



SKRIPSI – TK141581

**STUDI PEMANFAATAN SAMPAH KOTA
MENJADI ENERGI TERBARUKAN LISTRIK
- BIOGAS**

**Oleh :
Binsar David Nababan
NRP. 2311100190**

**Dosen Pembimbing:
Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D
NIP. 198107132005011001**

**Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc.
NIP. 195108041974121001**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**



FINAL PROJECT – TK141581

**STUDY OF THE UTILIZATION OF URBAN
WASTE CONVERSION INTO RENEWABLE
ENERGY ELECTRICAL - BIOGAS**

**Proposed by :
Binsar David Nababan
NRP. 2311100190**

**Research Advisor:
Fadlilatul Taufany, ST, Ph.D
NIP. 198107132005011001**

**Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc.
NIP. 195108041974121001**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PEMANFAATAN SAMPAH KOTA MENJADI ENERGI TERBARUKAN LISTRIK-BIOGAS

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Binsar David Nababan

NRP : 2311 100 190

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D (Pembimbing I)
2. Prof. Dr.Ir. Ali Altway, M.S (Pembimbing II)
3. Ir. Nuniek Hendrianie, MT (Penguji I)
4. Dr. Ir. Susianto, DEA (Penguji II)
5. Dr. Eva Oktavia Ningrum, ST, M.S (Penguji III)

Surabaya,
Januari 2016



STUDI PEMANFAATAN SAMPAH KOTA MENJADI ENERGI TERBARUKAN BIOGAS - LISTRIK

**Dosen Pembimbing : Fadlilatul Taufany, ST., PhD
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc.**

Disusun oleh : Binsar David Nababan (2311100190)

ABSTRAK

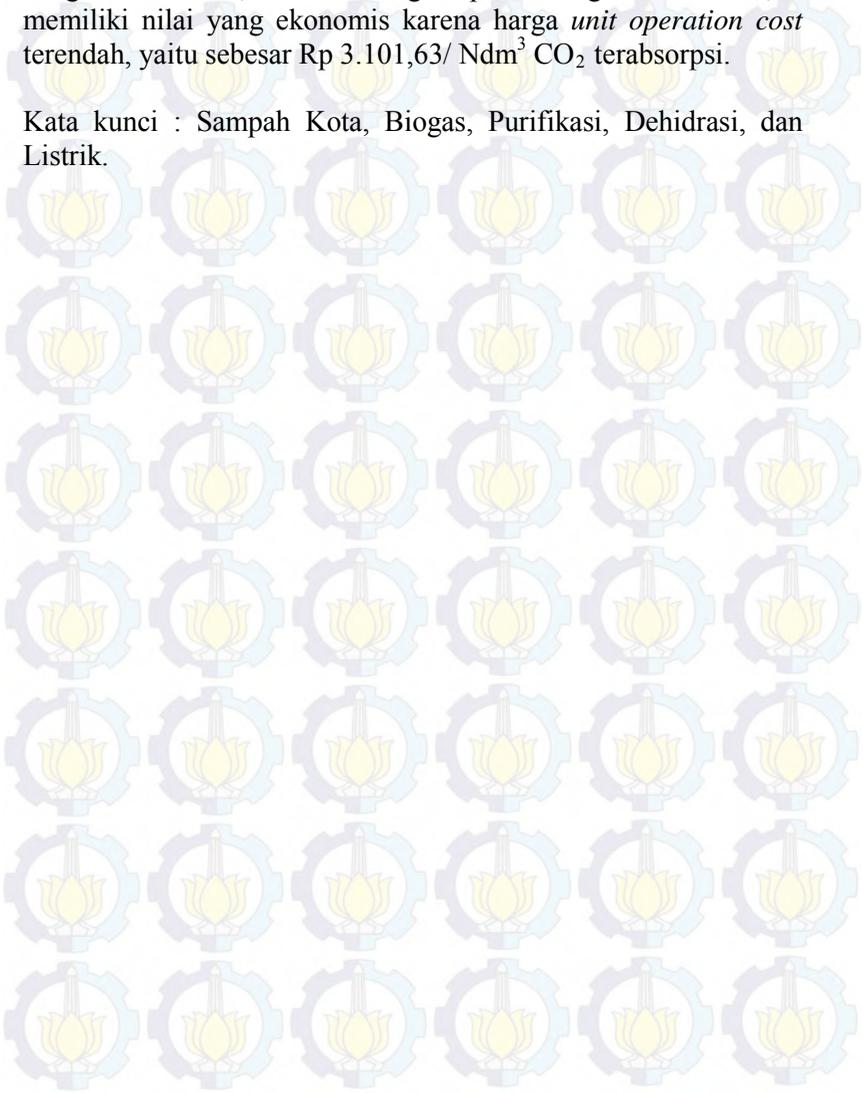
Kebutuhan energi dunia terutama yang bersumber pada bahan bakar fosil di dunia semakin meningkat seiring dengan perkembangan peradaban manusia. Namun berbanding terbalik dengan cadangan energi fosil tersebut, sehingga perlu adanya pengembangan penelitian mengenai energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan alternatif tersebut adalah pemanfaatan biogas. Biogas merupakan produk akhir/degradasi anaerobik oleh bakteri methanogen. Biogas pada penelitian ini memiliki komposisi CH_4 52,54%, karbondioksida (CO_2) 17,6% dan sisanya merupakan campuran gas (O_2 , N_2 , CO , H_2 dan H_2S) sebesar 29,8%.

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati produk biogas yang dihasilkan dari pengaturan keseragaman ukuran sampah sayurannya dan pengaruh sirkulasi yang diberikan selama proses fermentasi untuk memaksimalkan potensi kebermafaatan sampah sayuran kota sebelum menjadi pupuk kompos, serta menganalisa secara ekonomi dari proses purifikasi dan dehidrasi untuk menghasilkan efisiensi *overall* generator listrik, dan *load* maksimal generator yang digunakan pada berbagai macam beban (12,5%; 25%; 37,5%; 50%; 62,5%; 75%; 87,5%; 100%) pada *load bank test*.

Hasil dari penelitian ini adalah Pencacahan sampah sayuran dapat mempercepat proses pembentukan biogas dengan komposisi gas metana yang mulai bisa terbakar dan semakin besar laju alir dari proses sirkulasi dapat semakin memperbesar laju produksi biogas perharinya, serta biogas terpurifikasi dengan NaOH 0,5N dan dengan perbandingan $L/G=1:12,75$ memiliki

%recovery terbesar, yakni 93,67%, sedangkan biogas terpurifikasi dengan NaOH 0,1N dan dengan perbandingan L/G=1:12,75 memiliki nilai yang ekonomis karena harga *unit operation cost* terendah, yaitu sebesar Rp 3.101,63/ Ndm³ CO₂ terabsorpsi.

Kata kunci : Sampah Kota, Biogas, Purifikasi, Dehidrasi, dan Listrik.



STUDY OF THE UTILIZATION OF URBAN WASTE CONVERSION INTO RENEWABLE ENERGY ELECTRICAL - BIOGAS

**Advisors : Fadlilatul Taufany, ST., PhD
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MS.**

Name : Binsar David Nababan (2311100190)

ABSTRACT

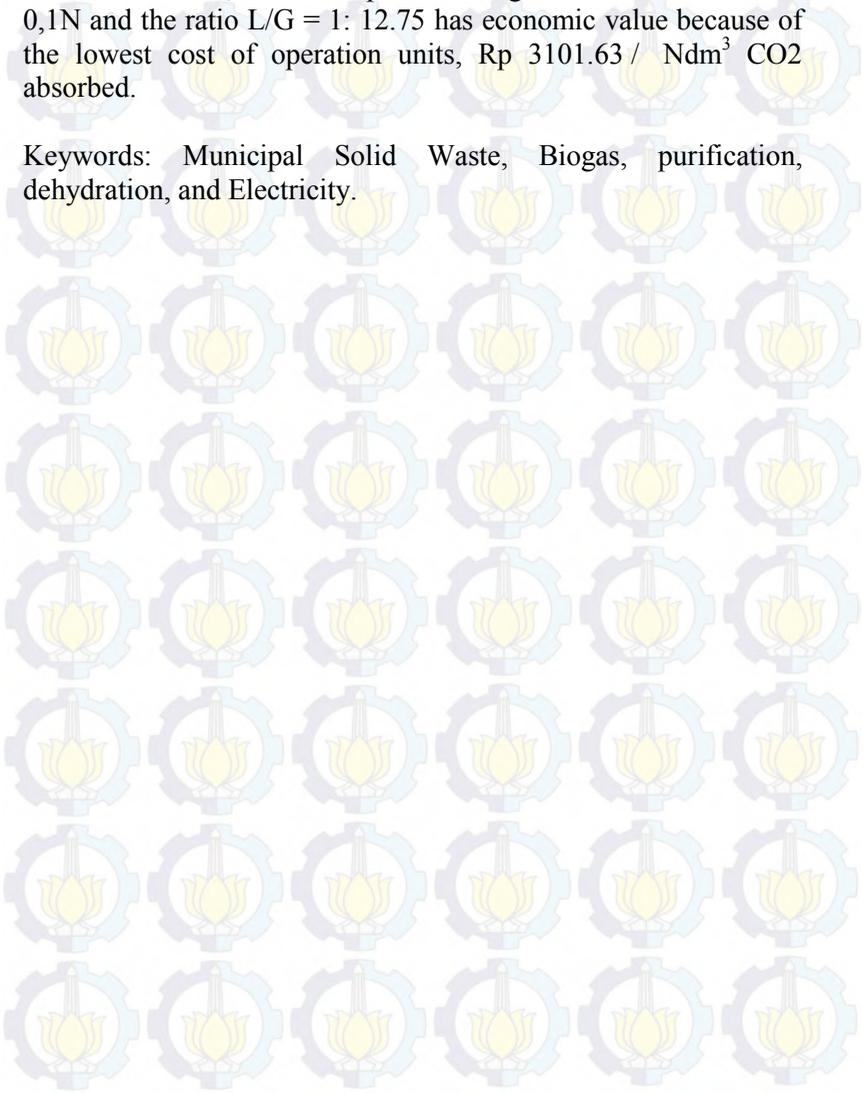
The world's energy needs are sourced primarily on fossil fuels in the world is increasing along with the development of human civilization. It is inversely proportional to the fossil energy reserves. Therefore, there is the more the need of research on the development of renewable energy. One such alternative renewable energy is the utilization of biogas. Biogas is the end product of anaerobic degradation by methanogen bacteria. Biogas in this study had a composition of 52.54% CH₄, carbon dioxide (CO₂) 17.6% and the remainder is a mixture of gases O₂, N₂, CO, H₂, H₂O and H₂S amounted to 29.8%.

This study aims to observe the products of biogas produced from setting uniform litter size of municipal city waste and the influence of circulation provided during the fermentation process to maximize the potential municipal city waste before it becomes compost manure, as well as to analyze the economics of the process of purification and dehydration to produce efficient overall electrical generator, and the maximum load generator used in a wide variety of load (12.5%; 25%; 37.5%; 50%; 62.5%; 75%; 87.5%; 100%) in load bank test.

Results from this study are the cutting up of municipal city waste can speed up the process of formation biogas with a methane gas composition can begin to burn and the greater the flow rate of the circulation process can increase the production rate of biogas per day, also purified biogas with NaOH solution

0,5N and the ratio L/G=1:12.75 has the biggest % recovery, which is 93.67%, while the purified biogas with NaOH solution 0,1N and the ratio L/G = 1: 12.75 has economic value because of the lowest cost of operation units, Rp 3101.63 / Ndm³ CO₂ absorbed.

Keywords: Municipal Solid Waste, Biogas, purification, dehydration, and Electricity.



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur Penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul:

“STUDI PEMANFAATAN SAMPAH KOTA MENJADI ENERGI TERBARUKAN LISTRIK-BIOGAS”

Laporan skripsi ini disusun untuk melengkapi persyaratan penelitian skripsi dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang Studi S1 Teknik Kimia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini dengan kerendahan hati Penulis menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga Penulis yang telah memberikan segalanya yang tak mungkin tercantumkan dalam tulisan ini.
2. Bapak **Fadilatul Taufany, ST., Ph.D** selaku Dosen Pembimbing 1, Bapak **Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MS**, selaku Dosen Pembimbing 2 serta Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan Bapak **Prof. Dr. Ir. Nonot Soewarno, M. Eng.**, selaku Guru Besar Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran, bimbingan, saran dan dukungan dalam menyelesaikan tugas akhir Penulis.
3. Ibu **Ir. Nuniek Hendrianie, MT** selaku Dosen Penguji dari tugas akhir skripsi ini, serta Dosen Wali bagi Penulis di Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah memberikan semangat dan masukan untuk menjadi pribadi yang semakin lebih baik lagi
4. Bapak **Dr. Ir. Susianto, DEA** dan Ibu **Dr. Eva Oktavia Ningrum, ST, MS** selaku Dosen-dosen Penguji atas

segala masukan dan kritikan untuk menjadikan laporan skripsi ini semakin lebih baik.

5. Bapak **Ir, Edy Hartono, MM** selaku General Manager Unit Proyek CNG dan LNG PT PJB yang telah memberikan banyak masukan, bantuan alat dan bimbingan dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
6. Bapak **Juwari, ST, M.Eng. Ph.D**, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI - ITS
7. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh staff jurusan Teknik Kimia FTI – ITS
8. Rekan – rekan mahasiswa Teknik Kimia ITS angkatan 2011 (K51) yang senantiasa memberikan dukungan dalam pengerjaan proposal skripsi ini.
9. Rekan – rekan Laboratorium Perpanmas 14/15 dan 15/16 tercinta atas dukungan dan bantuannya selama penyusunan laporan skripsi Penulis
10. Semua pihak yang telah membantu merajut kelengkapan dari laporan ini yang tidak dapat Penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih jauh dari sempurna, namun, Penulis tetap berharap semoga penelitian dalam skripsi ini dapat bermanfaat. Amin.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Prinsip Dasar Pembentukan Biogas dari Bahan Organik	5
2.2 Karbondioksida (CO ₂)	7
2.3 Hidrogen Disulfida (H ₂ S)	9
2.4 Air (H ₂ O)	9
2.5 Absorber	9
2.6 <i>Acid Gas Removal</i>	11
2.7 <i>Dehydration</i>	12
2.8 <i>Load Bank Test</i>	16
2.9 Penelitian Terdahulu yang Relevan.....	17
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Deskripsi Penelitian.....	21
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian.....	21
3.2.1 Bahan Penelitian	21
3.2.2 Peralatan Penelitian	21
3.2.3 Skema Reaktor Biogas dan Alat Penelitian	24
3.3 Variabel Penelitian	27
3.4 Prosedur Penelitian.....	28

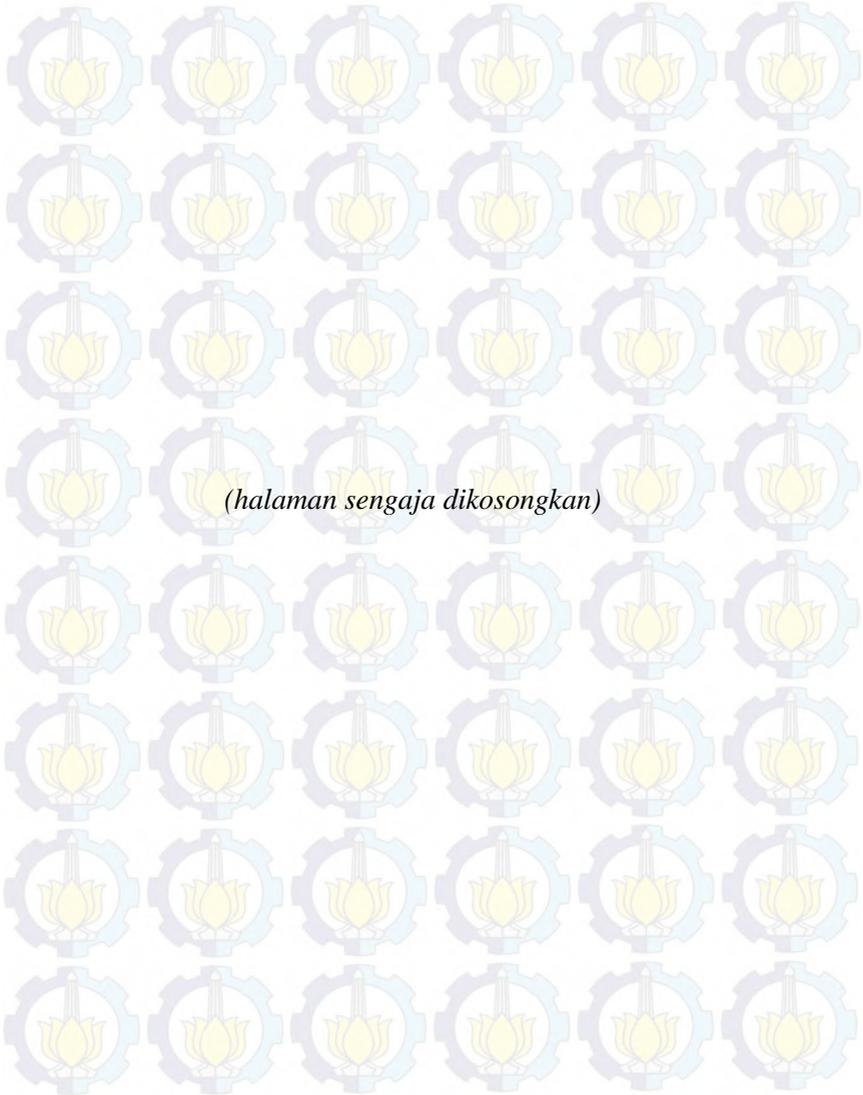
3.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian	28
3.4.2 Tahap Pelaksanaan Penelitian	29
3.5 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Analisa Hasil	32
3.2.1 Kromatografi Gas	32
3.2.2 Analisa Orsat	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Prosedur Penelitian	35
4.1.1 Persiapan Kotoran Sapi Sebagai <i>Starter</i> pada Tangki <i>Digester</i> 5000L	35
4.1.2 Persiapan dan Kondisi Awal <i>Feed</i> Sampah Sayuran	37
4.2 Proses Produksi Biogas pada Tangki <i>Digester</i> 1100L	37
4.3 Proses Purifikasi dan Dehidrasi Biogas	40
4.3.1 Pemilihan Jenis Absorban untuk Purifikasi Biogas	40
4.3.2 Pengaruh Konsentrasi dan Rasio L/G Terhadap Hasil <i>Acid Gas Removal</i>	41
4.3.3 Pengujian Hasil Purifikasi Biogas Sebagai Umpan Generator dan Diuji Menggunakan <i>Load Bank Test</i>	43
BAB 5 KESIMPULAN	
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	
PENJELASAN NOTASI	
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	
RIWAYAT PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis – Jenis Proses <i>Acid-Gas Removal</i>	12
Gambar 3.1	Skema Peralatan Penelitian	22
Gambar 3.2	Reaktor Biogas Tangki Penyiapan <i>Starter</i> 5000 L dan Bagian Dalam Reaktor.....	24
Gambar 3.3	Skema Reaktor <i>Digester Starter</i> 5000 L	24
Gambar 3.4	Skema Bagian Dalam Reaktor.....	25
Gambar 3.5	Reaktor Biogas 1100L dan Gas Holder 650L	25
Gambar 3.6	Skema Reaktor Biogas 1100 L.....	26
Gambar 3.7	Gambar Alat Pencacah Sampah Sayuran dan Motor Penggerak	26
Gambar 3.8	Gambar Alat Penelitian Tampak Depan dan Tampak Belakang	27
Gambar 3.9	Analisa Kromatografi Gas (GC – 7900).....	32
Gambar 3.10	Gambar Skema Analisa Orsat dan Analisa Orsat yang Digunakan	33
Gambar 4.1	Laju Produksi Kotoran Sapi Sebagai <i>Starter</i>	35
Gambar 4.2	Lapisan-lapisan di Dalam Tangki <i>Digester</i>	36
Gambar 4.3	Grafik Laju Produksi Biogas Sampah Sayuran Fraksi Solid 7,65%.....	38
Gambar 4.4	Grafik Perubahan pH dan Temperatur Tangki <i>Digester</i> 1100L	39
Gambar 4.5	Diagram Batang Pengaruh Rasio L/G dan Normalitas Terhadap % <i>Recovery</i>	42
Gambar 4.6	Diagram Batang Pengaruh Rasio L/G dan Normalitas Terhadap <i>Unit Operation Cost</i>	43
Gambar 4.7	Grafik Hasil <i>Load Bank Test</i> Biogas Terpurifikasi dengan Konsentrasi 0,1N dan Rasio L/G=1:12,5 ..	44

PENJELASAN NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
BM	berat molekul	gram/mol
N	normalitas	N
m	massa	gram
ρ	densitas	gram/liter
P	tekanan	bar
V	voltase	volt
I	arus	ampere
P	<i>power</i>	watt
μ	efisiensi	%



(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Sampah di Kota Surabaya	2
Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan Proses Anaerob	5
Tabel 2.2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida dalam Proses Industri	8
Tabel 2.3 <i>Glycol</i> untuk Dehidrasi	13
Tabel 2.4 Sifat <i>Activated</i> Alumina	14
Tabel 2.5 Sifat Silika Gel	15
Tabel 2.6 Sifat <i>Molecular Sieves</i>	16
Tabel 2.7 Daftar Peneliti Biogas	17
Tabel 4.1 Kadar COD Awal Sampah Sayuran setelah Pencacahan, <i>Starter</i> , setelah Pencampuran, dan setelah 20 H ari Fermentasi	37
Tabel 4.2 Kadar Biogas Awal dari Sampah Sayuran Tanpa Purifikasi	39
Tabel 4.3 Tabel % <i>Recovery</i> dari <i>Acid Gas Removal</i> Menggunakan Alat Analisa Orsat	41
Tabel 4.3 Efisiensi Biogas Terpurifikasi dengan Konsentrasi NaOH 0,1 N dan Rasio L/G=1:12,5	45

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pada saat ini, Indonesia telah menjadi negara pengimpor minyak. Hal ini disebabkan karena semakin tingginya selisih antara ekspor dan impor minyak. Di samping itu, kapasitas produksi nasional dalam beberapa tahun terakhir terus menerus mengalami penurunan. Data yang tercantum pada situs resmi pemerintah Indonesia menunjukkan bahwa produksi minyak hanya 958 ribu barel per hari sedangkan kebutuhan minyak lebih dari 1 juta barel per hari. Rendahnya produksi minyak ini akan menjadikan posisi Indonesia sebagai negara pengimpor minyak tidak hanya tidak hanya untuk saat ini, tetapi juga untuk saat yang akan mendatang.

Berdasarkan data di atas, perlu dipikirkan usaha dalam pencarian dan penggunaan sumber energi alternatif, terutama yang dapat diperbarui. Ada berbagai macam energi yang dapat diperbarui, salah satunya adalah biogas. Biogas telah lama dikembangkan dan dapat dibuat dari berbagai macam limbah organik melalui proses penguraian secara anaerobik.

Ada berbagai macam bahan baku pembuatan biogas, seperti limbah peternakan yang terdiri dari kotoran ternak, limbah pertanian yang berupa jerami, limbah perairan yang berupa eceng gondok, dan sampah organik dari sisa rumah tangga dan pasar. Data sampah yang diolah di tempat pembuangan akhir kota Surabaya ternyata cukup besar seperti yang tercantum di tabel 1.1. Jumlah sampah tersebut akan semakin membebani tempat pembuangan sampah sehingga perlu dilakukan usaha pengolahan sampah.

Tabel 1.1 Sampah di Kota Surabaya

Tahun	Jumlah Sampah di Tempat Pembuangan Akhir Kota Surabaya (ton/hari)
2011	1.150,02
2012	1.276,76
2013	1.394,22

Sumber: Informasi Laporan Penyelenggaraan Pemerintah Daerah (ILPPD) Tahun 2011, 2012, dan 2013

Penelitian ini dilakukan sebagai salah satu usaha untuk mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, yaitu dengan memfermentasi sampah menjadi biogas. Pada penelitian sebelumnya, hasil biogas yang didapat oleh Corral et. al. dalam penelitian skala pilot menunjukkan bahwa produksi biogas rata-rata sebesar 62 m³ metana/ton kotoran sapi kering untuk bahan baku kotoran sapi, 37 m³ metana/ton sampah kering untuk bahan baku sampah organik, dan 172 m³ metana/ton sampah kering untuk bahan baku campuran kotoran sapi dan sampah organik. Dengan mengambil data hasil biogas untuk bahan baku campuran sampah organik dan kotoran sapi yaitu sebesar 172 m³ metana/ton sampah kering, dengan nilai bakar metana sebesar 8,96 mcal/m³, maka dengan permissalan bahan baku sebanyak 250 ton/hari, akan diperoleh nilai bakar sebesar 80,89 Gcal/hari. Jika dibandingkan dengan minyak tanah yang mempunyai nilai bakar 9000 kcal/liter dengan harga Rp6000/liter, maka akan dapat menghemat minyak tanah sebanyak 8.987 liter/hari dan dapat menghemat 19,7 milyar tiap tahunnya.

Mengingat besarnya jumlah sampah dan potensi yang dapat ditimbulkan, serta potensi ekonomi yang sangat besar maka penelitian produksi biogas perlu dilakukan. Dalam penelitian ini akan dilakukan usaha untuk meningkatkan produksi biogas dari sampah organik yang diambil dari sampah pasar yang dicampur dengan kotoran sapi dengan pemurnian menggunakan NaOH dan *molecular sieve* untuk menghasilkan hasil biogas yang lebih baik.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian yang meneliti tentang potensi pengolahan sampah kota menjadi biogas dan listrik-biogas. Sampah kota yang dikhususkan adalah sampah sayuran berupa sawi, kubis, selada, dan timun, yang kemudian diseragamkan ukurannya untuk diamati produk biogas yang dihasilkan, efisiensi *overall* generator listrik, dan *load* maksimal generator yang digunakan pada berbagai macam beban pada *load bank test*.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengamati produk biogas yang dihasilkan dari pengaturan keseragaman ukuran sampah sayurannya dan pengaruh sirkulasi yang diberikan selama proses fermentasi untuk memaksimalkan potensi kebermafaatan sampah sayuran kota sebelum menjadi pupuk kompos.
2. Menganalisa secara ekonomi dari proses purifikasi dan dehidrasi untuk menghasilkan efisiensi *overall* generator listrik, dan *load* maksimal generator yang digunakan pada berbagai macam beban (12,5%; 25%; 37,5%; 50%; 62,5%; 75%; 87,5%; 100%) pada *load bank test*.

I.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a) *Starter* menggunakan cairan *supernatant* dari pencampuran kotoran sapi dengan air yang telah menghasilkan gas metana, yang sebelumnya telah di inkubasi dalam reactor digester 5000L.
- b) Proses fermentasi utama pembentukan biogas menggunakan reaktor anaerobik 1100 L dan gas holder biogas 650 L dengan bahan baku campuran sampah sayuran dengan air.

- c) Proses *acid gas removal* menggunakan *packed bed column* dengan *raschig ring* dan dehidrasi biogas menggunakan *molecular sieve* 3Å dalam kolom dehidrasi.

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai evaluasi dari perlakuan teknis pada proses fermentasi sampah sayuran dalam menghasilkan laju produksi biogas per harinya, yang kemudian dianalisa penghasilan komposisi gas metana tertingginya. Juga, mengevaluasi proses purifikasi dan dehidrasi biogas dalam menghasilkan efisiensi *overall* yang tinggi dan *load bank* maksimum. Serta memaksimalkan potensi kebermanfaatan sampah sayuran perkotaan dalam menghasilkan sumber daya listrik terbarukan, sebelum akhirnya dijadikan pupuk kompos.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Dasar Pembentukan Biogas dari Bahan Organik

Pengolahan limbah secara biologis dibedakan menjadi dua proses yaitu proses aerobik dan proses anaerobik, pada proses aerobik berlangsungnya proses sangat tergantung dari adanya oksigen, sedangkan dalam proses anaerobik justru sebaliknya karena oksigen menghambat jalannya proses. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.

- Proses aerobik: Bahan organik + O₂ → CO₂ + H₂O + MO baru
- Proses anaerobik : Bahan organik → CO₂ + CH₄

Kelebihan utama yang dimiliki pada proses anaerobik, yaitu:

1. Dihasilkan biogas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.
2. Tidak diperlukan energi untuk aerasi.

Kelebihan dan kekurangan proses anaerob dapat dilihat pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan Proses Anaerob

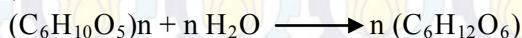
Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Derajat stabilitas tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rate</i> pertumbuhan bakteri methanogenesis rendah
<ul style="list-style-type: none"> • Produk <i>sludge</i> buangan rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Bakteri methanogenesis sangat <i>sensitive</i> terhadap perubahan temperatur
<ul style="list-style-type: none"> • Kebutuhan <i>nutrient</i> rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Pada temperatur operasi <i>thermophilic</i> dibutuhkan energi untuk pemanasan
<ul style="list-style-type: none"> • Dihasilkan gas metana sebagai sumber energi 	
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak dibutuhkan energi untuk aerasi 	

(Sumber: Sughezzo, 2004)

Penguraian bahan – bahan organik menjadi biogas melalui 4 tahapan proses, yaitu:

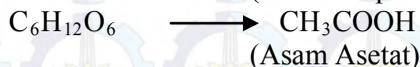
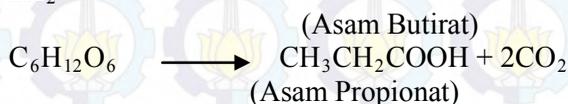
1. Tahap Hidrolisa

Dalam proses ini organisme fermentasi hidrolitik menghidrolisis dan fermentasi bahan organik kompleks seperti protein, poli karbonat, lipid, senyawa organik sederhana (format, asetat, asam lemak propionate, butirir dan lainnya, etanol, dll), hydrogen dan karbon dioksida. Proses ditunjukkan oleh fermentasi glukosa oleh bakteri fermentasi selama 48 jam. Kelompok bakteri pada tahap hidrolisa ini adalah *Streptococci*, *Bacteriodes*, dan beberapa jenis *Enterobacteriaceae*. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah:



2. Tahap Asidifikasi

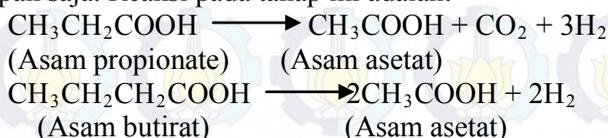
Produk utama fermentasi adalah asetat, hidrogen, karbondioksida, propionat, dan butirir. Propionat dan butirir di fermentasi lebih lanjut menjadi hidrogen, karbondioksida dan asetat yang merupakan pembentukan metana (methanogenesis). pH optimum bagi bakteri asidogenesis adalah 5,2 – 6,5 dengan laju pertumbuhan spesifik 2 ha ri (Solera, 2002). Kelompok bakteri asidifikasi, seperti bakteri asidogen dan *Desulfovibrio*. Reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah:



3. Tahap Asetogenasi

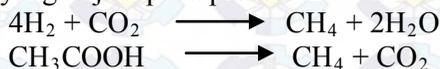
Produk dari tahap asidifikasi yang tidak langsung dikonversi menjadi metana oleh bakteri methanogenik akan dikonversi

menjadi senyawa methanogenik selama proses asetogenesis. Produk yang terbentuk selama asetogenesis disebabkan oleh sejumlah mikroba yang berbeda misalnya *Syntrophobacter wolnii decomposer* propionate dan *Wolfei syntrophomonos* dekomposer butirat dan pembentuk asam lainnya adalah *Clostridium spp*, *Peptococcus anerobus*, *Lactobacillus*, dan *Actinomyces*. Tahap asetogenasi ini juga termasuk pada produksi asetat dari hydrogen dan karbon dioksida oleh asetogen dan homoasetogen. Kadang – kadang tahap asidifikasi dan asetogenasi dikombinasikan sebagai satu tahapan saja. Reaksi pada tahap ini adalah:



4. Tahap Methanogenasi

Proses pada tahap methanogenasi dilaksanakan oleh mikroorganisme kelompok metanogen, yang terbagi dalam dua kelompok, kelompok pertama adalah bakteri yang mengkonversi asam asetat menjadi karbon dioksida dan metana oleh mikroorganisme asetropik, sedangkan kelompok kedua adalah *hydrogen – utilizing* methanogenesis menggunakan hidrogen sebagai elektron dan karbondioksida sebagai elektron aseptor untuk menghasilkan dua kali lipat. pH optimum yang diperlukan 6 – 7 (Solera, 2002). Bakteri yang berperan dalam tahap ini adalah Reaksi yang terjadi pada proses ini adalah:



2.2 Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Karbondioksida termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5,1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78⁰C. Dalam bentuk

padat, karbondioksida disebut *dry ice*. Larutan karbondioksida mengubah warna lakmus dari biru menjadi merah muda.

Gas karbondioksida diproduksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam dan biomassa. Keberadaan karbondioksida pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan karbondioksida yang diizinkan sekitar 1-2% mol.

Adanya karbondioksida yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas karbondioksida. Gas karbondioksida yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas karbondioksida, seperti pada Tabel II.2:

Tabel 2.2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida dalam Proses Industri

Proses	Batas konsentrasi gas karbondioksida
Industri manufaktur	< 0,1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
Pipa gas	< 4% CO ₂
Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ /CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
Pembangkit tenaga listrik IGCC	<0,5% CO ₂
Pembangkit listrik batubara	<1,5% CO ₂

Selain memiliki beberapa efek negatif, karbondioksida juga memiliki nilai ekonomis, diantaranya karbondioksida digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku pada industri urea, industri abu soda.

2.3 Hidrogen Sulfida (H₂S)

Hidrogen sulfide (H₂S) adalah gas yang tidak berwarna, beracun, mudah terbakar dan berbau sangat menyengat. Gas ini dapat timbul dari aktivitas biologis ketika bakteri mengurai bahan organik dalam keadaan tanpa oksigen (aktivitas anaerobik), seperti di rawa dan saluran pembuangan kotoran. Gas ini juga muncul pada gas yang timbul dari aktivitas gunung berapi dan gas alam. Keberadaan gas H₂S pada gas alam dapat menyebabkan korosi pada pipa. Jumlah kandungan H₂S yang diizinkan dalam standar *pipeline* gas yaitu *range* antara 4 – 16 ppmv.

2.4 Air (H₂O)

Air merupakan komponen yang berlimpah di bumi ini. Di alam, air terkandung di dalam *liquid*, *solid*, dan gas. Dalam pemurnian gas, kandungan air dalam gas harus dihilangkan atau dimurnikan agar tidak menyebabkan korosi pada sistem perpipaan. Kadar air maksimum pada *pipeline* gas adalah 4 – 7 lb/MMscf.

2.5 Absorber

Alat yang digunakan dalam proses absorpsi disebut *absorber*. *Absorber* berfungsi untuk memisahkan suatu komponen atau lebih dari campurannya menggunakan prinsip perbedaan kelarutan. Karena perbedaan kelarutan inilah, transfer masa *absorber* digunakan untuk memisahkan suatu *solute* dari arus gas. *Solute* adalah komponen yang dipisahkan dari campurannya sedangkan pelarut (*solvent* sebagai *separating agent*) adalah cairan atau gas yang melarutkan *solute*. Kinerja *absorber* juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Tekanan

2. Laju alir gas
3. Konsentrasi larutan penyerap

Absorban merupakan cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi. Adapun persyaratan absorban antara lain:

a) Kelarutan Gas

Kelarutan gas harus tinggi sehingga dapat meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan kuantitas pelarut yang diperlukan. Umumnya pelarut yang memiliki sifat yang sama dengan bahan terlarut akan lebih mudah dilarutkan. Jika gas larut dengan baik dalam fraksi mol yang sama pada beberapa jenis pelarut, maka dipilih pelarut yang memiliki berat molekul paling kecil agar didapatkan fraksi mol gas terlarut yang lebih besar. Jika terjadi reaksi kimia dalam operasi absorpsi maka umumnya kelarutan akan sangat besar.

b) Volatilitas

Pelarut harus memiliki tekanan uap yang rendah, karena jika gas yang meninggalkan kolom absorpsi jenuh terhadap pelarut maka akan ada banyak pelarut yang terbuang.

c) Korosifitas

Pelarut yang korosif dapat menyebabkan kerusakan pada kolom *absorber*.

d) Harga

Penggunaan pelarut yang mahal dan tidak mudah *direcovery* akan meningkatkan biaya operasi kolom *absorber*.

e) Ketersediaan

Ketersediaan pelarut akan sangat mempengaruhi stabilitas harga pelarut dan biaya operasi secara keseluruhan.

f) Viskositas

Viskositas pelarut yang rendah memiliki kelebihan karena akan terjadi laju absorpsi yang tinggi, meningkatkan karakter *flooding* dalam kolom, jatuh-tekan yang kecil dan sifat perpindahan panas yang baik.

g) Lain-lain

Sebaiknya pelarut tidak memiliki sifat racun, mudah terbakar, stabil secara kimiawi dan memiliki titik beku yang rendah.

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain:

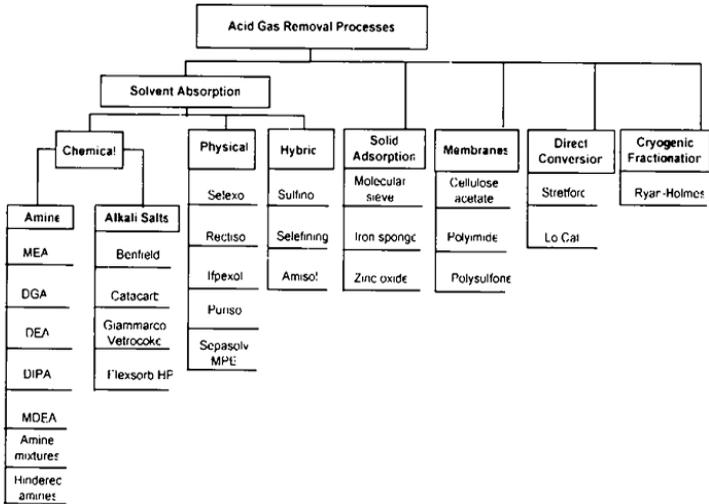
- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk.
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *absorber* adalah keberadaan bahan isian (*packing*). Bahan isian (*packing*) dalam *absorber* berfungsi untuk memperluas bidang kontak di dalam *absorber*. Bahan isian (*packing*) yang digunakan dalam *absorber* dapat terbuat dari bermacam-macam bahan. Syarat-syarat suatu bahan isian yang bisa digunakan adalah sebagai berikut (Mc.Cabe, 1999):

1. Tidak bereaksi dengan fluida dalam *absorber*.
2. Kuat tetapi tidak berat.
3. Memberikan luas kontak yang besar.
4. Murah.
5. Tahan korosi.

2.6 Acid Gas Removal

Pada proses ini gas asam yang dihilangkan adalah CO₂ dan H₂S sebagai produk samping dari reaksi pembentukan biogas. CO₂ bersifat korosif terhadap logam, sedangkan H₂S akan dihilangkan karena bersifat racun serta dapat menyebabkan korosi pada sistem perpipaan. Ada beberapa metode terkini yang sedang dikembangkan ataupun telah dilakukan pengujian kelayakan dalam skala kecil (*Pilot Project*) dan bahkan telah digunakan untuk menghilangkan kandungan CO₂. Beberapa metode tersebut seperti Gambar II.1:



Gambar 2.1 Jenis – Jenis Proses *Acid-Gas Removal*

Dari beberapa metode-metode tersebut, dipilih yang merupakan absorban paling baik, yaitu NaOH. Natrium hidroksida (NaOH), juga dikenal sebagai soda kaustik, soda api, atau sodium hidroksida, adalah sejenis basa logam kaustik. Natrium Hidroksida terbentuk dari oksida basa Natrium Oksida dilarutkan dalam air. Natrium hidroksida membentuk larutan alkalin yang kuat ketika dilarutkan ke dalam air. Ia digunakan di berbagai macam bidang industri, seperti absorpsi pada proses pengolahan gas. Natrium hidroksida bersifat lembap cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas.

2.7 Dehidrasi

Pada tahap ini biogas yang dihasilkan akan dihilangkan kadar airnya agar gas metana yang dihasilkan memiliki kemurnian yang optimum sehingga tidak diperlukan proses lanjutan. Ada beberapa metode yang digunakan untuk memisahkan uap air dari kandungan *feed* gas yaitu:

1. Absorpsi

Metode ini dapat mengurangi kadar uap air pada gas alam dapat hingga 10 ppm. Pelarut yang banyak digunakan untuk penghilangan H₂O pada proses ini adalah *glycol*, seperti *ethylene glycol* (EG), *diethylene glycol* (DEG), *Triethylene glycol* (TEG), *tetraethylene glycol* (TREG) dan *propylene glycol* (PG). Oleh karena itu proses ini tidak dapat diaplikasikan pada pengolahan gas alam menjadi LNG. Proses ini cenderung menyebabkan korosi karena oksigen bereaksi dengan *glycol*. Selain itu dapat meningkatkan potensi *foaming* pada produk.

Tabel 2.3 *Glycol* untuk Dehidrasi

Nama	Rumus Kimia	Temperatur Regenerasi Max (°C)
<i>Ethylene glycol</i> (EG)	C ₂ H ₆ O ₂	-
<i>Diethylene glycol</i> (DEG)	C ₄ H ₁₀ O ₃	160
<i>Triethylene glycol</i> (TEG)	C ₆ H ₁₄ O ₄	180
<i>Tetraethylene glycol</i> (TREG)	C ₈ H ₁₈ O ₅	200
<i>Propylene glycol</i>	C ₃ H ₈ O ₂	-

(Sumber: *Fundamental of Natural gas processing*)

2. Adsorpsi

Beberapa zat padat dapat digunakan sebagai adsorben padat dalam dehidrasi gas alam. Beberapa adsorben padat ini dapat menghilangkan air sampai kadar air menjadi di bawah 10 ppm. Karena itu sering digunakan dalam dehidrasi gas alam sebelum proses pencairan. Pada saat ini terdapat beberapa

adsorben padat komersial yang dapat digunakan untuk dehidrasi gas, di antaranya:

a. Alumina (Al_2O_3)

Alumina dapat menghasilkan gas dengan titik embun di bawah -1000 F tetapi memerlukan panas yang lebih besar dalam regenerasinya dibandingkan dengan lainnya. Selain itu, cenderung mengadsorb hidrokarbon yang sulit dibebaskan lagi pada proses regenerasi. Alumina bersifat basa sehingga tidak tahan terhadap asam. Dan Alumina ini merupakan bahan yang mahal, dan menghasilkan gas dengan kadar air di bawah 10 ppm.

Tabel 2.4 Sifat *Activated Alumina*

Properti	Nilai
<i>Bulk Density</i>	38-42 lb/ft ³ (granul) 54-58 lb/ft ³ (pellet)
<i>Heat Capacity</i>	0.21-0.25 BTU/lb°F
<i>Pore Volume</i>	0.29-0.37 cm ³ /g
<i>Surface Area</i>	210-360 m ² /g
<i>Average Pore Diameter</i>	18-48 Å
<i>Regeneration Temperature (steaming)</i>	200-250 °C
<i>Maximum Allowable Temperature</i>	500 °C

(Sumber: *Fundamental of Natural gas processing*)

b. Silika gel (SiO_2)

Silika gel adalah bahan pengikat yang dapat menghasilkan gas dengan kadar air di bawah 10 ppm. Kedua bahan ini lebih mudah diregenerasi, dan juga cenderung mengadsorb hidrokarbon tetapi mudah dibebaskannya kembali pada proses regenerasi. bahan ini

bersifat asam sehingga dapat bereaksi dengan amoniak, soda kostik dan basa lainnya. Selain itu silica gel ini akan retak dan pecah jika kena cairan.

Tabel 2.5 Sifat Silika Gel

Properti	Nilai
<i>Bulk Density</i>	44-56 lb/ft ³
<i>Heat Capacity</i>	0.22-0.26 BTU/lb ^o F
<i>Pore Volume</i>	0.37 cm ³ /g
<i>Surface Area</i>	750 m ² /g
<i>Average Pore Diameter</i>	22 Å
<i>Regeneration Temperature (steaming)</i>	120-250 °C
<i>Maximum Allowable Temperature</i>	400 °C

(Sumber: *Fundamental of Natural gas processing*)

c. Molecular sieves

Molekular Sieve terbuat dari alkali-aluminat yang berbentuk kristalin yang dapat menghasilkan gas dengan kadar air di bawah 1 ppm. Dengan ukuran tertentu *molekular sieve* ini tidak mengadsorb hidrokarbon, tetapi memerlukan temperatur yang tinggi dalam reaktivasi. *Molekular sieve* bersifat basa karena itu tidak tahan terhadap asam. Meskipun *molekular sieve* ini *relative* mahal namun dapat dilakukan proses regenerasi.

Tabel 2.6 Sifat *Molecular Sieves*

	<i>Anhydrous Sodium Aluminosilicate</i>	<i>Anhydrous Calcium Aluminosilicate</i>	<i>Anhydrous Aluminosilicate</i>
Tipe	3Å	5Å	13X
Density in bulk (lb/ft³)	44	44	38
Specific Heat (BTU/lb°F)	0.19	0.19	-
Effective Diameter of Pore (Å)	3	5	13
Regeneration Temperature (°C)	200-300	200-300	200-300
Maximum Allowable Temperature (°C)	600	600	600

(Sumber: *Fundamental of Natural gas processing*)

2.8 Load Bank Test

Load Bank dipakai sebagai alat simulasi dan penguji seberapa besar kemampuan suatu pembangkit listrik seperti *diesel* genset, gas genset, *turbine* maupun berbagai macam pembangkit dan sejenisnya beserta kelengkapannya. *Load bank* dipergunakan dalam menguji kemampuan suatu generator baik itu generator baru maupun generator bekas, generator baru belum tentu memiliki kemampuan seperti yang tertera dalam katalog maupun

brosur-brosurnya, *test report* yang terlampir dari perusahaan perakit belum tentu sesuai dengan kondisi saat generator terinstal, ada berbagai aspek yang bisa menyebabkan kondisi *performance engine* generator berubah.

Untuk itu perlu alat uji yang akurat yaitu *load bank test*, yang bisa memberikan data lengkap tentang kondisi *performance* dari generator, Bisa dilakukan *test* dengan beban *smooth* maupun ekstrim untuk melihat seberapa bagus *response* generator terhadap berbagai karakter beban.

2.9 Penelitian Terdahulu yang Bersangkutan

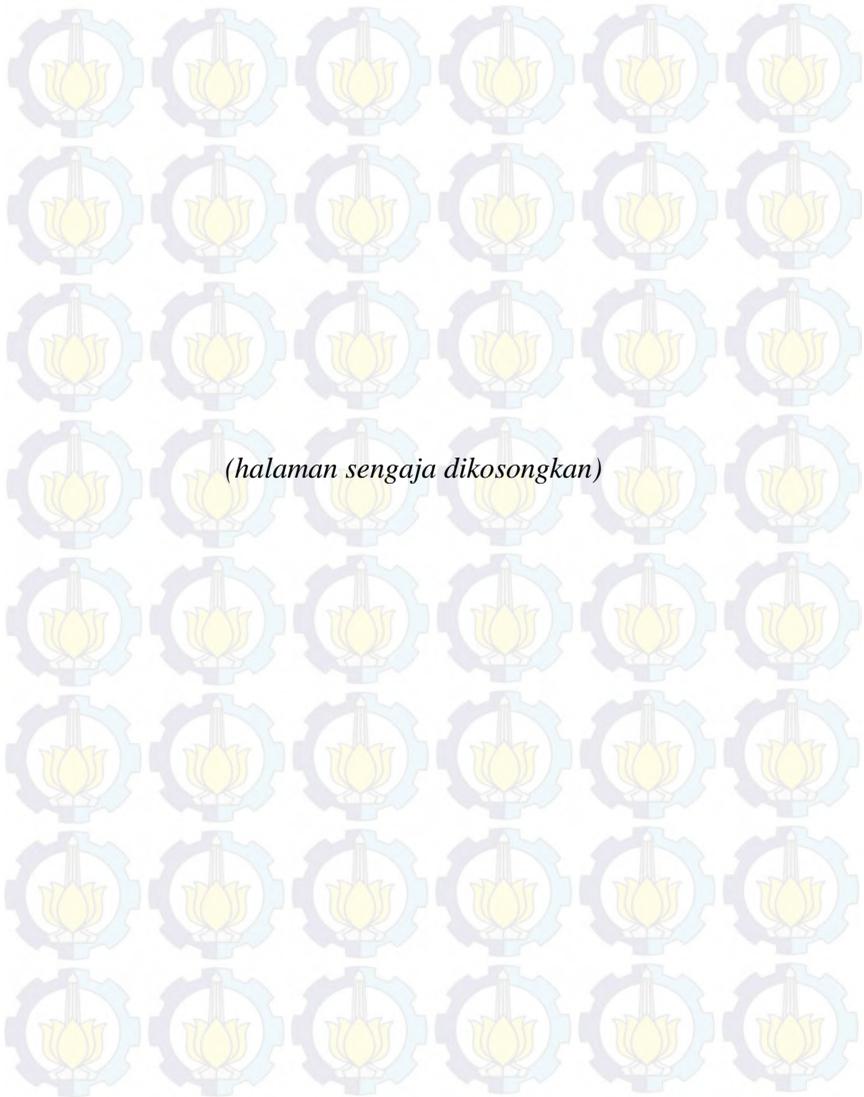
Berikut adalah penelitian terdahulu mengenai purifikasi biogas dan generasi listrik:

Tabel 2.7 Daftar Peneliti Biogas

No	Nama Penulis	Judul	Hasil yang Diperoleh
1	Herawati, Arif Wibawa, Fitriyawati, 2014	<i>The Impact of Solvent of Absorption CO₂ from Biogas Vinasse</i>	Mendapatkan hasil bahwa larutan NaOH dan KOH dapat menghilangkan kadar CO ₂ sebanyak 100% dari biogas yang diproduksi pada hari ke -7. Absornam NaOH merupakan absorban terbaik untuk meningkatkan kadar CH ₄ yaitu dari 55,377 % menjadi 82,53% volume pada minggu kelima produksi biogas
2	Huertos, Giraldo dan Izquierdo, 2011	<i>Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine</i>	Mendapatkan hasil bahwa MEA dan DEA dapat menurunkan kadar H ₂ S adalah 98%

		<i>Absorption</i>	menjadi 95% dan untuk CO ₂ adalah 87% menjadi 50%.
3	Himabindu dan Ravikrishna, 2013	<i>Performance Assessment of a Small Biogas – fuelled Power Generator Prototype</i>	Mendapatkan hasil pengaruh kecepatan mesin terhadap efisiensi <i>gas engine</i> menggunakan <i>load bank test</i> , didapatkan nilai pada 3000 rpm dengan berbagai beban untuk mencapai <i>overall</i> efisiensi optimum.
4	Achmad Warid Dio P. dan Nimrod Alvino Sinaga, 2014	Peningkatan Kualitas Biogas melalui Absorpsi Gas CO ₂ dan H ₂ S Menggunakan Larutan Alkali dan Garamnya Sebagai Absorban	Mendapatkan hasil bahwa larutan NaOH memiliki waktu untuk mencapai kondisi jenuh paling lama dan persen <i>recovery</i> paling besar yaitu K ₂ CO ₃ serta larutan absorben yang paling efisien digunakan untuk absorpsi kandungan gas CO ₂ dan H ₂ S di dalam biogas adalah Ca(OH) ₂ .

5	Rahayaan, Bobby Rama Jaya dan Ardhiya, 2015	Pengaruh Proses <i>Acid Gas Removal</i> dan Dehidrasi Terhadap Efisiensi <i>Overall</i> Mesin Konversi Biogas- Listrik	Mendapatkan hasil bahwa larutan NaOH merupakan absorban yang paling optimum dan absorban K ₂ CO ₃ memiliki efisiensi <i>overall</i> tertinggi dengan nilai 5,64%.
6	Soewarno, Nonot, Ali Altway, dan Gede Wibawa. 2009	Pemanfaat Sampah Kota Menjadi Energi Terbarukan Biogas dengan Fermentasi Secara Anaerobik	Mendapatkan hasil bahwa semakin rendah konsentrasi padatan maka semakin tinggi produktifitas volume gas per kg sampah dan penambahan urea untuk konsentrasi padatan yang semakin tinggi dapat meningkatkan produktifitas biogas yang dihasilkan.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui daya listrik optimum yang dihasilkan biogas terpurifikasi dari gas asam yang berasal dari proses fermentasi anaerobik sampah sayuran sisa di Pasar Keputran, Surabaya. Proses pemurnian menggunakan sistem absorpsi kimiawi dengan alkali (NaOH), serta dehidrasi menggunakan *molecular sieve* 3Å. Purifikasi dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran biogas sebagai umpan generator listrik dengan pengujian daya listrik optimumnya menggunakan *load bank test*.

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

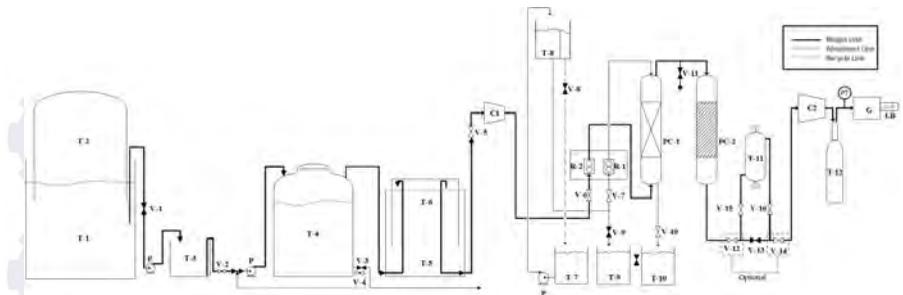
3.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Sampah Sayuran Pasar Keputran, Surabaya.
2. Biogas
3. Natrium Hidroksida (NaOH)
4. *Aquadest*
5. *Molecular sieve* 3Å

3.2.2 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini, digunakan tanki *digester* 1100L dengan *gas holder* bervolume 650L, satu buah *packed column reactor* untuk *acid gas removal* yang diisi dengan *raschig ring* serta dilengkapi dengan tangki umpan larutan absorban dan tangki *overflow*, satu buah *packed column reactor* untuk *gas dehydration* yang diisi dengan *molecular sieve* 3Å, kompresor, pompa, *valve*, *rotameter* gas dan liquid, tangki penampung gas dan liquid, *gas generator*, dan *load bank test*. Skema peralatan penelitian yang sistematis dapat dilihat pada Gambar III.1:



Gambar 3.1 Skema Peralatan Penelitian

Keterangan :

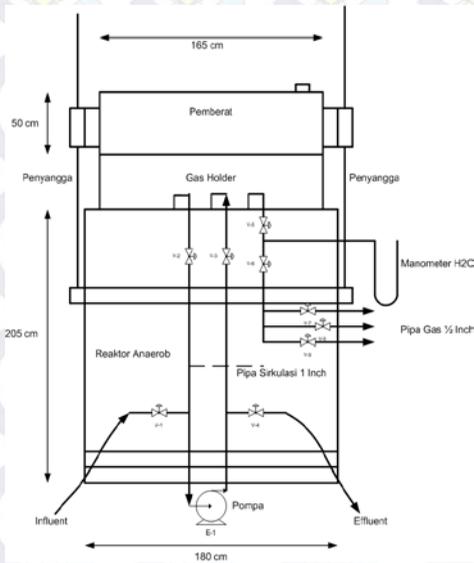
- T-1 = Tangki penyiapan *starter* (5000L)
- T-2 = *Gas holder* penampung biogas *starter* (4500L)
- T-3 = Tangki pencampuran sampah organik + air (60 L)
- T-4 = Tangki *digester* (1100L)
- T-5&6 = Tangki penampung gasbio (650 L)
- T-7 = Tangki penampung larutan absorbant (15 L)
- T-8 = Tangki *overflow* larutan absorbant (15 L)
- T-9 = Tangki penampung drainase absorbant (15 L)
- T-10 = Tangki pembuangan absorbant hasil absorpsi (15 L)
- T-11 = Tangki penampung sementara *treated* biogas sebelum dikompresi
- T-12 = Tangki penampung *treated* biogas setelah dikompresi
- V-1 = Kran aliran *supernatant* ke tangki *digester* 1100L (*normally closed*)
- V-2 = Kran aliran *feed* ke T-2
- V-3 = Kran drainase T-2
- V-4 = Kran *recycle* T-2
- V-5 = Kran aliran biogas menuju *booster* kompresor
- V-6 = Kran aliran biogas ke *packed column*
- V-7 = Kran aliran larutan absorbant menuju *packed column*
- V-8 = Kran aliran *recycle* absorbant (*normally closed*)
- V-9 = Kran drainase aliran absorbant pada T-4 (*normally closed*)
- V-10 = Kran aliran buangan absorbant hasil absorpsi

- V-11 = Kran *sampling* biogas setelah proses *acid gas removal* (*normally closed*)
- V-12 = Kran aliran *treated* biogas menuju T-9 dan V-12 (*optional*)
- V-13 = Kran pengatur inlet T-9 dan C-2
- V-14 = Kran aliran *treated* biogas menuju C-2 (*optional*)
- V-15 = Kran *inlet treated* biogas menuju T-9
- V-16 = Kran *outlet treated* biogas menuju C-2
- R-1 = *Rotameter* larutan absorban ke *packed column* (45 L/jam)
- R-2 = *Rotameter* biogas ke *packed column* (25 L/min)
- C-1 = *Booster* kompresor biogas menuju *packed column* (0.22 atm gauge)
- C-2 = kompresor *treated biogas* menuju T-10 (250 psi)
- PC-1 = *Packed column* untuk *acid gas removal* (D = 7 cm, L = 150 cm, $L_{\text{packing}} = 60$ cm)
- PC-2 = *Packed column* untuk *gas dehydration* (D = 6 cm, L = 150 cm, $L_{\text{packing}} = 10$ cm)
- P = Pompa (300 watt)
- G = *Gas generator* (800 Watt)
- LB = *Load bank* (10 slot terminal listrik dengan lampu bohlam 50 W)
- PT = Pressure Transmitter
- TT = Temperature Transmitter

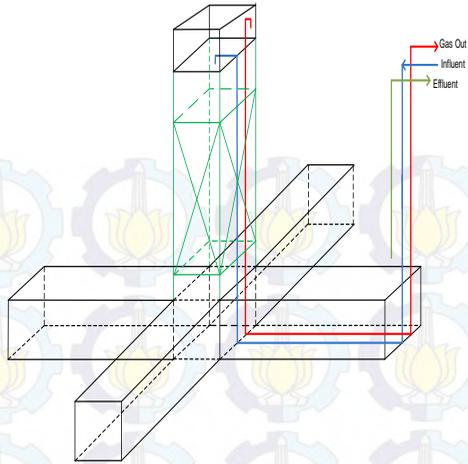
3.2.3 Skema Reaktor Biogas dan Alat Penelitian



Gambar 3.2 Reaktor Biogas Tangki Penyiapan Starter 5000 L (a) dan Bagian Dalam Reaktor (b)



Gambar 3.3 Skema Reaktor *Digester Starter* 5000 L



Gambar 3.4 Skema Bagian Dalam Reaktor

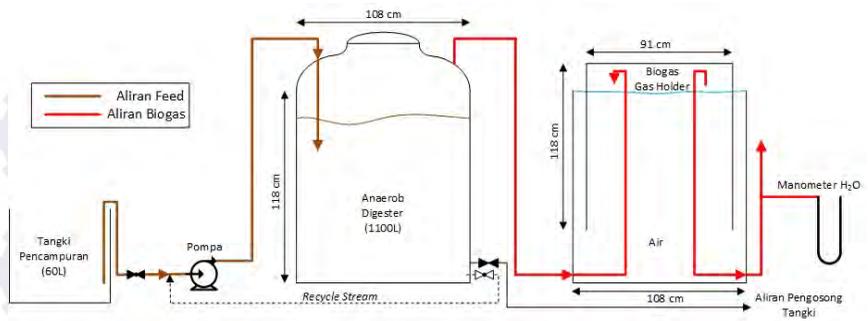


a)



b)

Gambar 3.5 Reaktor Biogas 1100L (a) dan Gas Holder 650L (b)



Gambar 3.6 Skema Reaktor Biogas 1100 L



(a)



(b)

Gambar 3.7 Gambar Alat Pencacah Sampah Sayuran (a) dan Motor Penggerak (b)



a)



b)

Gambar 3.8 Gambar Alat Penelitian Tampak Depan (a) dan Tampak Belakang (b)

3.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada =

1. Tekanan operasi = 760 mmHg (atmosferik)
2. Suhu = 28 – 32 °C
3. *Feed* = Sampah sayuran Pasar Keputran, Surabaya, yang terdiri dari campuran sayuran selada, sawi, kubis, dan timun.

Adapun variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah :

- Variabel tetap:

1. Jumlah sampah sayuran = 75 kg
2. Fraksi sampah sayuran = 7,65%

- Variabel bebas:
 1. Rasio *Rate* larutan absorban: *rate* biogas = 1:12,5; 1:18,75; 1: 25
 2. Konsentrasi NaOH = 0,1 N; 0,3 N; dan 0,5 N
 3. *Load Bank Test*
 - a. 12,5 % maximum *Load*
 - b. 25% maximum *Load*
 - c. 37,5% maximum *Load*
 - d. 50% maximum *Load*
 - e. 62,5% maximum *Load*
 - f. 75% maximum *Load*
 - g. 87,5% maximum *Load*
 - h. 100% maximum *Load*

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian

3.4.1.1 Tahap Persiapan *Starter Reaktor Digester Anaerob* 1100L

- a. Melarutkan 600 kg kotoran sapi menggunakan air PDAM dengan perbandingan rasio massa kotoran sapi : air = 1 : 1,5. Pelarutan ditambahkan dengan 2500 gram urea.
- b. Sirkulasi setiap hari selama 1,5 jam dengan menggunakan pompa air SHIMIZU Model PC-260 BIT.
- c. Mengamati biogas yang terproduksi selama persiapan *starter* sampai menghasilkan komposisi gas metan yang cukup untuk bisa terbakar.
- d. Setelah biogas dapat terbakar, memompa air *supernatant* hasil pengenceran kotoran sapi sebanyak 880L ke dalam tangki reaktor *digester* anaerob 1100L.
- e. Mengamati *rate* produksi gas yang dihasilkan di dalam reaktor *digester* anaerob 1100L.

3.4.1.2 Tahap Persiapan *Feed* Reaktor *Digester Anaerob* 1100L

- a. *Feed* yang digunakan pada penelitian ini adalah sampah sayuran dengan jenis sayurnya selada, sawi, kol dan timun. Sampah sayuran diperkecil ukurannya dengan menggunakan mesin pencacah sebanyak 75 kg dengan rasio massa sampah sayuran:air = 3:1.
- b. Memasukkan *feed* yang telah tercacah kedalam tangki *digester* 1100L.
- c. Menyirkulasi setiap hari selama 1 jam dengan menggunakan pompa air.
- d. Mencatat *rate* produksi biogas per hari, serta pH dan temperatur di dalam tangki *digester*.
- e. Mengamati biogas yang terproduksi oleh sampah sayuran sampai menghasilkan komposisi gas metan yang cukup untuk bisa terbakar.
- f. Setelah biogas dapat terbakar, biogas ditampung selama beberapa waktu sampai volume yang mencukupi untuk proses *acid gas removal* dan dehidrasi.
- g. Mempersiapkan peralatan penelitian.

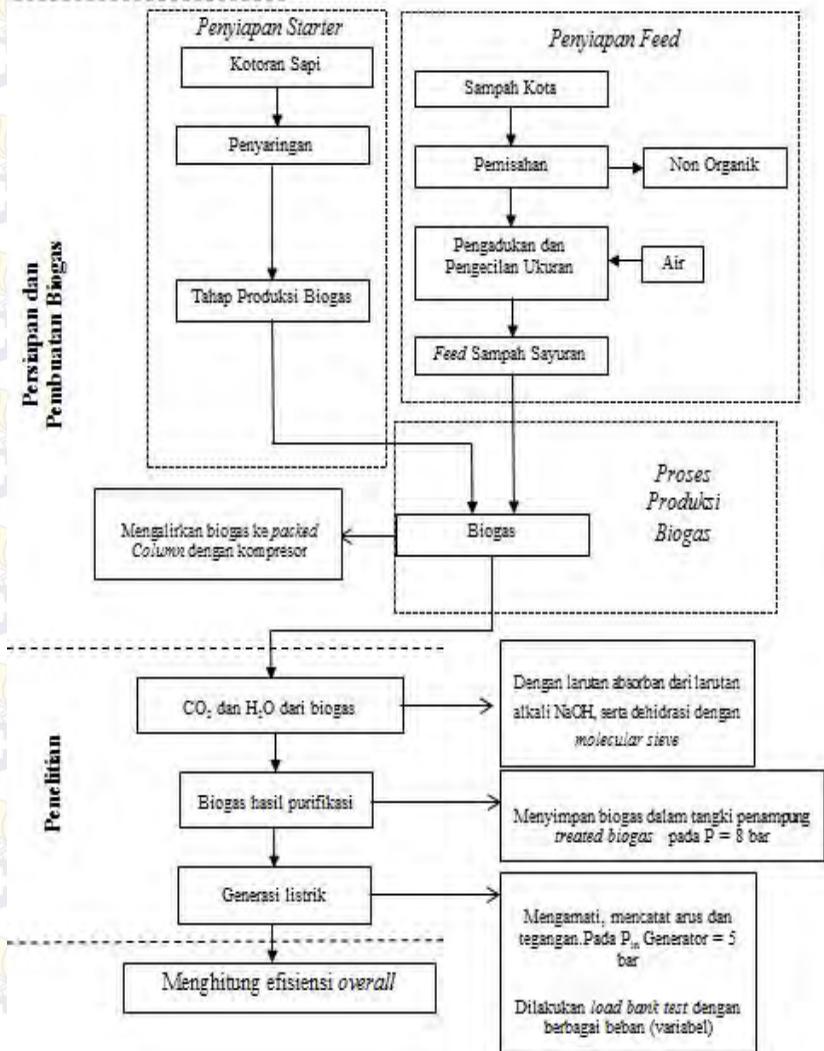
3.4.2 Tahap pelaksanaan penelitian

- a. Mengisi tangki penampung larutan absorban (*T-5*) dengan 40 L larutan NaOH sebagai absorban 0.5 N.
- b. Mengalirkan larutan absorban menuju tangki *overflow* larutan absorban (*T-8*) dengan menyalakan *power* pada pompa (*P*) dan membuka *V-7*.
- c. Mengalirkan larutan absorban ke dalam *packed column* (*PC-1*) dengan membuka *V-7* untuk laju alir 0.4 L/min pada pembacaan rotameter (*R-1*) dan menutup *V-9*, tunggu hingga larutan absorban keluar dari dasar *packed column* menuju tangki pembuangan absorban hasil absorpsi (*T-10*).
- d. Mengalirkan biogas dari *gas holder* (*T-6*) dengan membuka *V-5* yang terhubung dengan *booster compressor* (*C-1*) dan membuka *V-6* untuk mengatur laju alir pada rotameter (*R-1*)

- sesuai dengan variabel L/G yang diinginkan, kemudian biogas dialirkan menuju *packed column (PC-1)* hingga biogas dan larutan absorbans berkontak pada *raschig ring*.
- e. Biogas yang keluar dari *packed column (PC-1)* mengalir menuju *packed column (PC-2)* dengan menutup *V-8* hingga biogas berkontak dengan molecular sieve dan keluar dari *packed column (PC-2)*.
 - f. Mengalirkan biogas yang telah terpurifikasi ke tangki penampung sementara (*T-11*) dengan membuka *V-12*, *V-13* dan *V-16* serta menutup *V-14* dan *V-15*. Selama 5 menit.
 - g. Menyampling biogas yang telah terpurifikasi dengan cara membuka *V-15* setelah 5 menit terjadi proses adsorpsi dan adsorpsi biogas.
 - h. Mengulangi dari poin a.) untuk berbagai jenis variabel normalitas NaOH.
 - i. Setelah menampung biogas yang telah terpurifikasi selama 40 menit pada tangki penampung sementara (*T-11*), biogas tersebut dikompresi sebesar 8 bar menggunakan kompresor (*C-2*) menuju Tangki penampung *treated* biogas (*T-12*) dengan membuka *V-15* dan *V-16*.
 - j. Mengalirkan biogas yang sudah dikompresi menjadi 8 bar di dalam Tangki penampung *treated* biogas (*T-10*) menuju gas generator (*G*).
 - k. Menyalakan gas generator dengan menarik tuas yang ada pada generator listrik.
 - l. Menaikkan pressure pada regulator tangki penampung *treated* biogas (*T-10*) hingga 5 bar.
 - m. Mengamati dan mencatat tegangan dan arus pada *load bank test* menggunakan clamp meter dengan berbagai macam beban (variabel) dan melihat pengurangan tekanan pada regulator tangki.
 - n. Setelah selesai percobaan, mematikan *power* pada pompa dan kompresor (*C-1* dan *C-2*), menutup *V-5* dan *V-6* untuk menutup aliran biogas, membuka *V-9* untuk membuang

absorban yang terdapat pada tangki *overflow*, dan membuang larutan sisa absorban pada T-7, T-9, T-10

3.5 Diagram Alir Penelitian



3.6 Analisa Hasil

3.6.1 Kromatografi Gas

Kromatografi gas adalah proses pemisahan campuran menjadi komponen – komponen dengan menggunakan gas sebagai fase bergerak yang melewati suatu lapisan serapan yang diam. Seluruh bentuk kromatografi terdiri atas fase diam dan fase gerak. Sebagaimana dalam fase gas – cair, kromatografi gas fase gerak dan fase diamnya antara lain :

- Fase gerak adalah gas dan zat terlarut terpisah sebagai uap. Pemisahan tercapai dengan partisi sampel antara fase gas bergerak.
- Fase diam berupa cairan dengan titik didih tinggi (tidak mudah menguap) yang terikat pada zat padat penunjangnya.

Pada dasarnya, proses kromatografi gas adalah memisahkan komponen dari campuran berdasarkan titik didih pada skala yang sangat kecil (*microscale*).

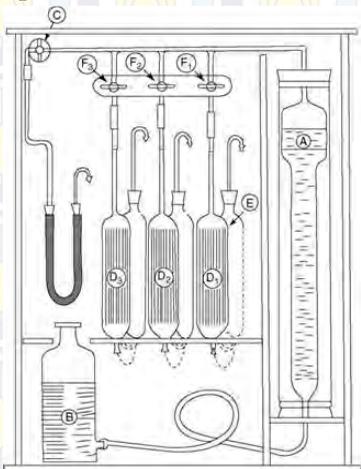
Keuntungan pada analisa kromatografi gas diantaranya adalah proses analisa yang cepat, efisien (resolusinya tinggi), sensitif, analisa kuantitatif dengan akurasi yang tinggi, dan tidak mahal. Adapun kerugian pada analisa kromatografi gas ini adalah terbatas pada sampel – sampel yang mudah menguap dan cukup sulit untuk preparasi sampel dalam jumlah besar.



Gambar 3.9 Analisa Kromatografi Gas (GC – 7900)

3.6.2 Analisa Orsat

Untuk menganalisa gas buang yang terdiri dari CO_2 , O_2 , dan CO , diperlukan alat orsat dengan tiga botol penyerap sedang, untuk contoh gas yang mengandung CH_4 dan H_2 diperlukan tambahan botol penyerap dan sistem pembakaran. Agar volum komponen gas terserap langsung dapat terbaca dalam persen, maka kapasitas buret harus 100 mL. Prinsip analisa orsat ini adalah menyerap komponen gas secara bergantian melalui penyerap yang hanya dapat menyerap komponen gas tertentu. Berkurangnya volum gas setelah proses penyerapan pada tekanan dan suhu tetap merupakan ukuran komponen gas yang bersangkutan. Alat analisa orsat ini dapat dibuat dalam berbagai macam konstruksi, namun tetap mempunyai prinsip yang sama. Gas CO_2 biasanya diserap dengan larutan KOH , gas O_2 diserap dengan larutan pirogalol, dan gas CO diserap dengan larutan kuprokhlorida.



a)

b)

Gambar 3.10 Gambar Skema Analisa Orsat (a) dan Analisa Orsat yang Digunakan (b)



(halaman sengaja dikosongkan)

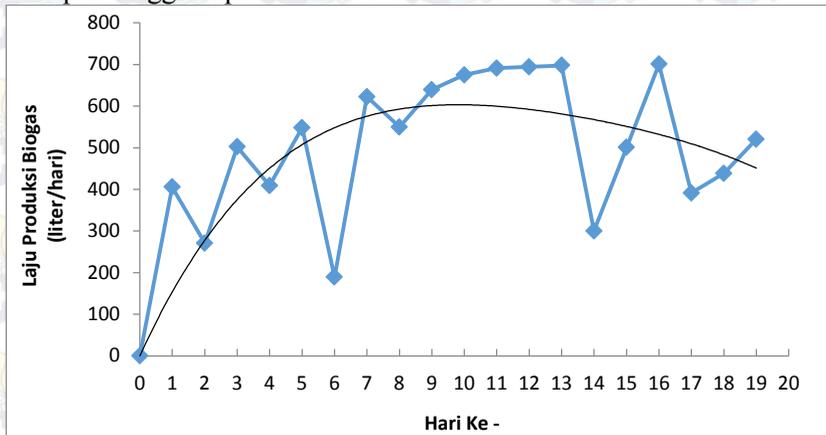
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Persiapan *Feed* dan *Starter*

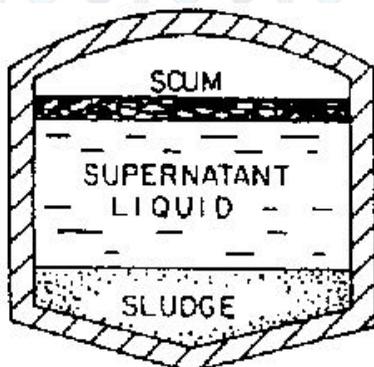
4.1.1 Persiapan Kotoran Sapi sebagai *Starter* pada Tangki *Digester* 5000L

Kotoran sapi (KS) yang masih baru diambil dari peternakan belakang Bengkel Sinar Agung di Jl. Kaliwaron, Surabaya. Kotoran sapi yang digunakan sebagai *starter* sebanyak 600kg yang diencerkan dengan menggunakan air PDAM (m/m KS:Air = 1:1,5). Pencampuran KS juga ditambahkan dengan pelarutan urea sebanyak 2,5kg untuk menjaga rasio perbandingan C/N=25. Penambahan urea untuk menurunkan nilai C/N rasio karena apabila terlalu besar dapat mempengaruhi bakteri metanogen lebih cenderung menghasilkan amoniak dibanding gas metana. Campuran KS kemudian dimasukkan ke dalam tangki *digester* ukuran 5000L yang setiap harinya gas yang terproduksi diamati hasilnya hingga menghasilkan gas metana dengan komposisi yang cukup sehingga dapat terbakar.



Gambar 4.1 Laju Produksi Kotoran Sapi Sebagai Starter

Pengenceran KS dengan air ini memerlukan 15 hari sampai akhirnya biogas dapat terbakar. Setiap harinya, campuran pengenceran KS setiap harinya disirkulasi selama 1,5 jam dengan pompa air SHIMIZU Model PC-260 BIT. Larutan *supernatant* hasil dari pengenceran KS selanjutnya dipompa ke dalam tangki *digester* 1100L (volume *liquid* = 880L) untuk dijadikan sebagai *starter*.



Gambar 4.2 Lapisan-lapisan di Dalam Tangki Digester

Sirkulasi dengan menggunakan pompa air bertujuan sebagai pengganti pengadukan bila tanpa adanya *propeller* di dalam tangki *digester*. Penentuan waktu sirkulasi selama 1 jam adalah dengan merata-ratakan laju alir maksimum dan minimum dari tipe pompa air SHIMIZU Model PC-260 BIT, yang kemudian membagi volume aktif tangki *digester* dengan nilai rata-rata laju alir tersebut. Pengenceran sebanyak 600kg KS bertujuan untuk memenuhi kebutuh larutan *supernatant* yang selanjutnya akan menjadi larutan pengencer serta pembawa bakteri-bakteri pemventuk biogas bagi sampah sayuran di dalam tangki *digester* 1100L.

4.1.2 Persiapan dan Kondisi Awal *Feed* Sampah Sayuran

Produksi biogas dari sampah sayuran Pasar Keputran, Surabaya, memerlukan sampah sayuran sebanyak 75 kg. Setelah pencacahan dan pencampuran dengan air (rasio m/m sampah sayuran:air = 3:1) memiliki data sebagai berikut:

Tabel 4.1 Kadar COD Awal Sampah Sayuran setelah Pencacahan, *Starter*, setelah pencampuran, dan setelah 20 hari fermentasi

	Cacahan Sampah Sayuran	Cairan <i>Supernatant</i> (<i>Starter</i>)	Campuran Sampah Sayuran - <i>Starter</i>	Setelah 20 hari fermentasi
COD (mg/l)	21.200	400	2.522,4	2.160

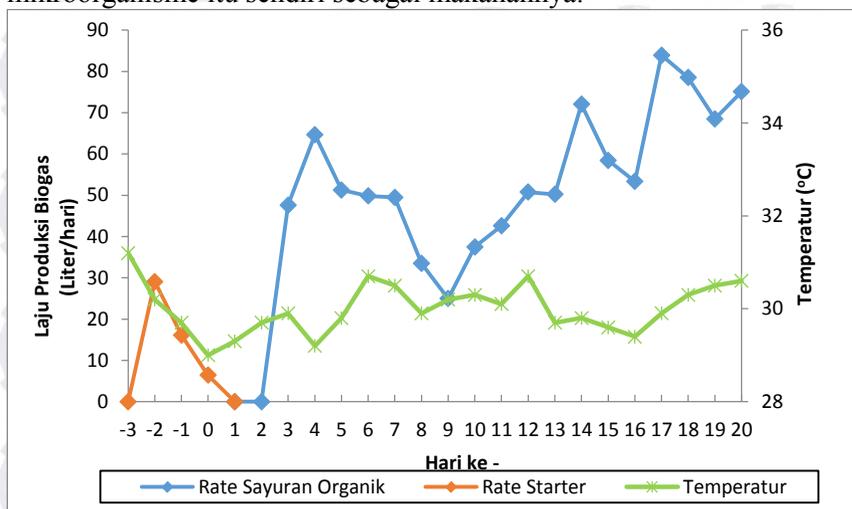
Pencacahan dilakukan dengan menggunakan mesin penggiling yang digerakan dengan motor bensin. Pencacahan dan penggilingan dilakukan secara berulang hingga kondisi feed berbentuk seperti *slurry*. Pencacahan dilakukan untuk memecah lignin yang menghalangi bakteri-bakteri pembentuk biogas untuk memfermentasi sampah sayuran. Cacahan sampah sayuran kemudian dicampur dengan cairan *supernatant* sebagai dari tangki 5000L. Menganalisa kadar COD bertujuan untuk mengetahui potensi volume gas yang dihasilkan per satuan massa COD.

4.2 Proses Produksi Biogas pada Tangki *Digester* 1100L

Cacahan sampah sayuran yang telah dimasukkan ke dalam tangki 1100L dan tercampur dengan larutan *supernatant*, disirkulasi dengan pompa air SHIMIZU Model PC-260 BIT selama 1 jam. Sirkulasi dilakukan sebagai pengganti dari pengadukan yang bertujuan menjaga keseragaman dari campuran sampah sayuran dengan larutan *supernatant*.

Larutan *starter* yang telah dimasukkan ke dalam tangki *digester* 1100L sebelumnya dipantau terlebih dahulu produksi gas

per harinya guna melihat produktifitas dari starter tersebut. Produksi biogas mengalami penurunan sampai akhirnya sampah sayuran dimasukan. Penurunan laju produksi biogas sebelum memasukan sampah organik disebabkan kandungan substrat yang semakin berkurang di cairan *starter* karena kebutuhan dari mikroorganisme itu sendiri sebagai makanannya.



Gambar 4.3 Grafik Laju Produksi Biogas Sampah Sayuran Fraksi Solid 7,65%

Larutan *supernatant* sebagai *starter* yang digunakan adalah larutan yang dimana fase pertumbuhan bakteri terjadi dalam fase *log*. Tujuan menjadikan larutan *supernatant* ini menjadi *starter* adalah karena kondisi dari pertumbuhan bakteri yang optimum dan saat yang tepat untuk bakteri beradaptasi dengan kondisi *feed* baru, sampah sayuran dari sebelumnya kotoran sapi.

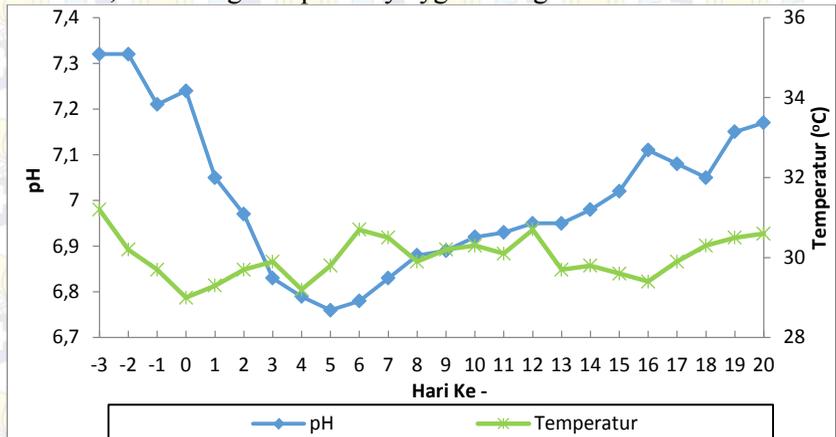
Di hari ke-1 dan ke-2 kran *gas holder* dibuka untuk membuang gas yang tersisa yang masih terproduksi karena pengaruh substrat tersisa dari *starter*. Pada hari ke-4 sampai 7 mengalami penurunan produktifitas dari produksi biogas disebabkan adanya perubahan jenis pompa sirkulasi dari pompa bensin dengan laju alir yang lebih besar dibanding dengan pompa

air SHIMIZU Model PC-260 BIT. Dimana kecepatan laju alir pompa dapat dianalogikan sebagai kecepatan rotasi dengan pengaduk. Dimana tujuan pengadukan, selain penyeragaman dari konsentrasi di dalam tangki *digester*, adalah me-*release* gas yang mungkin terperangkap oleh lapisan *scum*. Pengukuran biogas dilakukan pada hari ke-19 untuk mendapatkan komposisi dari biogas yang dihasilkan.

Tabel 4.2 Kadar Biogas Awal dari Sampah Sayuran Tanpa Purifikasi

Komponen	Kadar (%volume)
CH ₄	52,54
CO ₂	17,6
O ₂ , N ₂ , H ₂ O, dan H ₂ S	29,86

Biogas dengan komposisi dari masing-masing komponen seperti pada tabel IV.4 dapat menurunkan nilai kalornya sebesar 14,80 MJ/Nm³, dibanding komposisinya yg murni gas metana.



Gambar 4.4 Grafik Perubahan pH dan Temperatur Tangki Digester 1100L

Selama produksi biogas setiap harinya temperatur di dalam digester cenderung konstan, namun pH sempat mengalami penurunan diawal pemasukan dari *feed* sampah sayuran yang disebabkan proses pembentukan gas metan sedang berada di tahap pengasaman. Dimana glukosa diurai oleh bakteri membentuk asam laktat, asam butirat, atau etanol.

Setelah 20 hari dari *feed* sampah sayuran dimasukan, COD di dalam tangki digester diukur kembali dan didapati produksi biogas/gCOD *removal* adalah sebesar 2,79L/gCOD *removal*. Dengan volume total aktif dari tangki *digester* 1100L sebesar 880L.

4.3 Proses Purifikasi dan Dehidrasi Biogas

Purifikasi bertujuan meningkatkan kualitas biogas melalui absorpsi gas CO₂ dan H₂S (*acid gas removal*) menggunakan larutan alkali NaOH, serta adsorpsi H₂O (dehidrasi) menggunakan *molecular sieve* 3Å terhadap efisiensi *overall* generator listrik dan untuk mengetahui efisiensi *overall* tertinggi dari berbagai macam beban (12,5%, 25%, 37,5%, 50%, 62,5%, 75%, 87,5%, dan 100%) pada *load bank test*. Pada proses *acid gas removal*, didalam *packed column*, biogas dialirkan dari bawah menuju atas dan absorban dialirkan dari atas menuju bawah (*counter – current*) kemudian berkontak pada *raschig ring*, Sedangkan untuk proses dehidrasi, biogas akan mengalir dari atas kolom menuju bawah dan akan berkontak dengan *molecular sieve* 3Å. Biogas yang telah terpurifikasi, akan dialirkan ke tangki *buffer* untuk ditampung sementara.

4.3.1 Pemilihan Jenis Absorban untuk Proses Purifikasi Biogas

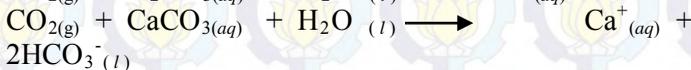
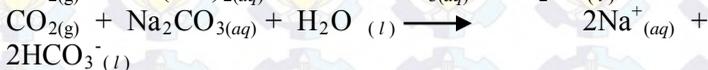
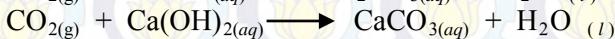
Penentuan larutan NaOH sebagai absorban dalam proses *acid gas removal* adalah dengan mengabsorpsi terlebih dahulu menggunakan alat analisa orsat untuk melihat potensi optimum CO₂ yang dapat terabsorb. Dengan berbagai absorban yang umum digunakan dalam pemurnian gas CO₂, yaitu larutan alkali NaOH,

KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, serta larutan garamnya, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , dan CaCO_3 .

Tabel 4.3 Tabel %Recovery dari Acid Gas Removal Menggunakan Alat Analisa Orsat

Komponen	%Recovery
NaOH	96,59
KOH	36,36
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	40,57
Na_2CO_3	68,18
K_2CO_3	27,27
CaCO_3	52,84

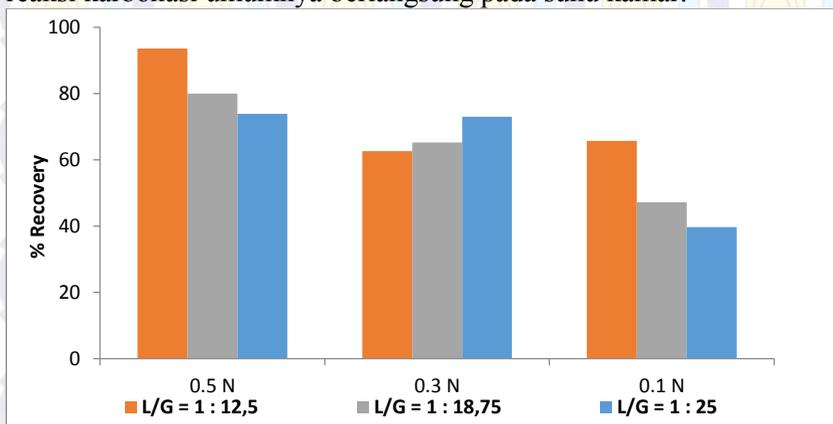
Penganalisaan potensi optimum absorpsi CO_2 dari masing-masing jenis alkali dan garamnya adalah dengan melarutkan sebanyak 0,1N ke dalam 150mL aquadest. Larutan NaOH, KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , dan CaCO_3 mengabsorpsi CO_2 dengan mengikuti reaksi di bawah ini:



4.3.2 Pengaruh Konsentrasi dan Rasio L/G Terhadap Hasil Acid Gas Removal

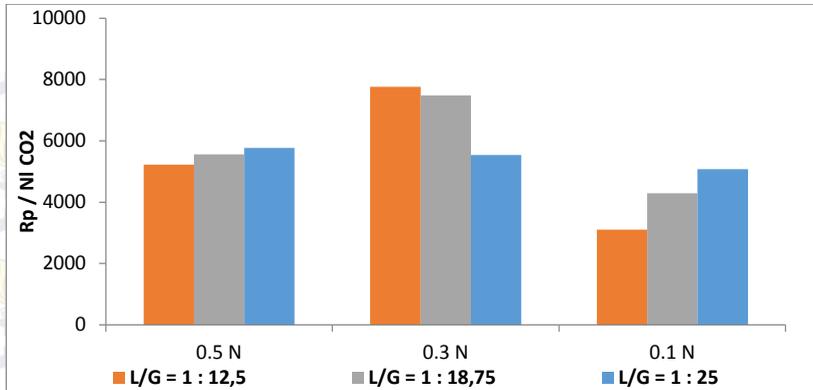
Pada proses absorpsi, laju absorpsi merupakan ukuran perpindahan massa antara fase gas dan fase cairan, di samping perbedaan konsentrasi dan luas permukaan absorben. Laju

absorpsi tersebut tergantung suhu yaitu semakin rendah suhu operasi kelarutan gas di dalam cairan semakin tinggi. Selain berpengaruh pada proses pelarutan, suhu juga sangat berperan pada kondisi optimum reaksi yang terjadi, apalagi dalam hal ini absorpsi disertai dengan reaksi kimia. Pada percobaan ini proses absorpsi dianggap dilakukan secara isoterm, karena tidak ada operasi signifikan yang dapat mempengaruhi perubahan suhu, dan reaksi karbonasi umumnya berlangsung pada suhu kamar.



Gambar 4.5 Diagram Batang Pengaruh Rasio L/G dan Normalitas Terhadap %Recovery

Pada diagram gambar IV.5 didapati jika semakint ingginya konsentrasi dari larutan NaOH dengan semakin kecilnya rasio perbandingan laju alir biogas dan larutan absorbant dapat meningkatkan %recovery CO₂. Hal ini menunjukkan jika semakin meningkatnya konsentrasi NaOH memperbanyak jumlah mol NaOH yang aktif agar dapatberdifusi di lapisan *interface* antara gas-liquid dan bereaksi dengan CO₂, yang dapat meningkatkan faktor *enhancement* dan menginisiasi peningkatan laju absorbsinya.



Gambar 4.6 Diagram Batang Pengaruh Rasio L/G dan Normalitas Terhadap *Unit Operation Cost*

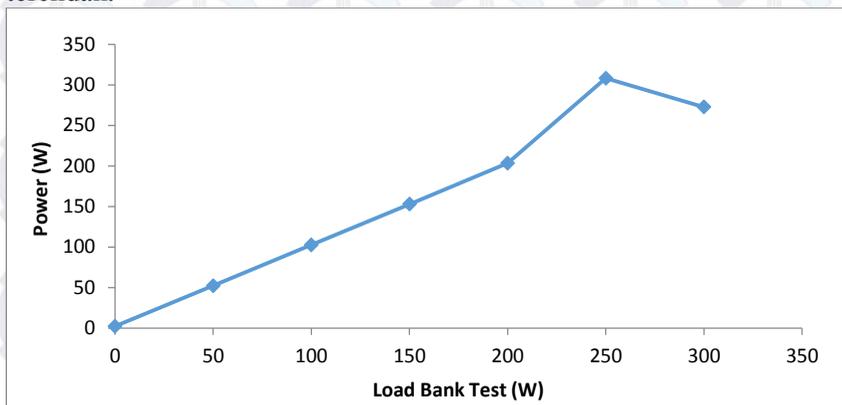
Dengan semakin meningkatnya konsentrasi dari NaOH tidak menjadikan semakin berkurangnya harga *unit operation cost* seperti yang terlihat pada gambar IV.6. Jumlah mol NaOH pada konsentrasi yang semakin besar dapat meningkatkan %*recovery* karena semakin banyak mol aktif tersedia untuk terdifusi sampai lapisan *interface* biogas dan larutan NaOH, namun jumlah mol NaOH yang tidak bereaksi masih tersisacukup banyak sehingga membuat *unit operation cost* meningkat. Untuk 0,3N memiliki harga rata-rata tertinggi dikarenakan %*recovery* yang kecil pada konsentrasi tersebut.

4.3.3 Pengujian Hasil Purifikasi Biogas Sebagai Umpan Generator dan Diuji Menggunakan *Load Bank Test*

Pada percobaan ini, gas CO₂ setelah proses *acid gas removal* selanjutnya melalui proses dehidrasi. Dimana terjadi peristiwa penyerapan pada lapisan permukaan atau antar fasa, dimana molekul dari suatu materi terkumpul pada bahan pengadsorpsi (adsorben). Langkah pertama dalam proses adsorpsi adalah kontak antara biogas dengan permukaan adsorben dalam percobaan ini digunakan *molecular sieve* 3Å. Setelah itu air yang terkandung pada biogas terserap melalui pori – pori adsorben. Proses kontak antara biogas pada permukaan adsorben

berlangsung secara cepat sedangkan penyerapan kadar air pada pori – pori adsorben berlangsung lambat sehingga waktu yang dibutuhkan pada proses adsorpsi dengan adsorben padat lebih lama daripada absorpsi. Pada proses adsorpsi akan terjadi reaksi eksotermis antara gas dan *molecular sieve* dimana molekul air akan terlepas dari gas kemudian teradsorb ke dalam pori – pori pada permukaan *molecular sieve*. Sehingga terjadi perubahan temperatur pada biogas yang dialirkan, dimana temperatur biogas akan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur biogas sebelum berkontak dengan *molecular sieve*. Hal ini mengindikasikan bahwa *relative humidity*(RH) dari biogas turun.

Pada percobaan *load bank test* ini menggunakan biogas hasil purifikasi dengan menggunakan gas hasil purifikasi 0,1N NaOH dengan rasio L/G = 1:12,5 karena memiliki *unit operation cost* terendah.



Gambar 4.7 Grafik Hasil *Load Bank Test* Biogas Terpurifikasi dengan Konsentrasi 0,1 N dan Rasio L/G = 1:12,5

Biogas hasil purifikasi dinaikan tekanannya hingga 4 bar dengan dimasukkan ke dalam tangki penampung bertekanan dengan volume 40,1L, dimana keluaran dari tangki penampung bertekanan dijaga pada 2,5 bar sebagai umpan dari generator listrik. Dengan asumsi hanya gas metan dan CO₂ yang terdapat dalam biogas terpurifikasi tersebut sehingga biogas terpurifikasi

memiliki komposisi 94,47% mol CH₄, maka biogas tersebut memiliki nilai LHV sebesar 706,1659 kJ/mol. Dengan perhitungan untuk harga LHV per 1 mol CH₄ murni adalah 756,1416 kJ/mol, dimana perhitungan untuk mencari LHV campuran adalah dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$LHV = \sum_{i=1} x_i \cdot LHV_i$$

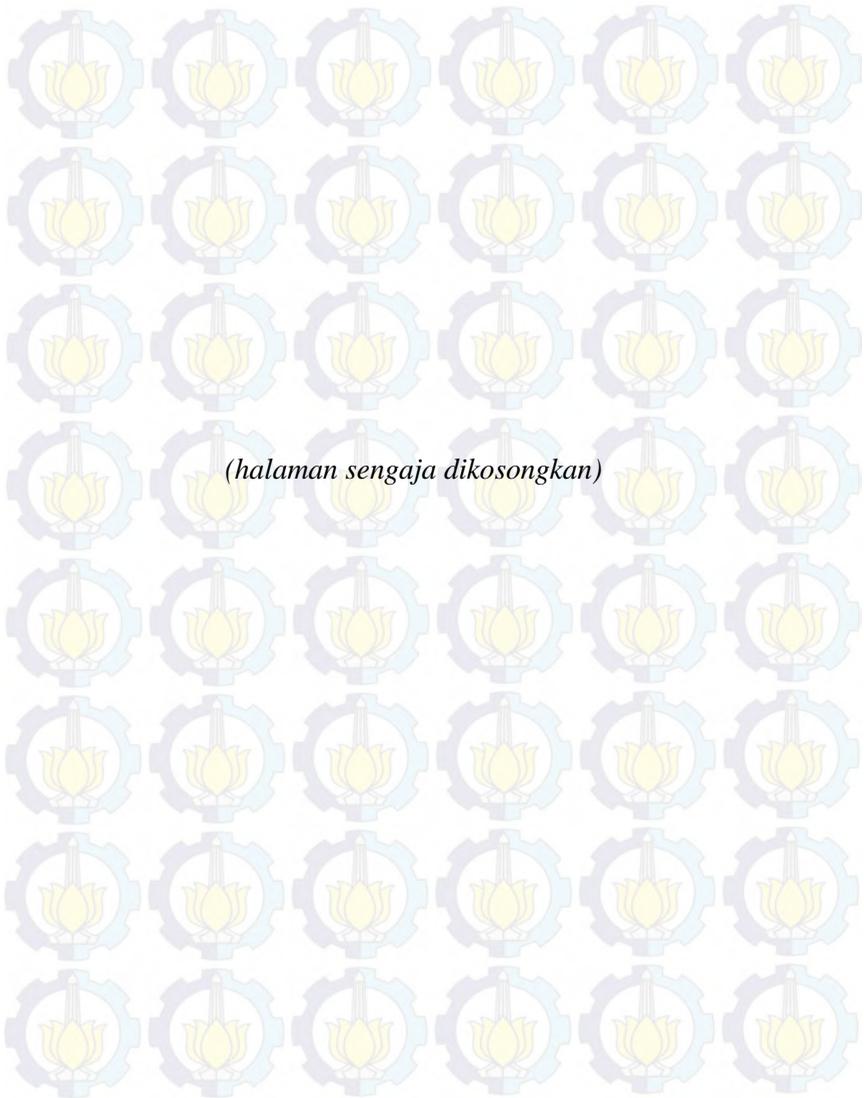
Keterangan: - x_i = fraksi mol komponen i

- LHV_i = spesifik nilai pembakaran dari komponen i

Selama proses pembakaran biogas sebagai umpan generator, *load bank test* dinyalakan bertahap untuk setiap 50W dan diukur voltase dan kuat arus yang dihasilkan. Proses penyalaaan generator dilakukan selama 3,5 menit dan diasumsikan gas ideal.

Tabel 4.4 Efisiensi Biogas Terpurifikasi dengan Konsentrasi NaOH 0,1 N dan Rasio L/G=1:12,5

Mol Biogas	Energi Keluar (kWh)	Energi Keluar (kJ)	Energi Masuk (kJ)	Efisiensi (%)
2,3865	0,01798	64,7388	1685,29	3,84



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

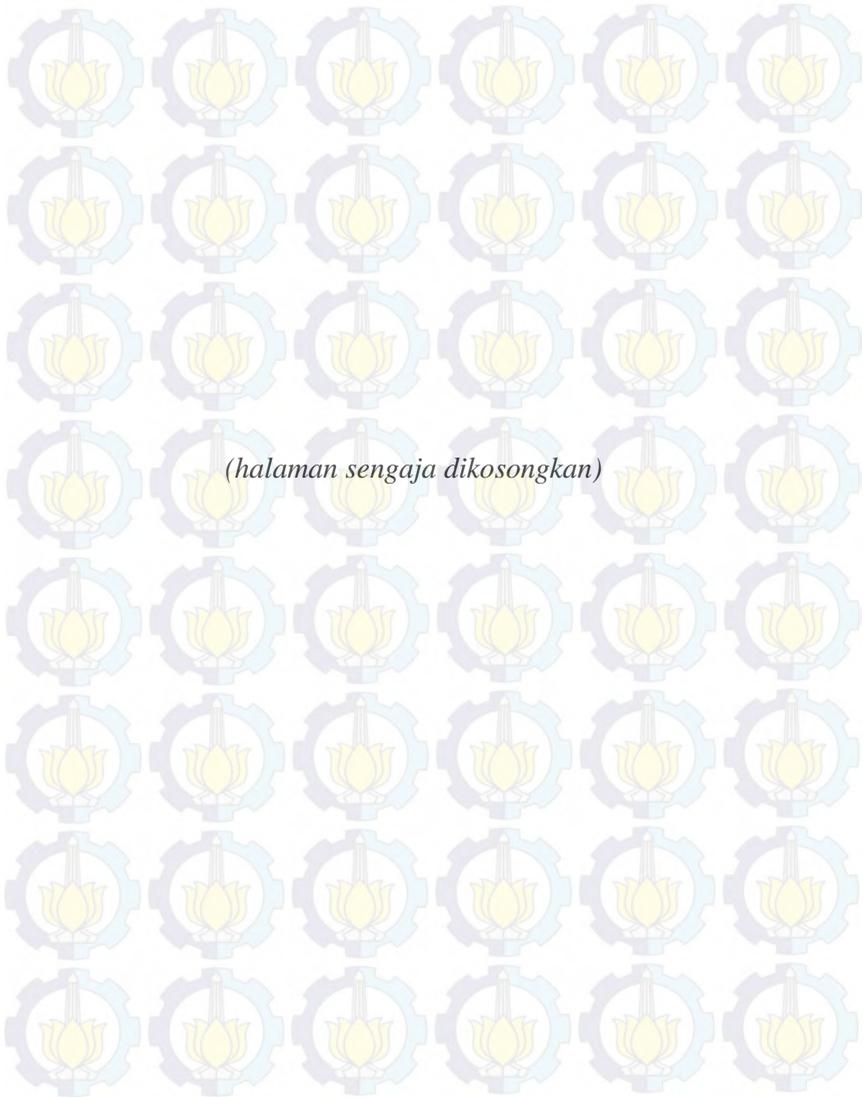
V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian studi pemanfaatan sampah kota menjadi energi terbarukan listrik-biogas, dapat disimpulkan bahwa :

1. Pencacahan sampah sayuran dapat mempercepat proses pembentukan biogas dengan komposisi gas metana yang mulai bisa terbakar dan semakin besar laju alir dari proses sirkulasi dapat semakin memperbesar laju produksi biogas perharinya.
2. Berdasar studi secara teknis dan ekonomis didapatkan bahwa biogas terpurifikasi dengan NaOH 0,5N dan dengan perbandingan L/G=1:12,75 memiliki %recovery terbesar, yakni 93,67%, sedangkan biogas terpurifikasi dengan NaOH 0,1N dan dengan perbandingan L/G=1:12,75 memiliki nilai yang ekonomis karena harga *unit operation cost* terendah, yaitu sebesar Rp 3.101,63/ Ndm³ CO₂ terabsorpsi.

V.2 Saran

1. Melakukan variasi lama waktu dan laju alir dari proses sirkulasi.
2. Melakukan variasi fraksi solid dari sampah sayuran dengan larutan di dalam digesternya dan dilakukan dengan sistem umpan kontinyu agar dapat menentukan HRT terbaik.
3. Memodifikasi alat dengan menambahkan P,T sensor dan *flowrate* transmitter pada tangki biogas bertekanan untuk mengevaluasi kerja gas generator.
4. Memodifikasi *Load Bank Test* dengan menggunakan *resistive load bank* agar dapat menentukan beban maksimum yang digunakan pada gas generator.



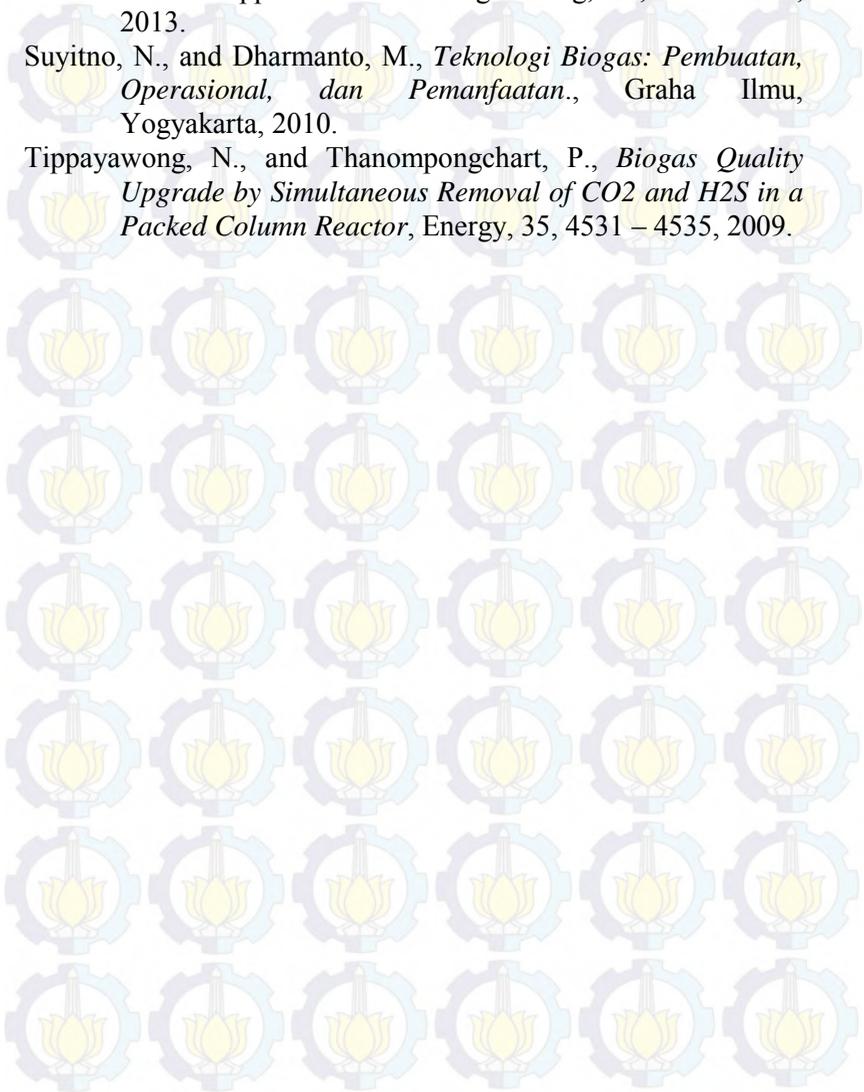
DAFTAR PUSTAKA

- Boyce, Meherwan. P., *Gas Turbine Engineering Handbook 2nd Edition.*, Gulf Professional Publishing, Boston, 2002.
- Coskun, C., Akyuz, E., Oktay, Z., and Dincer, I., *Energy Analysis of Hydrogen Production Using Biogas – Based Electricity*, Science Direct, 36, 11418 – 11424, 2011.
- Engineering Data Book*, GPSA 11th Edition (Electronic) Vol. I & II Section 1 – 26, Gas Processors Association, Oklahoma, 1996.
- Herawati, Dewi. A., Wibawa, Arif. D., and Fitriyawati., Utya., *The Impact of Solvent of Absorbtion CO₂ from Biogas Vinasse*, 2014.
- Himabindu, M. and Ravikrishna, R. V., *Performance Assessment of a small Biogas – Fuelled Power Generator Prototype*, Scientific & Industrial Research Vol. 73, 781 – 785, 2013.
- Huertas, J. I., Giraldo, N., and Izquierdo, S. *Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption*, 2011.
- Kang, Do Won., Kim, Tong Seop., Hur, Kwang Beom., and Park, Jung Keuk. *The Effect of Firing Biogas on the Performance and Operating Charateristics of Simple and Recuperative Cycle Gas Turbine Combined Heat and Power Systems*, Applied Energy, 93, 215 – 228, 2011.
- McCabe, W. L., and Smith J. C., Harriott, P. *Unit Operation of Chemical Engineering 4th Edition.*, McGraw-Hill, Inc, New York, 1985.
- Parrish, William. R., and Kidnay, Arthur. J., *Fundamentals of Naturan gas Processing.*, Taylor & Francis Group, London, 2006.
- Seghezzo, Lucas., *Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater in Subtropical Regions*, 2004.
- Somehsaraei, H. N., Majjoumerd, M. M., Breuhaus, P., and Assadi, M., *Performance Analysis of a Biogas – Fueled*

Micro Gas Turbine Using a Validated Thermodynamic Model. Applied Thermal Engineering, 66, 181 – 190, 2013.

Suyitno, N., and Dharmanto, M., *Teknologi Biogas: Pembuatan, Operasional, dan Pemanfaatan.*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2010.

Tippayawong, N., and Thanompongchart, P., *Biogas Quality Upgrade by Simultaneous Removal of CO₂ and H₂S in a Packed Column Reactor.* Energy, 35, 4531 – 4535, 2009.



LAMPIRAN A
DATA HASIL PENELITIAN

Tabel A.1 Data Hasil Penelitian Produksi Gas per Hari dari Kotoran Sapi

Hari	Waktu	Tinggi Tangki Penampung (cm)			
		1	2	3	4
1	16:00:00	45	52	92	38
2	15:00:00	63	71	109	55
3	18:45:00	37	37.5	37.5	37.5
4	07:30:00	37	37	43	42
	19:30:00	46	46	54	53.5
5	06:30:00	55.7	56.3	63.7	63.3
	18:30:00	66.6	66.6	77	77.4
	21:30:00	36.5	38.5	39.5	38.5
6	07:45:00	38.2	38.2	46	46
	21:00:00	53	54	62	62
7	07:00:00	62.6	63	73.6	73.5
8	11:00:00	72.5	72	84	84.5
	14:00:00	36.5	36	39	39
9	16:05:00	63.5	63	74	73.5

	19:00:00	36	36.5	37	37
10	14:00:00	51.5	52	61	61.5
	17:00:00	36	37	38	39
11	15:00:00	59	60	69	69
12	13:00:00	83	83	102	102
	16:00:00	36	36	38	37.5
14	10:30:00	82.5	83	103	102.5
	13:30:00	36.5	36.5	39	39
15	15:45:00	66	65.5	80.5	78.35
16	14:00:00	88	86	110	112
	17:00:00	36.5	35	36	36.5
17	14:00:00	58.5	58	69.5	70
18	11:20:00	72	71.5	87.5	88.5
19	10:16:00	88	86	110	112
	15:00:00	36	36	38	38
20	14:10:00	57.75	58	62	62

Tabel A.2 Data Hasil Penelitian pH

Hari	Date	time	pH	T (°C)	h (cm)
-3	Thursday, December 17, 2015	13:15	7.32	31.2	21.5
-2	Friday, December 18, 2015	16:07	7.32	30.2	26.5
-1	Saturday, December 19, 2015	16:20	7.21	29.7	29
0	Sunday, December 20, 2015	16:40	7.24	29	30
1	Monday, December 21, 2015	16:00	7.05	29.3	21.5
2	Tuesday, December 22, 2015	16:00	6.97	29.7	21.5
3	Wednesday, December 23, 2015	16:35	6.83	29.9	29
	*sirkulasi 15 menit	16:50			46

	*released	17:12			21.5
4	Thursday, December 24, 2015	17:20	6.79	29.2	31.5
	*sirkulasi	17:40			52.5
	*released	18:00			21.5
5	Friday, December 25, 2015	16:50	6.76	29.8	29
6	Saturday, December 26, 2015	16:20	6.78	30.7	36.5
7	Sunday, December 27, 2015	16:00	6.83	30.5	44
8	Monday, December 28, 2015	20:00	6.88	29.9	50
9	Tuesday, December 29, 2015	21:00	6.89	30.2	54
10	Wednesday, December 30, 2015	22:00	6.92	30.3	60
	*released	23:00			21.5

11	Thursday, December 31, 2015	10:00	6.93	30.1	24.5
	*released	10:30			21.5
12	Friday, January 01, 2016	14:10	6.95	30.7	30.5
	*released	16:20			21.5
13	Saturday, January 02, 2016	18:45	6.95	29.7	30
14	Sunday, January 03, 2016	16:25	6.98	29.8	40

Tabel A.3 Data Hasil CO₂ Removal dengan Berbagai L/G Rasio dan Normalitas NaOH

Normalitas	L/G	% CO ₂	pH	
			sebelum	sesudah
0,1	1:12,5	5,53	12,34	10,02
	1:18,75	8,27		10,37
	1:25	9,34		10,53
0,3	1:12,5	6,0	12,74	11,48
	1:18,75	5,6		11,45
	1:25	4,4		12,07
0,5	1:12,5	1,07	12,96	12,59
	1:18,75	3,3		12,64
	1:25	4,27		12,66

Tabel A.4 Data Hasil Penelitian *Gas Engine* dengan Konsentrasi NaOH dan L/G Terbaik

Normalitas	L/G	Max Power	LHV (kJ/mol)	Energy out (kwh)	Mol biogas
0,1	1:12,5	308,28	706,1659	0,01798	2,3865

LAMPIRAN B PERHITUNGAN

1. Perhitungan Laju Produksi Gas per Hari
Contoh perhitungan dari Selasa, 22 Desember 2015 sampai Rabu, 23 Desember 2015.

D tanki 1100 L = 91 cm

1 Hari = 24 jam

$$\Delta t = t@23Des - t@22Des = 16.35 - 16.00 \\ = 24.35$$

$$\Delta h = h@23Des - h@22Des = 29 - 21,5 \\ = 7,5 \text{ cm}$$

$$LPD = \frac{\Delta t}{24 \text{ jam}} \times \Delta h \times \pi \times \frac{(D \text{ tanki})^2}{4} \\ \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \\ = 47,6216$$

2. Perhitungan Pengenceran Absorban Padat (NaOH, KOH, Ca(OH)₂, Na₂CO₃, K₂CO₃, CaCO₃).

Contoh perhitungan pengenceran NaOH 0.1N

- a) Mencari Molaritas NaOH

$$N = M \times e$$

Dimana : N = Normalitas

M = Molaritas

e = Bilangan Ekuivalen

$$0.1 = M \times 1$$

$$M = \frac{0.1}{1}$$

$$M = 0.1$$

b) Mencari massa NaOH yang digunakan
Massa NaOH yang dibutuhkan untuk membuat
larutan NaOH 0.1 N sebanyak 60 L

$$M = \frac{Gr}{BM} \times \frac{1000}{Volume (mL)}$$

$$0.1 = \frac{Gr}{40} \times \frac{1000}{60000}$$

$$Gr = 240 \text{ gram}$$

Jadi, massa NaOH yang dibutuhkan untuk membuat
larutan NaOH 0.1 N adalah 240 gram

3. Perhitungan % *Recovery* CO₂

Contoh % *Recovery* pada absorban NaOH 0.1 N

Kadar CO₂ awal = 17,6 %

Kadar CO₂ akhir = 0,0107%

$$\begin{aligned} \%Recovery &= \frac{Kadar CO_2 \text{ awal} - kadar CO_2 \text{ akhir}}{kadar CO_2 \text{ awal}} \times 100 \\ &= \frac{0,176 - 0,0107}{0,176} \times 100 \end{aligned}$$

$$\%Recovery = \frac{0,176 - 0,0107}{0,176} \times 100$$

$$\%Recovery = 93,67\%$$

4. Perhitungan absorbansi yang bereaksi dengan CO_2 berdasarkan pH larutan

Contoh perhitungan pada NaOH

pH awal = 12.52

pH akhir = 8.43

Reaksi yang terjadi :



a) Mencari pOH

$$\text{pOH awal} = 14 - 12.96 = 1.48$$

$$\text{pOH akhir} = 14 - 8.43 = 5.57$$

b) Mencari konsentrasi OH^-

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$$

$$\text{OH}^- \text{ awal} = 1/10^{-1.04}$$

$$= 0.0912 \text{ M}$$

$$\text{OH}^- \text{ akhir} = 1/10^{-1.41}$$

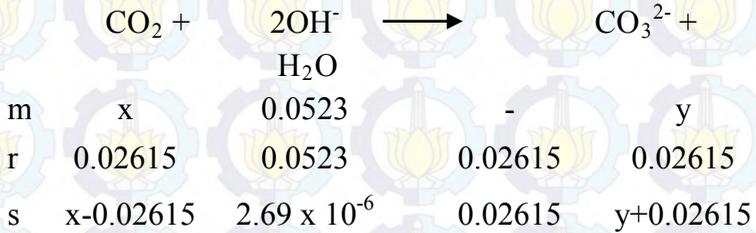
$$= 0.0389 \text{ M}$$

$$\text{OH}^- \text{ yang bereaksi} = \text{OH}^- \text{ awal} - \text{OH}^- \text{ akhir}$$

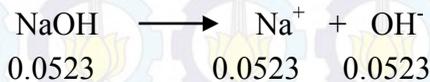
$$= 0.0523 \text{ M}$$

*Karena volume sample sama maka M dianggap sebagai mol

- c) Mencari mol Na(OH) yang bereaksi melalui kesetaraan mol reaksi



Karena ion OH⁻ yang bereaksi didapatkan dari NaOH, maka didapatkan NaOH yang bereaksi menurut reaksi berikut :



Sehingga didapatkan NaOH yang bereaksi sebanyak 0.033 mol dalam satu kali siklus absorpsi di dalam *packed column*.

5. Perhitungan Unit Operation Cost

Dari perhitungan 4 didapatkan mol NaOH yang bereaksi

- a) Menghitung massa NaOH

Mol x BM

$$0.0523 \times 40 = 2.0917 \text{ gram}$$

- b) Menghitung harga absorban

Harga NaOH/gram = Rp 15

Harga NaOH = Rp 15 x 2.0917 gram

$$= \text{Rp } 31,38$$

- c) Menghitung massa CO₂ yang terabsorb
Fraksi mol CO₂ awal dan akhir dilihat dari hasil analisa orsat

Komponen	Fraksi awal	Volume (mL)	Mol Awal	Fraksi akhir	Mol Akhir	Massa Akhir
CO ₂	0.176	7,3	0.0002881	0.0107	0.0000182	0.0008022
CH ₄	0.824	42,7	0.0016854	0.9893	0.0016854	0.0270339
Total	1	50	0.0019735	1	0.0017036	0.0278361

Perubahan Massa CO₂ = 0.0000118 kg

$$\begin{aligned} \text{Massa} &= \text{Massa CO}_2 : \text{Densitas CO}_2 \\ &= 0.0000118 \text{ kg} : 0,00198 \text{ kg/L} \\ &= 0.0059993 \text{ L} \end{aligned}$$

- d) Unit operation Cost

Harga / Volume CO₂ terabsorb

$$= \text{Rp } 31,38 / 0.0059993 \text{ L}$$

$$= \text{Rp } 5229.86 / \text{NL CO}_2 \text{ Terabsorb}$$

6. Perhitungan Efisiensi Overall (untuk Biogas Terpurifikasi dengan NaOH 0,1N dan Rasio L/G=1:12,5)

$$\mu_{\text{Overall}} = \frac{\text{Energy Out}}{\text{Energy in}} \times 100\%$$

Energi masuk didapatkan dari Heating Value Biogas (LHV)

Pada percobaan dengan absorban NaOH didapatkan konsentrasi CO₂ akhir yang terkandung pada biogas

adalah 5,53% jika diasumsi Biogas hanya mengandung CO₂ dan CH₄ maka dapat dihitung nilai Heating Value dari biogas. Berdasarkan perhitungan nilai heating value biogas adalah 706.17 kJ/mol.

a) Mencari banyaknya penggunaan biogas selama t menit (mol)

Tekanan tabung pada $T_0 = 4$ barg = 4×10^5 Pa

Tekanan tabung pada $T_5 = 2,5$ barg = $2,5 \times 10^5$ Pa

Volume Tabung = 40.1 L = 0.0401 m^3

Temperatur = 30 C = 303.15 K

$R = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Menggunakan persamaan gas ideal

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

1. Mol Biogas pada saat T_0

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{(4 \times 10^5) + 0.0401}{8.314 \times 303.15}$$

$$n = 7.9762 \text{ mol}$$

2. Mol Biogas pada saat T_5

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{(2,5 \times 10^5) + 0.0401}{8.314 \times 303.15}$$

$$n = 5.5897 \text{ mol}$$

3. Mol Biogas yang digunakan selama t menit
= Mol Biogas pada saat T_0 – Mol Biogas pada saat T_t
= 2,3865 mol

b) Energi masuk = LHV x mol biogas
= 706,1659 x 2,3865
= 1685,29 kJ

c) Energi keluar berupa maximum power yang dihasilkan dalam 5 menit

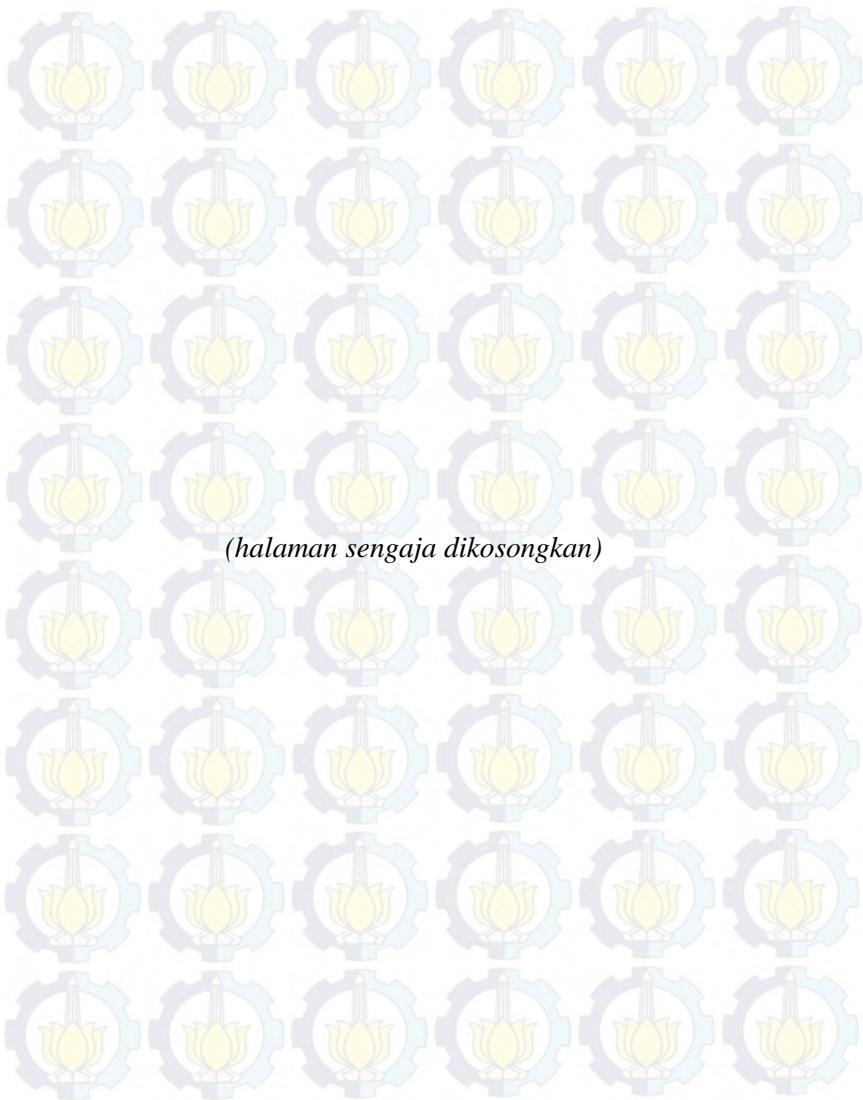
$$\text{Maximum Power} = 308,28 \text{ Watt}$$

$$\begin{aligned} \text{Energi Out} &= \frac{P}{1000} \times t \\ &= \frac{308,28}{1000} \times \frac{3,5}{60} \\ &= 64,7388 \end{aligned}$$

d) Menghitung Efisiensi Overall

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Overall}} &= \frac{\text{Energy Out}}{\text{Energy In}} \times 100\% \\ &= \frac{64,7388}{1685,29} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{Overall}} = 3,84\%$$



(halaman sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C
GAMBAR PENELITIAN



Aktivasi Molucular Sieve



Molecular Sieve Packed Column



Pembuatan Larutan untuk Orsat Analyzer



Peralatan Analisa Orsat



Tangki *Feed* Absorban



Tangki *Effluent* Absorban



Kompresi 8 Barg
dengan *Air Compressor*
yang dimodifikasi



Raschig Ring *Packed Column*



Connector antara kompresor dan tabung gas



Rotameter Gas dan Liquid



Regulator Gas untuk Load Bank Test



Sampling Point dan Tangki Buffer



Rangkaian *Load Bank*
Test



Gas Generator

RIWAYAT PENULIS



Binsar David Aldwinanda Nababan adalah mahasiswa S1 Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya yang memiliki minat mengenai teknologi biomassa dan biokimia ini lahir di Jakarta pada tanggal 22 Desember 1993. Penulis sebelumnya telah menamatkan sekolah dasar di SD Strada Wiyatasana, sekolah menengah pertama di SMP Strada Marga Mulia, dan sekolah menengah atas di SMAN 60 Jakarta. Selama berkuliah, Penulis aktif sebagai pengurus kepanitiaan acara tahunan jurusan Teknik Kimia FTI-ITS, yaitu sebagai Ketua Acara sub-bidang Chernival 2013, Orange Day, dan President of Chernival 2014. Kegemaran Penulis untuk menjaga kelestarian lingkungan hidup dan kesejahteraan masyarakat akan kualitas hidupnya yang memotivasi Penulis melakukan pengabdian masyarakat implementasi biogas bersama dengan bimbingan **Prof. Dr. Ir. Nonot Soewarno, M.Eng** agar mencukupi kebutuhan bahan bakar memasak sehari-hari, serta memotivasi Penulis untuk meneliti di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa untuk mengambil judul **Pra-Desain Pabrik "Sodium Karbonat dari CO₂ Flue Gas Pabrik Semen"** dan Tugas Akhir Skripsi **"Studi Pemanfaatan Sampah Kota Menjadi Energi Terbarukan Listrik-Biogas"**. Tulisan dari penelitian ini yang akan menjadi janji bakti Penulis yang seterusnya mengabdikan bagi Bangsa dan Almamater.