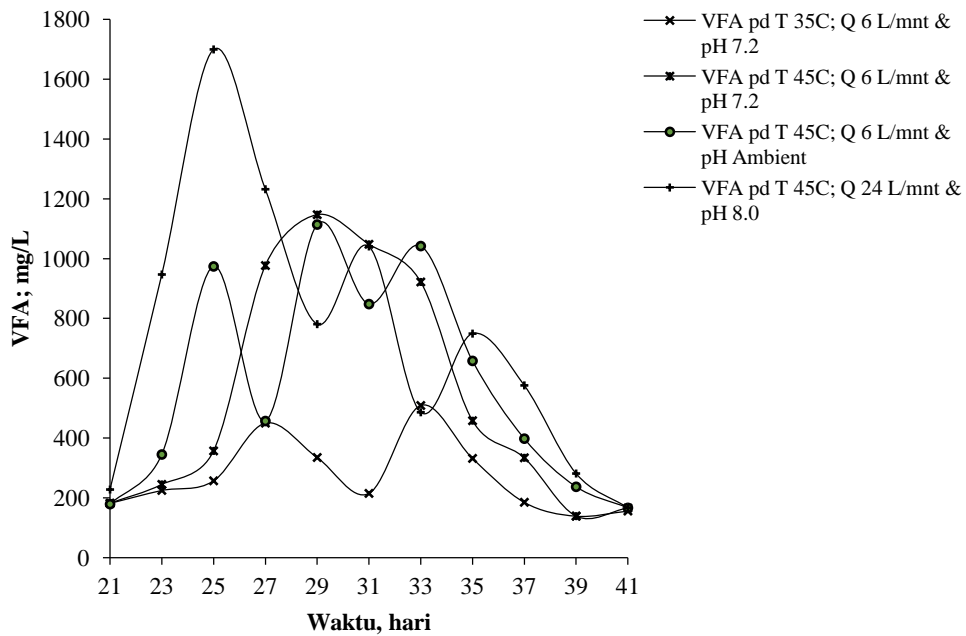
Sedangkan kombinasi pH; Q dan T diperoleh konsentrasi VFA sebesar 139.00 – 1699.7 mg/L. seperti terlihat pada gambar 4.35. Pada perlakuan kombinasi pH, Q dan T, diperoleh konsentrasi VFA pada T 45°C; Q 24 L/mnt; pH 8.0 > T 45°C; Q 6 L/mnt; pH 7.2 > T 45°C; Q 24 L/mnt; pH Ambient > T 35°C; Q 6 L/mnt; pH 7.2, berturut-turut adalah 1699.70 mg/L, 1147.00 mg/L, 1114.00 mg/L dan 509.00 mg/L. Jadi jika dilihat dari besarnya konsentrasi VFA maka VFA yang diperoleh pada kombinasi pH-Q-T > T > Q > pH.



Gambar.4.33.Densitas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



Gambar.4.34.Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



Gambar.4.35. Konsentrasi VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Uji Anova Pengaruh Kombinasi pH-Q-T

Densitas

Tabel 4.48. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap densitas

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	0.0000044	0.0000015	1.07	0.374
Error	40	0.0000556	0.0000014		
Total	43	0.0000601			

S = 0.001179 R-Sq = 7.40% R-Sq(adj) = 0.46%

Nilai p-value sebesar 0.374 menunjukkan alfa kurang dari 5%, sehingga kombinasi pH-Q-T tidak mempengaruhi densitas secara signifikan.

Viskositas

Tabel 4.49. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap viskositas

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	0.01888	0.00629	1.29	0.291
Error	40	0.19503	0.00488		
Total	43	0.21392			

S = 0.06983 R-Sq = 8.83% R-Sq(adj) = 1.99%

Nilai p-value menunjukkan kurang dari alfa 5%, sehingga kombinasi pH-Q-T tidak mempengaruhi viskositas secara signifikan.

BOD

Tabel 4.50. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap BOD

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	1148224	382741	0.41	0.746
Error	40	37224447	930611		
Total	43	38372672			

S = 964.7 R-Sq = 2.99% R-Sq(adj) = 0.00%

Nilai p-value menunjukkan kurang dari alfa 5%, sehingga kombinasi pH-Q-T tidak mempengaruhi BOD secara signifikan.

COD

Tabel 4.51 Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap COD

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	2389870	796623	0.27	0.847
Error	40	118254051	2956351		
Total	43	120643921			

S = 1719 R-Sq = 1.98% R-Sq(adj) = 0.00%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.847 lebih besar dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa kombinasi pH-Q-T tidak berpengaruh signifikan terhadap COD.

VFA (asam Asetat)

Tabel 4.52. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap VFA (Asam asetat)

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	1273148	424383	3.27	0.031
Error	40	5184966	129624		
Total	43	6458114			

S = 360.0 R-Sq = 19.71% R-Sq(adj) = 13.69%

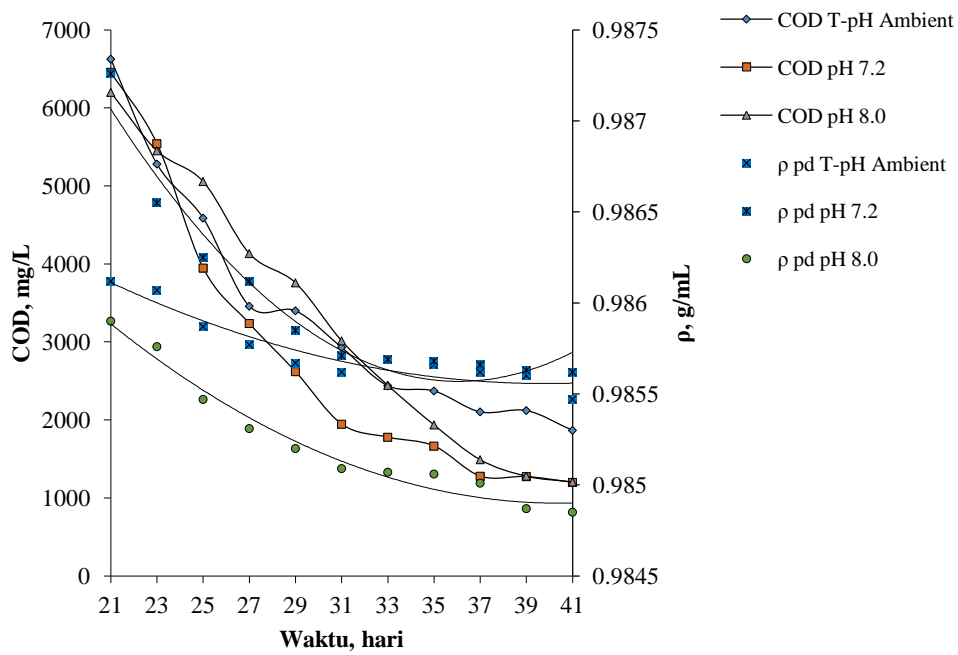
Hasil uji hipotesis diperoleh nilai p-value sebesar 0.031 lebih kecil dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa kombinasi pH-Q-T berpengaruh signifikan terhadap VFA (Asam asetat).

4.3. Hubungan COD, Densitas dan Viskositas

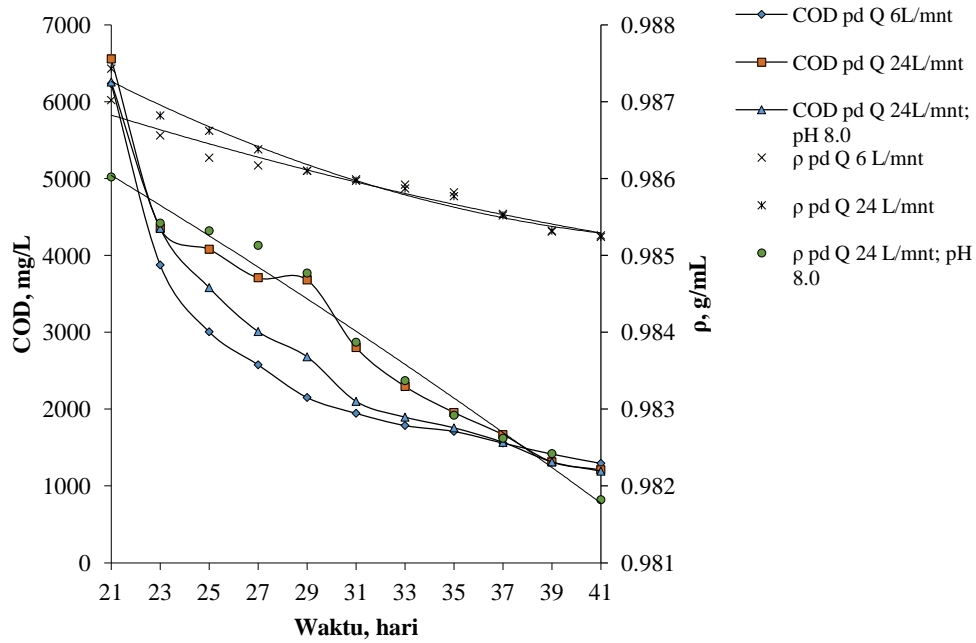
pH, COD, BOD, dan VFA merupakan parameter kimia, sedangkan densitas, viskositas dan tekanan biogas merupakan parameter fisik. Dimanan pH

adalah parameter kontrol yang menunjukkan derajat keasaman lindi dalam bioreaktor. COD dan BOD memberikan gambaran konsentrasi substrat terlarut dalam lindi. VFA menunjukkan produksi asam-asam organik pada tahap hidrolisis, asidogenesis dan asetogenesis. Densitas menunjukkan kerapatan massa zat terlarut organik dan anorganik yang bersifat *biodegradable* dan *non-biodegradable* dalam lindi pada temperatur tertentu. Viskositas atau kekentalan lindi menunjukkan ukuran ketahanan atau hambatan (resistensi) lindi untuk mengalir. Semakin besar viskositas lindi maka aliran akan semakin lambat Sedangkan tekanan biogas menunjukkan produksi biogas yang didasarkan pada konsentrasi molar biogas dalam satuan volume tertentu.

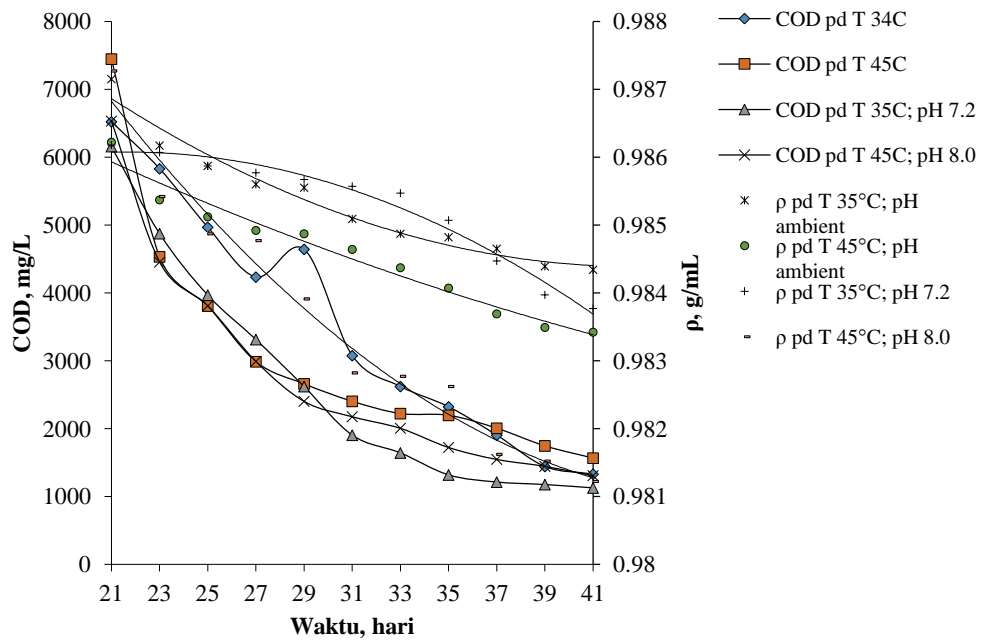
Terdapat hubungan secara langsung antara konsentrasi substrat terlarut dengan densitas dan viskositas dalam lindi. Dimana densitas dan viskositas makin menurun dengan menurunnya konsentrasi substrat. Seperti terlihat pada Gambar 4.36 – 4.39 dan Gambar 4.40 - 4.43. Walaupun tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada pengaruh temperatur tertentu. Karena kondisi temperatur yang sedikit berimpit. Hal ini dapat dimaklumi karena konsentrasi substrat awal sebagai umpan masuk bioreaktor memang berbeda-beda. Sehingga nilai densitas dan viskositas tidak terdapat perbedaan yang nyata antara temperatur yang satu dengan yang lainnya. Juga karena lindi merupakan sistem larutan biologis (Geankoplis, 2003), dimana selain mengandung substrat organik dan anorganik juga mengandung mikroorganisme hidup di dalamnya, yang tidak hanya bergantung pada temperatur tetapi juga kondisi lain.



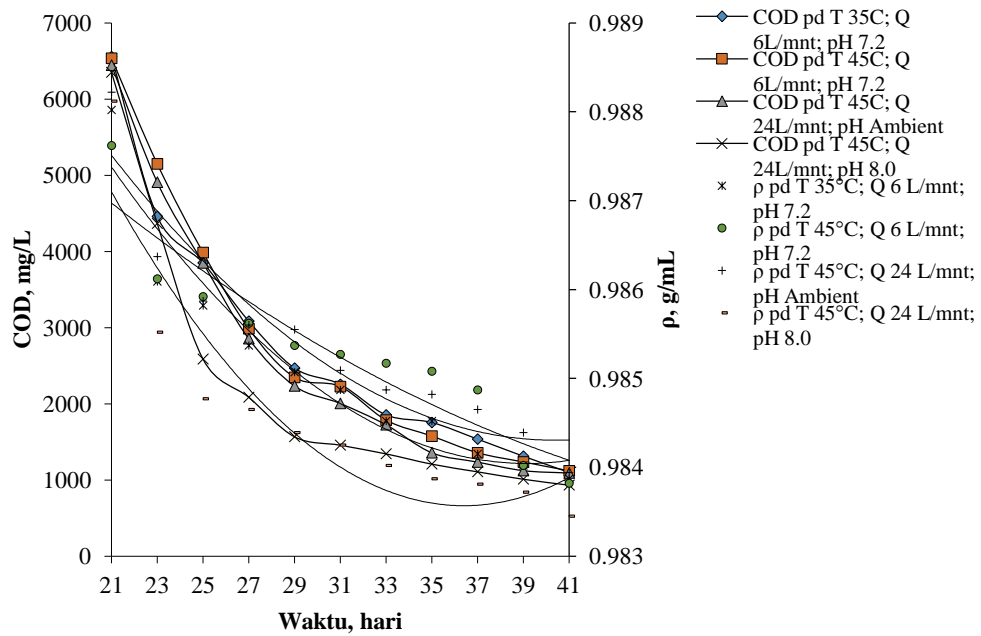
Gambar 4.36. COD vs Densitas pada pengaruh pH



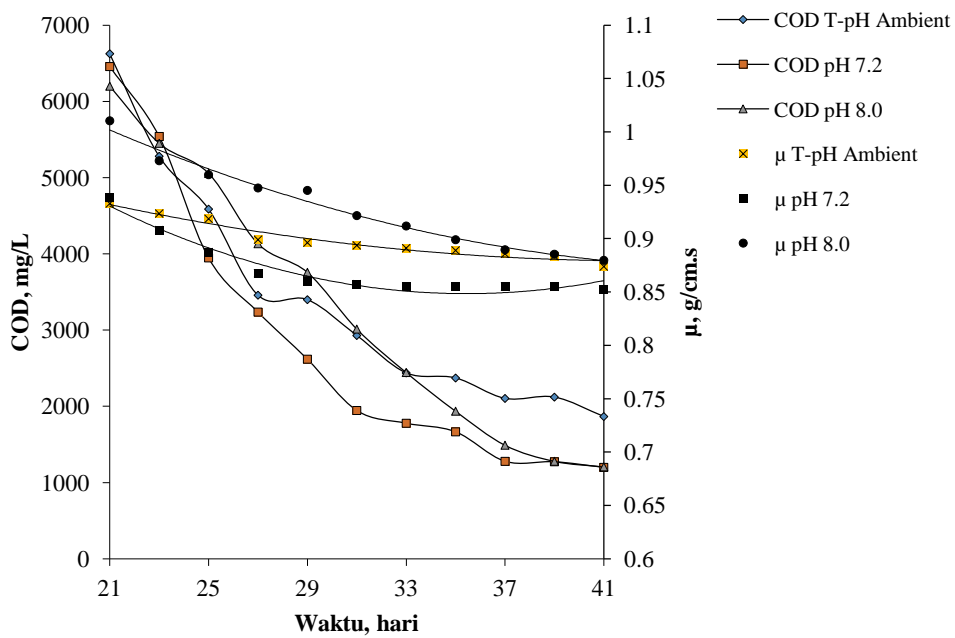
Gambar 4.37. COD vs Densitas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



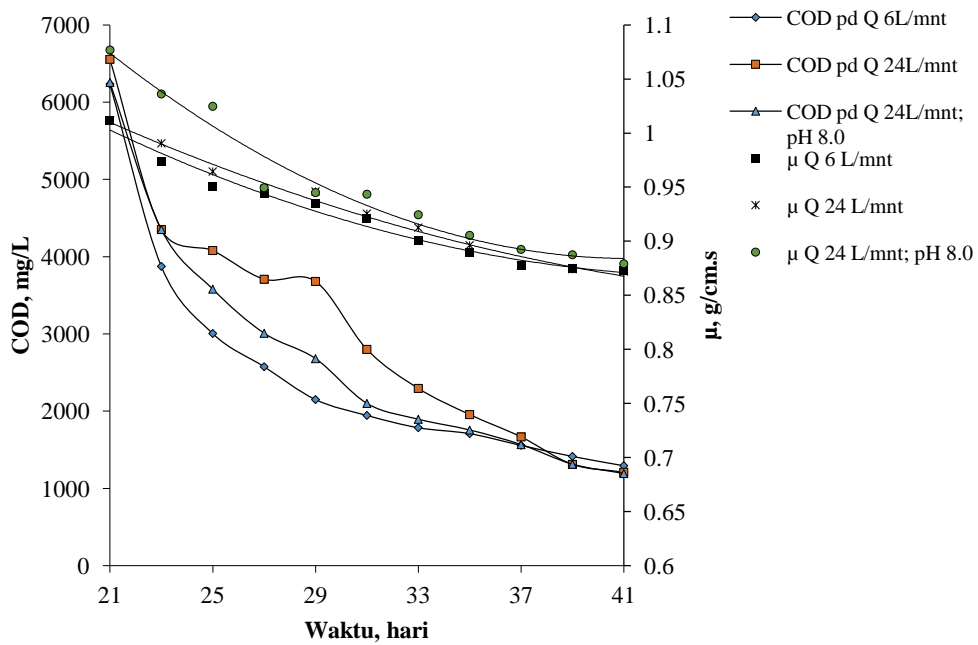
Gambar 4.38. COD vs Densitas pada pengaruh temperatur T



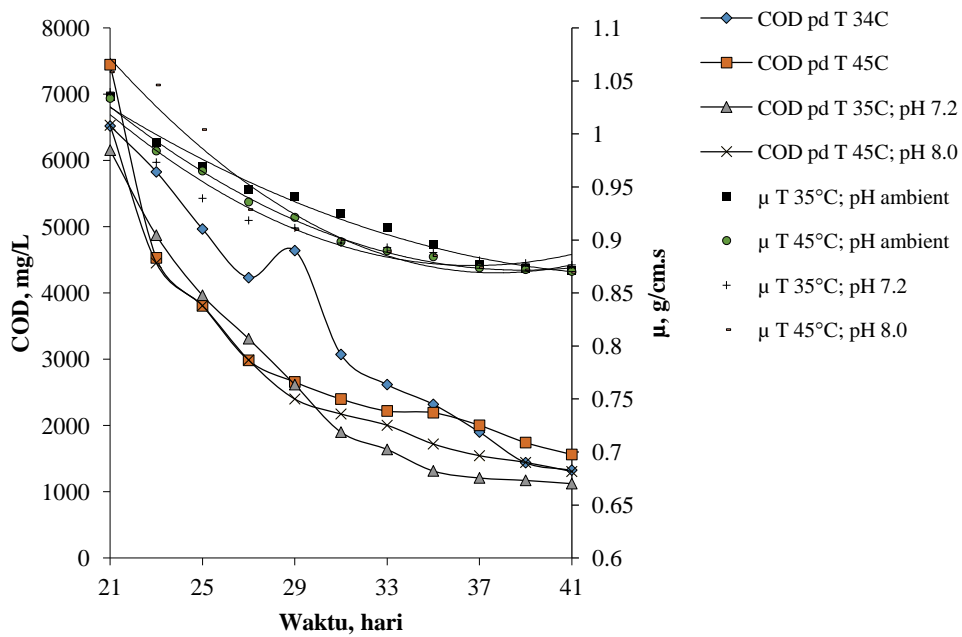
Gambar 4.39. COD vs Densitas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



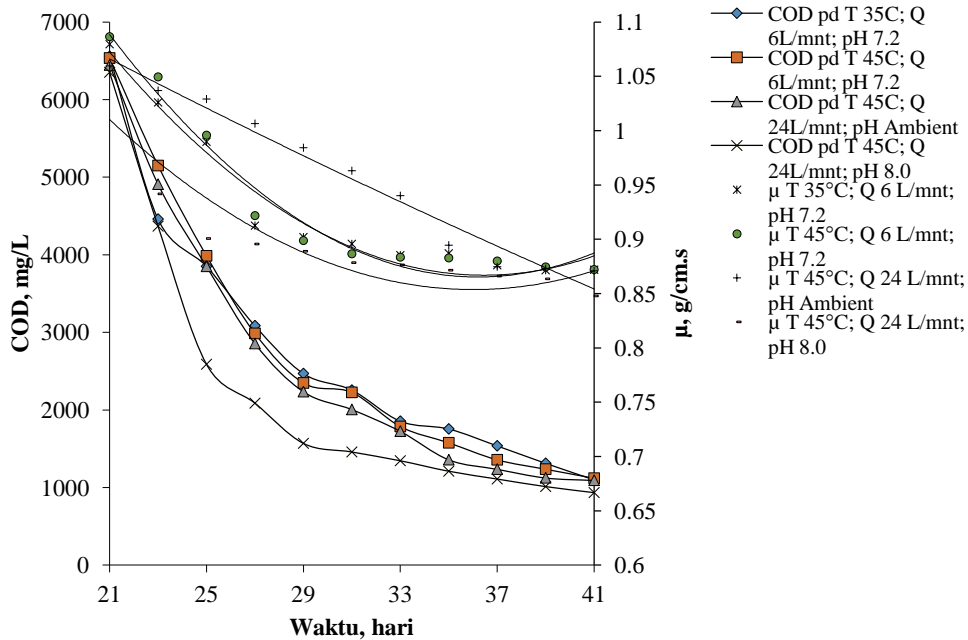
Gambar 4.40. COD vs viskositas pada pengaruh pH



Gambar 4.41. COD vs viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.42. COD vs viskositas pada pengaruh temperatur T



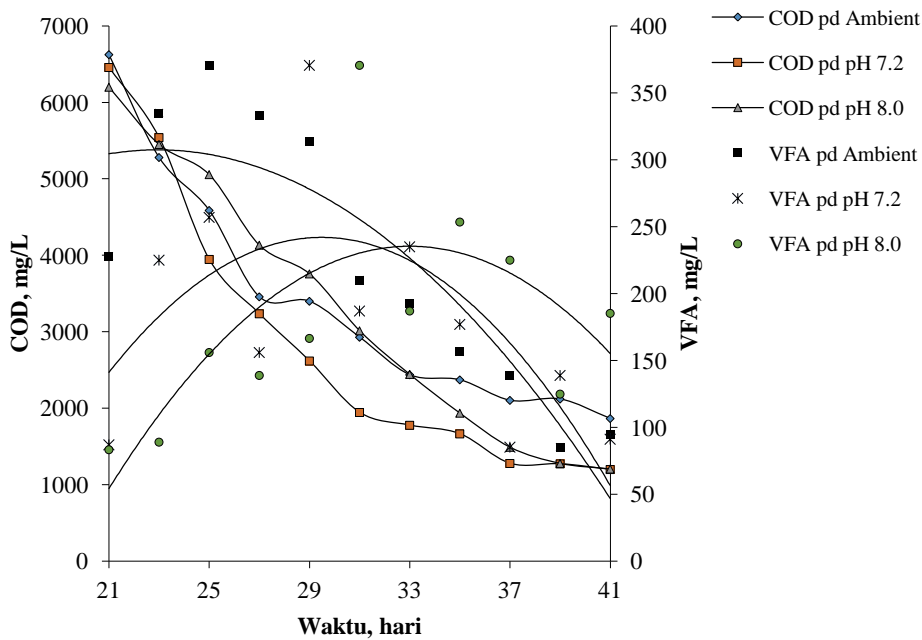
Gambar 4.43. COD vs viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

4.4. Hubungan COD, BOD dan VFA

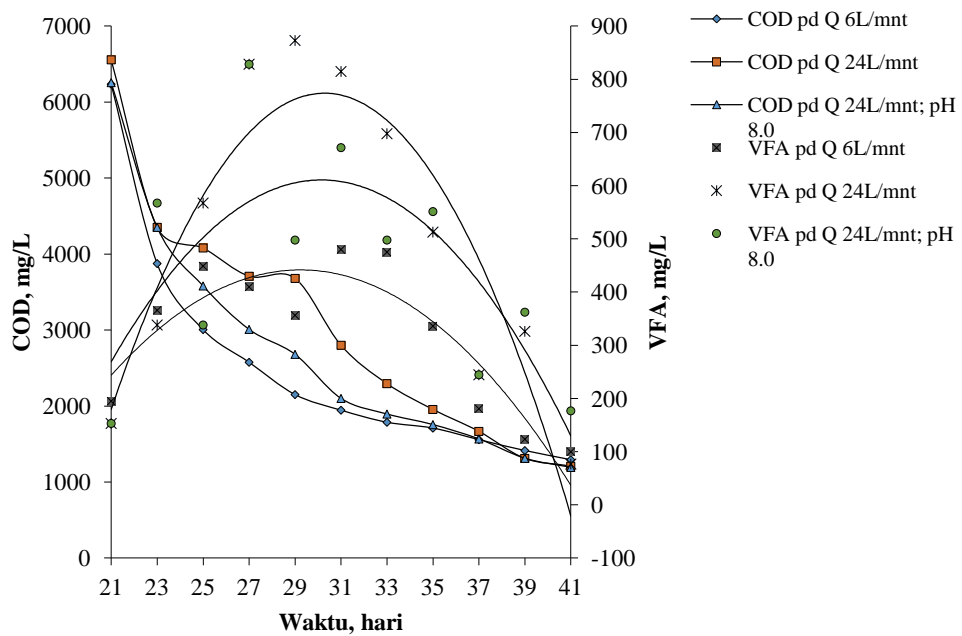
Pada awal pengolahan, kenaikan VFA diiringi dengan penurunan konsentrasi substrat. Seiring dengan waktu, semakin besar penurunan COD removal makin menurun pula konsentrasi VFA yang diperoleh. Kenyataan yang

tak dapat dipungkiri kenaikan eksponensial VFA kemudian menurun kembali, menunjukkan bahwa ketergantungan VFA terhadap terbatasnya konsentrasi substrat dalam lindi (Reid *et al.*, 1991). Terlihat juga, bahwa konsentrasi VFA tertinggi pada semua kondisi operasi berada pada hari ke-25 – 31. Seperti terlihat pada Gambar 4.44 – 4.47 dan Gambar 4.48 – 4.51.

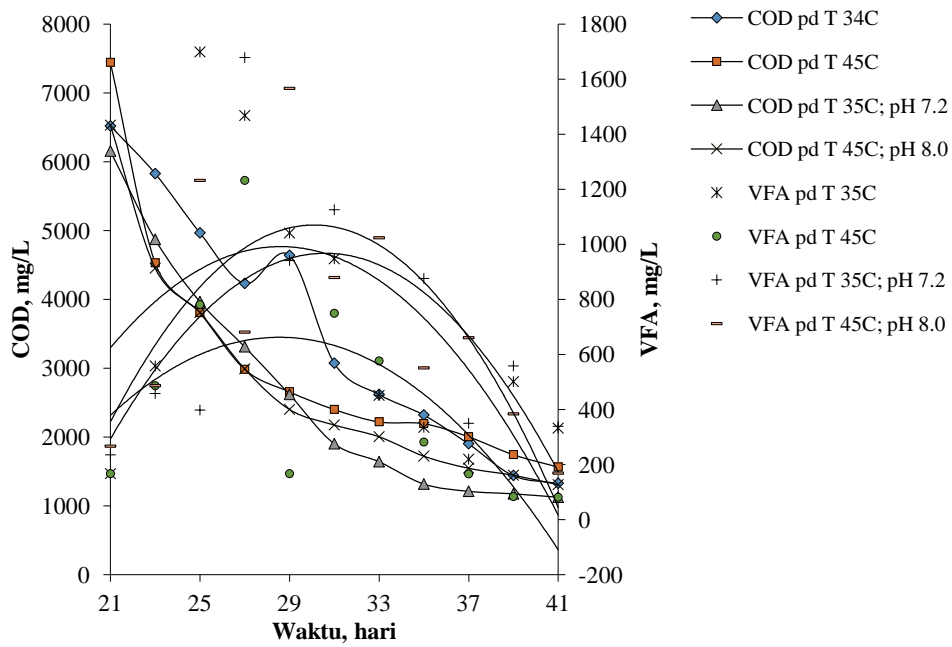
Pengaruh resirkulasi pada acidogenik membantu peningkatan acidifikasi dengan meningkatkan kontak antara mikroorganisme dan substrat (Beux *et al.*, 2007). Seperti pada Gambar 4.48. Terlihat VFA pada pengolahan dengan laju alir resirkulasi; Q 6 L/mnt dan 24 L/mnt, lebih tinggi dari pada VFA pada tanpa resirkulasi (Q 0 L/mnt).



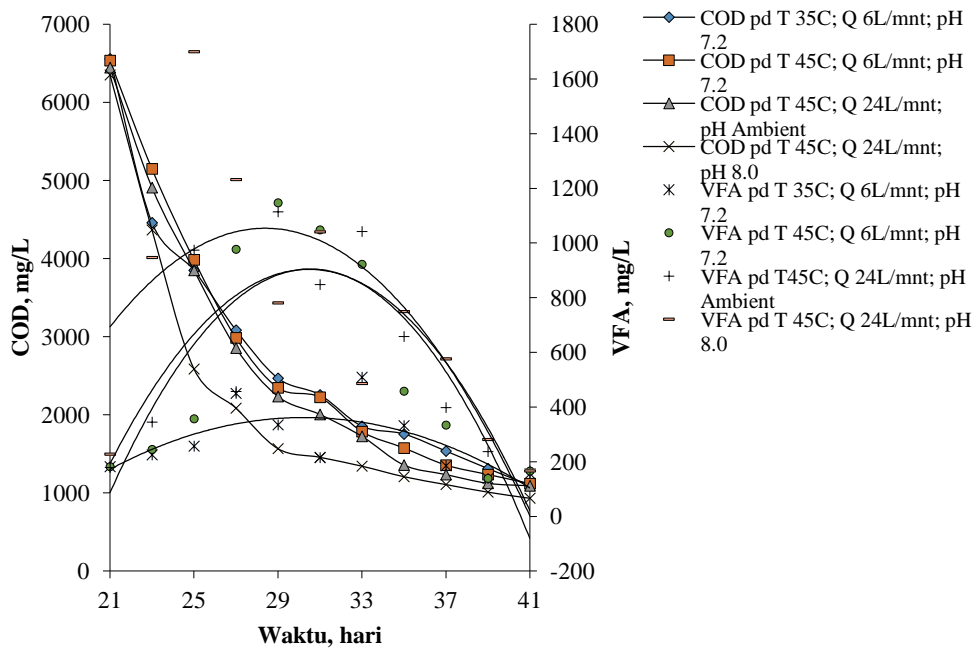
Gambar 4.44. COD vs VFA pada pengaruh pH



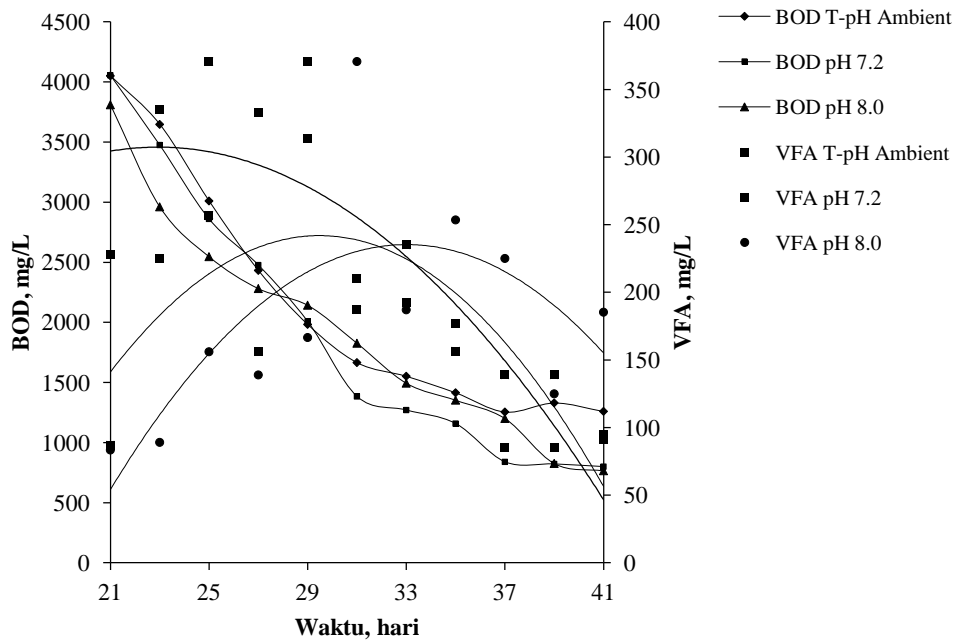
Gambar 4.45. COD vs VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



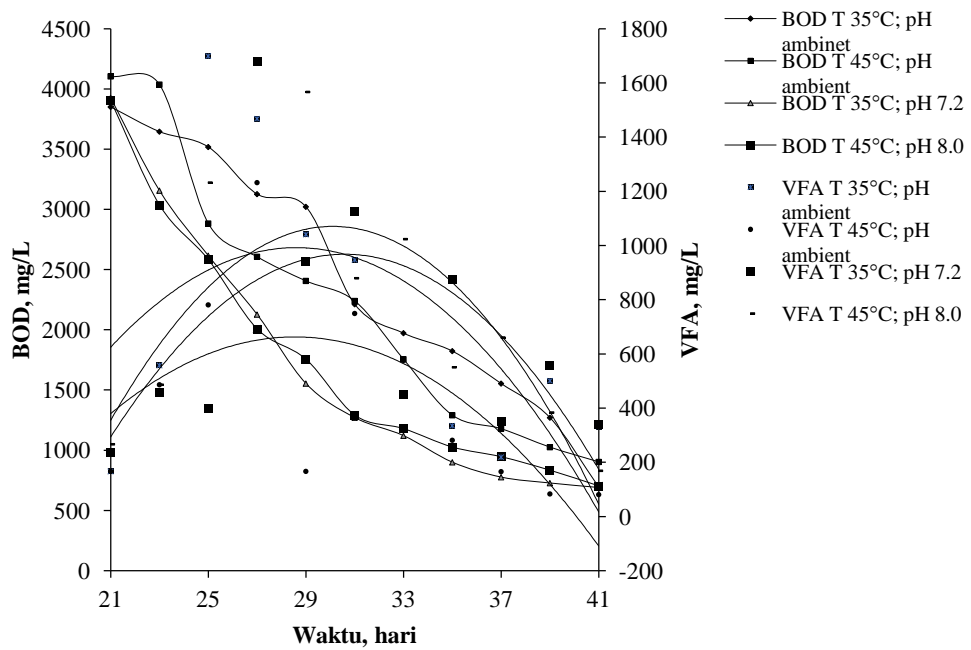
Gambar 4.46. COD vs VFA pada pengaruh temperatur T



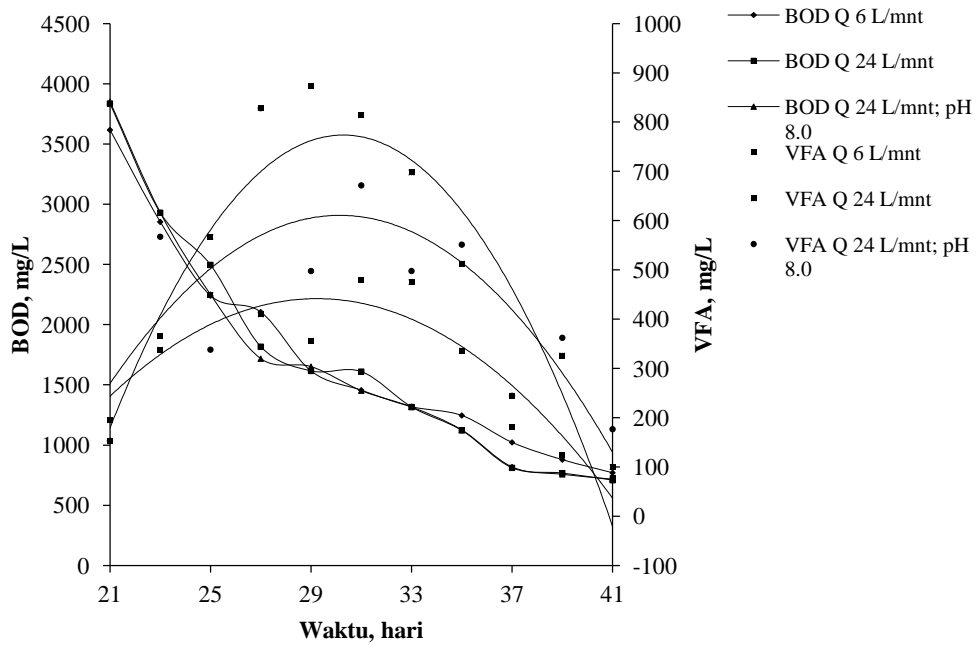
Gambar 4.47. COD vs VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



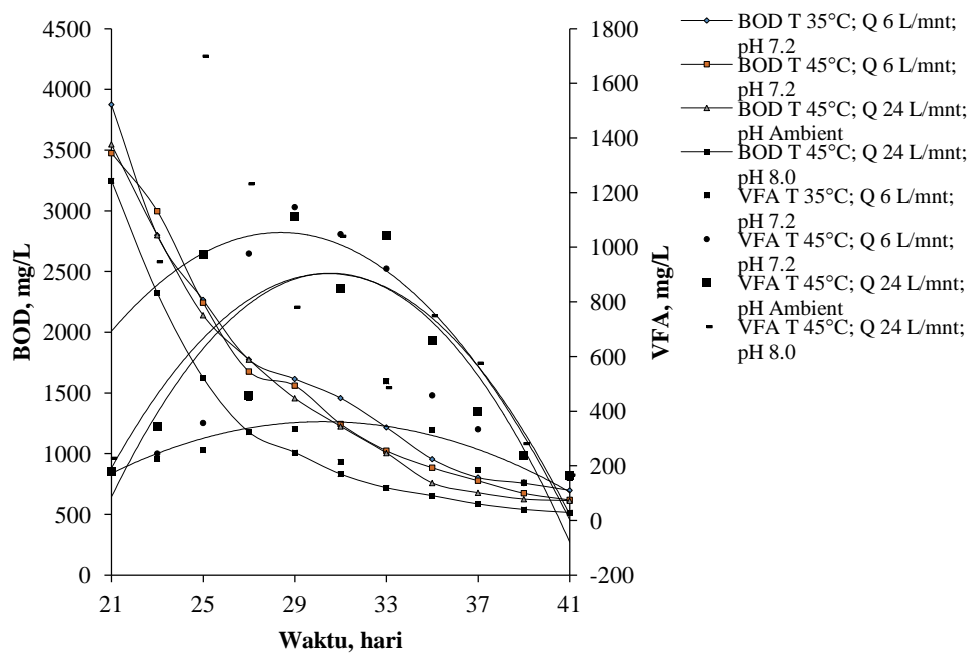
Gambar 4.48. BOD vs VFA pada pengaruh pH



Gambar 4.49. BOD vs VFA pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.50. BOD vs VFA pada pengaruh temperatur T



Gambar 4.51. BOD vs VFA pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Pertumbuhan bakteri hidrolitik lebih cepat dari pada bakteri *methanogens*, hal ini seringkali menyebabkan terjadi akumulasi VFA (Amani *et al.*, 2010). Akumulasi VFA dalam bioreaktor anaerobik mencerminkan suatu ketidakseimbangan antara asam yang diproduksi dan asam yang dikonsumsi oleh bakteri. Jika bioreaktor *overload* dan kandungan konsentrasi VFA tinggi, lebih besar daripada yang dapat dikonsumsi bakteri methan-producing (*slow-growers*), maka produksi biogas akan meningkat. Peningkatan ini berpotensi meningkatkan foaming dalam bioreaktor anaerobik (Baber, 2005). Akumulasi VFA dapat mengakibatkan penurunan pH secara progresif dari 7 menjadi 5 yang dapat mengganggu proses dekomposisi terutama bagi bakteri pembentuk metana yang rentan terhadap pH (Padmono, 2007).

Pada penelitian ini diperoleh makin tinggi COD yang terbiodegradasi makin tinggi pula konsentrasi VFA. Makin berkurang konsentrasi substrat makin menurun pula konsentrasi VFA. Hal ini sesuai dengan pernyataan, bahwa semakin besar konsentrasi substrat yang tereduksi, berarti bahan organik terlarut yang terbiodegradasi menjadi asam-asam organik semakin besar. Asam organik inilah yang kemudian dikonversi menjadi gas metana. Oleh karena itu, jika penurunan COD semakin besar maka laju pembentukan gas metana juga semakin besar

(Widjaja, *et al.*, 2008). Hanya saja yang perlu diperhatikan pada semua kondisi operasi pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik adalah sebelum dan sesudah puncak konsentrasi VFA tertinggi. Dimana sebelum VFA tertinggi, konsentrasi substrat organik terlarut juga masih tinggi. Sedangkan pada sesudah VFA puncak tertinggi, konsentrasi substrat organik terlarut telah menurun.

4.5. Pembahasan

Secara umum, semua jenis biomassa dapat dikatakan sebagai substrat, sepanjang mengandung karbohidrat, protein, lemak, selulosa dan hemiselulosa sebagai komponen utama (Deublein and Steinhauser, 2008). Dan konsentrasi substrat diekspresikan sebagai COD (Christensen *et al.*, 2001; Hassan and Xie, 2014).

Perbedaan konsentrasi substrat (organik dan anorganik) terlarut dalam lindi merupakan gaya dorong (*driving force*) dari proses perpindahan massa pada pengolahan lindi. Biodegradasi substrat bahan organik dan anorganik terlarut ini akan mempengaruhi sifat, parameter dan karakteristik lindi dalam bioreaktor selama proses pengolahan anaerobik.

Dengan adanya gradien konsentrasi, akan terjadi gerakan perpindahan massa dari daerah yang berkonsentrasi tinggi ke daerah yang berkonsentrasi rendah. Gerakan inilah yang dimanfaatkan agar kontak yang intensif terjadi antara zat terlarut dan mikroorganisme, sehingga memungkinkan perpindahan massa lebih banyak terjadi (Geankoplis, 2003; Welty *et al.*, 2007). Perpindahan massa fase cair dalam lindi terjadi karena perbedaan konsentrasi substrat terlarut (organik dan anorganik) di dalamnya. Gerakan antara zat terlarut, pelarut dan mikroorganisme terjadi secara terus menerus. Sebagai akibat tumbukan-tumbukan itu, zat terlarut, pelarut dan mikroorganisme tersebut bergerak tak-beraturan dan acak.

Selama proses pengolahan anaerobik, substrat dibiodegradasi secara simultan dari satu fase ke fase yang lain. Substrat organik kompleks dibiodegradasi menjadi *intermediate product* (VFA) kemudian dikonversi menjadi biogas (CH_4 dan CO_2) (van Lier *et al.*, 2008). Makin banyak massa substrat (organik dan anorganik) terlarut yang terbiodegradasi, maka akan menurunkan

massa substrat terlarut, sehingga konsentrasi substrat terlarut dalam lindi juga makin berkurang. Adanya perubahan konsentrasi substrat (COD, BOD) terlarut juga diikuti perubahan densitas, viskositas, VFA dan tekanan biogas.

4.5.1. Laju Perpindahan Massa, Laju Difusi Zat Terlarut, dan Bilangan Tak-Berdimensi

Perhitungan perpindahan massa fase cair, k_L menggunakan data konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD. Dengan menggunakan persamaan:

$$\ln \frac{[S]_0}{[S]_t} = k_L \cdot t \quad 2.35a.$$

Selanjutnya plot antara $\ln \frac{[S]_0}{[S]_t}$ terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa reaksi ini adalah orde kesatu dan harga koefisien perpindahan massa, k_L dapat diperoleh dari kemiringannya. Contoh perhitungan pada Lampiran C.

Perhitungan difusi fase cair, D_L menggunakan data Temperatur lindi (T_{lindi}), viskositas dan konsentrasi VFA (sebagai asam asetat), mg/L, dengan menggunakan persamaan 2.32.

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B \cdot M_B)^{1/2} T}{\mu_L \cdot V_A^{0,6}} \quad 2.32.$$

Selanjutnya plot antara laju difusi zat terlarut rata-rata per hari, r_{DL} terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa reaksi ini adalah orde kesatu dan harga koefisien difusi zat terlarut dan pelarut, D_L dapat diperoleh dari kemiringannya. Contoh perhitungan pada Lampiran C.

Bilangan *Reynolds*, N_{Re} : menggambarkan keadaan atau rezim aliran resirkulasi fluida, menggunakan persamaan 2.38, sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{di \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad 2.38.$$

Perhitungan bilangan *Schmidt*, N_{Sc} : yaitu sifat fluida untuk korelasi difusivitas massa, menggunakan persamaan 2.39, sebagai berikut.

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} \quad 2.39.$$

Perhitungan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} : yaitu perpindahan masa antara solute (zat terlarut) dan *solvent* (pelarut).

$$N_{Sh} = \frac{k_L \cdot di}{D_L} \quad 2.40.$$

Adapun data hasil perhitungan laju perpindahan massa, r_{kL} , laju difusi zat terlarut; r_{DL} , bilangan *Reynolds*; N_{Re} , bilangan *Schmidt*; N_{Sc} , dan bilangan *Sherwood*; N_{Sh} , disajikan pada Tabel 4.63 – Tabel 4.83.

Pengaruh pH

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur dan pH *ambient* serta tanpa resirkulasi lindi seperti terlihat pada Tabel 4.53. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $4.7101 \cdot 10^{-8}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-27 adalah $1.6359 \cdot 10^{-6}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut berkisar antara $5.57442 \cdot 10^{-5}$ - $1.40034 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* berkisar antara 6403.041831 - 16714.67388. dan bilangan *Sherwood* berkisar antara 0.00544 - 0.01367.

Tabel 4.53. r_{kL} , r_{DL} , N_{Re} , N_{Sc} , N_{Sh} pada T dan pH *ambient*; Tanpa Resirkulasi

Waktu; t hari	r_{kL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00000	$7.348 \cdot 10^{-5}$	0.00	12875.42343	0.01037
23	$1.3132 \cdot 10^{-6}$	$5.895 \cdot 10^{-5}$	0.00	15887.73343	0.01293
25	$8.1419 \cdot 10^{-7}$	$5.574 \cdot 10^{-5}$	0.00	16714.66385	0.01367
27	$1.6359 \cdot 10^{-6}$	$6.076 \cdot 10^{-5}$	0.00	15010.51052	0.01254
29	$9.8643 \cdot 10^{-8}$	$6.317 \cdot 10^{-5}$	0.00	14394.14918	0.01206
31	$8.6185 \cdot 10^{-7}$	$8.057 \cdot 10^{-5}$	0.00	11254.33036	0.00946
33	$1.0620 \cdot 10^{-6}$	$8.482 \cdot 10^{-5}$	0.00	10657.54231	0.00898
35	$1.5946 \cdot 10^{-7}$	$9.633 \cdot 10^{-5}$	0.00	9362.25472	0.00791
37	$6.4736 \cdot 10^{-7}$	$1.039 \cdot 10^{-4}$	0.00	8646.82370	0.00733
39	$4.7101 \cdot 10^{-8}$	$1.400 \cdot 10^{-4}$	0.00	6403.04184	0.00544
41	$6.9309 \cdot 10^{-7}$	$1.330 \cdot 10^{-4}$	0.00	6665.58945	0.00573

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH 7.2, temperatur *ambient* dan tanpa resirkulasi lindi, seperti

terlihat pada Tabel 4.54. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $2.631.10^{-08}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-25 adalah $1.962.10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $5.96009.10^{-5}$ - $1.44715.10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 5995.082279 - 14631.49363. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.00088 - 0.00213.

Tabel 4.54. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada pH 7.2

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00000	$1.305.10^{-04}$	0.00000	7279.93084	0.00097
23	$8.864.10^{-07}$	$7.618.10^{-05}$	0.00000	12082.66835	0.00167
25	$1.962.10^{-06}$	$7.192.10^{-05}$	0.00000	12510.14914	0.00177
27	$1.149.10^{-06}$	$9.943.10^{-05}$	0.00000	8847.20127	0.00128
29	$1.226.10^{-06}$	$5.960.10^{-05}$	0.00000	14631.49363	0.00213
31	$1.720.10^{-06}$	$8.994.10^{-05}$	0.00000	9671.06777	0.00141
33	$5.206.10^{-07}$	$7.875.10^{-05}$	0.00000	11017.60679	0.00161
35	$3.790.10^{-07}$	$9.335.10^{-05}$	0.00000	9294.25544	0.00136
37	$1.530.10^{-06}$	$1.447.10^{-04}$	0.00000	5995.08228	0.00088
39	$2.631.10^{-08}$	$1.078.10^{-04}$	0.00000	8042.18469	0.00118
41	$3.442.10^{-07}$	$1.402.10^{-04}$	0.00000	6170.61883	0.00091

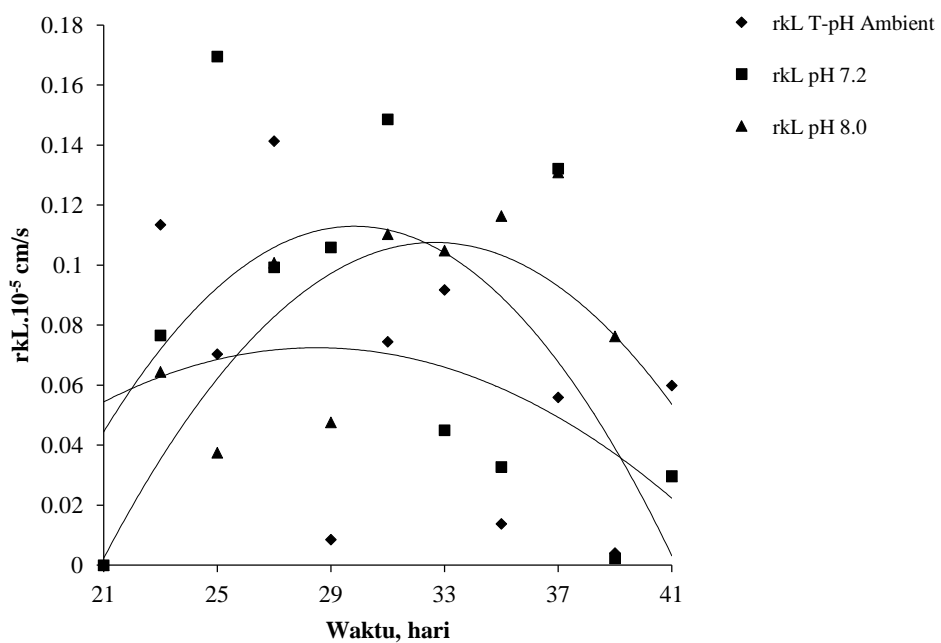
Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH 8.0, temperatur ambient dan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.55. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $3.42.10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-37 adalah $1.515.10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $5.541.10^{-5}$ - $1.242.10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor, 0 L/menit. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 8003.422666 - 16882.51969. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.01023 - 0.02292.

Tabel 4.55. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada pH 8.0

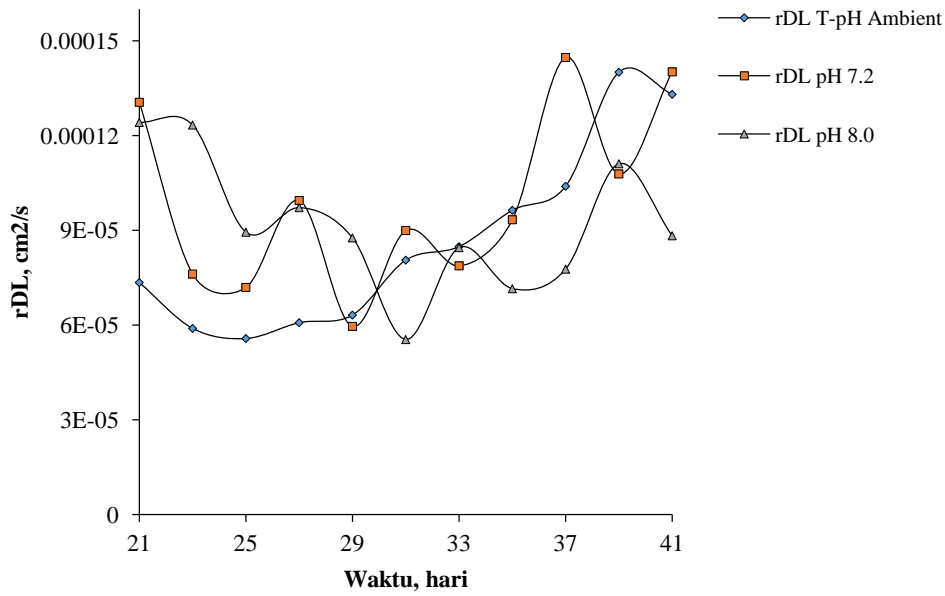
Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$1.242.10^{-04}$	0.00	8254.5163	0.01023
23	$7.457.10^{-07}$	$1.233.10^{-04}$	0.00	8003.4227	0.01030
25	$4.341.10^{-07}$	$8.939.10^{-05}$	0.00	10897.0812	0.01421
27	$1.167.10^{-06}$	$9.718.10^{-05}$	0.00	9895.6063	0.01307
29	$5.511.10^{-07}$	$8.761.10^{-05}$	0.00	10950.8976	0.01450
31	$1.277.10^{-06}$	$5.541.10^{-05}$	0.00	16882.5197	0.02292
33	$1.214.10^{-06}$	$8.451.10^{-05}$	0.00	10952.7926	0.01503

Waktu; t hari	r_{kL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
35	$1.347 \cdot 10^{-06}$	$7.151 \cdot 10^{-05}$	0.00	12761.6496	0.01776
37	$1.515 \cdot 10^{-06}$	$7.771 \cdot 10^{-05}$	0.00	11622.2343	0.01634
39	$8.827 \cdot 10^{-07}$	$1.111 \cdot 10^{-04}$	0.00	8093.8814	0.01143
41	$3.424 \cdot 10^{-07}$	$8.827 \cdot 10^{-05}$	0.00	10118.8050	0.01439

Keadaan laju perpindahan massa, r_{kL} dan laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh pH ambient, 7.2 dan 8.0, seperti terlihat pada Gambar 4.52 dan Gambar 4.53.

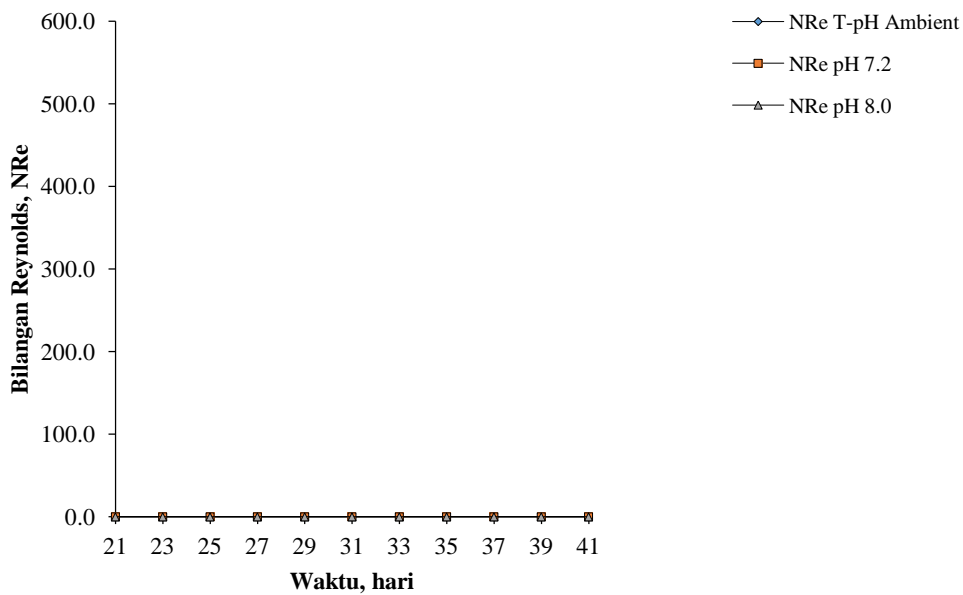


Gambar 4.52. Laju perpindahan massa pada pengaruh pH

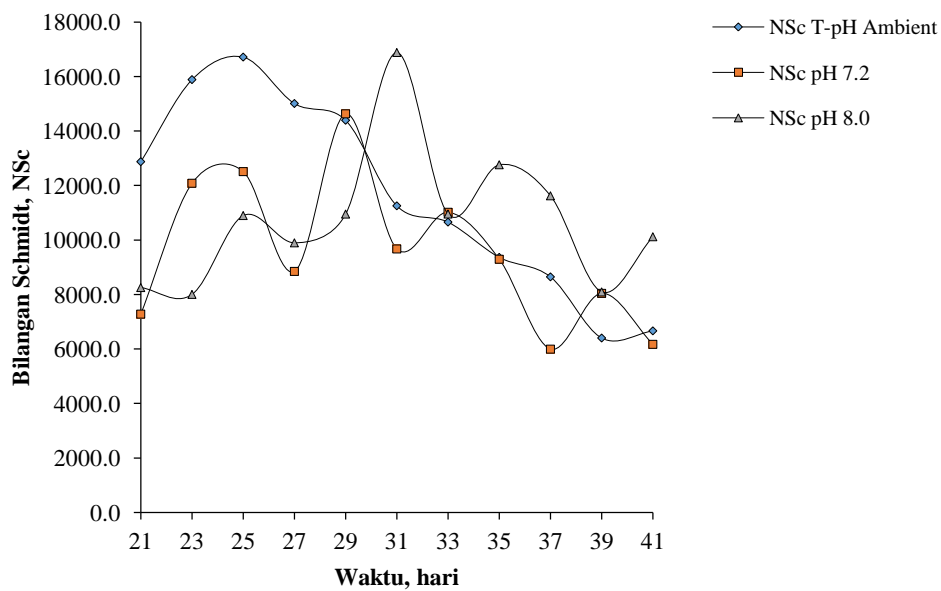


Gambar 4.53. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh pH

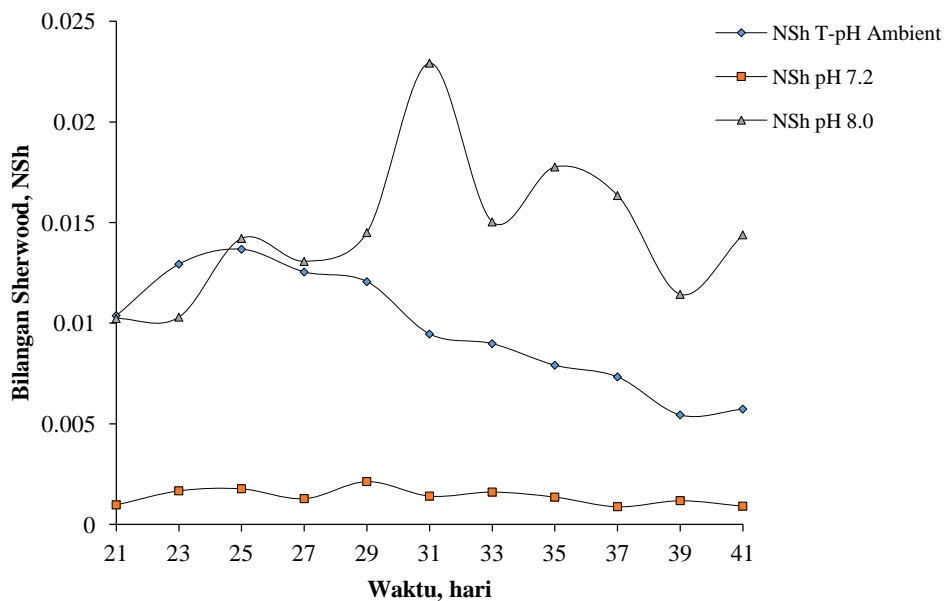
Kondisi bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} pada pengaruh pH ambient, 7.2 dan 8.0, seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.54; Gambar 4.55; dan Gambar 4.56.



Gambar 4.54. Bilangan *Reynolds* pada pengaruh pH



Gambar 4.55. Bilangan *Schmidt* pada pengaruh pH



Gambar 4.56. Bilangan *Sherwood* pada pengaruh pH

Uji Anova Pengaruh pH

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Tabel 4.56. Uji Anova pengaruh pH terhadap bilangan *Schmidt*

Source	DF	SS	MS	F	P
pH	2	22845139	11422569	1.26	0.297
Error	30	271354994	9045166		
Total	32	294200132			

S = 3008 R-Sq = 7.77% R-Sq(adj) = 1.62%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.297 lebih besar dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa pH tidak berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Schmidt*, N_{Sc} .

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh}

Tabel 4.57. Uji Anova pengaruh pH terhadap bilangan *Sherwood*

Source	DF	SS	MS	F	P
pH	2	1058138	529069	5.4	0.01
Error	30	2939970	97999		
Total	32	3998108			

S = 313.0 R-Sq = 26.47% R-Sq(adj) = 21.56%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.01 lebih kecil dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa pH berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Sherwood*, N_{Sh} .

Pengaruh Laju Alir Resirkulasi

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH dan temperatur *ambient* serta laju resirkulasi lindi 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.58. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $2.540.10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah $2.753.10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $4.76643.10^{-5} - 1.2917.10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 97.804 – 113.118. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 6860.2121 - 19978.9503. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.005899 - 0.015794.

Tabel 4.58. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$7.467.10^{-05}$	97.804	13724.9068	0.010204
23	$2.753.10^{-06}$	$5.328.10^{-05}$	101.553	18526.8302	0.014303
25	$1.470.10^{-06}$	$4.825.10^{-05}$	103.990	19978.9503	0.015794
27	$8.935.10^{-07}$	$5.119.10^{-05}$	104.682	18707.4754	0.014887
29	$1.044.10^{-06}$	$5.623.10^{-05}$	105.761	16855.6945	0.013552
31	$5.818.10^{-07}$	$4.766.10^{-05}$	107.260	19606.3354	0.015987
33	$4.934.10^{-07}$	$4.923.10^{-05}$	109.729	18556.4708	0.015479
35	$2.540.10^{-07}$	$6.107.10^{-05}$	111.055	14780.5205	0.012478

Waktu; t hari	r_{kL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
37	$5.376 \cdot 10^{-07}$	$9.028 \cdot 10^{-05}$	112.584	9862.2393	0.008441
39	$5.581 \cdot 10^{-07}$	$1.135 \cdot 10^{-04}$	112.851	7825.3361	0.006713
41	$5.166 \cdot 10^{-07}$	$1.292 \cdot 10^{-04}$	113.118	6860.2121	0.005899

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH dan temperatur *ambient* dengan laju resirkulasi lindi 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.59. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $4.457 \cdot 10^{-08}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah $2.371 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $3.26097 \cdot 10^{-5}$ – $1.52197 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 391.2127 - 453.0099. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 5815.3162 - 29420.5222. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.007510 - 0.035051.

Tabel 4.59. r_{kL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

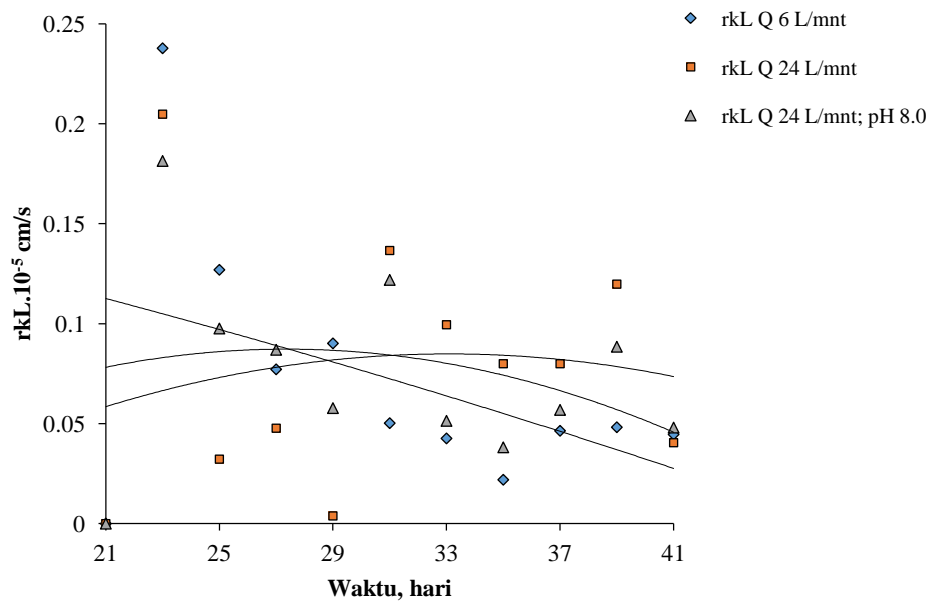
Waktu; t hari	r_{kL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$8.651 \cdot 10^{-05}$	391.2127	11847.6351	0.013213
23	$2.371 \cdot 10^{-06}$	$5.492 \cdot 10^{-05}$	399.4051	18277.3065	0.020811
25	$3.734 \cdot 10^{-07}$	$4.138 \cdot 10^{-05}$	410.1425	23623.3748	0.027621
27	$5.526 \cdot 10^{-07}$	$3.361 \cdot 10^{-05}$	416.9553	28610.7412	0.034008
29	$4.457 \cdot 10^{-08}$	$3.261 \cdot 10^{-05}$	417.9164	29420.5222	0.035051
31	$1.582 \cdot 10^{-06}$	$3.469 \cdot 10^{-05}$	427.1348	27061.4785	0.032952
33	$1.152 \cdot 10^{-06}$	$3.863 \cdot 10^{-05}$	433.1428	23962.4378	0.029588
35	$9.259 \cdot 10^{-07}$	$4.737 \cdot 10^{-05}$	440.9604	19196.8432	0.024132
37	$9.260 \cdot 10^{-07}$	$7.542 \cdot 10^{-05}$	450.2266	11807.2420	0.015154
39	$1.387 \cdot 10^{-06}$	$6.339 \cdot 10^{-05}$	451.9324	13996.0947	0.018032
41	$4.686 \cdot 10^{-07}$	$1.522 \cdot 10^{-04}$	453.0099	5815.3162	0.007510

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH 8.0; temperatur *ambient* dengan laju alir resirkulasi lindi 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.60. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $4.419 \cdot 10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah $2.100 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $3.31995 \cdot 10^{-5}$ – $9.14975 \cdot 10^{-5}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 367.1145 - 447.7456. Bilangan *Schmidt* naik turun berfluktuasi dengan kisaran antara 9786.9341 - 29031.5172. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.011104 - 0.030603.

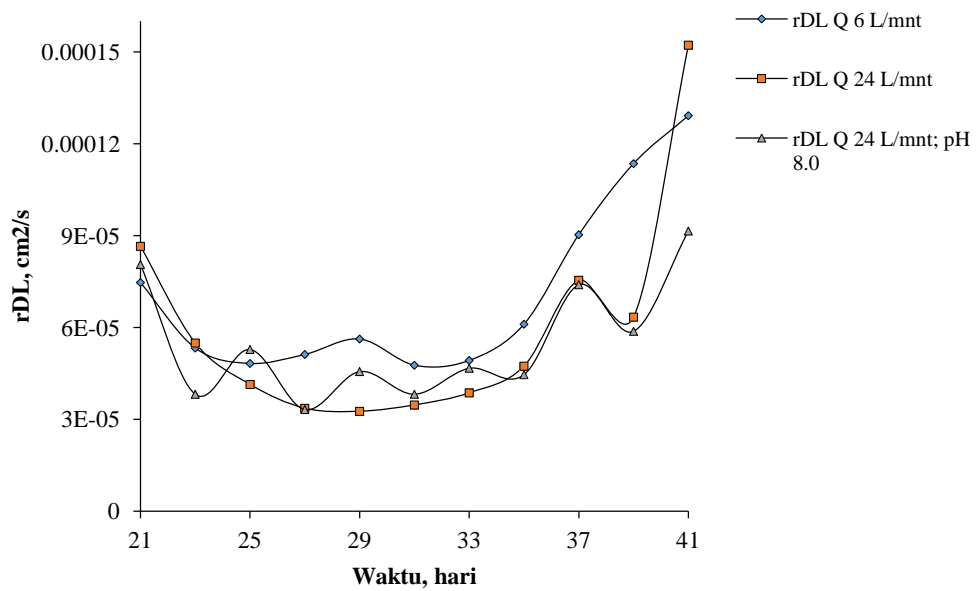
Tabel 4.60. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm^2/s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.000	$8.060.10^{-05}$	367.1145	13551.1068	0.012606
23	$2.100.10^{-06}$	$3.819.10^{-05}$	381.2983	27535.4107	0.026605
25	$1.130.10^{-06}$	$5.283.10^{-05}$	385.5008	19687.1279	0.019232
27	$1.007.10^{-06}$	$3.320.10^{-05}$	415.9927	29031.5172	0.030603
29	$6.690.10^{-07}$	$4.561.10^{-05}$	417.8208	21039.0836	0.022275
31	$1.411.10^{-06}$	$3.821.10^{-05}$	418.1027	25097.7703	0.026590
33	$5.953.10^{-07}$	$4.670.10^{-05}$	426.4785	20131.6081	0.021756
35	$4.419.10^{-07}$	$4.459.10^{-05}$	435.2472	20657.1397	0.022783
37	$6.585.10^{-07}$	$7.397.10^{-05}$	441.4327	12278.5689	0.013735
39	$1.024.10^{-06}$	$5.877.10^{-05}$	443.8293	15371.4753	0.017288
41	$5.562.10^{-07}$	$9.150.10^{-05}$	447.7456	9786.9341	0.011104

Keadaan laju perpindahan massa, r_{KL} dan laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh laju alir resirkulasi 6 L/manit, 24 L/menit dan 24 L/menit; pH 8.0, seperti terlihat pada Gambar 4.52 dan Gambar 4.53.

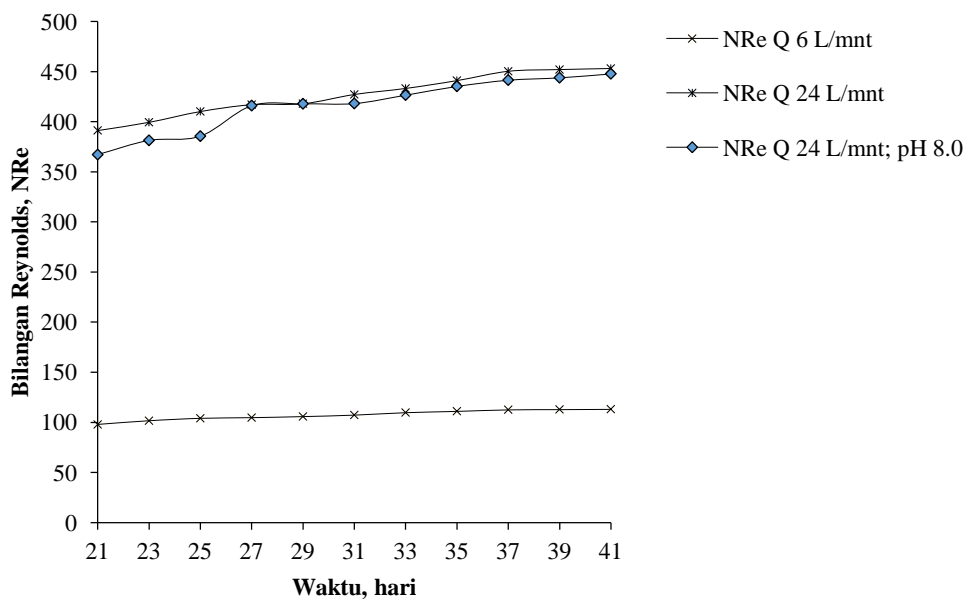


Gambar 4.57. Laju perpindahan massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

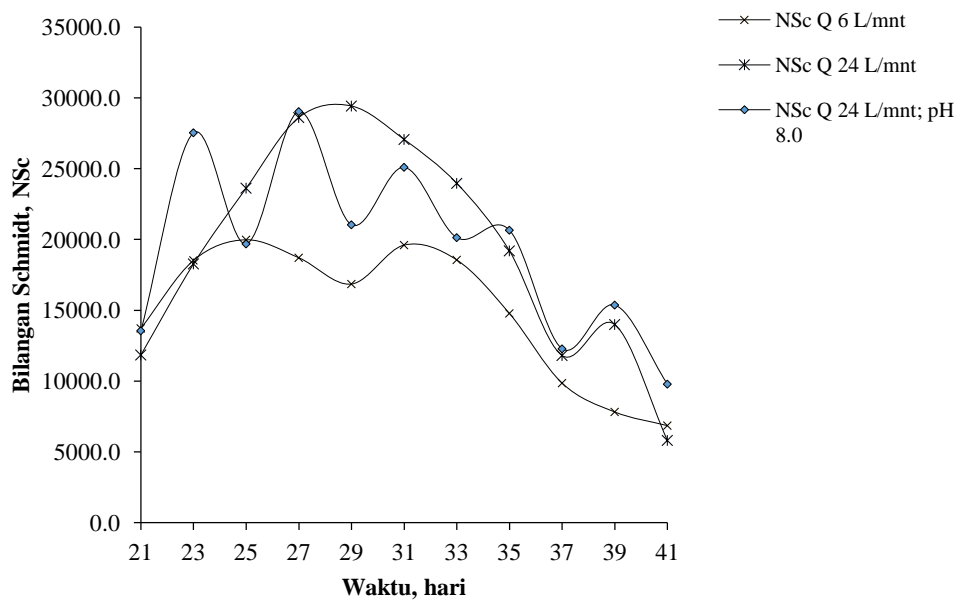


Gambar 4.58. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

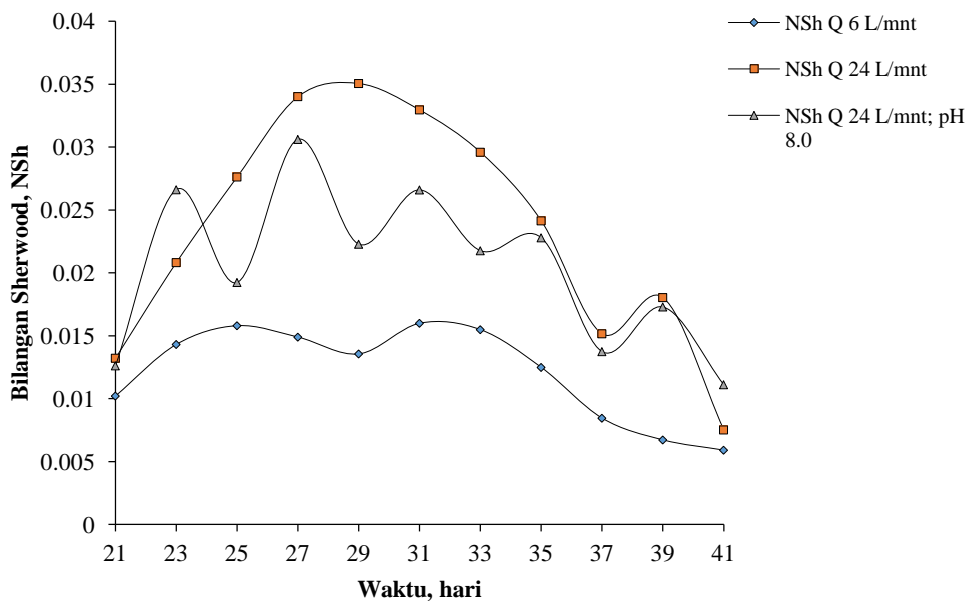
Kondisi bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} pada pengaruh laju alir resirkulasi 6 L/manit, 24 L/menit dan 24 L/menit; pH 8.0, seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.59; Gambar 4.60; dan Gambar 4.61.



Gambar 4.59. Bilangan *Reynolds* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.60. Bilangan *Schmidt* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.61. Bilangan *Sherwood* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Uji Anova Pengaruh Laju alir Resirkulasi

Bilangan *Reynolds*, N_{Re}

Tabel 4.61. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan *Reynolds*

Source	DF	SS	MS	F	P
Laju alir	2	724404	362202	885.35	0.000
Error	30	12273	409		
Total	32	736677			

S = 20.23 R-Sq = 98.33% R-Sq(adj) = 98.22%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.000 lebih kecil dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa laju alir resirkulasi berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Reynolds*, N_{Re} .

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Tabel 4.62. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan *Schmidt*

Source	DF	SS	MS	F	P
Laju alir	2	143212242	71606121	1.74	0.193
Error	30	1236221526	41207384		
Total	32	1379433769			

S = 6419 R-Sq = 10.38% R-Sq(adj) = 4.41%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.193 lebih besar dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa laju alir resirkulasi tidak berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh}

Tabel 4.63. Uji Anova pengaruh laju alir resirkulasi terhadap bilangan *Sherwood*

Source	DF	SS	MS	F	P
Laju alir	2	4756536	2378268	6.82	0.004
Error	30	10457710	348590		
Total	32	15214246			

S = 590.4 R-Sq = 31.26% R-Sq(adj) = 26.68%

Didapatkan nilai p-value sebesar 0.004 lebih kecil dari 0.05, maka dapat disimpulkan bahwa laju alir resirkulasi berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Sherwood*, N_{Sh} .

Pengaruh Temperatur

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH *ambient* dan temperatur 35°C dengan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.64. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $-5.333 \cdot 10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-31 adalah $2.385 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $2.167 \cdot 10^{-5} - 8.186 \cdot 10^{-5}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena

tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* naik turun berfluktuasi dengan kisaran antara 10878.471 - 45359.355. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.015514 - 0.058612.

Tabel 4.64. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35°C

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	8.174.10 ⁻⁰⁵	0.00	12825.812	0.015536
23	6.500.10 ⁻⁰⁷	4.129.10 ⁻⁰⁵	0.00	24364.946	0.030760
25	9.259.10 ⁻⁰⁷	2.167.10 ⁻⁰⁵	0.00	45359.355	0.058612
27	9.260.10 ⁻⁰⁷	2.419.10 ⁻⁰⁵	0.00	39760.405	0.052512
29	-5.333.10 ⁻⁰⁷	2.995.10 ⁻⁰⁵	0.00	31869.806	0.042406
31	2.385.10 ⁻⁰⁶	3.224.10 ⁻⁰⁵	0.00	29117.849	0.039395
33	9.259.10 ⁻⁰⁷	5.105.10 ⁻⁰⁵	0.00	18134.491	0.024880
35	7.002.10 ⁻⁰⁷	6.213.10 ⁻⁰⁵	0.00	14635.003	0.020441
37	1.152.10 ⁻⁰⁶	8.186.10 ⁻⁰⁵	0.00	10878.471	0.015514
39	1.608.10 ⁻⁰⁶	5.003.10 ⁻⁰⁵	0.00	17731.902	0.025383
41	4.710.10 ⁻⁰⁷	6.420.10 ⁻⁰⁵	0.00	13786.309	0.019782

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada pH *ambient* dan temperatur 45°C dengan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.65. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah 6.754.10⁻⁰⁸ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah 2.875.10⁻⁰⁶ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara 2.808.10⁻⁵ – 1.549.10⁻⁴ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 5714.571152 - 33835.03896. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.004920 - 0.021281.

Tabel 4.65. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45°C

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	8.451.10 ⁻⁰⁵	0.00	12401.012	0.009017
23	2.875.10 ⁻⁰⁶	4.667.10 ⁻⁰⁵	0.00	21397.493	0.016328
25	1.008.10 ⁻⁰⁶	3.581.10 ⁻⁰⁵	0.00	27360.100	0.021281
27	1.408.10 ⁻⁰⁶	2.808.10 ⁻⁰⁵	0.00	33835.039	0.027132
29	6.710.10 ⁻⁰⁷	9.480.10 ⁻⁰⁵	0.00	9868.469	0.008038
31	5.883.10 ⁻⁰⁷	3.943.10 ⁻⁰⁵	0.00	23138.276	0.019324
33	4.525.10 ⁻⁰⁷	4.661.10 ⁻⁰⁵	0.00	19395.080	0.016349
35	6.754.10 ⁻⁰⁸	7.210.10 ⁻⁰⁵	0.00	12461.849	0.010568
37	5.263.10 ⁻⁰⁷	1.003.10 ⁻⁰⁴	0.00	8852.941	0.007595
39	8.047.10 ⁻⁰⁷	1.518.10 ⁻⁰⁴	0.00	5841.804	0.005020
41	6.305.10 ⁻⁰⁷	1.549.10 ⁻⁰⁴	0.00	5714.571	0.004920

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 35°C dan pH 7.2 dengan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.66. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $1.797.10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-31 adalah $1.852.10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $2.303.10^{-5}$ – $6.622.10^{-5}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 14129.20845 - 40462.35466. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.019179 - 0.055154.

Tabel 4.66. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

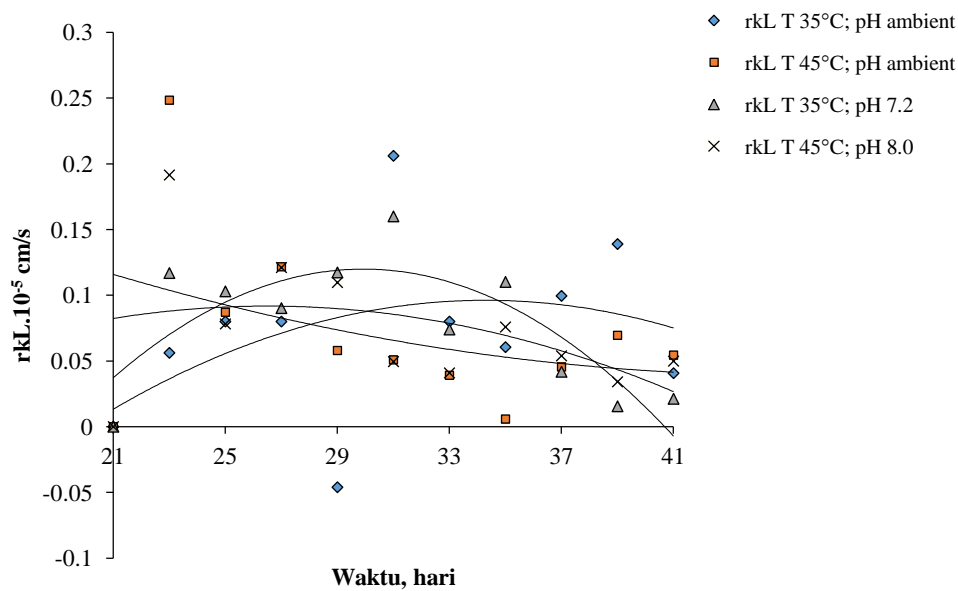
Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$6.622.10^{-05}$	0.00	15917.836	0.019179
23	$1.353.10^{-06}$	$4.739.10^{-05}$	0.00	20826.470	0.026799
25	$1.192.10^{-06}$	$5.343.10^{-05}$	0.00	17830.884	0.023768
27	$1.044.10^{-06}$	$2.303.10^{-05}$	0.00	40462.355	0.055154
29	$1.358.10^{-06}$	$3.284.10^{-05}$	0.00	28155.730	0.038671
31	$1.852.10^{-06}$	$2.996.10^{-05}$	0.00	30382.151	0.042387
33	$8.557.10^{-07}$	$5.211.10^{-05}$	0.00	17386.880	0.024369
35	$1.275.10^{-06}$	$3.518.10^{-05}$	0.00	25631.525	0.036101
37	$4.838.10^{-07}$	$6.157.10^{-05}$	0.00	14529.306	0.020628
39	$1.797.10^{-07}$	$4.664.10^{-05}$	0.00	19133.124	0.027228
41	$2.456.10^{-07}$	$6.306.10^{-05}$	0.00	14129.208	0.020140

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 45°C dan pH 8.0 dengan tanpa resirkulasi lindi, seperti terlihat pada Tabel 4.67. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $3.953.10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah $2.216.10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $2.501.10^{-5}$ – $9.967.10^{-5}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* tidak dihitung karena tanpa resirkulasi lindi dalam bioreaktor. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran fluktuasi antara 8890.669123 - 38953.96833. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.010194 - 0.040618.

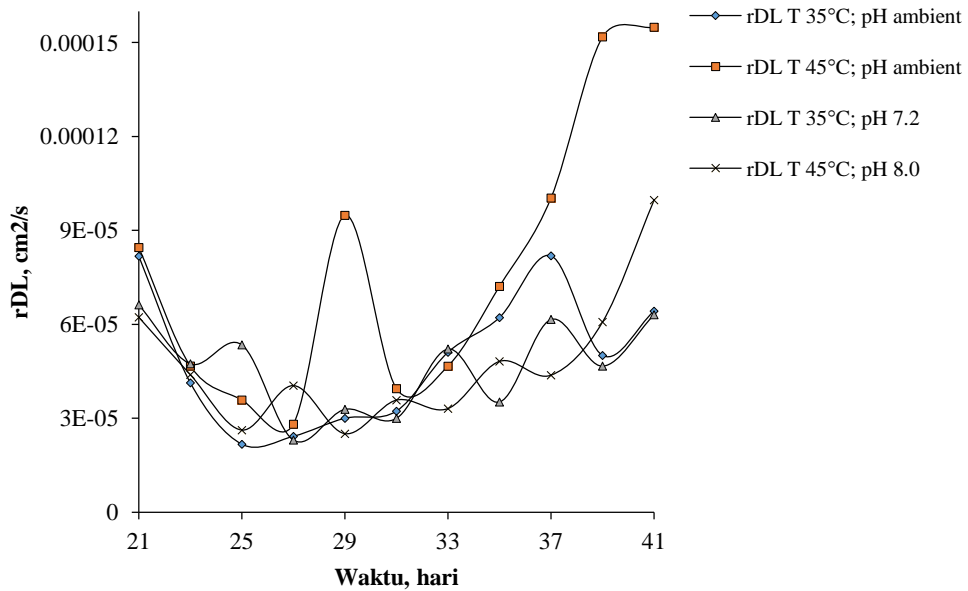
Tabel 4.67. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} , N_{Sc} , N_{Sh} pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm^2/s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$6.223 \cdot 10^{-05}$	0.00	17230.566	0.016328
23	$2.216 \cdot 10^{-06}$	$4.389 \cdot 10^{-05}$	0.00	24186.923	0.023146
25	$9.050 \cdot 10^{-07}$	$2.618 \cdot 10^{-05}$	0.00	38953.968	0.038815
27	$1.401 \cdot 10^{-06}$	$4.040 \cdot 10^{-05}$	0.00	23343.646	0.025149
29	$1.270 \cdot 10^{-06}$	$2.501 \cdot 10^{-05}$	0.00	36968.002	0.040618
31	$5.730 \cdot 10^{-07}$	$3.575 \cdot 10^{-05}$	0.00	25616.856	0.028417
33	$4.734 \cdot 10^{-07}$	$3.305 \cdot 10^{-05}$	0.00	27368.145	0.030741
35	$8.780 \cdot 10^{-07}$	$4.815 \cdot 10^{-05}$	0.00	18710.773	0.021103
37	$6.240 \cdot 10^{-07}$	$4.372 \cdot 10^{-05}$	0.00	20362.753	0.023237
39	$3.953 \cdot 10^{-07}$	$6.072 \cdot 10^{-05}$	0.00	14627.977	0.016732
41	$5.774 \cdot 10^{-07}$	$9.967 \cdot 10^{-05}$	0.00	8890.669	0.010194

Keadaan laju perpindahan massa, r_{KL} dan laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh temperatur 35°C, temperatur 45°C, temperatur 35°C; pH 7.2 dan temperatur 45°C; pH 8.0, seperti terlihat pada Gambar 4.62 dan Gambar 4.63.

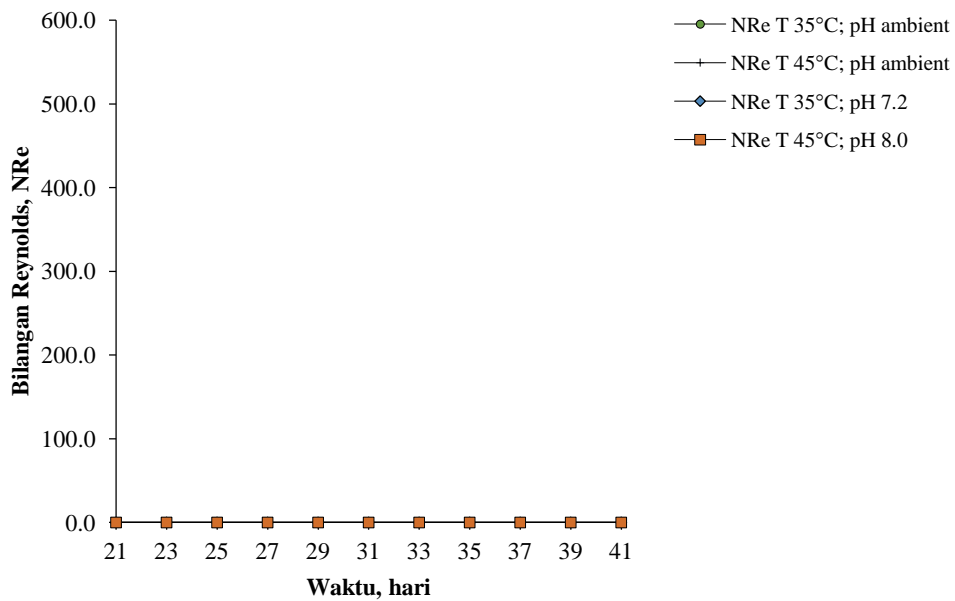


Gambar 4.62. Laju perpindahan massa, r_{KL} pada pengaruh temperatur T

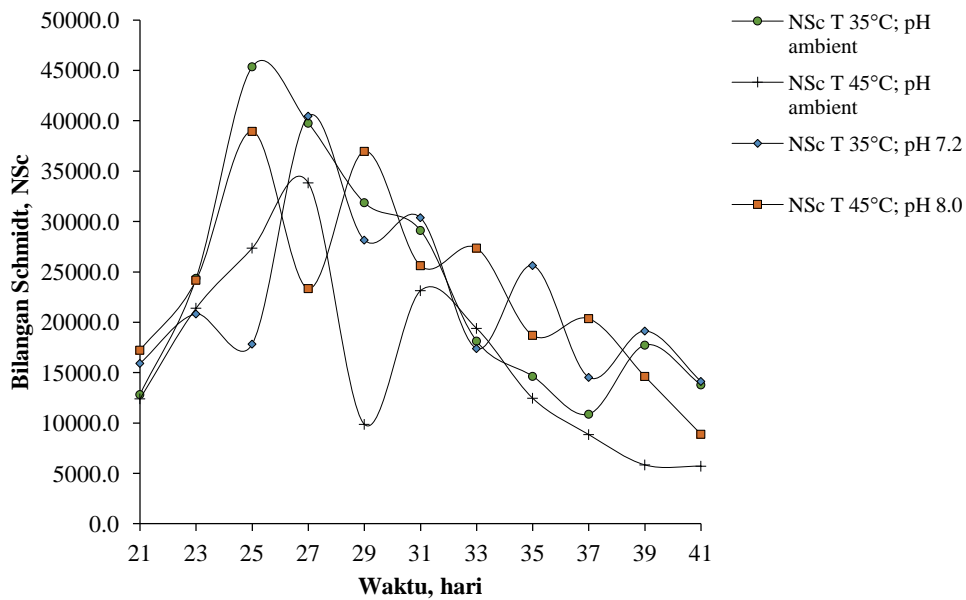


Gambar 4.63. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh temperatur T

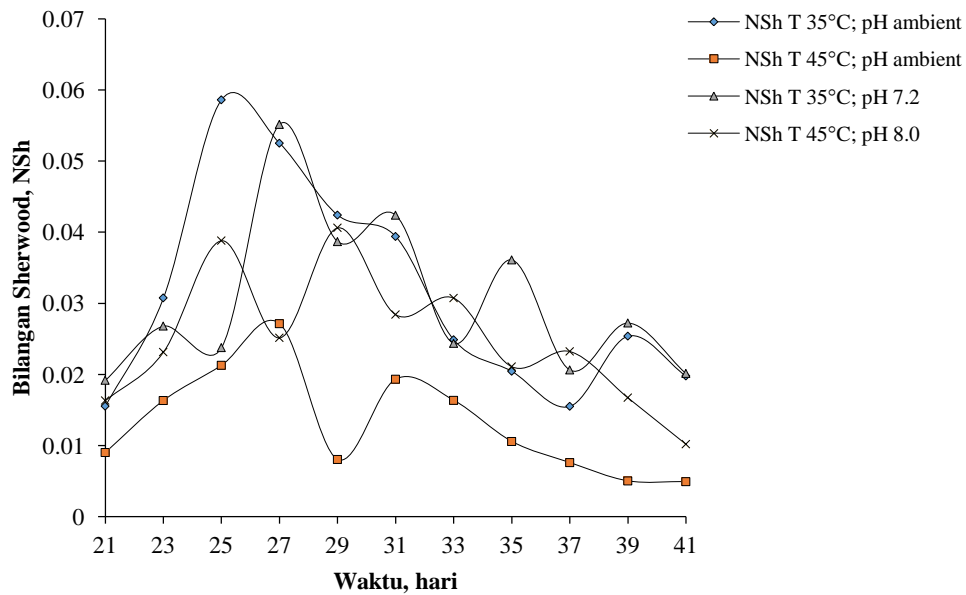
Kondisi bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} pada pengaruh temperatur 35°C, temperatur 45°C, temperatur 35°C; pH 7.2 dan temperatur 45°C; pH 8.0, seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.64; Gambar 4.65; dan Gambar 4.66.



Gambar 4.64. Bilangan *Reynolds* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.65. Bilangan *Schmidt* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.66. Bilangan *Sherwood* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Uji Anova Pengaruh Temperatur

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Tabel 4.68. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap bilangan *Schmidt*

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	371482383	123827461	1.35	0.273
Error	40	3681686182	92042155		
Total	43	4053168565			

S = 9594 R-Sq = 9.17% R-Sq(adj) = 2.35%

Diperoleh nilai p-value sebesar 0.273 lebih besar dari 0.05, maka dapat disimpulkan bahwa temperatur tidak berpengaruh signifikan terhadap bilangan bilangan *Schmidt*, N_{Sc} .

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh}

Tabel 4.69. Uji Anova pengaruh temperatur terhadap bilangan *Sherwood*

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	16266617	5422206	6.03	0.002
Error	40	35939066	898477		
Total	43	52205683			

S = 947.9 R-Sq = 31.16% R-Sq(adj) = 26.00%

Diperoleh nilai p-value sebesar 0.002 lebih kecil dari 0.05, sehingga dapat disimpulkan bahwa temperatur berpengaruh signifikan terhadap bilangan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} .

Pengaruh Kombinasi pH, Temperatur dan Laju Alir Resirkulasi

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 35°C, pH 7.2 dengan laju alir resirkulasi lindi 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.70. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $3.209 \cdot 10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-23 adalah $2.232 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $4.888 \cdot 10^{-5} - 1.082 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 91.743 - 113.114. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 8184.882 - 18397.526. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.010564 - 0.023385.

Tabel 4.70. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$7.430 \cdot 10^{-05}$	91.743	14706.006	0.015385
23	$2.232 \cdot 10^{-06}$	$6.884 \cdot 10^{-05}$	96.348	15113.859	0.016605
25	$8.498 \cdot 10^{-07}$	$6.589 \cdot 10^{-05}$	99.854	15235.404	0.017348
27	$1.283 \cdot 10^{-06}$	$5.106 \cdot 10^{-05}$	108.250	18134.252	0.022384
29	$1.290 \cdot 10^{-06}$	$6.167 \cdot 10^{-05}$	109.482	14847.020	0.018535
31	$5.223 \cdot 10^{-07}$	$8.103 \cdot 10^{-05}$	110.229	11222.373	0.014106
33	$1.133 \cdot 10^{-06}$	$4.888 \cdot 10^{-05}$	111.471	18397.526	0.023385
35	$3.209 \cdot 10^{-07}$	$6.305 \cdot 10^{-05}$	111.270	14288.281	0.018129
37	$7.680 \cdot 10^{-07}$	$9.059 \cdot 10^{-05}$	112.612	9825.942	0.012618

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
39	$9.144 \cdot 10^{-07}$	$1.082 \cdot 10^{-04}$	113.192	8184.882	0.010564
41	$1.023 \cdot 10^{-06}$	$1.009 \cdot 10^{-04}$	113.118	8781.789	0.011327

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 45°C, pH 7.2 dengan laju alir resirkulasi lindi 6 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.71. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $3.065 \cdot 10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-27 adalah $1.672 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $3.053 \cdot 10^{-5} - 1.113 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 91.123 - 113.091. Bilangan *Schmidt* naik turun berfluktuasi dengan kisaran antara 7982.297 - 29872.447. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.011408 - 0.041597.

Tabel 4.71. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	$7.622 \cdot 10^{-05}$	91.123	14432.284	0.016662
23	$1.379 \cdot 10^{-06}$	$6.602 \cdot 10^{-05}$	94.193	16119.613	0.019237
25	$1.483 \cdot 10^{-06}$	$5.551 \cdot 10^{-05}$	99.253	18193.610	0.022879
27	$1.672 \cdot 10^{-06}$	$3.278 \cdot 10^{-05}$	107.192	28528.618	0.038745
29	$1.394 \cdot 10^{-06}$	$3.053 \cdot 10^{-05}$	109.904	29872.447	0.041597
31	$3.065 \cdot 10^{-07}$	$3.267 \cdot 10^{-05}$	111.405	27537.315	0.038869
33	$1.275 \cdot 10^{-06}$	$3.541 \cdot 10^{-05}$	111.785	25324.727	0.035868
35	$7.243 \cdot 10^{-07}$	$5.392 \cdot 10^{-05}$	111.863	16617.919	0.023553
37	$8.664 \cdot 10^{-07}$	$6.538 \cdot 10^{-05}$	112.200	13664.657	0.019425
39	$5.409 \cdot 10^{-07}$	$1.113 \cdot 10^{-04}$	112.804	7982.297	0.011408
41	$5.708 \cdot 10^{-07}$	$1.003 \cdot 10^{-04}$	113.091	8832.523	0.012656

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 45°C, pH ambient dengan laju alir resirkulasi lindi 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.72. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah $1.651 \cdot 10^{-07}$ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-27 adalah $1.730 \cdot 10^{-06}$ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara $2.837 \cdot 10^{-5} - 1.003 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 373.955 - 453.010. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 8824.279 - 35488.797. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.012662 - 0.044762.

Tabel 4.72. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45°C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

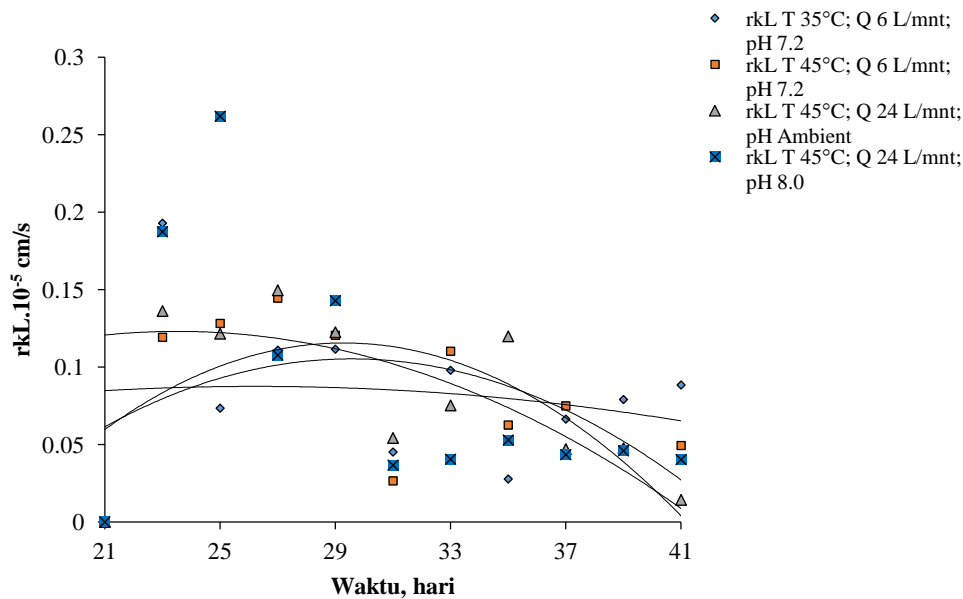
Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	7.893.10 ⁻⁰⁵	373.955	13583.250	0.016089
23	1.575.10 ⁻⁰⁶	5.441.10 ⁻⁰⁵	381.434	19318.318	0.023340
25	1.406.10 ⁻⁰⁶	2.941.10 ⁻⁰⁵	384.123	35488.797	0.043180
27	1.730.10 ⁻⁰⁶	4.736.10 ⁻⁰⁵	392.664	21561.762	0.026818
29	1.418.10 ⁻⁰⁶	2.837.10 ⁻⁰⁵	401.509	35196.162	0.044762
31	6.274.10 ⁻⁰⁷	3.415.10 ⁻⁰⁵	410.144	28623.108	0.037185
33	8.705.10 ⁻⁰⁷	3.092.10 ⁻⁰⁵	420.081	30868.056	0.041073
35	1.386.10 ⁻⁰⁶	4.282.10 ⁻⁰⁵	441.471	21211.154	0.029661
37	5.445.10 ⁻⁰⁷	5.920.10 ⁻⁰⁵	451.398	15002.703	0.021451
39	5.504.10 ⁻⁰⁷	8.096.10 ⁻⁰⁵	452.147	10953.006	0.015687
41	1.651.10 ⁻⁰⁷	1.003.10 ⁻⁰⁴	453.010	8824.279	0.012662

Data hasil perhitungan pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik yang dilakukan pada temperatur 45°C, pH 8.0 dengan laju alir resirkulasi lindi 24 L/mnt, seperti terlihat pada Tabel 4.73. Laju perpindahan massa rata-rata per hari terendah 4.244.10⁻⁰⁷ mg/L.s dan tertinggi pada hari ke-25 adalah 3.030.10⁻⁰⁶ mg/L.s. Laju difusi zat terlarut awalnya turun kemudian naik, dengan kisaran antara 2.158.10⁻⁵ – 1.030.10⁻⁴ cm²/s. Bilangan *Reynolds* meningkat dari 374.320 - 465.160. Bilangan *Schmidt* naik turun dengan kisaran antara 8365.136 - 47243.830. Dan bilangan *Sherwood* naik turun dengan kisaran antara 0.011093 - 0.052960.

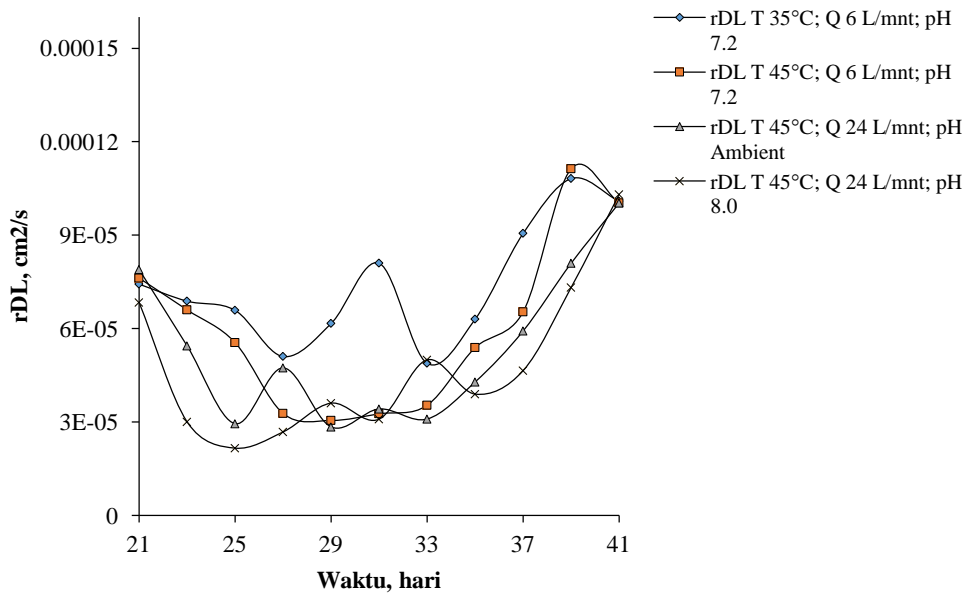
Tabel 4.73. r_{KL} , r_{DL} , N_{Re} N_{Sc} N_{Sh} pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0

Waktu; t hari	r_{KL} , mg/L.s	r_{DL} , cm ² /s	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
21	0.00	6.835.10 ⁻⁰⁵	374.320	15670.870	0.016722
23	2.167.10 ⁻⁰⁶	3.001.10 ⁻⁰⁵	385.286	34672.586	0.038083
25	3.030.10 ⁻⁰⁶	2.158.10 ⁻⁰⁵	393.228	47243.830	0.052960
27	1.246.10 ⁻⁰⁶	2.679.10 ⁻⁰⁵	402.353	37199.082	0.042668
29	1.653.10 ⁻⁰⁶	3.603.10 ⁻⁰⁵	411.468	27047.624	0.031727
31	4.244.10 ⁻⁰⁷	3.089.10 ⁻⁰⁵	419.157	30963.424	0.036999
33	4.687.10 ⁻⁰⁷	4.994.10 ⁻⁰⁵	429.058	18712.782	0.022888
35	6.121.10 ⁻⁰⁷	3.892.10 ⁻⁰⁵	433.447	23764.931	0.029365
37	5.028.10 ⁻⁰⁷	4.647.10 ⁻⁰⁵	441.982	19519.889	0.024595
39	5.315.10 ⁻⁰⁷	7.317.10 ⁻⁰⁵	452.685	12104.616	0.015621
41	4.659.10 ⁻⁰⁷	1.030.10 ⁻⁰⁴	465.160	8365.136	0.011093

Keadaan laju perpindahan massa, r_{KL} dan laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh temperatur 35°C; laju alir resirkulasi 6 L/mt dan pH 7.2; temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 6 L/mt dan pH 7.2; temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 24 L/mt dan pH *Ambient* dan temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 24 L/mt dan pH 8.0, seperti terlihat pada Gambar 4.67 dan Gambar 5.68.

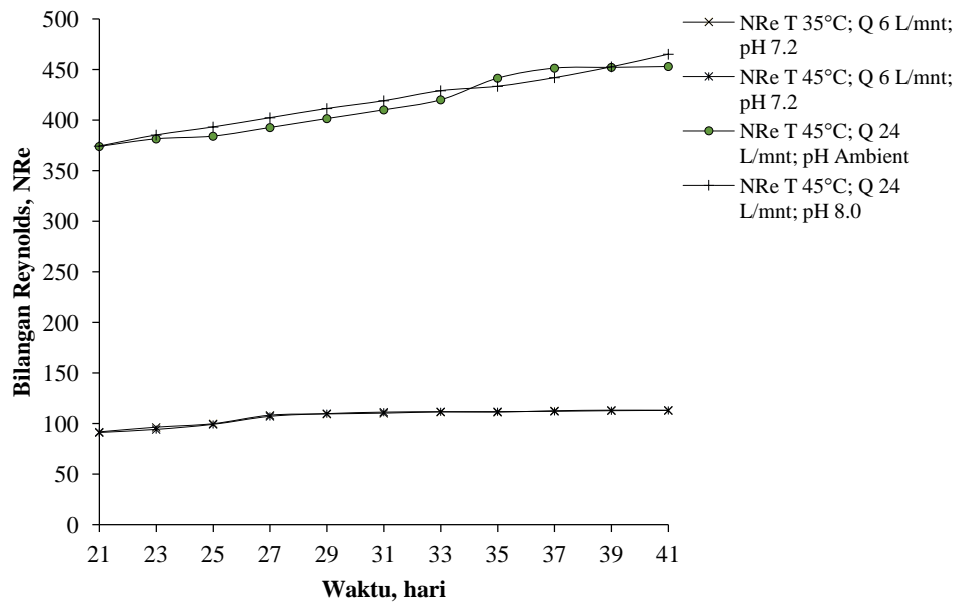


Gambar 4.67. Laju perpindahan massa, r_{kL} pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

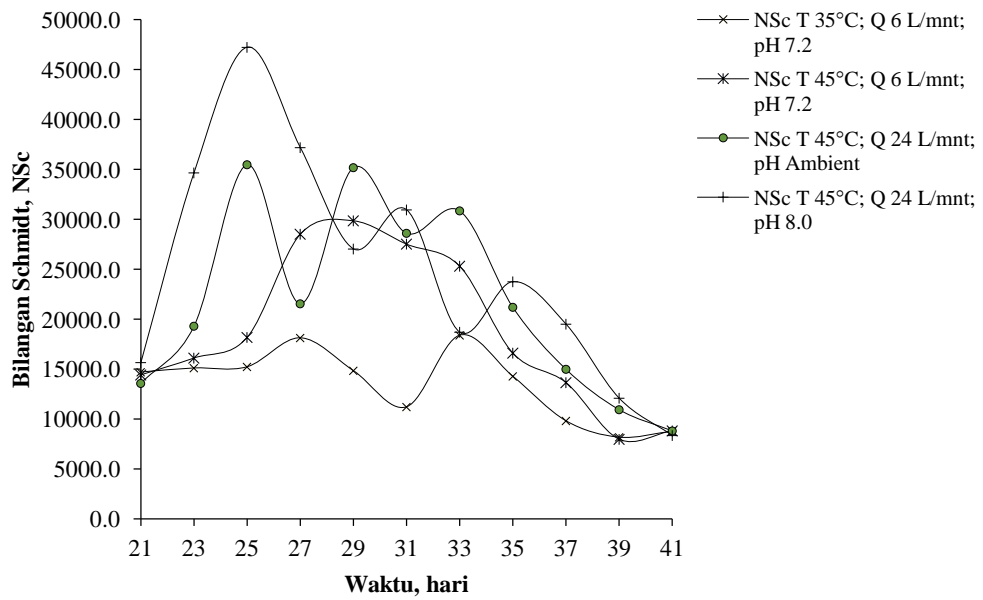


Gambar 4.68. Laju difusi zat terlarut, r_{DL} pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

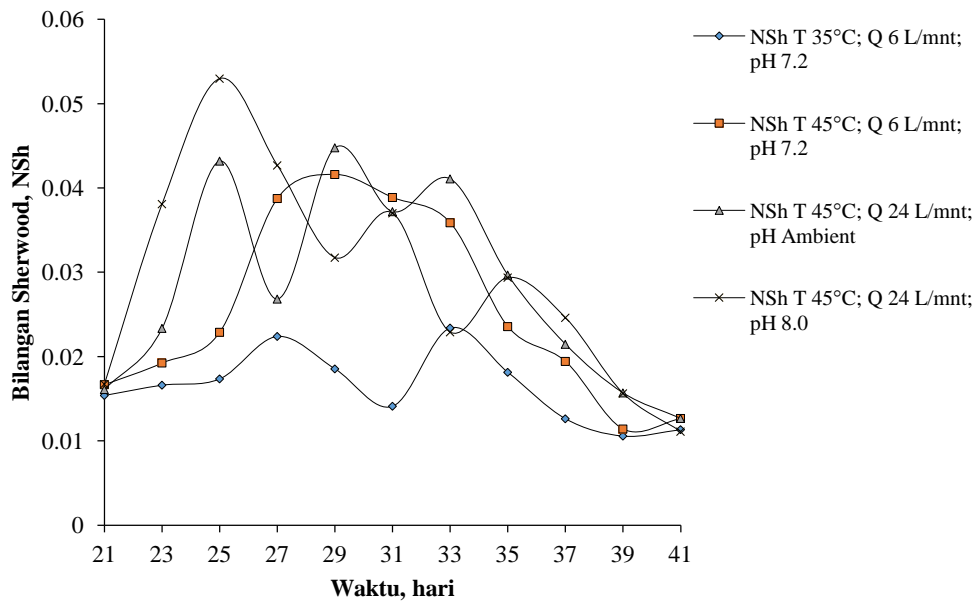
Kondisi bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} pada pengaruh temperatur 35°C; laju alir resirkulasi 6 L/mt dan pH 7.2; temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 6 L/mt dan pH 7.2; temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 24 L/mt dan pH *Ambient* dan temperatur 45°C; laju alir resirkulasi 24 L/mt dan pH 8.0, seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.69; Gambar 4.70; dan Gambar 4.71.



Gambar 4.69. Bilangan *Reynolds* pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



Gambar 4.70. Bilangan *Schmidt* pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



Gambar 4.71. Bilangan *Sherwood* pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Uji Anova Pengaruh Kombinasi pH-Q-T

Bilangan *Reynolds*, N_{Re}

Tabel 4.74. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap bilangan *Reynolds*

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	1056484	352161	749.77	0.000
Error	40	18788	470		
Total	43	1075271			

$S = 21.67$ $R-Sq = 98.25\%$ $R-Sq(adj) = 98.12\%$

Diperoleh nilai p-value sebesar 0.000 lebih kecil dari 0.05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi pH-Q-T berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Reynolds*, N_{Re} .

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Tabel 4.75. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap bilangan *Schmidt*

Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi pH Q T	3	791579671	263859890	3.5	0.024
Error	40	3014357545	75358939		
Total	43	3805937216			

$S = 8681$ $R-Sq = 20.80\%$ $R-Sq(adj) = 14.86\%$

Diperoleh nilai p-value sebesar 0.024 lebih kecil dari 0.05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi pH-Q-T berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Schmidt*, N_{Sc} .

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh}

Tabel 4.76. Uji Anova pengaruh kombinasi pH-Q-T terhadap bilangan *Sherwood*

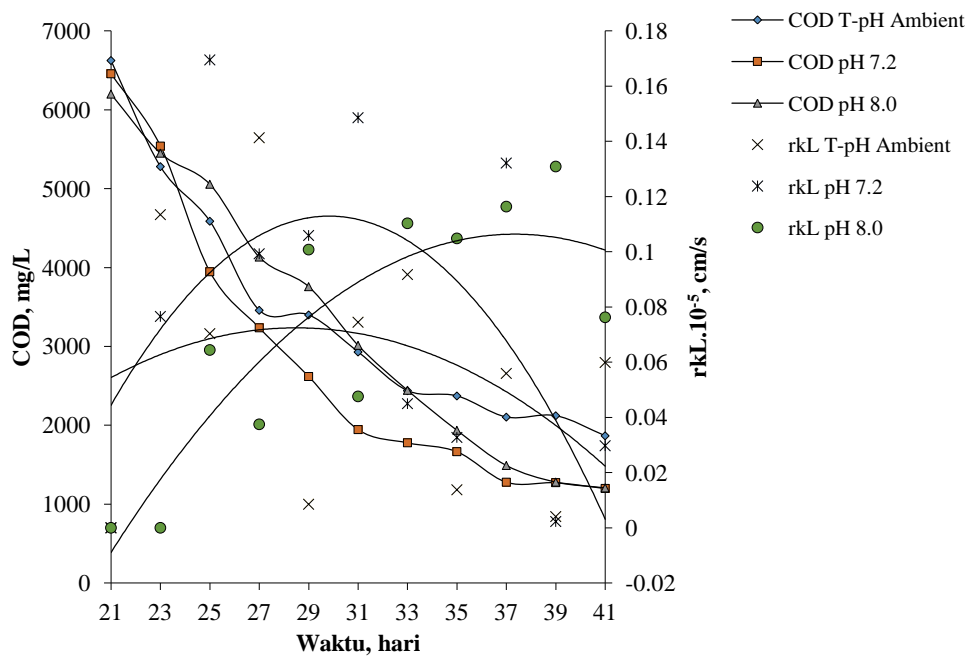
Source	DF	SS	MS	F	P-value
Kombinasi pH Q T	3	7805811	2601937	3.45	0.025
Error	40	30177596	754440		
Total	43	37983407			

S = 868.6 R-Sq = 20.55% R-Sq(adj) = 14.59%

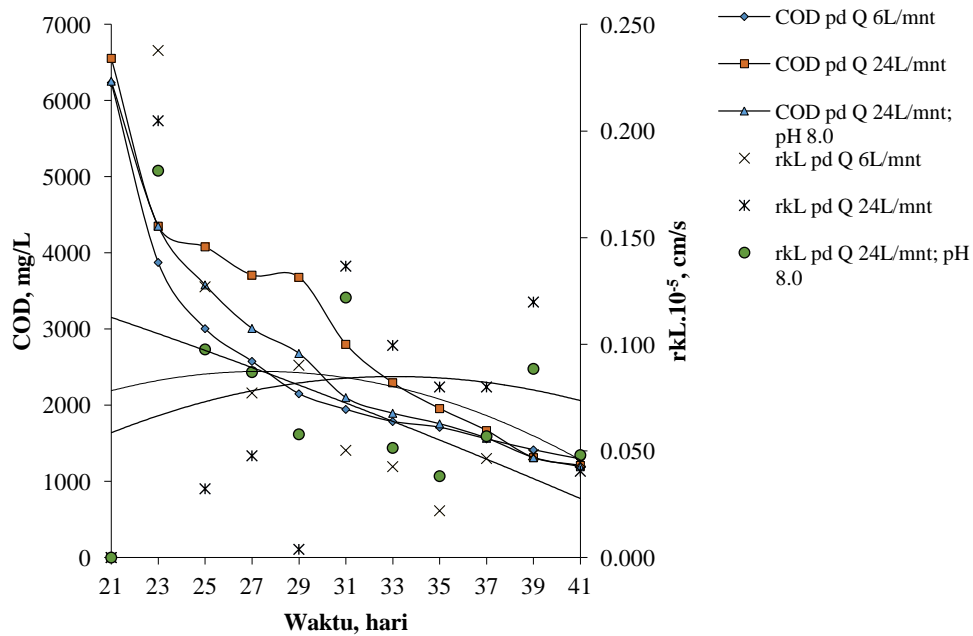
Diperoleh nilai p-value sebesar 0.025 lebih kecil dari 0.05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kombinasi pH-Q-T berpengaruh signifikan terhadap bilangan *Sherwood*, N_{Sh} .

Hubungan Laju Perpindahan Massa, r_{kL} dan COD

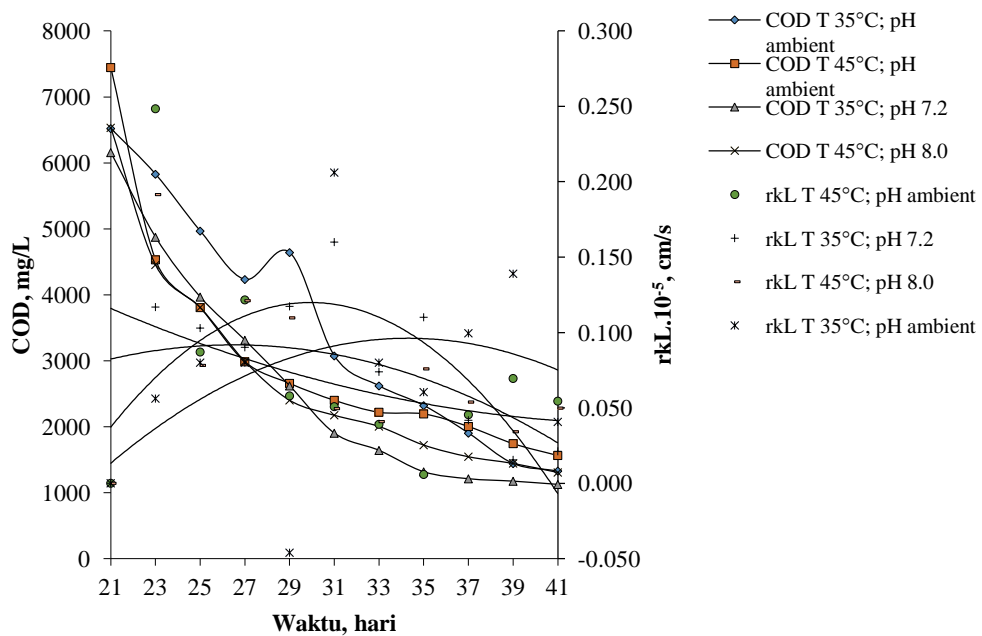
Perpindahan massa merupakan jumlah substrat zat terlarut yang terbiodegradasi setiap hari. Penurunan COD diiringi dengan kenaikan laju perpindahan massa, r_{kL} rata-rata per hari. Kenaikan laju perpindahan massa, r_{kL} karena pada saat itu aktifitas mikroorganisme dan jumlah substrat terlarut masih tinggi. Kontak yang intensif antara substrat dan mikroorganisme, terjadi pada daerah-daerah puncak perpindahan massa rata-rata perhari tertinggi, yaitu antara hari ke-29 – 30. Namun pada hari ke-31 perpindahan massa rata-rata per hari mulai turun. Seiring berkurangnya substrat terlarut maka menurun pula r_{kL} rata-rata per hari. Hal ini terjadi pada semua pengaruh pH, Q dan T; maupun kombinasi pH-Q-T. Sebagaimana terlihat berturut-turut pada Gambar 4.72; Gambar 4.73; Gambar 4.74 dan Gambar 4.75.



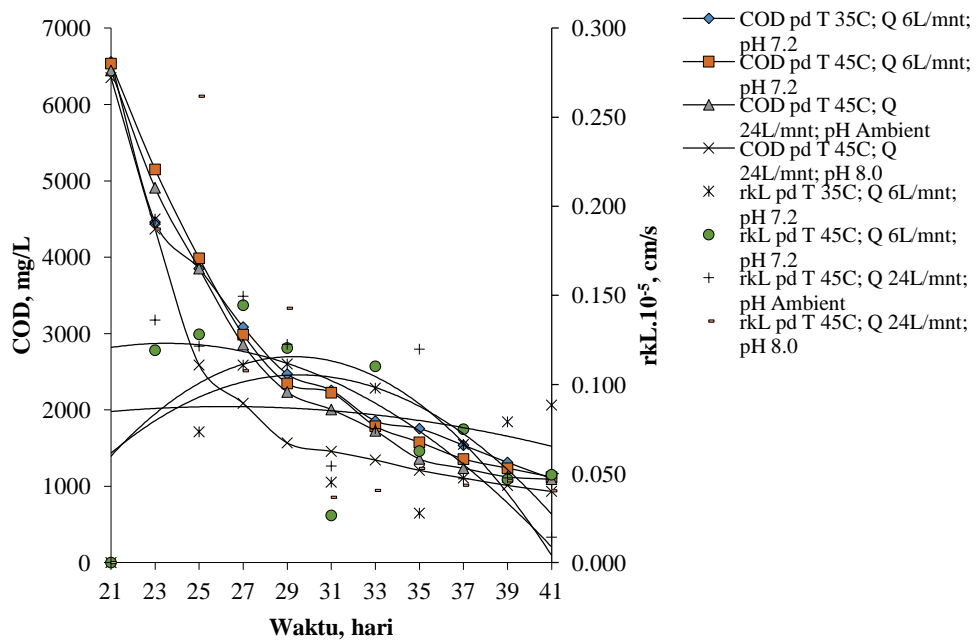
Gambar 4.72. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh pH



Gambar 4.73. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.74. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh temperatur T



Gambar 4.75. Laju perpindahan massa vs COD pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Dari penelitian ini diperoleh juga bahwa jika COD turun maka densitas, ρ dan viskositas, μ juga turun. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa semakin kecil tahanan (ditandai dengan penurunan ρ dan μ yang semakin besar) maka perpindahan massa semakin besar (Prasetyo dan Yosephine, 2012). Hanya saja yang perlu diperhatikan pada semua kondisi operasi pengolahan lindi dalam

bioreaktor anaerobik adalah sebelum dan sesudah puncak r_{kL} rata-rata per hari. Dimana sebelum laju perpindahan massa, r_{kL} rata-rata per hari tertinggi, konsentrasi substrat organik terlarut juga masih tinggi. Sedangkan pada setelah r_{kL} rata-rata per hari tertinggi, konsentrasi substrat organik terlarut telah menurun.

Pada keseluruhan pengaruh pH, laju alir resirkulasi Q dan temperatur T; serta kombinasi pH-Q-T, juga diperlihatkan bahwa kondisi sebelum puncak dan laju perpindahan massa, r_{kL} tertinggi, yaitu hari ke-21 – 27 dan hari ke-29 – 30, pada dasarnya dapat dikatakan sebagai tahap eksponensial dan *stationary* pertumbuhan mikroorganisme. Aktifitas mikroorganisme tertinggi berada pada kedua kondisi itu. Oleh karena itu r_{kL} rata-rata per hari secara tidak langsung menunjukkan laju biodegradasi massa substrat terlarut yang terjadi dalam lindi. Kondisi ini sebenarnya harus dipertahankan karena merupakan kondisi optimum rata-rata pada semua kondisi operasi pengolahan lindi yang dilakukan. Karena gaya dorong perpindahan massa fase cair, yaitu gradien konsentrasi tertinggi berada pada kedua tahap ini.

Dimana setelah kondisi ini, yaitu diatas hari ke-31, penurunan COD rata-rata pada semua operasi pengolahan > 64.5%. Jadi dapat dikatakan bahwa perpindahan massa yang terjadi diatas hari ke-31 adalah “miskin” perpindahan massa. Karena konsentrasi substrat telah banyak berkurang sehingga gaya dorong perpindahan massa kecil.

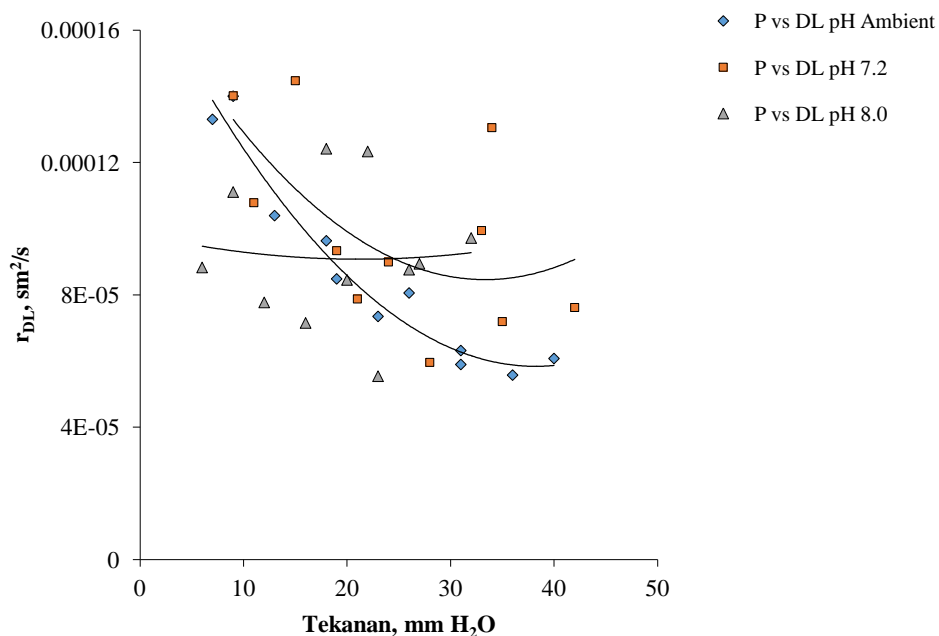
Hubungan Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan

Pada tahap-tahap awal pengolahan anaerobik, laju difusi zat terlarut rata-rata; r_{DL} terlihat menurun. Seiring bertambahnya waktu r_{DL} terus meningkat. Ini terjadi pada semua perlakuan pengaruh kombinasi pH-Q-T; temperatur T; laju alir resirkulasi Q; dan pengaruh pH. Seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.76; Gambar 4.77; Gambar 4.78; dan Gambar 4.79. Sama halnya dengan r_{kL} , yang perlu diperhatikan pada semua kondisi operasi pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik adalah sebelum dan sesudah penurunan r_{DL} rata-rata per hari. Dimana sebelum r_{DL} rata-rata per hari terendah, konsentrasi substrat organik terlarut juga masih tinggi. Sedangkan pada setelah r_{DL} rata-rata per hari terendah, konsentrasi substrat organik terlarut telah menurun. r_{DL} terendah berada pada hari ke-27 – 29,

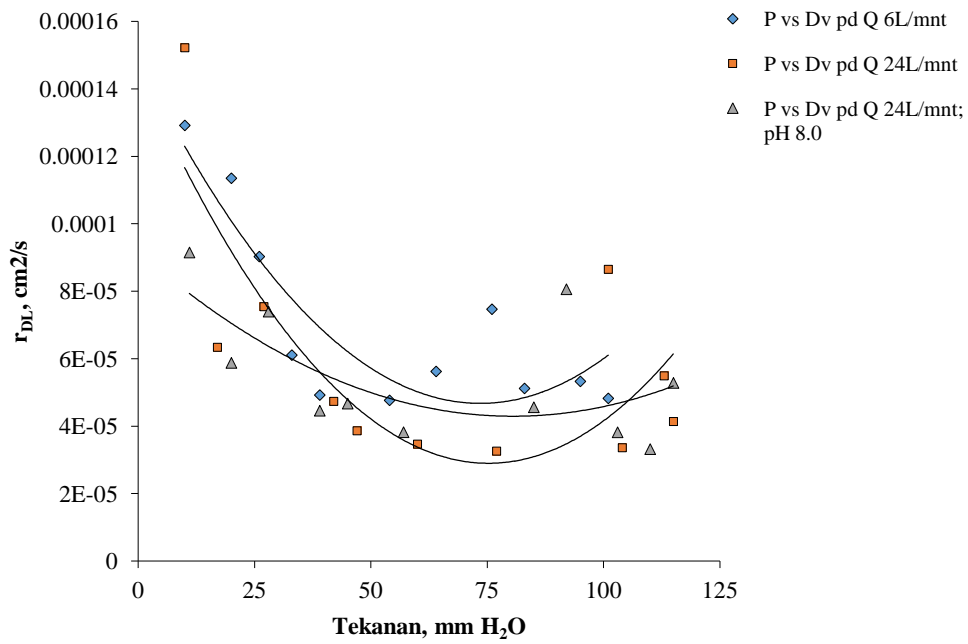
dimana penurunan konsentrasi substrat COD rata-rata pada semua operasi pengolahan > 56.8%.

Laju difusi zat terlarut, r_{DL} menurun dengan semakin meningkatnya tekanan. Tetapi pada “batas” tekanan biogas tertentu r_{DL} meningkat, sehingga dapat dikatakan bahwa ada batas optimal tekanan. Untuk hal ini, semua variabel pH, Q, T dan kombinasi pH-Q-T; memberikan kondisi yang sama.

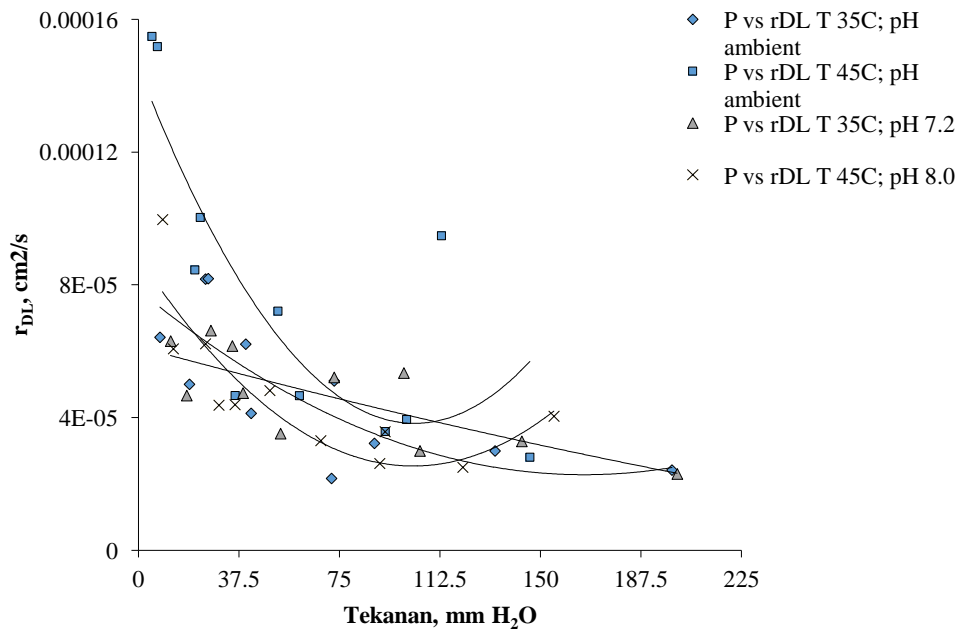
Dilihat dari pengaruh tekanan terhadap laju difusi zat terlarut, r_{DL} diperoleh bahwa tekanan biogas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T > pengaruh temperatur T > pengaruh laju alir resirkulasi Q > pengaruh pH. Tekanan tertinggi berada pada hari ke-23 - 27. Hal ini juga menunjukkan bahwa kenaikan tekanan secara keseluruhan berpengaruh terhadap r_{DL} . Makin banyak variabel-variabel peubahnya makin tinggi tekanannya. Masing-masing variabel (pH, Q, dan T) memberikan pengaruh yang berbeda terhadap tekanan biogas. Sehingga dapat dikatakan bahwa pengaruh kombinasi pH-Q-T lebih optimum dari pada pengaruh pH, Q dan T.



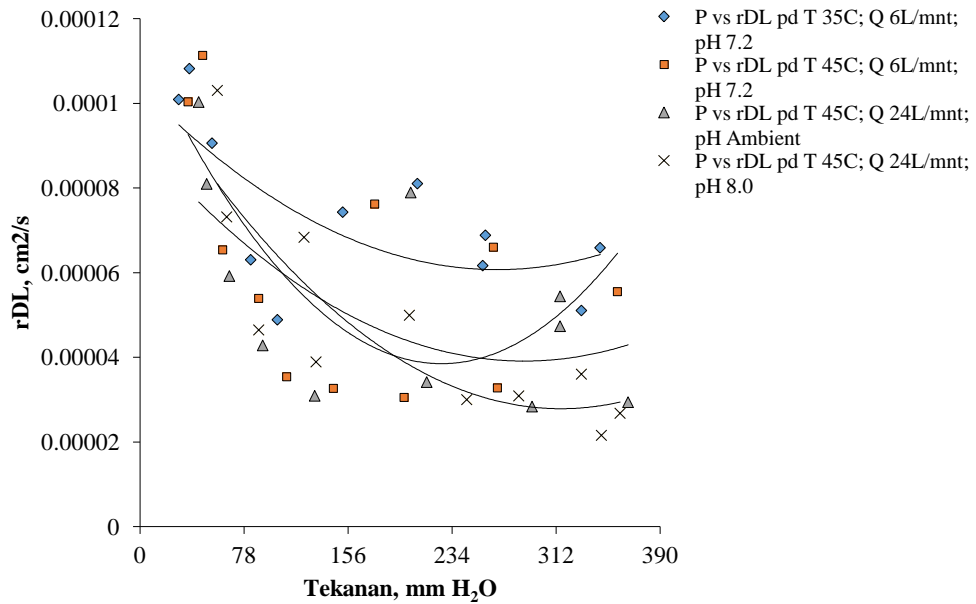
Gambar 4.76. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh pH



Gambar 4.77. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



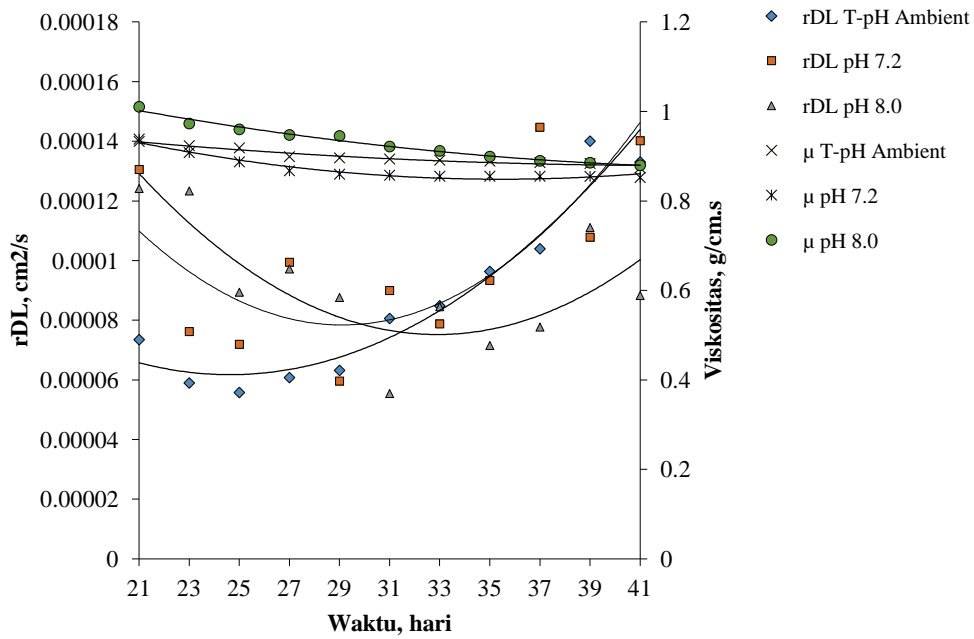
Gambar 4.78. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh temperatur T



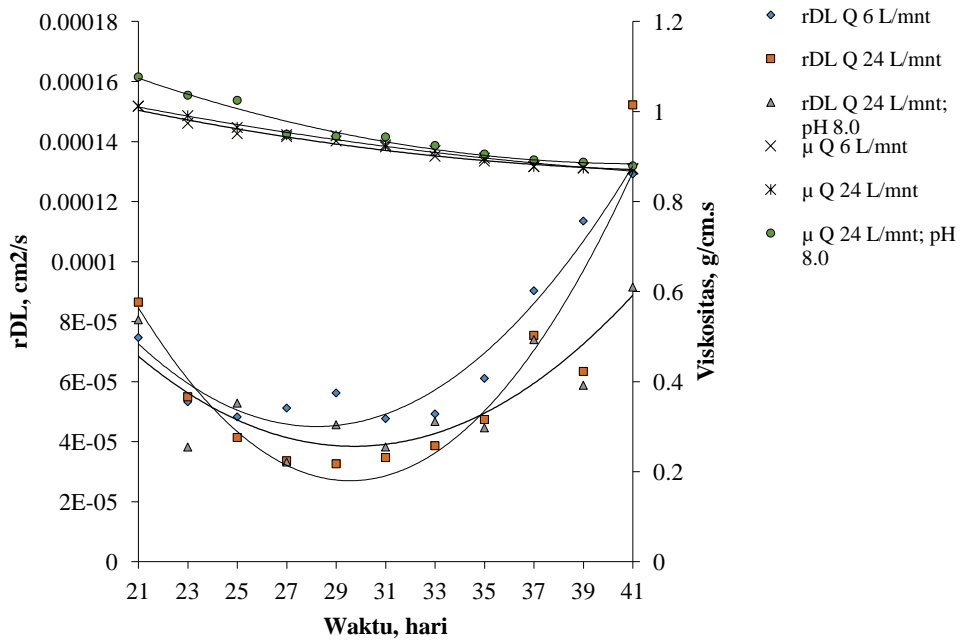
Gambar 4.79. Laju Difusi Zat Terlarut dan Tekanan pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Hubungan Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas

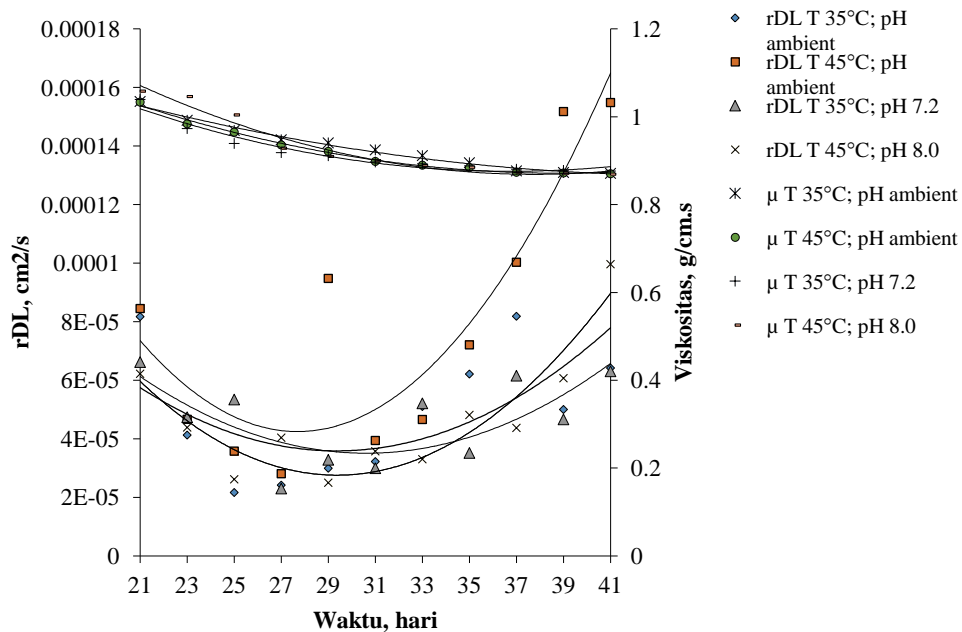
Laju difusi massa zat terlarut dalam lindi juga bergantung pada viskositas sebagai akibat perubahan konsentrasi bahan terlarut dalam lindi. Pada semua perlakuan, baik pengaruh pH, Q, T maupun pengaruh kombinasi pH-Q-T, setelah r_{DL} menurun pada titik terendah hari ke-27 – 29, r_{DL} kemudian meningkat lagi. Sementara viskositas lindi tetap menurun. Sebagaimana terlihat berturut-turut pada Gambar 4.80; Gambar 4.81; Gambar 4.82; dan Gambar 4.83.



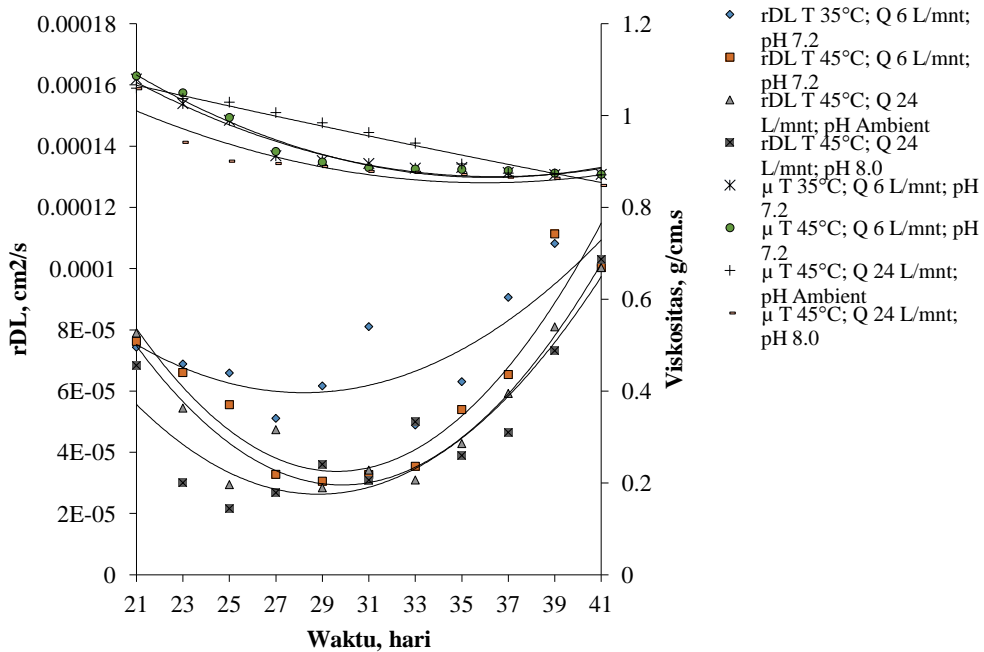
Gambar 4.80. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh pH



Gambar 4.81. Laju difusi zat terlarut dan viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.82. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh temperatur T

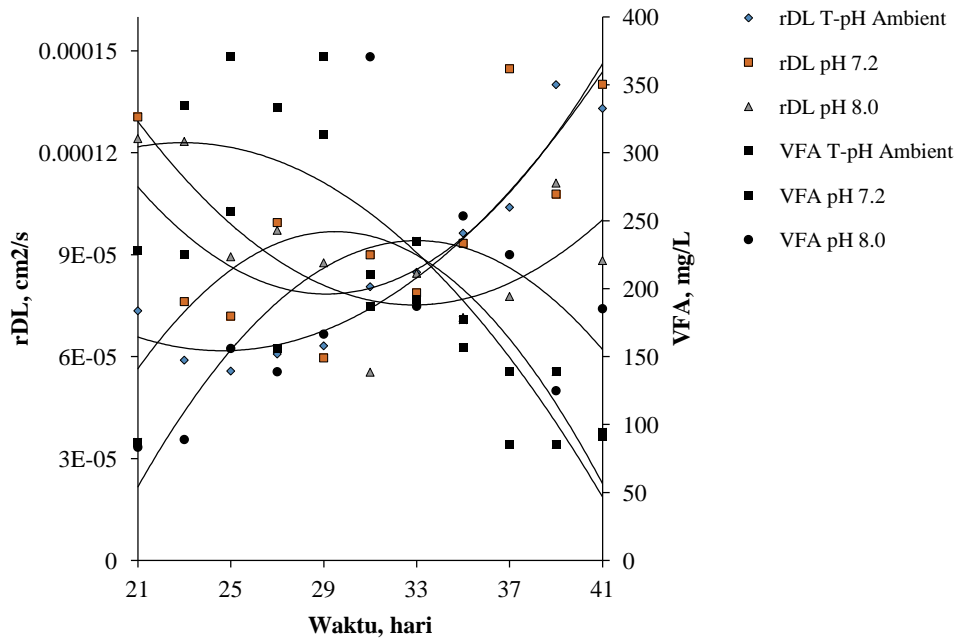


Gambar 4.83. Laju Difusi Zat Terlarut dan Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

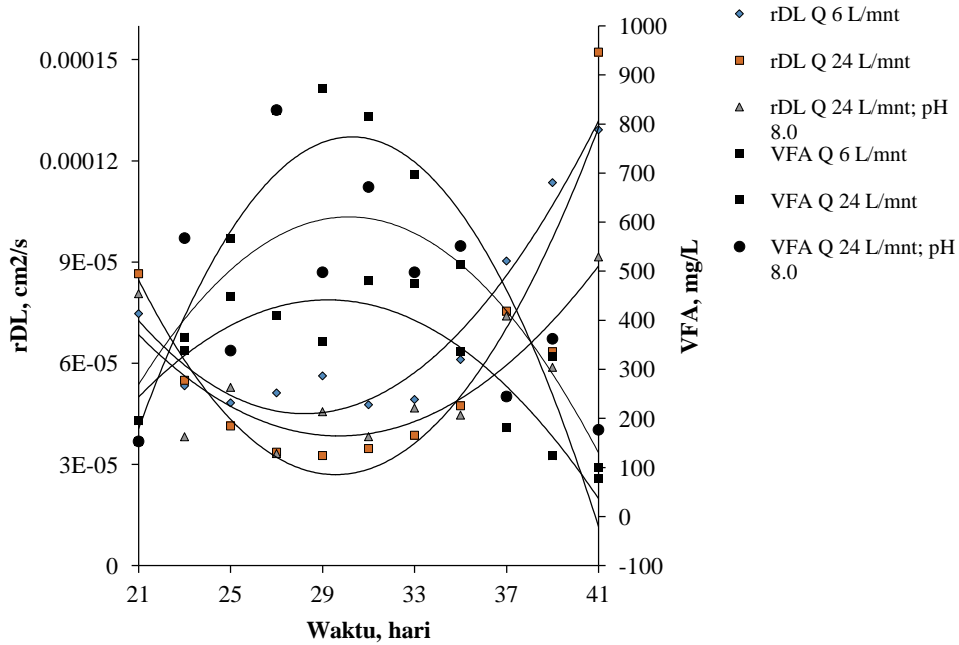
Hubungan Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA

Laju difusi massa zat terlarut dalam lindi juga dipengaruhi konsentrasi VFA. Pada semua perlakuan, baik pengaruh pH, Q, T maupun pengaruh kombinasi pH-Q-T, setelah r_{DL} menurun pada titik terendah hari ke-27 – 29, r_{DL} kemudian meningkat lagi. Sementara VFA naik kemudian menurun. Sebagaimana

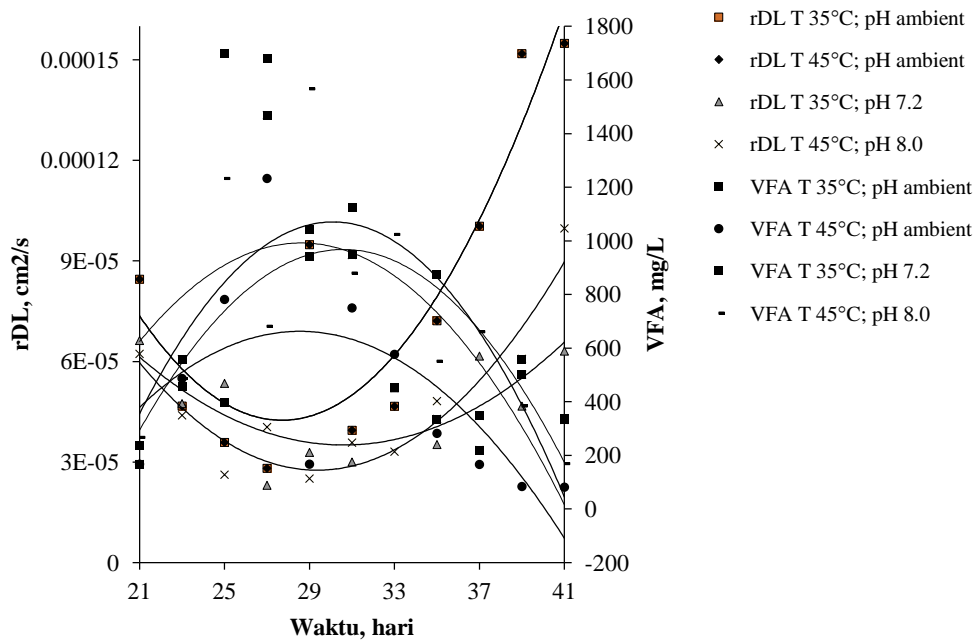
terlihat berturut-turut pada Gambar 4.84; Gambar 4.85; Gambar 4.86; dan Gambar 4.87.



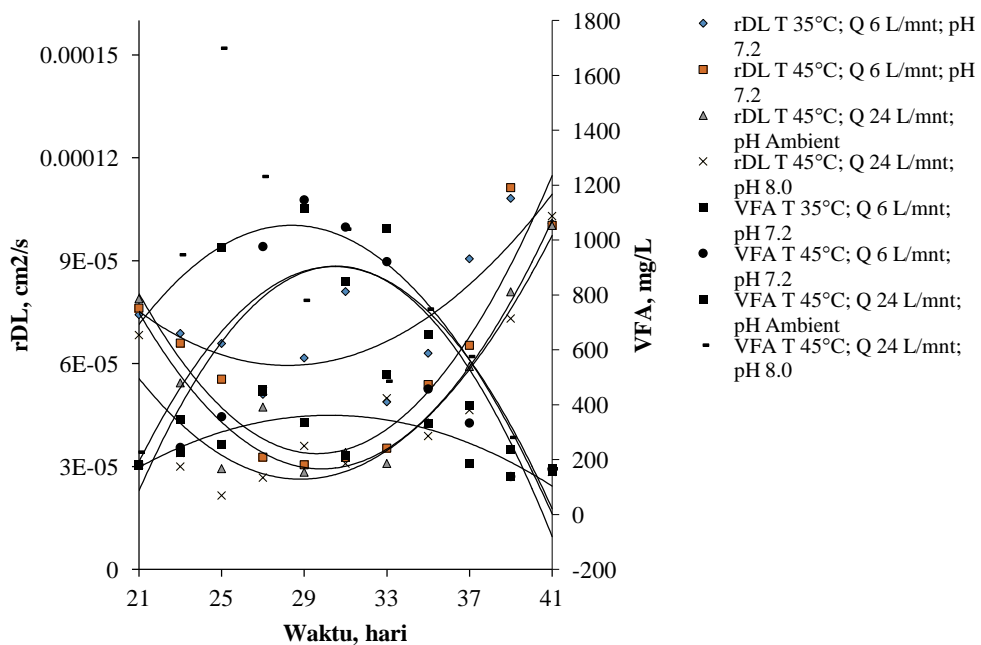
Gambar 4.84. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pngaruh pH



Gambar 4.85. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pngaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.86. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pngaruh temperatur T



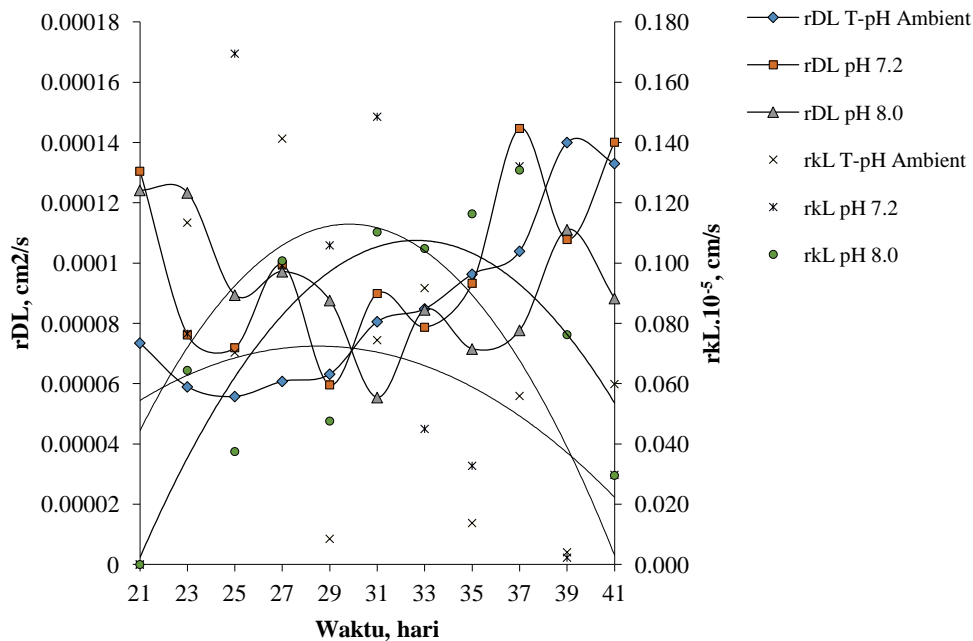
Gambar 4.87. Laju Difusi Zat Terlarut dan VFA pada pngaruh kombinasi pH-Q-T

Hubungan Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa

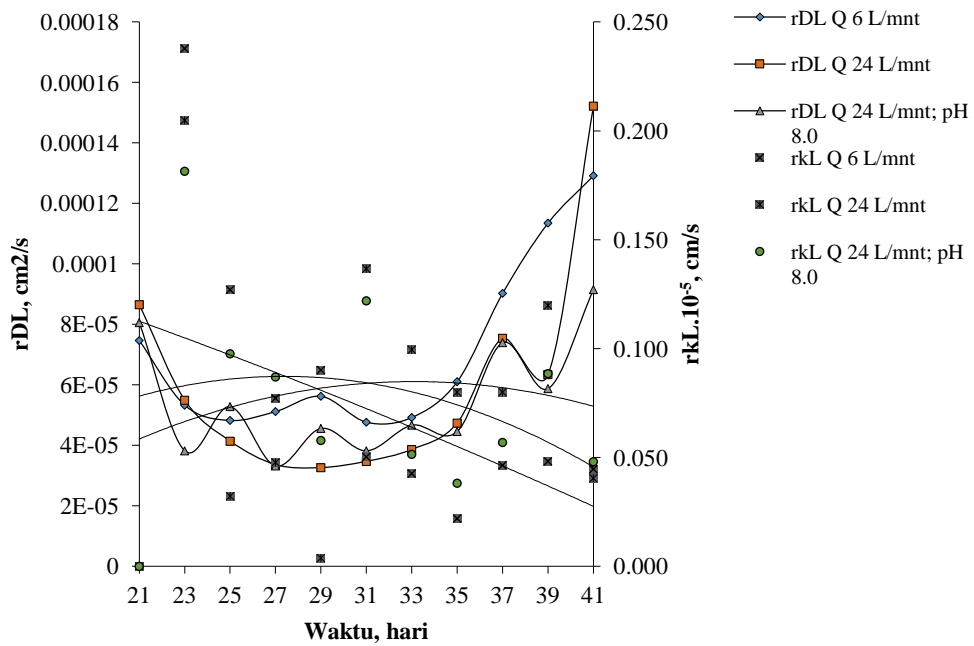
Sebagaimana terlihat berturut-turut pada Gambar 4.88; Gambar 4.89; Gambar 4.90; dan Gambar 4.91. Bahwa laju perpindahan massa fase cair

dipengaruhi oleh konsentrasi substrat (Cubas *et al.*, 2007), laju konversi zat organik terlarut keseluruhan (Zaiat *et al.*, 2000; Cho and Young, 2001; Ramos *et al.*, 2003; Chou and Huang, 2005).

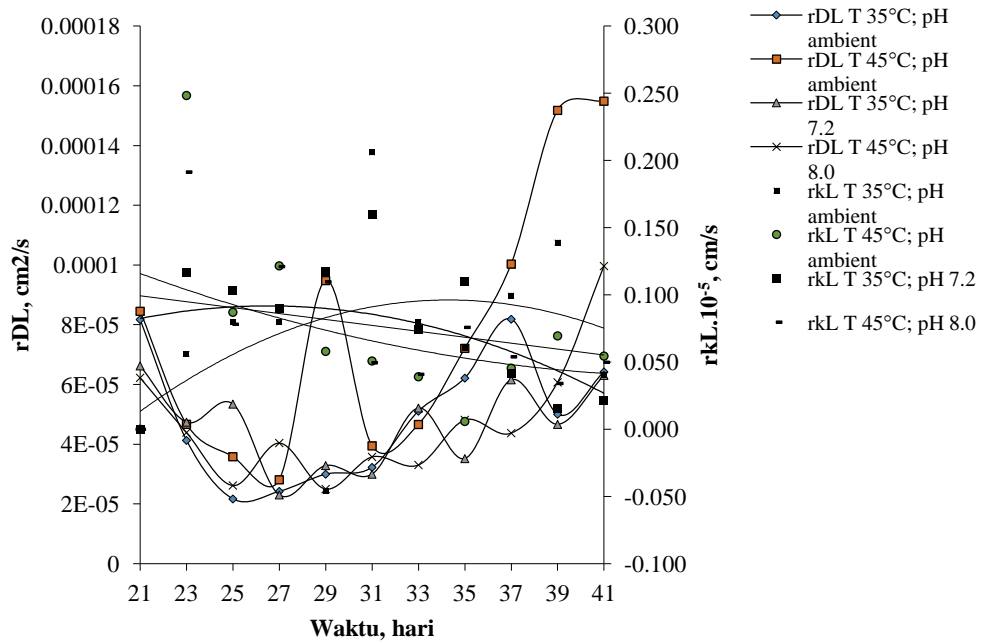
Dari penelitian ini diperoleh, pada semua kondisi operasi pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, bahwa terlihat jelas adanya ketergantungan pada massa substrat (COD) terlarut dalam lindi. Hubungan timbal balik antar semua parameter, yaitu; tekanan biogas, BOD, VFA, r_{kL} serta r_{DL} bergantung pada massa substrat (COD) terlarut dalam lindi. Jadi, konsentrasi substrat (COD) akan mempengaruhi tekanan biogas, BOD, VFA, perpindahan massa fase cair; r_{kL} dan difusivitas zat terlarut; r_{DL} . Ketergantungan ini mutlak adanya. Selain karena merupakan gaya dorong pada perpindahan massa, juga karena konsentrasi masing-masing parameter ini bergantung pada konsentrasi parameter yang lain. Sehingga, jika parameter yang satu meningkat atau menurun akan menyebabkan peningkatan atau penurunan pada parameter yang lain.



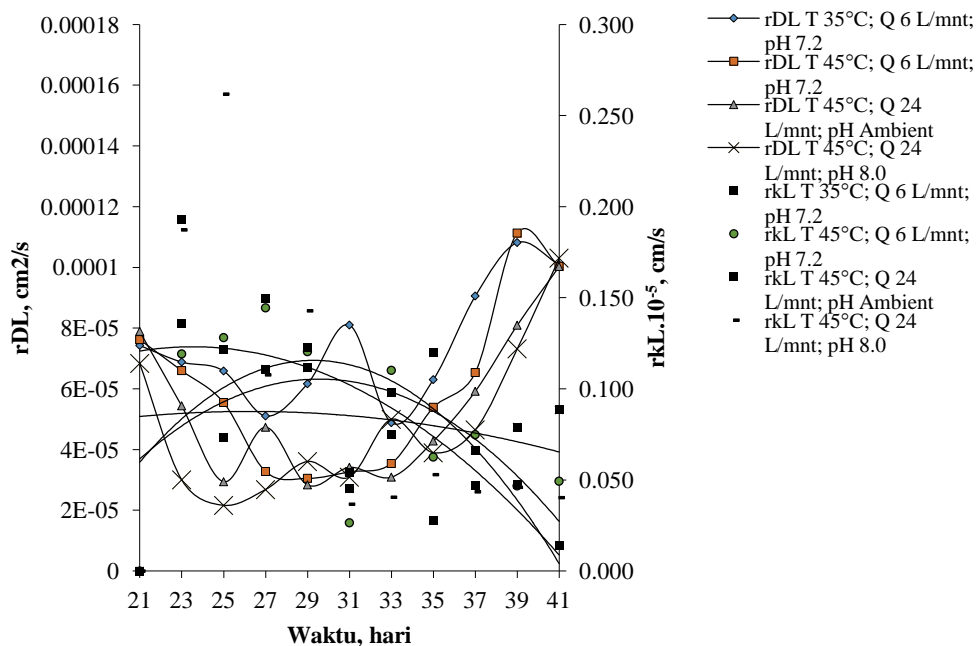
Gambar 4.88. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh pH



Gambar 4.89. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.90. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh temperatur T



Gambar 4.91. Laju Difusi Zat Terlarut dan Laju Perpindahan Massa pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Laju alir resirkulasi dalam bioreaktor memberikan gambaran perilaku karakteristik dan hidrodinamika cairan, yang akan mempengaruhi proses perpindahan massa (Widayat *et al.*, 2011). Efek aliran resirkulasi lindi pada proses pengolahan adalah mempercepat pencampuran, tumbukan antara substrat-mikroorganisme dan homogenitas lindi dalam bioreaktor. Proses pencampuran dalam fasa cair dilandasi oleh mekanisme perpindahan massa karena gradien konsentrasi di dalam aliran resirkulasi. Pada aliran resirkulasi, terjadi pencampuran sebagai akibat aliran lindi secara keseluruhan (*bulk flow*), yang disebut mekanisme konvektif dan pencampuran karena gerak molekular yang merupakan mekanisme pencampuran difusi. Pencampuran ini terjadi secara bersama-sama (*simultan*). Dimana sifat fisik fluida dan karakteristik aliran berpengaruh pada proses pencampuran, seperti densitas, viskositas dan laju alir resirkulasi serta dimensi geometri (Treybal, 1984; McCabe *et al.*, 1990; Thibodeaux, 1996). Resirkulasi lindi mendistribusikan secara acak dua fase atau lebih sistem yang semula tidak tercampur merata menjadi homogen dan serba rata. Oleh sebab itu, resirkulasi lindi dapat mengurangi ketidakseragaman sistem

lindi dalam bioreaktor, seperti konsentrasi substrat, densitas, viskositas, temperatur dan lain-lain.

Untuk fluida yang mengandung zat organik volatil terlarut, maka karakteristik dan sifat aliran berada pada batasan aliran laminar (Crites *et al.*, 2006; US EPA, 2006). Pada keseluruhan perlakuan laju alir resirkulasi, aliran turbulen tidak terbentuk, oleh karena itu tidak terbentuk riak-riak aliran lindi, yang dikenal sebagai *eddies*, sehingga tidak terjadi difusi eddy (*eddy diffusion*).

4.5.2. Koefisien Perpindahan Massa Fase Cair dan Koefisien Difusi Zat Terlarut

Adapun koefisien perpindahan massa fase cair; k_L , dan koefisien difusi zat terlarut dan pelarut; D_L pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, disajikan pada Tabel 4.77. dan Gambar 4.92.

Pada perlakuan variasi pH diperoleh k_L pada pH *ambient*; pH 7.2 dan pH 8.0 berturut-turut adalah 6.10^{-07} cm/s, 1.10^{-7} cm/s dan 1.10^{-6} cm/s. Pada perlakuan variasi Q diperoleh k_L pada laju alir resirkulasi 6 L/mnt, laju alir resirkulasi 24 L/mnt dan laju alir resirkulasi 24 L/mnt, pH 8.0 berturut-turut adalah 6.10^{-7} cm/s, 9.10^{-7} cm/s dan 8.10^{-7} cm/s. Pada perlakuan variasi temperatur T diperoleh k_L pada temperatur 35°C; temperatur 45°C; temperatur 35°C; pH 7.2; dan temperatur 45°C; pH 8.0 berturut-turut adalah 1.10^{-6} cm/s, 6.10^{-7} cm/s, 1.10^{-6} cm/s dan 8.10^{-7} cm/s. Pada perlakuan kombinasi pH-Q-T diperoleh k_L pada T 35°C, Q 6L/mnt, pH 7.2; T 45°C, Q 6L/mnt, pH 7.2; T 45°C; Q 24L/mnt, pH *ambient* dan T 45°C, Q 24L/mnt, pH 8.0 berturut-turut adalah 9.10^{-7} cm/s, 1.10^{-6} cm/s, 1.10^{-6} cm/s dan 9.10^{-7} cm/s.

Sedangkan koefisien difusi zat terlarut, perlakuan variasi pH diperoleh D_L pada Ambient; pH 7.2 dan pH 8.0 berturut-turut adalah 5.10^{-11} cm²/s, 2.10^{-11} cm²/s dan 2.10^{-11} cm²/s. Pada perlakuan variasi laju alir resirkulasi lindi, Q diperoleh D_L pada Q 6 L/mnt, Q 24 L/mnt dan Q 24 L/mnt, pH 8.0 berturut-turut adalah 3.10^{-11} cm²/s, 3.10^{-11} cm²/s dan 1.10^{-11} cm²/s. Pada perlakuan variasi temperatur T diperoleh D_L pada T 35°C, T 45°C, T 35°C, pH 7.2 dan T 45°C; pH 8.0 berturut-turut adalah 1.10^{-11} cm²/s, 5.10^{-11} cm²/s, 3.10^{-12} cm²/s dan 2.10^{-11} cm²/s. Pada perlakuan kombinasi pH-Q-T diperoleh D_L pada T 35°C, Q 6L/mnt, pH 7.2; T 45°C, Q 6L/mnt, pH 7.2;

T 45°C; Q 24L/mnt, pH Ambient dan T 45°C, Q 24L/mnt, pH 8.0 adalah 2.10^{-11} cm^2/s .

Tabel 4.77. Koefisien perpindahan massa fase cair, k_L , dan Koefisien Difusi zat terlarut; D_L

	Perlakuan	k_L, cm/s	D_L, cm^2/s
pH	<i>Ambient</i>	6.10^{-07}	5.10^{-11}
	7.2	1.10^{-7}	2.10^{-11}
	8.0	1.10^{-6}	2.10^{-11}
Q	6 L/mnt	6.10^{-7}	3.10^{-11}
	24 L/mnt	9.10^{-7}	3.10^{-11}
	24 L/mnt, pH 8.0	8.10^{-7}	1.10^{-11}
T	35°C	1.10^{-6}	1.10^{-11}
	45°C	6.10^{-7}	5.10^{-11}
	35°C, pH 7.2	1.10^{-6}	3.10^{-12}
	45°C, pH 8.0	8.10^{-7}	2.10^{-11}
pH, Q, T	35°C, 6L/mnt, 7.2	9.10^{-7}	2.10^{-11}
	45°C, 6L/mnt, 7.2	1.10^{-6}	2.10^{-11}
	45°C, 24L/mnt, <i>Ambient</i>	1.10^{-6}	2.10^{-11}
	45°C, 24L/mnt, 8.0	9.10^{-7}	2.10^{-11}

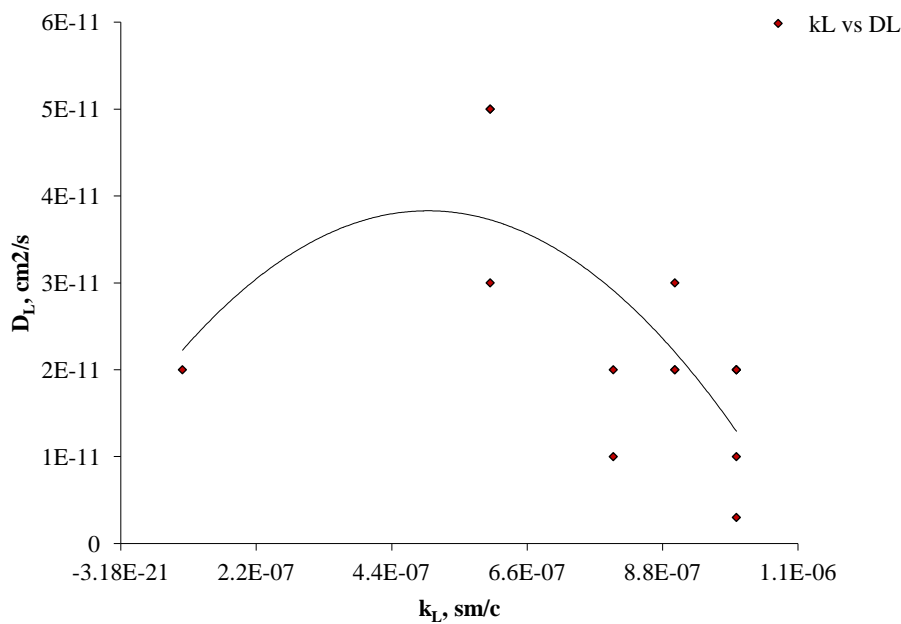
Pada perlakuan variasi pH, terlihat makin tinggi pH, maka makin meningkat koefisien perpindahan panas k_L dan koefisien difusi zat terlarut D_L makin meningkat. k_L pH 8.0 > k_L pH *ambient* > k_L pH 7.2, berturut-turut adalah 1.10^{-6} cm/s, 6.10^{-07} cm/s dan 1.10^{-7} cm/s. Sedangkan D_L pH *ambient* adalah 5.10^{-11} cm^2/s , sedangkan D_L pH 7.2 = D_L pH 8.0 adalah 2.10^{-11} cm^2/s . Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.92.

Pada perlakuan variasi laju alir resirkulasi Q, makin tinggi Q maka koefisien perpindahan panas k_L makin meningkat dan koefisien difusi zat terlarut D_L makin menurun. k_L Q 24L/mnt > k_L Q 24L/mnt, pH 8.0 > k_L Q 6L/mnt, berturut-turut adalah 9.10^{-7} cm/s, 8.10^{-7} cm/s dan 6.10^{-7} cm/s. Sedangkan D_L 6 L/mnt = D_L Q 24L/mnt adalah 3.10^{-11} cm^2/s , dan D_L Q 24L/mnt, pH 8.0 adalah 1.10^{-11} . Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.92.

Pada perlakuan variasi temperatur T, makin tinggi T makin, maka koefisien perpindahan panas k_L menurun dan koefisien difusi zat terlarut D_L makin menurun, tetapi kondisinya naik turun. k_L pada T 35°C, pH 7.2 = T 35°C adalah 1.10^{-6} cm/s, sedangkan k_L pada T 45°C, pH 8.0 > T 45°C adalah 8.10^{-7} cm/s, 6.10^{-7} cm/s. Sedangkan D_L pada T 45°C, T45°C, pH 8.0, T 35°C, T 35°C, pH 7.2

berturut-turut adalah 5.10^{-11} cm²/s, 2.10^{-11} cm²/s, 1.10^{-11} cm²/s dan 3.10^{-12} cm²/s. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.92.

Pada perlakuan kombinasi pH, Q, T, terlihat koefisien perpindahan panas k_L dan koefisien difusi zat terlarut D_L agak landai dimana kenaikan dan penurunannya tidak signifikan. Koefisien perpindahan panas k_L pada 45°C, 24L/mnt, *ambient* = T 45°C, 6L/mnt, 7.2 sebesar 1.10^{-6} cm/s, sedangkan pada T 35°C, 6L/mnt, 7.2 = T 45°C, 24L/mnt, 8.0 sebesar 9.10^{-7} cm/s. Sedangkan D_L pada T 35°C, 6L/mnt, 7.2; T 45°C, 6L/mnt, 7.2; T 45°C, 24L/mnt, 8.0; T 45°C, 24L/mnt, *ambient* adalah 2.10^{-11} cm²/s. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.92.



Gambar 4.92. Laju Difusi Zat Terlarut, D_L vs Laju Perpindahan Massa k_L pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik

Semakin banyak variabel yang berpengaruh makin besar pula faktor “penghambat” terhadap proses pengolahan anaerobik. Koefisien perpindahan massa fase cair, k_L merupakan fungsi dari sifat kimia fisik zat terlarut (densitas, viskositas, pH, BOD, COD dan VFA), karakteristik internal dan kondisi operasi bioreaktor (geometri bioreaktor, laju alir resirkulasi, temperatur, tekanan) (Zaiat *et al.*, 2000; Geankoplis, 2003; Kraakman *et al.*, 2011).

Tabel 4.78. Perbandingan antara Penelitian Tentang Perpindahan Massa

Bioreactor	Wastewater	Parameter (Perlakuan)	V _R , L	HRT (hari)	Temp. (°C)	COD _{Inf.} (mg/L)	COD _{Rem.} (%)	Mass Transfer Coefficient, <i>k_L</i>	Reference
HAIB (pilot-scale)	Glucose-based synthetic substrate	Superfisial velocity dan Substrate concentration	237	8 h	30	2.090-41	98	3.40.10 ⁻² cm/h	Zaiat <i>et al.</i> , 2000
	Domestic Sewage			8 h	30	341-71	79,2	2.23.10 ⁻¹ cm/h	Zaiat <i>et al.</i> , 2000
Two-stage Anaerobic Filter	Brewery wastewater	Substrate concentration	7.45 dan 6.55	0.5-6 d	35	1500-2500 (OLR 0.5-20 g SCOD/L.d	98,2	1.4-2.2 d ⁻¹	Cho and Young, 2001
Fixed-Bed ASBR	Synthetic Wastewater (Polyurethane Foam)	Superfisial velocity (0.095, 0.191, 0.312 and 0.467 cm/s)	1.2	8 h	30	500-68	72-87	1.98-1.85 h ⁻¹	Ramos <i>et al.</i> , 2003
SASBR	Synthetic Wastewater (Polyurethane Foam)	Bioparticle size (0.5, 1.0, 2.0 and 3.0 cm)	5		30	285-333	84-89	0.48-0.60 h ⁻¹	Cubas <i>et al.</i> , 2007
Anaerobic Batch Bioreactor (pilot-scale)	Leachate	pH ambient, 7.2 dan 8.0	160	1.0 d	Ambient (27-30)	6200-6625.4	71.84-81.43	1.10 ⁻⁷ -1.10 ⁻⁶ cm/s = 3.6.10 ⁻⁴ - 3.6.10 ⁻³ cm/h	Penelitian ini
		Laju alir Q 6L/mnt dan 24L/mnt		0.111-0.444 h	Ambient (27-30)	6235-6555.71	79.25-81.55	6.10 ⁻⁷ -9.10 ⁻⁷ cm/s = 2.16.10 ⁻³ - 3.24.10 ⁻³ cm/h	
		Temperatur ambient, 35°C dan 45°C		1.0 d	Ambient, 35 dan 45	6155.9-7445.11	79.00-81.73	6.10 ⁻⁷ -1.10 ⁻⁶ cm/s = 2.16.10 ⁻³ - 3.6.10 ⁻³ cm/h	
		pH, Q, T (ambient, 7.2 dan 8.0), (6L/mnt dan 24L/mnt), (ambient, 35°C dan 45°C)		0.111-0.444 h	Ambient, 35 dan 45	6351-6557	82.88-85.31	9.10 ⁻⁷ -1.10 ⁻⁶ cm/s = 3.24.10 ⁻³ - 3.6.10 ⁻³ cm/h	

Keterangan:

HAIB : Horizontal-Flow Anaerobic Immobilized Biomass

UASB : Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactors

ASBR : Anaerobic Sequencing Batch Reactor

SASBR : Stirred Anaerobic Sequencing Batch Reactor

Nilai koefisien perpindahan massa fase cair, k_L yang diperoleh dalam penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan nilai k_L pada pengolahan *glucose-based synthetic substrate, domestic sewage, brewery wastewater, dan synthetic wastewater (polyurethane foam)* berturut-turut adalah 0.0106 – 0.106 kali, 0.0016 – 0.016 kali, 0.0062 – 0.0620 kali dan 0.00075 – 0.0075 kali. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai k_L , semakin sulit terbiodegradasi, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mendegradasi limbah tersebut (Tabel 4.78).

4.6. Analisis Dimensional Bilangan Tak-berdimensi

4.6.1. Hubungan Bilangan Reynolds N_{Re} dan Viskositas

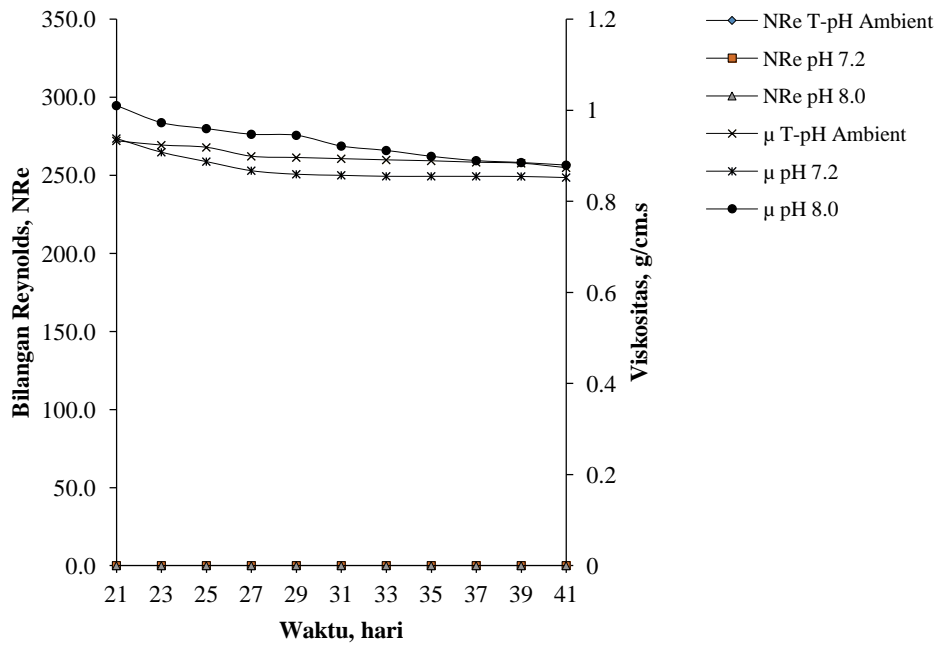
pH dan temperatur tidak berpengaruh langsung terhadap N_{Re} . Laju alir resirkulasi berpengaruh terhadap kenaikan bilangan Reynolds, N_{Re} . Makin tinggi laju alir resirkulasi lindi, Q makin tinggi pula N_{Re} . Seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.93; Gambar 4.94; Gambar 4.95; dan Gambar 4.96.

Terlihat bahwa N_{Re} untuk laju alir resirkulasi, Q 6 L/mnt dan 24 L/mnt, meningkat sedikit demi sedikit. Sedangkan N_{Re} pada tanpa resirkulasi lindi tidak terjadi peningkatan. Hal ini terjadi karena berkurangnya konsentrasi substrat terlarut dalam lindi, sehingga mempengaruhi densitas dan viskositas lindi. Dan selanjutnya juga akan mempengaruhi massa zat terlarut dan resistensi lindi ketika diresirkulasi. Namun tidak demikian halnya pada bioreaktor yang tidak diresirkulasi walaupun terjadi penurunan densitas dan viskositas lindi tetapi N_{Re} tetap konstan tidak mengalami kenaikan. Inilah menunjukkan bahwa N_{Re} selain dipengaruhi oleh laju alir resirkulasi juga dipengaruhi oleh densitas dan viskositas lindi.

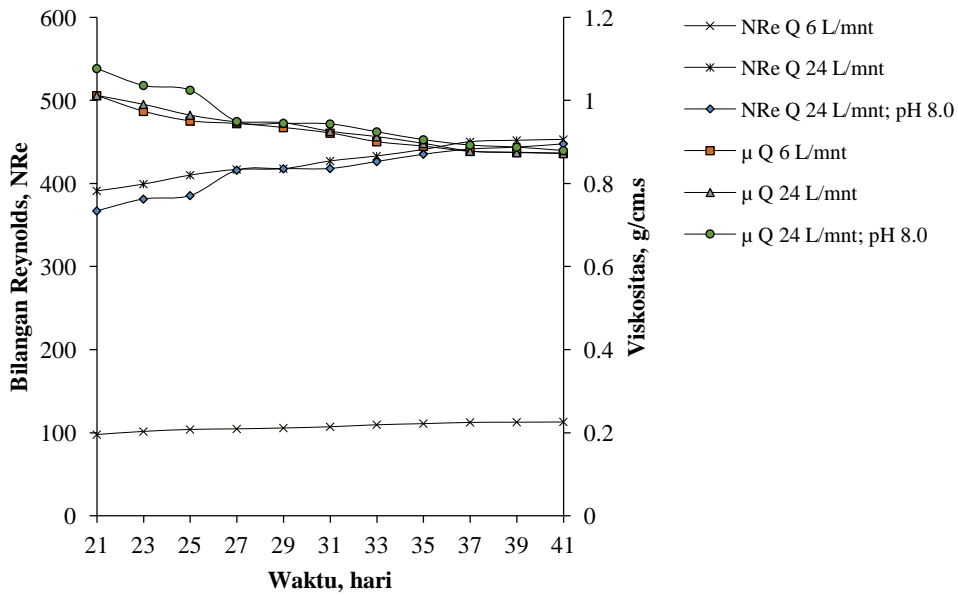
Secara umum, N_{Re} meningkat jika laju alir resirkulasi dinaikkan. Pada pengaruh pH dan T, dimana kondisi pengolahan tanpa resirkulasi lindi ($Q = 0$ L/mnt), tidak ada kenaikan N_{Re} walaupun terjadi penurunan ρ dan μ lindi. Seperti terlihat pada Gambar 4.93 dan Gambar 4.95.

Sedangkan pada variasi Q dan kombinasi pH-Q-T, dimana kondisi pengolahan dengan resirkulasi lindi ($Q = 6$ L/mnt dan 24 L/mnt), N_{Re} meningkat

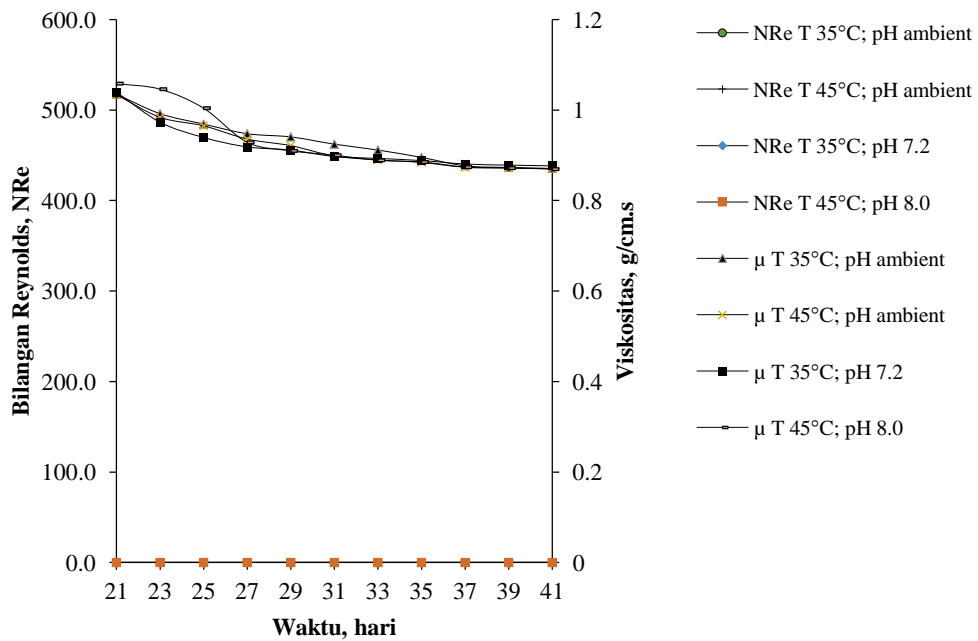
seiring dengan penurunan ρ dan μ lindi. Seperti terlihat pada Gambar 4.94 dan Gambar 4.96.



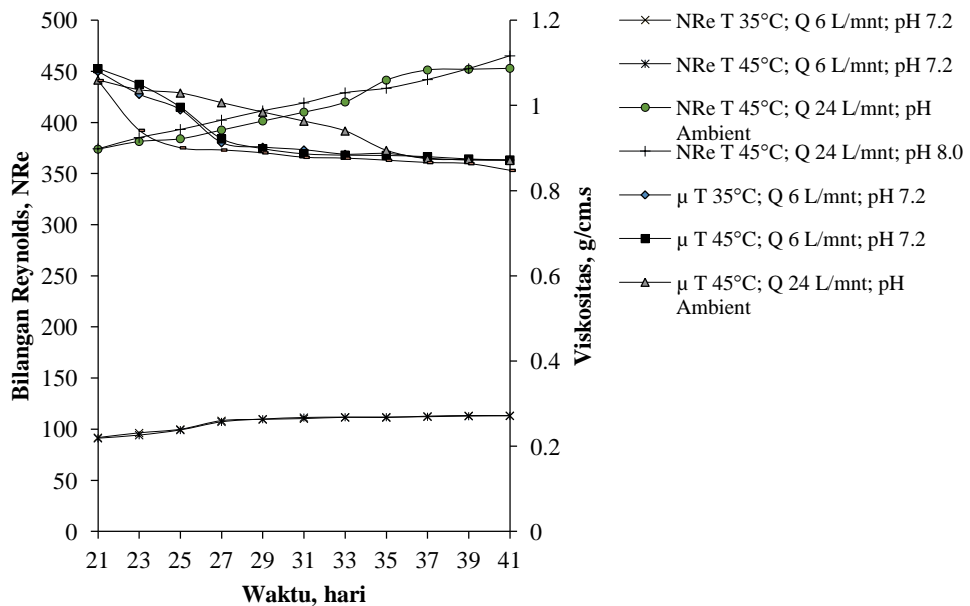
Gambar 4.93. Hubungan Bilangan Re dan Viskositas pada pengaruh pH



Gambar 4.94. Hubungan Bilangan Re dan Viskositas pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.95. Hubungan Bilangan *Reynolds* N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh temperatur T



Gambar 4.96. Hubungan Bilangan *Reynolds* N_{Re} dan Viskositas pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

Viskositas berhubungan dengan besarnya gaya gesekan antar lapisan zat cair dan antar zat cair dengan dinding. Viskositas merupakan fungsi dari konsentrasi larutan. Semakin banyak zat terlarut, maka viskositas dan gesekan akan semakin tinggi. Semakin besar viskositas larutan semakin lama waktu untuk

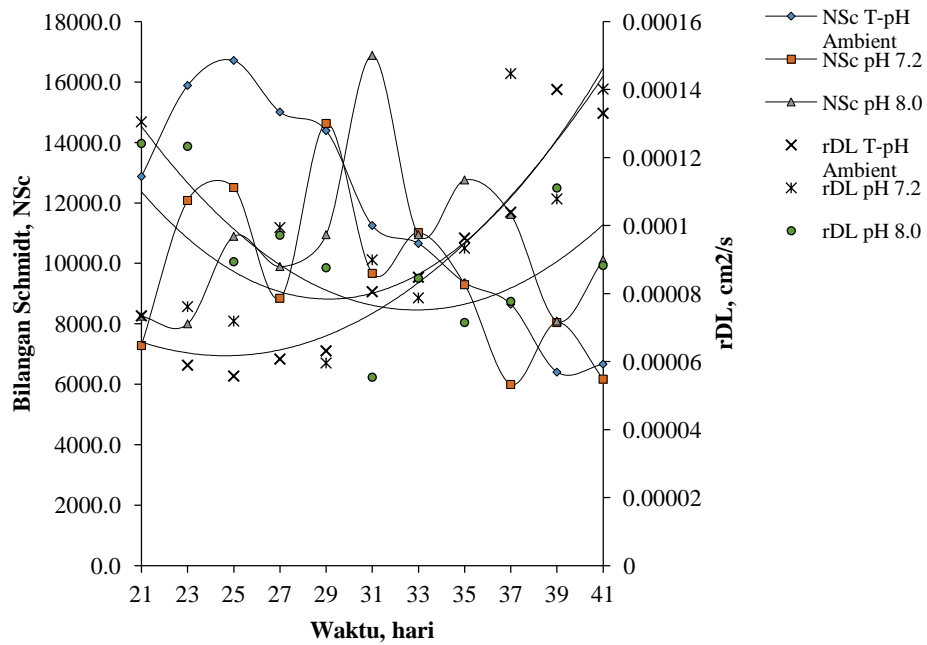
mengalir (Jati *et al.*, 2010). Dari penelitian ini diperoleh bahwa N_{Re} meningkat juga disebabkan oleh penurunan ρ dan μ . Semakin besar penurunan ρ dan μ , maka semakin kecil tahanan lindi, sehingga makin tinggi laju alir selanjutnya makin tinggi pula N_{Re} . Hal ini dapat dijelaskan, bahwa dengan menurunnya densitas dan viskositas lindi akan mengurangi hambatan terhadap aliran resirkulasi lindi. Gaya gesek antar lapisan dan lindi yang semakin kecil sehingga menyebabkan peningkatan pada N_{Re} , walaupun pada laju alir resirkulasi konstan.

4.6.2. Hubungan Bilangan Schmidt, N_{Sc} dan Laju Difusi Zat Terlarut, r_{DL}

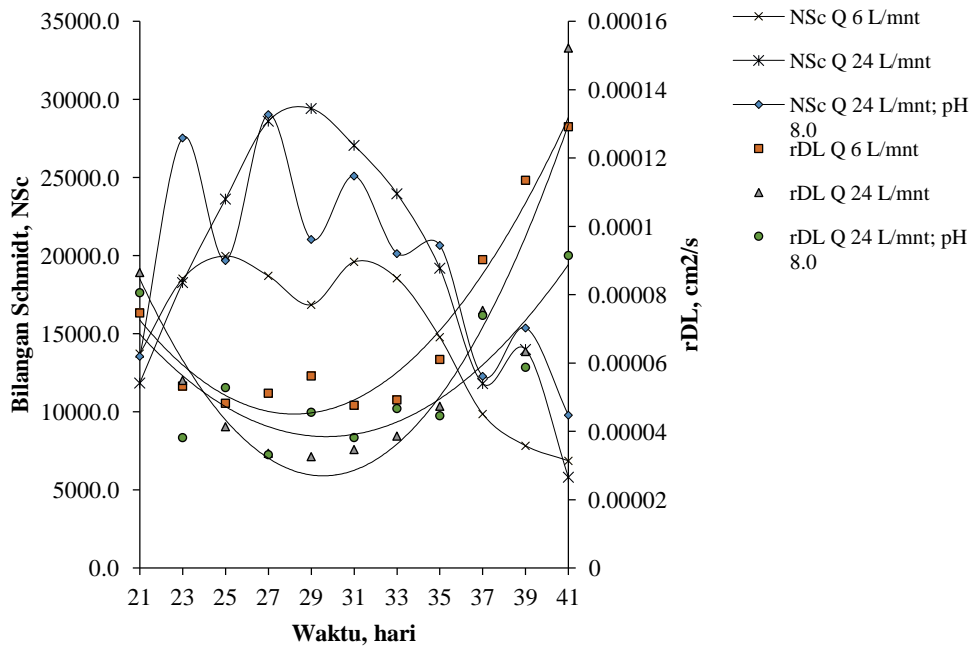
Bilangan *Schmidt*, N_{Sc} dipengaruhi oleh massa zat terlarut dan berbanding terbalik dengan difusivitas zat terlarut dalam lindi. Pada keseluruhan kondisi, N_{Sc} meningkat sampai pada hari ke-25 – 31, kemudian setelah itu menurun. Seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.97; Gambar 4.98; Gambar 4.99; dan Gambar 4.100.

Sebagaimana bilangan *Reynolds*, N_{Re} , pH dan temperatur tidak berpengaruh langsung terhadap N_{Sc} . Seiring terjadi penurunan pada difusivitas zat terlarut, maka N_{Sc} meningkat. Begitu juga sebaliknya, difusivitas zat terlarut meningkat, maka N_{Sc} menurun. Hal ini terjadi karena difusivitas zat terlarut dipengaruhi oleh penurunan densitas dan viskositas sebagai akibat penurunan konsentrasi massa zat terlarut dan penurunan konsentrasi VFA dalam lindi. Pada keseluruhan kondisi, N_{Sc} tertinggi berada pada hari ke-25 – 31. Dimana diatas hari ke-31 VFA mulai menurun, seperti terlihat juga pada gambar 4. Seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.84; Gambar 4.85; Gambar 4.86; dan Gambar 4.87., hubungan antara r_{DL} vs VFA.

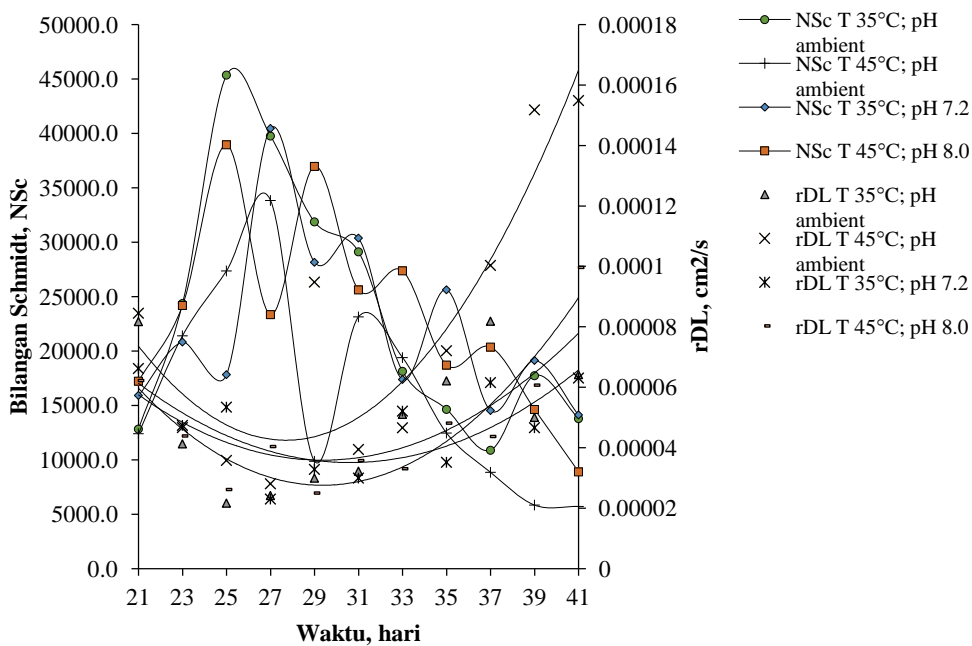
Secara umum, N_{Sc} meningkat dengan menurunnya r_{DL} dan menurun dengan meningkatnya r_{DL} . Hal ini berlaku umum pada semua kondisi pengolahan, baik pada pengaruh pH, Q dan T, maupun pada pengaruh kombinasi pH-Q-T.



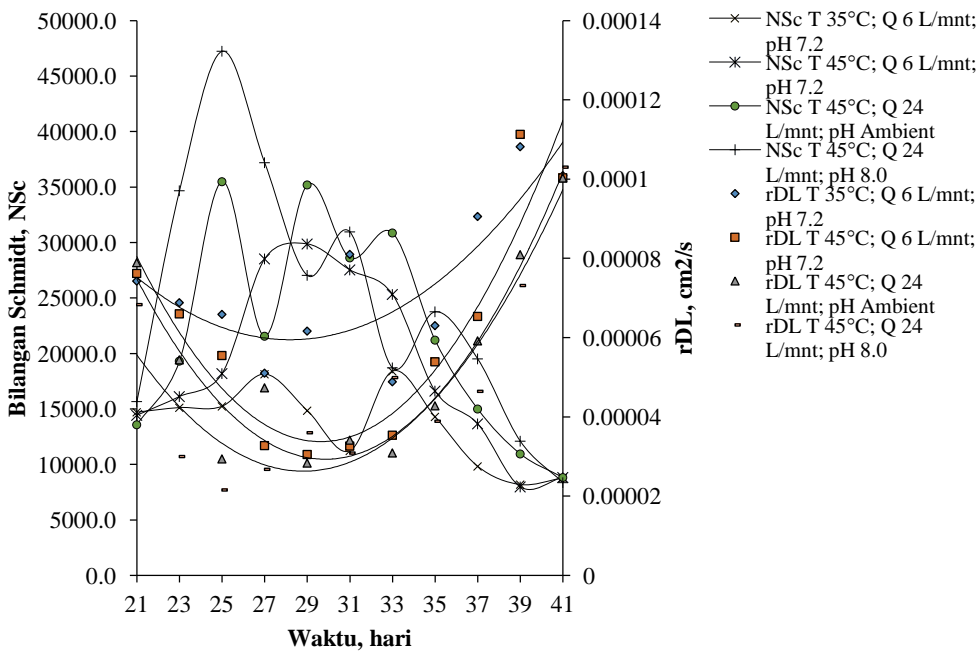
Gambar. 4.97. Bilangan *Schmidt* vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh pH



Gambar. 4.98. Bilangan *Schmidt* vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar. 4.99. Bilangan *Schmidt* vs laju difusi zat terlarut pada pengaruh temperatur T



Gambar. 4.100. Bilangan *Schmidt* vs laju difusi zat terlarut pada kombinasi pH-Q-T

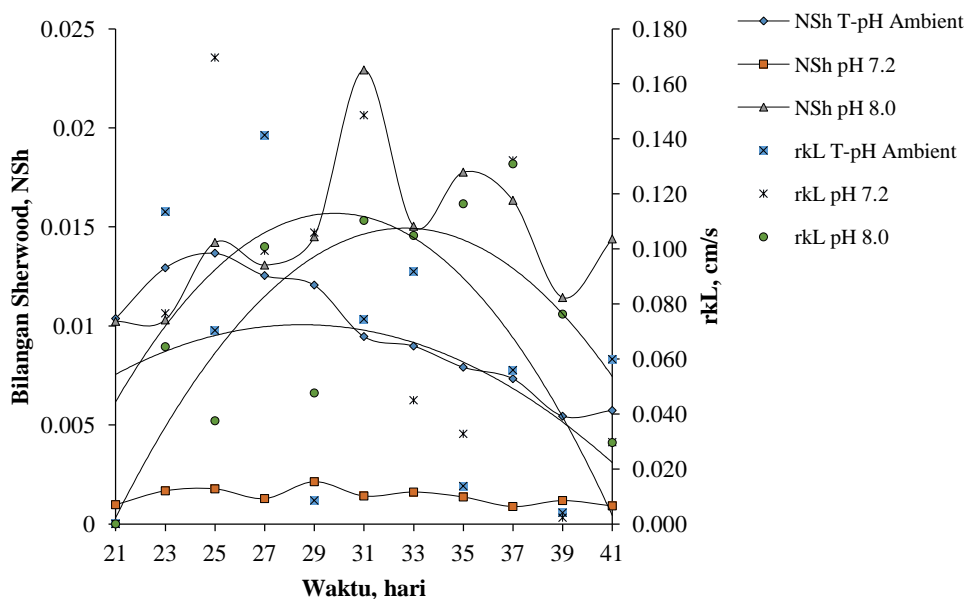
4.6.3. Hubungan Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} , Laju Perpindahan Massa, r_{kL} dan Laju Difusi Zat Terlarut, r_{DL}

Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} berbanding lurus dengan perpindahan massa zat terlarut dan berbanding terbalik dengan difusi zat terlarut dalam lindi. Pada

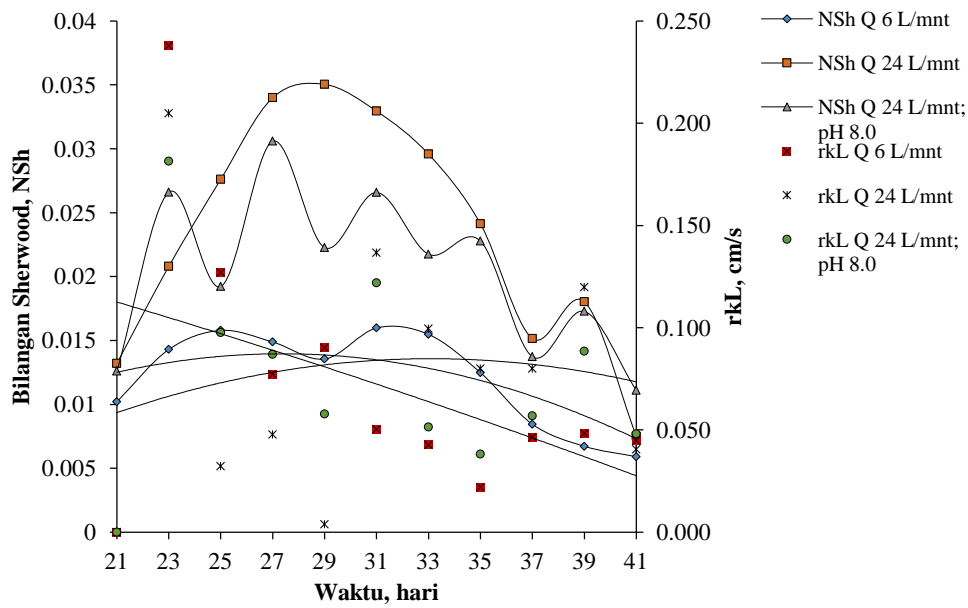
keseluruhan kondisi, N_{Sh} meningkat sampai pada hari ke-25 – 31, kemudian menurun. Sebagaimana N_{Re} dan N_{Sc} , pH dan temperatur tidak berpengaruh langsung terhadap N_{Sh} . Seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.101; Gambar 4.102; Gambar 4.103; dan Gambar 4.104.

Seiring terjadi penurunan r_{DL} dan kenaikan rata-rata r_{kL} meningkat, maka N_{Sh} meningkat. Begitu juga sebaliknya, r_{DL} meningkat dan r_{kL} menurun, maka N_{Sc} menurun. Hal ini terjadi karena difusivitas zat terlarut dipengaruhi oleh penurunan densitas dan viskositas sebagai akibat penurunan konsentrasi massa zat terlarut dan penurunan konsentrasi VFA dalam lindi. Sedangkan r_{kL} dipengaruhi konsentrasi substrat (COD) dalam lindi. Dimana diatas hari ke-31, r_{kL} menurun dan r_{DL} meningkat. Sebagaimana terlihat berturut-turut pada Gambar 4.84, Gambar 4.85, Gambar 4.86, dan Gambar 4.87, hubungan antara r_{DL} vs VFA.

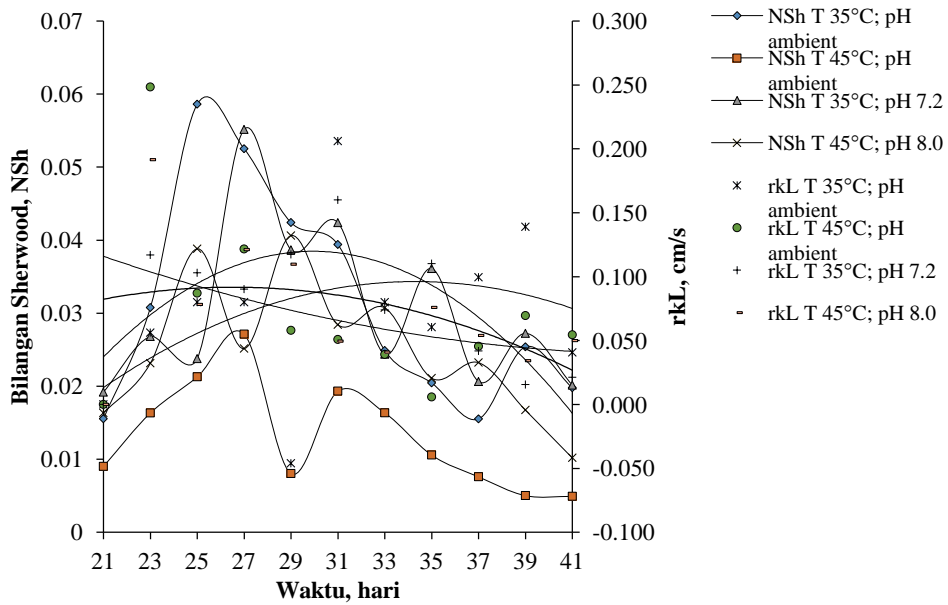
Secara umum, N_{Sh} meningkat dengan meningkatnya r_{kL} dan menurun dengan menurunnya r_{DL} . Hal ini berlaku umum pada semua kondisi pengolahan, baik pada pengaruh pH, Q dan T, maupun pada kombinasi pH-Q-T. Sebagaimana terlihat berturut-turut pada Gambar 4.105, Gambar 4.106, Gambar 4.107 dan Gambar 4.108.



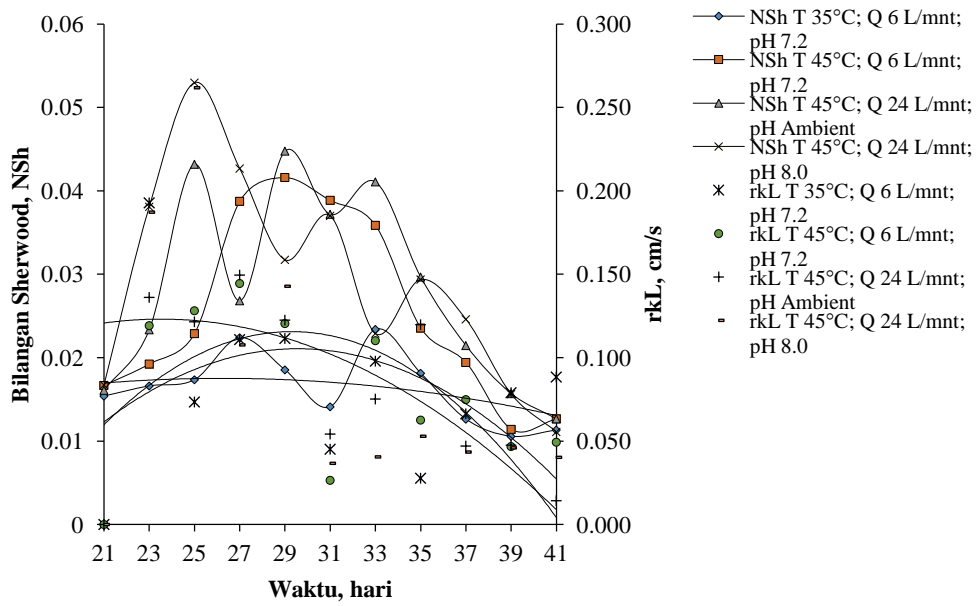
Gambar 4.101. Bilangan *Sherwood* dan Laju perpindahan massa pada pengaruh pH



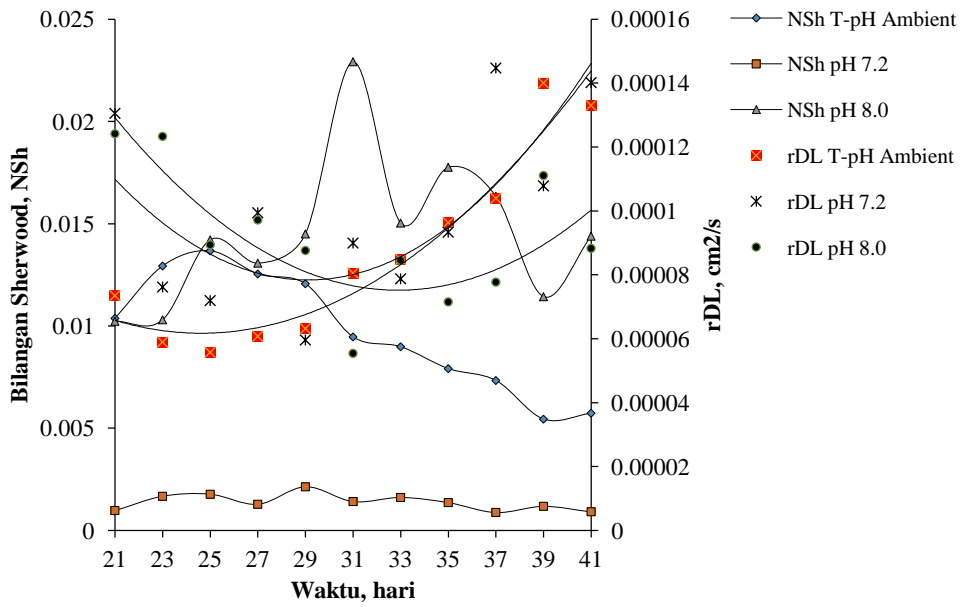
Gambar 4.102. Bilangan *Sherwood* dan Laju perpindahan massa pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



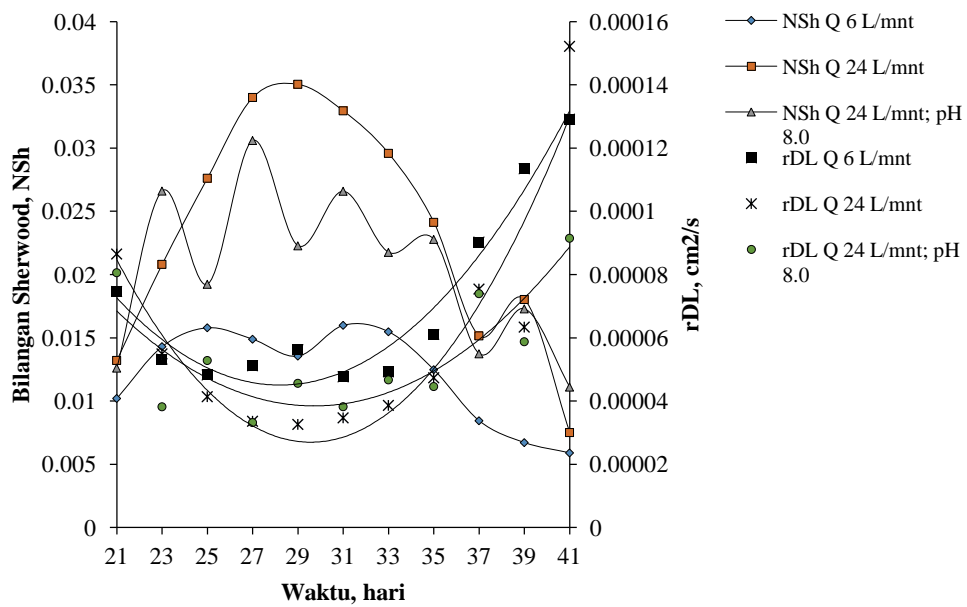
Gambar 4.103. Bilangan *Sherwood* dan Laju perpindahan massa pada pengaruh temperatur T



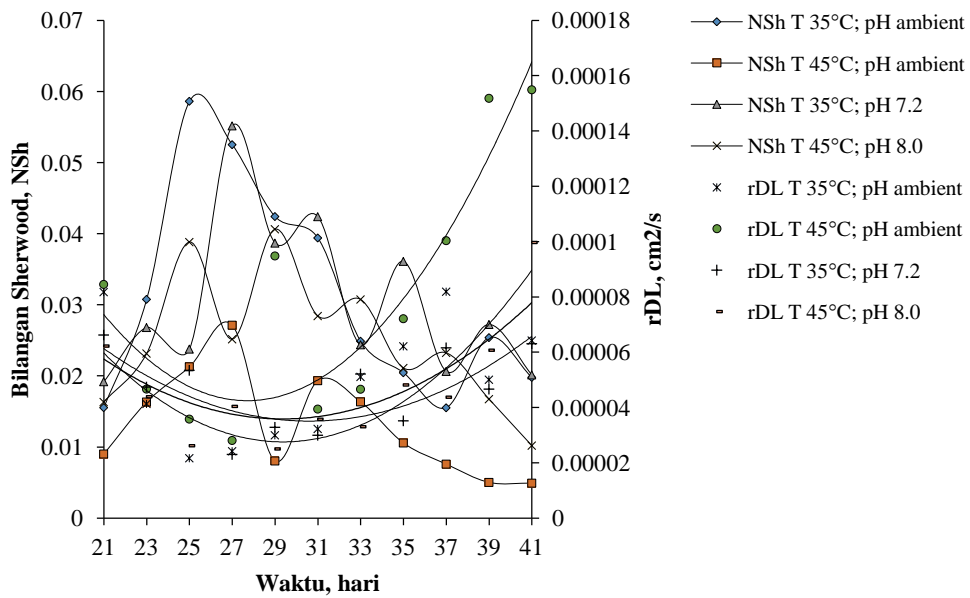
Gambar 4.104. Bilangan *Sherwood* dan Laju perpindahan massa pada pengaruh kombinasi pH-Q-T



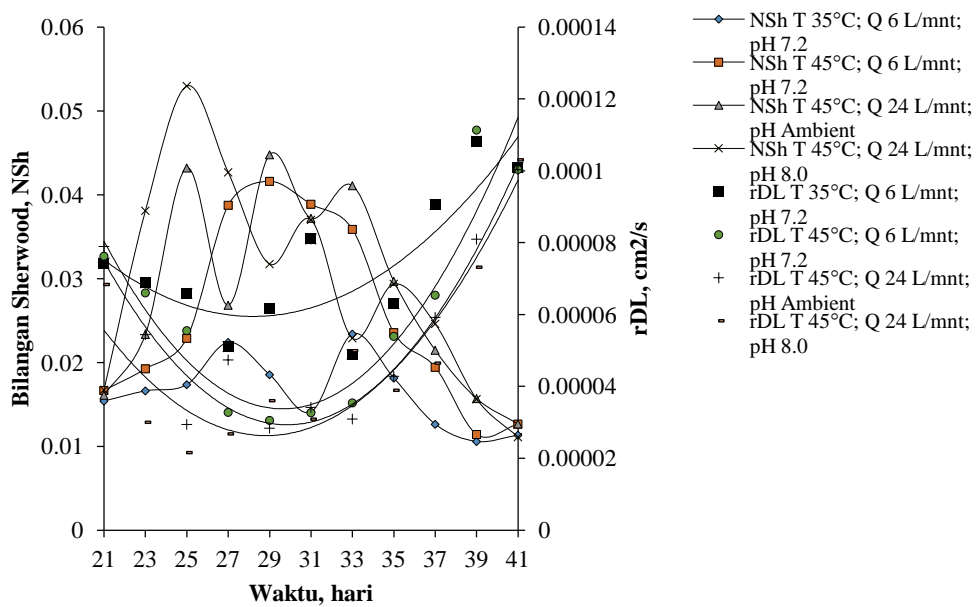
Gambar 4.105. Bilangan *Sherwood* vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh pH



Gambar 4.106. Bilangan *Sherwood* vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh laju lair resirkulasi Q



Gambar 4.107. Bilangan *Sherwood* vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh temperatur T



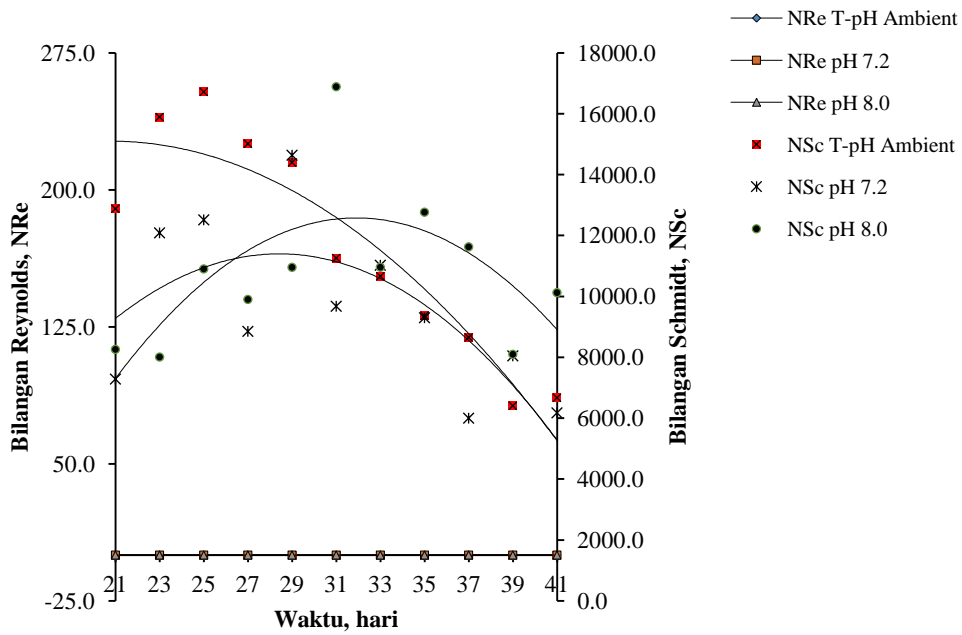
Gambar 4.108. Bilangan *Sherwood* vs Laju Difusi Zat Terlarut pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

4.6.4. Hubungan Bilangan *Reynolds* N_{Re} dan Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

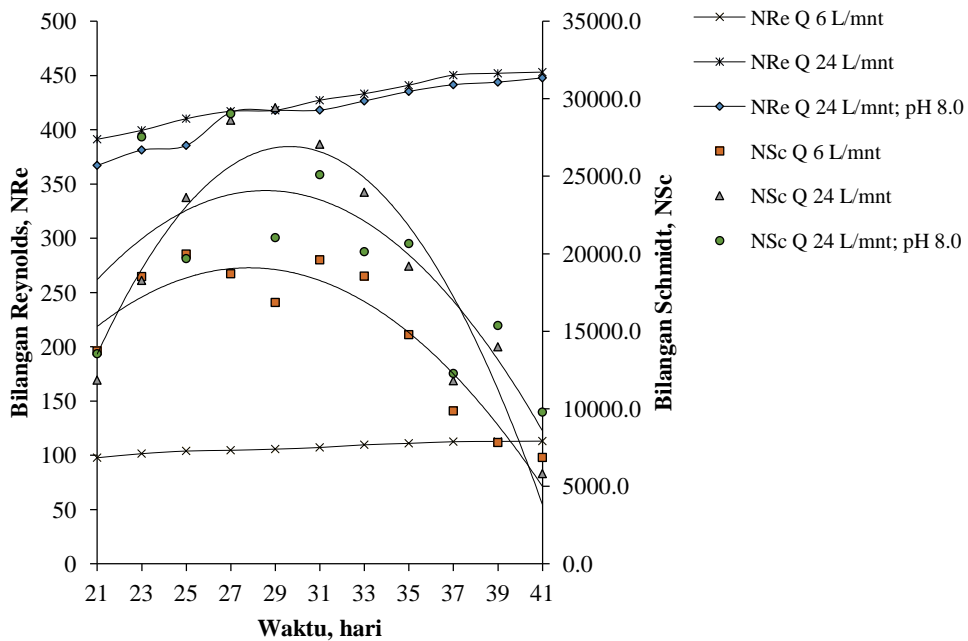
Hubungan timbal balik antar bilangan tak-berdimensi akan memberikan gambaran pengaruh bilangan yang satu terhadap bilangan yang lain. Secara umum, semakin tinggi N_{Re} maka N_{Sc} juga semakin meningkat. Hubungan timbal balik antara N_{Re} dan N_{Sc} , seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.109; Gambar 4.110; Gambar 4.111; dan Gambar 4.112.

Pada perlakuan pengaruh pH dan T, dimana kondisi operasi pengolahan lindi tanpa resirkulasi ($Q = 0\text{L/mnt}$), terlihat bahwa N_{Re} tetap konstan namun N_{Sc} meningkat dari hari ke-21 – 30, kemudian menurun setelah hari ke-31. Seperti terlihat pada Gambar 4.109 dan Gambar 4.111. Sedangkan pada perlakuan pengaruh variasi laju alir resirkulasi Q , dimana kondisi operasi pengolahan dengan laju alir resirkulasi ($Q = 6\text{L/mnt}$ dan 24L/mnt), terlihat N_{Re} semakin meningkat walaupun dengan laju alir yang konstan. Namun N_{Sc} terus meningkat dari hari ke-21 – 30, kemudian terus menurun. Seperti terlihat pada Gambar 4.110. Demikian juga halnya pada pengaruh kombinasi pH, Q , T, seperti terlihat pada Gambar 4.112. Keadaan dimana N_{Sc} yang pada awalnya meningkat kemudian menurun berlaku umum pada semua kondisi operasi pengolahan lindi.

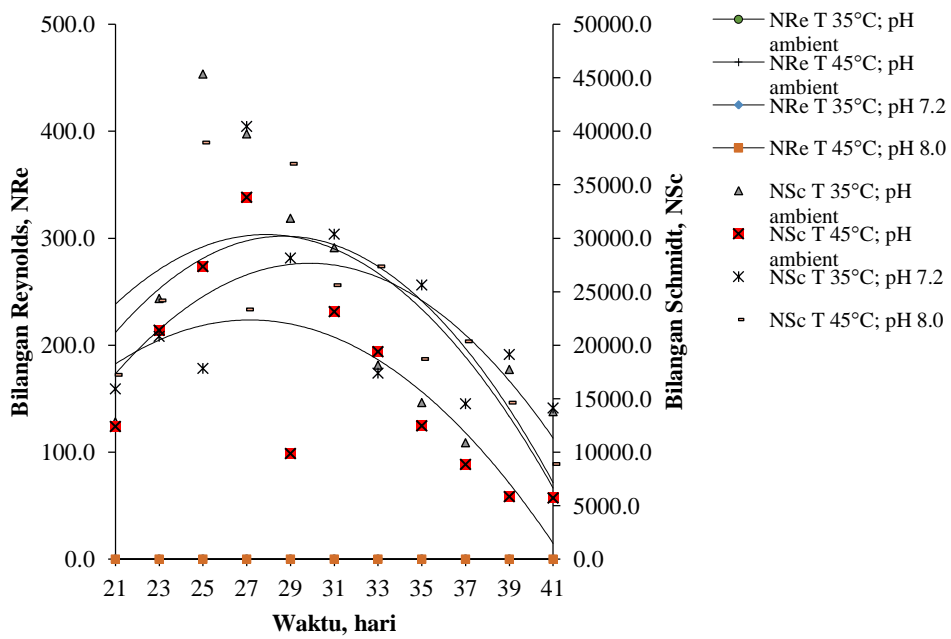
Hal ini menunjukkan bahwa N_{Sc} dipengaruhi oleh difusi zat terlarut, yang tergantung pada konsentrasi substrat.



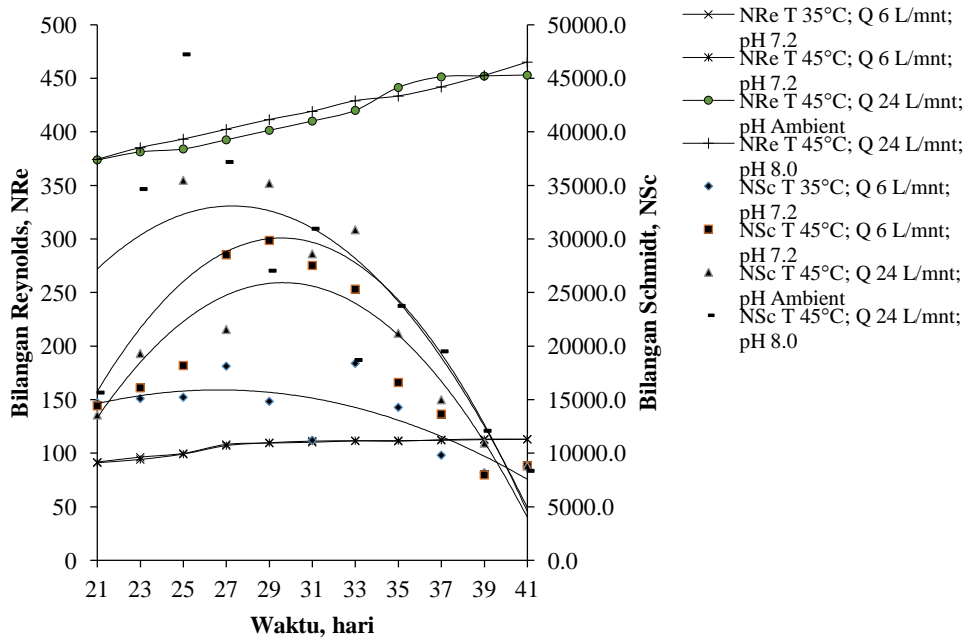
Gambar 4.109. Bilangan *Reynolds* dan Bilangan *Schmidt* pada pengaruh pH



Gambar 4.110. Bilangan *Reynolds* dan Bilangan *Schmidt* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



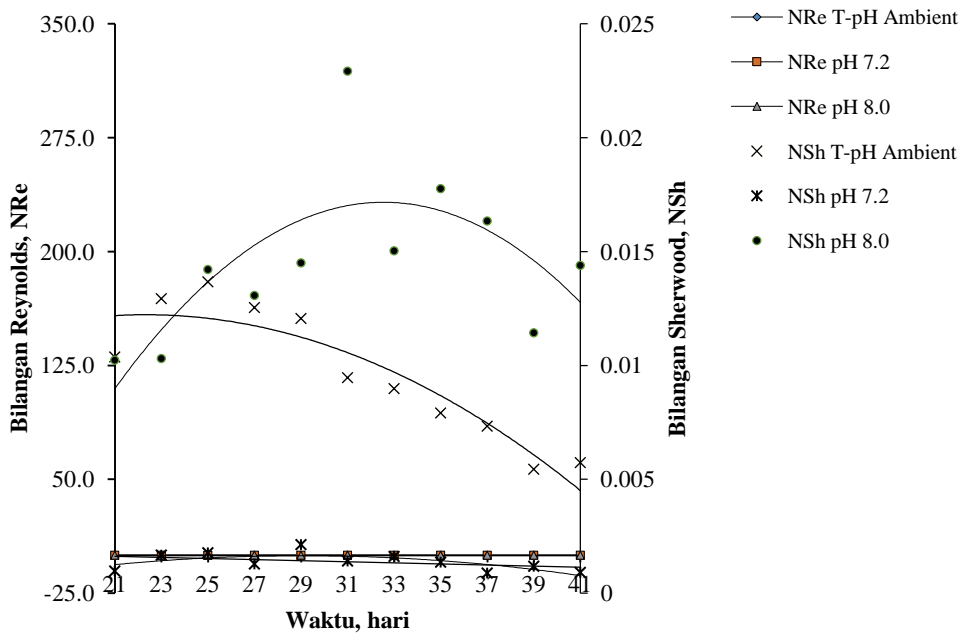
Gambar 4.111. Bilangan Reynolds dan Bilangan Schmidt pada pengaruh temperatur T



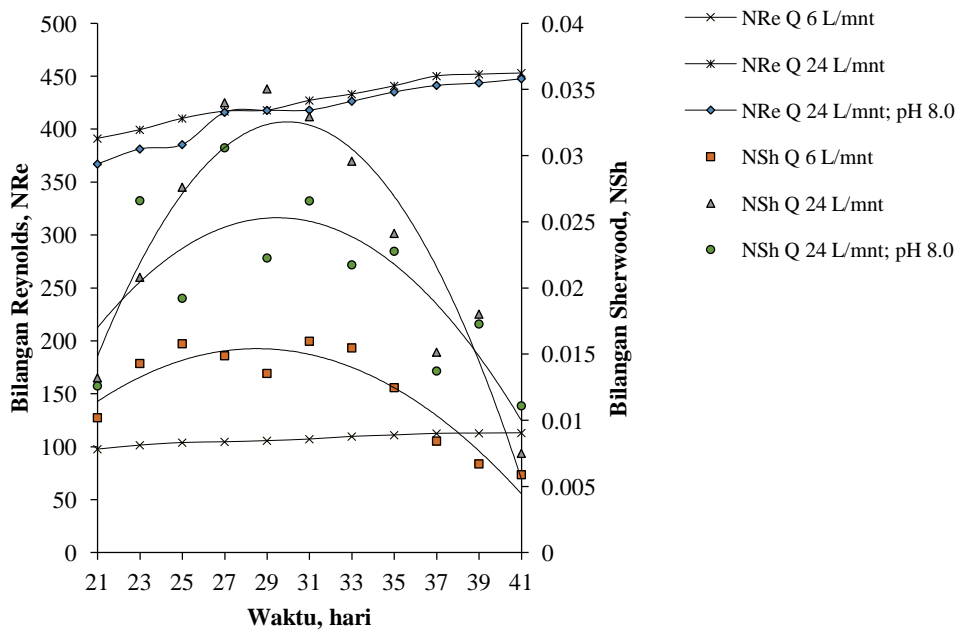
Gambar 4.112. Bilangan Reynolds dan Bilangan Schmidt pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

4.6.5. Hubungan Bilangan Reynolds N_{Re} dan Bilangan Sherwood, N_{Sh}

Hubungan timbal balik antara N_{Re} dan N_{Sh} , seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.113; Gambar 4.114; Gambar 4.115; dan Gambar 4.116. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka bilangan Sherwood juga semakin meningkat.



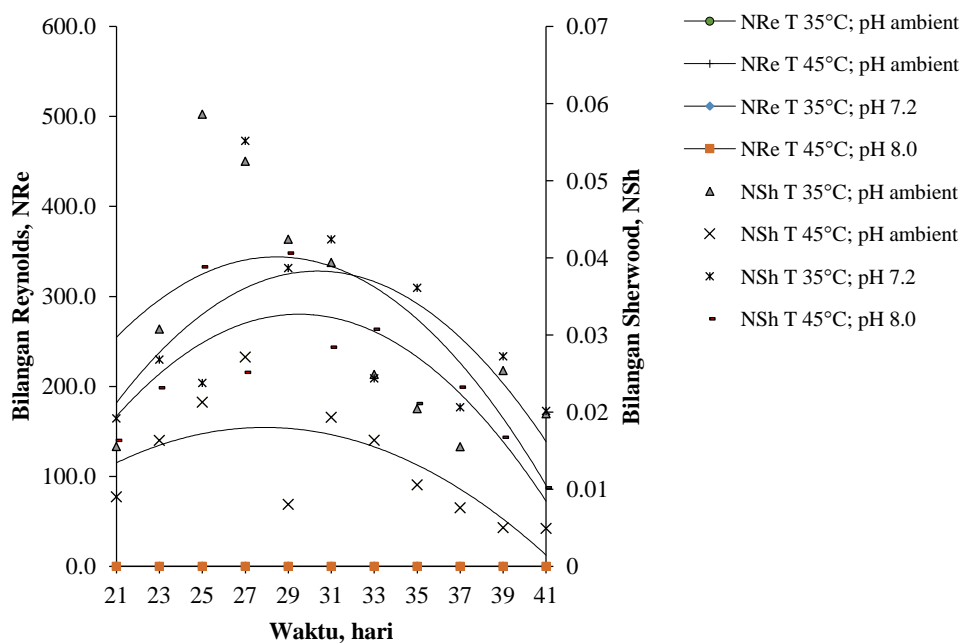
Gambar 4.113. Bilangan Reynolds vs Bilangan Sherwood pada pengaruh pH



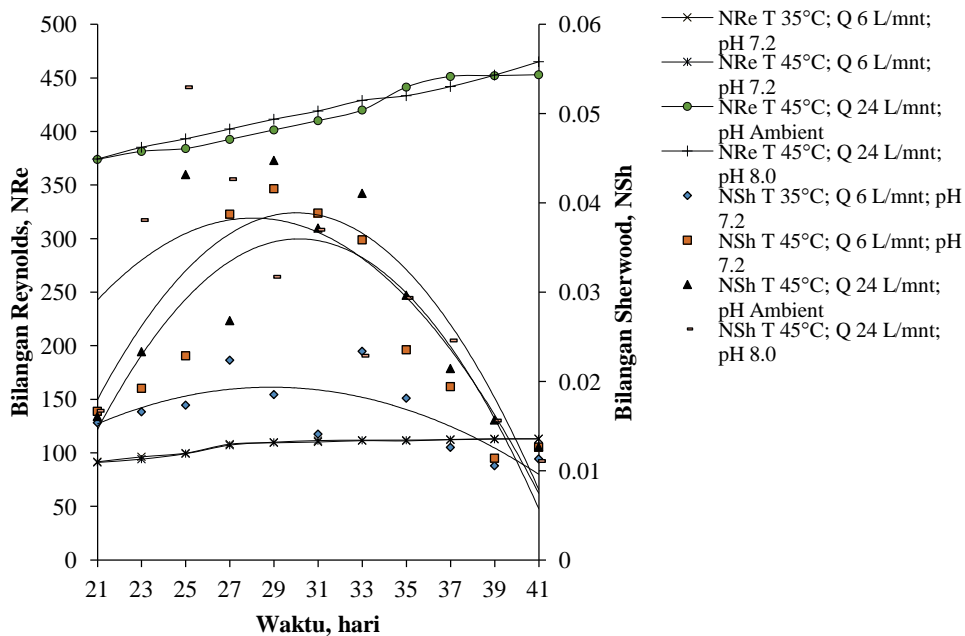
Gambar 4.114. Bilangan Reynolds vs Bilangan Sherwood pada pengaruh laju alir resirkulasi Q

Pada perlakuan pengaruh pH dan T, dimana kondisi operasi pengolahan lindi tanpa resirkulasi ($Q = 0$ L/mnt), terlihat bahwa N_{Re} tetap konstan namun N_{Sh} meningkat dari hari ke-21 – 31, kemudian menurun. Seperti terlihat pada Gambar 4.113 dan Gambar 4.115.

Sedangkan pada perlakuan pengaruh Q, dimana kondisi operasi pengolahan dengan laju alir resirkulasi ($Q = 6$ L/mnt dan 24 L/mnt), terlihat N_{Re} semakin meningkat walaupun dengan laju alir yang konstan. Dan N_{Sc} terus meningkat dari hari ke-21 – 31, kemudian menurun. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.114. Demikian juga halnya pada pengaruh kombinasi pH-Q-T, seperti terlihat pada Gambar 4.116.



Gambar 4.115. Bilangan Reynolds vs Bilangan Sherwood pada pengaruh temperatur T

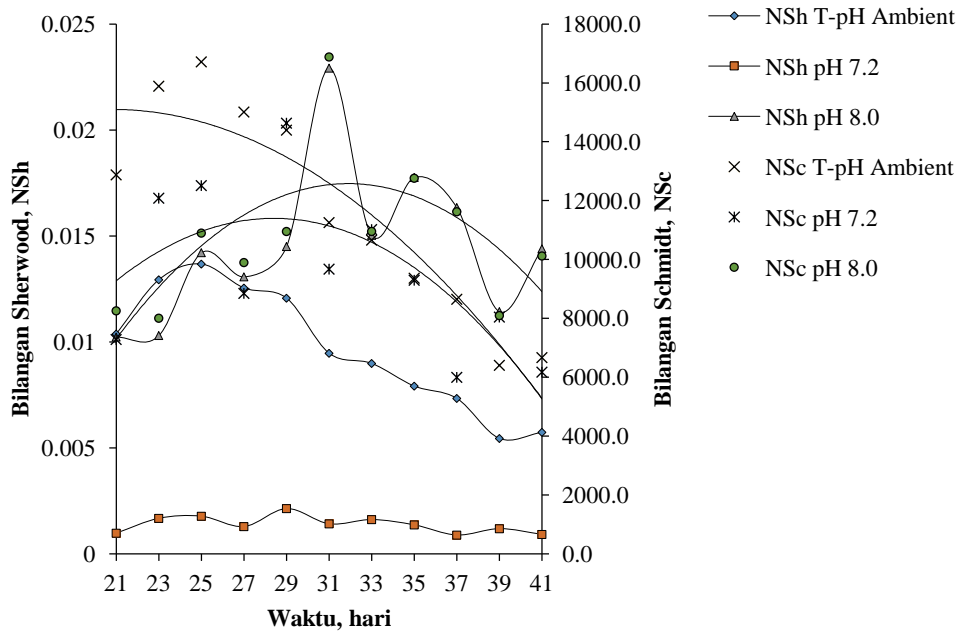


Gambar 4.116. Bilangan *Reynolds* vs Bilangan *Sherwood* pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

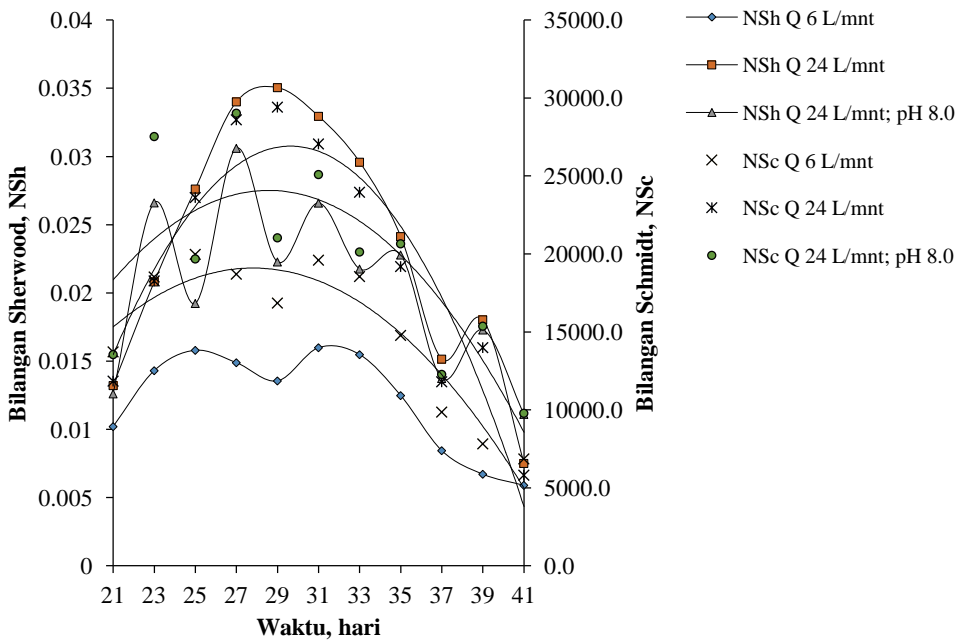
4.6.6. Hubungan Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} dan Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

Hubungan timbal balik antara N_{Sh} dan N_{Sc} , seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 4.117; Gambar 4.118; Gambar 4.119; dan Gambar 4.120. Semakin tinggi N_{Sh} maka N_{Sc} juga semakin meningkat. Pada perlakuan pengaruh pH dan T, dimana kondisi operasi pengolahan lindi tanpa resirkulasi ($Q = 0L/mnt$), terlihat bahwa N_{Sh} dan N_{Sc} meningkat dari hari ke-21 – 32, kemudian menurun. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.117 dan Gambar 4.119.

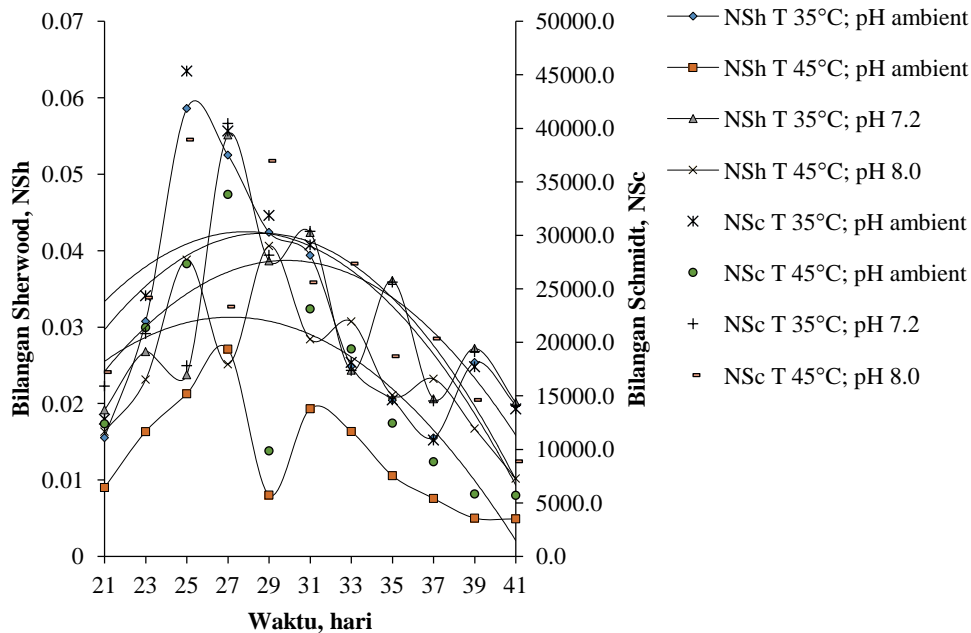
Sedangkan pada perlakuan pengaruh Q, dimana kondisi operasi pengolahan dengan laju alir resirkulasi ($Q = 6L/mnt$ dan $24L/mnt$), terlihat N_{Sh} dan N_{Sc} terus meningkat dari hari ke-21 – 32, kemudian menurun. Seperti terlihat pada Gambar 4.118. Demikian juga halnya pada pengaruh kombinasi pH-Q-T, seperti terlihat pada Gambar 4.120.



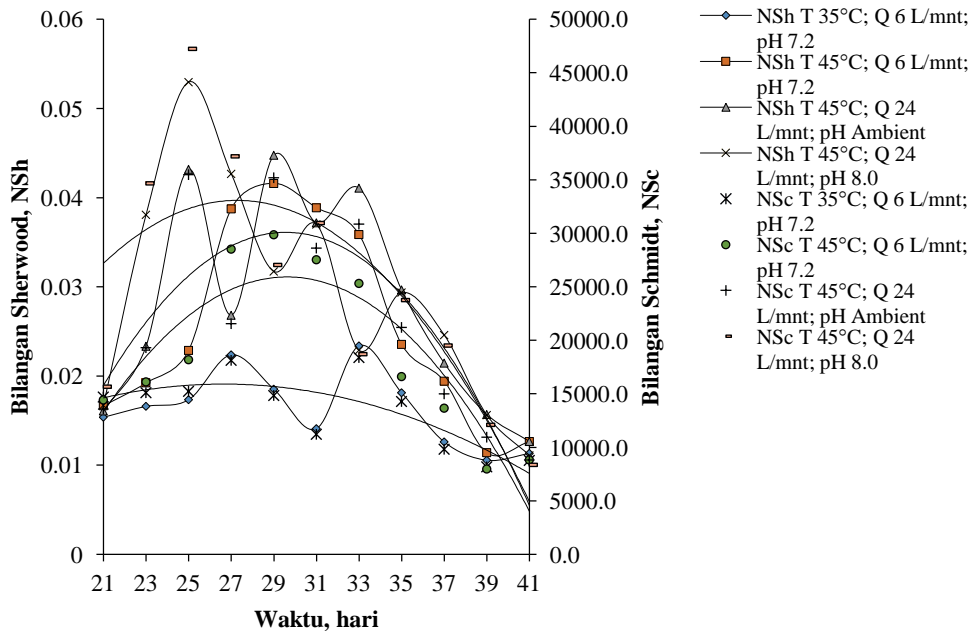
Gambar 4.117. Bilangan *Sherwood* vs Bilangan *Schmidt* pada pengaruh pH



Gambar 4.118. Bilangan *Sherwood* vs Bilangan *Schmidt* pada pengaruh laju alir resirkulasi Q



Gambar 4.119. Bilangan *Sherwood* vs Bilangan *Schmidt* pada pengaruh temperatur T



Gambar 4.120. Bilangan *Sherwood* vs Bilangan *Schmidt* pada pengaruh kombinasi pH-Q-T

4.7. Korelasi Empirik N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh}

Analisis bilangan tak-berdimensi (*dimensionless number analysis*) dalam bentuk korelasi empirik antar bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} , dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} (Arogo *et al.*, 1999). Data-data yang digunakan diambil

dari Tabel 4.33 – Tabel 4.46. N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} pada pengaruh pH, Q, T, dan pengaruh kombinasi pH-Q-T. Contoh perhitungan pada Lampiran C 7.

Hubungan antara variabel-variabel diatas dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$k_L = f(D_L, d_i, v, \mu, \rho) \quad 2.35.$$

Dengan menggunakan metode *Buckingham* (Arogo *et al.*, 1999), analisa dimensional untuk persamaan pada sistem ini adalah sebagai berikut:

$$N_{Sh} = f(N_{Re}, N_{Sc}) \quad 2.36a.$$

$$N_{Sh} = C_k (N_{Re})^a (N_{Sc})^b \quad 2.36b.$$

Koefisien pangkat pada bilangan tak berdimensi ditentukan dengan metode menggunakan metode *Buckingham's π Theorem*. Oleh karenanya, nilai bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; bilangan *Schmidt*, N_{Sc} , dan bilangan *Sherwood*, N_{Sh} yang diperoleh ditransformasi ke dalam bentuk logaritma, sehingga diperoleh:

$$\ln N_{Sh} = \ln C_k + a \ln N_{Re} + b \ln N_{Sc} \quad 2.36c.$$

Korelasi empirik bilangan tak-berdimensi ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh N_{Re} dan N_{Sc} terhadap k_L lindi dalam bentuk N_{Sh} (Prasetyo dan Yosephine, 2012). Korelasi empiris pengolahan lindi merupakan persamaan yang menunjukkan pengaruh variabel-variabel terhadap perpindahan massa zat terlarut yang terjadi dalam bioreaktor anaerobik. Persamaan bilangan tak-berdimensi tidak bergantung pada skala geometri, sehingga dapat dipergunakan untuk *scale-up* bioreaktor (Arogo *et al.*, 1999; Klöckner *et al.*, 2013). Dengan menggunakan korelasi empirik persamaan bilangan tak-berdimensi, pada skala geometri berbeda bioreaktor akan memiliki sistem operasi dan kinerja yang serupa (Prasetyo dan Yosephine, 2012).

N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} hasil penelitian yang digunakan untuk menentukan korelasi empirik pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik pada pengaruh pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T. Seperti terlihat pada Tabel 4.89.

Tabel 4.79. N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} pada pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T

Perlakuan	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
pH <i>Ambient</i>	0	-5.10^{-7}	-5.10^{-7}
pH 7.2	0	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
pH 8.0	0	9.10^{-8}	2.10^{-7}
Q 6 L/mnt	8.10^{-8}	-5.10^{-7}	-4.10^{-7}
Q 24 L/mnt	9.10^{-8}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
Q 24 L/mnt dan pH 8.0	1.10^{-7}	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
T 35°C	0	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45°C	0	-7.10^{-7}	-6.10^{-7}
T 35°C dan pH 7.2	0	-2.10^{-7}	-8.10^{-8}
T 45°C dan pH 8.0	0	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	1.10^{-7}	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
T 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	1.10^{-7}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45 °C; Q 24 L/mt dan pH <i>Ambient</i>	1.10^{-7}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0	1.10^{-7}	-6.10^{-7}	-5.10^{-7}

Koefisien pangkat pada bilangan tak berdimensi ditentukan dengan metode menggunakan metode *Buckingham's π* . Korelasi empirik hubungan antar variabel-variabel peubah yang berpengaruh dalam bentuk persamaan bilangan tak-berdimensi pada pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, sebagai berikut:

$$N_{Sh} = 0.52497 N_{Re}^{-0.3109} N_{Sc}^{0.9019} \quad 2.36.d$$

Persamaan 2.36.d dengan koefisien determinasi, $R^2 = 0,9284$ berarti antar variabel ini memiliki hubungan yang sangat kuat. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan yang sangat kuat antara k_L lindi dalam bentuk N_{Sh} dengan N_{Re} dan N_{Sc} . Hasil analisis koefisien determinasi ini prosentase keterhubungan antar variabel adalah 92,84%.

$$\left(\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \right) = 0.52497 \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{-0.3109} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right)^{0.9019} \quad 2.37.b$$

Selanjutnya persamaan 2.37.b ditata-ulang, diperoleh bentuk persamaan koefisien perpindahan massa, k_L sebagai berikut:

$$k_L = 0.52497 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1.2128} v^{-0.3109} D_L^{0.0981} d_i^{-1.3109} \quad 2.37.c$$

Persamaan 2.37.c, berlaku pada rentang pH 6,2 – 8,0, temperatur 27 – 45°C dan laju alir resirkulasi lindi, Q 0 – 24 L/mnt, serta konsentrasi substrat COD antara 6155,9 mg/L – 7445,11 mg/L dan BOD 3248,5 mg/L – 4104,18

mg/L. Persamaan 2.37.c, berlaku pada bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 0 - 465$, bilangan *Schmidt*, $N_{Sc} = 5700 - 47200$, dan bilangan *Sherwood*, $N_{Sh} = 0,00088 - 0,058612$.

Perbandingan beberapa korelasi empirik koefisien perpindahan massa yang didasarkan pada analisis bilangan tak-berdimensi, disajikan dalam Tabel 4.90. Bilangan *Reynolds*, N_{Re} menggambarkan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya kekentalan. N_{Re} menggambarkan karakteristik aliran dalam bioreaktor. Terlihat laju alir dalam bioreaktor berada pada aliran laminar dengan rentang N_{Re} anatar 0 - 2000 dan aliran laminar turbulent dengan N_{Re} 17000. Penelitian ini berada pada aliran laminar, $N_{Re} = 0, 100$ dan 400 dan kekentalan lindi berkisar antara 0,8230 - 0,8475g/cm.s.

Tabel 4.80. Korelasi empirik koefisien perpindahan massa berdasarkan analisis dimensional

No.	Laju Alir	Korelasi empirik	Bioreaktor	References
1.	$N_{Re} < 100$	$N_{Sh} = 2.076(N_{Re})^{0.5}(N_{Sc})^{0.5}$		Treyball, 1984
2.	Superficial velocity, $v_s = 360$ cm/h.	$\left(\frac{k_s d_p}{D_L}\right) \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L}\right)^{-1/3} \left(\frac{\varepsilon v_s \rho_L d_p}{\mu_L}\right)^{-1.0} = 1.90 \left(\frac{v_s \rho_L d_p}{(1-\varepsilon)\mu_L}\right)^{-0.50}$	Anaerobic fixed-bed bioreactor	Zaiat et al., 2000
3.	Aliran laminar, $N_{Re} = 2 - 2000$	$N_{Sh} = 2 + 0.95 N_{Re}^{0.50} N_{Sc}^{1/3}$		Geankoplis, 2003
	$N_{Re} = 2000 - 17000$	$N_{Sh} = 0.347 N_{Re}^{0.62} N_{Sc}^{1/3}$		
4.	Superficial velocity, $v_s = 0.5, 1.0, 2.0,$ and 4.0 m/h	$L = 1.1 D_w v_s^{-1.0} N_{Sc}^{2/3} N_{Re}^{0.51}$	UASB	Chou and Huang, 2005
5.	Aliran laminar, $N_{Re} \leq 2000$	$N_{Sh} = 0.332 N_{Re}^{1/2} N_{Sc}^{1/3}$		Welty et al., 2007
6.	Laju alir = 9.4 - 23.3 mL/s	$k_{La} = 26.17 \times 10^{-4} (J_G)^{0.647} \left(1 + \frac{A_d}{A_r}\right)^{0.853} \mu_{app}^{-1.844}$	Bioreaktor Fermentasi	Haryani dan Widayat, 2011
7.	$1000 < N_{Re} < 6000$	$\frac{k_{La} d_p^2}{D_L} = 2.2490 \left(\frac{N d_p^2 \rho}{\mu}\right)^{0.4687} \left(\frac{\mu}{\rho D_L}\right)^{0.5855} \left(\frac{d_b}{d_p}\right)^{0.1217}$	Bioreaktor Ekstraksi	Prosetyo dan Yosephine, 2012
8.	Aliran laminar, $N_{Re} = 0, 100$ dan 400	$N_{Sh} = 0.52497 N_{Re}^{-0.3109} N_{Sc}^{0.9019}$ $k_L = 0.52497 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1.2128} v^{-0.3109} D_L^{0.0981} d_i^{-1.3109}$	Bioreaktor anaerobik	Penelitian ini

4.8. State Of The Art: Aplikasi Korelasi Empirik

Koefisien perpindahan massa fase cair, k_L yang diperoleh pada pengolahan lindi TPA sampah kota jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan nilai k_L pada

pengolahan limbah cair yang lain, yaitu antara $1.10^{-7} - 1.10^{-6}$ cm/s ($3,6.10^{-4} - 3,6.10^{-3}$ cm/h). Hal ini menunjukkan bahwa lindi TPA sampah kota merupakan limbah cair yang spesifik dan sulit terbiodegradasi, sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mendegradasinya. Demikian juga, halnya laju alir dalam bioreaktor untuk limbah yang mengandung substrat organik volatile, bilangan *Reynolds* berada pada aliran laminar, tidak berada pada aliran *turbulent*.

Korelasi empirik merupakan gambaran hubungan koefisien perpindahan massa k_L , koefisien difusi zat terlarut, D_L terhadap variabel-variabel peubah (pH, laju alir resirkulasi dan temperatur) yang mempengaruhi karakteristik dan sifat lindi dalam bioreaktor anaerobik, yaitu: viskositas, densitas, dan konsentrasi zat terlarut (COD, BOD, VFA). Korelasi empirik yang diperoleh penelitian ini berada rentang pH 6,2 – 8,0, temperatur 27 – 45°C, konsentrasi substrat antara 6155,9 mg/L – 7445,11 mg/L dengan bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 0 - 465$, bilangan *Schmidt*, $N_{Sc} = 5700 - 47200$, dan bilangan *Sherwood*, $N_{Sh} = 0,00088 - 0,058612$.

Korelasi empirik memberikan pertimbangan teoritis dan empirik dalam desain bioreaktor dari data eksperimen skala laboratorium, skala pilot maupun *scale-up* ke skala industri. Dengan demikian, dalam perancangan bioreaktor anaerobik pengolahan lindi TPA sampah kota, hal-hal tersebut perlu diperhatikan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah, sebagai berikut:

1. pH, laju alir resirkulasi dan temperatur berpengaruh terhadap densitas, viskositas, COD, BOD dan VFA pada pengolahan anaerobik lindi dalam bioreaktor anaerobik. Pengaruh pH, laju alir resirkulasi dan temperatur berdampak pada jumlah massa zat terlarut yang terbiodegradasi sehingga mempengaruhi konsentrasi substrat organik terlarut lindi. Perubahan konsentrasi substrat organik terlarut lindi (COD, BOD), maka akan merubah densitas, viskositas, konsentrasi VFA dan tekanan biogas. Makin besar massa zat terlarut yang terbiodegradasi, maka makin tinggi pula penurunan densitas, viskositas, COD dan BOD.

Dengan uji Anova diperoleh pH berpengaruh secara signifikan terhadap densitas dan viskositas dengan P-value < 0.05 . pH tidak berpengaruh signifikan terhadap COD, BOD dan VFA dengan P-value > 0.05 . Laju alir berpengaruh signifikan terhadap densitas dengan P-value < 0.05 . Laju alir tidak berpengaruh signifikan terhadap viskositas, COD, BOD dan VFA. Temperatur berpengaruh signifikan terhadap densitas dan viskositas namun berpengaruh signifikan terhadap COD, BOD dan VFA. Kombinasi pH-Q-T tidak berpengaruh signifikan terhadap densitas, viskositas, COD dan BOD, dengan P-value > 0.05 berturut-turut 0.374, 0.291, 0.746 dan 0.847. Namun berpengaruh signifikan terhadap VFA, dengan P-value sebesar 0.031. Persentase penurunan densitas pada pH, laju alir resirkulasi dan temperatur serta kombinasi pH, laju alir resirkulasi, temperatur berturut-turut adalah 0.113%, 0.275%, 0.356% dan 0.428%. Sedangkan persentase penurunan viskositas pada pengaruh pH, Q, T dan kombinasi pH-Q-T berturut-turut adalah 9.468%, 13.763%, 15.804% dan 19.172%. Persentase penurunan COD pada kombinasi pH-Q-T $> T > Q > pH$, berturut-turut

adalah 85.31%, 81.73%, 81.55%, dan 81.43%. sedangkan persentase penurunan BOD pada kombinasi pH-Q-T > T > Q > pH, berturut-turut adalah 84.15%, 82.44%, 81.54%, dan 80.29%. pH, laju alir resirkulasi Q dan temperatur T berpengaruh terhadap konsentrasi VFA lindi. Konsentrasi VFA pada kombinasi pH-Q-T > T > Q > pH berturut-turut adalah 1699.70 mg/L, 1698.97 mg/L, 872.88 mg/L dan 370.63 mg/L.

2. Koefisien perpindahan massa fase cair, k_L pada pengolahan lindi TPA sampah kota jauh lebih rendah dibandingkan dengan nilai k_L pada pengolahan limbah cair yang lain. Lindi TPA sampah kota merupakan limbah cair yang spesifik, sulit terbiodegradasi sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mendegradasinya. pH, laju alir resirkulasi dan temperatur berpengaruh terhadap perpindahan massa fase cair pada pengolahan anaerobik lindi dalam bioreaktor anaerobik. Perpindahan massa fase cair pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik sangat bergantung pada konsentrasi massa substrat (COD) terlarut dalam lindi. Koefisien perpindahan massa k_L rata-rata yang diperoleh pada pH, Q, T dan kombinasi pH-Q-T berturut-turut adalah $5.6 \cdot 10^{-7}$ cm/s, $7.7 \cdot 10^{-7}$ cm/s, $8.0 \cdot 10^{-7}$ cm/s, dan $9.7 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Sedangkan koefisien difusi zat terlarut D_L , pH, Q, T dan kombinasi pH-Q-T berturut-turut adalah $3.0 \cdot 10^{-11}$ cm²/s, $2.3 \cdot 10^{-11}$ cm²/s, $2.4 \cdot 10^{-11}$ cm²/s dan $2.0 \cdot 10^{-11}$ cm²/s.
3. Korelasi empirik yang menunjukkan pengaruh pH, Q, T, dan kombinasi pH-Q-T terhadap perpindahan massa substrat organik terlarut pada pengolahan lindi TPA sampah kota dalam bioreaktor anaerobik, sebagai berikut:

$$\left(\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \right) = 0.52497 \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{-0.3109} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right)^{0.9019}$$

Dengan $R^2 = 0,9284$ berarti antar variabel ini memiliki hubungan yang sangat kuat. Analisis koefisien determinasi ini menunjukkan bahwa prosentase keterhubungan antar variabel yang berpengaruh adalah 92,84%. Persamaan ini yang berlaku pada rentang pH 6.2-8.0, temperatur 27-45°C dan laju alir resirkulasi lindi, Q 0-24 L/mnt, serta konsentrasi substrat

COD antara 6155,9 mg/L – 7445,11 mg/L dan BOD 3248,5 mg/L – 4104,18 mg/L. mg/L. Persamaan 2.37.c berlaku pada bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 0 - 465$, bilangan Schmidt, $N_{Sc} = 5700 - 47200$, dan bilangan *Sherwood*, $N_{Sh} = 0.00088 - 0.058612$.

5.2. Saran

Berdasarkan pembahasan dan simpulan yang diambil, maka beberapa hal yang perlu menjadi perhatian untuk penelitian selanjutnya adalah, sebagai berikut:

1. Proses perpindahan massa menunjukkan adanya hubungan dari zat terlarut yang terdifusi dengan gradien konsentrasi yang menjadi pendorong (*driving force*) penyebab perpindahan massa ini. Sehingga menggambarkan secara kuantitatif perpindahan massa masing-masing komponen merupakan hal yang sangat sulit, karena terjadi dalam suatu campuran yang kompleks dan multi fase. Maka evaluasi dan optimasi mengharuskan untuk mengamati pengaruh setiap komponen dan variabel yang berpengaruh, misalnya Ratio C/N, pengaruh N-organik, komposisi biogas yang dihasilkan.
2. Jika dilihat dari kondisi operasi, tekanan biogas, COD vs r_{kL} rata-rata per hari tertinggi, VFA vs COD. Maka diperoleh tekanan biogas tertinggi berada pada hari ke-23 – 27. Penurunan COD secara tertinggi terjadi pada hari ke-21 – 29. Konsentrasi VFA tertinggi pada semua kondisi operasi berada pada hari ke-25 – 31. Sedangkan r_{kL} rata-rata per hari tertinggi antara hari ke-29 – 31. Oleh karenanya, evaluasi dan optimasi selanjutnya akan diarahkan untuk mencari kondisi optimum operasi dalam bioreaktor.
3. Untuk meningkatkan produksi biogas dan menghindari inhibisi proses selanjutnya, maka perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai saponifikasi, *foaming* dan *scum* (buih) yang menghambat proses perpindahan massa.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A.A., Guo Jingsong, Liu Zhi Ping, Pan Ying Ya and Wisaam S. Al-Rekabi., 2009. Review on Landfill Leachate Treatments. *American Journal of Applied Sciences* 6 (4) 2009 ISSN 1546-9239, p. 672-684.
- Abdelgadir, A., Xiaoguang Chen, Jianshe Liu, Xuehui Xie, Jian Zhang, Kai Zhang, Heng Wang, and Na Liu., 2014. Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. *BioMed Research International* Volume 2014, Article ID 841573, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/841573>, pp. 1-10.
- Abdurahman, N.H., Y.M. Rosli and N.H., Azhari., 2013. The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A Review. *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control*, <http://dx.doi.org/10.5772/54331>, p.87-106.
- Abdurahman, N.H., Y.M. Rosli, N.H. Azhari, and S.F. Tam., 2011. Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent (POME) by Membrane Anaerobic System (MAS) using POME as a Substrate. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 51 2011, pp.419-424.
- Abubakar, B.S.U.I, and Nasir Ismail., 2012. Anaerobic Digestion Of Cow Dung For Biogas Production. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, ISSN 1819-6608, Vol. 7, NO. 2, February 2012, p. 169-172.
- Affes, R., J. Palatsi, X. Flotats, H. Carrère, J.P. Steyer, and A. Battimelli., 2013. Saponification pretreatment and solids recirculation as a new anaerobic process for the treatment of slaughterhouse waste. *Bioresource Technology* 131 (2013) 460–467.
- Ahring, B.K., 2003. Perspectives for anaerobic digestion. In : T. Scheper (Ed.). *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. 81 : 1-30. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ahring, B.K., Angelidaki, I., and Johansen, K., 1992. Anaerobic treatment of manure together with industrial waste. *Water Sci. Technol.*, 30, 241–249.
- Ahring, B.K., Ibrahim, A.A., and Mladenovska, Z., 2001. Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Res.* 35(10): 2446–2452. doi:10.1016/S0043-1354(00)00526-1. PMID:11394779.
- Alfaro, N., R. Cano, and F. Fdz-Polanco. 2014. Effect of thermal hydrolysis and ultrasounds pretreatments on foaming in anaerobic digesters. *Bioresource Technology* 170 (2014) 477–482.
- Alves, M.M., Mota Vieira, J.A., Álvares Pereira, R.M., Pereira, M.A., Mota, M., 2001. Effects of lipids and oleic acid on biomass development in anaerobic fixed-bed reactors. Part II: oleic acid toxicity and biodegradability. *Water Res* 35 (1) : 264–270. doi:10.1016/S0043-1354(00)00242-6
- Alves, M.M., Pereira, M.A., Sousa, D.Z., Cavaleiro, A.J., Picavet, M., Smidt, H., Stams, A.J.M., 2009. Waste lipids to energy: how to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). *Microbial Biotechnology* 2 (5), 538-550.

- Amani, T., M. Nosrati, and T.R. Sreerishnan., 2010. Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - a review. *Environ.* doi:10.1139/A10-011. Rev.18: 255–278 (2010).
- American Public Health Association (APHA)., 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th ed.; APHA: Washington DC, 1989.
- Ammary, B.Y., 2004. Nutrients requirements in biological industrial wastewater treatment. *African Journal of Biotechnology* Vol. 3 (4), April 2004, ISSN 1684–5315, pp. 236-238.
- Angelidaki, I., and Ahring B.K., 1992. Effects of free long chain fatty acids on thermophilic anaerobic digestion. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 37 (6): 808-812. Doi:10.1007/BF00174850
- Angelidaki, I., and Ahring B.K., 1997. Co-digestion of olive oil mill wastewater with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation*, 8, 221-226.
- Anonym, 2012. Materi Bidang Sampah: Pengolahan *Leachate*. Deseminasi dan Sosialisasi Keteknikan Bidang PLP. Direktorat Pengembangan Penyehatan Lingkungan Permukiman Dirjen Cipta Karya, Kementerian PU. Jakarta.
- Appels, L., Jan Baeyens., Jan Degre`ve., Raf Dewil., 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008) 755–781.
- Aquino, S.F., Stuckey D.C., 2008. Integrated model of the production of soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic chemostats during transient conditions. *Biochem Eng J* 2008; 38:138–46.
- Arogo, J., R. H. Zhang, G.L. Riskowski, L.L. Christianson, D.L. Day., 1999. Mass Transfer Coefficient of Ammonia in Liquid Swine Manure and Aqueous Solutions. *J. Agric. Engng Res.* (1999) 73, p.77-86.
- Asenjo, J.A., W.H. Sund, and J.L. Spencer. 1986. Optimalization Of Batch Processes Involving Simultaneous Enzymatic And Microbial Reaction. *J. Biotech. Bioengine.* 37: 1074-1087.
- Aziz, S.Q., Aziz, H.A., Yusoff, M.S., and Bashir, M.J.K., 2010. Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 91, 2608-2614. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.042>
- Barber, W.P, 2005. Anaerobic digester foaming: causes and solutions. *Water* 21 (FEB.), 45 – 49.
- Barjenbruch, M., Hoffmann, H., Kopplow, O., and Tranckner, J., 2000. Minimizing of Foaming in Digesters by Pre-Treatment of the Surplus-Sludge. *Water Science And Technology*, 42(9), 235-241.
- Barthakur, A., Bora M., Singh H.D., 1991. Kinetic Model For Substrate Utilization And Methane Production In The Anaerobic Digestion Of Organic Feeds. *Biotechnol Prog* 1991;7:369-376.
- Bates, R., and Massart, N., 2006. Design and Operational Considerations to Avoid Excessive Anaerobic Digester Foaming. *Water Environment Federation*, Kansas City, MO, 2006.

- Batstone, D.J., 2006. Review: Mathematical modelling of anaerobic reactors treating domestic wastewater: Rational criteria for model use. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* (2006) 5: 57–71. DOI 10.1007/s11157-005-7191-z.
- Batstone, D.J., Keller, J., Newell, R.B., Newland, M., 2000. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. I: model development. *Bioresour. Technol.*, 2000; 75, p.67–74.
- Batstone., D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T. M., Siegrist H., Vavilin V.A., 2002. Anaerobic Digestion Model No.1 Scientific and Technical Report, 13, IWA, London. *Water Science and Technology* Vol 45 No 10 pp 65-73.
- Battimelli, A., Hélène Carrère, Jean-Philippe Delgenès., 2009. Saponification of fatty slaughterhouse wastes for enhancing anaerobic biodegradability. *Bioresource Technology* 100 (2009) 3695–3700.
- Battimelli, A., M. Torrijos, R. Moletta, and J.P. Delgenès., 2010. Slaughterhouse fatty waste saponification to increase biogas yield. *Bioresource Technology* 101 (2010) 3388–3393.
- Bennet, C.O., and J.E. Myers., 1985. *Momentum, Heat and Mass Transfer. International Student Edition. Third Edition.* McGraw Hill Inc. New York.
- Benz, G.T., 2011. *Bioreactor Design for Chemical Engineers.* American Institute of Chemical Engineers (AIChE), August 2011. www.aiche.org/cep. p.21-26.
- Berthouex, P.M., and Brown, L.C., 2002. *Statistics for Environmental Engineers. Second Edition.* Lewis Publishers. CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431.
- Beux, S., Ezequiel Nunes, and Ana Cláudia Barana., 2007. Effect of Temperature on Two-phase Anaerobic Reactors Treating Slaughterhouse Wastewater. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, November 2007 Vol. 50, n. 6: pp. 1061-1072.
- Bolzonella, D., Paolo Pavan, Paolo Battistoni, Franco Cecchia. 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry* 40 (2005) 1453–1460.
- Borja, R., Esther Gonzalez, Francisco Raposo, Francisco Millan, And Antonio Martin, 2002. Kinetic Analysis of the Psychrophilic Anaerobic Digestion of Wastewater Derived from the Production of Proteins from Extracted Sunflower Flour. Accepted April 24, 2002. JF0116045.
- Briski, F., Vukovic, M., Papa, K., Gomzi, Z., Domanovac, T., 2007. Modelling of composting of food waste in a column reactor. *Chem. Pap.* 61, p.24–29.
- Bryant, M.P., 1979. Microbial Methane Production—Theoretical Aspects. *J. Anim. Sci.* 48: 193-201.
- Budiansyah, A., Resmi, K. G. Wiryawan, M. T. Soehartono, Y. Widyastuti, dan N. Ramli., 2010. Isolasi dan Karakterisasi Enzim Karbohidrase Cairan Rumen Sapi Asal Rumah Potong Hewan. Isolation and Characterization of Carbohydrases in Beef Cañle Rumen Liquor from Abattoir. ISSN 0126-0472, *Media Peternakan*, April 2010, hlm. 36-43.

- Budiyono, I.N. Widiyasa, S. Johari, and Sunarso, E., 2010. The Kinetic of Biogas Production Rate from Cattle Manure in Batch Mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 3:1 2010, p. 39-44.
- Budiyono, I.N. Widiyasa, Seno Johari, and Sunarso., 2014. Increasing Biogas Production Rate from Cattle Manure Using Rumen Fluid as Inoculums. *International Journal of Science and Engineering*, Vol. 6(1)2014:31-38. Doi: 10.12777/ijse.6.1.31-38
- Cammarota, M.C., Teixeira, G.A., Freire, D.M.G., 2001. Enzymatic pre-hydrolysis and anaerobic degradation of wastewaters with high fat content. *Biotechnol. Lett.* 23, 1591–1595.
- Carrere, H., Georgia Antonopoulou, Rim Affes, Fabiana Passos, Audrey Battimelli, Gerasimos Lyberatos, Ivet Ferrer., 2015. Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application. . *Bioresource Technology*, September 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.09.007
- Carrere, H., Y. Rafrafi, A. Battimelli, M. Torrijos, J.P. Delgenes, and C. Motte., 2012. Improving methane production during the codigestion of waste-activated sludge and fatty wastewater: Impact of thermo-alkaline pretreatment on batch and semi-continuous processes. *Chemical Engineering Journal* 210 (2012) 404–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.005>.
- Chaisri, R., Boonsawang, P., Prasertsan, P., and Chaiprapat, S., (2007) Effect of organic loading rate on methane and volatile fatty acids productions from anaerobic treatment of palm oil mill effluent in UASB and UFAF reactors. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 2: 311-323.
- Chen, J. and P. J. Weimer., 2001. Competition among three predominant ruminal cellulolytic bacteria in the absence or presence of non-cellulolytic bacteria. *J. Environ. Microbiol.* 147: 21-30.
- Chen, Y., Hashimoto, A., 1980. Substrate utilization kinetic model for biological treatment processes. *Biotechnol. Bioeng.*, 1980; 22: 2081–95.
- Chen, Y., Jay J. Cheng, and Kurt S. Creamer., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99 (2008) 4044–4064.
- Chipasa, K.B., Medrzycka K., 2006. Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes. *Journal Ind, Microbiol. Biotechnol.*, 33, 635-645.
- Cho, Y.T., and Young, J.C., 2001. Prediction of Gas Production and COD Removal of Two-Stage Cyclic Anaerobic Filters by Mass Transfer Models. *Environ. Eng. Res.* Vol. 6, No. 4, 2001, pp. 211-222.
- Choi, D.W, Woo Gi Lee, Seong Jin Lim, Byung Jin Kim, Ho Nam Chang, and Seung Teak Chang. 2003. Simulation on Long-term Operation of an Anaerobic Bioreactor for Korean Food Wastes. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 2003, Vol. 8, No. 1, p.23-31.
- Chotwattanasak, J., and Puetpaiboon, U., 2011. Full Scale Anaerobic Digester for Treating Palm Oil Mill Wastewater. *Journal of Sustainable Energy & Environment* 2 (2011), p.133-136.
- Chou, H.H., and Ju-Sheng Huang., 2005. Role of Mass Transfer Resistance in Overall Substrate Removal Rate in Upflow Anaerobic Sludge Bed

- Reactors. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 4, April 1, 2005. ISSN 0733-9372/2005/4-548–556 DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(2005) 131:4(548).
- Christensen, T.H., Peter Kjeldsen, Poul L. Bjerg, Dorthe L. Jensen, Jette B. Christensen, Anders Baun, Hans-Jorgen Albrechtsen, Gorm Heron., 2001. Review: Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes. *Applied Geochemistry* 16 (2001) 659-718.
- Cirne D.G., Paloumet X., Björnsson L., Alves M.M.and Mattiasson B., 2007. Anaerobic digestion of lipid-rich waste – Effects of lipid concentration, *Renewable energy*, 32, 965-975.
- Conrad, R., 1999. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentration in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiol. Ecol.* 28: 193-202.
- Crites, R.W., Joe Middlebrooks, and Sherwood C. Reed. 2006. *Natural Wastewater Treatment Systems*. Taylor & Francis Group, LLC. CRC Press.
- Cubas, S.A., E. Foresti, J.A.D. Rodrigues, S.M. Ratusznei, M. Zaiat., 2007. Effects of solid-phase mass transfer on the performance of a stirred anaerobic sequencing batch reactor containing immobilized biomass. *Bioresource Technology* 98 (2007), p. 1411-1417.
- Dalmau, J., Comas, J., Rodriguez-Ruda, J., Pagilla, K., and Steyer, J.P., 2010. Model Development and Simulation for Predicting Risk of Foaming in Anaerobic Digestion Systems. *Biosource Technology*, 101 (12), 4306–4314.
- Das, K.C., and Wensheng Qin., 2012. Isolation and characterization of superior rumen bacteria of cattle (*Bos taurus*) and potential application in animal feedstuff. *Open Journal of Animal Science* Vol.2, No.4, 224-228 (2012). <http://dx.doi.org/10.4236/ojas.2012.24031>.
- Demirel, B., Scherer, P., 2008. The Roles Of Acetotrophic And Hydrogenotrophic Methanogens Turing Anaerobic Conversion Of Biomass To Methane: A Review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7: 173-190.
- Demirel, B., Yenigun, O., Onaya, T.T., 2005. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. *Process Biochem.* 40, 2583–2595.
- Deublein, D., and Steinhauser, A., 2008. *Biogas from waste and renewable resources*. Weinheim, Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Dinopoulou, G., Rudd, T., Lester, J.N., 1988. Anaerobic asidogenesis of a complex wastewater: 1. The influence of operational parameters on reactor performance. *Biotechnol. Bioeng.* 31, 958–968.
- Doble, M., 2006. Avoid the Pitfalls of Bioprocess Development. *Bioprocessing*, August 2006. www.cepmagazine.org. p.34-41.
- Dohanyos, M., Zabranska, J., Kutil, J., Jenicek, P., 2004. Improvement of anaerobic digestion of sludge. *Water Science and Technology* 49, 10, 89-96.
- Droste, R.L., 1997. *Theory and Practice of Water and Wastewater treatment*, John Wiley and Sons, Inc.

- Dunn, I.J., E. Heinzle, J. Ingham, J. E. Pfenosil., 2003. *Biological Reaction Engineering*. Second, Completely Revised Edition. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN:3-527-30759-1.
- Eckenfelder, W.W. 1989. *Industrial Water Pollution Control*. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Eckenfelder, W.W., J.B. Patoczka, and G.W. Pulliam, 1989. *Anaerobic Versus Aerobic Treatment in the USA*. A Ware Incorporated, 227 French Landing Nashville, TN 37228, USA, pp. 105-114.
- El Hajjoui, H., Merlina, G., Pinelli, E., Winterton, P., Revel, J.C., and Hafidi, M., 2008. ¹³C NMR study of the effect of aerobic treatment of olive mill wastewater (OMW) on its lipid-free content. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154 (N°1-3). pp. 927-932. ISSN 0304-3894. DOI:10.1016/j.jhazmat.2007.10.105.
- Fabián, R.M., Gourdon, R., 1999. Effect of baling on the behavior of domestic wastes: laboratory study on the role of pH in biodegradation. *Bioresour. Technol.* 69, 15–22.
- Faisal, M., Unno, H., 2001. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. *Biochemical Engineering Journal* 9(2001): 25–31.
- Fang, H.H.P., Lau, I.W.C., and Wang, P., 2005. Anaerobic treatment of Hong Kong leachate followed by chemical oxidation. *QIWA Publishing 2005, Water Science & Technology*, Vol. 52, No. 10-11, pp.41–49.
- Feng, C., Sadoru Shimada, Zhenya Zhang, and Takaaki Maekawa, 2008. A pilot plant two-phase anaerobic digestion system for bioenergy recovery from swine wastes and garbage. *Waste Management* 28 (2008) 1827–1834.
- Ferry, J.G., 1999. *Enzymology Of One-Carbon Metabolism In Methanogenic Pathways*. *FEMS Microbiol. Rev.*, 23, 13–38.
- Firdha, I., Adrianto, A., dan Said Zul M., 2010. Pengaruh Waktu Tinggal Hidrolik (WTH) Terhadap Penyisihan BOD Limbah Cair Pabrik Minyak Sawit Menggunakan Bioreaktor Hibrid Anaerob Bermedia Batu Skala Pilot Plant. *Prosiding Seminar Nasional Fakultas Teknik UR*, ISBN 978-602-96729-0-9, hal. 1-10.
- Franco, A., A. Mosquera-Corral, J.L. Campos, E. Roca., 2007. *Learning to Operate Anaerobic Bioreactors. Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*, Formatex 2007, p. 618-627.
- Fry, L.J., 1974. *Practical Building of Methane Power Plant For Rural Energy Independence*. 2nd edition, Chapel River Press, Hampshire-Great Britain.
- Gamayanti, K.N., Ambar Pertiwinigrum, dan Lies Mira Yusiati., 2012. Influence Of The Use Rumen Liquid Waste And Peat Mud As Starter On Methanogenic Fermentation Processes. *Buletin Peternakan* ISSN 0126-4400, Februari 2012 Vol. 36(1): 32-39.
- Ganidi, N., Sean Tyrrel., Elise Cartmell., 2009. Anaerobic Digestion Foaming Causes – A review. *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 23, December 2009, p. 5546-5554.
- Ganidi, N., Tyrrel, S., Cartmell, E., 2011. The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal

- wastewater sludge. *Bioresource Technology* 102 (12), 6637–6643, doi:10.1016/j.biortech.2011.03.057
- Garaffa, C. and Gröll, K., 2013. Anaerobic digestion of compostable bags. *BioCycle* Vol. 54, No. 10, p.40.
- Geankoplis, C.J., 2003. *Transport Processes and Separation Process Principles. Fourth Edition.* International Edirion Pearson Prantice Hall, NJ.
- Gerardi, M.H., 2003. *The microbiology of anaerobic Digesters.* 1st ed. Somerset NJ: Wiley.
- Gerber, M., and Roland Span., 2008. An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. International Gas Union Research Conference IGRC, Paris.
- Ghyoot, W., Verstraete W., 1997. Anaerobic digestion of primary sludge from chemical pre-precipitation. *Water Sci Technol* 1997; 6-7: 357–65.
- Gossett, J.M., Belser, R.L., 1982. Anaerobic digestion of waste activated sludge. *J. Environ. Eng. ASCE* 108, p.1101–1120.
- Griffin, M.E., McMahan K.D., Mackie R.I., Raskin L., 2000. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnol. Eng.* 57: 342-355.
- Gujer, W., Zehnder, A.J.B., 1983. *Conversion Processes in Anaerobic Digestion.* Water Science and Technology, Vol. 15, 127 – 167.
- Gulsen, H., and Turan, M., 2004. Anaerobic Treatability of Sanitary Landfill Leachate in a Fluidized Bed Reactor. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 28 (2004), pp. 297-305.
- Hanaki, K., Nagase, M., Matsuo, T., 1981. Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnol Bioeng* 23 (7): 1591–1610. doi:10.1002/bit.260230717
- Hardyanti, N., dan Haryono Setiyo Huboyo., 2009. Evaluasi Instalasi Pengolahan Leachate Tempat Pembuangan Akhir Putri Cempo Kota Surakarta. *Jurnal Presipitasi* Vol. 6 No.1 Maret 2009, ISSN 1907-187X, hal. 52-56.
- Haryani, K., dan Widayat. 2011. Pengaruh Viskositas Dan Laju Alir Terhadap Hidrodinamika Dan Transfer Massa Dalam Proses Produksi Asam Sitrat Dengan Bioreaktor Air-Lift Dan Kapang *Aspergillus Niger*. *Reaktor*, Vol. 13 No. 3, Juni 2011, hal. 194-200.
- Hassan, M., and Xie, B., 2014. Use of aged refuse-based bioreactor/biofilter for landfill leachate treatment. *Appl Microbiol Biotechnol* (2014) 98:6543–6553, DOI 10.1007/s00253-014-5813-5
- Hassan, S.R., Haider M. Zwain and Irvan Dahlan., 2013. Development of Anaerobic Reactor for Industrial Wastewater Treatment: An Overview, Present Stage and Future Prospects. *Journal of Advanced Scientific Research*, ISSN 0976-9595, 2013, 4(1), p. 7-12
- Hatamoto, M., Imachi, H., Ohashi, A., Harada, H., 2007. Identification and cultivation of anaerobic, syntrophic long-chain fatty acid-degrading microbes from mesophilic and thermophilic methanogenic sludges. *Appl. Environ. Microbiol.* 73, 1332–1340.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J., Arvin E., 1997. *Wastewater Treatment.* second edition, Springer.

- Hossain, Sk.M., N. Anantharaman, and Manas Das., 2009. Anaerobis Biogas Generation from Sugar Industry Wastewater in Three-phase Fluidized-Bed Bioreactor. *Indian Journal of Chemical Technology*, Vol. 16, January 2009, pp.58-64.
- Hungate, R.E., 1966, *The Rumen and Its Microbes*. Academic Press, New York.
- Hwang, M.H., Jang, N.J., Hyun, S.H., and Kim, I.S., 2004. Anaerobic Biohydrogen Production from Ethanol Fermentation: The Role of pH. *J. Biotechnol.* 111(3): 297–309. doi:10.1016/j.jbiotec. 2004.04.024. PMID:15246666.
- Hwu C.S., van Lier, J.B., and Lettinga G., 1998. Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long chain fatty acids, *Process Biochemistry*, 33, 75-81.
- Indriyati, 2007. Unjuk Kerja Reaktor Anaerob Lekat Diam Terendam Dengan Media Penyangga Potongan Bambu. *J. Tek. Ling.* No. 3 Vol. 8, September 2007 ISSN 1441-318X, Hal. 217-222
- Isik, M., and Delia Teresa Sponza. 2005. Substrate removal kinetics in an upflow anaerobic sludge blanket reactor decolorising simulated textile wastewater. *Process Biochemistry* 40 (2005), p. 1189-1198. doi:10.1016/j.procbio.2004.04.014
- Jati, B.M.E., Karyono, Supriyatin., 2010. Penyetaraan Nilai Viskositas terhadap Indeks Bias pada Zat Cair Bening. *Berkala Fisika* ISSN : 1410 – 9662. Vol. 13, No. 4, Oktober 2010, hal. 119 – 124.
- Jeganathan, J., Nakhla, G., and Bassi, A., 2006. Long-term performance of high-rate anaerobic reactors for the treatment of oily wastewater. *Environ. Sci. Technol.*, 40:6466-6472.
- Jördening, H.J., and Buchholz, K., 2005. High-rate Anaerobic Wastewater Treatment. *Environmental Biotechnology. Concepts and Applications*. Edited by H.J. Jördening and J. Winter. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN: 3-527-30585-8, p.135-162.
- Jung, J.Y., Sang-Min Lee, Pyong-Kyun Shin, and Yun-Chul Chung., 2000. Effect of pH on Phase Separated Anaerobic Digestion. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* 2000, 5: 456-459.
- Kahar, A., Ghitarina, dan Suitsi Siswanto., 2012. Pengaruh Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Terhadap Kualitas Air Sekitar. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW)*, Surabaya, 11 Juli 2012, ISSN 2301-6752, p.H1-7.
- Kalyuzhnyi, S. V. and M.A. Davlyatshina, 1997. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling: I. Kinetic investigations. *Biores. Technol.* 59: 73-80.
- Kalyuzhnyi, S. V., 1997. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling: II. Description, verification and application of model. *Biores. Technol.* 59: 249-258.
- Kangle, K.M., V.S. Kore, and G.S. Kulkarni, 2012. Recent trends in anaerobic codigestion: a review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, vol.2, no.4, pp. 210-219.
- Kanu, I.R., T.J. Aspray, A.J. Adeloye., 2015. Understanding and Predicting Foam in Anaerobic Digester. *World Academy of Science, Engineering and*

- Technology. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering* Vol:9, No:10, 2015.
- Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, J., Rintala, J., 2002. Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. *Water Sci. Technol.*, 45, 275–280.
- Karakashev, D., Batstone D.J., Angelidaki, I., 2005. Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 331-338.
- Kawai, M., M. Kishi, M.R. Hamersley, N. Nagao, J. Hermana, T. Toda. 2012. Biodegradability and Methane Productivity during anaerobic co-digestion of refractory leachate. *International Biodeterioration and Biodegradation* 72 (2012), p. 46-51.
- Khalid, A., Muhammad Arshad, Muzammil Anjum, Tariq Mahmood, and Lorna Dawson, 2011. Review: The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31 (2011).1737–1744.
- Kigozi, R., A. Aboyade and E. Muzenda., 2014. Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock. *Int'l Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engg. (IJRCMCE)* Vol. 1, Issue 1(2014) ISSN 2349-1442 EISSN 2349-1450, p. 107–114, <http://dx.doi.org/10.15242/IJRCMCE.E1113563>.
- Kim, J., Park, C., Kim, T.H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.W., Lee, J., 2003. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. *J.Biosci. Bioeng.* 95, p.271–275.
- Kim, J.K., Baek Rock Oh, Young Nam Chun, and Si Wouk Kim, 2006. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. *Journal of Bioscience And Bioengineering*, Vol. 102, No. 4, 328–332. 2006, DOI: 10.1263/jbb.102.328.
- Klöckner, W., Riad Gacem, Tibor Anderlei, Nicole Raven, Stefan Schillberg, Clemens Lattermann and Jochen Büchs., 2013. Correlation between mass transfer coefficient kLa and relevant operating parameters in cylindrical disposable shaken bioreactors on a bench-to-pilot scale. *Journal of Biological Engineering* 2013,7:28. <http://www.jbioleng.org/content/7/1/28>, doi:10.1186/1754-1611-7-28.
- Kougias, P.G., K. Boe, S. O-Thong, L. A. Kristensen and I. Angelidaki. 2014. Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: a survey on causes and solutions. *Water Science & Technology*, 69.4, p. 889 - 895, doi: 10.2166/wst.2013.792
- Kraakman, N.J.R., Rocha-Rios, J., and van Loosdrecht, M.C., 2011. Review of mass transfer aspects for biological gas treatment. *Appl. Microbiol Biotechnol.* 2011 Aug;91(4):873-86. doi: 10.1007/s00253-011-3365-5.
- Kumar, S., Dhruv Katoria and Gaurav Singh. 2013. Leachate Treatment Technologies. *International Journal of Environmental Engineering and Management*. ISSN 2231-1319, Volume 4, Number 5 (2013), pp. 439-444.
- Kung, L. Jr., Treacher, R.J., Nauman, G.A., Smagala, A.M., Endres, K.M., & Cohen, M.A. 2000. The effect of treating forages with fibrolytic enzymes on its nutritive value and lactation performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 83: 115-122.

- Kusch, S., Oechsner, H., and Jungbluth, T., 2012. Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates. DOI: 10.1504/IJEW.2012.044161. *Int. J. Environment and Waste Management*, Vol. 9, Nos. 1/2, pp.69-88.
- Kusuryani, Y., dan Kosasih., 2015. Media Rumen Untuk Meningkatkan Produksi Gas Metana Batubara. *M&E*, Vol. 13, No. 1, Maret 2015
- Lalman, J., Bagley, D.M., 2002. Effects of C18 long chain fatty acids on glucose, butyrate and hydrogen degradation. *Water Res* 36 (13): 3307–3313. doi:10.1016/S0043-1354(02)00014-3
- Lalman, J.A., Bagley D.M., 2000. Anaerobic degradation and inhibitory effects of linoleic acid. *Water Res* 34 (17): 4220–4228. doi:10.1016/S0043-1354(00)00180-9
- Lawrence, A.W., McCarty, P. L., 1969. Kinetics of Methane Fermentation in Anaerobic Treatment. *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 41, R1-R17.
- Lee, D.H., Behera, S.K., Kim, J., Park, H.S., 2009. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab scale study. *Waste Manage.* 29, p.876–882.
- Leib, T.M., Carmo J. Pereira, and John Villadsen., 2001. Bioreactors: a chemical engineering perspective. *Chemical Engineering Science* 56 (2001) 5485–5497.
- Lettinga, G., 1995. *Anaerobic Digestion And Wastewater Treatment Systems*. J.Antonie van Leeuwenhoek, 67, 3–28.
- Lettinga, G., L.W. Hulshopp Pol, I.W. Koster, W.M. Wiegant, W.J. De Zeeuw, A. Rinzema, P.C. Grin, R.E. Roersma and S.W Hobma., 1984. High-Rate Anaerobic Wastewater Treatment Using the UASB Reactor under a Wide Range of Temperature Conditions. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, Vol. 2, Oktober 1984, 0264-8725/84/02/253-32, p.253-284.
- Li, W., Zhou, Q., and Hua1, T., 2010. Review Article Removal of Organic Matter from Landfill Leachate by Advanced Oxidation Processes: A Review. *International Journal of Chemical Engineering* Vol. 2010, Article ID 270532, 10 pages doi:10.1155/2010/270532.
- Liotta, F., Giuseppe d'Antonio, Giovanni Esposito, Massimiliano Fabbricino, Luigi Frunzo, Eric D van Hullebusch, Piet NL Lens and Francesco Pirozzi. 2014. Effect of moisture on disintegration kinetics during anaerobic digestion of complex organic substrates. *Waste Management & Research*, 2014, Vol 32(1) 40–48 DOI: 10.1177/0734242X13513827.
- Liu, C., Yuan, X., Zeng, G., Li, W., Li, J., 2008. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* 99, p.882–888.
- Long, J.H., Tarek N. Aziz, Francis L. de los Reyes III, and Joel J. Ducoste., 2012. Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Safety and Environmental Protection* 90 (2012) 231–245.
- Lubken, M., Marc Wichern, Markus Schlattmann, Andreas Gronauer, and Harald Horn, 2007. Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed

- with cattle manure and renewable energy crops. *Water Research*, 41 (2007), p.4085-4096.
- Ma, J., Quan-Bao Zhao, Lieve L. M. Laurens, Eric E. Jarvis, Nick J. Nagle, Shulin Chen and Craig S. Frear., 2015. Mechanism, kinetics and microbiology of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion of algal biomass. *Biotechnol Biofuels* (2015) 8:141. DOI 10.1186/s13068-015-0322-z.
- Macias-Corral, M., Samani, Z., and Hanson, A., 2008, Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresour. Technol.*, 99, 8288–8293.
- Mahmoud, N., G. Zeeman, H. Gijzen, and G. Lettinga, 2003. Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review. *Bioresource Technology*, vol.90, no.1, pp.1-9.
- Maier, R.M., 1999. Biochemical Cycling, Chapter 14. In: Maier RM, Pepper IL, Gerba CP (eds). *Environmental Microbiology*, Academic Press, pp. 319-346.
- Manjunath, N.T., Mehrotra, I. and Mathur, R.P., 2000. Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF-UASB system. *Wat. Res.* 34(6):1930-1936.
- Mardina, P., Ajang Gunawan, dan M. Imam Nugraha, 2012. Penentuan Koefisien Transfer Massa Ekstraksi Kalium dari Abu Batang Pisang. *Konversi*, Volume 1, No.1, Oktober 2012, hal. 39-44.
- Masse, D.I., and Droste, R.L., 2000. Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in an sequencing batch reactor. *Water Res* 2000;34: 3087–106.
- McCabe, W.L., Julian C. Smith dan Peter Harriot. 1990. *Operasi Teknik Kimia*. Jilid I dan II. Edisi keempat. Terjemaham E. Jasjfi. Erlangga. Jakarta.
- McInerney, M.J., Bryant, M.P., 1981. Review of methane fermentation fundamentals, in: *Fuel Gas Production from Biomass*, ed. Wise, D.L., CRC Press, Boca Raton, p.19-46.
- Merlin, G., François Kohler., Maele Bouvier., Thierry Lissolo., Hervé Boileau., 2012. Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context. *Bioresource Technology* 124 (2012), p.59–67.
- Mirwan, A., 2013. Keberlakuan Model HB-GFT Sistem n-Heksana – Mek – Air Pada Ekstraksi Cair-Cair Kolom Isian. *Konversi*, Volume 2 No. 1, April 2013, hal. 32-38.
- Mitchell, R., dan Ji-Dong Gu., 2010. *Environmental microbiology*. Second edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Moeller, L., Herbes, C., Müller, R. A. & Zehnsdorf, A., 2010. Formation and removal of foam in the process of Anaerobic Digester. *Landtechnik* 65, 3 (Energy production), pp. 207-207.
- Moertinah, S., 2010. Kajian Proses Anaerobik Sebagai Alternatif Teknologi Pengolahan Air Limbah Industri Organik Tinggi. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan dan Pencemaran Industri* Vol. 1 No. 2, November 2010, hal. 104-114.
- Mojiri, A., Hamidi Abdul Aziz, Nastaiein Qamaruz Zaman and Shuokr Qarani Aziz, 2012. A Review on Anaerobic Digestion, Bio-reactor and Nitrogen

- Removal from Wastewater and Landfill Leachate by Bio-reactor. *Advances in Environmental Biology*, 6(7): ISSN 1995-0756, p.2143-2150.
- Monit, M., 2009. Bioprocess Design: The Geogas Project: Bioremediation of geothermal gases and SCP production with HOX/SOX bacteria. A Master's thesis done at RES the School for Renewable Energy Science. in affiliation with University of Iceland & the University of Akureyri Akureyri, February 2009. www.res.is.
- Montgomery, D.C., 2004. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, NY.
- Mosey, F.E., 1983. Mathematical modeling of anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose. *Wat. Sci. Technol.* 15: 209-217.
- Nacheva, P. M.; Chavez, G. M.; Chacon, J. M.& Chuil, C., 2009. Treatment of cane sugar mill wastewater in an upflow anaerobic sludge bed reactor. *Water Science and Technology*, 60, 5, 1347-1352
- Najafpour, G.D., and M.H. Sadeghpour, 2012. Evaluation And Characterization Of Biological Processes: Aerobic Verses Anaerobic Processes. *Linnaeus ECO-TECH 2012*, Kalmar, Sweden, November 26-28, 2012, p. 245-259.
- Najafpour, G.D., B.A. Hashemiyeh, M. Asadi and M.B. Ghasemi., 2008. Biological Treatment of Dairy Wastewater in an Upflow Anaerobic Sludge-Fixed Film Bioreactor. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 4 (2): 251-257, 2008, ISSN 1818-6769.
- Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Hasnain Isa, M., and Nasrollahzadeh, H., 2006. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluents in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochem.*, 41:370–379.
- Nealson, K.M., 1997. Sediment Bacteria: Who's there, what are they doing, and what's new? *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 25: 403-434.
- Nielsen, H.B., Ahring, B.K., 2006. Responses of the biogas process to pulses of oleate in reactors treating mixtures of cattle and pig manure. *Biotechnol Bioeng* 95(1):96–105. doi:10.1002/bit.20963
- Nikolaeva, S., Sánchez, E., and Borja, R. 2013. Dairy Wastewater Treatment by Anaerobic Fixed bed Reactors from Laboratory to pilot-scale plant: A case study in Costa Rica Operating at Ambient Temperature. *Int. J. Environ. Res.*, 7(3):759-766, Summer 2013, ISSN: 1735-6865
- Nopharatana, A., Pratap C. Pullammanappallil., William P. Clarke., 2006. Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digesters of municipal solid waste in a stirred reactor. Elsevier Ltd. All rights reserved.
- Noutsopoulos, C., D. Mamais, K. Antoniou, C. Avramides, 2012. Increase Of Biogas Production Through Co-Digestion Of Lipids And Sewage Sludge. *Global NEST Journal*, Vol 14, No 2, pp 133-140.
- O'flaherty, V., Gavin Collins., Th' Er` Ese Mahony., 2010. Anaerobic Digestion of Agricultural Residues. In *Environmental Microbiology*, Second Edition Edited by Ralph Mitchell and Ji-Dong Gu. Second edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 259-279.
- Omed, H.M., D.K. Lovettand, R., and F.E. Axford., 2000. Faeces as A Source of Microbial Enzymes for Estimating Digestibility. In: *Forage Evaluation in*

- Ruminant Nutrition, D.I. Givens, E. Owen, R.F.E. Axford dan H.M. Omed (Eds). CABI Publising. New York. p. 135-150.
- Padilla, G.E., Alberto López López., 2010. Kinetics of Organic Matter Degradation in an Upflow Anaerobic Filter Using Slaughterhouse Wastewater. *J. Bioremed Biodegrad*, Volume 1 Issue 2 1000106. ISSN:2155-6199, hal. 1-6.
- Padmono, D., 2007. Kemampuan Alkalinitas Kapasitas Penyanggan (Buffer Capacity) Dalam Sistem Anaerobik Fixed Bed. *J. Tek.Ling.*, Mei 2007 ISSN 1441-318 Vol.8 No.2 Hal.119-127.
- Padmono, D.J., 2003. Pengaruh Beban Organic Terhadap Efisiensi Anaerobic Fixed Bed Reactor Dengan System Aliran Catu Up-Flow. *J. Teknik Lingkungan P3TL BPPT*.4(3). Hal. 148-154.
- Padmono, Dj., dan Susanto, J.P., 2007. Biogas Sebagai Energi Alternatif Antara Mitos Dan Fakta Ilmiah. *J.Tek.Ling.*, Januari 2007, 8 (1), ISSN 1441-318, p.34-42.
- Pagilla, K.R., Craney, K.C., and Kido, W.H., 1997. Causes and effects of foaming in anaerobic sludge digesters. *Water Sci. Technol.* 36 (6–7), 463–470.
- Pandian, M., Huu-Hao NGO, and Pazhaniappan, S., 2011. Substrate Removal Kinetics of an Anaerobic Hybrid Reactor Treating Pharmaceutical Wastewater. *Journal of Water Sustainability*, Vol. 1, 3(2011), p.301-312.
- Parawira, W., Readc, J.S., Mattiassona, B., Bjornsson, L., 2008. Energy Production From Agricultural Residues: High Methane Yields In Pilot scale Two-Stage Anaerobic Digestion, *Biomass Bioenergy*, 32: 44-50.
- Park, Y., Tsuno, H., Hidaka, T., Cheon, J., 2008. Evaluation of operational parameters in thermophilic acid fermentation of kitchen waste. *J. Mater. Cycl. Waste Manage.* 10, p.46–52.
- Pavlosthatis, S.G., Giraldo-Gomez, E., 1991. Kinetics of anaerobic treatment. *Water Science and Technology*, Vol. 24 (8): 35-59.
- Pereira, M.A., Cavaleiro, A.J., Mota, M., and Alves, M.M., 2003. Accumulation of long chain fatty acids onto anaerobic sludge under steady state and shock loading conditions: effect on acetogenic and methanogenic activity. *Water Sci Technol* 48(6):33–40.
- Pereira, M.A., Pires, O.C., Mota, M., Alves, M.M., 2005. Anaerobic biodegradation of oleic and palmitic acids: evidence of mass transfer limitations caused by long chain fatty acid accumulation onto the anaerobic sludge. *Biotechnology and Bioengineering* 92 (1), 15-23.
- Pereira, M.A., Sousa, D.Z., Mota, M., Alves, M.M., 2004. Mineralization of LCFA associated with anaerobic sludge: kinetics, enhancement of methanogenic activity and effect of VFA. *Biotechnology and Bioengineering* 88 (4), 502-511.
- Peres, J., J. Munoz-Dorado, T. de la Rubia, and J. Martinez., 2002. Biodegradation and biological treatment of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 5 : 53-56.
- Petersen, J., and Petrie, J.G., 2000. Modelling and assessment of the longterm leachate generation potential in deposits of ferro-chromiun slags. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, October 2000, SA ISSN 0038–223X, p. 355-364.

- Poh, P.E., Chong, M.F., 2009. Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresour. Technol.* 100, p. 1–9.
- Pohland, F.G., 1992. Anaerobic treatment: fundamental concepts, applications, and new horizons, in: *Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes*, ed. Malina, J.F.; Pohland, F.G., CRC Press, London, pp. 1–33.
- Pohland, F.G., and Harper, S.R., 1985. *Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills*. U.S. Environmental Protection Agency, Ohio, p.165.
- Polprasert, C., 2007. *Organic Waste Recycling: Technology and Management*. IWA Publishing.
- Prasetyo, S., dan Yosephine, F., 2012. Model Perpindahan Massa Pada Ekstraksi Saponin Biji Teh Dengan Pelarut Isopropil Alkฮอล์ 50% Dengan Pengontakan Secara Dispersi Menggunakan Analisis Dimensi. *Reaktor*, Vol. 14 No. 2, Oktober 2012, Hal. 87-94
- Price, E.C., and Cheremisinoff, P.N., 1981. *Biogas Production and Utilization*. Ann Arbor Science Publishers, Inc. United States of America.
- Priyono, A., Adrianto A., Bahruddin. 2012. Kajian aklimatisasi Proses Pengolahan Limbah Cair Pabrik Sagu Secara Anaerob. *Prosiding SNTK TOPI 2012*, ISSN 1907-0500, hal. 155-159.
- Purwati, S., dan Rina S. Soetopo, 2006. Biogas and Organic Compost Production by Anaerobic Digestion of Paper Industry Sludge from Wastewater Treatment Plant. *BS*, Vol. 41, No. 1, 2006, hal. 30-36.
- Quemeneur, M., and Marty, Y., 1994. Fatty acids and sterols in domestic wastewater, *Wat. Res.*, 28, 5, 1217-1226.
- Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V.V.N., 2000. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 135-156.
- Ramos, A.C.T., Suzana M. Ratusznei, José A.D. Rodrigues, Marcelo Zaiat, 2003. Mass transfer improvement of a fixed-bed anaerobic sequencing batch reactor with liquid-phase circulation. *Interciencia*, vol. 28, no. 4, April, 2003, 0378-1844/03/04/214-06, pp. 214-219.
- Raunkjaer, K., Hvitved-Jacobsen, T., Nielsen P.H., 1994. Measurement of pools of protein, carbohydrate and lipid in domestic wastewater, *Water Research*, 28, 251-262.
- Rehm, H.J., Reed, G., Puhler, A., and Stadler, P.J.W., 2000. *Biotechnology*. Vol. 11A: Environmental processes I, 2nd ed. New York: Wiley, 2000.
- Reid, R.C., Jhon M. Prausnitz, and Thomas K. Sherwood., 1991. *Sifat Gas dan Zat Cair*. Edisi ketiga. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. *The Properties of Gases and Liquids*. Third Edition. McGraw-Hill, Inc.
- Renou, S., J.G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan and P. Moulin., 2008. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials* 150 (2008), 0304-3894, doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.077, p. 468–493.
- Reynolds, T.D. and Paul A. Richards 1996. *Unit Operations and Processes in Enviromental Engineering*. Second Edition. PWS Publishing, Boston.

- Rinzema, A., Boone, M., van Knippenberg, K., Lettinga, G., 1994. Bactericidal effect of long chain fatty acids in anaerobic digestion. *Water Environmental Research* 66 (1), 40-49.
- Rode, L.M, 2002, Maintaining a Healthy Rumen An Overview, Research Centre Agriculture and Agri-food Canada: Lethbridge.
- Russell, T.W.F., Anne Skaja Robinson and Norman J. Wagner., 2008. Mass and Heat Transfer: Analysis Of Mass Contactors And Heat Exchangers. Cambridge University Press, 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473,USA.
- Safari, E., Jalili Ghazizade, M., Shokouh, A., and Nabi Bidhendi, Gh.R., 2011. Anaerobis Removal of COD from High Strength Fresh and Partialla Stabilized Leachate and Application of Multi stage Kinetics Model. *Int. J. Environ. Res.* 5(2), Spring 2011, ISSN: 1735-6865, pp. 255-270.
- Schink, B., 1997. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microb. Mol. Biol. Rev.* 61: 262-280.
- Schink, B., 2002. Synergistic interactions in the microbial world. *J. Antonie van Leeuwenhoek*, 81, 257–261.
- Sekiguchi, Y., Kamagata, Y., 2004. Microbial Community Structure And Functions In Methane Fermentation Technology For Wastewater Treatment. In Nakano, M. M., and Zuber, P. (eds.), *Strict and Facultative Anaerobes: Medical and Environmental Aspects*. Horizon Bioscience, Norwich, U.K. pp. 361–384.
- Sekiguchi, Y., Kamagata, Y., Harada, H., 2001. Recent advances in methane fermentation technology. *Curr. Opin. Biotechnol.*,12, 277–282.
- Shewani, A., Pierre Horgue, Sébastien Pommier, Gérald Debenest, Xavier Lefebvre, Emmanuel Gandon, Etienne Paul., 2015. Assessment of percolation through a solid leach bed in dry batch anaerobic digestion processes.(2015) *Bioresource Technology*, vol. 178. pp. 209-216. ISSN 0960-8524, DOI:10.1016/j.biortech.2014.10.017
- Shin, H.S., Song, Y.C., 1995. A Model for Evaluationof Anaerobic Degradation Characteristics of Organic Waste: Focusing on Kinetics, Rate-Limiting Step. *Environmental Technology*, Vol. 16, 775-784.
- Siedlecka, E.M., J. Kumirska, T. Ossowski, P. Glamowski, M. Gołębiowski, J. Gajdus, Z. Kaczyński, P. Stepnowski., 2008. Determination of Volatile Fatty Acids in Environmental Aqueous Samples. *Polish J. of Environ. Stud.* Vol. 17, No. 3 (2008), 351-356.
- Skillman LC, Evans PN, Naylor GE, Morvan B, Jarvis GN, Joblin KN. 2004. 16S Ribosomal DNA-directed PCR primers for ruminal methanogens and identification of methanogens colonising young lambs. *Anaerobe* 10: 277-285.
- Soetopo, R.S., Sri Purwati, Yusup Setiawan, Krisna Adhytia .W., 2011. The Effectivity Of Continuous Process Of Two-Stage Anaerobic Digestion On Biological Sludge Treatment Of Paper Industry. *Jurnal Riset Industri* Vol. V, No.2, 2011, Hal 131-142.
- Sötemann, S.W., Van Rensburg, P., Ristow, N.E., Wentzel, M.C., Loewenthal, R.E., and Ekama, G.A., 2005. Integrated Chemical, Physical and

- Biological Processes Modelling Part 2 - Anaerobic Digestion of Sewage Sludges. *Water SA* 31(4) 545-568.
- Souza, M.A.B.B., Oliveira, M.B., Araújo, A.S.F., de Castro J.A., 2014. Analyze of the Density and Viscosity of Landfill Leachate in Different Temperatures. *American Journal of Environmental Engineering* 2014, 4(4): 71-74. DOI: 10.5923/j.ajee.20140404.01
- Spellman, F.R., 2013. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*, Third Edition, CRC Press.
- Stams, A.J.M., S.J.W.H. Oude Elferink, and P. Wastermann., 2003. Metabolic interactions between methanogenic consortia and anaerobic respiring bacteria. In : T. Scheper (Ed.): *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 81 : 31-56. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Stegmann, R., K.U. Heyer and R. Cossu. 2005. Leachate Treatment. *Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October 2005. by CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy.
- Stronach, S.M., Rudd, T., Lester, J.N., 1986. *Anaerobic Digestion Processes In Wastewater Treatment*. Berlin: Springer.
- Subramanian, B., and Pagilla, K., 2015. Mechanisms of foam formation in anaerobic digesters. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Volume 126, pp. 621-630.
- Sugiyana, D., 2008. Metode Biologi Anaerobik-Aerobik Dan Pengolahan Limbah Cair Tekstil. *J. Arena Tekstil* Vol.23. No.1, Oktober 2008, pp.1-11.
- Sunny, A., Philip Odonkor, Nkoebe Theko, Adrianus van Haandel and Willy Verstraete, 2010. Technical Problems Ensuing From UASB Reactor Application in Domestic Wastewater Treatment without Pre-Treatment. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol.1, No.5, December 2010, ISSN: 2010-0264, pp. 392-398.
- Suryawanshi, P.C., Chaudhari A.B., Bhardwaj S., and Yeole T.Y., 2013. Operating Procedures for Efficient Anaerobic Digester Operation. *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences*, ISSN 2320 – 6535, Vol. 1(2), March (2013), 12-15.
- Tabatabaei, M., Alawi Sulaiman, Ali M. Nikbakht., Norjan Yusof., Ghasem Najafpour. 2011. Influential Parameters on Biomethane Generation in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. ISBN: 978-953-307-372-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com>
- Tamas, A., R. Martagiu, R. Minea. 2007. Experimental Determination of Mass Transfer Coefficients in Dissolution Processes. *Chem. Bull. Politehnica*. Vol. 52 (66), 1-2, 2007, p. 133-138.
- Tatsi, A.A., A.I. Zouboulis, K.A. Matis, P. Samaras., 2003. Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere* 53 (2003) 737–744. doi:10.1016/S0045-6535(03)00513-7.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D., 2004. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Fourth Edition. Metcalf & Eddy Inc, McGraw-Hill Co.

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S.A., 1993. Integrated solid waste management engineering principles and management issues (1st ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Thibodeaux, L.J., 1996. Environmental Chemodynamics: Movement of Chemical in Air, Water, and Soil. Second Edition. Awiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. NY.
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., Neis, U., 2001. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration For Improving Anaerobic Stabilization. *Water Res* 2001; 35:2003–9.
- Torkian, A., Eqbali, A., Hashemian, S.J., 2003. The effect of organic loading rate on the performance of UASB reactor treating slaughterhouse effluent. *Res. Conserv. Recyc.* 40:1-11.
- Treybal, R.E. 1984. Mass-Transfer Operations. Mc Graw Hill International Book Company.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA)., 2006. Process Design Manual: Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents. Land Remediation and Pollution Control Division, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio. EPA/625/R-06/016, September 2006.
- Valladão, A.B.G., Torres, A.G., Freire, D.M.G., Cammarota, M.C., 2011. Profiles of fatty acids and triacylglycerols and their influence on the anaerobic biodegradability of effluents from poultry slaughterhouse. *Bioresource Technology* 102 (2011) 7043–7050.
- Van Lier, J.B., Mahmoud, N., and Zeeman, G., 2008. Anaerobic Wastewater Treatment: Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design. Edited by M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama, and D. Brdjanovic. ISBN: 9781843391883. IWA Publishing, London, UK. p. 401-441.
- Vardar-Sukan, F., 1998. Foaming: Consequences, Prevention and Destruction. *Biotech. Advances.* 16(5-6), 913-948.
- Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Lokshina. L.Y., Pavlostathis, S.G., Barlaz, M.A., 2002. Distributed model of solid waste digestion-effects of leachate recirculation and pH adjustment. *Biotechnol Bioeng* 2002;81:66-73.
- Veeken, A., Hamelers, B., 1999. Effect of Temperature on Hydrolysis Rates of Selected Biowaste Components. *Bioresource Technology*, Vol. 69, 249 – 254.
- Veeken, A., Sergey Kalyuzhnyi, Heijo Scharff, and Bert Hamelers., 2000. Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 12, December, 2000, ISSN 0733-9372/00/0012, p.1076-1081.
- Visser, A., Gao, Y., Lettinga, G., 1993. Effects of pH on methanogenesis and sulphate reduction in thermophilic (55°C) UASB reactors. *Bioresour. Technol.* 44, 113–121.
- Wang, Q., Kuninobu, M., Kakimoto, K., Ogawa, H.I., Kato, Y., 1999. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment. *Bioresour. Technol.* 68, 309–313.

- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L., 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 99, p.7928–7940.
- Welty, J.R., Charles E. Wicks, Robert E. Wilson, and Gregory L. Rorrer. 2007. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Westlund, A. D., Hagland, E., Rothmann, M., 1998. Operational Aspects on Foaming in Digesters Caused by *Microthrix Parvicella*. *Water Science And Technology*, 38(8-9), 29-34.
- Widayat, Abdullah, D. Soetrisnanto dan M. Hadi., 2011. Perpindahan Massa Gas–Cair Dalam Proses Fermentasi Asam Sitrat Dengan Bioreaktor Bergelembung. *Momentum*, Vol. 7, No. 2, Oktober 2011 : 14-17.
- Widjaja, T., Ali Altway, Pritha Prameswarhi, dan Freshnny Sabrina Wattimena., 2008. Pengaruh HRT Dan Beban COD Terhadap Pembentukan Gas Methan Pada Proses Anaerobic Digestion Menggunakan Limbah Padat Tepung Tapioka. *Prosiding Seminar Nasional Soebardjo Brotohardjono “Pengolahan Sumber Daya Alam Dan Energi Terbarukan”* Surabaya, 18 Juni 2008. ISSN 1978-0427.
- Widjaya, T., dan Lindu Sunarko., 2007. Pengaruh Perbandingan Nutrisi Terhadap Pengolahan Minyak Secara Biologis Dengan Bakteri Mixed-Culture. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Vol. 6, No. 2 Agustus 2007, hal. 755-762.
- Wiesmann, U., In Su Choi., Eva-Maria Dombrowski., 2007. *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-31219-1.
- Wilkie, A.C., 2005. Anaerobic digestion of dairy manure: Design and process considerations. *Dairy manure management: Treatment, handling, and community relations*. NRAES-176, Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Cornell University, Ithaca, NY. p.301-312.
- Williams, J.A., 2002. Keys to Bioreactor Selections. *Bioreactions*, March 2002. www.cepmagazine.org. p.34-41.
- Wong, B.T., Kuan-Yeow Show, Ay Su, Rui-jyun Wong, and Duu-Jong Lee., 2007. Effect of Volatile Fatty Acid Composition on Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Performance. *International Conference on Bioenergy Outlook 2007*, Singapore, April 26–27.
- Xie, S., Lawlor, P.G., Frost, J.P., Wu, G., Zhan, X., 2012. Hydrolysis and acidification of grass silage in leaching bed reactors. *Bioresour. Technol.* 114, 406–413. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.008>.
- Yu, L., Pierre Christian Wensel, Jingwei Ma and Shulin Chen., 2013. Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD). *Bioremediation & Biodegradation*, J Bioremed. Biodeg. S4: 003. doi:10.4172/2155-6199, pp. 1-12.
- Yu, Y., Xiwu Lu., and Yifeng Wu, 2014. Performance of an Anaerobic Baffled Filter Reactor in the Treatment of Algae-Laden Water and the Contribution of Granular Sludge. *Water* 2014, 6, 122-138; doi:10.3390/w6010122.

- Zaiat, M., Jose´ Alberto Domingues Rodrigues, Eugenio Foresti., 2000. External and internal mass transfer effects in an anaerobic fixed-bed reactor for wastewater treatment. *Process Biochemistry* 35 (2000), p.943-949.
- Zainol, N.A., Hamidi Abdul Aziz and Mohd Suffian Yusoff., 2012. Characterization of Leachate from Kuala Sepetang and Kulim Landfills: A Comparative Study. *Energy and Environment Research*; E-ISSN 1927-0577, Vol. 2, No. 2; 2012, doi:10.5539/eer.v2n2p45, p. 45-52.
- Zhu, B., Gikas, P., Zhang, R., Lord, J., Jenkins, B., Li, X., 2009. Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor. *Bioresour. Technol.* 100, p.1122–1129.
- Ziemiński, K., and Fraç, M., 2012. Review: Methane Fermentation Process As Anaerobic Digestion Of Biomass: Transformations, Stages And Microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, ISSN 1684–5315, Vol. 11(18), pp. 4127-4139.
- Zinatizadeh, A.A.L., A.R. Mohamed, G.D. Najafpour, M. Hasnain Isa, H. Nasrollahzadeh., 2006. Kinetic Evaluation Of Palm Oil Mill Effluent Digestion In A High Rate Up-Flow Anaerobic Sludge Fixed Film Bioreactor. *Process Biochemistry* 41 (2006) 1038–1046.
- Zonta, Z., M.M. Alves, X. Flotats, J. Palatsi., 2013. Modelling inhibitory effects of long chain fatty acids in the anaerobic digestion process. *Water Research* 47 (2013), p.1369-1380.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran A.

1. Penentuan T, pH; dan v_R .

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Temperatur, T yang terdiri dari temperatur ambient (T_1), *mesophilic* (T_2) pada temperatur 35°C, sedangkan *thermophilic* (T_3) pada temperatur 45°C.
2. Derajat keasaman, pH yang terdiri dari $pH_1 = pH$ lindi, $pH_2 = pH$ optimum untuk pengolahan anaerobik pada 7,2; dan $pH_3 = > pH$ optimum pada 8.0
3. Laju alir resirkulasi, v yang terdiri dari: v_{R1} , v_{R2} dan v_{R3} .

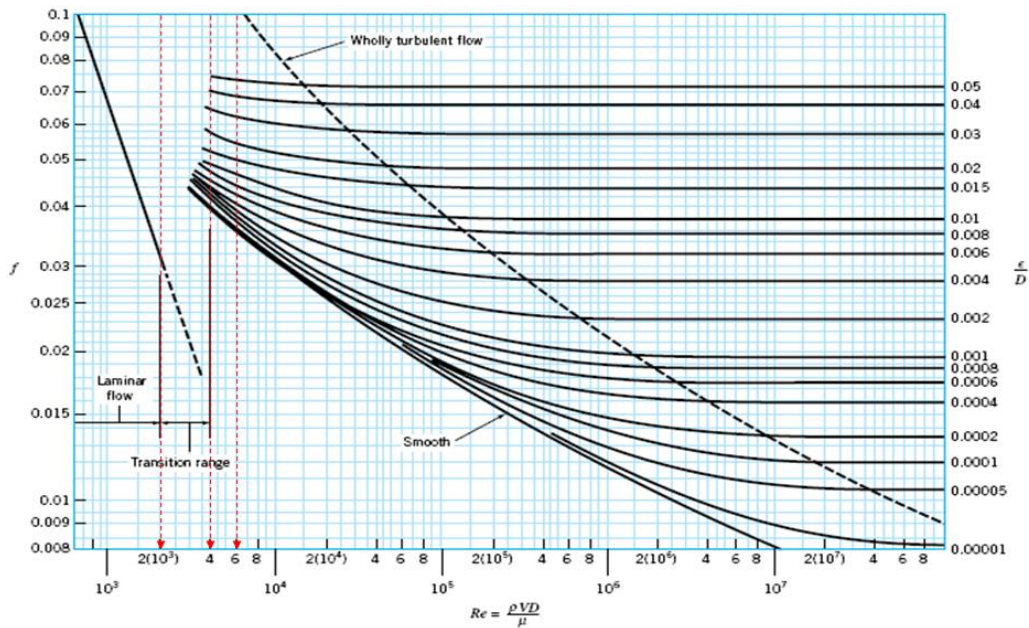
Sedangkan variabel terikat dalam penelitian ini adalah densitas lindi, ρ (g/cm^3), viskositas, μ ($g/cm.s$), tekanan biogas, BOD, COD dan VFA (mg/L).

Penentuan temperatur dan pH didasarkan pada penelusuran pustaka. Sedangkan penentuan laju alir resirkulasi lindi, v_R didasarkan pada sifat aliran yang berpengaruh terhadap transfer massa (Treybal, 1984). Bilangan *Reynolds*, N_{Re} menyatakan batasan antara aliran laminar dan aliran turbulenta, seperti pada Gambar 3.1. (Mc Cabe *et al.*, 1990). Bilangan *Reynolds* untuk aliran laminar berada pada $N_{Re} \leq 2000$, untuk aliran transisi aliran laminar dan turbulenta dengan $N_{Re} = 2000 - 4000$, dan untuk aliran turbulenta dengan $N_{Re} \geq 4000$. Namun untuk laju alir fluida yang mengandung bahan organik volatil bukan berada pada kisaran turbulenta tetapi berada pada aliran yang laminar dengan kisaran bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 100 - 400$ (Crites *et al.*, 2006; US EPA, 2006).

Sehingga pada penelitian ini dipilih laju alir resirkulasi lindi adalah sebagai berikut:

1. v_{R1} adalah 0 L/s, dengan $N_{Re} = 0$.
2. v_{R2} adalah aliran laminar dengan $N_{Re} = 100$.
3. v_{R3} adalah aliran laminar dengan $N_{Re} = 400$.

Dari persamaan Bilangan *Reynolds* sebagai berikut $N_{Re} = \frac{d_i \cdot v_R \cdot \rho}{\mu}$



Gambar 3.1. Diagram Moody (sumber: Mc Cabe *et al.*, 1990).

Dimana:

d_i = diameter dalam pipa, cm atau m;

v_R = laju alir resirkulasi, cm/s;

ρ_L = densitas lindi, g/cm³

μ_L = viskositas lindi, g/cm.s.

Tata ulang persamaan N_{Re} diperoleh, *superfisial velocity*, $v_R = \frac{N_{Re} \cdot \mu_L}{d_i \cdot \rho_L}$;

m/s. Dan luas penampang pipa, A adalah: $A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_i)^2$; m², Sehingga laju alir

volumetrik adalah, $Q_R = v_R \cdot A$; m³/s. Dimana 1 L = 0,001 m³.

Sehingga;

Dimana:

$d_i = 0,5 \text{ inch} = 1,27 \text{ cm} = 0,0127 \text{ m}$;

$\rho_L = 1,00089 \text{ g/cm}^3$

$\mu_L = 0,842415 \text{ g/cm.s.}$

$N_{Re} = 100.$

Jadi; *superfisial velocity*, v_R :

$$v_R = \frac{N_{Re} \cdot \mu_L}{di \cdot \rho_L} = \frac{100 \cdot 0,842415 \text{ g/cm.s}}{1,27 \text{ cm} \cdot 1,00098 \text{ g/cm}^3} = \frac{84,2415 \text{ g/cm.s}}{1,271245 \text{ g/cm}^2} = 66,267 \text{ cm/s}$$

$$v_R = 66,267 \text{ cm/s} = 0,66267 \text{ m/s}$$

Sehingga laju alir volumetrik, $Q_R = v_R \cdot A$

Dimana;

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (di)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0127 \text{ m})^2 = 1,267 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga laju alir volumetrik, Q_R :

$$Q_R = 0,66267 \text{ m/s} \cdot 1,267 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Dimana: $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$

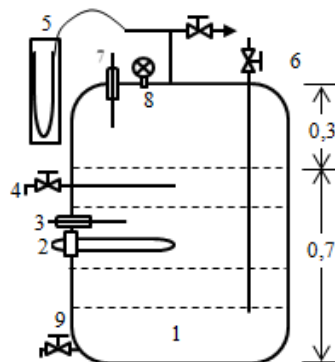
1 menit = 60 s

Maka

$$Q_R = 8,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 0,084 \text{ L/s}$$

$$Q_R = 0,084 \frac{\text{L}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ menit}} = 5,04 \text{ L/mnt}$$

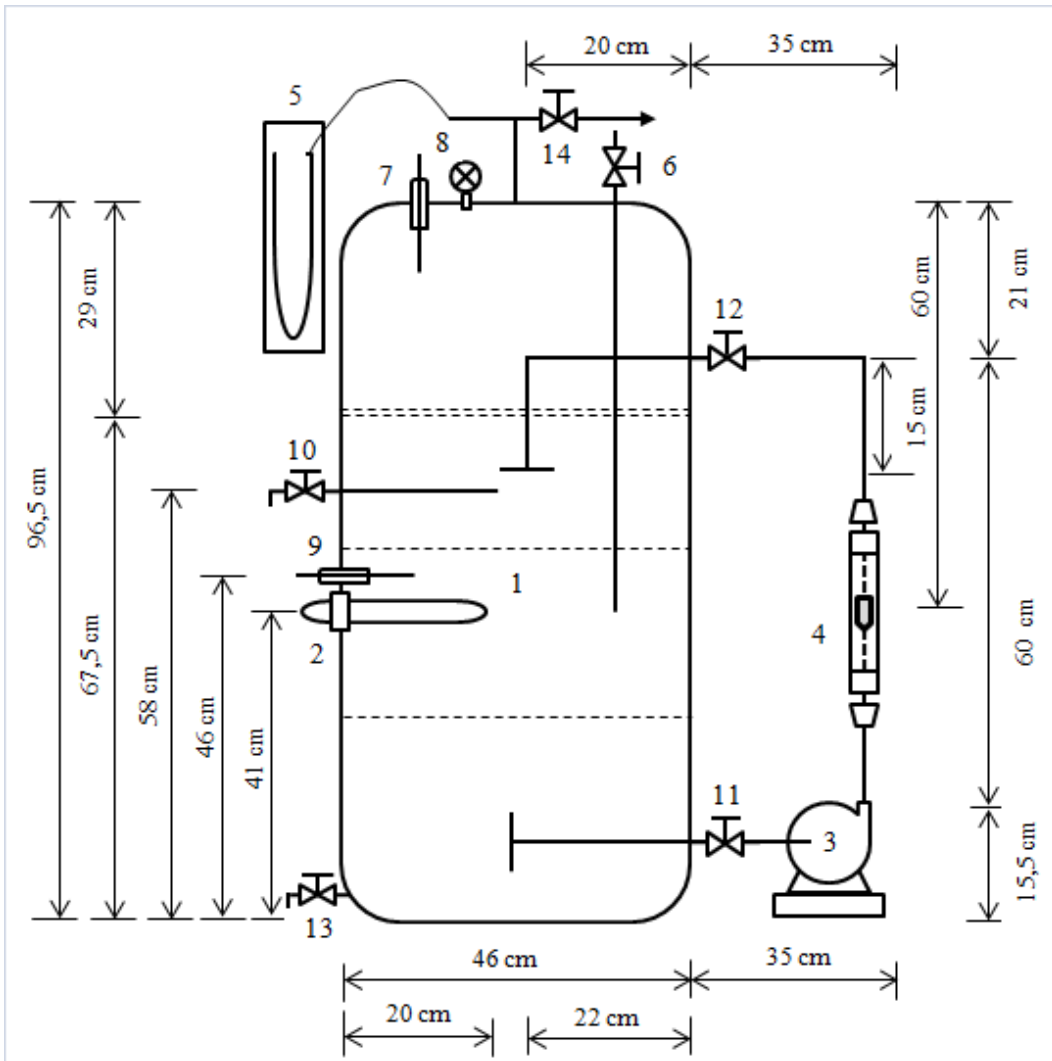
2. Penentuan Volume Bioreaktor



Gambar 3. Rangkaian Bioreaktor seeding dan aklimatisasi

Keterangan:

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Bioreaktor anaerobik | 6. Inlet umpan masuk lindi |
| 2. Pemanas | 7. Termometer biogas |
| 3. Termometer lindi | 8. <i>Pressure gauge</i> |
| 4. <i>Sampling port</i> | 9. <i>Effluent</i> lindi |
| 5. Manometer | |



Gambar 4. Rangkaian Bioreaktor Anaerobik yang digunakan dalam penelitian

Keterangan:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Bioreaktor anaerobik | 8. <i>Pressure gauge</i> |
| 2. Pemanas | 9. Termometer lindi |
| 3. Pompa resirkulasi lindi | 10. <i>Sampling port</i> |
| 4. <i>Flowmeter</i> resirkulasi lindi | 11. Kran masuk resirkulasi lindi |
| 5. Manometer | 12. Kran keluar resirkulasi lindi |
| 6. Inlet umpan masuk lindi | 13. <i>Effluent</i> lindi |
| 7. Termometer biogas | |

Diketahui:

$$t = 96,5 \text{ cm}$$

d = 46 cm sehingga r = 23 cm

1L = 1000 cm³

Maka Volume bioreaktor adalah

$$V_R = \pi \cdot r^2 \cdot t = 3.14 \times (23\text{cm})^2 \times 96.5\text{ cm} = 160373.6\text{ cm}^3$$

$$V_R = 160373.6\text{ cm}^3 \times \frac{1\text{ L}}{1000\text{ cm}^3} = 160.37\text{ L} \approx 160\text{ L}$$

Pompa resirkulasi dan *flowmeter* lindi yang digunakan:

1. Konsumsi daya listrik : 220 V
2. N : 2900 menit⁻¹
3. Daya dorong, H : 20 m
4. Daya hisap, Hs : maks. 9 m (*suction head*)
5. Laju alir Q : 10 – 18 L/mnt
6. Temperatur : maks. 40 °C
7. Diameter pipa hisap dorong : ½"
8. *Flowmeter* resirkulasi lindi : 2 – 36 L/mnt

“halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran B.

1. Pembuatan Larutan *Buffer*

1. Larutan *buffer* fosfat pH 7

Ditimbang NaH_2PO_4 50 mM sebanyak 0,4024 gram dan $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 50 mM sebanyak 0,9228 gram. Lalu kedua bahan dilarutkan dengan akuades dan dituang dalam beaker 500 ml.

2. Larutan *buffer* pH 7,2

Ditimbang KH_2PO_4 sebanyak 6,805 gram kemudian masukkan ke labu takar 500 mL. Tuangi dengan akuades $\frac{1}{4}$ labu dan homogenkan, tambahkan lagi akuades sampai tanda batas dan diambil sebanyak 34,7 mL. Setelah itu dibuat larutan baku NaOH dengan menimbang sebanyak 4 gram kemudian diencerkan dengan akuades bebas CO_2 sedemikian sehingga diperoleh larutan NaOH 0,1 M, diambil sebanyak 15,3 mL. Lalu kedua bahan dilarutkan dengan akuades dan dituang dalam beaker 500 ml.

3. Larutan *buffer* pH 8.0

Ditimbang KH_2PO_4 sebanyak 6,805 gram kemudian masukkan ke labu takar 500 mL. Tuangi dengan akuades $\frac{1}{4}$ labu dan homogenkan, tambahkan lagi akuades sampai tanda batas dan diambil sebanyak 46,1 mL. Setelah itu dibuat larutan baku NaOH dengan menimbang sebanyak 4 gram kemudian diencerkan dengan akuades bebas CO_2 sedemikian sehingga diperoleh larutan NaOH 0,1 M, diambil sebanyak 3,9 mL. Lalu kedua bahan dilarutkan dengan akuades dan dituang dalam beaker 500 ml.

2. Analisis COD

Pengukuran *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan metode refluks tertutup secara titrimetri.

A. Alat dan Bahan

1. *Digestion vessel*
2. Pemanas dengan lubang-lubang penyangga tabung (*heating block*)
3. Mikroburet
4. Labu ukur 100 mL dan 1000 mL
5. Pipet volumetrik 5 mL, 10 mL, dan 25 mL
6. Pipet ukur 5 mL, 10 mL, dan 25 mL
7. *Erlenmeyer*
8. Gelas piala
9. *Magnetic stirrer*
10. Timbangan analitik dengan ketelitian 0,1 mg
11. Air bebas organik
12. Larutan pereaksi asam sulfat
13. Larutan baku kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,01667 M ($\approx 0,1$ N)
14. Larutan indikator ferroin
15. Larutan baku Ferro Ammonium Sulfat (FAS) 0,05 M
16. Asam sulfamat (NH_2SO_3H)
17. Larutan baku Kalium Hidrogen Ftalat ($HOOC_6H_4COOK$, KHP) \approx COD
500 mg O_2/L

B. Pembuatan Reagen

a. Larutan pereaksi asam sulfat

1. Larutkan 10,12 g serbuk atau kristal Ag_2SO_4 ke dalam 1000 mL H_2SO_4 pekat
2. Aduk hingga larut

b. Larutan baku kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,01667 M ($\approx 0,1$ N)

1. Larutkan 4,903 g $K_2Cr_2O_7$ yang telah dikeringkan pada suhu $150^\circ C$ selama 2 jam ke dalam 500 mL air bebas organik.
2. Tambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat dan 33,3 g $HgSO_4$
3. Larutkan dan dinginkan pada suhu ruang dan encerkan sampai 1000 mL

c. Larutan indikator ferroin

1. Larutkan 1,485 g 1,10-phenatrolin monohidrat dan 695 mg $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dalam air bebas organik
2. Encerkan sampai 100 mL

d. Larutan baku Ferro Ammonium Sulfat (FAS) 0,05 M

1. Larutkan 19,6 g $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ dalam 300 mL air bebas organik
2. Tambahkan 20 mL H_2SO_4 pekat
3. Dinginkan dan tepatkan sampai 1000 mL

e. Asam sulfamat (NH_2SO_3H)

1. Digunakan jika ada gangguan nitrit
2. Tambahkan 10 mg asam sulfamat untuk setiap mg NO_2-N yang ada dalam contoh uji

f. Larutan baku Kalium Hidrogen Ftalat ($HOOC C_6H_4 COOK$, KHP) \approx COD 500 mg O_2/L

1. Gerus perlahan KHP lalu keringkan sampai berat konstan pada suhu $110^\circ C$.
2. Larutkan 425 mg KHP ke dalam air bebas organik dan tepatkan sampai 1000 mL

C. Persiapan contoh uji

1. Homogenkan contoh uji
2. Cuci *digestion vessel* dan tutupnya dengan H_2SO_4 20% sebelum digunakan

D. Pengawetan contoh uji

Bila contoh uji tidak dapat segera diuji, maka contoh uji diawetkan dengan menambahkan H₂SO₄ pekat sampai pH lebih kecil dari 2 dan disimpan dalam pendingin pada temperatur 4°C ± 2°C dengan waktu simpan maksimum yang direkomendasikan 7 hari.

E. Persiapan pengujian

Lakukan standarisasi larutan baku FAS dengan larutan baku kalium dikromat setiap melakukan pengujian dengan cara :

1. Pipet 5 mL *digestion solution* ke dalam *erlenmeyer*
2. Tambahkan air bebas organik sejumlah contoh uji dan dinginkan pada suhu ruang
3. Tambahkan 1 – 2 tetes indikator ferroin dan titrasi dengan larutan titrasi FAS
4. Hitung kembali molaritas larutan

Molaritas FAS

$$= \frac{\text{Volume } 0,1 \text{ N larutan } K_2Cr_2O_7 \text{ (mL)}}{\text{Volume FAS yang digunakan (mL)}} \times \text{Normalitas digestion solution}$$

F. Prosedur

1. Pipet volume contoh uji dan tambahkan *digestion solution* dan tambahkan larutan pereaksi asam sulfat ke dalam tabung atau ampul
2. Tutup tabung dan kocok perlahan sampai homogen
3. Letakkan tabung pada pemanas yang telah dipanaskan pada suhu 150°C, lakukan *digestion* selama 2 jam
4. Dinginkan perlahan-lahan contoh uji yang sudah direfluks sampai suhu ruang
5. Pindahkan secara kuantitatif contoh uji dan *tube* atau ampul ke dalam *erlenmeyer* untuk titrasi
6. Tambahkan indikator ferroin 0,05 mL – 0,1 mL atau 1 – 2 tetes dan aduk dengan pengaduk magnetik sampai dititrasi dengan larutan baku FAS 0,05

M sampai terjadi perubahan warna yang jelas dari hijau-biru menjadi coklat-kemerahan, catat volume larutan FAS yang digunakan

7. Lakukan langkah 1 sampai dengan langkah 6 terhadap air bebas organik sebagai blanko. Catat volume larutan FAS yang digunakan

G. Perhitungan COD sebagai mg/L O₂:

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(A - B) \times M \times 8000}{\text{mL contoh uji}}$$

dimana:

A : volume larutan FAS yang dibutuhkan untuk blanko (mL)

B : volume larutan FAS yang dibutuhkan untuk contoh uji (mL)

M : molaritas larutan FAS

8000 : berat miliequivalent oksigen x 1000 mL/L

3. Analisis BOD₅

Pengukuran *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) menggunakan metode Winkler berdasarkan prinsip titrasi iodometri.

A. Alat dan Bahan

1. Botol Winkler yang volumenya telah diketahui dengan ketelitian ± 0,1 mL lengkap dengan tutupnya.
2. Kotak incubator
3. Pipet ukur 10 mL
4. Gelas arloji
5. Pipet tetes
6. Erlenmeyer 250 mL
7. Labu ukur 100 mL
8. MnSO₄ 2H₂O 20 g
9. NaOH 26 g
10. KI 7,5 g
11. NaN₃ 0,5 g

12. Indikator amilum
13. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 3,1025 g
14. $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,1205 g
15. KI murni 2 g
16. H_2SO_4 4 N 40 ml
17. Akuades

B. Pembuatan Reagen

a. Larutan Mangan Sulfat

1. Larutkan $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 20 g didalam 50 mL akuades pada labu takar
2. Larutan alkali-iodide-azida.
3. Larutkan secara terpisah 25 g NaOH, 7,5 g KI dan 0,5 g NaN_3 . Campurkan dalam labu takar dan diencerkan dengan akuades sampai 50 ml lalu didinginkan
4. Larutan tiosulfat 0,025 N.
5. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 3,1025 g dilarutkan dalam labu takar dengan akuades sampai 500 mL. Diawetkan dengan tambahan 0,25 g NaOH.
6. Standarisasi larutan tiosulfat dengan titrasi $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,025 N untuk meningkatkan ketelitian.
7. Dilarutkan 0,1205 gr dalam labu ukur 100 mL ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sebelumnya harus dikeringkan pada suhu 105°C selama 2 jam lalu didinginkan dalam desikator). Dipipet 20 ml larutan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ke dalam Erlenmeyer 250 mL diencerkan dengan aquades sampai 100 ml ditambah 2 gr KI murni dan 10 mL H_2SO_4 4 N. dikocok dan disimpan dalam pada tempat gelap selama 5 menit. Dititrasi dengan larutan natrium tiosulfat yang akan distandarkan bila warna kuning dalam larutan hamper hilang ditambah 2 mL indikator amilum. Diteruskan titrasi sampai warna biru yang baru muncul habis menjadi bening.

C. Cara kerja Penentuan DO:

1. Dipipet 2 mL larutan mangan sulfat kedalam sampel yang ada dalam botol winkler dimana penambahan dilakukan di bawah permukaan cairan

2. Ditambah 2 mL larutan alkali-iodida-azida kemudian botol ditutup kembali untuk mencegah udara terperangkap udara luar, kemudian dikocok dengan membalik-balikkan botol beberapa kali.
3. Dibiarkan 10 menit agar gumpalan mengendap.
4. Setelah pengendapan sempurna, maka bagian larutan yang jernih dikeluarkan dari botol dengan menggunakan pipet; sebanyak kurang lebih 100 mL dipindahkan dalam Erlenmeyer 500 mL.
5. Ditambahkan 2 mL H₂SO₄ pekat dikocok, dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 250 mL.
6. Dititrasi dengan larutan tiosulfat 0,025 N sampai timbul warna kuning pucat.
7. Ditambah indikator kanji 1-2 mL sehingga timbul warna biru. Titrasi dilanjutkan sampai warna biru hilang, dicatat volum titrasi dan volume contoh.

D. Perhitungan:

Penentuan nilai oksigen terlarut (DO) dengan rumus:

$$\text{DO (mg/L)} = \frac{V \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 8 \times 1000}{V \text{ sampel}}$$

Perhitungan BOD (mg/L) = (DO₀ - DO₅)

4. Analisis VFA

Pengukuran konsentrasi VFA menggunakan Metode *Steam Distillation*.

A. Alat dan Bahan

Larutan sampel, asam sulfosalisila, larutan NaOH 0,1 N, H₂SO₄ 15% dan indikator PP (*Phenolphthaline*). Peralatan yang digunakan terdiri dari labu erlenmeyer, sentrifius 15000 rpm, pipet 25 ml, pipet tetes, alat distilasi dan buret.

B. Metode Distilasi

1. Cairan sampel disaring dengan kain kasa secara 2 (dua) kali
2. Disentrifus 15000 rpm selama 10 menit dan dipipet sebanyak 25 ml.

3. Dimasukkan ke dalam alat distilasi.
4. Ditambahkan 5 ml asam sulfat 15%.
5. Didistilasi dan distilat ditampung sampai kira-kira volume 300 ml.
6. Ditambahkan 2 tetes indikator PP ke dalam distilat.
7. Distilat kemudian dititrasi dengan larutan NaOH 0,1 N sampai berwarna merah lembayung yang stabil.

Perhitungan:
$$\text{VFA total} = \frac{\text{mL NaOH} \times 0,1 \times 1000 \text{ mmol (mM)}}{\text{mL contoh}}$$

5. Pengukuran Densitas dan Viskositas Lindi

Menentukan densitas dan viskositas lindi dengan menggunakan piknometer dan viskosimeter *Ostwald*.

Viskositas suatu cairan murni atau larutan merupakan indeks hambatan alir cairan. Secara numerik harga viskositas zat cair jauh lebih besar daripada gas dan nilai viskositas ini akan berkurang dengan cepat bila temperatur bertambah. Viskositas zat cair di bawah titik didih normal tidak secara khusus dipengaruhi oleh tekanan sedang, tetapi pada tekanan sangat tinggi, banyak peneliti menjumpai kenaikan viskositas yang besar. Semakin besar nilai viskositas dari larutan maka tingkat kekentalan larutan tersebut semakin besar pula.

Salah satu alat pengukur viskositas zat cair adalah viskosimeter *Ostwald*. Pada viskosimeter *Ostwald* yang diukur adalah waktu yang dibutuhkan sejumlah tertentu cairan untuk mengalir melalui pipa kapiler dengan gaya yang disebabkan oleh berat cairan itu sendiri. Waktu yang dibutuhkan untuk mengalirnya sejumlah tertentu cairan dicatat, dan viskositas η dihitung dengan hubungan :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2}$$

Dimana: (viskositas dinyatakan dalam Poise)

μ_1 = viskositas air

μ_2 = viskositas larutan yang diukur

ρ_1 = densitas air

ρ_2 = densitas larutan yang diukur

t_1 = waktu alir air

t_2 = waktu alir larutan yang diukur

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan adalah viskosimeter Ostwald, piknometer 10 mL, *stopwatch*, neraca analitik dan termometer. Bahan yang digunakan: akuades dan larutan yang diukur : lindi

Pengukuran densitas larutan

Masukkan larutan yang akan diukur densitasnya ke dalam piknometer hingga penuh, perhatikan jangan sampai terdapat gelembung udara pada saat piknometer ditutup. Timbang piknometer dan catat masanya.

$$\rho_{Larutan} = \frac{m_{pa} - m_{pk}}{v \text{ piknometer}}$$

Dimana :

$\rho_{Larutan}$ = densitas larutan, g/cm³

m_{pk} = massa piknometer kosong, g

m_{pa} = massa piknometer + aquades, g

v = volume piknometer, mL

Pengukuran viskositas larutan

Sejumlah tertentu cairan dimasukkan dalam viskosimeter. Cairan kemudian diisap melalui labu pengukur dari viskosimeter sampai permukaan cairan lebih tinggi dari batas "A", kemudian cairan dibiarkan turun. Ketika permukaan melewati batas "A", *stopwatch* mulai dinyalakan dan ketika cairan melewati batas "B", *stopwatch* dimatikan. Waktu yang dibutuhkan cairan untuk melewati jarak antara "A" dan "B" dicatat. Dengan menggunakan persamaan:

$$\mu_{Lindi} = \mu_{aquades} \frac{\rho_L t_L}{\rho_{aquades} t_{aquades}}$$

Dimana :

μ_{Lindi} = viskositas lindi, g/cm.s

μ_{aquades} = viskositas aquades, g/cm.s

ρ_{L} = densitas lindi, g/cm³

ρ_{aquades} = densitas aquades, g/cm³

t_{L} = waktu alir lindi, s

t_{aquades} = waktu alir aquades, s

Langkah Kerja

1. Tentukan densitas zat cair yang akan ditentukan viscositasnya menggunakan piknometer
2. Masukkan zat cair ke dalam viscometer Oswald
3. Sedot hingga batas yang paling atas
4. Pasang stopwatch, mulai saat zat cair turun dari tanda batas itu dan berhenti saat zat cair berada di tanda batas bagian bawahnya
5. Catat berapa lama zat cair itu turun
6. Ulangi sampai 3 kali
7. Ulangi dengan zat lain.

Lampiran C. Contoh Perhitungan

1. Perhitungan Densitas dan Viskositas

Perhitungan densitas dan viskositas lindi diukur dengan menggunakan piknometer dan viskosimeter *Ostwald*.

Massa kosong piknometer = 16.0818 g

Massa piknometer + aquades = 25.943 g

Massa piknometer + lindi = 25.9556 g

No.	t aquades, s	t lindi, s
1	4.2	4.5
2	4.2	4.5
3	4.4	4.5
Rata-rata	4.267	4.5

Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Massa aquades} &= (\text{Massa piknometer} + \text{aquades}) - (\text{Massa kosong piknometer}) \\ &= 25.943 \text{ g} - 16.0818 \text{ g} = 9.8612 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa Lindi} &= (\text{Massa piknometer} + \text{lindi}) - (\text{Massa kosong piknometer}) \\ &= 25.9556 \text{ g} - 16.0818 \text{ g} = 9.8738 \text{ g} \end{aligned}$$

Selanjutnya:

Densitas aquades:

$$\rho_{\text{aquades}} = \frac{m_{pa} - m_{pk}}{v \text{ piknometer}} = \frac{25.943 \text{ g} - 16.0818 \text{ g}}{10 \text{ mL}} = 0.98612 \text{ g/mL}$$

Densitas lindi:

$$\rho_L = \frac{m_{pa} - m_{pk}}{v \text{ piknometer}} = \frac{25.9556 \text{ g} - 16.0818 \text{ g}}{10 \text{ mL}} = 0.9878 \text{ g/mL}$$

Viskositas lindi:

$$\mu_{\text{Lindi}} = \mu_{\text{aquades}} \frac{\rho_L t_L}{\rho_{\text{aquades}} t_{\text{aquades}}}$$

Dimana berdasarkan Tabel A.2-4. Viscosity of Liquid Water, pada temperatur 27°C diperoleh $\mu_{aquades} = 0.85485 \text{ g/cm.s}$ (Geankoplis, 2003).

$$\mu_{Lindi} = 0.85485 \text{ g/cm.s} \frac{0.9878 \text{ g / mL} \times 4.5 \text{ s}}{0.98612 \text{ g / mL} \times 4.267 \text{ s}} = 0.9031 \text{ g/cm.s}$$

2. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Fase Cair, k_L

Perhitungan koefisien perpindahan massa fase cair, k_L menggunakan data konsentrasi substrat yang diekspresikan sebagai COD. Untuk contoh perhitungan ini, data COD diambil dari Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi lindi.

Data yang dibutuhkan hanya data waktu, t hari dan COD sebagai berikut:

Waktu; t hari	COD	
	mg/L	g/cm ³
21	6625.40	0.0066254
22		
23	5280.38	0.0052804
24		
25	4587.37	0.0045874
26		
27	3457.78	0.0034578
28		
29	3399.34	0.0033993
30		
31	2928.98	0.0029290
32		
33	2437.90	0.0024380
34		
35	2371.64	0.0023716
36		
37	2120.64	0.0021206
38		
39	2103.45	0.0021035
40		
41	1866.03	0.0018660

Diketahui:

$$1 \text{ mg} = 0,001 \text{ g}$$

$$1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$$

Sehingga

$$\text{COD} = 6625.4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{0,001 \text{ g}}{1 \text{ mg}} = 0.0066254 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{COD} = 5280.38 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{0,001 \text{ g}}{1 \text{ mg}} = 0.0052804 \text{ g/cm}^3$$

Dan seterusnya

Perhitungan $\ln \frac{[S]_0}{[S]_t}$ adalah sebagai berikut:

$$\ln \frac{0.0066254}{0.0052804} = 0.22691$$

$$\ln \frac{0.0066254}{0.0045874} = 0.36760$$

$$\ln \frac{0.0066254}{0.0034578} = 0.65028$$

Dan seterusnya.

Hasil diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	COD g/cm ³	ln [S] ₀ /[S] _t
21	0.0066254	
22		
23	0.0052804	0.22691
24		
25	0.0045874	0.36760
26		
27	0.0034578	0.65028
28		
29	0.0033993	0.66733
30		
31	0.0029290	0.81626
32		
33	0.0024380	0.99977
34		
35	0.0023716	1.02733
36		
37	0.0021206	1.13919
38		
39	0.0021035	1.14733
40		
41	0.0018660	1.26710

Diketahui: 1 hari = 86.400 s

Selanjutnya perhitungan laju perpindahan massa zat terlarut rata-rata, r_{kL} per hari sebagai berikut:

$$r_{k_L} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$r_{k_L} = \frac{0.22691 - 0}{23 - 21} = 0.11346 \frac{\text{cm}}{\text{hari}} \times \frac{1 \text{ hari}}{86.400 \text{ s}} = 1.3411 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$$

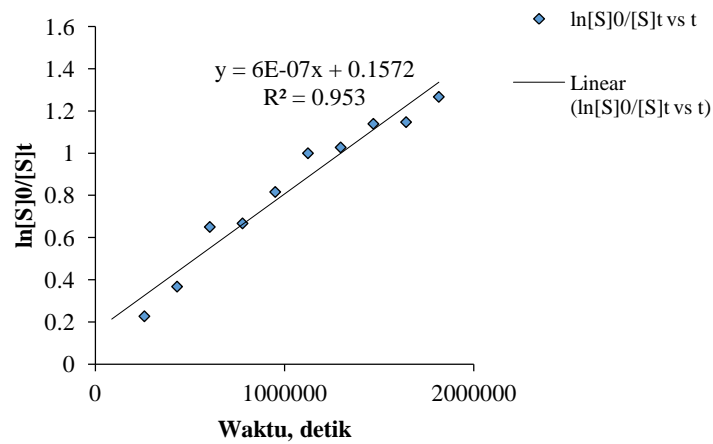
$$r_{k_L} = \frac{0.3676 - 0.22691}{25 - 23} = 0.07035 \frac{\text{cm}}{\text{hari}} \times \frac{1 \text{ hari}}{86.400 \text{ s}} = 8.1418 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$$

$$r_{k_L} = \frac{0.65028 - 0.36760}{27 - 25} = 0.14134 \frac{\text{cm}}{\text{hari}} \times \frac{1 \text{ hari}}{86.400 \text{ s}} = 1.6359 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Dan seterusnya.

Waktu; t hari	COD g/cm ³	ln [S] ₀ /[S] _t	r _{kL} , cm/s
21	0.0066254	0	
22			
23	0.0052804	0.22691	1.3132.10 ⁻⁰⁶
24			
25	0.0045874	0.36760	8.1419.10 ⁻⁰⁷
26			
27	0.0034578	0.65028	1.6359.10 ⁻⁰⁶
28			
29	0.0033993	0.66733	9.8643.10 ⁻⁰⁸
30			
31	0.0029290	0.81626	8.6185.10 ⁻⁰⁷
32			
33	0.0024380	0.99977	1.0620.10 ⁻⁰⁶
34			
35	0.0023716	1.02733	1.5946.10 ⁻⁰⁷
36			
37	0.0021206	1.13919	6.4736.10 ⁻⁰⁷
38			
39	0.0021035	1.14733	4.7101.10 ⁻⁰⁸
40			
41	0.0018660	1.26710	6.9309.10 ⁻⁰⁷

Selanjutnya plot antara $\ln \frac{[S]_0}{[S]_t}$ terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa reaksi ini adalah orde kesatu dan harga koefisien perpindahan massa, k_L dapat diperoleh dari kemiringannya.



Dengan menggunakan persamaan $y = 6.10^{-07}x + 0.1572$, maka harga x dan y dapat diperoleh data sebagai berikut:

No.	x	y	k_L , cm/s
1	518400	0.46824	6.10^{-07}
2	1382400	0.98664	

$$k_L = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.98664 - 0.46824}{1382400 - 518400} = 6.0 \times 10^{-07} \text{ cm/s}$$

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	COD mg/L	$\ln [S]_0/[S]_t$	r_{kL} , rata-rata mg/L.hari	k_L , cm/s
21	6625.40			6.10^{-07}
22				
23	5280.38	0.22691	$1.3132.10^{-06}$	
24				
25	4587.37	0.36760	$8.1419.10^{-07}$	
26				
27	3457.78	0.65028	$1.6359.10^{-06}$	
28				
29	3399.34	0.66733	$9.8643.10^{-08}$	
30				
31	2928.98	0.81626	$8.6185.10^{-07}$	
32				
33	2437.90	0.99977	$1.0620.10^{-06}$	
34				
35	2371.64	1.02733	$1.5946.10^{-07}$	
36				
37	2120.64	1.13919	$6.4736.10^{-07}$	
38				
39	2103.45	1.14733	$4.7101.10^{-08}$	
40				
41	1866.03	1.26710	$6.9309.10^{-07}$	

Hasil lengkap perhitungan ada pada tabel 4.33 – 4.46.

3. Perhitungan Koefisien Difusi Fase Cair Zat Terlarut Dan Pelarut, D_L

Perhitungan difusi fase cair, D_L menggunakan data Temperatur lindi (T_{lindi}), viskositas dan konsentrasi VFA (sebagai asam asetat), mg/L. Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi lindi.

Data yang dibutuhkan hanya data waktu, t hari dan VFA sebagai berikut:

Waktu; t hari	T_{Lindi} , C	Viscositas g/cm.s	V_{VFA} (As. Asetat)	
			mg/L	cm ³ /gmol
21	28.3	0.93291	227.94	3.79584
22	28.5			
23	28.5	0.92354	335	5.57868
24	28.2			
25	28.3	0.91858	370.63	6.17202
26	28.5			
27	28.4	0.89901	333	5.54538
28	28.4			
29	28.3	0.89623	313.52	5.22098
30	28.5			
31	28.4	0.89369	210.12	3.49908
32	28.4			
33	27	0.89106	192.3	3.20233
34	27.5			
35	27.4	0.88896	156.51	2.60633
36	27.5			
37	27.6	0.88582	138.86	2.31241
38	27.8			
39	28.5	0.88373	85.25	1.41965
40	28.2			
41	28.3	0.87388	94.5	1.57369

Diketahui:

$$BM_{\text{As. Asetat}} = 60.05 \text{ g/mol}$$

$$1 \text{ mg} = 0,001 \text{ g}$$

$$1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$$

V_A adalah volume molar VFA terlarut pada titik didih normal, cm³/gmol, sehingga:

$$V_{\text{VFA (As. Asetat)}} = 227.94 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{0,001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}$$

$$= \frac{2.2794 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3}{60.05 \text{ g/mol}} = 3.7958 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$V_{\text{VFA (As. Asetat)}} = 335 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{0,001 \text{ g}}{1 \text{ mg}}$$

$$= \frac{3.35 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3}{60.05 \text{ g/mol}} = 5.5787 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$$

Dan seterusnya.

Dimana difusi zat terlarut dapat dihitung dengan persamaan 2.34., yang didasarkan pada modifikasi empirik dilaporkan oleh Wilke-Chang (McCabe *et al.*, 1990; Reid *et al.*, 1991), sebagai berikut;

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\Psi_B \cdot M_B)^{1/2} T}{\mu_L \cdot V_A^{0,6}} \quad 2.34.$$

Dimana: D_L adalah difusi fase cair zat terlarut dan pelarut, cm^2/s ; T adalah temperatur, K; μ_L adalah viskositas larutan, g/cm.s ; V_A adalah volume molar VFA terlarut pada titik didih normal, cm^3/gmol ; Ψ_B adalah parameter asosiasi pelarut air = 2,6; dan M_B adalah berat molekul pelarut air = $18 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}$

Untuk perhitungan difusi fase cair zat terlarut, D_L sebagai berikut:

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \times 18 \text{ g / gmol})^{1/2} \times 301.45 \text{ K}}{0.93291 \text{ g / cm.s} \times (3.79584 \text{ cm}^3 / \text{gmol})^{0.6}}$$

$$D_L = 0.0000734765 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \times 18 \text{ g / gmol})^{1/2} \times 301.65 \text{ K}}{0.92354 \text{ g / cm.s} \times (5.57868 \text{ cm}^3 / \text{gmol})^{0.6}}$$

$$D_L = 0.0000589503 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \times 18 \text{ g / gmol})^{1/2} \times 301.45 \text{ K}}{0.91858 \text{ g / cm.s} \times (6.17202 \text{ cm}^3 / \text{gmol})^{0.6}}$$

$$D_L = 0.0000557442 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \times 18 \text{ g / gmol})^{1/2} \times 301.55 \text{ K}}{0.89901 \text{ g / cm.s} \times (5.54538 \text{ cm}^3 / \text{gmol})^{0.6}}$$

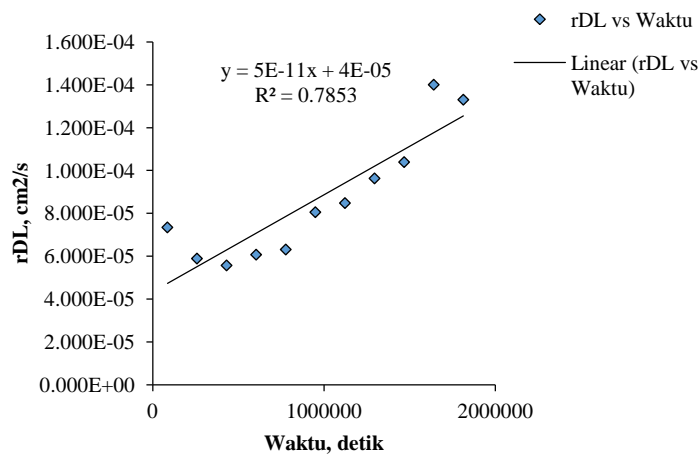
$$D_L = 0.0000607566 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Dan seterusnya.

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	T _{Lindi} , K	Viscositas g/cm.s	V _{VFA} (As. Asetat); cm ³ /gmol	D _L , cm ² /s
21	301.45	0.93291	3.79584	0.0000734765
22	301.65			
23	301.65	0.92354	5.57868	0.0000589503
24	301.35			
25	301.45	0.91858	6.17202	0.0000557442
26	301.65			
27	301.55	0.89901	5.54538	0.0000607566
28	301.55			
29	301.45	0.89623	5.22098	0.0000631687
30	301.65			
31	301.55	0.89369	3.49908	0.0000805671
32	301.55			
33	300.15	0.89106	3.20233	0.0000848222
34	300.65			
35	300.55	0.88896	2.60633	0.0000963329
36	300.65			
37	300.75	0.88582	2.31241	0.0001039392
38	300.95			
39	301.65	0.88373	1.41965	0.0001400337
40	301.35			
41	301.45	0.87388	1.57369	0.0001330362

Selanjutnya plot antara difusi zat terlarut rata-rata per hari, r_{DL} terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa reaksi ini adalah orde kesatu dan harga koefisien difusi zat terlarut dan pelarut, D_L dapat diperoleh dari kemiringannya.



Dengan menggunakan persamaan $y = 5.10^{-11}x + 4.10^{-05}$, maka harga x, y dan selanjutnya harga koefisien difusi zat terlarut dan pelarut, D_L diperoleh sebagai berikut:

x	y	D_L
518400	0.00006592	5.E-11
1382400	0.00010912	

$$D_L = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.00010912 - 0.00006592}{1382400 - 518400} = 5.10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Waktu; t hari	T_{Lindi} , K	Viscositas g/cm.s	V_{VFA} (As. Asetat); cm ³ /gmol	r_{DL} per hari cm ² /s	D_L cm ² /s
21	301.45	0.93291	3.79584	0.0000734765	4.10 ⁻⁶
22	301.65				
23	301.65	0.92354	5.57868	0.0000589503	
24	301.35				
25	301.45	0.91858	6.17202	0.0000557442	
26	301.65				
27	301.55	0.89901	5.54538	0.0000607566	
28	301.55				
29	301.45	0.89623	5.22098	0.0000631687	
30	301.65				
31	301.55	0.89369	3.49908	0.0000805671	
32	301.55				
33	300.15	0.89106	3.20233	0.0000848222	
34	300.65				
35	300.55	0.88896	2.60633	0.0000963329	
36	300.65				
37	300.75	0.88582	2.31241	0.0001039392	
38	300.95				
39	301.65	0.88373	1.41965	0.0001400337	
40	301.35				
41	301.45	0.87388	1.57369	0.0001330362	

Hasil lengkap perhitungan ada pada tabel 4.33 – 4.46.

4. Perhitungan viskositas kinematik lindi, ν dan bilangan *Reynolds*, N_{Re} tanpa resirkulasi

Perhitungan viskositas kinematik lindi dan bilangan *Reynolds* menggunakan data densitas dan viskositas. Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH *Ambient*; Tanpa Resirkulasi lindi.

Waktu; t hari	Densitas;	Viscositas;
	g/mL = g/cm ³	g/cm.s
21	0.98612	0.93291
22		
23	0.98607	0.92354
24		
25	0.98587	0.91858
26		
27	0.98577	0.89901
28		
29	0.98567	0.89623
30		
31	0.98562	0.89369
32		
33	0.98569	0.89106
34		
35	0.98566	0.88896
36		
37	0.98562	0.88582
38		
39	0.9856	0.88373
40		
41	0.98547	0.87388

Dari persamaan viskositas kinematik, diperoleh: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ (ν dibaca nu)

Dimana; dari tabel diatas diperoleh:

Densitas lindi, $\rho_L = 0.98612 \text{ g/cm}^3$

Viskositas lindi, $\mu_L = 0.93291 \text{ g/cm.s}$.

Jadi:

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.93291 \text{ g/cm.s}}{0.98612 \text{ g/cm}^3} = 0.96404 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.92354 \text{ g/cm.s}}{0.98607 \text{ g/cm}^3} = 0.93659 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.91858 \text{ g/cm.s}}{0.98587 \text{ g/cm}^3} = 0.93175 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Dan seterusnya

Bilangan *Reynolds*, N_{Re} : menggambarkan keadaan atau rezim aliran resirkulasi fluida, menggunakan persamaan 2.38, sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad 2.38.$$

Dimana; d_i adalah 0,5 inch = 1,27 cm = 0,0127 m; ρ_L adalah 0.98612 g/cm³; μ_L adalah 0.93291 g/cm.s; dan bilangan *Reynolds*, $N_{Re} = 0$ (tanpa resirkulasi lindi).

Jadi;

$$v_R = \frac{N_{Re} \cdot \mu_L}{d_i \cdot \rho_L} = \frac{0 \times 0.93291 \text{ g/cm.s}}{1.27 \text{ cm} \times 0.98612 \text{ g/cm}^3} = \frac{84.2415 \text{ g/cm.s}}{1.271245 \text{ g/cm}^2} = 0.0 \text{ cm/s}$$

Laju alir volumetrik, $Q_R = v_R \cdot A$

Dimana:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_i)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1.27 \text{ cm})^2 = 1.267 \text{ cm}^2$$

$$\text{Maka } Q = 0.0 \text{ cm/s} \times 1.267 \text{ cm}^2 = 0 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Sehingga, bilangan *Reynolds* diperoleh sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{1.27 \text{ cm} \times 0.0 \text{ cm}^3/\text{s} \times 0.98612 \text{ g/cm}^3}{0.93291 \text{ g/cm.s}} = 0.00$$

$$N_{Re} = \frac{1.27 \text{ cm} \times 0.0 \text{ cm}^3/\text{s} \times 0.98607 \text{ g/cm}^3}{0.92354 \text{ g/cm.s}} = 0.00$$

$$N_{Re} = \frac{1.27 \text{ cm} \times 0.0 \text{ cm}^3/\text{s} \times 0.98587 \text{ g/cm}^3}{0.91858 \text{ g/cm.s}} = 0.00$$

Dan seterusnya

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	Densitas;	Viscositas;	viskositas kinematik	N_{Re}	$\ln NRe$
	$\text{g/mL} = \text{g/cm}^3$	g/cm.s	$\nu, \text{cm}^2/\text{s}$		
21	0.98612	0.93291	0.94604	0.00	0.00
22					
23	0.98607	0.92354	0.93659	0.00	0.00
24					
25	0.98587	0.91858	0.93175	0.00	0.00
26					
27	0.98577	0.89901	0.91199	0.00	0.00
28					
29	0.98567	0.89623	0.90926	0.00	0.00
30					
31	0.98562	0.89369	0.90673	0.00	0.00
32					
33	0.98569	0.89106	0.90400	0.00	0.00
34					
35	0.98566	0.88896	0.90189	0.00	0.00
36					
37	0.98562	0.88582	0.89874	0.00	0.00
38					
39	0.9856	0.88373	0.89664	0.00	0.00
40					
41	0.98547	0.87388	0.88676	0.00	0.00

Hasil lengkap perhitungan ada pada tabel 4.33 – 4.46.

5. Perhitungan bilangan *Reynolds*, N_{Re}

Perhitungan viskositas kinematik lindi dan bilangan *Reynolds* menggunakan data densitas dan viskositas. Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.14. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Laju alir resirkulasi; $Q = 6 \text{ L/mnt}$.

Waktu; t hari	Densitas;	Viskositas;
	$\text{g/mL} = \text{g/cm}^3$	g/cm.s
21	0.98702	1.01158
22		
23	0.98656	0.97378
24		
25	0.98627	0.95068
26		
27	0.98617	0.9443
28		
29	0.9861	0.9346
30		

Waktu; t hari	Densitas;	Viskositas;
	g/mL = g/cm ³	g/cm.s
31	0.98599	0.92143
32		
33	0.98592	0.90064
34		
35	0.98582	0.88979
36		
37	0.98554	0.87746
38		
39	0.98531	0.87518
40		
41	0.98526	0.87307

Bilangan *Reynolds*, N_{Re} : menggambarkan keadaan atau rezim aliran resirkulasi fluida, menggunakan persamaan 2.38, sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad 2.38.$$

Dimana:

$$d_i = 0,5 \text{ inch} = 1,27 \text{ cm} = 0,0127 \text{ m};$$

Dimana; dari tabel diatas diperoleh:

$$\text{Densitas lindi; } \rho_L = 0.98702 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Viskositas lindi; } \mu_L = 1.101158 \text{ g/cm.s}$$

$$v_R = 6.0 \text{ L/mnt}$$

$$\text{Dimana: } 1 \text{ L} = 0.001 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ menit} = 60 \text{ s}$$

$$1 \text{ m}^3 = 1.000.000 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ m}^2 = 10.000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Laju alir volumetrik, } Q_R = v_R \cdot A, \text{ maka } v_R = \frac{Q_R}{A}$$

$$d_i = 0,5 \text{ inch} = 1,27 \text{ cm}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_i)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (1.27 \text{ cm})^2 = 1.267 \text{ cm}^2$$

Jadi:

$$v_R = 6 \frac{L}{mnt} \times \frac{0.001 m^3}{1 L} \times \frac{1 \text{ menit}}{60 s} = 1.10^{-4} m^3 / s$$

$$v_R = 1.10^{-4} \frac{m^3}{s} \times \frac{1.000.000 cm^3}{1 m^3} = \frac{100 cm^3 / s}{1.267 cm^2} = 78.927 cm / s$$

Sehingga, bilangan Reynolds diperoleh sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{1.27 cm \times 78.927 cm / s \times 0.98702 g / cm^3}{1.01158 g / cm.s} = 97.803$$

$$N_{Re} = \frac{1.27 cm \times 78.927 cm / s \times 0.98656 g / cm^3}{0.97378 g / cm.s} = 101.553$$

$$N_{Re} = \frac{1.27 cm \times 78.927 cm / s \times 0.98627 g / cm^3}{0.95068 g / cm.s} = 103.990$$

Dan seterusnya

Selanjutnya ln NRe:

$$\ln 97.803 = 4.583$$

$$\ln 101.553 = 4.621$$

$$\ln 103.990 = 4.644$$

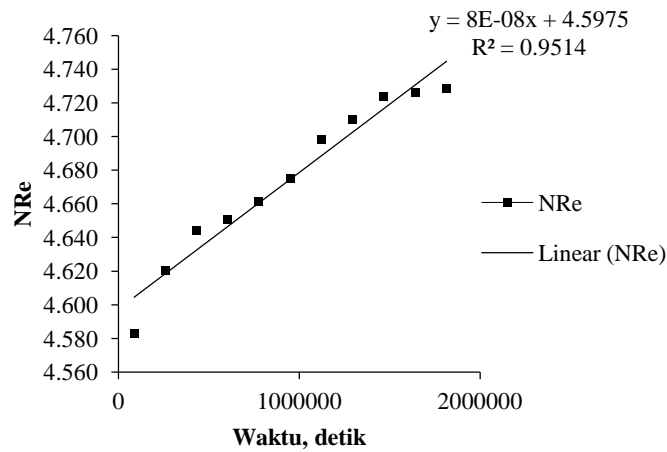
Dan seterusnya

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	Densitas;	Viskositas;	N_{Re}	$\ln N_{Re}$	N_{Re}
	$g/mL = g/cm^3$	$g/cm.s$			
21	0.98702	1.01158	97.804	4.583	7.E-03
22					
23	0.98656	0.97378	101.553	4.621	
24					
25	0.98627	0.95068	103.990	4.644	
26					
27	0.98617	0.9443	104.682	4.651	
28					
29	0.9861	0.9346	105.761	4.661	
30					
31	0.98599	0.92143	107.260	4.675	
32					
33	0.98592	0.90064	109.729	4.698	
34					
35	0.98582	0.88979	111.055	4.710	

Waktu; t hari	Densitas;	Viskositas;	N_{Re}	$\ln N_{Re}$	N_{Re}
	$\text{g/mL} = \text{g/cm}^3$	g/cm.s			
36					
37	0.98554	0.87746	112.584	4.724	
38					
39	0.98531	0.87518	112.851	4.726	
40					
41	0.98526	0.87307	113.118	4.728	

Selanjutnya plot antara bilangan *Reynolds* per hari, N_{Re} terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa N_{Re} adalah orde kesatu dan harga koefisien dapat diperoleh dari kemiringannya.



Dengan menggunakan persamaan $y = 8.10^{-11}x + 4.5975$, maka harga x, y dan selanjutnya harga koefisien diperoleh sebagai berikut:

x	y	8.10^{-08}
518400	4.638972	
1382400	4.708092	

Hasil lengkap perhitungan ada pada tabel 4.49.

6. Perhitungan bilangan Schmidt, N_{Sc}

Perhitungan bilangan Schmidt, N_{Sc} menggunakan data densitas, viskositas dan Difusi, D_L . Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi lindi.

Perhitungan bilangan Schmidt, N_{Sc} : yaitu sifat fluida untuk korelasi difusivitas massa, menggunakan persamaan 2.39, sebagai berikut.

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} \quad 2.39.$$

dimana: D_L adalah difusivitas, cm^2/s ; ρ adalah densitas, g/cm^3 ; dan μ adalah viskositas, $\text{g}/\text{cm.s}$.

Waktu; t hari	Densitas;	Viscositas;	$r_{DL}, \text{cm}^2/\text{s}$
	$\text{g/mL} = \text{g}/\text{cm}^3$	$\text{g}/\text{cm.s}$	
21	0.98612	0.93291	0.0000734765
22			
23	0.98607	0.92354	0.0000589503
24			
25	0.98587	0.91858	0.0000557442
26			
27	0.98577	0.89901	0.0000607566
28			
29	0.98567	0.89623	0.0000631687
30			
31	0.98562	0.89369	0.0000805671
32			
33	0.98569	0.89106	0.0000848222
34			
35	0.98566	0.88896	0.0000963329
36			
37	0.98562	0.88582	0.0001039392
38			
39	0.9856	0.88373	0.0001400337
40			
41	0.98547	0.87388	0.0001330362

Sehingga, bilangan Schmidt diperoleh sebagai berikut:

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} = \frac{0.93291 \text{ g/cm.s}}{0.0000685037 \text{ cm}^2/\text{s} \times 0.98612 \text{ g/cm}^3} = 12875.41696$$

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} = \frac{0.92354 \text{ g/cm.s}}{0.0000549606 \text{ cm}^2/\text{s} \times 0.98607 \text{ g/cm}^3} = 15887.72680$$

$$N_{Sc} = \frac{\mu}{D_L \cdot \rho} = \frac{0.91858 \text{ g/cm.s}}{0.0000519714 \text{ cm}^2/\text{s} \times 0.98587 \text{ g/cm}^3} = 16714.67388$$

Dan seterusnya

Selanjutnya ln N_{Sc}:

$$\ln 12875.41696 = 9.463$$

$$\ln 15887.7268 = 9.673$$

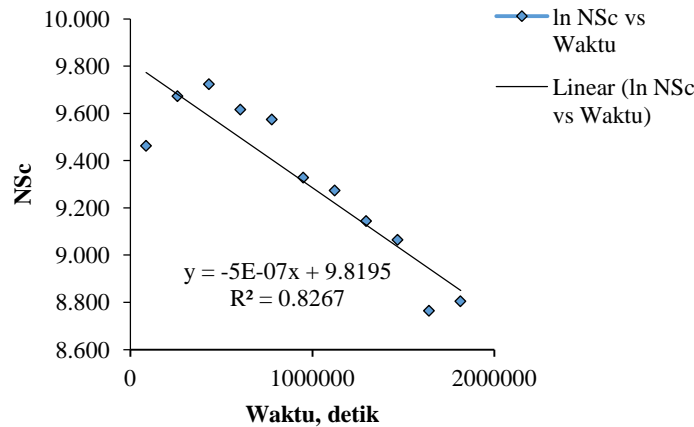
$$\ln 16714.67388 = 9.724$$

Dan seterusnya

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	Densitas; g/mL = g/cm ³	Viscositas; g/cm.s	r _{DL} , cm ² /s	N _{Sc}	ln N _{Sc}	N _{Sc}
21	0.98612	0.93291	0.0000734765	12875.41696	9.463	-5.E-02
22						
23	0.98607	0.92354	0.0000589503	15887.72680	9.673	
24						
25	0.98587	0.91858	0.0000557442	16714.67388	9.724	
26						
27	0.98577	0.89901	0.0000607566	15010.50107	9.617	
28						
29	0.98567	0.89623	0.0000631687	14394.14298	9.575	
30						
31	0.98562	0.89369	0.0000805671	11254.33728	9.329	
32						
33	0.98569	0.89106	0.0000848222	10657.54816	9.274	
34						
35	0.98566	0.88896	0.0000963329	9362.25281	9.144	
36						
37	0.98562	0.88582	0.0001039392	8646.82462	9.065	
38						
39	0.9856	0.88373	0.0001400337	6403.04183	8.765	
40						
41	0.98547	0.87388	0.0001330362	6665.58888	8.805	

Selanjutnya plot antara bilangan Schmidt per hari, N_{Sc} terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa N_{Sc} adalah orde kesatu dan harga koefisien dapat diperoleh dari kemiringannya.



Dengan menggunakan persamaan $y = -0.046x + 10.74$, maka harga x , y dan selanjutnya harga koefisien diperoleh sebagai berikut:

x	y	N_{Sc}
26	9.544	-5.10^{-02}
36	9.084	

Hasil lengkap perhitungan pada tabel 4.49.

7. Perhitungan bilangan Sherwood, N_{Sh}

Perhitungan bilangan Sherwood, N_{Sh} menggunakan data perpindahan massa dan Difusi zat terlarut, D_L . Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi lindi.

Perhitungan bilangan Sherwood, N_{Sh} : yaitu perpindahan masa antara solute (zat terlarut) dan solvent (pelarut).

$$N_{Sh} = \frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \quad 2.40.$$

dimana: k_L adalah koefisien perpindahan, $\text{kgmol/mnt.m}^3 \cdot \text{atm}$; d_i adalah diameter dalam bioreaktor, 1.27 cm; dan D_L adalah diffusi zat terlarut, cm^2/s

Waktu; t hari	r_{kL} , cm/s (COD)	r_{DL} , cm ² /s
21	6.10^{-07}	0.0000734765
22		
23	6.10^{-07}	0.0000589503
24		
25	6.10^{-07}	0.0000557442
26		
27	6.10^{-07}	0.0000607566
28		
29	6.10^{-07}	0.0000631687
30		
31	6.10^{-07}	0.0000805671
32		
33	6.10^{-07}	0.0000848222
34		
35	6.10^{-07}	0.0000963329
36		
37	6.10^{-07}	0.0001039392
38		
39	6.10^{-07}	0.0001400337
40		
41	6.10^{-07}	0.0001330362

Sehingga, bilangan Schmidt diperoleh sebagai berikut:

$$N_{Sh} = \frac{k_L \cdot d_i}{D_L} = \frac{0.0000006 \text{ cm/s} \times 1.27 \text{ cm}}{0.0000734765 \text{ cm}^2/\text{s}} = 0.0103707$$

$$N_{Sh} = \frac{0.0000006 \text{ cm/s} \times 1.27 \text{ cm}}{0.0000589503 \text{ cm}^2/\text{s}} = 0.01293$$

$$N_{Sh} = \frac{0.0000006 \text{ cm/s} \times 1.27 \text{ cm}}{0.0000557442 \text{ cm}^2/\text{s}} = 0.01367$$

Dan seterusnya

Selanjutnya ln NSh:

$$\ln 0.010371 = -4.569$$

$$\ln 0.01293 = -4.348$$

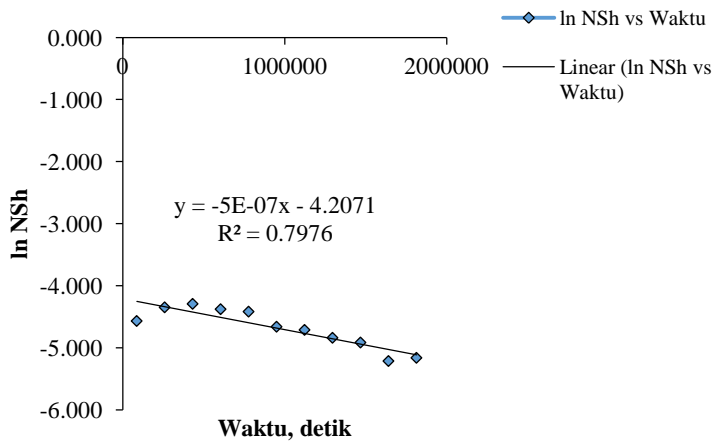
$$\ln 0.01367 = -4.293$$

Dan seterusnya

Hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Waktu; t hari	r_{kL} , cm/s (COD)	r_{DL} , cm^2/s	N_{Sh}	$\ln N_{Sh}$	N_{Sh}
21	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000734765	0.01037	-4.569	$-5 \cdot 10^{-07}$
22					
23	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000589503	0.01293	-4.349	
24					
25	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000557442	0.01367	-4.293	
26					
27	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000607566	0.01254	-4.379	
28					
29	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000631687	0.01206	-4.418	
30					
31	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000805671	0.00946	-4.661	
32					
33	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000848222	0.00898	-4.712	
34					
35	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0000963329	0.00791	-4.840	
36					
37	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0001039392	0.00733	-4.916	
38					
39	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0001400337	0.00544	-5.214	
40					
41	$6 \cdot 10^{-07}$	0.0001330362	0.00573	-5.162	

Selanjutnya plot antara bilangan Schmidt per hari, N_{Sc} terhadap waktu, t hari, maka akan menghasilkan garis lurus. Dimana grafik tersebut membuktikan bahwa N_{Sc} adalah orde kesatu dan harga koefisien dapat diperoleh dari kemiringannya.



Dengan menggunakan persamaan $y = -5 \cdot 10^{-07}x - 4.2071$, maka harga x, y dan selanjutnya harga koefisien diperoleh sebagai berikut:

x	y	ln NSh
518400	-4.4663	-5.10 ⁻⁰⁷
1382400	-4.8983	

Hasil lengkap perhitungan pada tabel 4.49.

8. Analisis Bilangan Tak-Berdimensi (*Dimensionless Number Analysis*)

Untuk sistem kompleks, perpindahan massa biasanya dideskripsikan dengan analisis bilangan tak-berdimensi (*dimensionless number analysis*) dalam bentuk korelasi empirik antar bilangan terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh (Jördening and Buchholz, 2005). Keuntungan menggunakan bilangan tak-berdimensi adalah dapat dipergunakan untuk beberapa skala sistem. Dan bilangan yang biasa digunakan dalam korelasi perpindahan massa adalah Bilangan *Reynolds*, N_{Re} ; Bilangan *Schmidt*, N_{Sc} , dan Bilangan *Sherwood*, N_{Sh} (Arogo *et al.*, 1999). Data-data yang digunakan diambil dari Tabel Tabel 4.49. N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} pada variasi pH, Q, T, dan kombinasi pH, Q, T.

Variabel-variabel yang memberikan pengaruh terhadap harga k_L pada proses perpindahan massa fase cair pengolahan lindi dalam bioreaktor anaerobik, yaitu: diameter dalam pipa, d_i ; cm atau m; diffusivitas, D_L cm²/s; laju alir resirkulasi, v ; cm/s; densitas, ρ ; g/cm³; dan viskositas, μ ; g/cm.s. Hubungan antara variabel-variabel diatas dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$k_L = f(D_L, d_i, v, \mu, \rho) \quad 2.35.$$

Dengan menggunakan metoda Buckingham (Arogo *et al.*, 1999), analisa dimensional untuk persamaan pada sistem ini adalah sebagai berikut:

$$N_{Sh} = f(N_{Re}, N_{Sc}) \quad 2.36a.$$

$$N_{Sh} = C_k (N_{Re})^a (N_{Sc})^b \quad 2.36b.$$

$$\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} = k_1 \cdot \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu}, \frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right) \quad 2.37.$$

Koefisien pangkat pada bilangan tak berdimensi ditentukan dengan metode multi regresi linier persamaan 2.37, sebagai berikut:

$$\ln N_{Sh} = \ln C_k + a \ln N_{Re} + b \ln N_{Sc}$$

Data-data yang digunakan diambil dari Tabel 4.49.

Tabel 4.49. N_{Re} , N_{Sc} , dan N_{Sh} pada variasi pH, Q, T, dan kombinasi pH, Q, T

Perlakuan	N_{Re}	N_{Sc}	N_{Sh}
pH Ambient	0	-5.10^{-7}	-5.10^{-7}
pH 7.2	0	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
pH 8.0	0	9.10^{-8}	2.10^{-7}
Q 6 L/mt	8.10^{-8}	-5.10^{-7}	-4.10^{-7}
Q 24 L/mt	9.10^{-8}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
Q 24 L/mt dan pH 8.0	1.10^{-7}	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
T 35°C	0	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45°C	0	-7.10^{-7}	-6.10^{-7}
T 35°C dan pH 7.2	0	-2.10^{-7}	-8.10^{-8}
T 45°C dan pH 8.0	0	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	1.10^{-7}	-3.10^{-7}	-2.10^{-7}
T 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2	1.10^{-7}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient	1.10^{-7}	-4.10^{-7}	-3.10^{-7}
T 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0	1.10^{-7}	-6.10^{-7}	-5.10^{-7}

Koefisien pangkat pada bilangan tak berdimensi ditentukan dengan metode menggunakan metode *Buckingham's π Theorem*. Oleh karenanya, nilai Bilangan Reynolds, N_{Re} ; Bilangan Schmidt, N_{Sc} , dan Bilangan Sherwood, N_{Sh} yang diperoleh ditransformasi ke dalam bentuk logaritma, sehingga diperoleh persamaan 3.1.

$$N_{Sh} = C_k N_{Re}^a N_{Sc}^b \quad 2.36b.$$

$$\ln N_{Sh} = \ln C_k + a \ln N_{Re} + b \ln N_{Sc} \quad 3.1.$$

Tahapan untuk menyelesaikan persamaan 3.1, sebagai berikut:

Langkah 1, penyelesaian hubungan N_{Sh} vs N_{Re} , sebagai berikut:

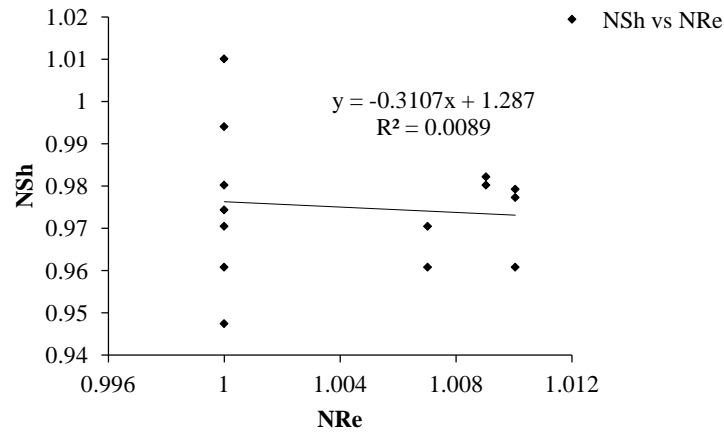
$$N_{Sh} = C_k N_{Re}^a N_{Sc}^b \quad 3.2.$$

$$N_{Sh} = p_1 N_{Re}^a \quad 3.3.$$

Dimana:

$$p_1 = C_k N_{Sc}^b \quad 3.4.$$

Hubungan antara N_{Sh} (y) dan N_{Re} (x) pada persamaan 3.3, diselesaikan dengan persamaan regresi linier.



Hasil plot antara N_{Sh} vs N_{Re} , diperoleh nilai $p_1 = 1.287$ dan $a = -0.3107$.
sehingga persamaan 3.3 menjadi:

$$N_{Sh} = 1.287 N_{Re}^{-0.3107} \quad 3.3a.$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{0.3107} = 1.287 = p_1 \quad 3.3b$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{0.30} \frac{1}{1.287} = p_1 \quad 3.3c$$

Langkah 2, penyelesaian persamaan $N_{Sh} N_{Re}^{-a}$ vs N_{Sc} , sebagai berikut:

Kemudian substitusi persamaan 3.4 ke persamaan 3.5, diperoleh:

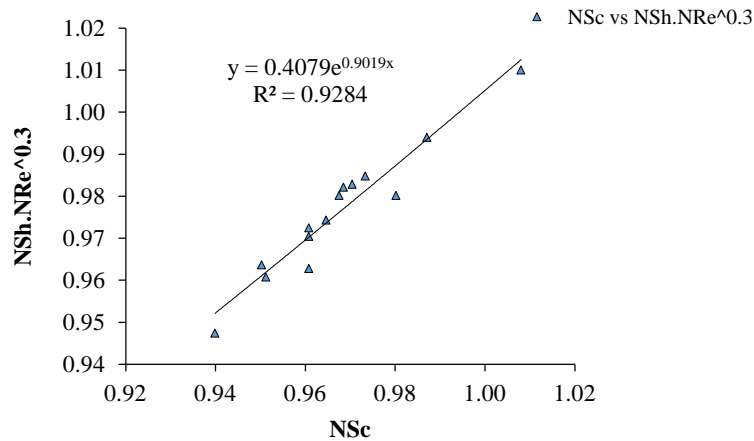
$$N_{Sh} N_{Re}^{-a} = p_1 \quad 3.5.$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{0.3107} \frac{1}{1.287} = C_K N_{Sc}^b \quad 3.6.$$

$$N_{Sh} N_{Re}^{-a} \frac{1}{p_1} = p_2 N_{Sc}^b \quad 3.7.$$

$$\text{Dimana: } C_k = p_2 \quad 3.8.$$

Hubungan antara $N_{Sh} N_{Re}^{-a}$ (y) dan N_{Sc} (x), diselesaikan dengan persamaan regresi linier.



Hasil plot antara $N_{Sh}N_{Re}^{-a}$ (y) terhadap N_{Sc} (x), diperoleh nilai $p_2 = 0.4079$ dan $b = 0.9019$, sehingga persamaan 3.7, menjadi:

$$N_{Sh}N_{Re}^{-a} \frac{1}{p_1} = p_2 N_{Sc}^b \quad 3.7$$

$$N_{Sh}N_{Re}^{0.3109} \frac{1}{1.287} = p_2 N_{Sc}^b \quad 3.7a$$

$$N_{Sh}N_{Re}^{0.3109} \frac{1}{1.287} = 0.4079 N_{Sc}^{0.9019} \quad 3.7a$$

Persamaan 3.7a, ditata-ulang diperoleh:

$$N_{Sh} = 0.52497 (N_{Re})^{-0.3109} (N_{Sc})^{0.9019} \quad 3.7b.$$

$$\left(\frac{k_L \cdot d_i}{D_L} \right) = 0.52497 \left(\frac{d_i \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{-0.3109} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_L} \right)^{0.9019} \quad 3.7c$$

Selanjutnya persamaan 3.7c ditata-ulang, diperoleh korelasi empirik yang didasarkan pada koefisien perpindahan massa, k_L sebagai berikut:

$$k_L = 0.52497 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1.2128} v^{-0.3109} D_L^{0.0981} d_i^{-1.3109} \quad 3.7d$$

Dengan koefisien determinasi, $R^2 = 0,9284$ berarti antar variabel ini memiliki hubungan yang sangat kuat.

Lampiran D.
Dokumentasi Penelitian



Gambar 4.1 TPA Sambutan saat awal pembukaan



Gambar 4.2. Sampling lindi



Gambar 4.3. Pemanasan lindi pada proses seeding



a. Penambahan lindi pada hari pertama



b. Penambahan lindi pada hari ke 6



c. Penambahan lindi pada hari ke 7



b. Aklimatisasi

Gambar 4.4. Penentuan pH dan Waktu Optimum Seeding dan aklimatisasi.



a.



b.

Gambar 4.5. Buih pada temperatur ambient.



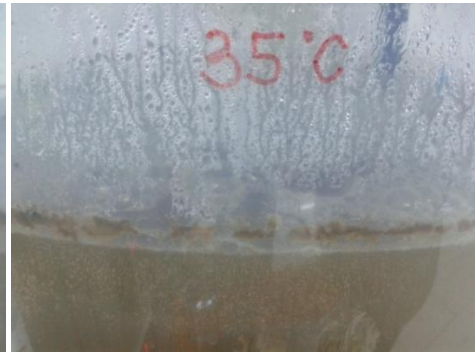
a.



b.



c.



d.

Gambar 4.6. Buih pada temperatur 35 °C.

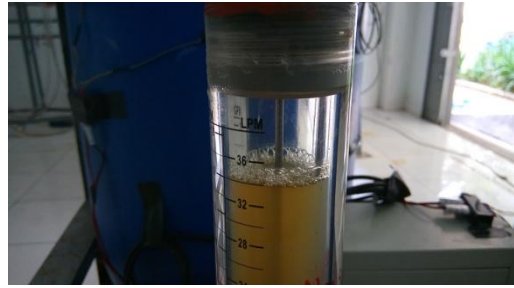
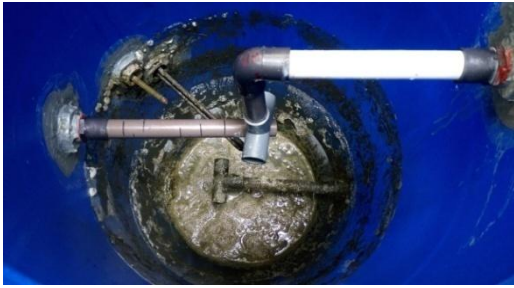


a.



b.

Gambar 4.7. Buih pada temperatur 45 °C.



Gambar 4.8. Pembentukan buih dalam bioreaktor



Gambar 4.9. Bioreaktor anaerobik



Gambar 4.10. Laboratorium analisis



Analisis Parameter



Analisis densitas dan viskositas



Analisis VFA



Peralatan Refluks

Gambar 4.11. Peralatan analisis



a.



b.

Gambar 4.12. Lindi sebelum dan setelah pengolahan

Lampiran E. Hasil Penelitian

1. Karakteristik Lindi TPA Bukit Pinang dan Sambutan, Samarinda

Tabel 4.1.a. Karakteristik Lindi TPA Bukit Pinang, Samarinda

Parameter	Satuan	Bulan												Rata-rata
		Febr 2015	Mar 2015	Apr 2015	Mei 2015	Jun 2015	Jul 2015	Ags 2015	Sept 2015	Okt 2015	Nop 2015	Des 2015	Jan 2016	
Sifat Fisik														
TSS	mg/L	23	14	28	96	6	25	9	88	12	5	27	6	28.25
TDS	mg/L	5979	5802	5838	5421	5033	165	5561	19556	7085	6319	6478	6127	6613.67
Potensial Redoks (eH)	mV	216	224,4	145.21	-74	-86	-75	-83	-79	-90.2	-90	-97	-89	-36.54
Densitas	g/cm ³	0,9273	0,92749	0,9330	0,9480	0,98384	0,9453	0,937	0,97579	0,952	0,9261	0,902	0,9332	0,94
Viskositas	g/cm.s	0,87522	0,8727	0,8923	0,8926	0,8962	0,8864	0,8828	0,892	0,8893	0,878	0,8675	0,8811	0,88
Sifat Kimia														
pH		6.58	8.18	8.27	8.34	8.44	8.27	8.41	8.49	8.0	8.29	8.37	8.31	8.16
BOD ₅	mg/L	1516	1386	1587	1792	2797	1812	1683	1887	1903	1059	1034	1479	1661.25
COD	mg/L	2806	2448	3661	3608	4591	3465	3205	3859	3670	2867	2115	3087	3281.83
Ammonia (NH ₃ -N)	mg/L	3.6	4.11	3.21	97.14	850.72	83.17	8.35	7.65	47.38	19.61	15.97	83.93	102.07
Nitrite	mg/L	2.07	2.37	1.16	203.49	29.8	22.52	21.97	20.33	1.48	0.68	0.57	20.64	27.26
Nitrate	mg/L	39.57	54.14	31.25	755.53	372.09	39.55	147.29	226.74	11.82	2.15	10.17	40.8	144.26
Phosphate	mg/L	36.31	35.84	28.98	171.21	370.96	186.08	59.7	183.74	19.78	17.25	12.57	26.03	95.70
Sulfat	mg/L	72.82	36.19	265.31	38.75	36.35	3431	739.35	2068.14	150.47	104.6	355.03	365	638.58
Minyak dan Lemak	mg/L	424	60	3.08	1744.46	20.14	7.71	3.91	15.91	3.23	3.14	2.93	2.84	190.946
Logam Berat														
Fe	mg/L	8.241	2.031	4.890	1.406	4.416	8.805	3.993	2.780	0.177	0.061	0.225	0.514	3.128
Mn	mg/L	2.197	0.266	6.040	0.100	0.170	0.092	0.016	0.005	0.064	0.101	0.161	1.004	0.851
Cu	mg/L	1.668	0.080	0.480	5.200	0.610	1.665	0.782	0.132	0.073	0.063	0.062	0.730	0.962
Zn	mg/L	0.623	0.310	3.090	1.790	3.600	0.385	1.000	0.282	0.254	0.250	0.273	0.036	0.991
Cr	mg/L	2.432	2.715	0.040	1.454	1.310	4.395	2.113	3.422	3.293	2.232	2.177	2.129	2.309
Cd	mg/L	0.262	0.246	4.130	3.430	2.836	1.255	6.475	0.850	0.047	0.055	0.034	0.051	1.639
Pb	mg/L	1.071	1.349	8.660	12.020	9.570	3.705	2.459	0.738	0.721	0.697	0.765	0.189	3.495
Total akumulasi	mg/L	16.494	6.997	27.330	25.400	22.512	20.302	16.837	8.209	4.629	3.459	3.697	4.653	13.377

Tabel 4.1.b. Karakteristik Lindi TPA Sambutan, Samarinda

Parameter	Satuan	Bulan												Rata-rata
		Mei	Jun	Jul	Ags	Sept	Okt	Nop	Des	Jan	Febr	Mar	Apr	
		2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2016	2016	2016	2016	
Sifat Fisik														
TSS	mg/L	73	125	74	21	73	48	68	22	26	5	2	14	45.92
TDS	mg/L	2423	1010	258	819	1127	1539	950	2671	2319	1370	1343	1358	1432.25
Potensial Redoks (eH)	mV	-62	-18	-4	-3	-21.75	-56	-20	-49	-72	-48	-59	-42	-37.90
Densitas	g/cm ³	0.9186	0.91444	0.91221	0.91387	0.9148	0.9133	0.9138	0.9245	0.91221	0.91387	0.9316	0.9213	0.9170
Viskositas	g/cm.s	0.84224	0.82632	0.823	0.8242	0.8289	0.8247	0.8256	0.8274	0.8239	0.8624	0.8435	0.8475	0.8333
Sifat Kimia														
pH		7.98	6.88	6.9	6.84	7.15	7.91	7.13	7.33	7.95	6.93	7.13	7.3	7.29
BOD ₅	mg/L	725	523	303	411	490.5	680	481	707	213	625	558	742	538.21
COD	mg/L	1505	877	543	792	929.25	1112	850	1615	433	1114	934	1828	1044.35
Ammonia (NH ₃ -N)	mg/L	19.82	4.35	0.21	4.01	7.1	4.05	3.94	9.08	0.19	10.03	9.45	9.75	6.83
Nitrite	mg/L	3.12	1.26	4.58	0.08	2.26	0.23	1.68	2.750	0.14	2.09	0.3	3.71	1.85
Nitrate	mg/L	39.14	18.16	12.77	0.63	17.68	2.11	10.27	39.04	12.77	22.77	39.55	50.69	22.13
Phosphate	mg/L	2.62	19.56	38.08	2.74	15.75	5.01	16.23	41.46	5.01	3.21	5.08	52.18	17.24
Sulfat	mg/L	0.23	21.75	26.3	41.4	22.42	22.79	26.93	145.25	34	150.47	343	316.7	95.94
Minyak dan Lemak	mg/L	27.5	2.04	0.15	0.09	7.45	0.07	1.96	2.17	0.001	2.44	1.9	49.94	7.98
Logam Berat														
Fe	mg/L	1.598	1.761	1.746	2.053	0.165	0.143	0.07	0.031	0.7745	0.415	0.3276	0.5411	0.8021
Mn	mg/L	0.039	nd	0.026	nd	nd	nd	nd	nd	0.059	0.775	0.582	0.584	0.3442
Cu	mg/L	0.079	nd	0.017	nd	0.037	0.051	0.08	0.076	0.092	0.139	0.01	0.15	0.0731
Zn	mg/L	0.241	0.077	0.363	0.029	0.367	0.317	0.339	0.324	0.987	1.776	1.700	1.339	0.6549
Cr	mg/L	nd	0.89	0.101	0.854	nd	nd	nd	nd	1.327	0.75	0.801	1.674	0.9139
Cd	mg/L	0.013	0.251	1.412	0.245	0.036	0.043	0.038	0.046	0.987	1.114	1.389	1.444	0.5848
Pb	mg/L	2.308	nd	0.976	nd	0.715	0.774	0.758	0.723	0.955	1.129	0.855	1.021	1.0214
Total akumulasi	mg/L	4.278	2.9790	4.6410	3.1810	1.3200	1.3280	1.2850	1.2000	5.1815	6.0980	5.6646	6.7531	4.3944

2. Penentuan pH dan Waktu Seeding Dan Aklimatisasi Optimum

Tabel 5.1.1. Penentuan pH dan waktu optimum seeding-aklimatisasi pada temperatur Ambient

Tahap	Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
Seeding	1	28	27,5	7,8	0		
	2	27	26	7	0		
	3	27,5	26,5	7,5	0		
	4	27,4	26,7	7,3	0		
	5	27,5	26,7	7,2	0		
	6	27,6	26,7	7,2	0	-	-
	7	27,8	26,8	7,1	0		
	8	28	27	6,9	3		
	9	29	27,5	7	4,5		
	10	28,5	26	7,3	8		
Aklimatisasi	1	28	27,5	6,9	21	810,0288	4732,56
	2	28	27	7,0	49		
	3	28,5	27,5	7,1	57	729,3082	5351,953
	4	28,2	27,9	7,2	80		
	5	28,2	27,9	7,2	72	601,8969	6627,04
	6	28,2	27,7	7,2	79		
	7	28,3	27	7,3	83	286,3256	5279,357
	8	28,5	27,2	7,3	94		
	9	28,5	27	7,4	110	363,5	4587,3704
	10	28,2	27,8	7,5	121		
	11	28,3	27,5	7,5	135	333	3457,7
	12	28,5	28	7,6	142		
	13	28,4	27,8	7,7	184	310,29	2437,9
	14	28,4	27,9	7,7	210		

Tabel 5.1.2. Penentuan pH dan waktu optimum seeding-aklimatisasi pada temperatur 35 °C

Tahap	Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
Seeding	1	29.9	28.5	6.3	0		
	2	30	28	6.3	0		
	3	29.9	28.3	6.4	0		
	4	30	28.8	6.4	27		
	5	30.2	29	6.5	20		
	6	30.5	29.3	6.7	2	-	-
	7	31	29.5	6.4	6		
	8	28.5	28.5	6.4	10		
	9	28.2	28.5	6.9	21		
	10	28.5	28.5	6.7	15		
Aklimatisasi	1	35	34	7.0	41	810.0288	4732.56
	2	35	35	7.4	44		
	3	35	34.5	7.8	55	688.0204	6611.68
	4	35	34	7.7	53		
	5	35	35	7.8	64	685.440	4558
	6	35	34.8	7.6	74		
	7	35	34.9	7.9	87	621.254	3892.8
	8	35	35	7.5	100		
	9	35	36	7.3	114	573.49	3227.6
	10	35	36	7.5	128		
	11	35	36	7.3	145	761.080	2562.4
	12	35	35.5	7.4	177		
	13	35	34.5	7.5	250	638.000	1666.0
	14	35	34	7.5	359		

Tabel 5.1.3. Penentuan pH dan waktu optimum seeding-aklimatisasi pada temperatur 45 °C

Tahap	Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
		T lindi	T biogas				
Seeding	1	28.3	28	6.3	1		
	2	28.5	28	6.4	4		
	3	29.5	28	6.5	7.5		
	4	28	29.5	6.7	4		
	5	29.3	28	6.4	18.5		
	6	28.5	28	6.4	0	-	-
	7	28.5	28	6.9	24.5		
	8	28.3	29.5	6.7	22		
	9	28.5	29	6.4	10		
	10	29.5	29.5	6.2	0		
Aklimatisasi	1	45	44.5	7.5	0	4414.2336	7715.68
	2	45	43	7.4	22.5		
	3	45	43.5	6.4	29.5	4405.2368	7417.6
	4	45	45.5	6.6	38.5		
	5	45	45.2	7.2	55	3136.896	3979.124
	6	45	45.3	7.9	72		
	7	45	45.5	7.6	82.5	3528	3836.97
	8	45	47	7.9	80		
	9	45	46.7	7.7	122	1916.83	3729.5
	10	45	46	7.8	147		
	11	45	46.5	7.8	125	1107.993	3075.2
	12	45	46	7.6	145		
	13	45	44	7.4	213	1139.59	2810.88
	14	45	44.5	7.6	310		

3. Seeding

Tabel 5.2.1. Seeding pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	27.4	26.7	7.5	0
2	27.5	26.7	7.3	0
3	27.6	26.7	7.2	0
4	27.8	26.8	7.2	0
5	28	27	7.1	0
6	29	27.5	6.9	0
7	28.5	26	7	0
8	28	27.5	7.3	0
9	27	26	6.9	1
10	27.5	26.5	7.0	1.5

Tabel 5.2.2. Seeding pada pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	28.9	28.5	7.2	0
2	28.2	27.5	7.2	0
3	28.9	28.5	7.2	0
4	29	28.5	7.2	0
5	28.3	27.5	7.2	0
6	28.5	28	7.2	2
7	28	27.5	7.2	1
8	28.2	27.5	7.2	0
9	28	27.5	7.2	2
10	28.5	27.8	7.2	5

Tabel 5.2.3. Seeding pada pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	28.5	27.2	8.0	0
2	28.4	27.9	8.0	0
3	27	26	8.0	0
4	27	26	8.0	0
5	27.5	26.5	8.0	0
6	27.4	26.7	8.0	0
7	27	26	8.0	0
8	27.6	26.7	8.0	1
9	27.8	26.8	8.0	1
10	28.5	27	8.0	2

Tabel 5.2.4. Seeding pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	28.5	27.5	7.1	0
2	28.5	27	6.9	0
3	28.2	27	7	6
4	28.3	29	7.3	6.5
5	28.2	28	6.9	6
6	28.3	27.8	6.9	7
7	28.5	27.5	7	7.5
8	28.5	27	7.3	9
9	28.2	27	7.4	10
10	28	27.8	7.4	11

Tabel 5.2.5. Seeding pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	28.2	28	6.3	0
2	28.3	27.8	6.9	0
3	28.5	27.5	6.8	4
4	28.5	27	6.9	9
5	28.2	27	6.8	5
6	28.3	28	6.9	10
7	28.5	27.5	7	10
8	28.2	27.8	7.3	15
9	28.3	28	7.1	9
10	28.5	28	7.4	11

Tabel 5.2.6. Seeding pada Temperatur 35°C

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29.9	28.5	6.8	0
2	30	29	6.9	0
3	30.2	30	6.9	0
4	30.5	29	6.8	4
5	31	30	7	4
6	28.5	28	7.3	0
7	28.2	28	7	1
8	28.5	28	7.2	2
9	30	28	7.1	4
10	30.2	29	7.3	3

Tabel 5.2.7. Seeding pada Temperatur 45°C

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29.3	29	7.3	0
2	28.5	28	7.5	1
3	28.5	28.5	7.5	1
4	28.3	28	7.4	1
5	28.5	28	7.6	3
6	29.5	29	7.5	0
7	29.3	28.5	7.5	4
8	28.5	28	7.4	4
9	28.5	28	7.5	2
10	28.3	28	7.5	0

Tabel 5.2.8. Seeding pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29.9	28.5	7.8	0
2	30	29	7.7	0
3	30.2	28	7.5	0
4	30.5	29	7.4	2
5	31	30	7.1	3
6	28.5	28	6.8	1
7	28.2	28	6.4	0
8	28.5	28.5	6.6	1
9	30	29	6.9	2
10	30.2	28	7.2	4

Tabel 5.2.9. Seeding pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29.3	28.5	7.7	0
2	28.5	28	7.5	0
3	28.5	28	7.2	0
4	28.3	27.5	6.9	0
5	28.5	28	6.8	0
6	29.5	29	6.5	0
7	29.3	28.5	6.3	1
8	28.5	28	6.6	2
9	28.5	28	6.9	1
10	28.3	27.5	7.4	3

Tabel 5.2.10. Seeding pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29	26.5	7.8	0
2	28.5	28	7.6	0
3	28.3	28	7.3	0
4	28.5	28	7.1	4
5	28.2	27	6.9	8
6	28.2	27	6.7	6
7	29	29	6.5	11
8	28	26.5	6.6	14
9	28.3	28	6.8	12
10	28.5	28	7.2	13

Tabel 5.2.11. Seeding pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29	28.5	7.4	0
2	29	28	7.3	0
3	30	29	7.2	0
4	30	29	7.1	0
5	29.5	28	6.9	0
6	29	28	6.6	4
7	29	28.5	6.7	8
8	29.5	28.8	6.8	7
9	30	29	6.9	10
10	30.5	29	7.1	13

Tabel 5.2.12. Seeding pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	28.5	27.5	7.7	0
2	28	27.8	7.3	0
3	29	28	6.8	2
4	29.5	28.5	6.9	4
5	29.5	28.5	7.0	0
6	29	27.9	7.1	4
7	29	29	7.1	7
8	29.5	28.9	7.2	8
9	30	28	7.2	9
10	29	27.9	7.3	15

Tabel 5.2.13. Seeding pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	29	28.5	7.6	0
2	29.5	28	7.4	0
3	30	29	7.3	0
4	29.5	29	7.1	9
5	29.5	28.3	6.8	0
6	29	26.9	6.4	10
7	29	27	6.2	10
8	29.5	26.5	6.4	12
9	30	28	6.4	14
10	28.5	27.8	6.4	13

Tabel 5.2.14. Seeding pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	Δp mm H ₂ O
	T lindi	T biogas		
1	31	30	7.8	0
2	31.5	30.5	7.6	0
3	31	30.5	7.3	0
4	30	29.5	7.1	0
5	31	30.5	6.9	2
6	30	29.5	6.7	4
7	30.5	30	6.5	3
8	30	29.5	7.0	8
9	30	29.5	7.0	11
10	31	30	7.1	13

4. Aklimatisasi

Tabel 5.3.1. Aklimatisasi pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	28.2	27.9	7.2	4	4332.56	7098.84
12	28.2	27.7	7.2	8		
13	28.3	27	7.3	10	4187.37	6881.06
14	28.5	27.2	7.3	14		
15	28.5	27	7.4	12	3057.7	5186.55
16	28.2	27.8	7.5	13		
17	28.3	27.5	7.5	14	2037.9	3656.85
18	28.5	28	7.6	16		
19	28,4	27,8	7.7	19	1528.66	2893.00
20	28,4	27,9	7.7	21		

Tabel 5.3.2. Aklimatisasi pada pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	27.9	26.6	7.2	7	3855.75	6111.7
12	27.8	27.5	7.2	11		
13	27.8	27.6	7.2	12	2377.7	4638.8
14	27.5	27	7.2	16		
15	26.5	26	7.2	18	1999.5	2397.6
16	27.2	27	7.2	20		
17	27	26.5	7.2	18	1555	2044.72
18	27.2	27	7.2	22		
19	27.2	27	7.2	23	1160.75	1557.57
20	27.8	27	7.2	29		

Tabel 5.3.3. Aklimatisasi pada pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	28.5	27.8	8.0	3	3845	6303.3
12	28.4	27.9	8.0	4		
13	28.4	26	8.0	5	2887.75	4284.84
14	28.3	26.5	8.0	8		
15	28.5	28	8.0	9	2022.25	3150.5
16	28.4	27.8	8.0	11		
17	28.4	27.9	8.0	12	1490.45	2205.1
18	27	26	8.0	14		
19	27.5	26.5	8.0	15	1326.32	2007.65
20	27.4	26.7	8.0	17		

Tabel 5.3.4. Aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	28.3	27.5	7.2	15	3508.35	6155
12	28.2	27.5	7.2	18		
13	28.3	28	7.2	23	2765.6	4123.65
14	28.2	28	7.1	30		
15	28.3	27.5	6.9	35	2057.4	3077.5
16	28.2	28	7.0	44		
17	28.3	27.5	7.4	47	1899.56	2815.6
18	28.5	28	7.8	55		
19	28.3	28	7.6	60	1755.5	2769.7
20	29	27.5	7.5	67		

Tabel 5.3.5. Aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	28.3	26	7.1	19	3753.94	6489
12	28.2	26.5	7.4	22		
13	28.3	27.8	7	33	3631.55	6279
14	28.5	27.5	7.8	43		
15	28.3	27	7.4	55	2577.76	4572.67
16	28.2	27.5	7.7	60		
17	28.3	27.5	8	64	2295.1	4200.12
18	28.5	28	7.8	76		
19	28.3	28	7.6	81	2003.53	3642.95
20	29	28	7.3	93		

Tabel 5.3.6. Aklimatisasi g pada Temperatur 35°C

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	35	34	7.5	7	4183.8	7320.0
12	35	33.5	7.7	8		
13	35	34.8	7.2	9	3820.0	6480.0
14	35	34.9	7.4	9		
15	35	34.5	7.2	11	2220.4	3760.00
16	35	33	7.2	13		
17	35	33.5	7.3	15	1650	2579.35
18	35	33.5	7.3	17		
19	35	34	7.3	19	1150.07	1873.0
20	35	34.5	7.4	22		

Tabel 5.3.7. Aklimatisasi pada Temperatur 45°C

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	45	42.5	7.5	0	4,095.90	7131.25
12	45	43.5	7.5	4		
13	45	44.5	7.5	5	3,930.33	6640.46
14	45	44	7.5	7		
15	45	44	7.4	9	2,750.71	5060.82
16	45	44.5	7.6	12		
17	45	44.5	7.5	14	2,540.98	4700.61
18	45	43.5	7.5	14		
19	45	44	7.4	21	1530.44	2748.4
20	45	44.5	7.5	25		

Tabel 5.3.8. Aklimatisasi pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	35	34	7.2	6	4123	7154.8
12	35	34	7.2	7		
13	35	34.5	7.2	11	3778.5	6234.2
14	35	34.8	7.2	13		
15	35	34	7.2	14	2123.45	3670.25
16	35	34.5	7.2	15		
17	35	34.8	7.2	13	1559.9	2272.5
18	35	34	7.2	19		
19	35	34.5	7.2	21	1122.45	1783.7
20	35	34.5	7.2	23		

Tabel 5.3.9. Aklimatisasi pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	45	44.5	7.7	4	4,045.48	6131.25
12	45	44.5	7.9	6		
13	45	44	8.0	10	2,831.50	4640.46
14	45	44	8.0	11		
15	45	44	8.0	12	2,150.71	3060.82
16	45	44	8.0	13		
17	45	44.5	8.0	14	1,840.98	2700.61
18	45	44.6	8.0	17		
19	45	44	8.0	19	1213.44	1748.4
20	45	44.5	8.0	22		

Tabel 5.3.10. Aklimatisasi pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	28.3	26	7.5	18	3703.9	6448.9
12	28.5	26.5	7.8	23		
13	28.3	28	7.9	25	3315.5	6227.9
14	28.2	28	8.0	29		
15	28.3	26.5	8.0	42	2557.7	4357.27
16	28.2	28	8.0	51		
17	28.3	26.5	8.0	55	2291.5	4120
18	28.2	28	8.0	63		
19	28.3	26.5	8.0	73	2030.5	3462.9
20	29	28	8.0	84		

Tabel 5.3.11. Aklimatisasi pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	35	33	7.2	10	3873	7455
12	35	32.5	7.2	17		
13	35	34	7.2	18	3315	6479
14	35	32.5	7.2	20		
15	35	33	7.2	23	2877	4327
16	35	33	7.2	25		
17	35	34	7.2	35	2295	4250
18	35	32.5	7.2	50		
19	35	33	7.2	65	2235	3529
20	35	34	7.2	95		

Tabel 5.3.12. Aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperature, °C		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	45	42.5	7.2	12	3499	7489
12	45	43.5	7.2	15		
13	45	44	7.2	19	3235	6229
14	45	43.5	7.2	22		
15	45	43	7.2	23	2775	5457
16	45	44	7.2	32		
17	45	43.5	7.2	45	2291.5	5120
18	45	43	7.2	59		
19	45	44.5	7.2	79	2030.5	4462
20	45	43.5	7.2	116		

Tabel 5.3.13. Aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	45	43.5	6.3	23	3433.56	7398.5
12	45	44	6.4	25		
13	45	43.5	6.4	35	3587.4	6581.6
14	45	44	6.5	47		
15	45	43	6.6	53	3357.5	5486.5
16	45	43.5	6.7	58		
17	45	43.5	6.9	62	2375	3756.5
18	45	43	7.1	68		
19	45	43.5	7.2	85	1452.5	2789.50
20	45	44	7.3	105		

Tabel 5.3.14. Aklimatisasi pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 8.0

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	BOD mg/L	COD mg/L
	T _{Lindi}	T _{Biogas}				
11	45	42.5	7.2	19	2630.6	7448.9
12	45	43.5	7.4	23		
13	45	43	7.5	30	1832.6	4558.3
14	45	42.5	7.6	33		
15	45	43	7.7	36	1545	3507
16	45	42.5	7.8	39		
17	45	42.5	8.0	42	1482.5	3267.8
18	45	43.5	8.0	62		
19	45	42.5	8.0	85	1496	3125
20	45	43.5	8.0	95		

5. Hasil Penelitian Pengolahan Anaerobik

Tabel 5.4.1. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur dan pH Ambient; Tanpa Resirkulasi

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	28.3	27	7.3	23	0.98612	0.93291	0.3	4050.14	6625.40	409.28	1991.2	227.94
22	28.5	27.2	7.2	24								
23	28.5	27	7.2	31	0.98607	0.92354	0.1	3646.54	5280.38	306.95	1789.3	335
24	28.2	27.8	7.1	36								
25	28.3	27.5	6.9	36	0.98587	0.91858	0.0	3009.49	4587.37	254.23	1562.5	370.63
26	28.5	28	7	40								
27	28.4	27.8	7.3	40	0.98577	0.89901	0.0	2431.63	3457.78	168.26	1520.4	333
28	28.4	27.9	7.4	36								
29	28.3	27.5	7.5	31	0.98567	0.89623	0.0	1982.50	3399.34	163.84	1234.9	313.52
30	28.5	28	7.5	28								
31	28.4	27.8	7.6	26	0.98562	0.89369	0.0	1665.00	2928.98	204.9	1134.5	210.12
32	28.4	27.9	7.7	22								
33	27	26	7.7	19	0.98569	0.89106	0.0	1551.45	2437.90	90.72	1110.9	192.3
34	27.5	26.5	7.8	20								
35	27.4	26.7	7	18	0.98566	0.88896	0.0	1414.20	2371.64	85.63	978.5	156.51
36	27.5	26.7	7.5	16								
37	27.6	26.7	7.3	13	0.98562	0.88582	0.0	1254.25	2103.45	65.24	899.3	138.86
38	27.8	26.8	7.3	14								
39	28.5	27	7.4	9	0.9856	0.88373	0.0	1329.60	2120.64	66.53	678.2	85.25
40	28.2	27.8	7.5	8								
41	28.3	27.5	7.5	7	0.98547	0.87388	0.0	1259.0	1866.03	65.15	549.79	94.5

Tabel 5.4.2. Pengolahan Anaerobik pada pH 7.2

Hari	Temperature, oC		pH	ΔP	Densitas	Viscositas	DO	BOD	COD	TSS	TDS	VFA;
	T Lindi	T Biogas		mm H ₂ O	g/mL	g/cm.s	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L (As. Asetat)
21	29	30.5	7.2	34	0.98726	0.93814	0.3	4055.00	6457.65	355	1908.32	87.00
22	29	29.5	7.2	39								
23	28.7	29	7.2	42	0.98655	0.90806	0.1	3474.82	5540.56	320	1723.4	225.00
24	28.5	29.5	7.2	40								
25	28.5	30	7.2	35	0.98625	0.88742	0.0	2860.00	3947.33	270	1478.9	257.00
26	28.5	29	7.2	34								
27	29	29	7.2	33	0.98612	0.86751	0.0	2476.10	3236.4	215	1413.4	156.00
28	28.3	29	7.2	30								
29	28.5	29	7.2	28	0.98585	0.85971	0.0	2006.56	2618.56	175	1259.1	370.63
30	28	28	7.2	26								
31	28	29	7.2	24	0.98571	0.8574	0.0	1383.00	1945.36	155	1119.9	187.00
32	28.5	28.4	7.2	23								
33	28.5	29.5	7.2	21	0.98569	0.85522	0.0	1270.00	1778	115	1007.5	235.00
34	28.5	29	7.2	20								
35	28.5	29	7.2	19	0.98568	0.8552	0.0	1157.35	1665.3	102	987.2	177.00
36	28.3	28.8	7.2	17								
37	28.5	29	7.2	15	0.98566	0.85514	0.0	838.80	1278.5	105	879.9	85.25
38	28	29	7.2	13								
39	28	29	7.2	11	0.98563	0.85486	0.0	821.5	1272.7	95	623.4	138.86
40	28.9	28.5	7.2	10								
41	30	31	7.2	9	0.98562	0.85242	0.0	799.33	1199.2	92	490.63	91.15

Tabel 5.4.3. Pengolahan Anaerobik pada pH 8.0

Hari	Temperature,		pH	ΔP	Densitas	Viscositas	DO	BOD	COD	TSS	TDS	VFA
	T Lindi	T Biogas		mm H ₂ O	g/mL	g/cm.s	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L (As. Asetat)
21	28.5	28	8.0	18	0.9859	1.01043	0.2	3809.60	6200.00	345.2	1791.7	83.33
22	28.4	27.8	8.0	20								
23	27	27.9	8.0	22	0.98576	0.97299	0.0	2960.70	5450.40	309	1674.6	89.00
24	27.5	26	8.0	24								
25	27.4	26.5	8.0	27	0.98547	0.95991	0.0	2546.00	5056.55	267	1505.5	156.00
26	27.5	26.7	8.0	31								
27	27.6	26.7	8.0	32	0.98531	0.94748	0.0	2280.70	4133.35	252	1478.9	138.86
28	27.8	27.8	8.0	29								
29	28.5	27.9	8.0	26	0.9852	0.9452	0.0	2142.20	3757.90	225	1292.5	166.53
30	27.4	27.5	8.0	24								
31	27.5	28	8.0	23	0.98509	0.92159	0.0	1825.90	3013.81	195	1071.8	370.63
32	27.6	27.8	8.0	21								
33	27.8	27.9	8.0	20	0.98507	0.91185	0.0	1493.89	2443.65	150	998.6	187
34	28.5	27.8	8.0	17								
35	28.2	27.5	8.0	16	0.98506	0.899	0.0	1352.50	1936.20	103	912.5	253.5
36	28.3	28	8.0	14								
37	28.5	27.8	8.0	12	0.98501	0.8896	0.0	1199.85	1490.22	89	820.7	225
38	28.2	27.9	8.0	11								
39	28.3	27.5	8.0	9	0.98487	0.8854	0.0	825.70	1279.40	79	556.7	124.90
40	28.5	28	8.0	7								
41	28.4	27.8	8.0	6	0.98485	0.8797	0.0	765.18	1205.9	75.9	398.43	185.25

Tabel 5.4.4. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 6 L/mnt

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	29.3	27.0	7.2	76	0.98702	1.01158	0.4	3616.3	6235	470.5	2579.4	194.95
22	29.0	27.5	6.9	89								
23	29.8	27.4	7	95	0.98656	0.97378	0.2	2853.02	3875.00	331.7	2226.7	365.65
24	29.9	28,4	7.3	99								
25	29.8	27.0	7.4	101	0.98627	0.95068	0.0	2240.50	3005.85	260.85	1995.6	448.98
26	29.3	27.5	7.5	97								
27	29.0	27.4	7.5	83	0.98617	0.9443	0.0	2104.40	2575.80	237.5	1629.35	409.63
28	29.0	27.5	7.5	72								
29	29.0	28.3	7.3	64	0.9861	0.9346	0.0	1614.78	2150.70	211.5	1321.7	356.32
30	29.0	28.5	7.5	61								
31	28.8	28,4	7.3	54	0.98599	0.92143	0.0	1455.32	1945.00	198	1235.6	480
32	28.5	28,4	7.4	43								
33	29.8	29.0	7.5	39	0.98592	0.90064	0.0	1318.80	1786.05	154.54	1067.5	475.1
34	28.8	28.3	7.5	35								
35	28.5	28.0	7.6	33	0.98582	0.88979	0.0	1245.70	1709.34	135.78	1002.3	336.1
36	29.8	27.5	7.7	30								
37	29.9	27.5	7.7	26	0.98554	0.87746	0.0	1022.34	1557.70	105.56	850.9	180.7
38	29.8	27.4	7.8	23								
39	29.3	27.5	7.6	20	0.98531	0.87518	0.0	878.75	1414.50	102.45	712.5	123.5
40	29.0	28.3	7.9	17								
41	29.0	28.5	7.5	10	0.98526	0.87307	0.0	769.9	1293.7	94.5	615.96	99.8

Tabel 5.4.5. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt

hari	Temperature,		pH	Δ P	Densitas	Viscositas	DO	BOD	COD	TSS	TDS	VFA
	T Lindi	T Biogas		mm H ₂ O	g/mL	g/cm.s	mg/L	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L (As. Asetat)
21	30	29.3	7.3	101	0.98743	1.012	0.1	3835.8	6555.71	550	2712.0	153.05
22	30	29	7.7	108								
23	30	29	7.8	113	0.98682	0.99063	0.0	2929.29	4351.90	455	2024.5	338.13
24	30.8	28.8	7.8	116								
25	30.2	29	7.8	115	0.98662	0.9645	0.0	2496.17	4080.00	360	1715.7	567.32
26	31	30.5	7.0	112								
27	30.9	29.8	7.4	104	0.98638	0.94851	0.0	1817.1	3708.45	330	1669.5	828.26
28	30.5	29.9	7.8	90								
29	30.5	29.8	7.7	77	0.9861	0.94606	0.0	1615.5	3680.00	310	1420.4	872.88
30	30.5	30	7.8	65								
31	30	29.7	7.6	60	0.98597	0.92552	0.0	1610	2800.00	280	1310	814.6
32	30.3	30	7.9	55								
33	30.2	30	7.5	47	0.98587	0.91259	0.0	1316.21	2294.73	275	1254.7	697.72
34	30	29.5	7.3	44								
35	30.5	30.5	7.5	42	0.98577	0.89632	0.0	1121.6	1955.44	205	1085.0	512.7
36	32	30.7	7.3	32								
37	30.5	29.8	7.4	27	0.98552	0.87765	0.0	810.82	1666.30	173	831.1	244.54
38	30.5	30	7.5	24								
39	29	30	7.5	17	0.98532	0.87416	0.0	767.00	1311.20	140	702.2	326.2
40	30	29.8	7.4	18								
41	30.5	29.5	7.3	10	0.98524	0.87201	0.0	708.2	1209.22	114	528.8	76.71

Tabel 5.4.6. Pengolahan Anaerobik g pada Temperatur 35°C

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H2O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	35	34.5	7.9	25	0.98715	1.03496	0.2	3850.32	6520	490	1980.00	166.5
22	35	34	7.7	30								
23	35	35	7.6	42	0.98617	0.99205	0.0	3645.10	5827.35	475	1885.00	557.78
24	35	34.8	7.6	61								
25	35	34.9	7.7	72	0.98587	0.96895	0.0	3517.47	4965.74	325	1740.00	1698.97
26	35	34	7.8	189								
27	35	34.5	7.8	199	0.9856	0.94776	0.0	3126.34	4231.5	300	1655.00	1467.7
28	35	34.5	7.9	163								
29	35	34	7.6	133	0.98555	0.94066	0.0	3021.00	4640	300	1520.00	1040.8
30	35	34.9	7.9	109								
31	35	35	7.8	88	0.98509	0.92469	0.0	2211.83	3072.7	250	1460.00	947.22
32	35	35	7.8	86								
33	35	34	7.6	73	0.98487	0.91167	0.0	1972.00	2618.4	240	1006.90	450.88
34	35	34.8	7.4	49								
35	35	34.5	7.6	40	0.98482	0.89545	0.0	1822.83	2320	210	952.25	334.83
36	35	34	7.6	36								
37	35	35	7.6	26	0.98465	0.87687	0.0	1553.50	1901.35	155	792.20	218.95
38	35	34.8	7.4	23								
39	35	34.9	7.4	19	0.98439	0.87333	0.0	1270.29	1440	115	583.90	500.79
40	35	35	7.5	16								
41	35	34.6	7.3	8	0.98434	0.87122	0.0	693.50	1327.45	99	397.60	331.85

Tabel 5.4.7. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	45	44.5	7.3	21	0.98622	1.03357	0.2	4104.18	7445.11	405	2078.6	166.5
22	45	44	7.4	26								
23	45	43	7.4	36	0.98537	0.98399	0.0	4035.80	4530	400	1554.6	486.18
24	45	44	7.6	53								
25	45	43.5	7.5	92	0.98512	0.96511	0.0	2882.35	3806.00	375	1245.6	780.88
26	45	44	7.7	152								
27	45	44	7.6	146	0.98492	0.93592	0.0	2606.41	2984.1	350	1101.45	1232.1
28	45	44.5	7.2	138								
29	45	44	7.9	113	0.98487	0.92138	0.0	2405.87	2657.42	330	982.8	166.5
30	45	43	7.6	100								
31	45	44	7.9	100	0.98464	0.89839	0.0	2239.32	2400.55	325	915.5	749.25
32	45	43.5	7.7	84								
33	45	43	7.8	60	0.98437	0.88987	0.0	1755.34	2220	105	805.77	576.09
34	45	43	7.8	63								
35	45	44.5	7.6	52	0.98407	0.88422	0.0	1290.73	2194.24	80	734.8	281.39
36	45	42	7.4	30								
37	45	43	7.6	23	0.98369	0.87374	0.0	1178.51	2003.5	70	613.9	165.5
38	45	43.5	7.5	17								
39	45	43	7.5	7	0.98349	0.87212	0.0	1025.54	1743.42	45	501.3	83.26
40	45	43	7.4	7								
41	45	43	7.4	5	0.98342	0.8704	0.0	902.88	1563.45	42.5	410.56	80.78

Tabel 5.4.8. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35°C dan pH 7.2

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	35	34	7.2	27	0.98618	1.0395	0.2	3925.50	6155.9	325	2245.8	234.8
22	35	35	7.2	31								
23	35	34.8	7.2	39	0.98607	0.97323	0.0	3155.25	4872.5	177.6	1778.9	457.65
24	35	34.8	7.2	59								
25	35	34.9	7.2	99	0.98587	0.93931	0.0	2615.49	3965.75	124.4	1332.2	397.5
26	35	34	7.2	162								
27	35	34.5	7.2	201	0.98577	0.91844	0.0	2126.34	3311.1	110.6	1102.35	1678.5
28	35	34.5	7.2	185								
29	35	34	7.2	143	0.98567	0.91141	0.0	1553.50	2618.4	97.5	1035.75	940.8
30	35	34.9	7.2	121								
31	35	34	7.2	105	0.98557	0.89717	0.0	1270.29	1901.35	89	925.25	1125.4
32	35	34.5	7.2	88								
33	35	34	7.2	73	0.98547	0.89294	0.0	1120.33	1640	84	788.6	450.9
34	35	34.8	7.2	65								
35	35	34	7.2	53	0.98507	0.88822	0.0	899.75	1315.78	80	685.45	875.75
36	35	34.5	7.2	44								
37	35	34.5	7.2	35	0.98447	0.88065	0.0	775.90	1210.25	75	575.65	349.5
38	35	34	7.2	27								
39	35	34.5	7.2	18	0.98397	0.87813	0.0	726.88	1173.25	65	540.58	557.78
40	35	34	7.2	14								
41	35	34.5	7.2	12	0.98377	0.8765	0.0	689.50	1124.5	60.15	420.5	338.5

Tabel 5.4.9. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45°C dan pH 8.0

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	45	44.5	8.0	25	0.98727	1.05854	0.1	3904.20	6531.1	375.5	2545.8	266.5
22	45	44	8.0	29								
23	45	43	8.0	36	0.98542	1.04619	0.0	3035.80	4453.2	257.5	1778.58	486.18
24	45	44	8.0	52								
25	45	43.5	8.0	90	0.98487	1.0042	0.0	2582.50	3808.50	212.5	1330.55	1232.1
26	45	44	8.0	136								
27	45	44	8.0	155	0.98477	0.9287	0.0	2006.40	2989.41	157.7	1100.25	680.9
28	45	44.5	8.0	140								
29	45	44	8.0	121	0.98391	0.90983	0.0	1755.34	2400.55	117.9	935.75	1566.5
30	45	43	8.0	110								
31	45	44	8.0	92	0.98282	0.90015	0.0	1290.73	2174.24	102.45	825.25	879.25
32	45	43.5	8.0	81								
33	45	43	8.0	68	0.98277	0.88895	0.0	1178.51	2003.45	99.5	778.6	1023.45
34	45	43	8.0	59								
35	45	44.5	8.0	49	0.98262	0.88519	0.0	1025.54	1721.42	102	625.45	550.6
36	45	42	8.0	39								
37	45	43	8.0	30	0.98162	0.87397	0.0	945.00	1545.45	81.7	557.55	660.4
38	45	43.5	8.0	21								
39	45	43	8.0	13	0.98152	0.87182	0.0	832.90	1443.42	72.5	524.6	383.6
40	45	43	8.0	11								
41	45	43	8.0	9	0.98122	0.86949	0.0	702.68	1306.35	67.25	457.5	168.7

Tabel 5.4.10. Pengolahan Anaerobik pada Resirkulasi Lindi 24 L/mnt dan pH 8.0

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	27.4	26.5	8.0	92	0.98602	1.07689	0.2	3850.75	6255.70	453.5	2457.9	153.05
22	27.5	26.7	8.0	99								
23	27.6	26.7	8.0	103	0.98542	1.0362	0.0	2929.9	4351.90	317.7	1789.56	567.32
24	27.8	27.8	8.0	107								
25	28.5	27.9	8.0	115	0.98532	1.0248	0.0	2249.67	3580.00	260.5	1321.7	338.13
26	29.7	27.5	8.0	117								
27	27.5	28	8.0	110	0.98513	0.9495	0.0	1717.5	3008.45	205	1123.5	828.26
28	29.7	27.8	8.0	99								
29	29.7	27.9	8.0	85	0.98477	0.945	0.0	1651.5	2680.00	173	1065.75	497.72
30	29.7	27.8	8.0	63								
31	30	29.7	8.0	57	0.98387	0.9435	0.0	1451.8	2100.00	140	905.2	671.46
32	30.3	30	8.0	48								
33	30.2	30	8.0	45	0.98337	0.9245	0.0	1316.21	1894.73	121.5	785.9	497.72
34	30	29.5	8.0	41								
35	28.5	27.9	8.0	39	0.98292	0.90546	0.0	1125.6	1755.44	107.9	684.5	551.27
36	29.7	26.7	8.0	32								
37	29.7	27.8	8.0	28	0.98262	0.8925	0.0	818.20	1566.63	99.5	576.45	244.54
38	30.5	27.9	8.0	24								
39	29.7	27.5	8.0	20	0.98242	0.8875	0.0	756.70	1312.50	97	545.8	362.2
40	30	28	8.0	18								
41	30.5	27.8	8.0	11	0.98182	0.8792	0.0	716.8	1192.22	92.5	445.4	176.7

Tabel 5.4.11. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 35 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperature,		pH	Δ P	Densitas	Viscositas	DO	BOD	COD	TSS	TDS	VFA
	T Lindi	T Biogas		mm H ₂ O	g/mL	g/cm.s	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L (As. Asetat)
21	35	33	7.2	152	0.98802	1.0795	0.2	3875.00	6557.00	355	2458	182.00
22	35	34	7.2	195								
23	35	32.5	7.2	259	0.98609	1.0259	0.0	2799.00	4459.00	217	1789	225.00
24	35	32.5	7.2	323								
25	35	32.5	7.2	345	0.98582	0.9896	0.0	2267.00	3850.00	184	1332	257.00
26	35	33	7.2	309								
27	35	34	7.2	257	0.98537	0.91243	0.0	1775.00	3084.50	146	1105	450.00
28	35	34	7.2	224								
29	35	33.5	7.2	183	0.98507	0.90189	0.0	1615.50	2468.00	109	1075	335.00
30	35	33.5	7.2	154								
31	35	34	7.2	125	0.98487	0.8956	0.0	1458.00	2255.00	97	925	215.00
32	35	33.5	7.2	103								
33	35	33	7.2	92	0.98452	0.8853	0.0	1216.50	1854.00	82	788	509.00
34	35	32.5	7.2	83								
35	35	33.5	7.2	78	0.98452	0.8869	0.0	955.00	1754.00	79	556	332.00
36	35	33.5	7.2	67								
37	35	34	7.2	55	0.98415	0.876	0.0	804.00	1536.00	72	465	185.25
38	35	33.5	7.2	45								
39	35	33	7.2	37	0.98402	0.8714	0.0	757.00	1311.50	63	454	139.00
40	35	32.5	7.2	31								
41	35	34	7.2	24	0.98387	0.87184	0.0	698.00	1099.00	59	420	156.00

Tabel 5.4.12. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 6 L/mt dan pH 7.2

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	45	44	7.2	176	0.98762	1.0864	0.2	3475	6535.00	459	2580	182.00
22	45	44.5	7.2	224								
23	45	44	7.2	265	0.98612	1.0494	0.0	2997.00	5149.00	447	2198	245.00
24	45	43	7.2	334								
25	45	44	7.2	358	0.98592	0.9957	0.0	2244.00	3985.00	360.5	1932	357.00
26	45	43.5	7.2	322								
27	45	43	7.2	268	0.98562	0.92167	0.0	1677.00	2985.00	275	1110	977
28	45	43	7.2	245								
29	45	44.5	7.2	198	0.98537	0.8987	0.0	1561.00	2346.00	179	995	1147
30	45	42	7.2	178								
31	45	43	7.2	145	0.98527	0.8865	0.0	1245.00	2225.00	124	915	1048
32	45	44	7.2	121								
33	45	44.5	7.2	110	0.98517	0.8834	0.0	1025.00	1785.00	102	768	922
34	45	44	7.2	99								
35	45	43	7.2	89	0.98508	0.8827	0.0	885.00	1575.00	93	535	458
36	45	44	7.2	73								
37	45	43.5	7.2	62	0.98487	0.87986	0.0	778.00	1356.00	90	456	334
38	45	43	7.2	54								
39	45	43	7.2	47	0.98402	0.8744	0.0	675.00	1235.00	89	445	139.00
40	45	44.5	7.2	41								
41	45	42	7.2	36	0.98382	0.872	0.0	620	1119.00	85	425	166.00

Tabel 5.4.13. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH Ambient

Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H2O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	45	42.5	7.2	123	0.98822	1.05955	0.1	3547.5	6445.00	495	2458	179.00
22	45	43	7.3	128								
23	45	42.5	7.4	137	0.98637	1.03683	0.0	2799.50	4909.00	387	2010.5	345.00
24	45	43.5	7.3	245								
25	45	44	7.6	273	0.98587	1.02905	0.0	2140.00	3850.00	303	1393	974
26	45	43.5	7.5	298								
27	45	44	7.5	359	0.9856	1.00639	0.0	1775.00	2855.00	243	1071	457.00
28	45	44	7.7	346								
29	45	43.5	7.7	296	0.98555	0.98417	0.0	1456.50	2234.60	208	845	1114
30	45	43.5	7.7	246								
31	45	44.5	7.8	215	0.98509	0.963	0.0	1224.50	2005.00	178	784	848
32	45	43.5	7.7	198								
33	45	44	7.8	131	0.98487	0.94001	0.0	1005.00	1725.00	146	712	1042
34	45	43.5	7.8	109								
35	45	43	7.9	92	0.98482	0.89442	0.0	758.50	1357.50	123	657	658
36	45	42.5	7.8	78								
37	45	43.5	7.6	67	0.98465	0.8746	0.0	678.00	1235.60	104	512	398
38	45	44	7.5	55								
39	45	43.5	7.4	50	0.98439	0.87292	0.0	625.50	1123.50	99	465	237.00
40	45	44	7.4	44								
41	45	44	7.3	44	0.98394	0.87086	0.0	612.50	1091.9	85	435	166.50

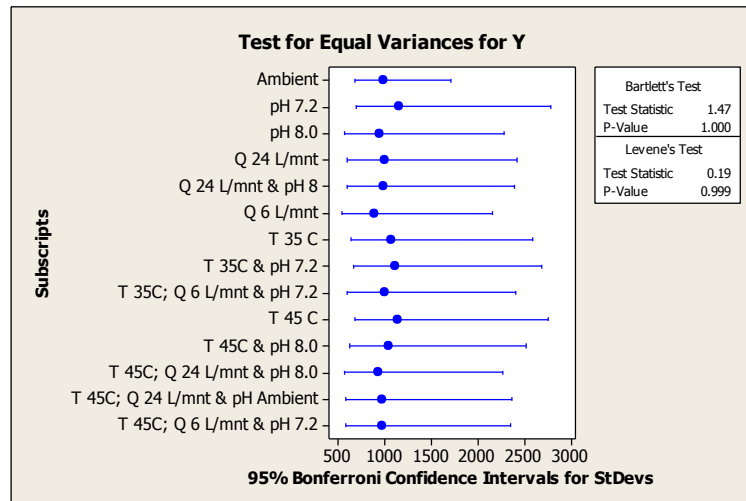
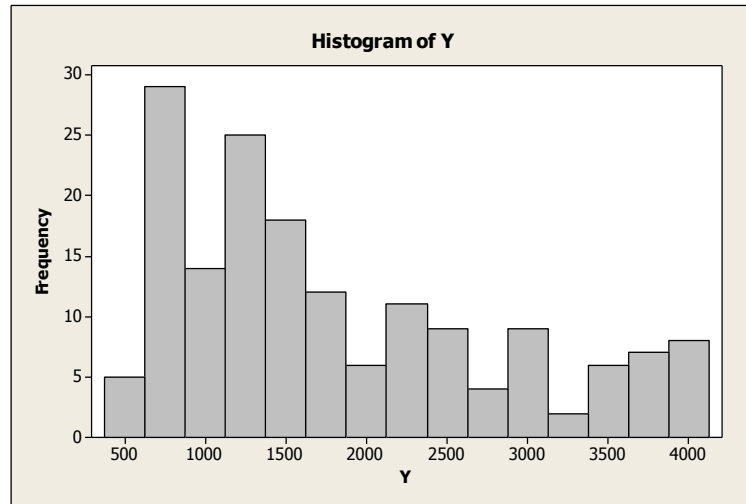
Tabel 5.4.14. Pengolahan Anaerobik pada Temperatur 45 °C; Q 24 L/mt dan pH 0.8

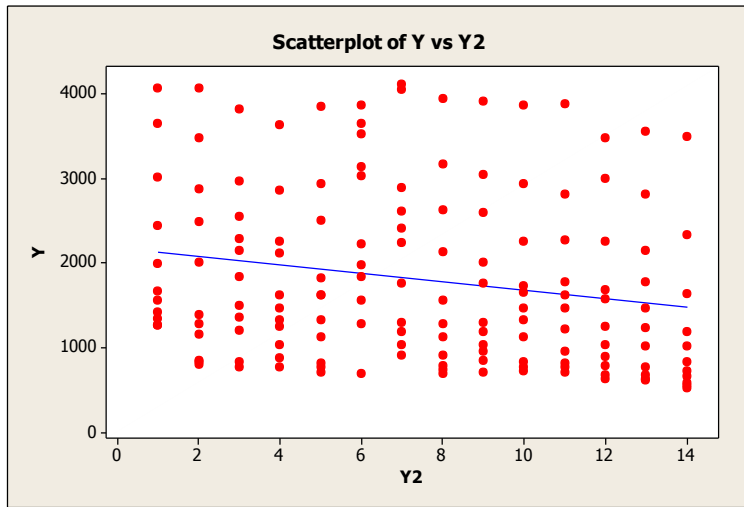
Hari	Temperature,		pH	ΔP mm H ₂ O	Densitas g/mL	Viscositas g/cm.s	DO mg/L	BOD mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	VFA mg/L (As. Asetat)
	T Lindi	T Biogas										
21	45	42.5	8.0	123	0.98812	1.05841	0.1	3248.5	6351.00	335.50	2345.80	227.94
22	45	43.5	8.0	177								
23	45	43	8.0	245	0.98552	0.94167	0.0	2322.3	4367.30	238.20	1594.60	947.00
24	45	43.5	8.0	290								
25	45	41.5	8.0	346	0.98477	0.90058	0.0	1624	2587.15	167.00	905.30	1699.70
26	45	42	8.0	364								
27	45	42.5	8.0	360	0.98465	0.89551	0.0	1176.6	2086.00	113.50	726.60	1232.10
28	45	43.5	8.0	343								
29	45	43	8.0	331	0.98439	0.88885	0.0	1009.4	1567.80	96.16	625.37	780.90
30	45	44	8.0	305								
31	45	43.5	8.0	284	0.98425	0.87838	0.0	831.09	1456.95	84.23	573.70	1040.80
32	45	43	8.0	262								
33	45	42.5	8.0	202	0.98402	0.87631	0.0	718.6	1343.60	75.44	500.15	486.20
34	45	42	8.0	176								
35	45	43.5	8.0	132	0.98387	0.87142	0.0	653.13	1208.74	61.64	447.45	749.30
36	45	43	8.0	98								
37	45	44.5	8.0	89	0.98381	0.86599	0.0	584.8	1108.15	56.30	423.40	576.10
38	45	44	8.0	75								
39	45	43.5	8.0	65	0.98372	0.86343	0.0	539.90	1010.90	50.87	389.40	281.40
40	45	42	8.0	61								
41	45	44	8.0	58	0.98345	0.84769	0.0	514.8	932.7	45.90	345.80	166.50

Lampiran F. Analisis Data Statistika

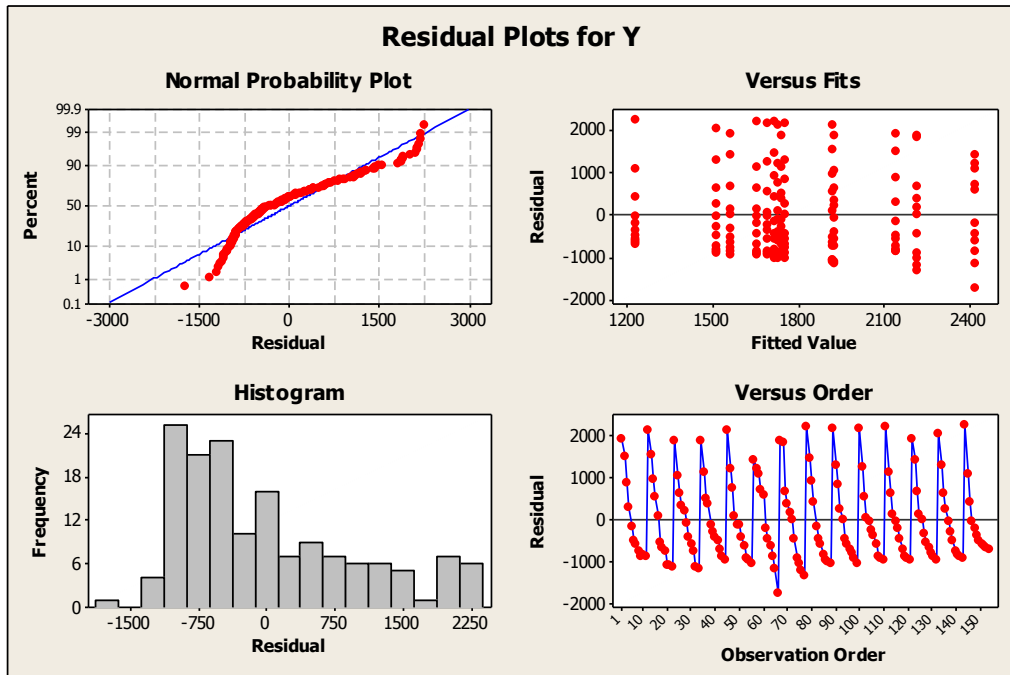
1. Hasil Analisis Data

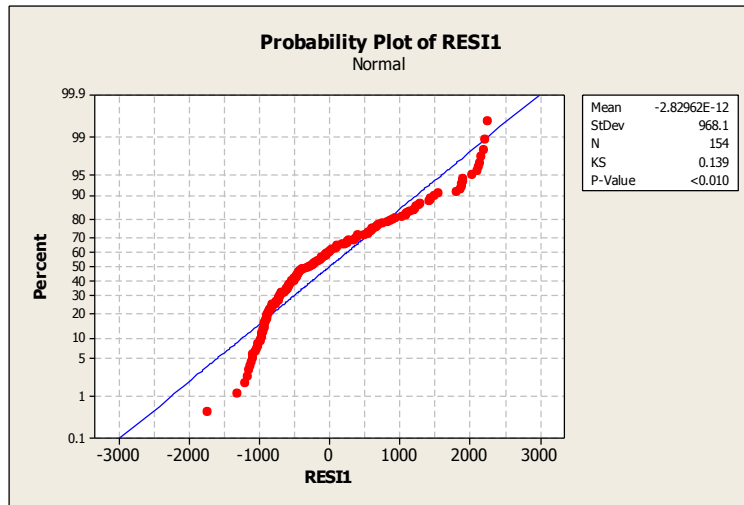
1. BOD



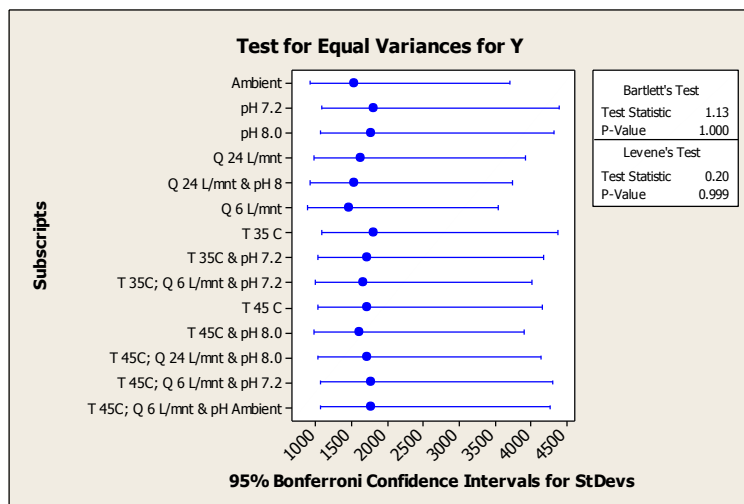
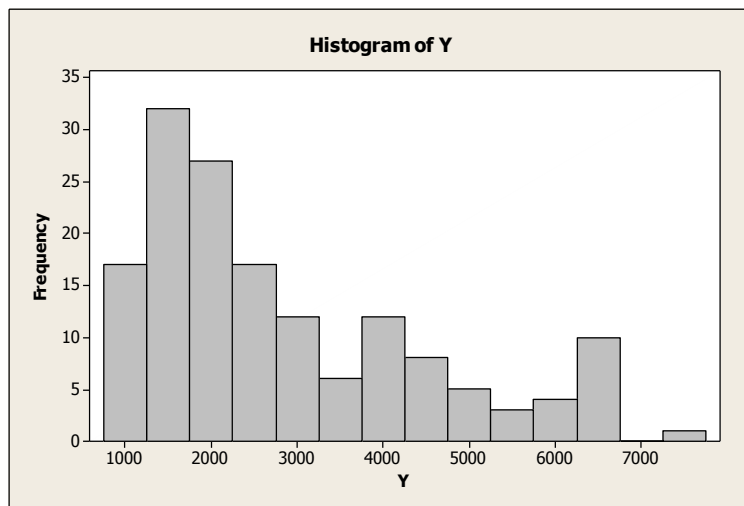


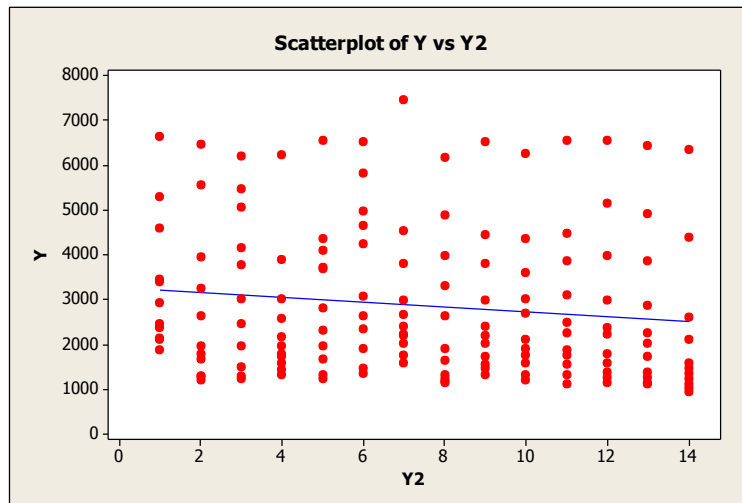
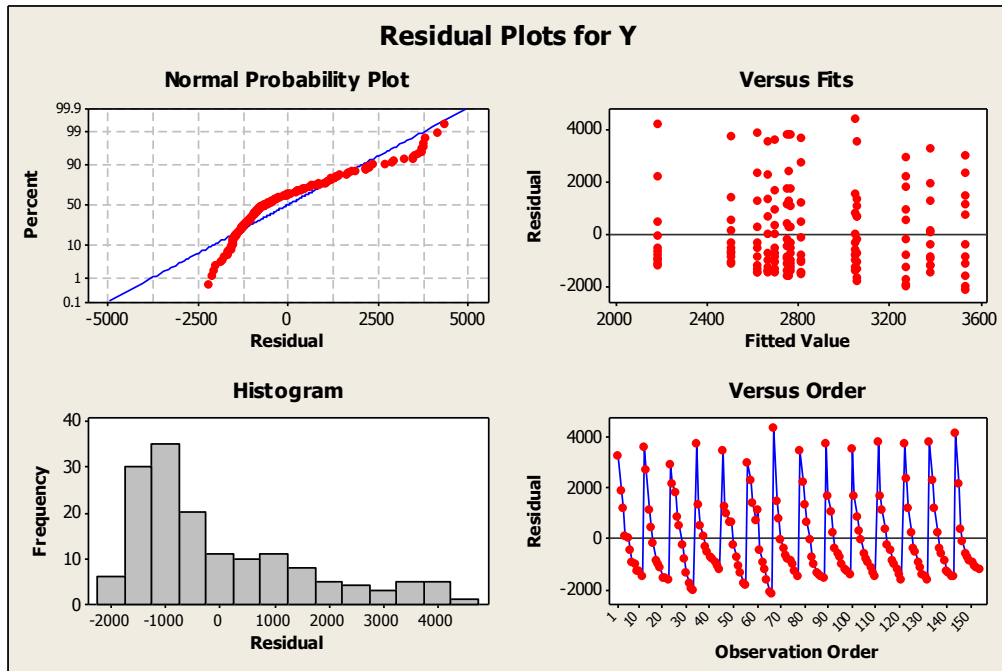
Pearson correlation of Y and Y2 = -0.203
P-Value = 0.012





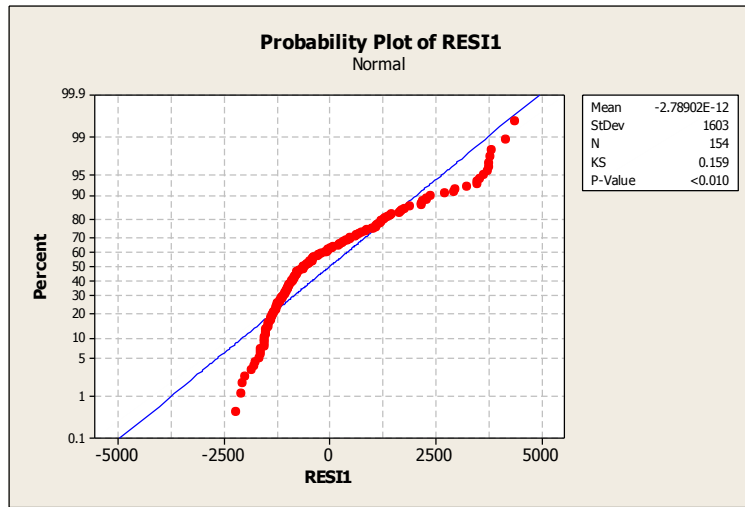
2. COD



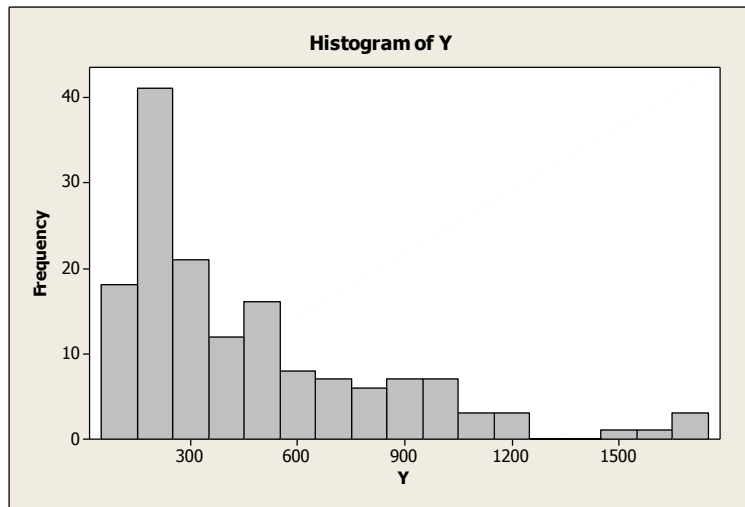


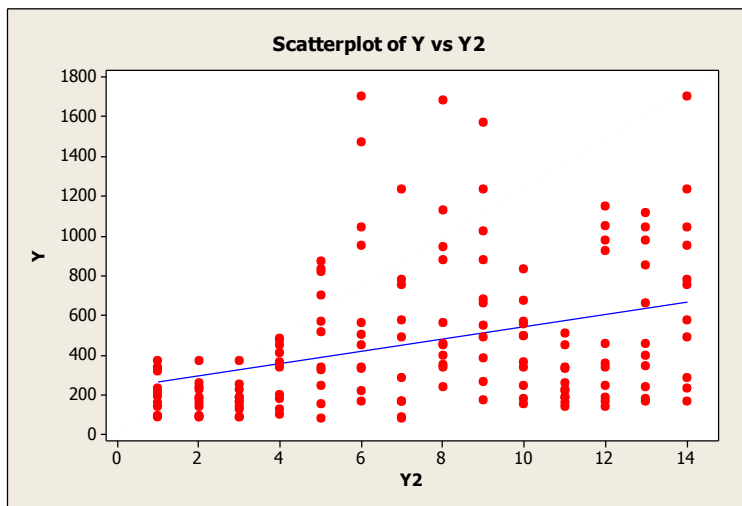
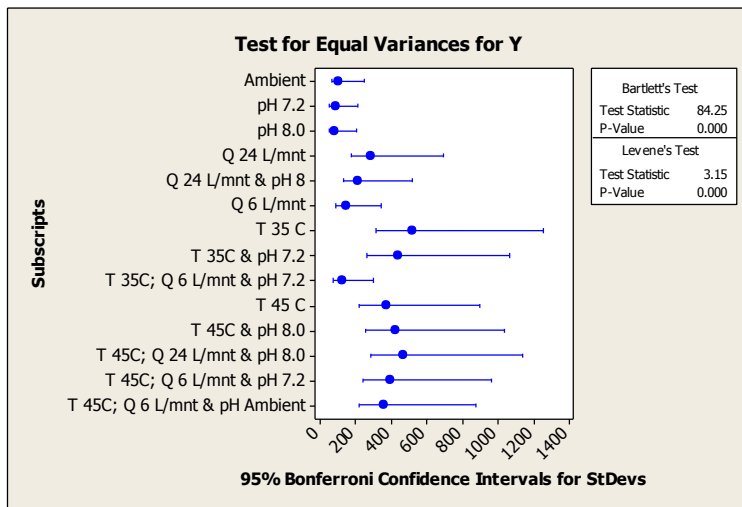
Pearson correlation of Y and Y2 = -0.136

P-Value = 0.093



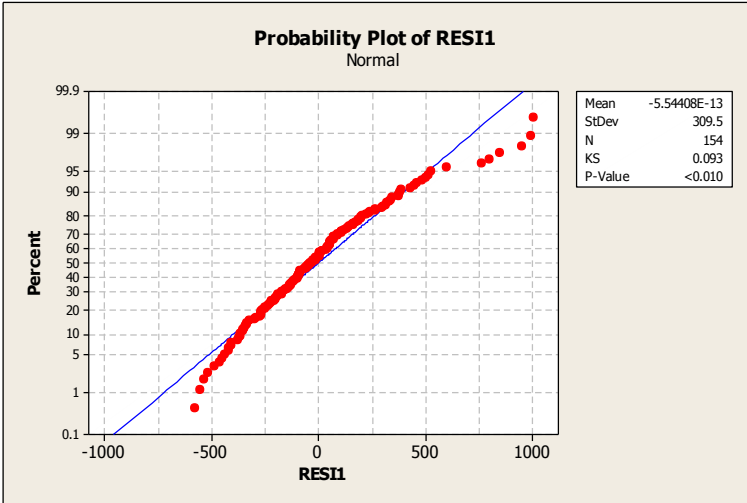
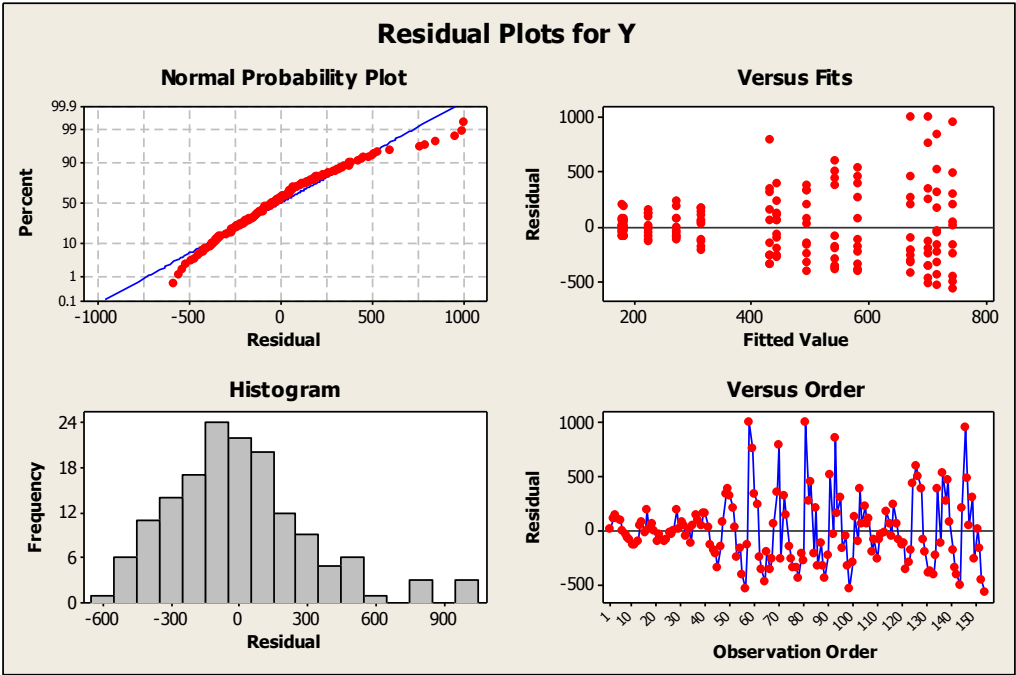
3. VFA



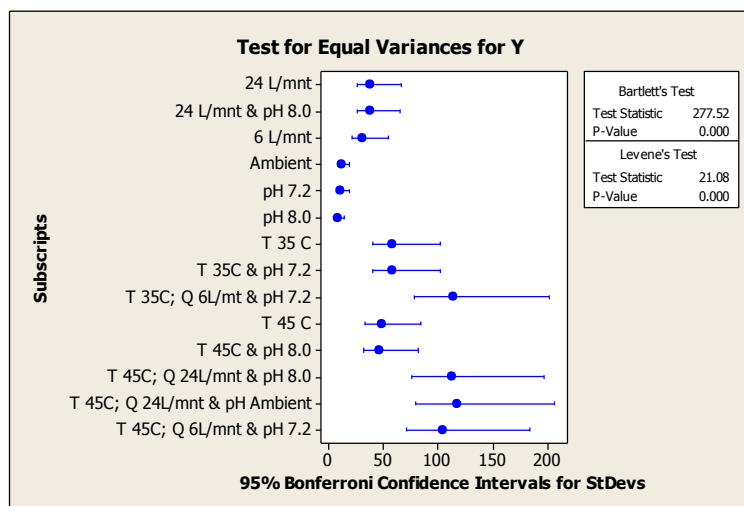
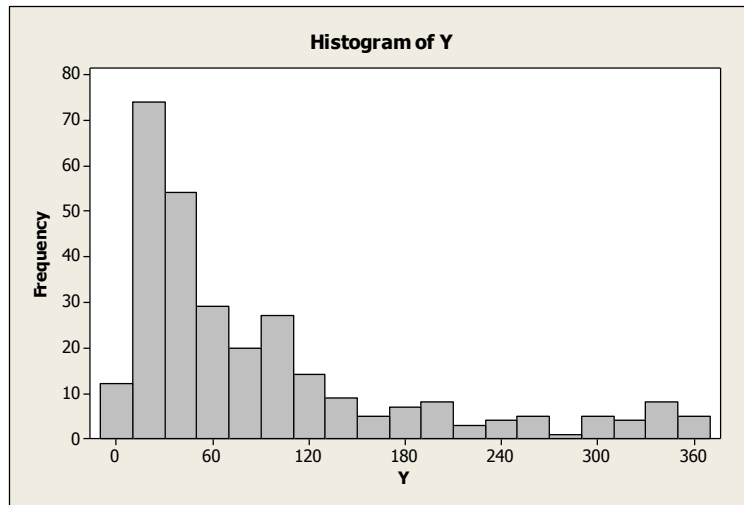


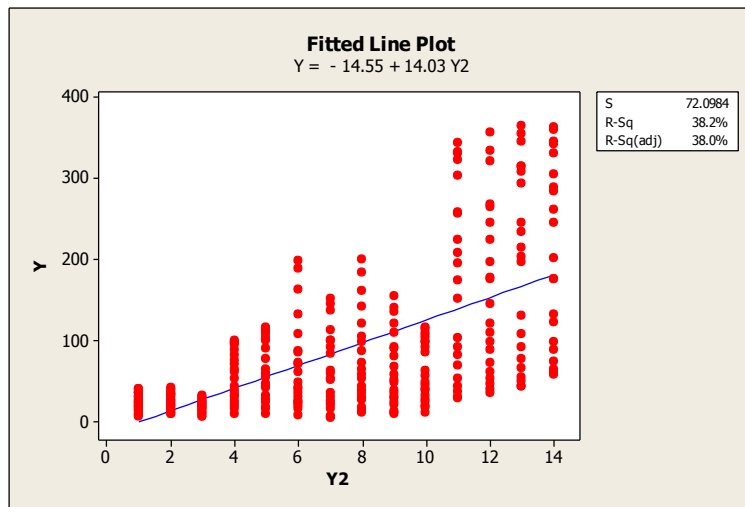
Pearson correlation of Y and Y2 = 0.343

P-Value = 0.000

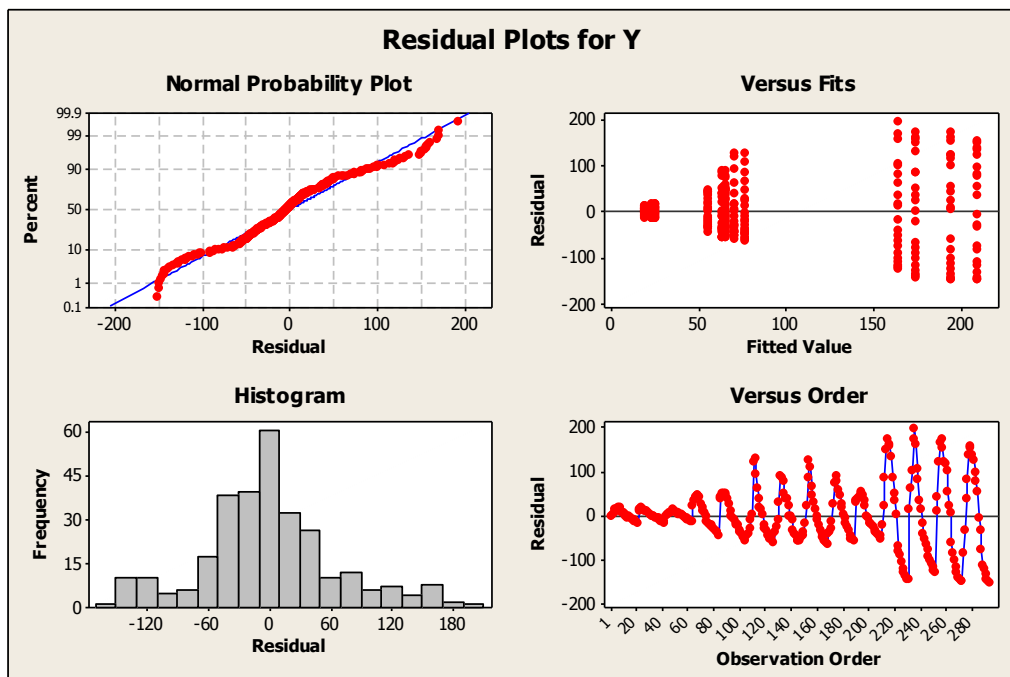


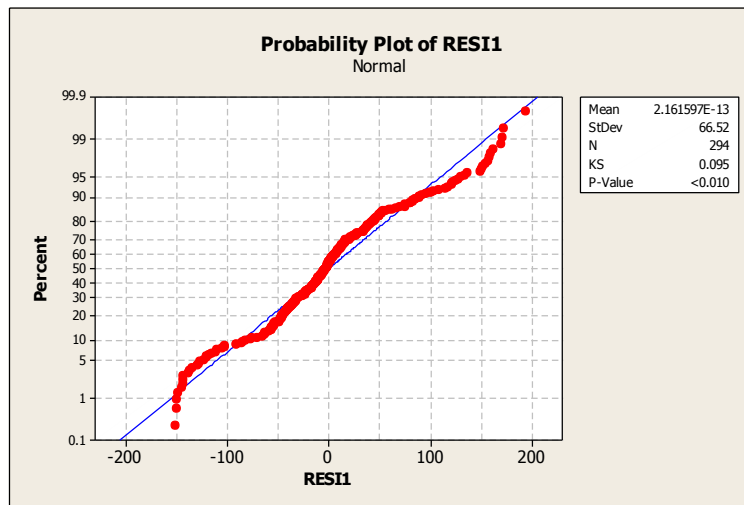
4. Tekanan





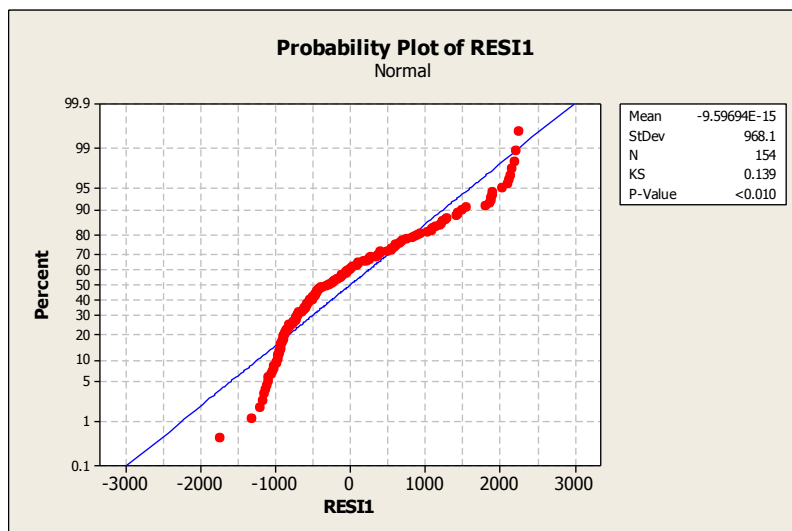
Pearson correlation of Y and Y2 = 0.618
P-Value = 0.000





2. Analisis Data Statistika Sebelum dan sesudah transformasi

1. BOD



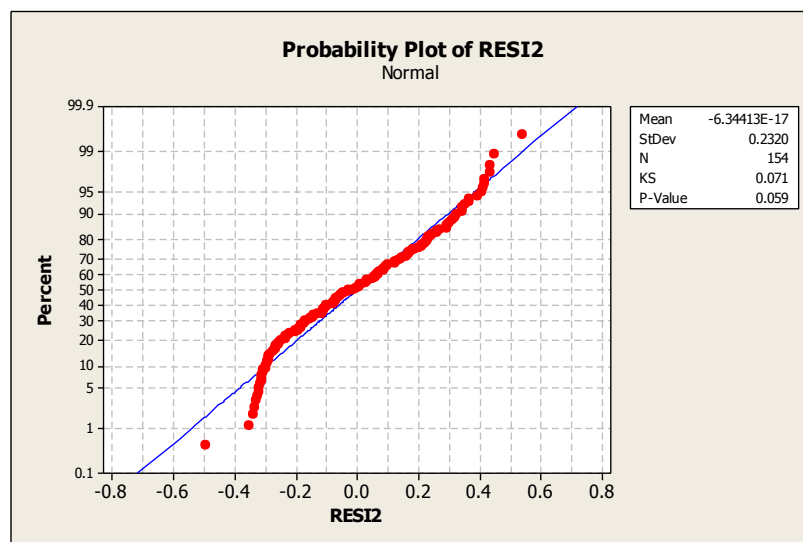
Gambar 6.1. Hasil uji normalitas BOD sebelum ditransformasi

Gambar 6.1, menunjukkan uji normalitas berdasarkan data table BOD. Titik-titik merah atau plot-plot merah merupakan error dari data tersebut. Sedangkan garis yang berwarna biru, adalah garis kenormalan. Dimana dapat dikatakan normal jika plot tersebut banyak yang mendekati garis normal tersebut. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebaran plot tersebut tidak normal. Karena tidak semua plot mendekati garis normal.

Uji Kolmogornov

Kolmogornov Smirnov Test	P – Value
0.139	0.010

Table diatas menunjukkan hasil uji kolmogornov smirnov. Nilai p – value kolmogornov smirnov pada uji ini adalah $0.010 < 0.05$ maka berdasarkan uji kolmogornov smirnov, data pada penelitian ini tidak berdistribusi normal. Sehingga perlu dilakukan transofrmasi data untuk menormalkan data tersebut.



Gambar 6.2. Hasil uji normalitas BOD setelah ditransformasi

Gambar 6.2, diatas merupakan hasil pengujian normalitas setelah dilakukan transformasi log pada data. Titik-titik merah pada gambar tersebut sebagian besar dekat pada garis normal, maka dapat dikatakan bahwa data sudah berdistribusi normal.

Kolmogornov Smirnov Test	P – Value
0.071	0.059

Table diatas menunjukkan hasil uji kolmogornov smirnov setelah dilakukannya transformasi log pada data. Nilai p – value pada uji kolmogornov adalah sebesar $0.059 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa data telah berdistribusi normal.

Uji Homogenitas

Levene Test	P – Value
0.25	0.996

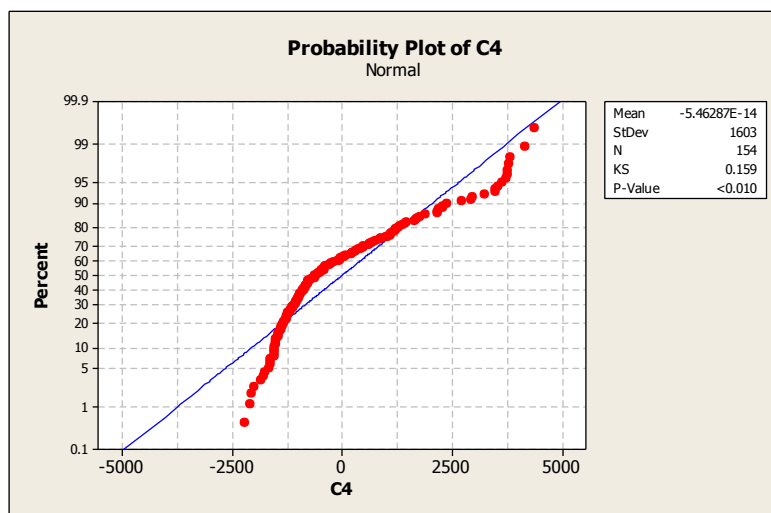
Tabel diatas merupakan hasil pengujian homogenitas dengan metode levene. Nilai p – value pada uji levene adalah sebesar $0.996 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa variance antar kelompok adalah sama yang berarti data homogeny.

Uji Linearitas

Linearity F Value	P – Value
9.959	0.002

Table diatas merupakan hasil pengujian linearity. Nilai p – value untuk pengujian linearity adalah sebesar $0.002 < 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa ada hubungan yang linear antara treatment atau factor terhadap respon.

2. COD



Gambar 6.3. Hasil uji normalitas COD sebelum ditransformasi

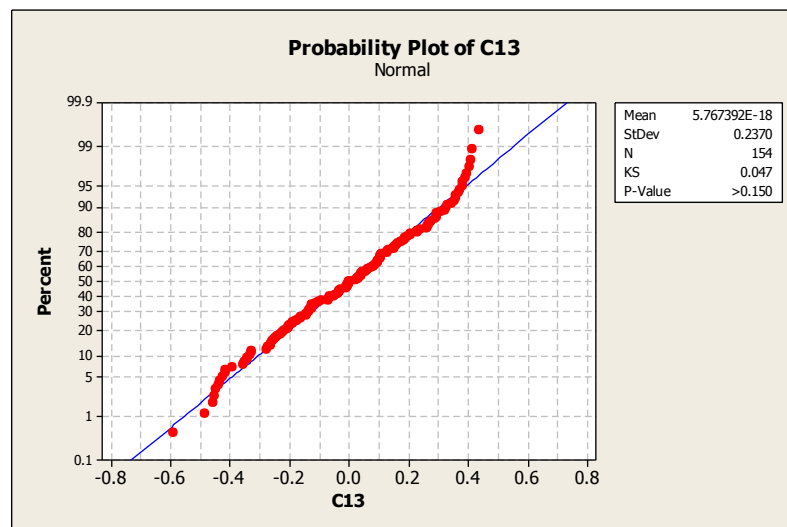
Gambar 6.3, menunjukkan uji normalitas berdasarkan data table COD. Titik-titik merah atau plot-plot merah merupakan error dari data tersebut.

Sedangkan garis yang berwarna biru, adalah garis kenormalan. Dimana dapat dikatakan normal jika plot tersebut banyak yang mendekati garis normal tersebut. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebaran plot tersebut tidak normal. Karena tidak semua plot mendekati garis normal.

Uji Normalitas

Kolmogorov Smirnov Test	P – Value
0.159	.010

Table diatas merupakan output pengujian normalitas data dengan metode kolmogorov smirnov. Nilai p – value untuk pengujian kolmogorov smirnov adalah $0.010 < 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa data pada penelitian ini tidak berdistribusi normal. Maka perlu dilakukan transformasi untuk menormalkan data.



Gambar 6.4. Hasil uji normalitas COD setelah ditransformasi

Gambar 6.4, diatas merupakan hasil pengujian normal setelah data ditransformasikan. Gambar menunjukkan titik-titik merah berada dekat pada garis kenormalan. Maka dapat dikatakan bahwa data sudah berdistribusi normal.

Kolmogorov Smirnov Test	P – Value
0.049	0.150

Table diatas merupakan hasil pengujian normalitas dengan metode kolmogornov smirnov. Nilai p – value untuk pengujian kolmogornov smirnov adalah sebesar $0.150 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa data pada pengamatan ini sudah berdistribusi normal.

Uji Homogenitas

Levene Test	P – value
0.78	0.676

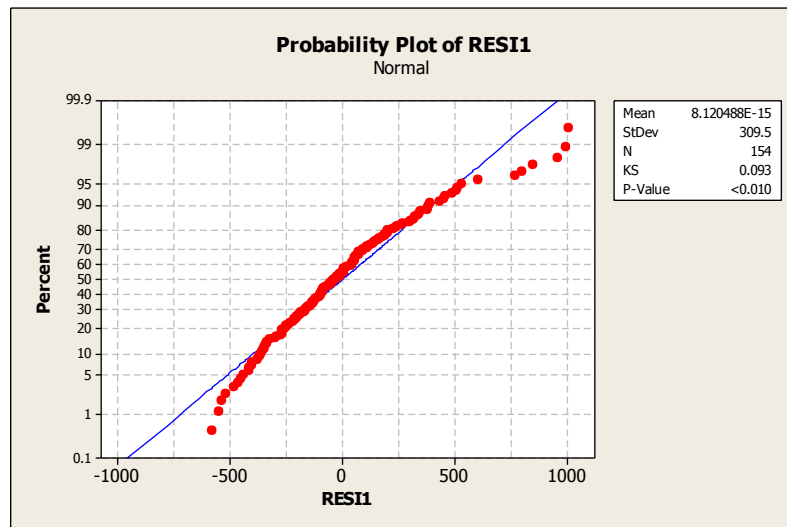
Table diatas menunjukkan hasil pengujian homogenitas dengan metode levene test. Nilai p – value pengujian levene adalah sebesar $0.676 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa variance data antar kelompok sudah homogen.

Uji Linearitas

Linearity F Test	P – Value
6.041	0.015

Tabel diatas merupakan pengujian linearitas pada data. Nilai p – value pada pengujian linearitas adalah sebesar $0.015 < 0.05$ maka dapat dikatakan ada hubungan yang linear antara variabel respon dengan treatment.

3. VFA



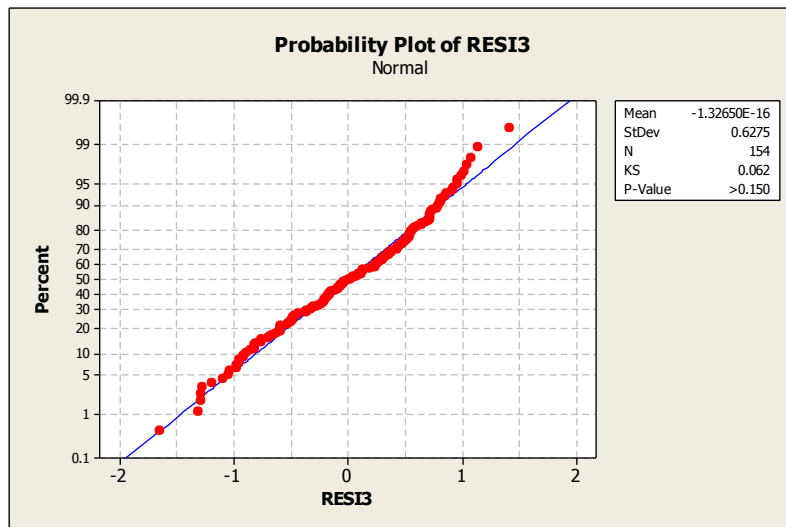
Gambar 6.5. Hasil uji normalitas VFA sebelum ditransformasi

Gambar menunjukkan uji normalitas berdasarkan data table VFA. Titik – titik merah atau plot – plot merah merupakan error dari data tersebut. Sedangkan garis yang berwarna biru, adalah garis kenormalan. Dimana dapat dikatakan normal jika plot tersebut banyak yang mendekati garis normal tersebut. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebaran plot tersebut tidak normal. Karena tidak semua plot mendekati garis normal.

Uji Kolmogorov Smirnov

Kolmogorov Smirnov Test	P – Value
0.093	<0.010

Table diatas menunjukkan hasil uji kolmogorov smirnov. Nilai p – value kolmogorov smirnov pada uji ini adalah $0.010 < 0.05$ maka berdasarkan uji kolmogorov smirnov, data pada penelitian ini tidak berdistribusi normal. Sehingga perlu dilakukan transofrmasi data untuk menormalkan data tersebut.



Gambar 6.6. Hasil uji normalitas VFA setelah ditransformasi

Gambar 6.6, diatas merupakan hasil pengujian normalitas setelah dilakukan transformasi log pada data. Titik-titik merah pada gambar tersebut sebagian besar dekat pada garis normal, maka dapat dikatakan bahwa data sudah berdistribusi normal.

Kolmogorov Smirnov Test	P – Value
0.062	> 0.150

Table diatas menunjukkan hasil uji kolmogorov smirnov setelah dilakukannya transformasi log pada data. Nilai p – value pada uji kolmogorov adalah sebesar $0.150 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa data telah berdistribusi normal.

Uji Homogenitas

Levene Test	P – Value
1.30	0.217

Tabel diatas merupakan hasil pengujian homogenitas dengan metode levene. Nilai p – value pada uji levene adalah sebesar $0.217 > 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa variance antar kelompok/treatment adalah sama yang berarti data homogen.

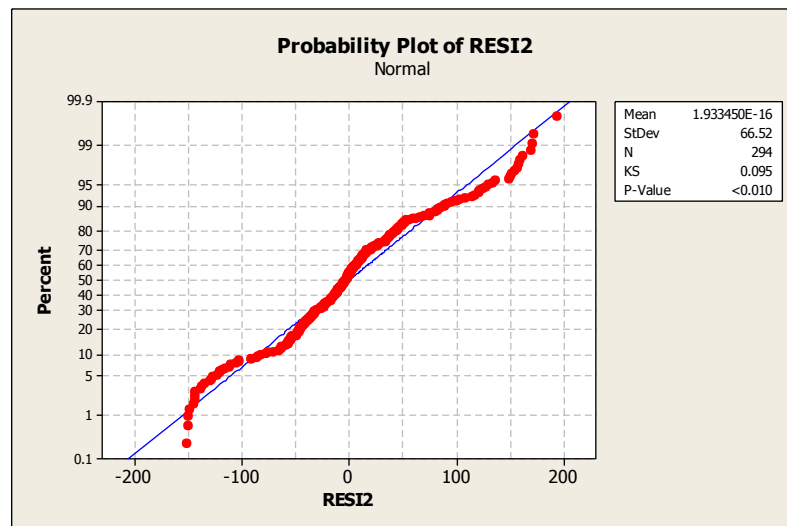
Uji Linearitas

Linearity F Value	P – Value
33.020	0.00001

Table diatas merupakan hasil pengujian linearity. Nilai p – value untuk pengujian linearity adalah sebesar $0.00001 < 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa ada hubungan yang linear antara treatment atau factor terhadap respon.

4. Tekanan biogas, P

Uji Normalitas



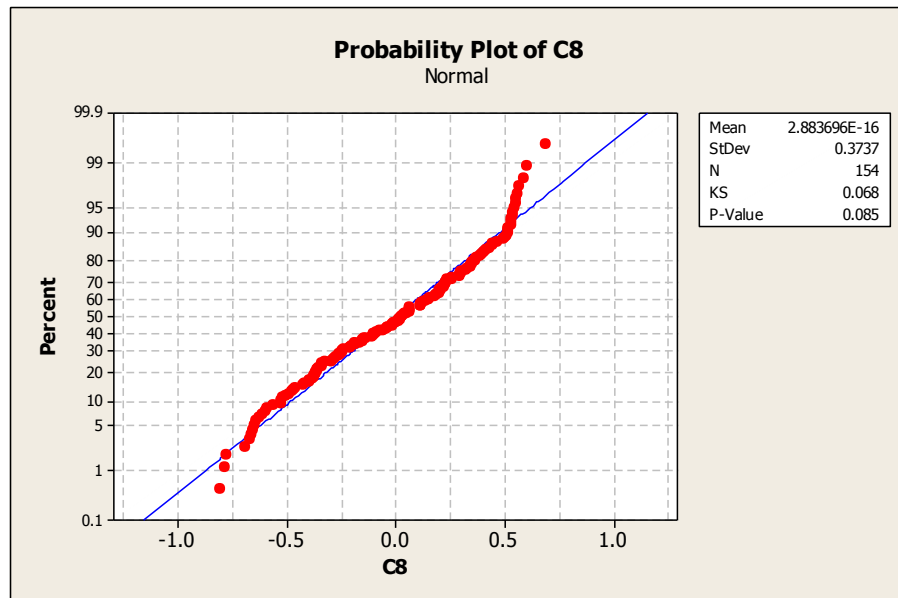
Gambar 6.7. Hasil uji normalitas tekanan sebelum ditransformasi

Gambar 6.7, menunjukkan uji normalitas berdasarkan data table tekanan. Titik-titik merah atau plot – plot merah merupakan error dari data tersebut. Sedangkan garis yang berwarna biru, adalah garis kenormalan. Dimana dapat dikatakan normal jika plot tersebut banyak yang mendekati garis normal tersebut. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebaran plot tersebut tidak normal. Karena tidak semua plot mendekati garis normal.

Uji Kolmogorov Smirnov

Kolmogorov Smirnov	P – Value
0.095	0.010

Table diatas menunjukkan hasil uji kolmogornov smirnov. Nilai p – value kolmogornov smirnov pada uji ini adalah $0.010 < 0.05$ maka berdasarkan uji kolmogornov smirnov, data pada penelitian ini tidak berdistribusi normal. Sehingga perlu dilakukan transofrmasi data untuk menormalkan data tersebut.



Gambar 6.8. Hasil uji normalitas tekanan setelah ditransformasi

Kolmogornov Smirnov	P – Value
0.068	0.085

Setelah dilakukan transformasi terhadap data, dapat dilihat hasil pengujian normal dengan metode kolmogornov smirnov diatas. Nilai p – value pada pengujian kolmogornov adalah $0.085 > 0.05$ maka data sudah berdistribusi normal.

Uji Homogen

Levene Test	P – Value
1.66	0.076

Table diatas merupakan hasil pengujian homogenitas dengan metode levene test. Nilai p – value pada pengujian levene adalah sebesar 0.076, maka

dapat dikatakan bahwa variance data antar treatment adalah sama yang berarti data sudah homogen.

Uji Linearitas

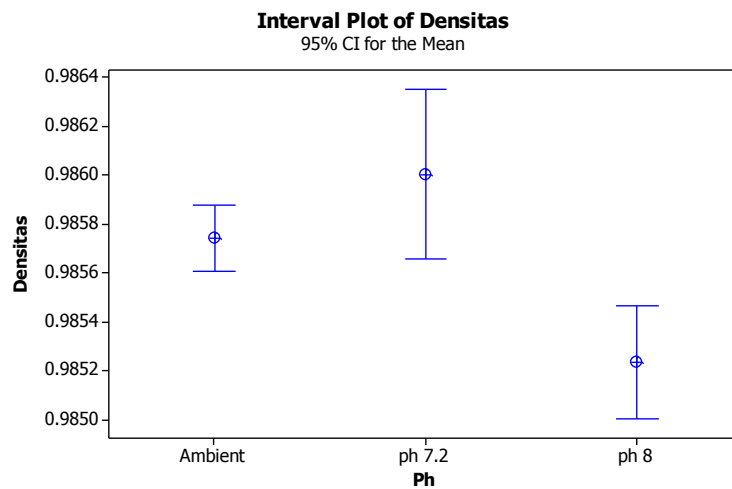
Linearity F Value	P – Value
444.631	0.00001

Table diatas merupakan hasil pengujian linearity. Nilai p – value untuk pengujian linearity adalah sebesar $0.00001 < 0.05$ maka dapat dikatakan bahwa ada hubungan yang linear antara treatment atau factor terhadap respon.

5. Uji ANOVA

5.1. Pengaruh pH

Pengujian anova **densitas**.

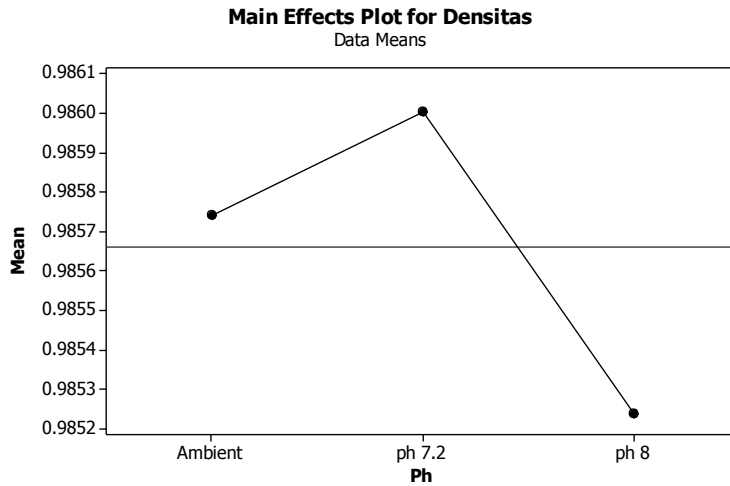


Interval Plot menunjukkan bahwa nilai densitas yang paling berbeda adalah pada pH 8, sehingga ada dugaan bahwa pH mempengaruhi densitas.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	0.0000033	0.0000017	11.75	0.000
Error	30	0.0000043	0.0000001		
Total	32	0.0000076			

S = 0.0003771 R-Sq = 43.92% R-Sq(adj) = 40.19%

Nilai p-value menunjukkan kurang dari alfa 5%, sehingga ph mempengaruhi densitas.



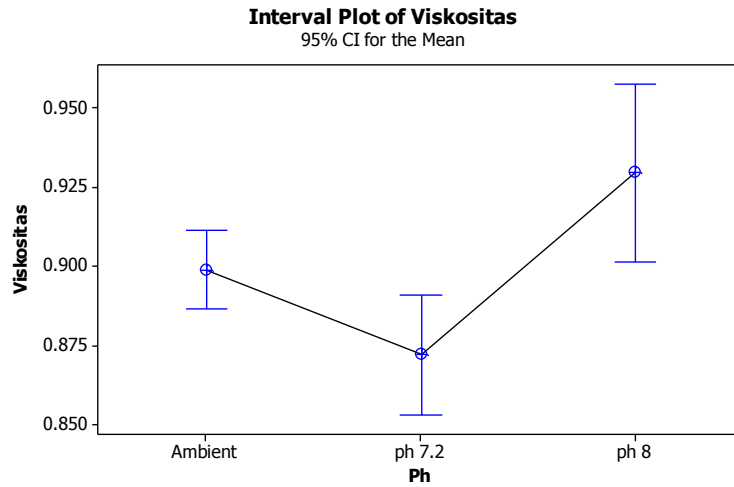
Main effect plot menunjukkan bahwa ph yang memberikan pengaruh paling berbeda adalah pH 8,0.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.98566	0.000066	15015.31	0.000
Ph				
Ambient	0.000082	0.000093	0.88	0.383
ph 7.2	0.000342	0.000093	3.69	0.001

Yang berpengaruh adalah ph 8 dan 7.2, namun yang memberikan pengaruh terbesar berdasarkan tabel diatas adalah pH 8,0. Didapatkan model persamaan linear sebagai berikut.

$$\text{Densitas} = 0.98566 + 0.000082 (\text{Ambient}) + 0.000342 (\text{pH}7.2) + \text{error}$$

Pengujian anova Viskositas

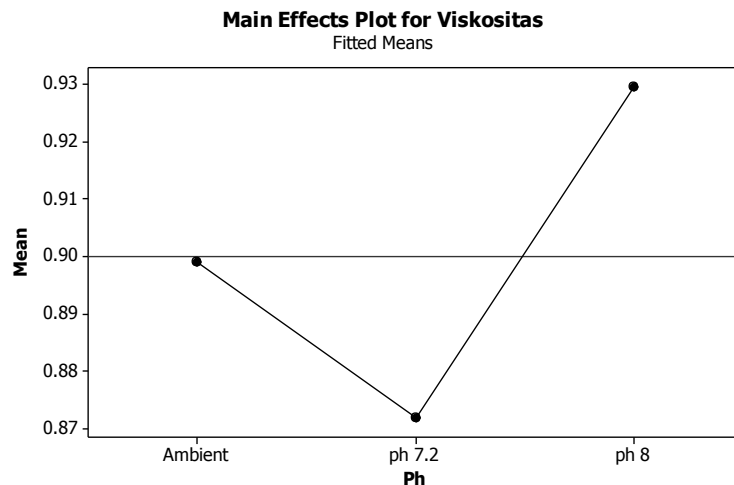


Terdapat perbedaan nilai antara ph 7.2 dengan ph 8. Sehingga ada dugaan bahwa Ph mempengaruhi viskositas.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	0.018183	0.009092	9.59	0.001
Error	30	0.028452	0.000948		
Total	32	0.046635			

S = 0.0307959 R-Sq = 38.99% R-Sq(adj) = 34.92%

P – value pada tabel diatas menunjukkan nilai kurang dari alfa 0.05, sehingga ph berpengaruh signifikan terhadap viskositas.



Gambar main efek menunjukkan bahwa ph 7.2 akan menghasilkan viskositas yang rendah, dan ph 8 akan menghasilkan viskositas yang tinggi.

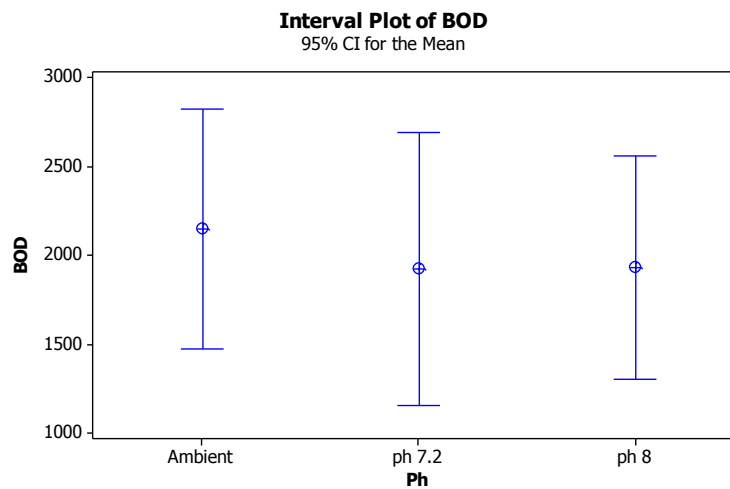
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.90005	0.005361	167.89	0.000
Ph				
Ambient	-0.001184	0.007581	-0.16	0.876
ph 7.2	-0.028133	0.007581	-3.71	0.001

Didapatkan model sebagai berikut:

$$\text{Viskositas} = 0.90005 - 0.001184(\text{Ambient}) - 0.28133(\text{pH}7.2) + \text{error}$$

Yang memberikan pengaruh terbesar adalah ph 8.

Uji anova BOD



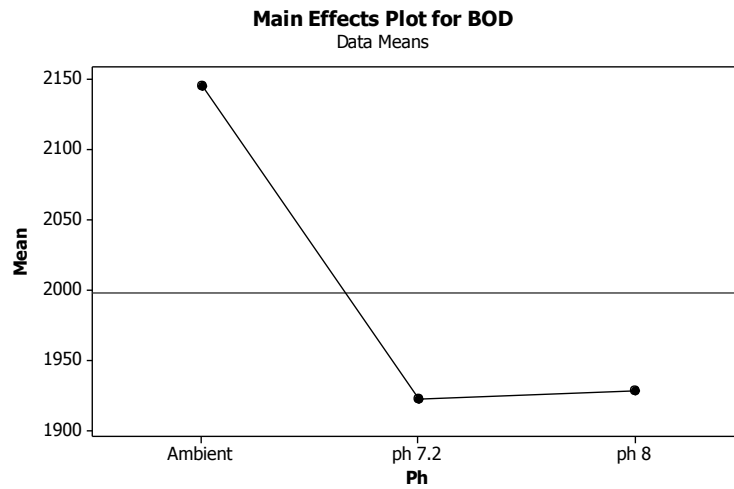
Gambar 6.13.

Gambar interval plot BOD dengan Ph tidak menunjukkan hal yang signifikan. Nilai rata-rata BOD antar pH saling berdekatan. Ada dugaan bahwa ph tidak mempengaruhi BOD.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	355524	177762	0.17	0.847
Error	30	31986833	1066228		
Total	32	32342357			

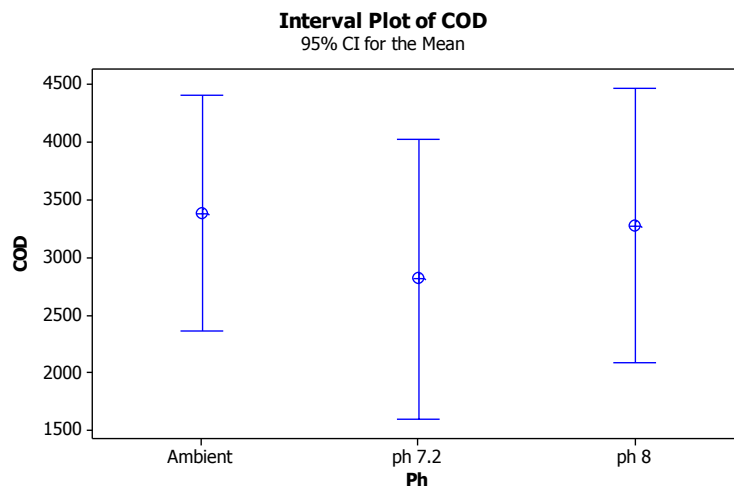
S = 1032.58 R-Sq = 1.10% R-Sq(adj) = 0.00%

Tabel diatas menunjukkan nilai p-value lebih dari 0.05, artinya pH tidak berpengaruh signifikan terhadap BOD.



Namun secara visual, nilai BOD ambient cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan ph 7.2 dan 8.

Uji anova COD

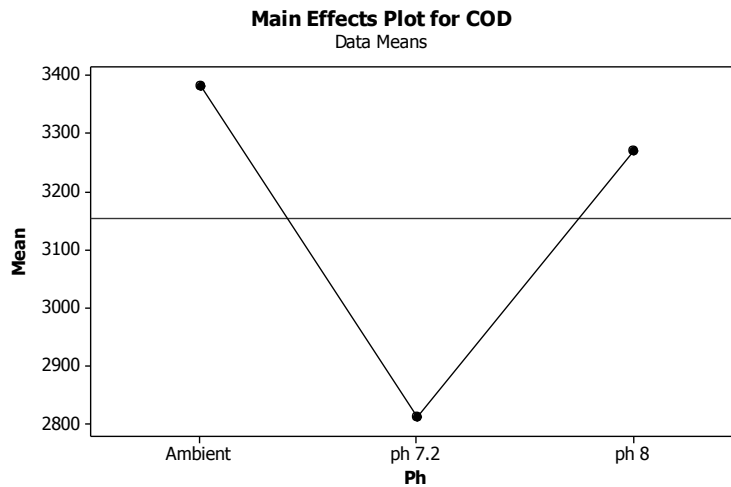


Gambar interval plot COD menunjukkan ada dugaan bahwa Ph tidak mempengaruhi COD, karena interval plot tidak berbeda jauh.

Source	DF	SS	MS	F	P
Ph	2	1990190	995095	0.34	0.713
Error	30	87355653	2911855		
Total	32	89345843			

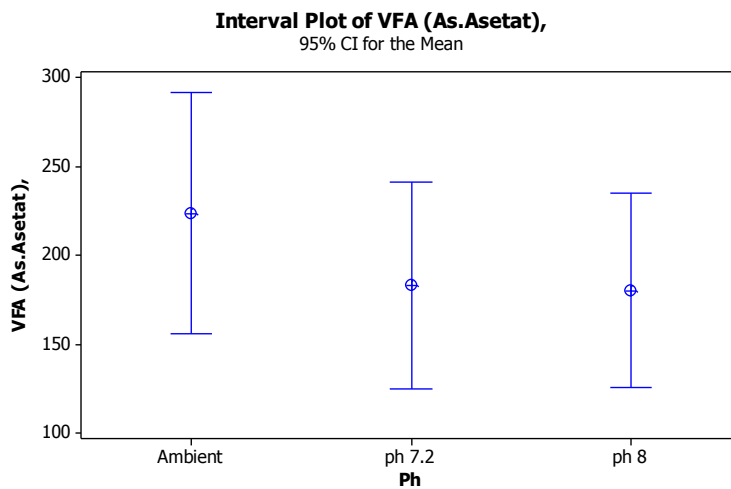
S = 1706 R-Sq = 2.23% R-Sq(adj) = 0.00%

P – value menunjukkan nilai lebih dari 0.05, sehingga tidak terdapat pengaruh yang signifikan.



Secara visual cod dan ph menunjukkan bahwa ph 7.2 cenderung menghasilkan cod yang rendah.

Uji anova Asetat

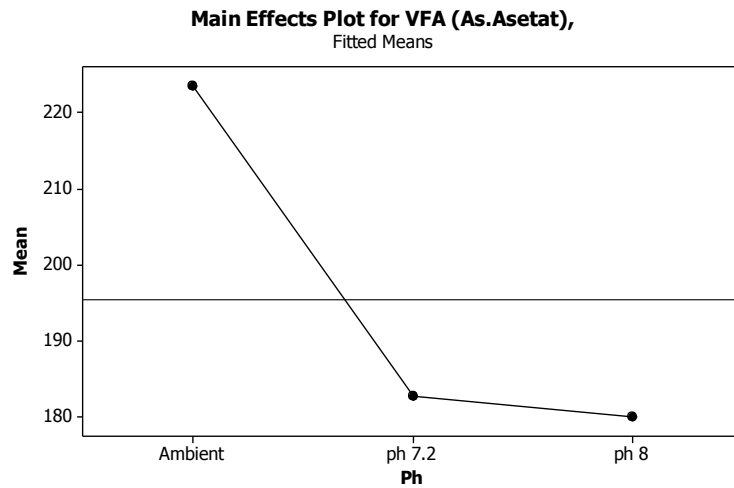


Gambar interval plot pH dengan asetat tidak menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan. Ada dugaan jika perlakuan pH tidak berpengaruh pada Asetat.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Ph	2	13015	6507	0.8	0.46
Error	30	244792	8160		
Total	32	257807			

S = 90.33 R-Sq = 5.05% R-Sq(adj) = 0.00%

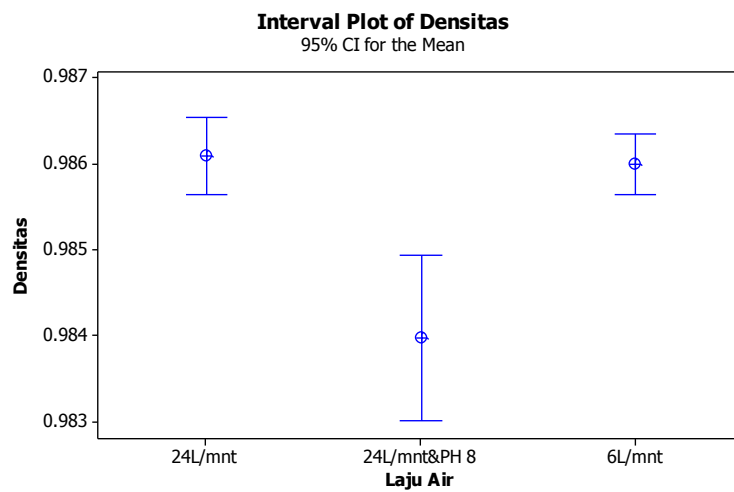
Tabel diatas menunjukkan nilai p-value pada pH sebesar 0.46, nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan alfa 0.05. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan pH tidak memberi pengaruh terhadap asetat.



Namun jika dilihat gambarnya ambient cenderung menghasilkan asetat lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian pH. Namun masih belum cukup untuk membuktikan bahwa pH berpengaruh terhadap asetat.

2. Pengaruh Laju Alir

Densitas



Gambar interval plot densitas dengan laju air air menunjukkan dugaan adanya perbedaan. Perlakuan laju air yang berbeda akan menghasilkan densitas yang berbeda pula.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Air	2	0.0000316	0.0000158	17.14	0.000
Error	30	0.0000277	0.0000009		
Total	32	0.0000593			

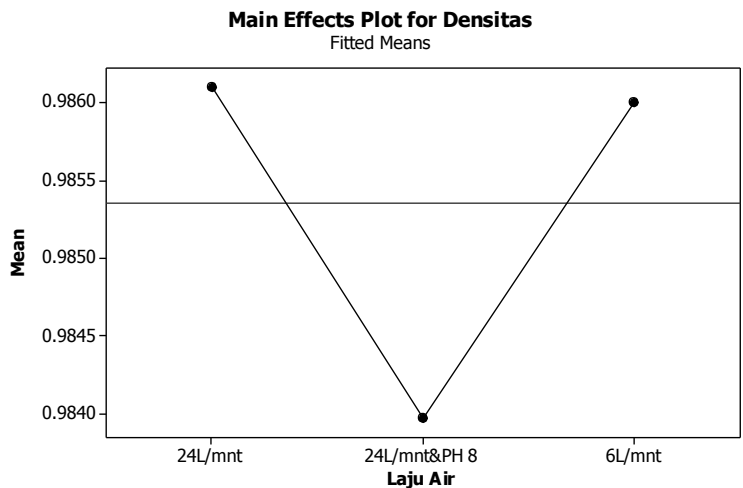
S = 0.0009604 R-Sq = 53.32% R-Sq(adj) = 50.21%

Tabel anova diatas menunjukkan nilai p-value kurang dari 0.05, sehingga laju air berpengaruh signifikan berdasarkan uji hipotesis dengan ANOVA

Term	Coef	SE Coef	T	P-value
Constant	0.985354	0.000167	5893.74	0.000
Laju Air				
24L/mnt	0.000741	0.000236	3.13	0.004
24L/mnt&PH 8	-0.001383	0.000236	-5.85	0.000

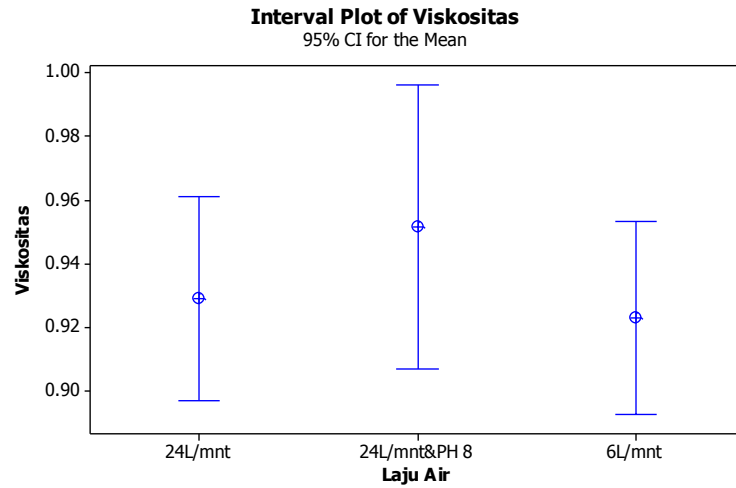
Tabel diatas merupakan pengujian pada tiap level di perlakuan laju air. Yang memberikan pengaruh terbesar adalah level 24L/mnt dengan pengaruh positif. Kemudian pengaruh terbesar lainnya adalah level 24L/mnt&pH8 dengan pengaruh negatif. Didapatkan model sebagai seperti berikut.

$$\text{Densitas} = 0.985354 + 0.000741(24\text{mnt/L}) - 0.001383(24\text{mnt/L}\&\text{Ph8}) + \text{error}$$



Gambar main efek menunjukkan bahwa laju air dan pH akan menghasilkan densitas yang lebih rendah dibandingkan tanpa interaksi dengan pH

Viskositas

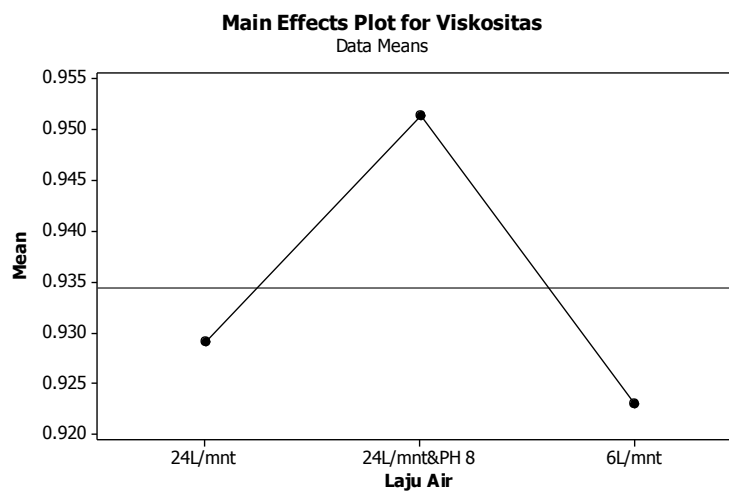


Gambar interval plot viskositas dengan laju air tidak menunjukkan adanya perbedaan

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Air	2	0.00492	0.00246	0.85	0.439
Error	30	0.08713	0.0029		
Total	32	0.09205			

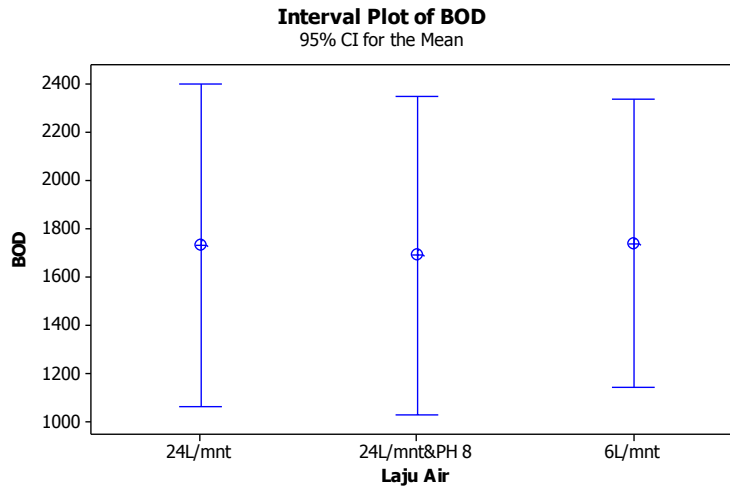
S = 0.05389 R-Sq = 5.34% R-Sq(adj) = 0.00%

P value lebih dari 0.05, sehingga hasil uji hipotesis terkait laju air terhadap viskositas ternyata tidak berpengaruh signifikan.



Main efek menunjukkan bahwa laju air dan pH8 cenderung menghasilkan viskositas lebih tinggi dibandingkan dengan laju air saja.

BOD

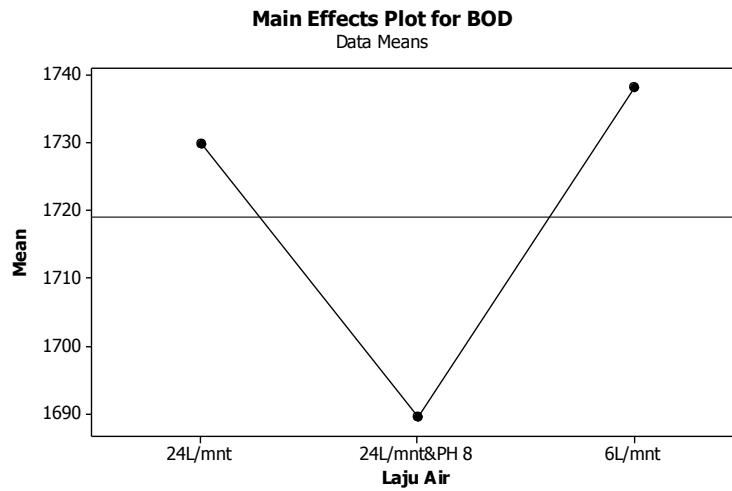


Gambar interval plot antara BOD dengan laju air menunjukkan dugaan bahwa laju air tidak mempengaruhi BOD

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Air	2	14885	7443	0.01	0.992
Error	30	27326290	910876		
Total	32	27341175			

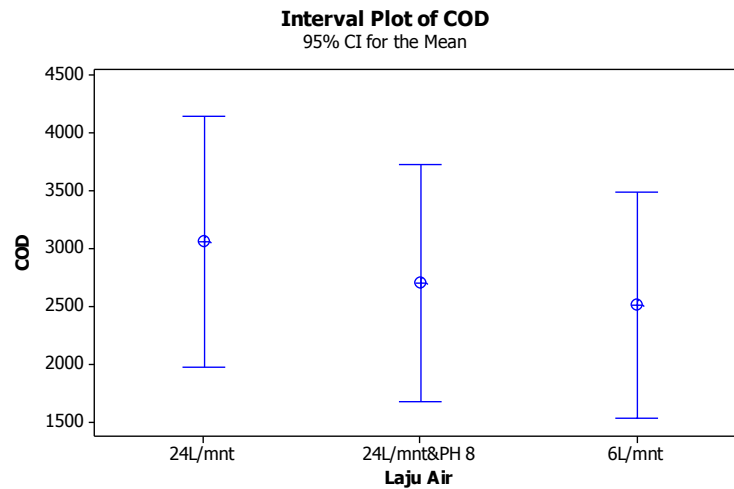
S = 954.4 R-Sq = 0.05% R-Sq(adj) = 0.00%

Hasil pengujian hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.992, yaitu lebih besar dari 0.05. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat pengaruh antara laju air dengan BOD



Gambar main efek menunjukkan perlakuan laju air 24L&pH 8 akan menghasilkan nilai BOD lebih kecil dibandingkan 2 level lainnya. Namun tidak signifikan.

COD

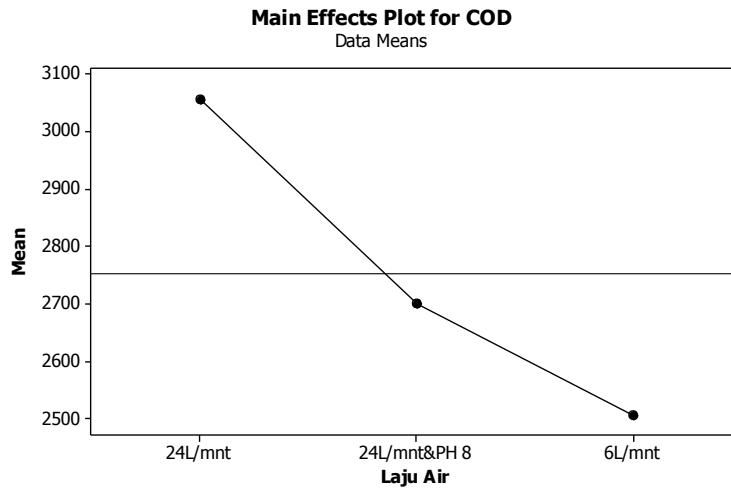


Interval plot cod dengan laju air tidak menunjukkan adanya perbedaan.

Source	DF	SS	MS	F	P-value
Laju Air	2	1718908	859454	0.36	0.698
Error	30	70847481	2361583		
Total	32	72566389			

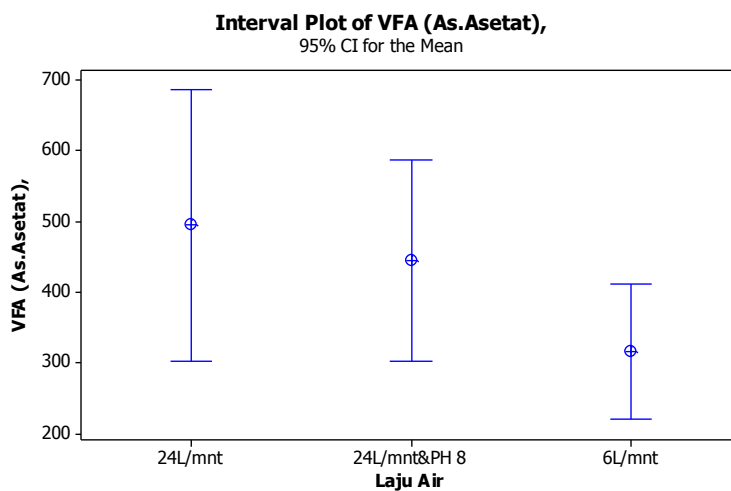
S = 1537 R-Sq = 2.37% R-Sq(adj) = 0.00%

Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.698 lebih besar dari 0.05. Maka dapat disimpulkan bahwa laju air tidak berpengaruh signifikan terhadap COD.



Secara visual, laju air yang lebih tinggi akan menghasilkan COD yang lebih tinggi pula.

VFA (Asam Asetat)

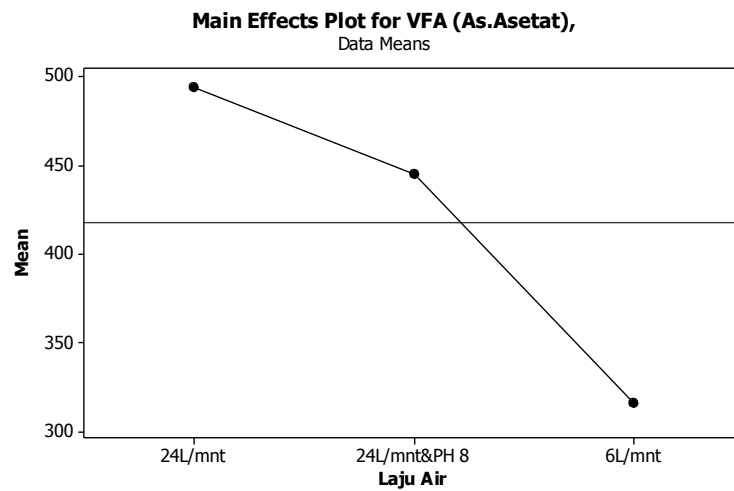


Interval plot VFA (asam asetat) dengan laju air menunjukkan tidak terdapat perbedaan pada masing-masing levelnya.

Source	DF	SS	MS	F	P
Laju Air	2	186435	93218	1.92	0.164
Error	30	1455924	48531		
Total	32	1642360			

S = 220.3 R-Sq = 11.35% R-Sq(adj) = 5.44%

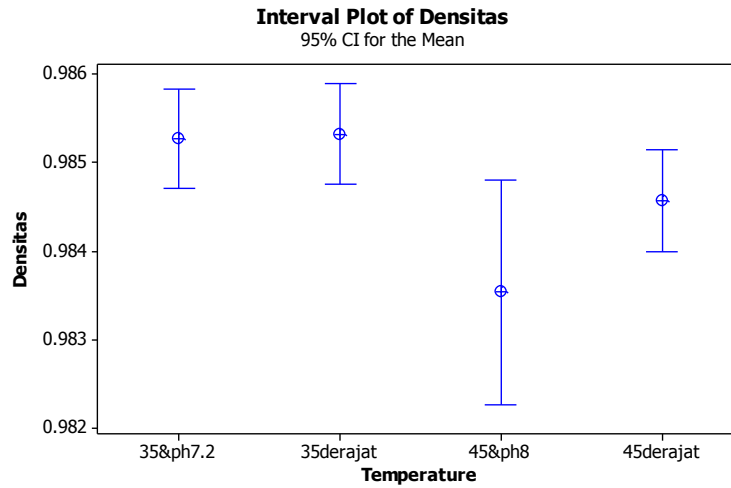
Hasil uji hipotesis didapatkan nilai p-value sebesar 0.164 yakni lebih besar dari 0.05, maka laju air tidak mempengaruhi asam asetat.



Secara visual, laju air dengan level 24L/mnt akan menghasilkan nilai asetat lebih tinggi dibandingkan dengan 6L/mnt dan dengan interaksi pH

Pengaruh Temperature

Uji Anova densitas



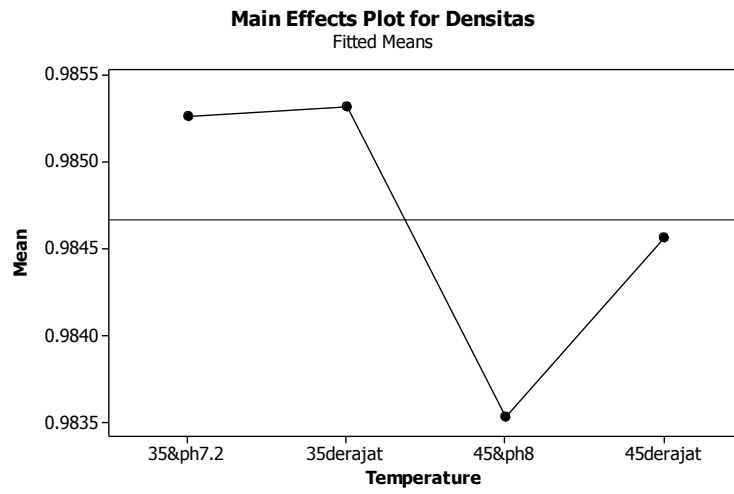
Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	0.0000229	0.0000076	5.3	0.004
Error	40	0.0000577	0.0000014		
Total	43	0.0000806			

S = 0.001201 R-Sq = 28.46% R-Sq(adj) = 23.09%

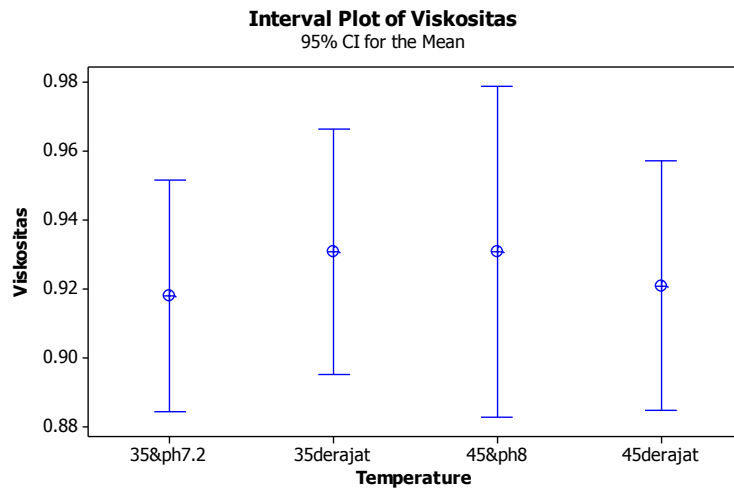
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.984668	0.000181	5439.25	0.000
Temperature				
35 &pH 7.2	0.000594	0.000314	1.9	0.065
45 & pH8	-0.001139	0.000314	-3.63	0.001
35 derajat	0.000651	0.000314	2.08	0.044

Didapatkan model:

$$\text{Densitas} = 0.984668 + 0.000594(35 * 7.2) - 0.001139(45 * 8) + 0.000651(35 \text{derajat})$$

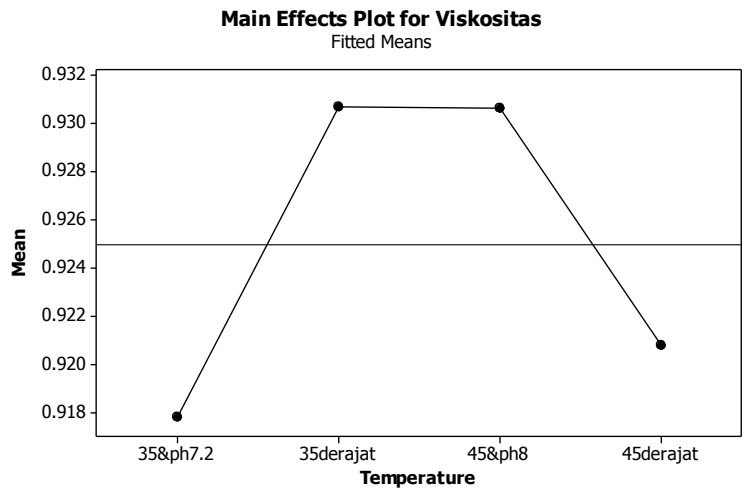


Viskositas

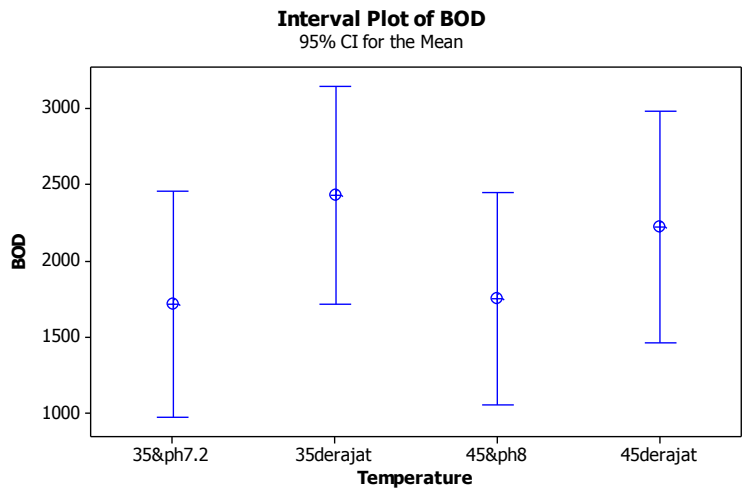


Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	0.00148	0.00049	0.15	0.93
Error	40	0.13235	0.00331		
Total	43	0.13382			

S = 0.05752 R-Sq = 1.10% R-Sq(adj) = 0.00%

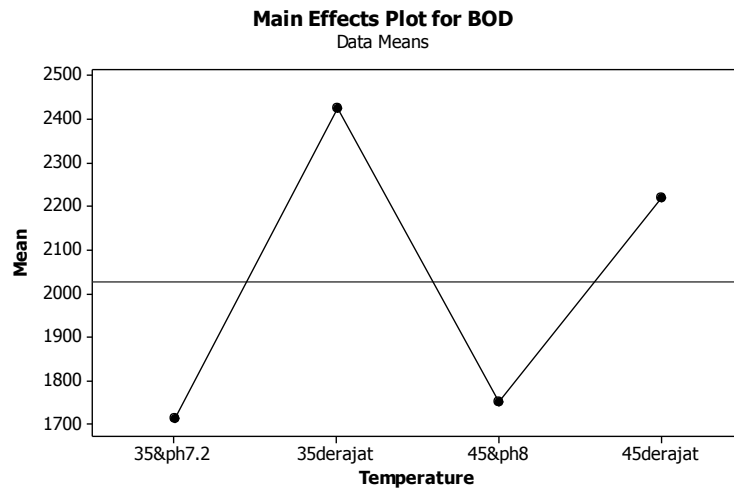


BOD

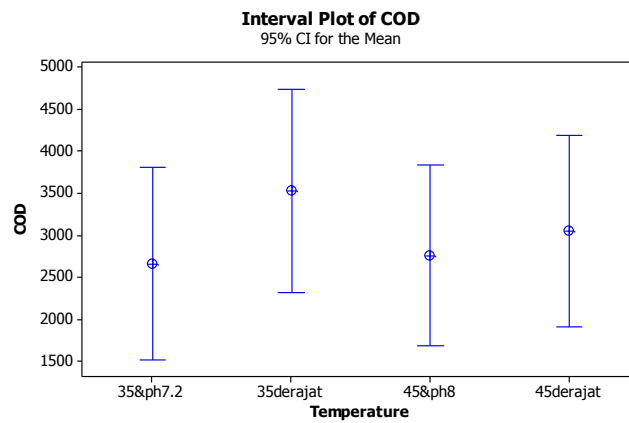


Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	4075547	1358516	1.16	0.337
Error	40	46854660	1171366		
Total	43	50930207			

S = 1082 R-Sq = 8.00% R-Sq(adj) = 1.10%

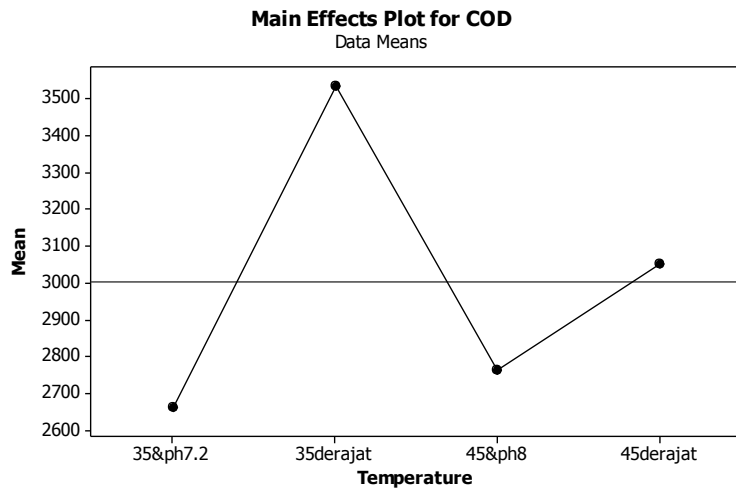


COD

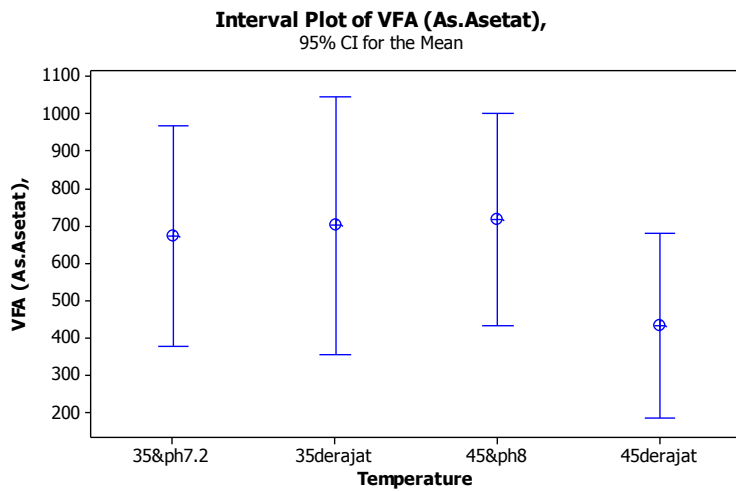


Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	5031236	1677079	0.58	0.634
Error	40	116496875	2912422		
Total	43	121528111			

S = 1707 R-Sq = 4.14% R-Sq(adj) = 0.00%

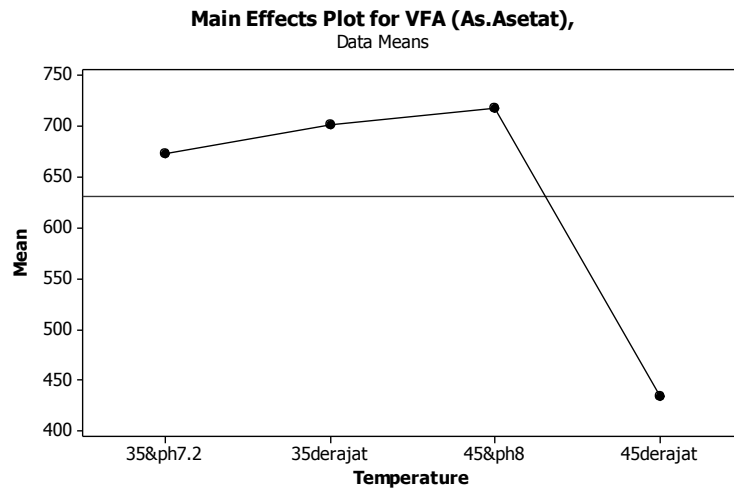


VFA (Asam Asetat)

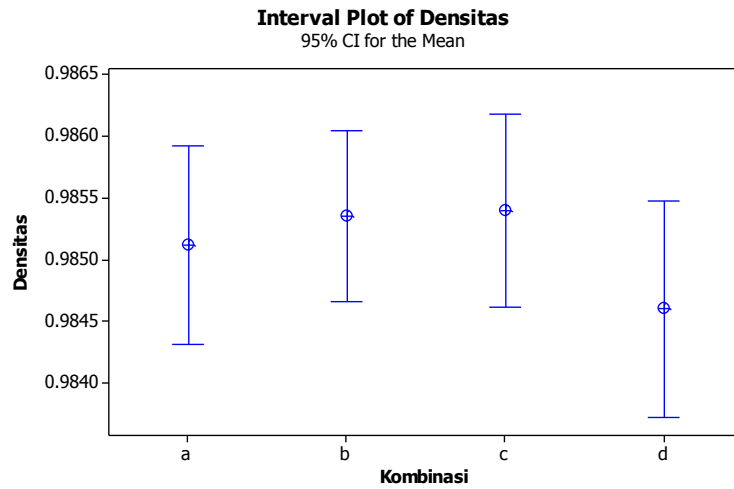


Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	3	586760	195587	1.01	0.4
Error	40	7766665	194167		
Total	43	8353425			

S = 440.6 R-Sq = 7.02% R-Sq(adj) = 0.05%

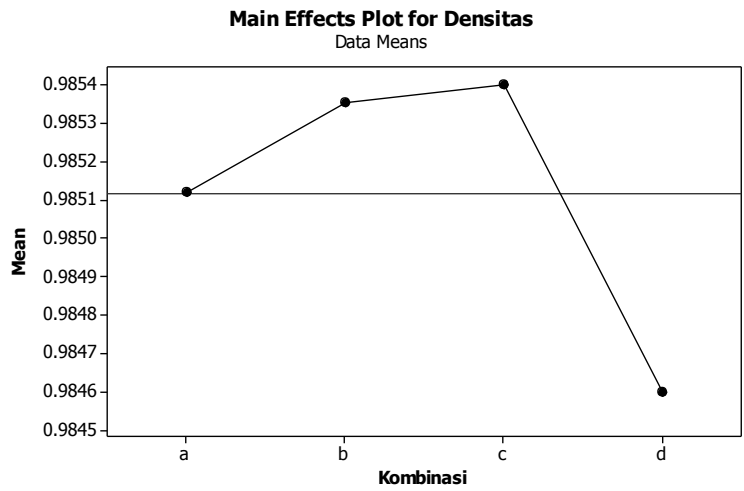


Pengaruh kombinasi pH Q T
Uji anova densitas

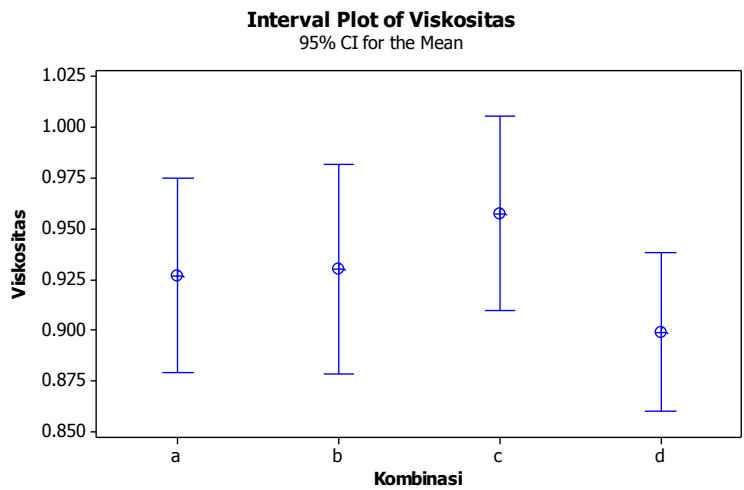


Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi	3	0.0000044	0.0000015	1.07	0.374
Error	40	0.0000556	0.0000014		
Total	43	0.0000601			

S = 0.001179 R-Sq = 7.40% R-Sq(adj) = 0.46%

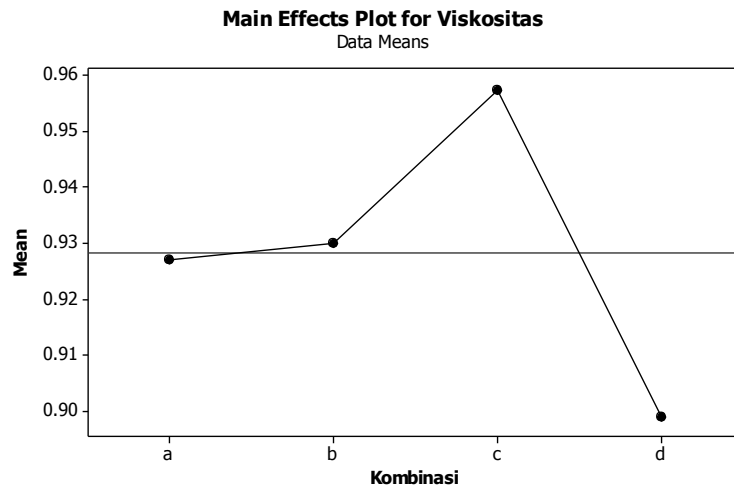


Viskositas

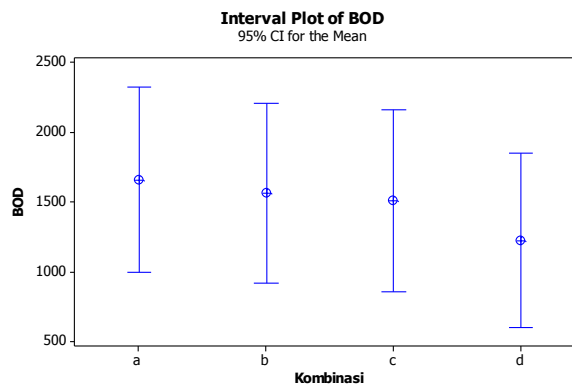


Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi	3	0.01888	0.00629	1.29	0.291
Error	40	0.19503	0.00488		
Total	43	0.21392			

S = 0.06983 R-Sq = 8.83% R-Sq(adj) = 1.99%

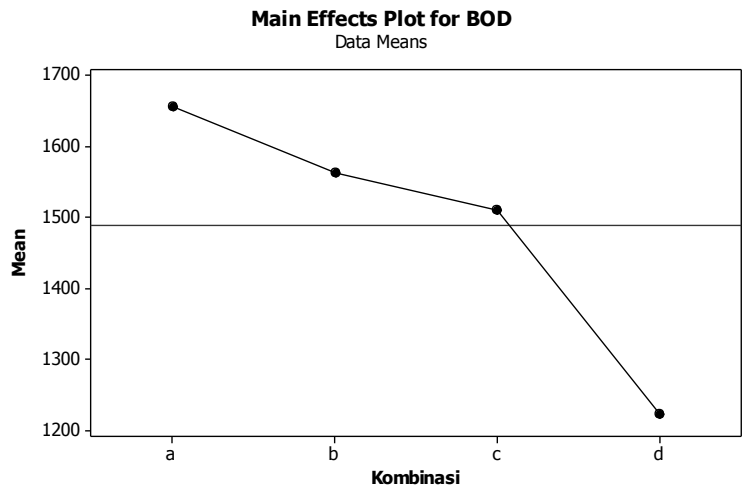


BOD

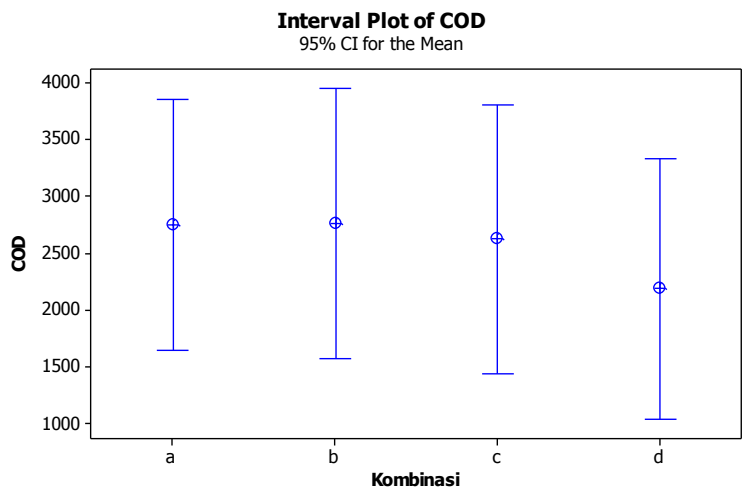


Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi	3	1148224	382741	0.41	0.746
Error	40	3722447	930611		
Total	43	38372672			

S = 964.7 R-Sq = 2.99% R-Sq(adj) = 0.00%

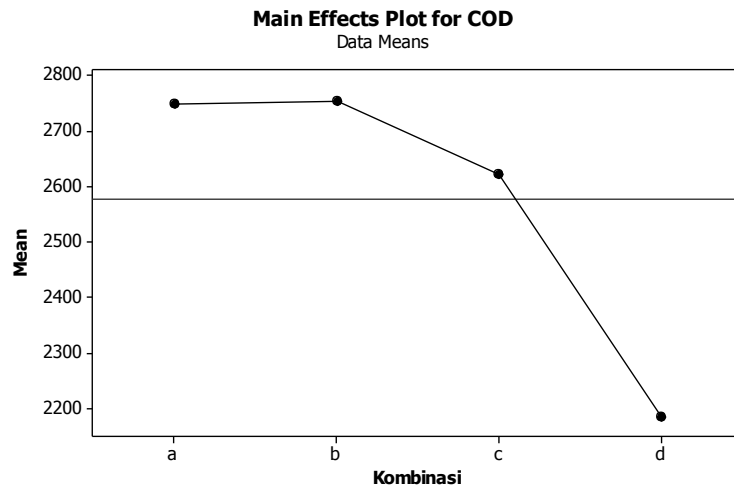


COD

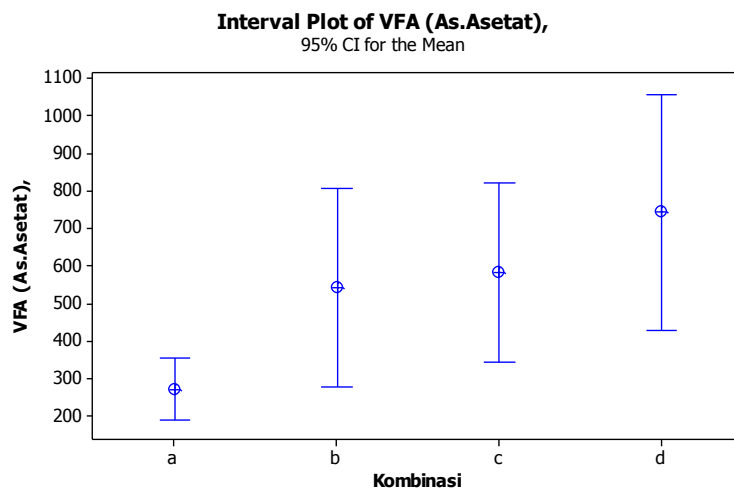


Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi	3	2389870	796623	0.27	0.847
Error	40	118254051	2956351		
Total	43	120643921			

S = 1719 R-Sq = 1.98% R-Sq(adj) = 0.00%



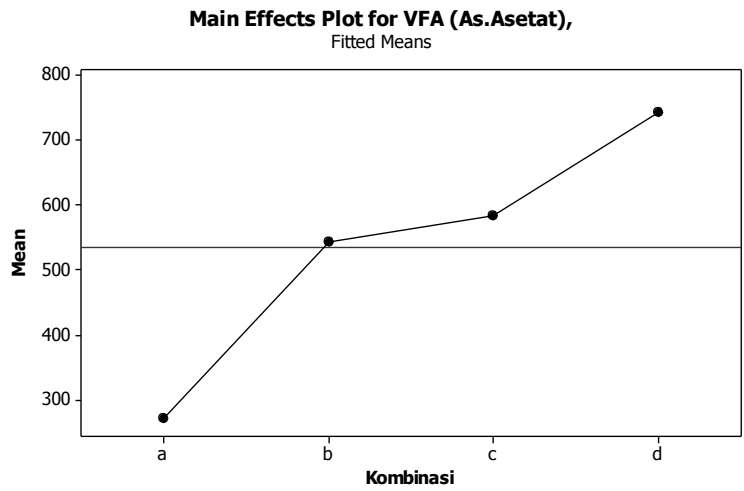
VFA (asam Asetat)



Source	DF	SS	MS	F	P
Kombinasi	3	1273148	424383	3.27	0.031
Error	40	5184966	129624		
Total	43	6458114			

S = 360.0 R-Sq = 19.71% R-Sq(adj) = 13.69%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	535.61	54.28	9.87	0
Kombinasi				
a	-264.22	94.01	-2.81	0.008
b	7.58	94.01	0.08	0.936
c	47.89	94.01	0.51	0.613



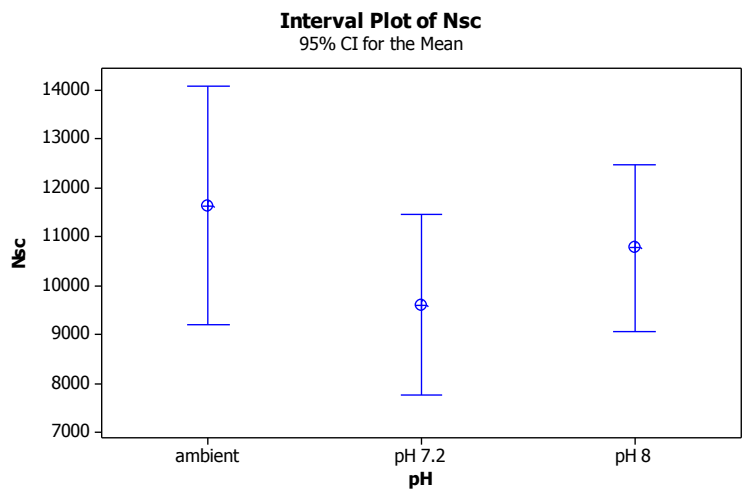
Keterangan

- a : T 35, Q 6 L/mnt pH 7.2
- b : T 45, Q 24L/mnt pH 7.2
- c : T 45, Q24L/mnt pH ambient
- d : T 45, Q 24L/mnt pH8

6. Korelasi Empirik

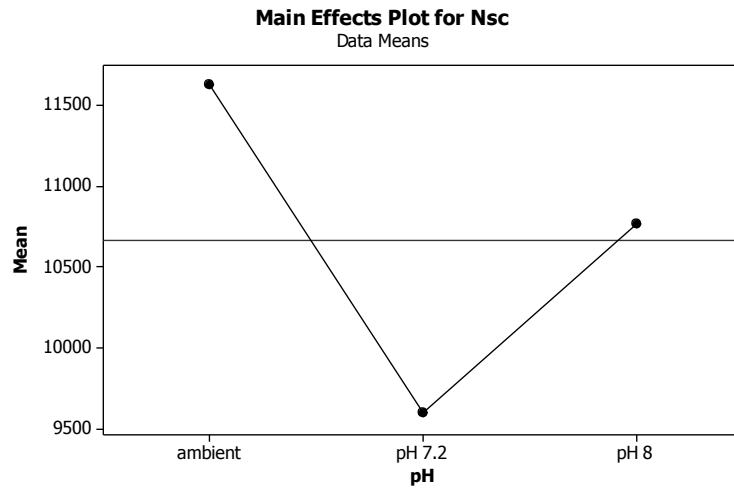
Pengaruh pH

Bilangan *Schmidt*, N_{Sc}

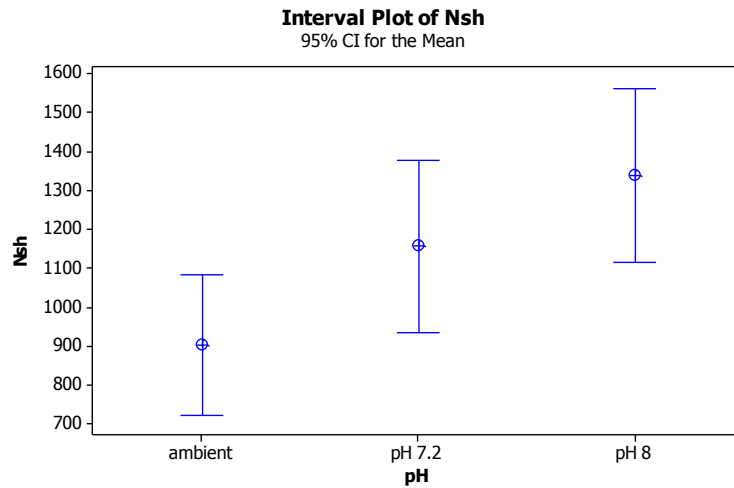


Source	DF	SS	MS	F	P
pH	2	22845139	11422569	1.26	0.297
Error	30	271354994	9045166		
Total	32	294200132			

S = 3008 R-Sq = 7.77% R-Sq(adj) = 1.62%



Bilangan Sherwood, N_{sh}



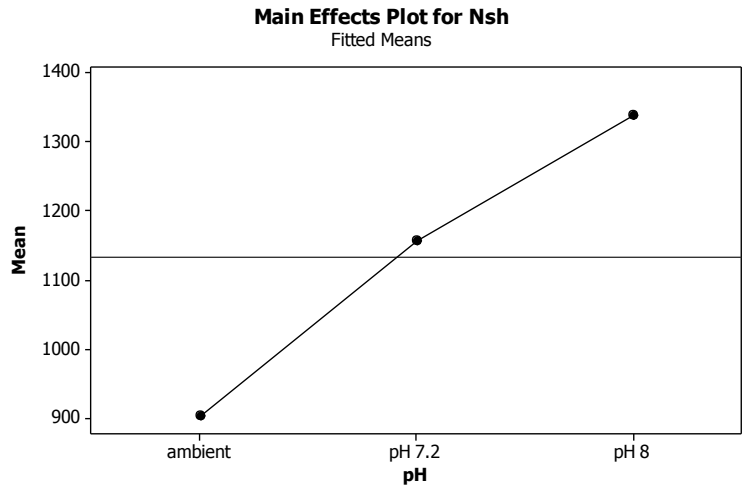
Source	DF	SS	MS	F	P
pH	2	1058138	529069	5.4	0.01
Error	30	2939970	97999		
Total	32	3998108			

S = 313.0 R-Sq = 26.47% R-Sq(adj) = 21.56%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1133.42	54.49	20.8	0.000
pH				
ambient	-230.44	77.07	-2.99	0.006
pH 7.2	24.28	77.07	0.32	0.755

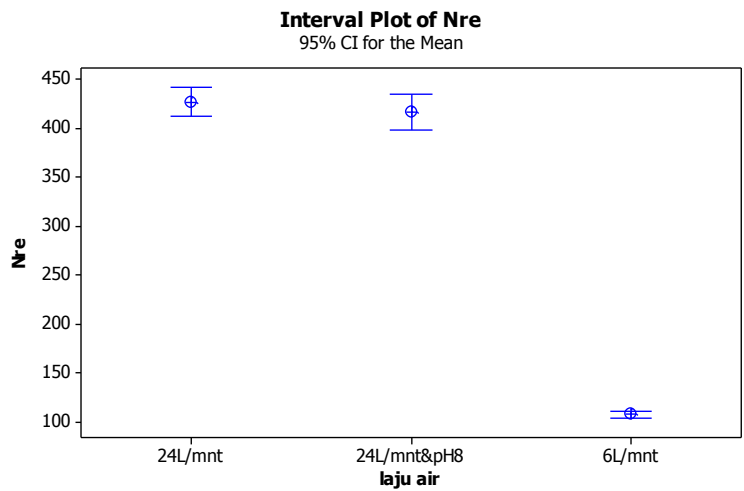
Model yang terbentuk

$$NSh = 1133.42 - 230.44(\text{Ambient}) + 24.28(\text{pH}7.2) + \text{error}$$



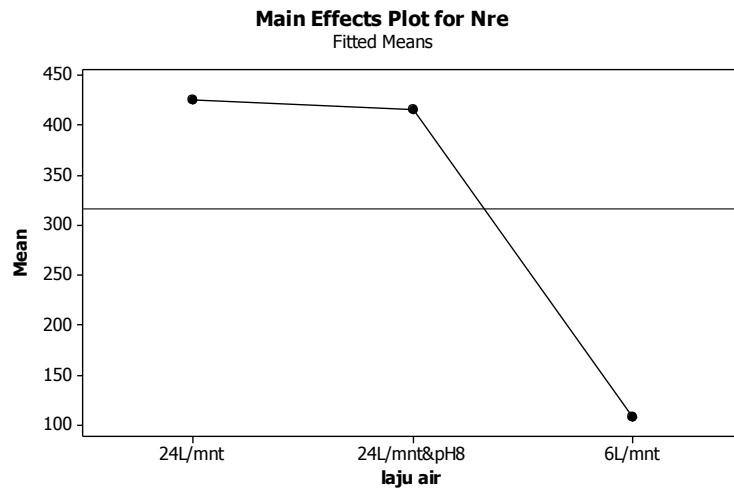
Pengaruh Laju alir Resirkulasi, Q

Bilangan *Reynolds*, N_{Re}



Source	DF	SS	MS	F	P
laju air	2	724404	362202	885.35	0.000
Error	30	12273	409		
Total	32	736677			

S = 20.23 R-Sq = 98.33% R-Sq(adj) = 98.22%

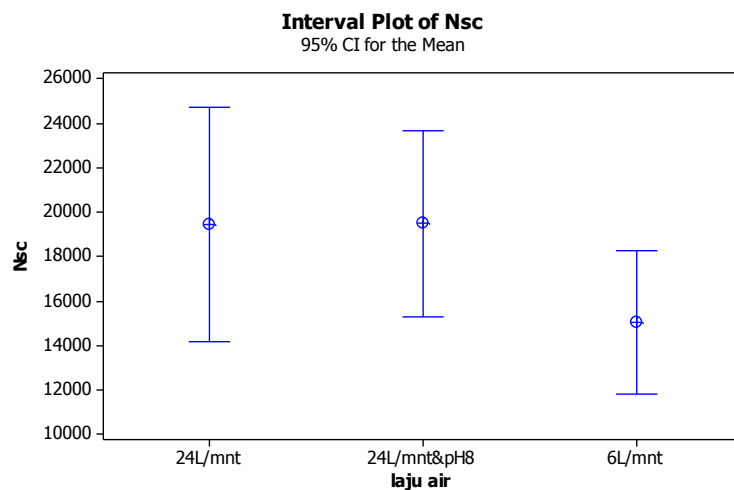


Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	316.757	3.521	89.96	0.000
laju air				
24L/mnt	109.792	4.979	22.05	0.000
24L/mnt&pH8	99.658	4.979	20.01	0.000

Model yang terbentuk

$$NRe = 316.757 + 109.792(24L/mnt) + 99.658(24L/mnt \& \text{pH8}) + \text{error}$$

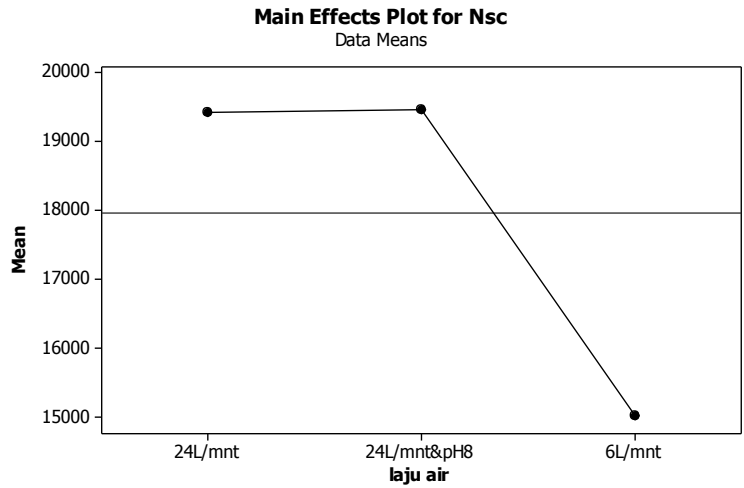
Bilangan Schmidt, N_{Sc}



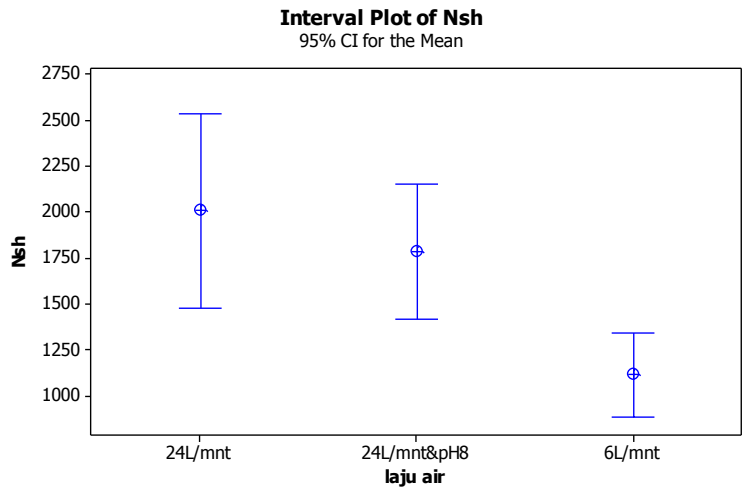
Source	DF	SS	MS	F	P
laju air	2	143212242	71606121	1.74	0.193

Error	30	1236221526	41207384		
Total	32	1379433769			

S = 6419 R-Sq = 10.38% R-Sq(adj) = 4.41%

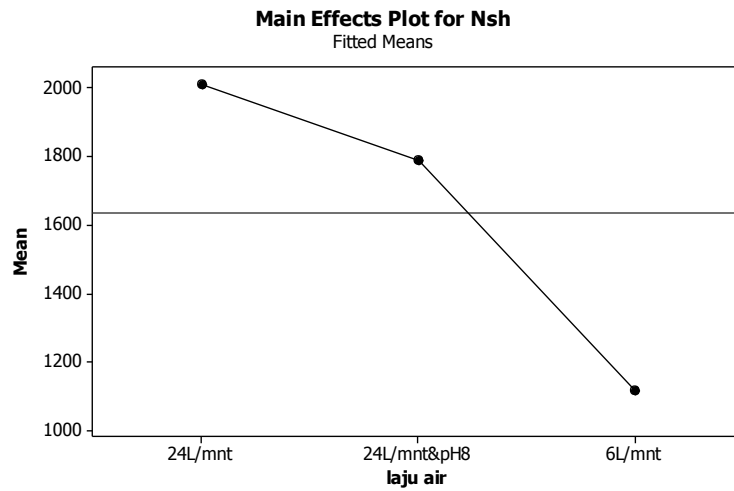


Bilangan Sherwood, N_{Sh}



Source	DF	SS	MS	F	P
laju air	2	4756536	2378268	6.82	0.004
Error	30	10457710	348590		
Total	32	15214246			

S = 590.4 R-Sq = 31.26% R-Sq(adj) = 26.68%



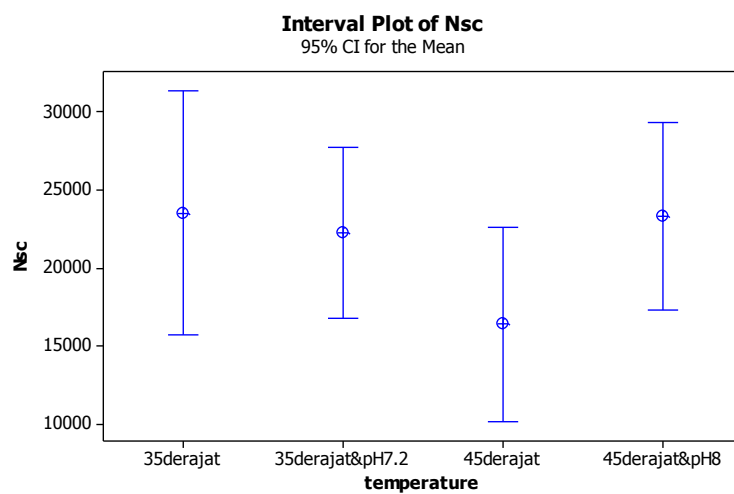
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1636	102.8	15.92	0.000
laju air				
24L/mnt	371.2	145.4	2.55	0.016
24L/mnt&pH8	150.4	145.4	1.03	0.309

Model yang terbentuk

$$NSh = 1636 + 371.2(24L/mnt) + 150.4(24L/mnt \text{ \& } pH \ 8,0) + \text{error}$$

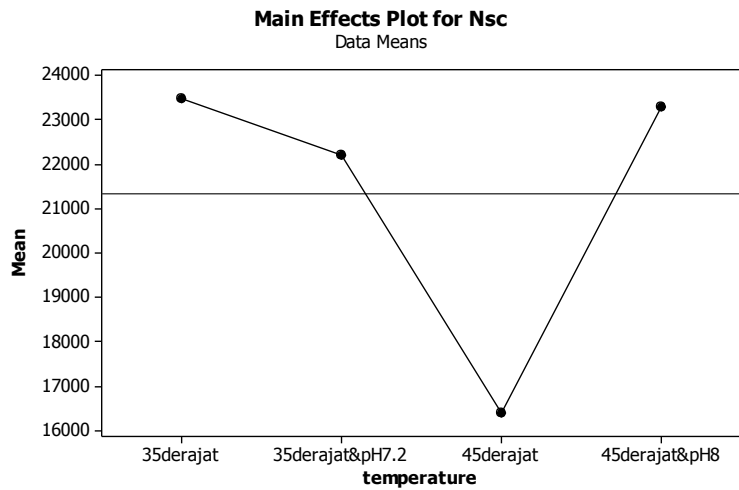
Pengaruh Temperatur, T

Bilangan Schmidt, NSc

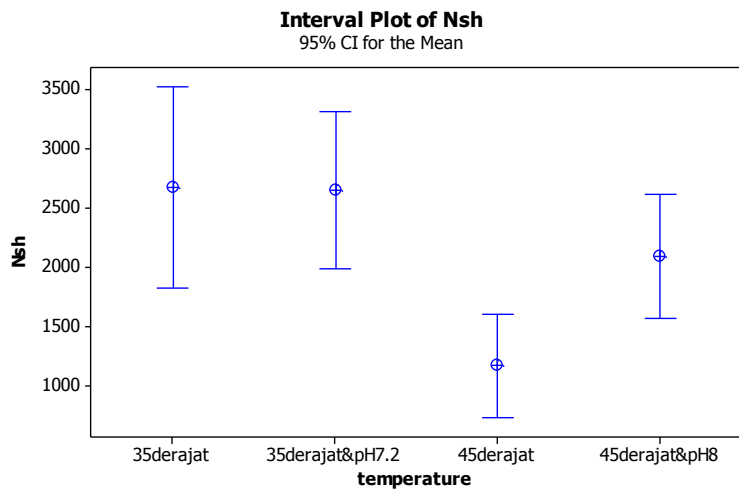


Source	DF	SS	MS	F	P
temperature	3	371482383	123827461	1.35	0.273
Error	40	3681686182	92042155		
Total	43	4053168565			

S = 9594 R-Sq = 9.17% R-Sq(adj) = 2.35%

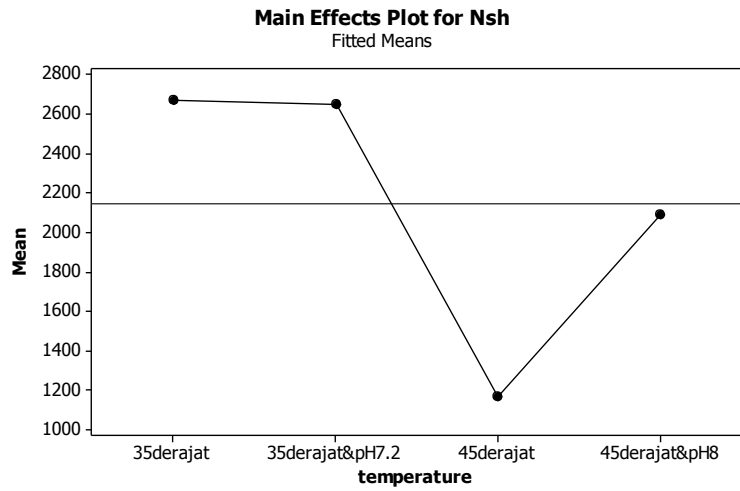


Bilangan Sherwood, *NSh*



Source	DF	SS	MS	F	P
temperature	3	16266617	5422206	6.03	0.002
Error	40	35939066	898477		
Total	43	52205683			

S = 947.9 R-Sq = 31.16% R-Sq(adj) = 26.00%



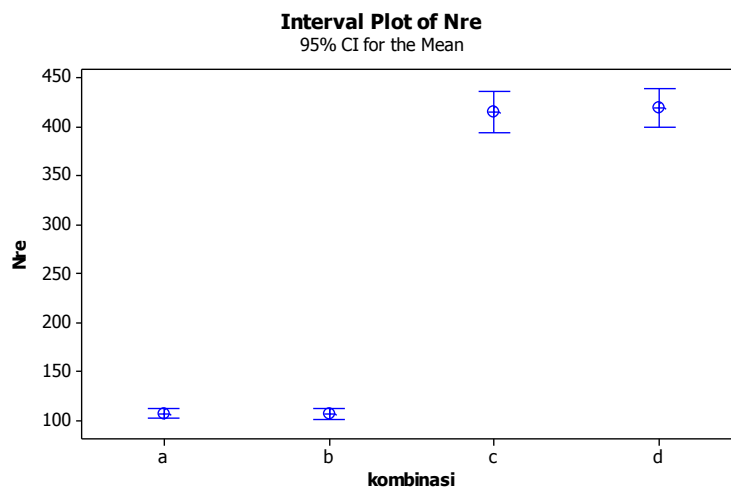
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2142.8	142.9	15	0.000
temperature				
35derajat	524.8	247.5	2.12	0.04
35derajat&pH7.2	502.1	247.5	2.03	0.049
45derajat	-973.9	247.5	-3.93	0.000

Model yang terbentuk

$$NSh = 2142.8 + 524.8(35^\circ) + 502.1(35^\circ \& \text{pH}7.2) - 973.9(45^\circ)$$

Pengaruh kombinasi pH Q T

Bilangan *Reynolds*, *NRe*



Source	DF	SS	MS	F	P
kombinasi	3	1056484	352161	749.77	0.000
Error	40	18788	470		
Total	43	1075271			

S = 21.67 R-Sq = 98.25% R-Sq(adj) = 98.12%

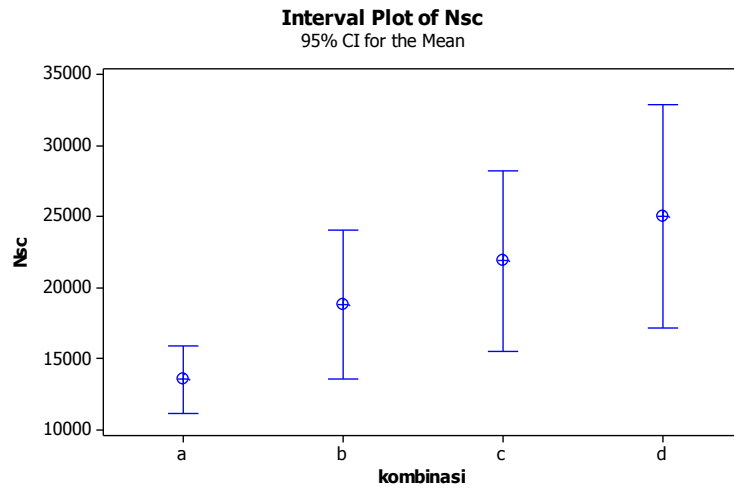


Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	261.874	3.267	80.15	0.000
kombinasi				
a	-154.822	5.659	-27.36	0.000
b	-155.073	5.659	-27.4	0.000
c	152.847	5.659	27.01	0.000

Model yang terbentuk:

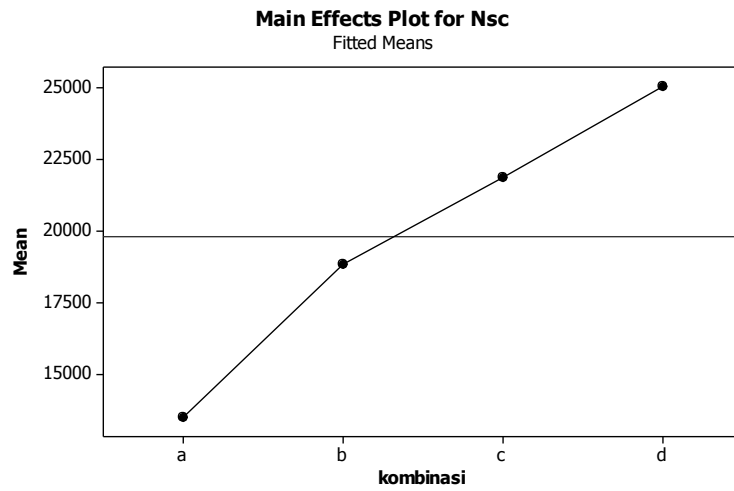
$$NRe = 261.874 - 154.822(a) - 155.073 (b) + 152.847(d) + \text{error}$$

Bilangan Schmidt, NSc



Source	DF	SS	MS	F	P
kombinasi	3	791579671	263859890	3.5	0.024
Error	40	3014357545	75358939		
Total	43	3805937216			

S = 8681 R-Sq = 20.80% R-Sq(adj) = 14.86%

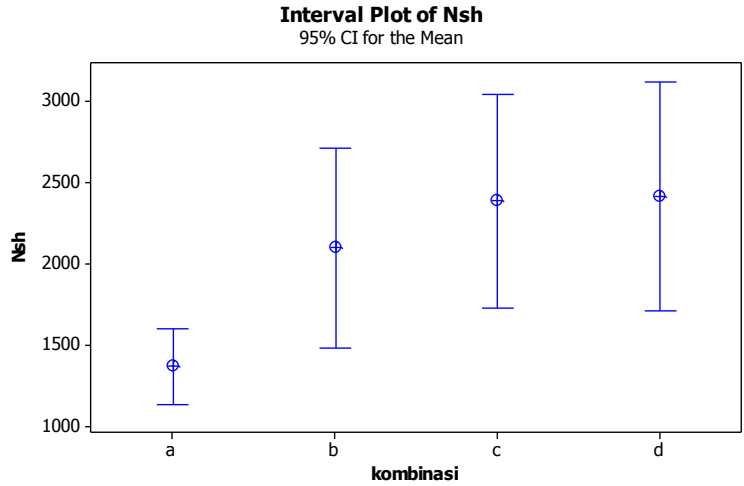


Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19812	1309	15.14	0
kombinasi				
a	-6291	2267	-2.78	0.008
b	-984	2267	-0.43	0.666
c	2063	2267	0.91	0.368

Model yang terbentuk:

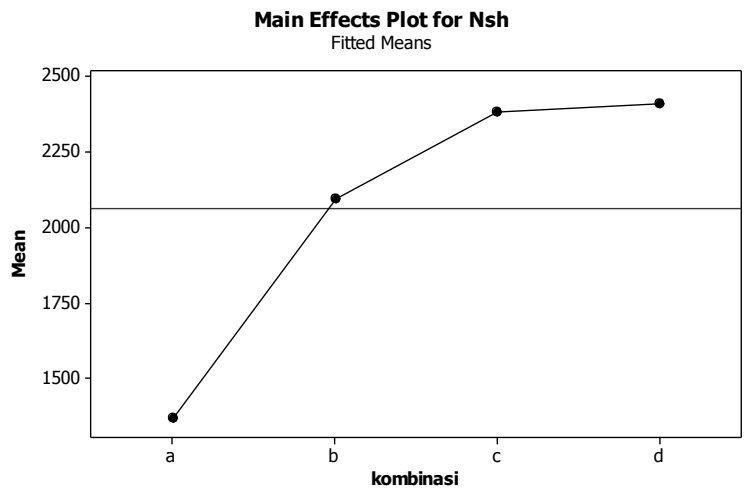
$$N_{Sc} = 19812 - 6291(a) - 984(b) + 2063(c) + \text{error}$$

Bilangan Sherwood, N_{Sh}



Source	DF	SS	MS	F	P-value
kombinasi	3	7805811	2601937	3.45	0.025
Error	40	30177596	754440		
Total	43	37983407			

S = 868.6 R-Sq = 20.55% R-Sq(adj) = 14.59%



Keterangan

- a : temperature 35, Q 6 L/mnt, pH 7.2
- b : temperature 45, Q 6 L/mnt, pH 7.2
- c : temperature 45, Q 24 L/mnt, pH Ambient
- d : temperature 45, Q 24 L/mnt, pH 8

Term	Coef	SE Coef	T	P-value
Constant	2063.7	130.9	15.76	0.000
kombinasi				
a	-697.1	226.8	-3.07	0.004
b	30.3	226.8	0.13	0.894
c	318.2	226.8	1.4	0.168

Model yang terbentuk:

$$NSh = 2063.7 - 697.1(a) + 30.3(b) + 318.2(c) + \text{error}$$

Kesimpulan:

Faktor/Respon	Densitas	Viskositas	BOD	COD	VFA (As.Asetat),
Ph	Signifikan	Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan
Laju Air	Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan
Temperature	Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan
Kombinasi	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Tidak Signifikan	Signifikan

Faktor/Respon	<i>NRe</i>	<i>Nsc</i>	<i>Nsh</i>
pH	-	Tidak Signifikan	Signifikan
Laju Air	Signifikan	Tidak Signifikan	Signifikan
Temperatur	-	Tidak Signifikan	Signifikan
Kombinasi	Signifikan	Signifikan	Signifikan

“halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran G. Biodata Penulis

Biodata Penulis

Yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Abdul Kahar, ST.,M.Si.
Pangkat/NIP/Golongan : Lektor Kepala/19690615 200112 1 001/IV-a
Tempat/Tgl Lahir : Balikpapan, 15 Juni 1969
Suku/Bangsa : Bugis/Indonesia
Agama : Islam
Alamat Rumah : Perum Navigasi Bengkuring
Jl. Turi Merah2 No. 61 RT.11 Sempaja Utara
Samarinda 75119
Telepon : 081346 305706
E-mail : kahar.abdul@gmail.com
Alamat Kantor : Fakultas Teknik Unmul Kampus Gn. Kelua
Jl. Sambaliung No. 9Samarinda 75119
Telepon/Faks : (0541)736834/(0541)749315
Orang tua : Mansur Makkulahu bin Kulahu Dg. Mattone
Indo Tang binti Jabe Dg. Pahata
Isteri : Sinto Windarti, S.Pi.
Anak : Yusuf Khalifah Arkhab
Dzakiy Muhammad Alfadhil

Menerangkan dengan sebenarnya;

Riwayat Pendidikan

1977-1983 SDN No. 013, Balikpapan
1983-1986 SMP PGRI I, Balikpapan
1986-1989 SMAN 3, Balikpapan
1989-1995 S1 Teknik Kimia, Universitas Muslim Indonesia, Makassar
1999-2002 S2 Ilmu Kimia, Universitas Hasanuddin, Makassar
2013-sekarang S3 Teknik Lingkungan FTSP ITS, Surabaya

Riwayat Pekerjaan

Des 2001-Febr 2008 Jurusan Kimia FMIPA, Universitas Mulawarman,
Samarinda
Febr 2008-sekarang Jurusan Teknik Kimia FT, Universitas Mulawarman,
Samarinda

Pengalaman Profesional (Pelatihan/Kursus/Seminar)

2010 Pelatihan Fasilitator Pembangunan Air Minum dan Penyehatan
Lingkungan (AMPL) WASPOLA Facility – BAPPENAS, Surabaya, 20 –
25 Juni 2010.

- 2010 Forum Komunikasi Klaster Industri Petrokimia, Dukungan Akademisi Dalam Pengembangan Klaster Industri Petrokimia Di Kalimantan Timur. Kementerian Perindustrian, Direktorat Jenderal Basis Industri Manufaktur. Hotel Zurich, Balikpapan, 9 Juni 2010.
- 2010 Nara Sumber pada Rapat Koordinasi Pengalokasian Bahan Baku Migas dan Kondensat Di Kalimantan Timur. Alternatif Pengganti Migas Sebagai Bahan Baku Industri Petrokimia. Kementerian Perindustrian, Direktorat Jenderal Basis Industri Manufaktur. Hotel Zurich, Balikpapan, 12 Agustus 2010.
- 2011 Pelatihan Pengenalan Dan Dokumentasi Sistem Menejemen Mutu Perguruan Tinggi Berbasis ISO 9001:2008. UGM, Yogyakarta, 4 – 6 Juli 2011
- 2011 Pemateri pada Diseminasi dan Sosialisasi Keteknikan Bidang PLP. Perencanaan Pengolahan Air Limbah Dengan Sistem Terpusat. Kementerian PU Dirjen Cipta Karya Direktorat Pengembangan PLP. Balikpapan, 20 - 28 Juli 2011.
- 2012 Diseminasi Dan Sosialisasi Keteknikan Bidang PLP. Kementerian PU Dirjen Cipta Karya Direktorat Pengembangan PLP. Hotel Santika Beach Resort, Tuban, Kuta, Bali, Denpasar, 5-10 Februari 2012.
- 2012 Seminar Nasional Teknologi, Inovasi dan Pengembangan Teknologi dan Energi Terbarukan yang Ramah Lingkungan untuk Mendukung Kaltim sebagai Kluster Industri, Kaltim Green, dan Kaltim Bangkit. Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman. Samarinda, 6 Maret 2012
- 2012 Moderator Diseminasi dan Sosialisasi Keteknikan Bidang Penyehatan Lingkungan Permukiman (PLP) Tahun 2012, Kementerian PU Dirjen Cipta Karya Direktorat Pengembangan PLP. Hotel Mesra International, Samarinda, 18 – 22 Juni 2012.
- 2012 Scientific Conference Of Environmental Technology IX–2012: Advances in Agricultural and Municipal Waste Technology to Anticipate Food and Energy Crisis. FTSP ITS, Surabaya, 10 Juli 2012.
- 2012 Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW) 2012: Sinergi Tata Kelola Keairan Dengan Pengaturan Tata Guna Lahan Dan Strategi Penanggulangan Bencana Yang Diakibatkannya. Program Diploma T.Sipil, ITS Surabaya, 11 Juli 2012.
- 2012 Seminar Nasional Kimia Kalimantan Timur 2012. Peran Riset & Pendidikan Kimia dalam pembangunan Agro-Industri dan Energi Terbarukan. Himpunan Kimia Indonesia (HKI) Cabang Kalimantan Timur. Gedung Lamin Etam Kantor Gubernur Kaltim, Samarinda, 20 Oktober 2012.

2016 Seminar Nasional Industri Kimia Dan Sumber Daya Alam (SNIKSDA) 2016. Pemanfaatan Sumber Daya Alam dengan Teknologi Terbarukan dan Ramah Lingkungan: Tantangan dan Peluang di Masa Depan. Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, 27 Agustus 2016.

Publikasi

Kahar, A., 2004. Analisis Dimensional Hubungan Koefisien Transfer Massa dan Difusi Gas Sistem Udara-Air pada Kolom Isian. Jurnal Kimia Mulawarman ISSN 1693-5616, Vol. 1 No. 2, Mei 2004, FMIPA Universitas Mulawarman, Samarinda.

Kahar, A., 2005. Model Aliran Dua-Fase: Sistem Udara-Air pada Kolom Vertikal. Jurnal Kimia Mulawarman ISSN 1693-5616, Vol. 2 No. 2, Mei 2005, FMIPA Universitas Mulawarman, Samarinda.

Kahar, A., 2006. Pengaruh Temperatur dan Tekanan pada Kolom Vertikal terhadap Koefisien Diffusi Gas. Jurnal Kimia Mulawarman ISSN 1693-5616, Vol. 3, No. 2, Mei 2006, FMIPA Universitas Mulawarman, Samarinda.

Kahar, A., 2007. Pengaruh Laju Alir dan Diameter Partikel Zeolit pada Proses Penjerapan Fenol Terlarut dalam Limbah Cair Industri Kayu Lapis. J. Kimia Mulawarman ISSN 1693-5616, Vol. 4, Nomor 2, Mei 2007.

Kahar, A., 2008. Pengaruh Penggunaan Material Anoda Yang Berbeda Terhadap Kinerja Proteksi Katodik Metode Arus Tanding. J. Kimia Mulawarman ISSN 1693-5616, Vol. 5, Nomor 2, Mei 2008, hal. 28 – 33.

Kahar, A., Wirawan, T., dan Kurniawan, H., 2008. Penentuan Konsentrasi Optimal Inhibitor Korosi pada Baja Karbon API 5L GRADE B. Jurnal Aplikasi FT Unmul, ISSN 1411-9370, Vol. 8, No. 3, September 2008, Hal; 101 – 108.

Kahar, A., 2008. Kinetika Metanolisis Berkatalis Asam Pada Pre-Treatment Biodiesel Dari Minyak Jelantah Berkadar Asam Lemak Bebas (ALB) Tinggi. Jurnal Ilmiah Mahakam; Seri Sains & Teknologi, Lemlit Unmul. ISSN1412-6885, Volume 7, No. 2, Desember 2008; hal: 52 – 58.

Kahar, A., 2009. Prediksi Sifat Kimia-Fisik Blending Biodiesel Dari Minyak Jelantah dengan Minyak Tanah. Jurnal Teknologi Media Perspektif, Poltek Negeri Samarinda. ISSN 1412-3819. Volume 9, No. 2; Desember 2009; hal; 67 – 71.

Kahar, A., 2009. Karakteristik Sifat Kimia-Fisik Biodiesel Dari Minyak Jelantah Dengan Katalis Asam (H_2SO_4) Dan Basa ($NaOH$). Jurnal Kimia

Mulawarman Vol. 7 Nomor 1, Nopember 2009 ISSN 1693-5616, hal. 27 – 33.

- Kahar, A., Firmansyah Wijaya, dan Nor Handayani. 2010. Perencanaan Material Recovery Facilities (MRF) Di Kota Tanah Grogot, Kabupaten Paser, Kalimantan Timur. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Lingkungan VII, ITS, Surabaya, 25 – 26 Oktober 2010.
- Kahar, A., 2010. Sifat Kimia Fisika Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Asam Lemak Bebas (ALB) Tinggi. Jurnal Aplikasi Vol. 10 No. 3, Juli 2010 ISSN 1411-9370, hal. 153 – 160.
- Kahar, A., dan Widada, D., 2011. Pengaruh Temperatur dan Laju Alir Pada Kinetika Transesterifikasi Homogen Metanol- Minyak Jelantah. Prosiding Seminar Nasional Teknologi FT Unmul II 2011 ISBN 978-60218083-0-6, hal A. 27 – 33.
- Putri, N.P., dan Kahar, A., 2011. Pemanfaatan Sampah Sayuran Hijau dan Limbah Cair Urea Sebagai Pupuk Cair. Prosiding Seminar Nasional Teknologi FT Unmul II 2011 ISBN 978-60218083-0-6, hal C. 15 – 23.
- Kahar, A., 2011. Kinetika Transesterifikasi Homogen Metanol-Minyak Jelantah Berkatalis Asam: Studi Pengaruh Laju Alir Dan Temperatur Terhadap Asam Lemak Bebas (ALB). Jurnal Aplikasi Vol. 11 No. 1, Februari 2011 ISSN 1411-9370, hal. 47 – 51.
- Kahar, A., Ghitarina, Dan Suitsi Siswanto. 2012. Pengaruh Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Terhadap Kualitas Air Sekitar, Studi Kasus: TPA Bukit Pinang, Kota Samarinda. Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW), Surabaya, 11 Juli 2012, ISSN 2301-6752, hal. H.1-8.
- Kahar, A., dan Waya Wulan Sari. 2012. Pengaruh Penambahan Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Kotoran Sapi Terhadap Produksi Biogas Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Pada Reaktor Anaerobik. Scientific Conference Of Environmental Technology IX – 2012, Advances in Agricultural and Municipal Waste Technology to Anticipate Food and Energy Crisis, Surabaya, 10 July 2012.
- Kahar, A., Ira Aisya dan Waya Wulan Sari. 2014. Penambahan Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Meningkatkan Produksi Biogas Pada Pengolahan Air Limbah Secara Anaerobik. Addition Of Empty Fruit Bunches For Enhancement of Biogas Prduction in Anaerobic Wastewater Treatment. Jurnal Purifikasi, ISSN: 1411-3465, Vol. 14, No. 1, Juli 2014: 11-20.
- Kahar, A., Nonie Novelya, Budi Nining Widarti, Muhammad Busyairi, Veryatti Othavia. 2016. Pengaruh Temperatur Terhadap BOD, TSS, Dan VFA

Pada Pengolahan Lindi Dalam Bioreaktor Anaerobic. Prosiding Seminar Nasional Industri Kimia Dan Sumber Daya Alam 2016, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, 27 Agustus 2016, ISBN: 978-602-70195-1-5, p. 38-44.

Kahar, A., Warmadewanthi, I.D.A.A., Hermana, J., 2017. The Effects of Temperature-pH on Biochemical Degradation at Leachate Treatment in Anaerobic Bioreactor. International Journal of ChemTech Research, ISSN: 0974-4290, Vol. 10, No. 4, pp. 172-181.

Kahar, A., Eko Heryadi, Lukman Malik, Budi Nining Widarti, Ika Mey Cahayanti. 2017. The Study of Seeding and Acclimatization from Leachate Treatment in Anaerobic Bioreactor. ARPN Journal Of Engineering and Applied Sciences. ISSN: 18196-608, Vol. 12, No. 8, April 2017, p. 2610-2614.

Demikian daftar riwayat hidup ini Saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya dan apabila dikemudian hari terdapat keterangan yang tidak benar saya bersedia dituntut dimuka pengadilan.

Samarinda, Agustus 2017

Hormat Saya

Abdul Kahar
NRP. 3313301001