



TESIS TF 142520

**PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH
(PLTSa) BERBASIS *LANDFILL PRETREATMENT*
DENGAN MENGGUNAKAN GENERATOR HCCI
(Studi Kasus :TPA Supit Urang Kota Malang, Jawa Timur)**

WAHYU HENDRA WIJAYA
2413 202 001

Dosen Pembimbing :
Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Dr. Sri Mulato, M.Si.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
JURUSAN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS TF 142520

**MODELING OF WASTE POWER PLANT BASED
LANDFILL PRETREATMENT WITH HCCI GENERATOR
(Case Study: Supit Urang Landfill on Malang, East Java)**

WAHYU HENDRA WIJAYA
2413 202 001

Supervisor :
Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Dr. Sri Mulato, M.Si.

MASTER PROGRAM
RENEWABLE ENERGY ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

oleh :

WAHYU HENDRA WIJAYA

NRP. 2413 202 001

Tanggal Ujian : 11 Januari 2016

Periode Wisuda : Maret 2016

Disetujui oleh :

1. Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. (Pembimbing I)
NIP. 19771127 200212 1 002
2. Dr. Sri Mulato, M.Si (Pembimbing II)
3. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
NIP. 19761223 200501 1 001
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Penguji)
NIP. 19620822 198803 1 001
5. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19710702 199802 1 001



Prof. Ir. Djaghar Manfaat, M.Si., Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001

PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH (PLTSa) BERBASIS LANDFILL PRETREATMENT DENGAN MENGUNAKAN GENERATOR HCCI (Studi Kasus :TPA Supit Urang Kota Malang, Jawa Timur)

Nama Mahasiswa : Wahyu Hendra W
Nrp. : 2413202001
Pembimbing : Dr. Gunawan Nugroho
Dr. Sri Mulato

ABSTRAK

Secara teknis, MSW (sampah kota) dapat dikonversi secara biologis menjadi biogas yang kemudian bisa digunakan sebagai sumber energi untuk pembangkitan listrik. Pemanfaatan LFG (*Landfill Gas*) sebagai bahan bakar pembangkit listrik juga ditunjang oleh keberadaan mesin motor bakar berbasis HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*). Untuk menunjang keberhasilan adopsi PLTSa berbasis mesin-generator HCCI, kajian dalam bentuk pemodelan matematis produksi biogas di suatu wilayah perlu dilakukan secara cermat. Langkah ini dibutuhkan untuk memberikan gambaran secara rinci dan menyeluruh tentang potensi energi listrik dengan bahan bakar biogas dari TPA di suatu wilayah dikaitkan dengan jumlah dan sifat sampah (MSW) yang tersedia. Sehingga hasil dari pemodelan ini dapat digunakan sebagai salah satu acuan dalam uji kelayakan pembangunan PLTSa di suatu wilayah. Penyusunan model PLTSa dengan mesin HCCI, didasarkan pada referensi pemodelan dan hasil eksperimen. Produksi biogas dari landfill menggunakan model hasil eksperimen. Untuk filter biogas menggunakan sistem filter dengan suspensi dolomit. Untuk konversi listrik menggunakan generator HCCI mengacu pada hasil eksperimen yang telah dilakukan Bedoya. Simulasi pemodelan dilakukan dengan menggunakan program Microsoft Office Excel. Hasil pemodelan PLTSa dengan menggunakan mesin HCCI menunjukkan daya yang dihasilkan $7.09 \cdot 10^{-3}$ kali kapasitas konsumsi bahan bakar mesin HCCI (m^3/Jam) dan prosentase kandungan CH_4 dari landfill. Berdasarkan pemodelan untuk TPA Supit Urang Kota Malang diperoleh daya keluaran 1,04 MW jika menggunakan mesin dengan kapasitas konsumsi biogas $252 m^3/\text{jam}$. Jika sistem landfill telah penuh dan tidak diperbarui, maka dengan LFG yang dihasilkan, pembangkit ini dapat beroperasi selama 17,3 tahun.

Kata kunci: Pemodelan, PLTSa, Generator HCCI

MODELING OF WASTE POWER PLANT BASED LANDFILL PRETREATMENT WITH HCCI GENERATOR (Case Study: Supit Urang Landfill on Malang, East Java)

Nama Mahasiswa : Wahyu Hendra W
Nrp. : 2413202001
Pembimbing : Dr. Gunawan Nugroho
Dr. Sri Mulato

ABSTRACT

Technically, MSW (Municipal Solid Waste) can be converted biologically to be biogas, which can be used as an energy source for an electricity generator. The use of LFG (Land Fill Gas) for power generation is also supported by a motor fuel engine based on HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition). To support the success of waste power plant adoption based on HCCI generator engine, it is needed to study the mathematical modeling of biogas production in a region carefully. This step is required to provide a detail and comprehensive picture of a potential biogas electrical energy source in an area associated with the amount and the nature of waste (MSW). As a result, this modeling can be used as a reference in terms of a feasibility test of the waste power plant development. The waste power plant modeling with HCCI engine was conducted based on the reference modeling and experimental results. The production of biogas from landfills used a model experimental results. The biogas filter used a filter system with biogas dolomite suspension. The conversion of electricity used a generator HCCI refers to the results of experiments that have been done by Bedoya. Simulation modeling was done by using Microsoft Office Excel program. The waste power plant modeling results used HCCI engine producing power $7,09 \cdot 10^{-3}$ times the capacity of the fuel consumption of HCCI engines (m^3/hour) and CH_4 content of landfill. Based on the modeling of supit Urang landfill Malang, the output power of 1,04 MW was obtained when a machine with a capacity of biogas consumption of 252 m^3/hour was used. If the system has been filled and no landfill replaces, then with LFG generated, these plants can be operated for 17,3 years.

Keywords: *Modelling, Waste Power Plant, Generator HCCI*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “**Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Berbasis *Landfill Pretreatment* dengan Menggunakan Generator HCCI (Studi Kasus : TPA Supit Urang Kota Malang, Jawa Timur)**”. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan), sebagai provider dalam menempuh program magister dan sponsor penelitian/Tesis.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta,S.T.,M.T.,Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS dan Ibu Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T., selaku Ketua Prodi S2 Teknik Fisika.
3. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. dan Dr. Sri Mulato, M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tesis ini.
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan Karyawan Jurusan Teknik Fisika yang telah banyak membantu penulis.
5. Kedua orang tua saya, Bapak Sunarto dan Ibu furotin, serta adik ku Ana Mariatul Uyun, beserta keluarga besar yang telah memberikan do’a, dukungan, nasehat dan semangat kepada penulis.
6. Istriku Enny Kusumawati beserta kedua putraku, Wira Farzana, S.A dan Alfariz Yukihiro, S.A yang sabar, pengertian dan menjadi motivasi teristimewa serta pelipur lara dikala lelah.
7. Teman-teman S2 angkatan 2013, dan semua sahabat penulis yang selalu mendo’akan dan memberikan semangat penulis.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tesis ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 15 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Permasalahan	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 TPA Supit Urang Kota Malang	5
2.2 Landfill	6
2.3 Biogas	13
2.4 Purifikasi Biogas	14
2.5 Biogas untuk Generator Mesin HCCI	15
2.6 Pemodelan Produksi Biogas, Purifikasi, dan Pembakaran	18
BAB 3 METODE PENELITIAN	25
3.1 Tempat dan Waktu.....	25
3.2 Sistematika Penelitian	25
3.3 Pengumpulan Data	26
3.4 Desain sistem PLTSa	28
3.5 Skema Aliran Energi	28

3.6	Pemodelan PLTSa	29
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1	Data Hasil Eksperimen	33
4.2	Ketersediaan Sampah di Kota Malang	40
4.3	Pemodelan PLTSa dengan Generator HCCI	45
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	61
	DAFTAR PUSTAKA.....	63
	LAMPIRAN	
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta Lokasi TPA Supit Urang Kota Malang.	5
Gambar 2.2	Skematik susunan lapisan sampah pada <i>controlled landfill</i> ...	7
Gambar 2.3	Tahapan reaksi biokemis pembentukan biogas.	8
Gambar 2.4	Skema eksperimen dengan mesin VW TDI	16
Gambar 2.5 (a)	Kesesuaian model eksponensial dengan jumlah produksi LFG terhadap waktu.	18
Gambar 2.5 (b)	Kesesuaian model Gompertz dengan jumlah produksi LFG terhadap waktu.	19
Gambar 2.5 (c)	Kesesuaian model combined growth and decay dengan nilai produksi LFG terhadap waktu.	19
Gambar 2.5 (d)	Kesesuaian model Gaussian dengan nilai produksi LFG terhadap waktu.	20
Gambar 2.5 (e)	Kesesuaian model multi komponen dengan nilai produksi LFG terhadap waktu.	20
Gambar 2.6	Diagram alir tahapan proses pemurnian biogas menggunakan suspensi dolomit.	22
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan penelitian.....	26
Gambar 3.2	Skema PLTSa.	28
Gambar 3.3	Diagram alir energi pada Sistem Pembangkit.	29
Gambar 3.4	Ilustrasi Ukuran <i>Landfill</i> di TPA Supit Urang Kota Malang..	30
Gambar 4.1	Produksi biogas yang dihasilkan subtrat 1.....	34
Gambar 4.2	Produksi biogas yang dihasilkan subtrat 2.....	35
Gambar 4.3	Produksi biogas yang dihasilkan subtrat 3.....	35
Gambar 4.4	Produksi biogas yang dihasilkan subtrat 4.....	36
Gambar 4.5	Produksi biogas yang dihasilkan subtrat 5.....	36
Gambar 4.6	Produksi biogas secara keseluruhan.....	37
Gambar 4.7	Alur pengelolaan sampah di Kota Malang.	40

Gambar 4.8	Grafik Produksi Harian LFG dan Akumulasi Produksi LFG di TPA Supit Urang Kota Malang Berdasarkan Pendekatan Model Multikomponen.....	47
Gambar 4.9	Perbandingan produksi biogas dan konsumsi dolomit pada filter.....	49
Gambar 4.10	Tampilan Simulasi Pemodelan dengan Excel.....	52
Gambar 4.11	Diagram alir energi dalam sistem PLTSa.....	52
Gambar 4.12	Grafik hubungan konsumsi bahan bakar dan dimensi tabung pada filter.....	54
Gambar 4.13	Grafik hubungan konsumsi bahan bakar dan power output.....	54
Gambar 4.14	Grafik hubungan konsumsi bahan bakar dan power output yang dihasilkan oleh pembangkit.....	55
Gambar 4.15	Grafik hubungan power output yang dihasilkan oleh pembangkit dan waktu operasional pembangkit.....	55
Gambar 4.16	Grafik hubungan komposisi komponen VS dan produksi LFG	57
Gambar 4.17	Grafik hubungan komposisi komponen VS dan lama operasional pembangkit.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis enzim hidrolitik pada tahapan hidrolisis biomassa.....	8
Tabel 2.2	Jenis senyawa asam produk proses asidogenesis	9
Tabel 2.3	Mekanisme reaksi pembentukan asam asetat dan gas H ₂	11
Tabel 2.4	Jenis mikroba metanogenik penghasil gas metan [CH ₄]	12
Tabel 2.5	Spesifikasi mesin	17
Tabel 3.1	Komposisi Subtrat yang Digunakan Sebagai Sampel Percobaan.....	27
Tabel 4.1	Komposisi Organik Bahan	33
Tabel 4.2	Hasil Uji Total Solids(TS) dan Volatile Solids(VS)	34
Tabel 4.3	Hasil produksi masing-masing subtrat	38
Tabel 4.4	Hasil kombinasi persamaan.....	39
Tabel 4.5	Proyeksi Jumlah Timbunan Sampah Kota Malang	41
Tabel 4.6	Komposisi Sampah Kota Malang	42
Tabel 4.7	Komposisi karbohidrat, lemak, dan protein sampah biodegradable.....	43
Tabel 4.8	Estimasi Energi Listrik yang Dapat Dibangkitkan PLTSa dengan Menggunakan Generator HCCI di TPA Supit Urang Kota Malang.....	44
Tabel 4.9	Inputan Spesifikasi <i>Inlet</i>	45
Tabel 4.10	Inputan Spesifikasi <i>Landfill</i>	46
Tabel 4.11	Data Output untuk Sistem <i>Landfill</i>	46
Tabel 4.12	Inputan Spesifikasi Filter.....	48
Tabel 4.13	Data Output untuk Sistem Filter.....	48
Tabel 4.14	Spesifikasi generator HCCI.....	50
Tabel 4.15	Data Output Power Sistem.....	50
Tabel 4.16	Pengaruh Perubahan Kapasitas Konsumsi Bahan Bakar Generator HCCI terhadap Variabel Lain.....	53
Tabel 4.17	Pengaruh komposisi karbohidrat, protein, dan lemak pada MSW terhadap variabel lain.....	56

Tabel 4.18 Waktu Operasional Pembangkit Berdasarkan Variasi Data Luas
Area dan Kedalaman Lanfill Untuk Power Output 1,04 MW.....59

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelolaan sampah merupakan salah satu masalah krusial bagi kota-kota besar di semua negara. Sampah yang tidak tertangani secara baik dan memadai dapat menyebabkan masalah serius bagi kualitas lingkungan dan kesehatan manusia (Uyan, 2013). Masalah tersebut akan semakin membesar akibat peningkatan secara signifikan dari tahun ke tahun jumlah sampah padat atau sering disebut MSW (*Municipal Solid Waste*) di perkotaan. Tumpukan MSW yang tidak terkontrol, akan mempengaruhi kehidupan manusia lewat cemaran air tanah sebagai sumber air minum dan polusi udara. Selain mengganggu pernafasan manusia, cemaran udara juga berpotensi menambah kandungan gas rumah kaca penyebab efek pemanasan global dan perubahan iklim. Keduanya merupakan ancaman serius pada kehidupan makhluk dunia di masa depan (Kumar, 2014). Sudah semestinya MSW diolah secara produktif untuk menunjang kegiatan ekonomis-sosial penduduk penghasil MSW itu sendiri. Secara teknis, MSW bisa dikonversi secara biologis menjadi biogas yang kemudian bisa digunakan sebagai sumber energi untuk pembangkitan listrik. Proses tersebut akan menghasilkan residu bahan organik yang mengandung nutrisi bagi tumbuh-tumbuhan, seperti nitrogen, fosfor, kalium dan sangat bermanfaat sebagai pupuk untuk peningkatan produksi pertanian.

Selain pembakaran dan pengomposan, penimbunan di tempat terbuka (*landfill*) secara terkendali merupakan salah satu teknologi alternatif yang paling mudah dipraktekkan untuk penanganan MSW. Selama penimbunan, senyawa organik dalam MSW akan terdegradasi secara biologis menghasilkan gas yang disebut LFG (*Landfill Gas*) dan cairan yang disebut lindi. Dalam kondisi yang tidak terkontrol, kedua materi tersebut akan terakumulasi sehingga keberadaannya melebihi ambang batas dan menjadi polutan bagi lingkungan (Mahar, 2014). Kandungan LFG terutama adalah CO₂ dan CH₄ yang merupakan penyebab efek rumah kaca dan pemanasan global. Konsentrasi CH₄ dalam LFG memang relatif

rendah, namun CH₄ menyebabkan efek rumah kaca 21-25 kali lebih besar daripada CO₂ (Talyan, 2007). Beberapa metode untuk mengendalikan dan mengurangi dampak *landfill* telah dikembangkan, antara lain, melalui proses *mechanical biological treatment* (MBT) (Salati, 2013) dan metode *flux chamber* (Trapani, 2013). Produksi gas hasil proses tersebut bisa dikendalikan untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSA).

Komposisi khas biogas terdiri atas 30-60% CH₄ (metana), 15-30% CO₂ (karbon dioksida), 1-10% O₂ (oksigen), 5-20% N₂ (nitrogen) dan sejumlah kecil gas H₂S (hidrogen sulfida), NH₃ (amoniak) dan senyawa organik ringan mudah menguap (VOC, *volatile organic compounds*) (Naros, 2009). Kandungan VOC dalam biogas dari *landfill* telah diuji dengan menggunakan GC/MS (*Gas chromatography/Mass Spectrometry*) dengan dua prosedur, yaitu *thermal desorption of the Tenax TA and Carbotrap 349 tubes* dan SPME (*Solid Phase Micro-Extraction*). Hasil uji menunjukkan bahwa VOC hanya mengandung senyawa halogen, klorin dan serta kandungan senyawa sangat minor (*trace element*) dalam jumlah sangat rendah. Hal itu merupakan indikasi bahwa biogas layak digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin pembangkit listrik.

Pada tahun 2012, Jerman telah mampu mengkonversi biogas menjadi energi listrik sebesar 20,500 GWh (Strauss, 2013). Hal ini tentunya bisa mendorong Indonesia untuk mengadopsi teknologi konversi biogas yang sudah berhasil disertai modifikasi disesuaikan dengan kondisi lingkungan Indonesia. Pemanfaatan LFG sebagai bahan bakar pembangkit listrik juga ditunjang oleh keberadaan mesin motor bakar berbasis HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) (Bedoya 2012). Pemanfaatan biogas pada mesin HCCI dapat menurunkan kandungan hidrokarbon pada emisi gas buang. Selain itu keberadaan CO₂ dalam biogas bermanfaat untuk menyerap pelepasan panas pembakaran gas. Sehingga, suhu gas buang tidak terlalu tinggi, seperti yang biasanya terjadi pada mesin HCCI berbahan bakar solar (Nathan, 2010).

Uji coba penerapan PLTSA dengan memanfaatkan mesin HCCI sangat memungkinkan dilakukan di berbagai kota di Indonesia, salah satu diantaranya adalah di tempat penimbunan akhir (TPA) Supit Urang, Kota Malang, Jawa Timur. Pada tahun 2009, Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kota Malang,

telah melakukan kajian tentang potensi produksi biogas pada zona I blok II dan zona II blok II TPA Supit Urang. Tercatat bahwa laju produksi LFG di kedua zona tersebut adalah 583,44 - 869,44 g/dt dengan kemurnian gas metan sekitar 27% (BAPPEDA, 2009). Empat tahun kemudian, BPPT juga melakukan hal sama di zona IV dengan perolehan kandungan gas metan dalam LFG lebih dari 50% (BPPT, 2013).

Untuk menjamin keberhasilan adopsi PLTSa berbasis mesin-generator HCCI, kajian dalam bentuk pemodelan matematis produksi biogas di suatu wilayah perlu dilakukan secara cermat. Langkah ini dibutuhkan untuk memberikan gambaran secara rinci dan menyeluruh potensi energi listrik dengan bahan bakar biogas dari TPA di suatu wilayah dikaitkan dengan jumlah dan sifat sampah (MSW) yang tersedia. Sehingga hasil dari pemodelan ini dapat digunakan sebagai salah satu acuan dalam uji kelayakan pembangunan PLTSa di suatu wilayah. Studi kasus pemodelan dalam penelitian ini akan dilaksanakan di lokasi TPA Supit Urang Kota Malang.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapakah potensi produksi (kapasitas) daya listrik yang mampu dibangkitkan oleh PLTSa (studi kasus: TPA Supit Urang Kota Malang)
2. Bagaimanakah model PLTSa berbasis landfill pretreatment dengan menggunakan mesin generator HCCI

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini membuat model konversi sampah menjadi energi listrik untuk dapat digunakan sebagai acuan pengembangan PLTSa di suatu wilayah. Tahapan kegiatan adalah sebagai berikut,

1. Menghitung neraca massa sampah yang potensial untuk dikonversi menjadi biogas per satuan waktu dan diikuti dengan neraca energi untuk estimasi daya listrik di PLTSa Supit Urang Kota Malang.
2. Menggunakan nilai yang diperoleh pada tahapan 1 sebagai masukan (input) validasi dari model yang diusulkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil pemodelan ini dapat dimanfaatkan sebagai salah satu acuan dalam uji kelayakan pembangunan PLTSa di suatu wilayah.

1.5 Batasan Aplikasi Model

1. Sampah yang ditimbun dalam *landfill* sudah mengalami perlakuan awal (pre-treatment) antara lain sortasi dan pencacahan agar bersifat biodegradable dan berukuran kecil-seragam.
2. Komposisi kimiawi (karbohidrat, protein dan lemak) dalam tumpukan LF relatif seragam.
3. Mesin penggerak tipe diesel empat silinder kompatibel dengan sistem HCCI.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 TPA Supit Urang Kota Malang

TPA Supit Urang terletak di Kelurahan Mulyorejo Kecamatan Sukun, Kota Malang yang didirikan sekitar tahun 1992. Areal TPA terdiri atas lahan penimbunan 13,2 Ha, kantor dan taman 2 Ha. Untuk meningkatkan kapasitasnya, Pemerintah Kota Malang telah memperluas areal penimbunan menjadi 25,2 Ha. Batas-batas area TPA Supit Urang adalah sebagai berikut :



Gambar 2.1 Peta Lokasi TPA Supit Urang Kota Malang

- Sebelah utara : berbatasan dengan sungai Sumber Songo dengan jarak $\pm 300\text{m}$
- Sebelah timur : tempat permukiman penduduk dengan jarak $\pm 700\text{m}$
- Sebelah selatan : berbatasan dengan sungai Gandulan dengan jarak $\pm 200\text{m}$
- Sebelah barat : merupakan perbukitan dan lembah.

TPA berfungsi sebagai tempat penimbunan sampah yang berasal dari berbagai TPS (Tempat Pembuangan Sementara) dalam wilayah Kota Malang. Setiap TPS mampu mengumpulkan sampah rata-rata sebanyak 700-900 m³ per hari. Volume rata-rata sampah yang masuk TPA dari Kota Malang adalah 21.000 – 28.000 m³ per bulan. Sampah tersebut tersusun dari buangan rumah tangga sebanyak 19.000 - 25.000 m³ dan buangan pasar sebesar 2.000 – 5.000 m³. Jumlah sampah industri dan sampah pertamanan yang masuk ke TPA terhitung relatif kecil.

TPA memiliki 4 sel yang sudah terisi penuh, 1 sel sedang operasional penimbunan dan 2 masih kosong untuk persiapan pengisian. Sel kosong ini mempunyai kapasitas tampung masing-masing 491.875 dan 319.580 m³. Dengan menggunakan rumus simulasi formal pertumbuhan limbah (kualitas dan kuantitas) *Jacob's Single phase Model* (divalidasi oleh TNO, Utrecht Belanda), sel kosong tersebut diperkirakan akan terisi penuh pada 2017 saat jumlah sampah Kota Malang mencapai 39.980.541 ton/tahun. Sehingga total akumulasi akumulasi sampah akan terkumpul sebanyak 3.151.273.375 ton. Timbunan sampah tersebut diperkirakan akan memproduksi biogas maksimum sebanyak 12 179 626 m³ per tahun mulai 2019. Setelah itu, produksinya akan menurun menjadi 14 784 m³/tahun sampai tahun 2065 (UMM, 2013).

2.2 Landfill

TPA dapat digolongkan sebagai *open landfill*. Cara ini termasuk sistem pembuangan paling sederhana hanya dengan menimbun sampah di tempat terbuka tanpa perlakuan yang memadai. Cara ini menimbulkan banyak masalah, seperti polusi udara (bau, toksik, gas rumah kaca), resapan cairan lindi dan kemungkinan longsor. Produksi biogas yang dihasilkan juga sangat minimal baik kuantitas maupun kualitasnya. Untuk menjamin ketersediaan biogas sebagai bahan bakar PLTSA, sampah TPA harus dikelola dengan sistem *controlled landfill* dan yang paling ideal adalah *sanitary landfill*. *Controlled landfill* merupakan metode penimbunan secara sistematis dan terkendali membentuk lapisan (layer) sampah bertingkat sesuai dengan urutan kedatangan sampah ke TPA (Gambar 2.2)

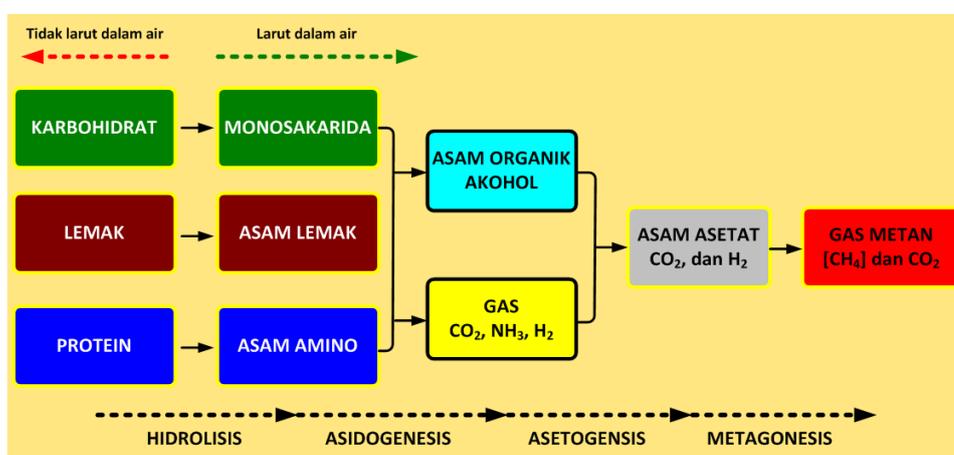


Gambar 2.2 Skematik Susunan Lapisan Sampah pada *Controlled Landfill*.

Sampah yang datang paling awal ditimbun di lapisan paling bawah, diratakan dan dipadatkan dengan bantuan alat berat. Lapisan sampah tersebut kemudian ditutup dengan tanah secara merata untuk mengurangi pelepasan gas yang berbau dan menahan penetrasi oksigen ke dalam lapisan sampah. Sehingga kondisi lapisan ini menjadi anaerobik. Lapisan sampah ini berfungsi sebagai reaktor biogas yang di bagian atasnya bisa dipasang pipa untuk penyaluran biogas ke tangki penyimpan bahan bakar. Sedangkan, di dalam tanah di bagian bawah lapisan padat dipasang pipa untuk menampung cairan lindi hasil reaksi dan air hujan untuk disalurkan ke kolam yang kemudian bisa diproses menjadi pupuk tanaman. Dengan perangkat sistem pengendalian sanitasi yang baik, “controlled landfill” bisa ditingkatkan menjadi “sanitary landfill”. Sistem ini sudah banyak diterapkan di sebagian besar negara-negara dikawasan benua Eropa untuk pengelolaan sampah kota (MSW) (Mahar, 2014). Sistem *controlled and sanitary landfill* dianggap dapat mengurangi dampak buruk pembuangan sampah dengan sistem terbuka (*open landfill*) terhadap kesehatan manusia (Gource, 2010).

Lapisan sampah dalam sistem *controlled landfill* berkisar antara 1 – 1,5 m. Setelah penimbunan beberapa minggu, senyawa organik di lapisan sampah di bagian bawah mulai mengalami proses degradasi. Lapisan ini berfungsi seperti halnya reaktor biogas semi-basah. Perbedaannya adalah reaktor biogas bisa dikontrol sedemikian rupa mendekati kondisi optimal untuk proses biologis. Sebaliknya, proses biologis dalam lapisan sampah berlangsung secara alami (William, 2005). Namun, proses pembentukan biogas di dalam reaktor dan di lapisan sampah memiliki kemiripan dalam tahapan reaksi bio-kimiawinya.

Pada sistem *controlled landfill*, pembentukan biogas diawali di lapisan paling bawah yang posisinya tepat di atas permukaan tanah. Kondisi ini dimungkinkan akibat tekanan lapisan sampah yang ada di atasnya dan juga lapisan tanah penutupnya. Pada posisi tersebut, kadar oksigen juga minimal. Berbagai spesies mikroba berperan dalam pembentukan biogas secara bersama dalam satu tim yang saling mendukung dan berlangsung secara berurutan dalam empat tahapan, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis (Gambar 2.3) (Mulato, 2014).



Gambar 2.3 Tahapan Reaksi Biokemis Pembentukan Biogas.

Tabel 2.1. Jenis Enzim Hidrolitik pada Tahapan Hidrolisis Biomassa.

Enzim	Senyawa Komplek	Produk Peruraian
Amilase	Pati (amilum)	Glukosa
Proteinase	Protein	Asam amino
Pektinase	Pektin	Mono-, di- dan oligo-sakarida
Lipase	Lemak (lipid)	Asam lemak dan gliserol
Hemiselulase	Hemiselulosa	Mono-, di- dan oligo-sakarida
Selulase	Selulosa	Selobiosa dan glukosa

(sumber: Mulato, 2014)

Pada fase hidrolisis, terjadi secara enzimatik yang dilakukan oleh mikroba fakultatif. Mikroba ini memanfaatkan oksigen yang terbawa oleh bahan baku.

Mikroba fakultatif mampu menghasilkan berbagai jenis enzim sesuai dengan jenis senyawa kompleks yang akan diuraikannya (Tabel 2.1).

Reaksi hidrolisis berlangsung secara simultan, namun dengan laju dekomposisi yang berlainan. Laju dekomposisi senyawa organik dalam biomassa yang terlarut dalam air substrat sangat tergantung pada kompleksitas struktur kimia senyawa penyusunnya. Karbohidrat berstruktur kimia sederhana (gula) akan terlarut sangat cepat menjadi glukosa. Pati akan terdegradasi oleh enzim amilase menjadi glukosa. Sedangkan, protein akan terdegradasi menjadi asam amino bebas oleh enzim protease. Lemak merupakan trigliserida yang tersusun dari asam lemak dan gliserol. Trigliserida akan dipecah oleh enzim lipase menjadi 3 molekul asam lemak bebas rantai panjang dan 1 molekul gliserol. Sementara, karbohidrat berstruktur kimia kompleks (hemi-selulosa dan selulosa) akan terpecah oleh enzim hemi-selulase dan selulase dengan laju yang sangat lambat menghasilkan senyawa mono sakarida, di sakarida dan oligosakarida.

Tabel 2.2. Jenis Senyawa Asam Produk Proses Asidogenesis.

Nama Asam	pKa	Struktur Kimia
Format	3.77	H-COOH
Asetat	4.76	CH ₃ -COOH
Propionat	4.80	CH ₃ -CH ₂ -COOH
Butirat	4.83	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -COOH
Valerat	4.84	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -COOH
Kaprilat	4.85	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -COOH

Asidogenesis merupakan proses untuk mengubah senyawa-senyawa produk reaksi hidrolisis, menjadi produk antara (*intermediate*) yang merupakan reaktan pembentuk gas metan. Seperti halnya pada fase hidrolisis, fase asidogenesis juga melibatkan banyak kelompok mikroba fakultatif yang beraktifitas secara paralel, yaitu enterobakteri, bakteriosida, asetobakteri dan eubakteri. Produk reaksi asidogenesis mempunyai 2 bentuk, yaitu fase cair dan gas. Senyawa asam rantai pendek hasil oksidasi monosakarida dan asam amino merupakan produk asidogenesis fase cair. Produk ini kemudian tercampur dengan senyawa asam

rantai panjang hasil dekomposisi senyawa trigliserida (minyak) dalam biomassa oleh enzim lipase (Tabel 2.2)

Ionisasi senyawa asam tergantung nilai pH substrat dalam reaktornya. Pada substrat dengan $\text{pH} < 4$, senyawa asam akan tidak akan mengalami ionisasi. Sebaliknya, pada kondisi $\text{pH} > 7$, senyawa asam akan terionisasi dan menghasilkan ion asam yang kemudian bersintesa dengan ion Na^{2+} atau K^+ dalam substrat membentuk senyawa garam. Dalam bentuk senyawa garam, senyawa asam tidak lagi bisa dikonversi menjadi biogas. Oleh karena itu, nilai pH substrat umumnya diatur mendekati netral untuk membatasi ionisasi senyawa asam. Mikroba fakultatif juga menghasilkan senyawa alkohol yang merupakan hasil fermentasi monosakarida. Produk asidogenesis dalam bentuk gas adalah karbondioksida (CO_2) dan gas hidrogen (H_2). Fase asidogenesis menghasilkan lebih kurang 20 % asam asetat dan 4 % gas H_2 . Seringkali, muncul juga gas amonia (NH_3) yang merupakan hasil dekomposisi protein.

Asetogenesis, Fase ini diperlukan untuk menghasilkan sebanyak mungkin senyawa utama pembentuk gas metan, yaitu asam asetat dan gas H_2 . Pada lingkungan asam dan minim oksigen, mikroba fakultatif akan menguraikan asam lemak berrantai karbon panjang, terutama dari asam propionat dan asam butirat menjadi asam asetat dan gas H_2 . Asam proprionat diuraikan oleh bakteri *syntrophobacter wolinii*, sedangkan asam butirat dipecah oleh *syntrophomonas wolfei*. Kedua jenis mikroba tersebut memanfaatkan sedikit oksigen (O_2) yang masih terlarut dalam substrat (*dissolved*) atau terikat (*bounded-oxygen*) dalam biomassa. Saat oksigen terlarut sudah habis, substrat berubah menjadi anaerobik. Kondisi ini akan mengaktifasi bakteri anaerobik untuk melanjutkan reaksi fase asetogenik. Mikroba sintrofomonas, sintrofus, klostridium dan sintrobakter, yang bersifat anaerobik secara bersama akan menghasilkan gas H_2 dari senyawa asam.

Konsentrasi H_2 dalam reaktor yang berlebihan akan menghalangi peruraian asam propionat dan butirat menjadi asam asetat. Secara termodinamis, keduanya mempunyai nilai energi bebas Gibbs ($\Delta G'_o$) positif. Suatu indikasi bahwa reaksi peruraian asam propionat dan butirat cenderung bergeser ke kiri seperti reaksi A dan B (Tabel 2.3). Oleh karena itu, konsentrasi H_2 harus diminimalkan supaya stokiometris reaksi asetogenik selalu bergeser ke arah

kanan. Mikroba metanogenik harus dirangsang mengkonsumsi gas H₂ lebih banyak untuk membentuk gas metan (reaksi C). Pada kondisi substrat defisit gas H₂, nilai energi bebas ($\Delta G'_o$) reaksi A dan B berubah menjadi negatif yang memicu pembentukan asam asetat lebih banyak, seperti ditunjukkan oleh reaksi imbiose bakteri asetogen dan metanogen pada Tabel 2.3 berikut,

Tabel 2.3. Mekanisme Reaksi Pembentukan Asam Asetat dan Gas H₂.

	Persamaan Reaksi Kimia	$\Delta G'_o$ [kJ/mol]
Bakteri penghasil H₂ [asetogen]		
A	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$	+48,1
B	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+76,1
Pembentukan CH₄ dengan reaktan H₂ [metanogen]		
C	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135,6
	$4\text{H}_2 + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-104,6
Simbiose bakteri asetogen dan metanogen		
A+C	$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{CH}_4$	-39,4
B+C	$4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 12\text{H}_2 \rightleftharpoons 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{CH}_4$	-102,4

(sumber: Mulato, 2014)

Untuk menghasilkan gas metan yang maksimal, mikroba asetogen (penghasil asam asetat) dan mikroba metanogenik (pemakan gas H₂) harus bersinergi. Jika sinergi ini terjadi tekanan partial gas H₂ dalam reaktor terjaga dalam posisi rendah. Dengan nilai energi bebas – 135, 60 kJ/mol, bakteri metanogen akan memanfaatkan gas H₂ dan CO₂ menjadi gas metan dengan lebih cepat dari pada sintesa H₂ dan ion bikarbonat membentuk asam asetat ($\Delta G'_o = -104,60$ kJ/mol).

Metanogenesis adalah fase akhir dari reaksi pembentukan biogas. Gas metan terbentuk dari asam asetat, gas H₂, gas CO₂ dan sedikit alkohol oleh beberapa jenis mikroba metanogenik. Bakteri ini sangat aktif dalam proses pembusukan bahan organik di alam sehingga substrat biomassa tidak perlu diinokulasi secara khusus dengan jenis bakteri ini dari sumber luar. Selain sensitif terhadap oksigen, bakteri metanogenik juga tidak bisa bertahan pada lingkungan bertoksik (beracun), antara lain senyawa garam. Jenis-jenis bakteri metanogen

yang terlibat dalam reaksi pembentukan biogas terdiri atas 3 kelompok (Tabel 2.4).

Tabel 2.4. Jenis Mikroba Metanogenik Penghasil Gas Metan (CH₄).

Reaktan	Reaksi	Jenis mikroba
Hidrogen	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	Hidrogenotofik
Senyawa metil	$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Metilotrofik
Asam asetat	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	Asetotrofik

(sumber: Mulato, 2014)

Kelompok hidrogenotrofik memanfaatkan gas H₂ dan CO₂ sebagai reaktan pembentuk gas metan. Mikroba ini termasuk pemakan gas H₂ yang bisa mendorong asam butirat terhidrolisis oleh bakteri asetogenik menjadi asam asetat (reaksi pertama Tabel 2.4). Surplus asam asetat dalam substrat pada fase akhir akan mempercepat mikroba asetotrofik aktif untuk memproduksi gas metan lebih banyak disertai pelepasan gas CO₂. Kelompok ketiga adalah mikroba metilotrofik yang menghasilkan gas metan dari senyawa berbasis metil, antara lain metanol (CH₃OH) dan metil alkohol (C₂H₅OH). Namun, populasi mikroba jenis ini dalam substrat relatif lebih kecil dibandingkan jumlah mikroba kelompok satu dan dua di atas. Di antara ketiganya, mikroba jenis asetotrofik paling mendominasi reaksi pembentukan biogas. Secara kumulatif, lebih kurang 70% gas metan dihasilkan oleh mikroba asetotrofik dan sisanya sebanyak 30 % diproduksi oleh mikroba hidrogenotrofik.

Waktu penuh *landfill* dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$t_l = \frac{V_{landfill}}{360 \cdot m_{sd} / \rho_s} \quad (2.1)$$

Dengan:

t_l = waktu penuh *landfill* (Tahun)

$V_{landfill}$ = kapasitas tempat (m³)

m_{sd} = jumlah sampah perhari (Ton)

ρ_s = kerapatan sampah (Ton/m³)

2.3 Biogas

Biogas merupakan sumber energi terbarukan dan bersih yang sangat bermanfaat untuk mengatasi masalah lingkungan yang ditimbulkan akibat bahan bakar fosil (Gupta, 2012). Biogas yang dihasilkan melalui proses anaerob terdiri dari komponen utama, Metana (CH_4) 50-80% dan karbon dioksida (CO_2) 20-25%, serta komponen lain seperti, hidrogen sulfida (H_2S), hidrogen (H_2), nitrogen (N_2), oksigen (O_2), argon (Ar), karbon monoksida (CO) dan sejumlah sangat kecil (*trace*) gas amonia (NH_3) yang jumlahnya $< 15\%$ (Cacho, 2011). Sedangkan, menurut Nutiu, 2014, biogas terdiri dari: 50-70% Metana, CH_4 ; 20-25% Karbon dioksida, CO_2 ; 0-10%, Nitrogen, N_2 ; 0-1% Hidrogen, H_2 ; 0-8% Hidrogen sulfida, H_2S ; 0-2% Oksigen, O_2 . Berdasarkan referensi lainnya, biogas terdiri dari metana (30-60%), CO_2 (15-30%), nitrogen (5-20%), Oksigen (1-10%) dan senyawa lain dalam jumlah kecil seperti H_2S dan NH_3 . Biogas juga mengandung senyawa organik yang mudah menguap (*Volatile Organic Compounds* = VOCs) (Naros, 2009). Sementara itu, biogas yang dihasilkan oleh *landfill* (LFG) di zona IV TPA Supit Urang Kota Malang, mengandung gas metana rata-rata 58,40 % (BPPT, 2013).

Jika tidak dikelola secara benar, biogas yang dihasilkan oleh TPA akan menjadi gas liar yang sangat berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Selain mudah terbakar dan sumber gas rumah kaca, biogas mengandung VOC yang sangat berbahaya bagi sistem pernafasan manusia. Gas ini memiliki kelarutan rendah dan tekanan uap tinggi yang sangat mudah menyebar ke lingkungan perumahan dekat TPA (Rasi, 2007). Sehingga, biogas dari TPA seharusnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk alat pemanas ruangan, pemanas air, dan untuk menghidupkan generator listrik (Kymalainen, 2012 dan Sigot, 2014). Bahkan beberapa sarana transportasi di Eropa telah menggunakan biogas sebagai bahan bakar penggerak bis kota (Borjesson, 2012). Efisiensi bahan bakar biogas pada mesin tergantung pada prosentase kandungan metananya dan juga tingkat teknologi mesin pada sarana transportasi yang digunakan (Nuti, 2014). Selain itu, senyawa sulfur dalam bentuk senyawa siloksan (senyawa silikon organik), senyawa halogen (klor) dan amonia, yang terkandung dalam biogas dapat menyebabkan kerusakan mesin lebih cepat (Rey, 2013).

Unsur *siloxanes* dalam biogas dapat menyebabkan masalah ketika dibakar. Senyawa organosilikon semi-volatile akan berubah menjadi silika yang padat dan keras. Karena bersifat sangat abrasif, senyawa ini berpotensi merusak bagian-bagian mesin yang bergerak (Arnold, 2010 dan Sigot, 2014). Sedangkan, senyawa organosulphur atau organoklorin mudah bereaksi dengan oksigen dan air selama proses pembakaran membentuk H_2SO_4 (asam sulfat) dan HCl (asam klorida). Keduanya menyebabkan korosi di bagian permukaan ruang pembakaran (Alen, 1997). Selain itu, pada saat suhu pembakaran, beberapa jenis senyawa halogen dalam biogas akan membentuk dioksin dan furan polihalogenat yang mempunyai sifat sebagai gas beracun (Persson, 2007). Untuk itu, biogas hasil dari TPA perlu melewati proses purifikasi. Sehingga, biogas memiliki kandungan metana yang tinggi dan bebas dari senyawa-senyawa yang merusak mesin dan pembentuk gas beracun pada gas hasil pembakarannya (Hernandes, 2011).

2.4 Purifikasi Biogas

Salah satu cara untuk mengurangi kadar siloxanes dalam biogas dapat adalah mengkonversinya menjadi silika gel (Sigot, 2014). Sementara untuk tujuan komersial, purifikasi biogas sampai 99% dapat dilakukan dengan teknologi cryogenic packed-bed (Tuiner, 2012). Proses ini menggunakan beberapa tahapan, yaitu pendinginan, pemisahan, dan pemulihan. Proses pendinginan ditujukan untuk kondensasi/desublimasi kontaminan, antara lain gas CO_2 dan H_2O , sementara itu CH_4 dan N_2 tetap dalam keadaan gas. Karena dalam fasa cair, CO_2 dan H_2O akan mudah dipisahkan. Untuk mencegah tercampurnya gas O_2 dengan CH_4 yang berpotensi menimbulkan ledakan, maka pemisahan N_2 dilakukan pada tahapan akhir proses tanpa mengurangi tekanan (Tuiner, 2012).

Cara yang lebih mudah untuk mengurangi kandungan gas H_2S dan CO_2 sampai di bawah 2% juga dapat dilakukan dengan menggunakan suspensi dolomit (Makareviciene, 2015). Dolomite merupakan bahan tambang alam yang mengandung mineral Magnesium (Mg) dan Kalsium (Ca). Keduanya membentuk ikatan kimia $CaMg(CO_3)_2$. Selain memakai suspensi padat, purifikasi biogas juga bisa dilakukan dengan pelarut kimiawi, seperti *monoethanolamine* (MEA), larutan alkanolamin (Liu, 2014), cairan ionik (Gotz, 2013), larutan amina (Gawel, 2012),

dan kondensasi membran cair (Poloncarzova, 2011). Namun, teknik purifikasi biogas harus dipilih atas dasar kualitas biogas hasil pemurnian, biaya dan kemudahan implementasi di lapangan. Sebagai ilustrasi, biaya pemurnian biogas dengan suspensi dolomit hampir 6 kali lebih murah daripada menggunakan sorbent kimia, seperti *monoethanolamine* (MEA). Sementara itu, biogas hasil purifikasi dengan suspensi dolomit mempunyai kemurnian sangat tinggi. Saat diuji pada mobil, konsumsi biogas menunjukkan 1,5 kali lebih irit daripada mobil dengan bahan bakar bensin 95 Plus. Sedangkan pada uji coba dengan mesin diesel, biogas yang sama hanya memberikan konsumsi sedikit lebih irit.

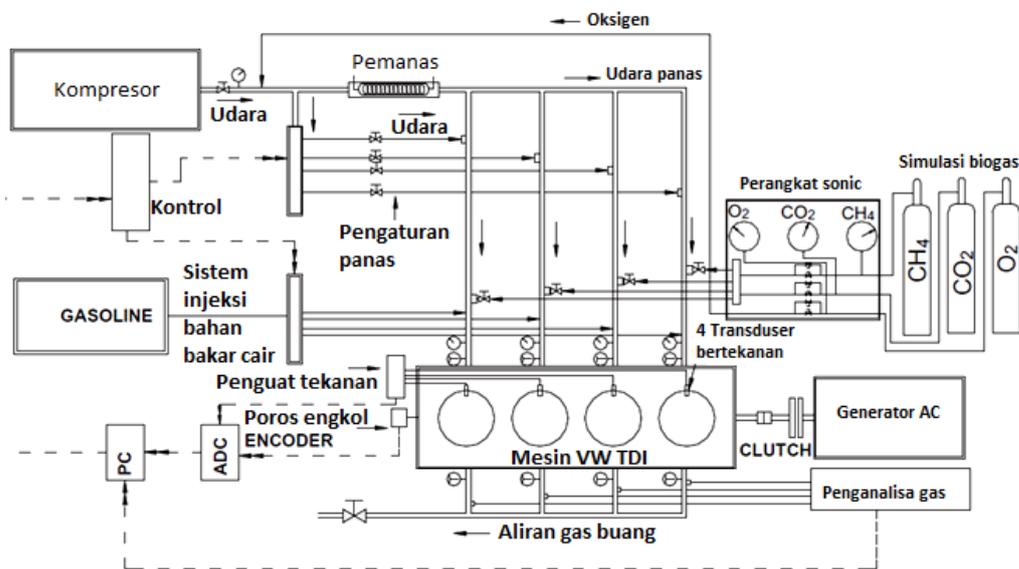
2.5 Biogas untuk generator mesin HCCI

Dengan sifatnya sebagai gas, biogas memberikan kinerja lebih baik pada mesin berbasis *internal combustion* (IC) (Stefan, 2004). Oleh karena itu, biogas telah dapat dimanfaatkan secara penuh sebagai bahan bakar generator listrik berpenggerak mesin berbasis IC. Uji coba generator listrik dengan mesin IC berbahan bakar biogas pernah dilakukan oleh Surata (2014). Mesin IC mampu beroperasi pada putaran 1500 rpm secara normal. Biogas yang digunakan sudah mengalami purifikasi dengan kandungan H₂S dan H₂O mendekati nol setelah biogas dilewatkan kolom *sulfide desulfurizer*. Sedangkan, untuk generator berpenggerak mesin berbasis disel, biogas perlu dicampur dengan bahan bakar disel (solar) atau *dual-fuel*. Hasil uji coba jangka panjang menunjukkan bahwa antara mesin disel dengan bahan bakar konvensional dan dual-fuel memberikan kinerja yang sebanding (Tippayawong, 2007).

Motor diesel dan motor otto termasuk dalam katagori mesin pembakaran internal. Keduanya merupakan sumber penggerak utama pada alat transportasi dan generator listrik. Pada mesin diesel, pembakaran terjadi secara spontan (tanpa sumber api) ketika bahan bakar diinjeksikan ke ruang pembakaran yang bertekanan serta bersuhu tinggi. Untuk motor jenis otto, pembakaran terjadi karena adanya sumber api atau busi (*spark plug*). Dengan tekanan piston yang lebih tinggi, motor diesel dapat menghasilkan daya lebih besar dibandingkan dengan motor otto. Akan tetapi dengan bahan bakar yang lebih kental, gas buang motor diesel berpotensi lebih polutif dibandingkan dengan motor otto.

Pada mesin berbasis Otto, bahan bakar gasolin (bensin) dicampurkan dengan udara terlebih dahulu (*pre-mixed*) supaya homogen sebelum masuk ke masuk pembakaran. Sedangkan pada mesin diesel, minyak diesel dan udara tidak mengalami percampuran awal (*pre-mixed*). Keduanya dimasukkan ruang pembakaran melalui jalur yang terpisah dan waktu yang tidak bersamaan. Motor bakar HCCI menggunakan konsep pembakaran gabungan antara motor Otto dan disel dengan tujuan mendapatkan sinergi antara keduanya. (Widadi, 2009). Pada sistem pembakaran HCCI, bahan bakar biogas dicampurkan terlebih dahulu dengan udara dan kemudian disusul dengan injeksi bensin ke dalam ruang pembakaran mesin disel.

Pengujian biogas pada model HCCI telah dilakukan dengan menggunakan mesin mobil *VW TDI, four stroke, four cylinders, water cooled, Diesel engine* yang telah dimodifikasi. Skema alir pengujian dan spesifikasi mesin disajikan masing-masing pada Gambar 2.4 dan Tabel 2.5.



Gambar 2.4 Skema Eksperimen dengan Mesin VW TDI (Bedoya, 2012)

Pada tahap pernyalaan awal, sistem HCCI hanya menggunakan bahan bakar bensin untuk tahap pemanasan selama kurang lebih 5 menit. Setelah mesin panas, biogas bercampur udara dimasukkan ke silinder 2 – 3 dan secara bersamaan aliran bensin untuk silinder tersebut secara bertahap dikurangi

dimatikan. Pada rasio stokiometri biogas dan udara 0,2 sampai 0,5, mesin mesin HCCI dapat beroperasi secara normal dan stabil dengan efisiensi thermal di atas 40% dan nilai IMEPg (*gross Indicated Mean Effective Pressure*) maksimum 8,5 bar. Sistem HCCI dapat menghemat penggunaan bahan bakar antara 15 sampai 20%. Selain itu, pada beban yang sama. serta emisi NOx HCCI juga dapat menurunkan emisi NOx sampai di bawah 20 ppm. (Y.Huang, 2004). Dengan demikian, mesin HCCI dengan bahan bakar biogas memiliki masa depan yang baik dan layak digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik (Bedoya 2012).

Tabel 2.5 Spesifikasi Mesin

Tipe mesin	VW TDI, empat tak, empat silinder, berpendingin air, mesin disel
Urutan pembakaran	1-3-4-2
Kompresor turbin orisinil	Turbocharged
Kompresor turbin modifikasi	Supercharged and heated
Kapasitas mesin	1890 cm ³
Perbandingan kompresi orisinil	19.5:1
Perbandingan kompresi modifikasi	17
Bore x stroke	79.5 x 95.5 mm
Panjang stang seher	144.0 mm
Valves (intake, exhaust)	1.1
Intake valve open (IVO)	16 CAD ATDC
Intake valve close (IVC)	25 CAD ABDC
Exhaust valve open (EVO)	28 CAD BBDC
Exhaust valve close (EVC)	19 CAD ATDC
Daya keluaran awal	60 kW at 3300 rpm
Torsi maksimum orisinil	210 Nm at 1800 rpm
Ruang pembakaran orisinil	Bowl
Ruang pembakaran modifikasi	Hemispherical/shallow bowl

Sumber: (Bedoya, 2012)

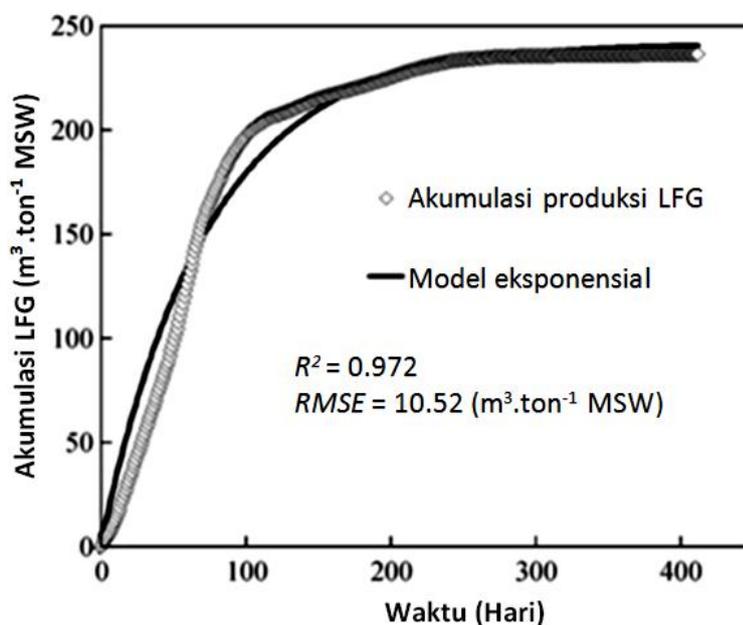
Pada tahap penyalaan awal, sistem HCCI hanya menggunakan bahan bakar bensin untuk tahapan pemanasan selama kurang lebih 5 menit. Setelah mesin panas, biogas bercampur udara dimasukkan ke silinder 2 – 3 dan secara bersamaan aliran bensin untuk silinder tersebut secara bertahap dikurangi dimatikan. Pada rasio stokiometri biogas dan udara 0,2 sampai 0,5, mesin HCCI dapat beroperasi secara normal dan stabil dengan efisiensi thermal di atas 40% dan nilai IMEPg (*gross Indicated Mean Effective Pressure*) maksimum 8,5 bar.

Sistem HCCI dapat menghemat penggunaan bahan bakar antara 15 sampai 20%. Selain itu, pada beban yang sama, serta emisi NO_x HCCI juga dapat menurunkan emisi NO_x sampai di bawah 20 ppm. (Y.Huang, 2004). Dengan demikian, mesin HCCI dengan bahan bakar biogas memiliki masa depan yang baik dan layak digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik (Bedoya 2012).

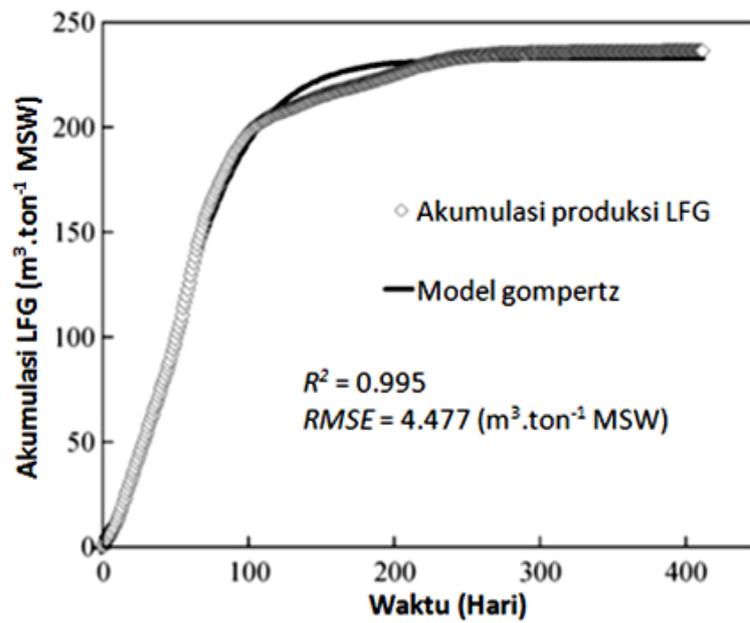
2.6 Pemodelan Produksi Bogas, Purifikasi dan Pembakaran

2.6.1 Produksi LFG (*Landfill Gas*)

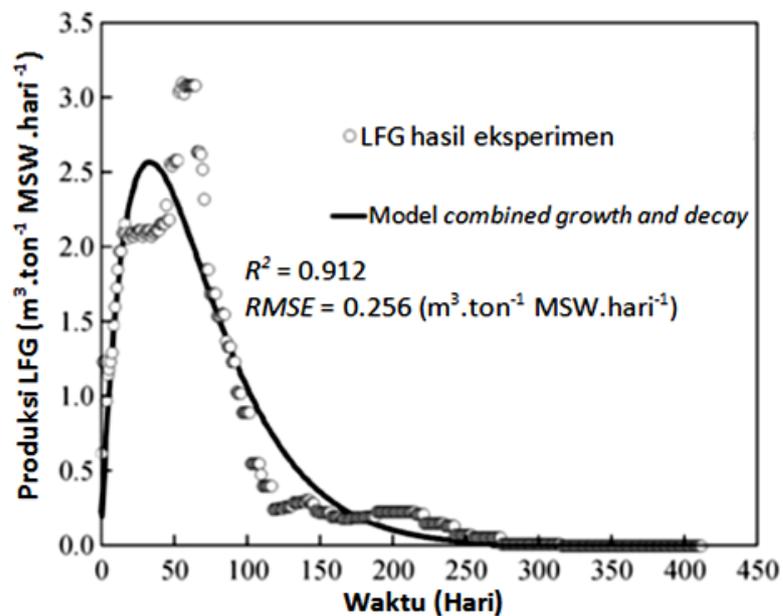
Untuk jumlah dan laju produksi gas yang dihasilkan dari sistem landfill dengan pretreatment dapat disimulasikan dengan menggunakan beberapa model. Model-model tersebut antara lain, orde eksponensial (Gioannis, 2009), model Gompertz yang dimodifikasi (Mali, 2012), model komponen tunggal yang merupakan gabungan model pertumbuhan dan pembusukan (Zacharof, 2004), model fungsi Gaussian (Lo, 2010) dan yang terakhir model multi komponen (Mahar, 2014).



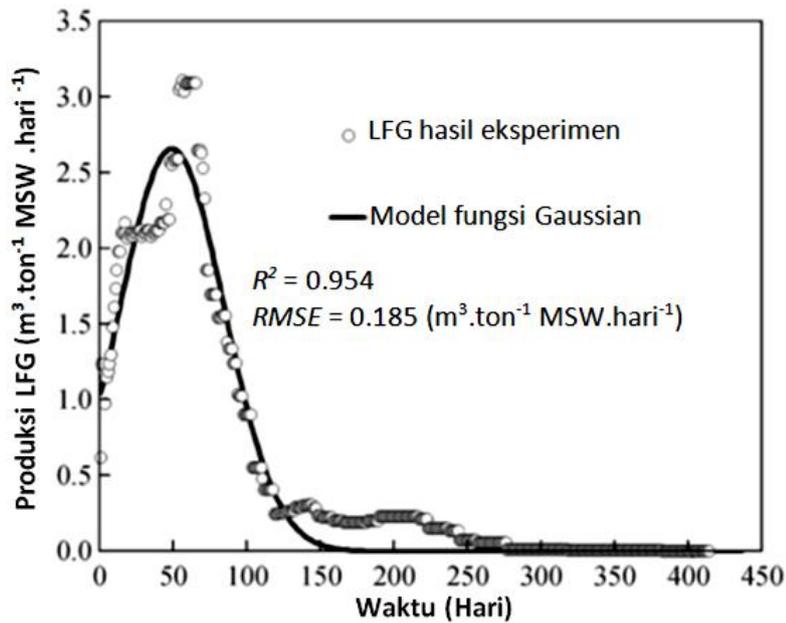
Gambar 2.5(a) Kesesuaian Model Eksponensial dengan Jumlah Produksi LFG Terhadap Waktu



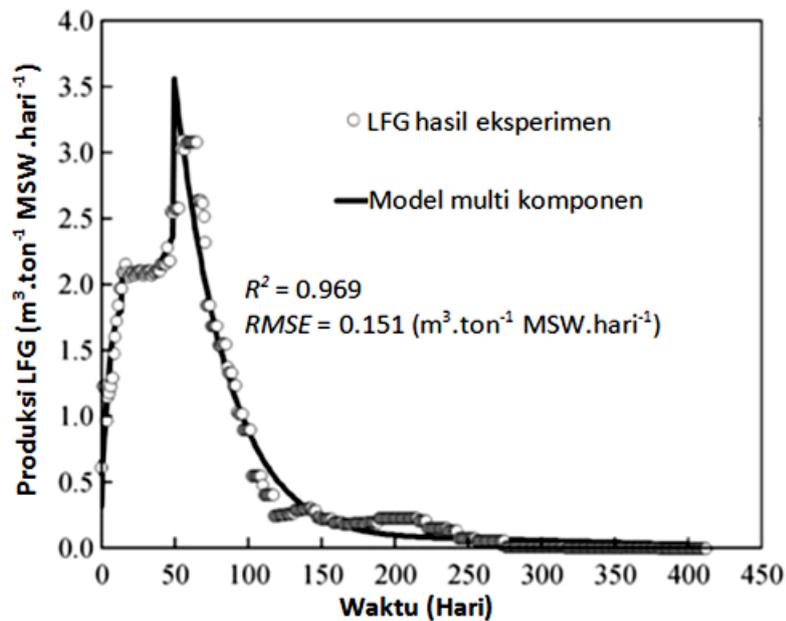
Gambar 2.5(b) Kesesuaian Model Gompertz dengan Jumlah Produksi LFG Terhadap Waktu



Gambar 2.5(c) Kesesuaian Model *Combined Growth and Decay* dengan Nilai Produksi LFG Terhadap Waktu



Gambar 2.5(d) Kesesuaian Model Gaussian dengan Nilai Produksi LFG Terhadap Waktu



Gambar 2.5(e) Kesesuaian Model Multi Komponen dengan Nilai Produksi LFG Terhadap Waktu

Pemodelan multi komponen dikembangkan dari model komponen tunggal dan didasarkan pada proses biokimia yang terjadi pada sistem landfill. Pemodelan ini mencakup komponen yang memiliki sifat degradasi cepat, sedang dan lambat. Selain itu, model ini juga dilengkapi dengan analisis secara statistik. Berdasarkan

validasi yang telah dilakukan, model multi komponen memberikan hasil pendugaan produksi LFG yang paling mendekati dengan yang terjadi pada penimbunan sampah sistem landfill dengan pretreatment, seperti disajikan pada Gambar 2.5a s/d 2.5e (Mahar, 2014).

Berikut merupakan model matematika multi komponen,

$$LFG(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{m-1} A_{j+1} (t_i - t_j) e^{[-k_{j+1}((t_i - t_j))]} ; \text{ dengan } i \neq j \quad (2.2)$$

Dengan:

LFG (t) = produksi LFG pada waktu t, dalam m³. Ton⁻¹ MSW (DM) . hari⁻¹

A = amplitudo dalam m³. Ton⁻¹ MSW (DM) . hari⁻²

k = konstanta laju reaksi LFG dalam hari⁻¹

n = jumlah hari

m = jumlah komponen biodegradable heterogen MSW setelah dipretreatment

t_j = waktu tunda, yang didefinisikan sebagai periode antara waktu mulai dan akhir komponen biodegradable.

Jika terdapat tiga komponen biodegradabel (m = 3), cepat, sedang, dan lambat.

Maka persamaan tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut,

$$LFG(t) = A_1 t e^{(-k_1 t)} ; j = 0 \text{ dan } t < t_1 \quad (2.3)$$

$$LFG(t) = A_1 t e^{(-k_1 t)} + A_2 (t - t_1) e^{[-k_2 (t - t_1)]} ; j = 1 \text{ dan } t_1 < t < t_2 \quad (2.4)$$

$$LFG(t) = A_1 t e^{(-k_1 t)} + A_2 (t - t_1) e^{[-k_2 (t - t_1)]} + A_3 (t - t_2) e^{[-k_3 (t - t_2)]} ; j = 2 \text{ dan } t > t_2 \quad (2.5)$$

Dengan:

LFG (t) = produksi LFG pada waktu t, dalam m³. Ton⁻¹ MSW (DM) . hari⁻¹

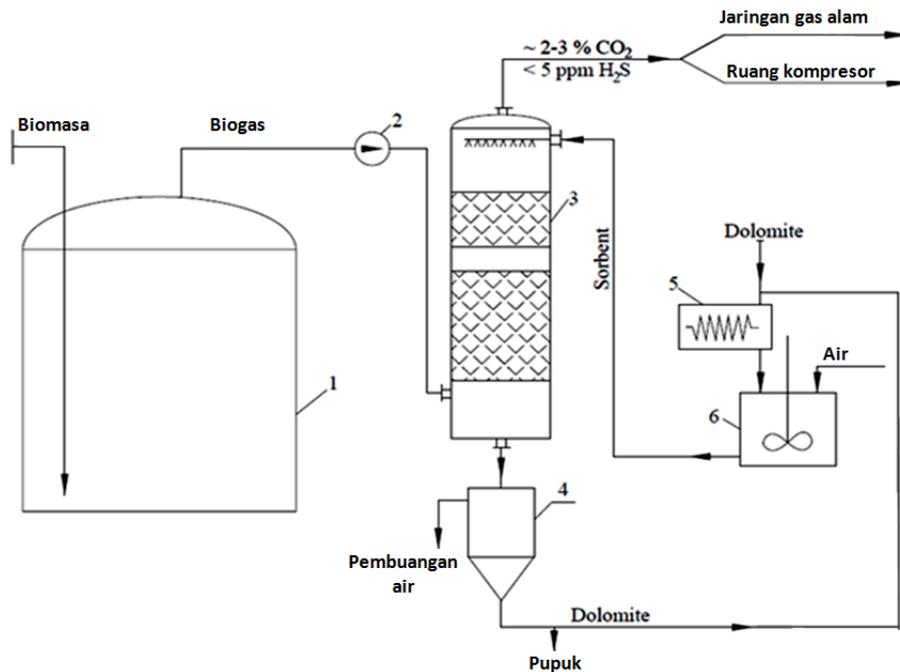
A₁, A₂, A₃ = amplitudo dalam m³. Ton⁻¹ MSW (DM) . hari⁻² untuk bahan degradable yang cepat, sedang, dan lambat.

k₁, k₂, k₃ = konstanta laju reaksi LFG dalam hari⁻¹ untuk bahan degradable yang cepat, sedang, dan lambat.

t₁, t₂, t₃ = waktu tunda produksi LFG antar fraksi dari bahan organik

2.6.2 Purifikasi

Model purifikasi dipilih dengan menggunakan suspensi dolomit (Makareviciene, 2015). Diagram alir tahapan proses pemurnian biogas menggunakan suspensi dolomit disajikan pada Gambar 2.6 berikut ini,



Gambar 2.6 Diagram alir tahapan proses pemurnian biogas menggunakan suspensi dolomit (1- reaktor biogas/ landfill; 2- katup; 3 - absorber; 4- precipitator; 5- pemanasan tungku; 6- tangki sorben.) (Makareviciene, 2015)

Bagian terpenting dari unit purifikasi biogas adalah menara absorber. Sebagai absorben adalah partikel dolomit dengan ukuran $100 \mu\text{m}$ dan telah dikalsinasi pada suhu tinggi dalam tanur pemanas. Suspensi absorber dibuat dari campuran partikel dolomit dengan air. Suspensi dolomit dialirkan lewat bagian atas menara absorber dan disemprotkan secara merata menuju arah bawah menara. Secara bersamaan, biogas dialirkan dari bagian bawah menara. Keduanya akan berkontak langsung secara berlawanan arah di sepanjang penampang menara. Karena bersifat sangat aktif, partikel dolomit dalam suspensi akan menyerap gas CO_2 , H_2S dan NH_3 dan kemudian keluar menuju bagian bawah menara. Sementara itu, gas metana tidak terserap oleh partikel dolomit keluar dari bagian atas menara

yang kemudian bisa ditampung dalam tangki penyimpan sebagai sumber bahan bakar. Sebaliknya, suspensi dolomit yang telah mengandung gas CO₂, H₂S dan NH₃ diendapkan untuk dipisahkan dari airnya. Dolomit padat diregenerasi lagi dalam tanur untuk digunakan ulang sebagai absorber. Sebagian dolomit yang sudah jenuh bisa digunakan sebagai pupuk pertanian.

Untuk memperoleh hasil purifikasi biogas yang optimal, laju aliran suspensi dolomit harus disesuaikan dengan komposisi kimiawi biogasnya. Menurut Makareviciene (2015), perbandingan optimal antara masukan biogas dan suspensi dolomit adalah $400 / 39.6 = 10.1 \text{ m}^3/\text{m}^3_{\text{abs}}$. Hal ini berarti setiap laju aliran biogas dari 400 m³/h dengan kandungan rata-rata 30% CO₂, suspensi dolomit mampu menyerap gas CO₂ sebesar 0.031 m³/detik. Biogas yang keluar menara sebanyak 280 m³/h dengan kandungan sisa CO₂ sekitar 2%, Kondisi optimal tersebut berlaku pada dimensi absorber dan tekanan operasi tertentu. Proses pemurnian pada tekanan atmosfer dibutuhkan dimensi menara absorber dibuat dengan diameter 2 m dan tinggi 15 m. Namun, pada kondisi biogas bertekanan (misalnya 3atm), maka dimensi menara dapat dibuat jauh lebih kecil, yaitu diameter 1,5 m dan tinggi antara 8-10 m. Pada tekanan ini, waktu kontak biogas dengan suspensi absorben hanya berlangsung sekitar 5 menit. LFG yang semula mengandung kurang lebih 40% CO₂, CH₄ 57-58%, 1,5-2% N₂, uap air, dan 3.000 ppm H₂S, setelah melewati menara absorber dapat dimurnikan dengan baik. Sehingga, biogas hasil purifikasi ini hanya mengandung residu CO₂ sebanyak 2-3% dan H₂S kurang dari 5 ppm dan tanpa uap air. Biogas yang demikian bisa digunakan langsung sebagai bahan bakar mesin HCCI (Makareviciene, 2015).

2.6.3 Diesel HCCI

Model untuk generator mesin HCCI mengadopsi dari sistem yang telah dikembangkan oleh Bedoya (2012). Pada tahap awal lima menit pertama penyalaan, mesin HCCI beroperasi dengan menggunakan bahan bakar bensin saja. Operasi ini bertujuan untuk pemanasan sistem ruang pembakaran. Gas buang hasil pembakaran mesin juga dimanfaatkan untuk, memanaskan biogas sehingga suhunya meningkat menjadi 210 °C sebelum diinjeksikan ke dalam mesin HCCI.

Rasio stokiometri pembakaran antara biogas dan udara ditetapkan pada nilai 0.4, dengan tekanan campuran sebesar 2.2bar. Pada kondisi ini akan diperoleh efisiensi pembakaran lebih dari 80% dan efisiensi sistem sebesar 40%. Aliran biogas yang akan dimanfaatkan pada mesin HCCI disesuaikan dengan alir keluaran biogas dari unit purifikasinya. Pemodelan dibuat agar sistem dapat menghasilkan keluaran sekitar 1 MW.

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Tempat dan Waktu

Pengambilan data berkaitan dengan sampah dan LFG dilakukan di TPA Supit Urang Kota Malang. Peyusunan model PLTSa dilakukan di Jurusan Teknik Fisika ITS Surabaya. Adapun waktu pelaksanaan kegiatan ini dilakukan pada Januari - Desember 2015.

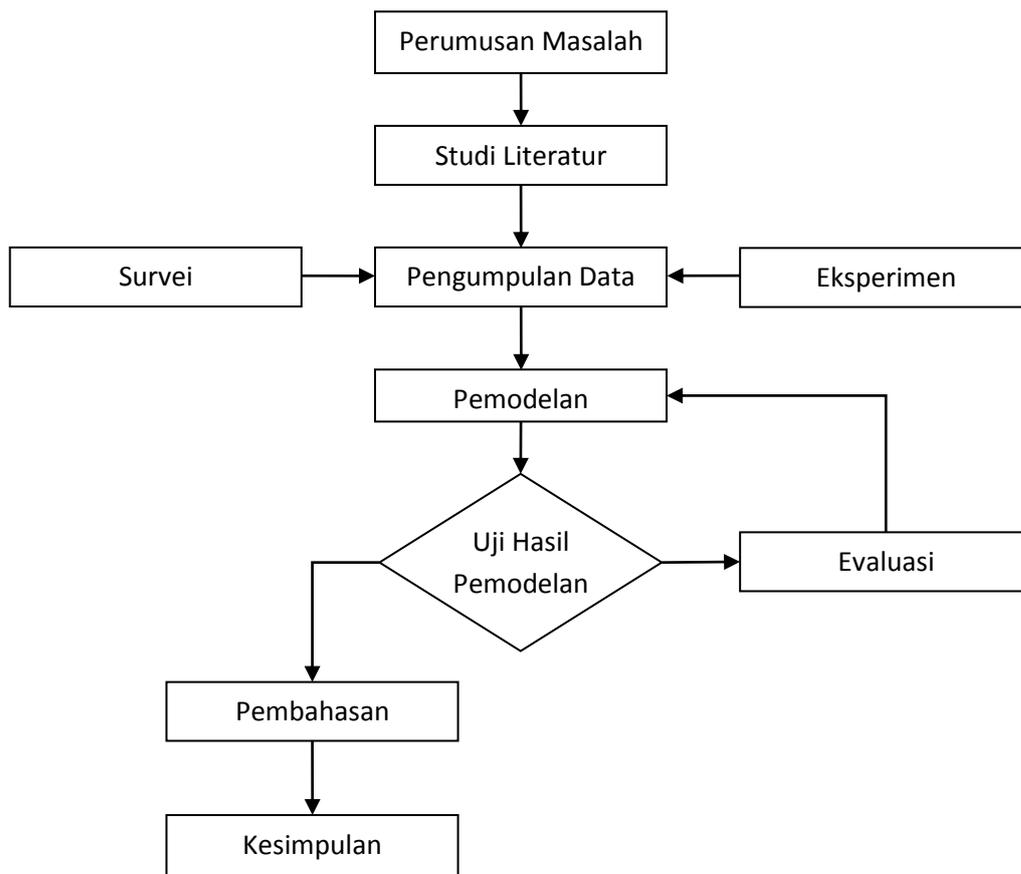
3.2 Sistematika Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan kegiatan, yaitu,

1. Perumusan masalah: identifikasi masalah yang nantinya sebagai dasar untuk menentukan arah dan fokus penelitian.
2. Studi literature: pengumpulan informasi yang terkait dengan pemodelan yang akan dilakukan, baik berupa teori ataupun hal-hal yang relevan. Sumber pustaka diperoleh dari buku, artikel ilmiah, jurnal, dan dokumen lainnya.
3. Pengumpulan data: pengumpulan data diperoleh dari kegiatan survei dan eksperimen.
4. Pemodelan: penyusunan model dengan menggunakan program Microsoft Office Excel. Model mempunyai bentuk persamaan matematis dengan variabel yang terkait dengan penerapan sistem PLTSa yang meliputi, produksi biogas dari *landfill*, filter biogas, pembakaran pada mesin HCCI, dan generator.
5. Pengujian model: validasi model dengan memakai masukan data riil yang diperoleh dari TPA Supit Urang Kota Malang, membandingkan dengan hasil pemodelan yang sudah ada dalam referensi yang relevan.
6. Evaluasi pemodelan: memperbaiki pemodelan jika diperlukan
7. Hasil dan pembahasan: menjelaskan hasil pemodelan final dan batas-batas penerapan model dalam skala aplikasinya.

8. Kesimpulan: jawaban dari tujuan dilakukannya penelitian. Berkaitan dengan Pemodelan PLTSa berbasis *landfill pretreatment* dengan menggunakan mesin generator HCCI dan estimasi kapasitas daya listrik yang mampu dibangkitkan oleh PLTSa.

Diagram alir tahapan penelitian ini dapat disajikan pada Gambar 3.1 berikut ini,



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.3 Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan dalam 2 tahap, yaitu survei dan eksperimen laboratorium. Data survei diperoleh dari lapangan yang berkaitan dengan kondisi TPA dan sampah yang ada di Kota Malang. Sedangkan data eksperimen merupakan analisis kimiawi sampah yang meliputi kandungan karbohidrat, lemak, dan protein dan pengaruhnya terhadap produksi biogas. Eksperimen dilakukan dengan menguji beberapa komponen utama sampah organik yang terdapat di kota

Malang. Adapun sampah yang digunakan sebagai bahan eksperimen adalah wortel, kangkung, bayam, nasi, dan pepaya. Pemilihan bahan tersebut didasarkan pada dominasi dan perwakilan dari kelompok buah, sayur, daun-daunan, dan sisa makanan pokok yang ada dalam sampah.

Bahan-bahan tersebut diproses secara terpisah. Pertama-tama bahan tersebut dihancurkan, kemudian ditambahkan air dan kotoran sapi dengan perbandingan 3:1:1. Selanjutnya dimasukkan kedalam tempat yang telah disediakan agar proses pembentukan biogas dapat terjadi. Sebagian dari bahan tersebut dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui nilai TS (*Total Solids*) dan VS (*Volatile Solids*) dari bahan tersebut. Pencatatan hasil produksi biogas dilakukan setiap hari.

Pengujian VS dilakukan dengan pengukuran volume bahan dan dilanjutkan dengan proses pengeringan sampai dengan suhu 103°C. Setelah itu dilakukan pengukuran masa. Bahan kemudian dipanaskan lagi sampai suhu 550 °C, selanjutnya didinginkan pada desikator dan ditimbang. Nilai VS dihitung dengan persamaan

$$VS = \frac{TS(masa\ bahan\ setelah\ 103C) - masa\ bahan\ setelah\ 550C}{TS} \times 100\% \quad (3.1)$$

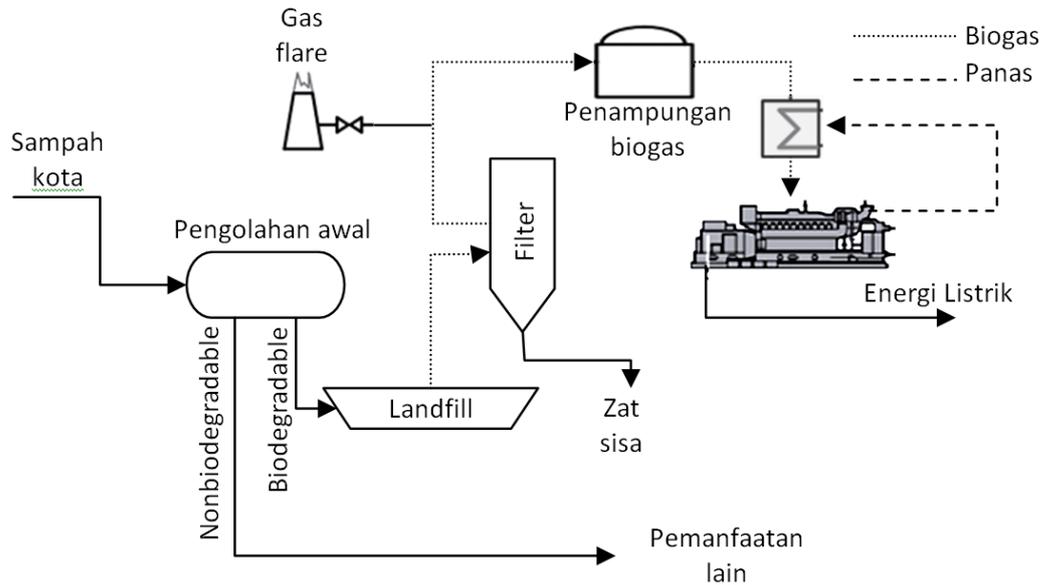
Dalam penelitian dilakukan pengujian terhadap lima subtrat. Adapun kelima subtrat tersebut diperoleh dengan mencampurkan masing-masing sampah, dengan kotoran sapi dan air. Komposisi subtrat terdiri dari 3kg sampah, 1kg kotoran sapi, dan 1kg air. Secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi Subtrat yang Digunakan Sebagai Sampel Percobaan

Subtrat	Komposisi
1	wortel, kotoran sapi, dan air
2	kangkung, kotoran sapi, dan air
3	bayam, kotoran sapi, dan air
4	nasi, kotoran sapi, dan air
5	pepaya, kotoran sapi, dan air

3.4 Desain Sistem PLTSa

Sistem PLTSa yang akan dimodelkan seperti pada Gambar 3.2.



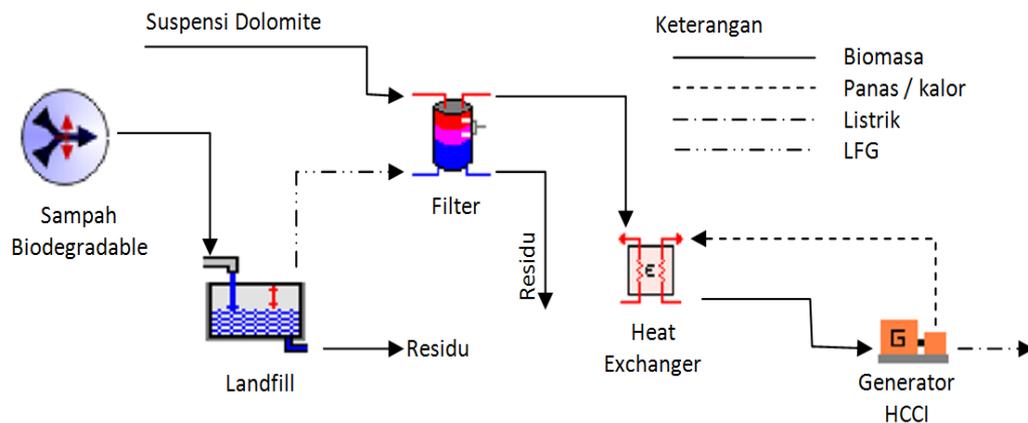
Gambar 3.2 Skema PLTSa

Sampah kota yang masuk ke TPA dipisahkan berdasarkan bahan biodegradable dan nonbiodegradable. Sampah biodegradable akan mengalami proses bio-kemis secara anaerob dan menghasilkan gas LFG. Gas ini perlu dipurifikasi dalam menara dengan suspensi dolomit. Gas kontaminan akan diserap dan terikat dalam suspensi dolomit. Sedangkan, gas metana dalam LFG yang sudah mendekati murni siap dipakai sebagai bahan bakar mesin generator HCCI. Hasil listrik dimanfaatkan secara produktif oleh masyarakat di sekitar TPA. Sementara itu, gas buang dari mesin HCCI dimanfaatkan untuk proses pemanasan awal (*pre heating*) biogas sebelum digunakan sebagai bahan bakar generator HCCI.

3.5 Skema Aliran Energi

Secara sederhana tahapan proses aliran energi pada sistem pembangkit listrik tenaga sampah diawali dari energi yang bersumber dari biomasa. Biomasa selanjutnya diubah menjadi energi dalam bentuk gas melalui proses anaerob dalam sistem *landfill*. Satu ton biomasa dapat menghasilkan 235 m³ dalam waktu

400 hari dengan nilai kalor 6,13.107 J/kg (Sorensen, 2007). Setelah melewati filter, nilai kalor per m³ gas bertambah. Hal ini dikarenakan adanya reduksi gas CO₂ sebanyak 20% per m³ biogas yang masuk ke sistem filter.



Gambar 3.3 Diagram Alir Energi pada Sistem Pembangkit

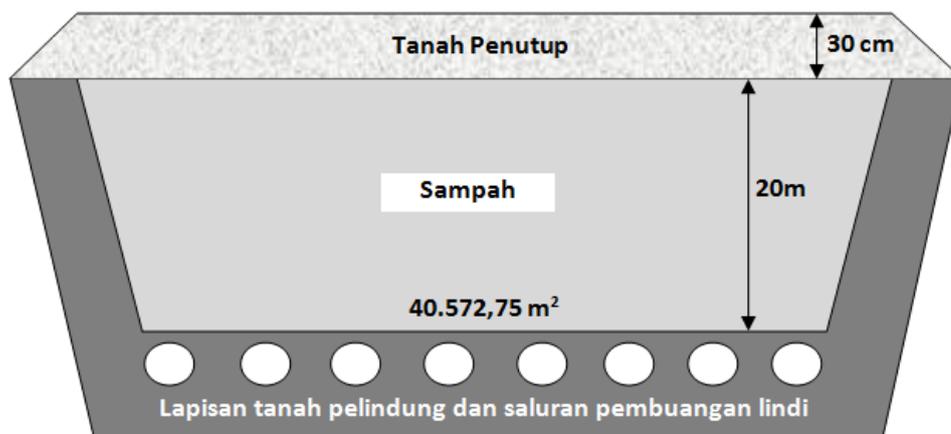
Setelah melewati proses pemanasan awal dengan *heat exchanger*, biogas hasil purifikasi selanjutnya digunakan sebagai bahan bakar generator mesin HCCI. Generator mesin HCCI memiliki efisiensi lebih dari 40%. Lebih kurang 60% dari energi yang hilang diantaranya terikut gas buang yang kemudian dimanfaatkan untuk sumber panas pada sistem *heat exchanger* untuk *preheating biogas*.

3.6 Pemodelan PLTSa

Pemodelan dilakukan dengan mengadopsi sistem TRNSYS, model matematika untuk beberapa komponen sistem, serta referensi yang terkait. Pengolahan data selanjutnya dilakukan dengan menggunakan program Excel. Hasil pemodelan berupa angka-angka dan grafik. Beberapa data yang dimasukkan dalam pemodelan terdiri atas tiga tipe. Data berwarna hijau merupakan variabel input sesuai dengan data lapangan. Data warna kuning adalah hasil perhitungan langsung oleh sistem terkait dengan perubahan input variabel. Sedangkan data warna merah ditentukan untuk menjaga performansi sistem.

Data sampah yang diperlukan meliputi variasi jumlah sampah dalam satuan (ton per hari), jumlah sampah *biodegradable* (ton per hari) dan tingkat kepadatan sampah (ton per meter kubik). Kasus di kota Malang, jumlah sampah *biodegradable* adalah sebanyak 405,41 Ton/hari karena sampah dianggap telah melalui proses *pretreatment*. Kepadatan sampah di TPA Supit Urang Malang 0,5 ton/m³ (BPPT, 2013).

Data pada sistem *landfill* mencakup luas area, kedalaman dan prosentase gas LFG yang terbangun. Mengacu pada data tahun 2013, luas TPA sekitar 40572,75 m² dengan kedalaman rata-rata 20 meter (Gambar 3.4). Untuk jumlah gas yang hilang dianggap 30%. Kehilangan biogas umumnya lewat pori-pori tanah penutup *landfill*. Penutupan ini dilakukan setiap tiga hari setelah perataan materi sampah selesai.



Gambar 3.4 Ilustrasi Ukuran *Landfill* di TPA Supit Urang Kota Malang

Data untuk sistem filter terdiri atas laju aliran biogas (m³/jam) dan kadar CH₄ dalam LFG (%). Diameter dan tinggi tabung dirancang sesuai dengan laju biogas maksimum yang masuk ke filter. Besarnya nilai laju biogas yang masuk ke filter ditentukan atas dasar kebutuhan keluaran listrik generator.

Keluaran daya listrik generator HCCI mengacu pada sistem yang sama dan telah diuji coba. Data untuk generator diperoleh dari nilai laju aliran biogas setelah dari filter dengan menetapkan terlebih dahulu kondisi operasional mesin HCCI seperti efisiensi pembakaran, rasio bahan bakar (biogas) dan udara, suhu

dan tekanan biogas saat masuk ke dalam mesin. Untuk menjaga generator HCCI beroperasi secara optimal dan konsisten, biogas hasil purifikasi disimpan terlebih dahulu dalam tangki. Pada aliran biogas 280 m³/jam, dengan rasio stokiometri pembakaran antara biogas dan udara ditetapkan pada nilai 0.4, suhu campuran biogas dan udara 473 K dengan tekanan 2,2 bar, generator HCCI mampu menghasilkan tenaga listrik sekitar 1 MW.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen

Komposisi kimiawi bahan yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Organik Bahan

No	Nama Bahan	Kandungan /100g		
		karbohidrat	protein	lemak
1	Kotoran sapi ¹⁾	2.01	0.19	1.14
2	Wortel ²⁾	9.6	0.9	0.2
3	Kangkung ²⁾	10	3.3	0.7
4	Bayam ²⁾	3.6	2.9	0.4
5	Nasi ²⁾	27.9	2.7	0.3
6	Pepaya ²⁾	9.81	0.6	0.14

1) Widarti 2012

2) <http://fatsecret.co.id/>

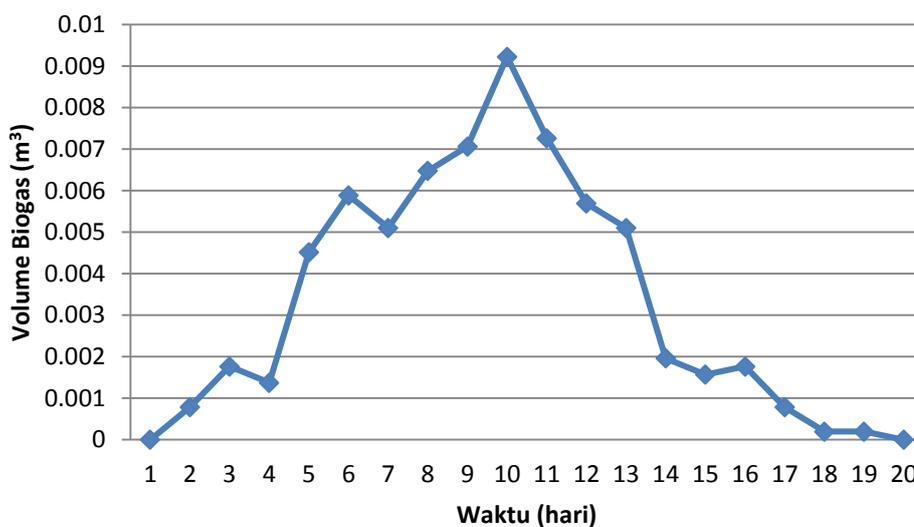
Masing-masing bahan memiliki kandungan karbohidrat, protein, dan lemak yang berbeda-beda. Kotoran sapi memiliki kandungan karbohidrat 2,01%, protein 0,19%, dan lemak 1,14%. Wortel memiliki kandungan karbohidrat yang lebih banyak dibandingkan dengan kotoran sapi, namun memiliki kandungan lemak yang lebih sedikit. Pada wortel terdapat karbohidrat 9,6%, protein 0,9%, dan lemak 0,2%. Kangkung memiliki kandungan karbohidrat dan protein yang lebih banyak dibandingkan kotoran sapi dan wortel. Kangkung memiliki kandungan karbohidrat 10%, protein 3,3%, dan lemak 0,7%. Bayam memiliki kandungan karbohidrat 3,6%, protein 2,9%, dan lemak 0,4%. Nasi memiliki kandungan karbohidrat yang paling besar diantara bahan yang lain, yaitu 27,9%, sedangkan kandungan protein 2,9%, dan lemak 0,4%. Pepaya memiliki kandungan karbohidrat 9,81%, protein 0,6%, dan lemak 0,14%. Kandungan protein tertinggi dimiliki oleh kangkung, 3,3g untuk setiap 100g. Sedangkan kotoran sapi memiliki kandungan lemak tertinggi, 1,14g dalam setiap 100g.

Berdasarkan hasil pengujian substrat dapat diketahui nilai *Total Solids* (TS) dan *Volatile Solids* (VS) sebagai berikut,

Tabel 4.2 Hasil Uji *Total Solids* (TS) dan *Volatile Solids* (VS)

Subtrat	Komposisi (%)			Jumlah (g)			TS (% mo)	VS (% TS)
	Karb	Prot	Lemak	Awal	T 103°C	T 550°C		
1	6.16	0.58	0.35	14.67	1.17	0.13	7.98	88.89
2	6.40	2.02	0.65	13.97	1.37	0.12	9.81	91.24
3	2.56	1.78	0.47	14.23	0.97	0.28	6.82	71.13
4	17.14	1.66	0.41	16.34	3.17	0.08	19.42	97.43
5	6.29	0.40	0.31	15.23	1.22	0.17	8.01	86.07

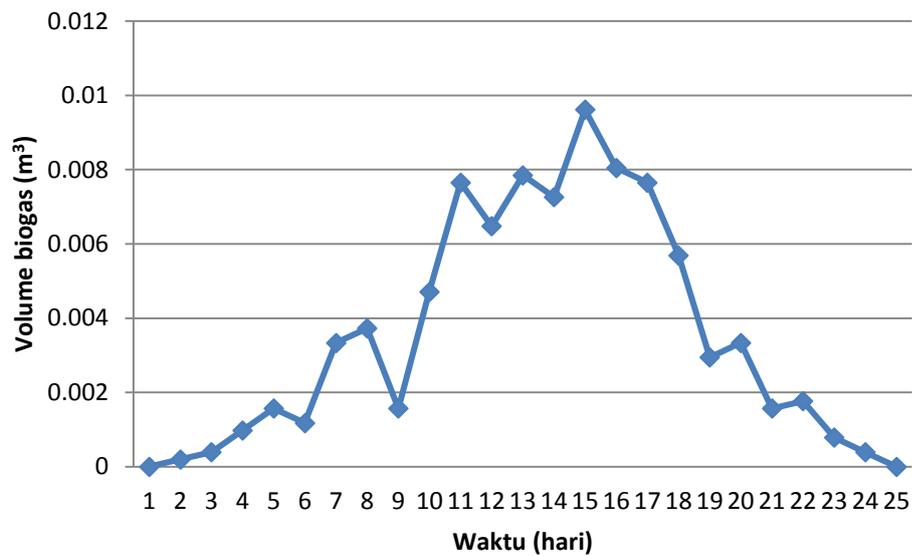
Adapun biogas yang dihasilkan dari masing-masing substrat, dapat dilihat pada gambar 4.1 sampai dengan 4.5.



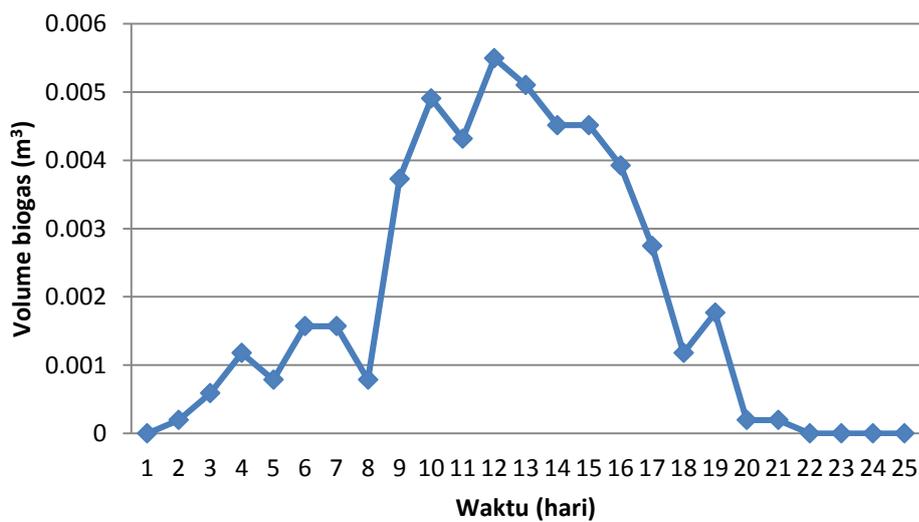
Gambar 4.1 Produksi Biogas yang Dihasilkan Subtrat 1

Subtrat 1 mengalami proses produksi biogas dalam kurun waktu kurang lebih 20 hari. Produksi biogas mengalami puncak produksi pada hari ke 10. Setelah itu, produksi biogas mengalami penurunan. Jika dikalkulasi, mulai hari pertama sampai dengan hari ke 20, dihasilkan biogas sebanyak 0,067m³.

Biogas yang dihasilkan oleh substrat 2 menunjukkan peningkatan produksi pada hari ke-3 sampai dengan hari ke-15. Meskipun pada hari keenam dan kesembilan menunjukkan penurunan. Puncak produksi antara hari ke sebelas sampai dengan hari ke tujuh belas. Setelahnya proses produksi mengalami penurunan sampai dengan hari ke 25. Jika dikalkulasi, maka substrat dua menghasilkan biogas sebanyak 0,089m³.

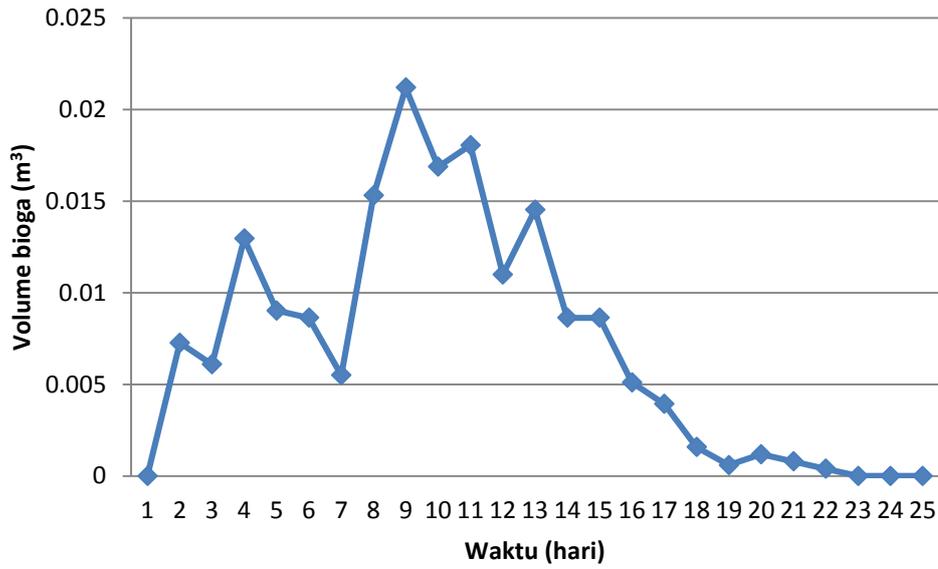


Gambar 4.2 Produksi Biogas yang Dihasilkan Subtrat 2

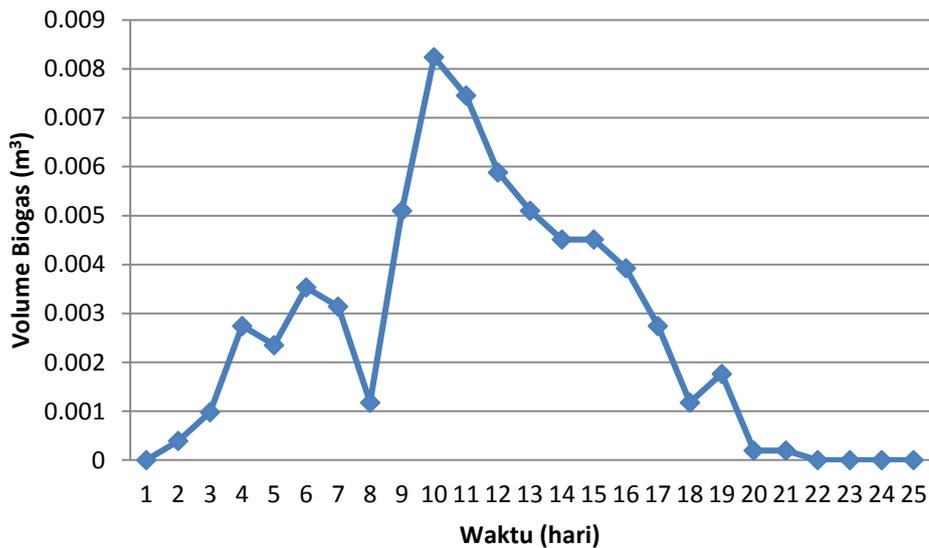


Gambar 4.3 Produksi Biogas yang Dihasilkan Subtrat 3

Produk biogas yang dihasilkan oleh substrat 3 mengalami peningkatan sampai dengan hari ke 12. Setelah itu mengalami penurunan sampai dengan hari ke 22. Produksi biogas banyak dihasilkan pada hari ke 9 sampai dengan 16. Total biogas yang dihasilkan substrat 3 sampai dengan hari ke 25 sebanyak 0.049 m³.



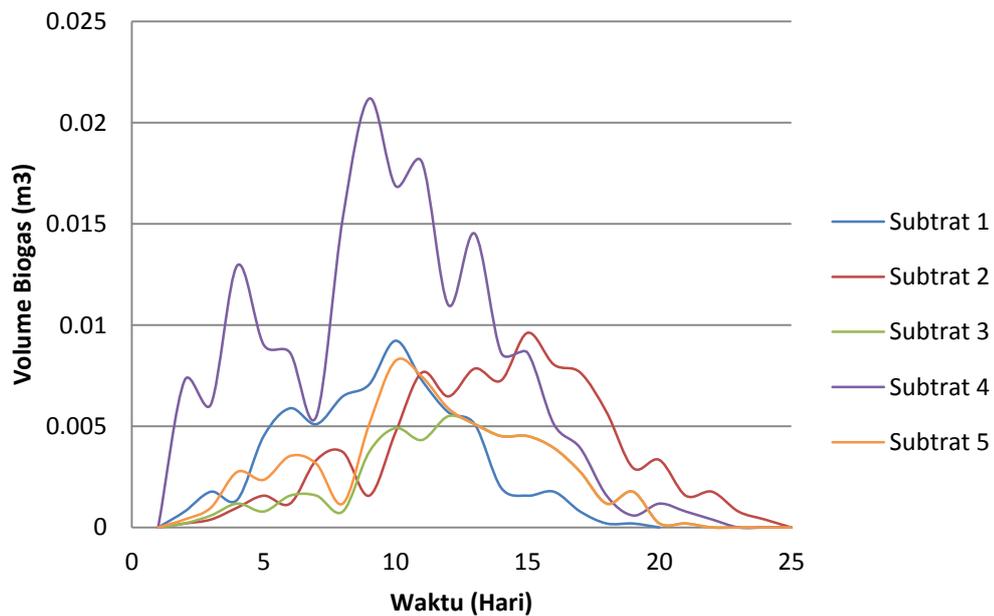
Gambar 4.4 Produksi Biogas yang Dihasilkan Subtrat 4



Gambar 4.5 Produksi Biogas yang Dihasilkan Subtrat 5

Subtrat 4 menunjukkan produksi biogas yang banyak pada awal-awal proses. Pada hari ke 4 menghasilkan biogas sebanyak 0,012. Meskipun produksi mengalami penurunan pada hari ke lima sampai dengan hari ke tujuh, produksi biogas meningkat kembali pada hari selanjutnya. Produksi biogas mengalami puncak produksi pada hari ke 9. Biogas yang dihasilkan dari hari pertama sampai dengan hari ke 25 sebanyak 0,177m³.

Pada hari pertama sampai dengan hari ke enam, subtrat 5 menunjukkan peningkatan produksi biogas. Meskipun sempat mengalami penurunan pada hari ke delapan, namun produksi biogas mengalami peningkatan kembali. Subtrat 5 mengalami puncak produksi pada hari ke 10. Setelah itu, produksi biogas mengalami penurunan. Total biogas yang dihasilkan mencapai 0,065m³. Jika hasil produksi biogas kelima subtrat dijadikan dalam satu grafik maka akan tampak seperti pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Produksi Biogas Secara Keseluruhan

Berdasarkan hasil produksi biogas oleh masing-masing subtrat, maka dapat dituliskan seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Produksi Masing-masing Subtrat

Subtrat	m_s (kg)	η_k	η_p	η_l	$m_s \cdot \eta_k$	$m_s \cdot \eta_p$	$m_s \cdot \eta_l$	V_b
1	5	6.16	0.58	0.35	0.31	0.03	0.02	0.07
2	5	6.40	2.02	0.65	0.32	0.10	0.03	0.09
3	5	2.56	1.78	0.47	0.13	0.09	0.02	0.05
4	5	17.14	1.66	0.41	0.86	0.08	0.02	0.18
5	5	6.29	0.40	0.31	0.31	0.02	0.02	0.07

Keterangan :

m_s = masa subtrat

V_b = volume biogas yang dihasilkan

η_k = prosentase kandungan karbohidrat dalam subtrat

η_p = prosentase kandungan protein dalam subtrat

η_l = prosentase kandungan lemak dalam subtrat

berkaitan dengan pengaruh komposisi karbohidrat, protein, dan lemak terhadap jumlah biogas yang dihasilkan, maka dapat ditulis,

Subtrat 1

$$0.31X_k + 0.03X_p + 0.02X_l = 0.07 \quad (4.1)$$

Subtrat 2

$$0.32X_k + 0.10X_p + 0.03X_l = 0.09 \quad (4.2)$$

Subtrat 3

$$0.13X_k + 0.09X_p + 0.02X_l = 0.05 \quad (4.3)$$

Subtrat 4

$$0.86X_k + 0.08X_p + 0.02X_l = 0.18 \quad (4.4)$$

Subtrat 5

$$0.31X_k + 0.02X_p + 0.02X_l = 0.07 \quad (4.5)$$

Dengan cara mengkombinasikan 3 persamaan, kemudian merata-rata, maka akan diperoleh nilai $X_k = 0.18$, $X_p = 0.22$, dan $X_l = 0.31$, dimana X_k , X_p , dan X_l berturut-turut merupakan faktor pengali untuk karbohidrat, protein, dan lemak. Adapun contoh perhitungan secara rinci sebagai berikut,

Kombinasi persamaan 1, 2, dan 4

$$\begin{array}{r}
 0.31X_k+0.03X_p+0.02X_l=0.07 \quad (1) \quad | \times 1 | \quad 0.31X_k+0.03X_p+0.02X_l=0.07 \\
 0.32X_k+0.10X_p+0.03X_l=0.09 \quad (2) \quad | \times 0.97 | \quad 0.31X_k+0.10X_p+0.03X_l=0.09 \\
 \hline
 0 \quad X_k -0.07X_p -0.01X_l= -0.02
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 0.31X_k+0.03X_p+0.02X_l=0.07 \quad (1) \quad | \times 1 | \quad 0.31X_k+0.03X_p+0.02X_l=0.07 \\
 0.86X_k+0.08X_p+0.02X_l=0.18 \quad (4) \quad | \times 0.98 | \quad 0.31X_k+0.029X_p+0.01X_l=0.05 \\
 \hline
 0 \quad X_k+0.001X_p+0.01X_l=0.02
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 -0.07X_p -0.01X_l= -0.02 \quad | \times 1 | \quad -0.07X_p -0.01X_l= -0.02 \\
 0.001X_p+0.01X_l=0.02 \quad | \times -57.51 | \quad -0.07X_p -0.74X_l= -0.29 \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 X_l = 0.381 \\
 X_p = 0.205 \\
 X_k = 0.181
 \end{array}$$

Hasil kombinasi dari persamaan dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Hasil Kombinasi Persamaan

No	Kombinasi Persamaan	X _K	X _p	X _l
1	124	0.179	0.209	0.319
2	134	0.179	0.213	0.319
3	145	0.177	0.234	0.321
4	245	0.179	0.216	0.298
5	234	0.179	0.224	0.276
Rata-rata		0.178	0.219	0.307

Jika kita hitung (dengan asumsi kandungan lemak, karbohidrat dan protein dalam sampah sama banyak) dan membandingkannya dengan pemodelan gompertz, eksponensial, dan multikomponen nilainya tidak jauh berbeda. Nilai komulatif

biogas sekitar 200 s/d 250 m³. Jika terdapat 1 Ton MSW dengan kandungan VS, 33,33% karbohidrat, 33,33% protein, dan 33,33% (kandungan merata), maka diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

$$V_{\text{biogas}} = \eta_k \cdot m_s \cdot X_k + \eta_p \cdot m_s \cdot X_p + \eta_l \cdot m_s \cdot X_l \quad (4.6)$$

$$V_{\text{biogas}} = \eta_k \cdot m_s \cdot 0,18 + \eta_p \cdot m_s \cdot 0,21 + \eta_l \cdot m_s \cdot 0,32 \quad (4.7)$$

$$V_{\text{biogas}} = 33,33\% \cdot 1000 \cdot 0,18 + 33,33\% \cdot 1000 \cdot 0,22 + 33,33\% \cdot 1000 \cdot 0,31$$

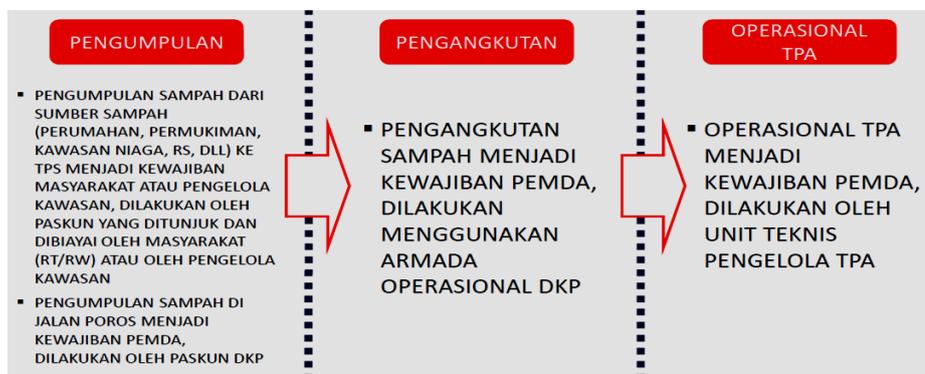
$$V_{\text{biogas}} = 33,33\% \cdot 1000 (0,18 + 0,22 + 0,31)$$

$$V_{\text{biogas}} = 236,64 \text{ m}^3$$

Sehingga persamaan persamaan 4.7, dapat digunakan sebagai pemodelan untuk landfill dengan mengikutsertakan prosentase kandungan karbohidrat, protein, dan lemak dalam volatile solids serta masa sampah.

4.2 Ketersediaan Sampah di Kota Malang

4.2.1 Rantai pasok sampah



Gambar 4.7 Alur Pengelolaan Sampah di Kota Malang

Sumber sampah awal merupakan sisa-sisa kegiatan yang ada di perumahan, pemukiman, pasar, kawasan niaga, hotel, rumah sakit, serta kotoran di sepanjang jalan-jalan kota. Sampah dari berbagai sumber tersebut umumnya dikumpulkan di Tempat Penampungan Sementara (TPS) yang lokasinya terpencar dekat dengan pusat kegiatan di perkotaan. TPS ini menjadi rantai sebelum sampah diangkut ke TPA. Pengangkutan sampah ke TPS sering kali menjadi tanggung jawab penghuni pemukiman atau pengelola kawasan usaha. Sampah di beberapa TPS selanjutnya dibawa ke TPA Supit Urang Kota Malang. Pengangkutan

sampah dari TPS-TPS dilakukan oleh petugas Dinas Kebersihan Kota. Demikian juga, pengelolaan sampah TPA yang merupakan rantai ketiga atau bagian akhir dari rantai pasok sampah di Kota Malang dikerjakan oleh Pemerintah Kota (Gambar 4.7).

Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Malang memproyeksikan bahwa jumlah sampah dari berbagai rantai pasok pada periode 2013-2018 diperkirakan mencapai 659,21 ton/hari (Tabel 4.5).

Tabel 4.5 Proyeksi Jumlah Timbunan Sampah Kota Malang Tahun 2013-2018

No	Asal Sampah	Jumlah Ton/hari
1	Penduduk Kota Malang : 898.558 x 0,5kg	449,28
2	Warga yang bukan sebagai penduduk : 300.000 x 0,5kg	150,00
3	Jalan, komersial /pasar, dan industri	44,93
3	Sampah dari sumber lain	15,00
Jumlah		659,21

Sumber: DKP Kota Malang, 2013

Jumlah sampah yang terangkut ke TPS lebih kurang hanya 492,35 Ton/hari. Setelah sampai di TPA, Jumlah sampah yang terangkut ke TPA : ± 464,74 Ton/hari. Selama berjalan dari satu mata rantai ke mata rantai berikutnya, berat sampah akan mengalami penyusutan. Hal ini terutama dikarenakan oleh aktivitas pemulung. Barang-barang yang dianggap memiliki nilai jual dan nilai pakai akan diambil oleh pemulung. Kelompok pemulung akan melakukan pengambilan secara selektif (penyortiran) terhadap berbagai jenis sampah sesuai dengan permintaan pedagang pengumpul (pengepul). Jenis-jenis sampah yang mempunyai nilai jual antara lain, kertas, karton, logam, botol, dan plastik. Prosentase penyusutan berat di rantai satu terhitung sekitar 25,31%, . Sedangkan, prosentasi penyusutan di rantai 2 berkisar 5,61%.

4.2.2 Estimasi Energi Sampah *Biodegradable*

Untuk menghitung estimasi energi sampah di kota Malang, kita dapat menggunakan pendekatan yang telah kita buat sebelumnya. Oleh karena itu kita harus mengetahui jumlah sampah *biodegradable* dan komposisi sampah yang dominan. Potensi sampah organik yang bersifat biodegradable di TPA Sumpit Urang nampaknya relatif besar. Tabel 4.6 menunjukkan bahwa jumlah sampah basah organik mencapai 405,41 ton/hari, sedangkan jumlah sampah anorganik terhitung 253,79 ton/hari.

Tabel 4.6 Komposisi Sampah Kota Malang

NO	JENIS SAMPAH	JUMLAH TON/HARI	%
1	Sampah Basah/ organik	405,41	61,50
2	Sampah Kering/ an-organik	253,79	38,50
	a. Kertas	45,49	6,90
	b. Plastik	115,36	17,50
	c. Logam	1,32	0,20
	d. Karet/kulit	5,27	0,80
	e. Kaca/gelas	4,61	0,70
	f. Kain	23,07	3,50
	h. Kayu	0,66	0,10
	i. Lain-lain	58,01	8,80
	JUMLAH	659,21	100,00

Sumber: DKP Kota Malang, 2013

Sebagian besar sampah jenis ini diambil oleh pemulung untuk dijual ke pengepul. Hal ini merupakan keuntungan karena aktivitas penyortiran berlangsung tanpa biaya. Sehingga, sampah yang tersisa di TPA sebagian besar adalah sampah organik basah biodegradable yang didominasi oleh sampah dari rumah tangga, pasar dan restoran. Sampah ini yang berpotensi paling besar menghasilkan LFG yang mengandung gas metan cukup tinggi.

Hasil survei menunjukkan bahwa sampah biodegradable didominasi oleh sampah pasar dan rumah tangga dengan proporsi sebagai berikut,

Tabel 4.7 Komposisi Karbohidrat, Lemak, dan Protein Sampah Biodegradable

No	Sampah	Komposisi (%) *		
		Karbohidrat	Lemak	Protein
1	wortel	9.60	0.90	0.20
2	kangkung	10.00	3.30	0.70
3	bayam	3.60	2.90	0.40
4	nasi	27.90	2.70	0.30
5	pepaya	9.81	0.60	0.14
6	Kubis	5.58	1.44	0.12
7	Tomat	3.92	0.88	0.20
8	semangka	7.55	0.15	0.61
9	usus ayam	13.90	45.20	26.30
10	Eceng gondok	3.80	0.20	1.00
	rata-rata	9.57	5.83	3.00
	Prosentase (% VS)	52.02	31.69	16.30

*) <http://www.organisasi.org/>
<http://www.fatsecret.co.id/>

Berdasarkan Tabel 4.7, Rata-rata kandungan karbohidrat 9,57%. Kandungan karbohidrat yang paling banyak dimiliki oleh nasi dan yang paling sedikit dimiliki oleh eceng gondok. Rata-rata untuk kandungan lemak 5,83%. Usus ayam memiliki kandungan lemak paling besar, sedangkan kandungan lemak paling sedikit dimiliki oleh eceng gondok. Kandungan protein rata-rata 3,00%. Kandungan lemak palingbanyak dimiliki oleh usus ayam, sedangkan yang paling sedikit dimiliki oleh worte dan tomat. Prosentase kandungan karbohidrat, lemak, dan protein dalam VS berturut-turut 52,02%, 31,69%, dan 16,30%.

Berdasarkan referensi yang telah dikemukakan pada kajian pustaka dan pemodelan untuk produksi biogas, maka dapat dihitung estimasi energi listrik yang dapat dibangkitkan dengan menggunakan generator HCCI disajikan secara rinci pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Estimasi Energi Listrik yang Dapat Dibangkitkan PLTSa dengan Menggunakan Generator HCCI di TPA Supit Urang Kota Malang

Proyeksi sampah biodegradable per hari	405,41 Ton/hr		
Kepadatan	0,5 Ton/m ³		
Kapasitas tempat penampungan	811.455 m ³		
Waktu penuh	2.74 Tahun		
Jumlah total timbunan sampah	405.727,5 Ton		
Estimasi komulatif LFG		(52,02% x 0,18)+ (31,69% x 0,22)+ (16,30% x 0,31) x 405.727,5 x1000	86.778.620,61 m ³
LFG yang hilang	30 %		
Reduksi sistem filter	37 %		
Estimasi jumlah LFG		0,7 x 0,63 x 86.778.620,61	38.269.371,69 m ³
Kadar CH ₄	92,7%		
Masa jenis gas metan (ρ_{CH_4})	0,656 kg/m ³		
Jumlah metan dalam kilogram		0,927 x 0,656 x 38.269.371,69	23.272.064.16 kg
Nilai kalor gas metan (Sorensen, 2007)	6,13 .10 ⁷ J/kg		
Estimasi nilai kalor yang dihasilkan		6,13.10 ⁷ x 23.272.064.16	142.657.753,3.10 ⁷ J
Asumsi efisiensi mesin dan generator	40 %		
Potensi listrik yang dapat dihasilkan		0,40 x 142.657.753,3.10 ⁷	57.063.101,32 MJ
Potensi listrik yang dapat dihasilkan dalam Watt		(waktu operasi pembangkit 17,3 tahun)	1,04 MW

4.3 Pemodelan PLTSa dengan Generator HCCI

Pemodelan PLTSa terdiri atas 3 bagian, yaitu *landfill*, filter, dan generator HCCI. Spesifikasi inlet dapat dilihat pada Tabel 4.9. Jumlah sampah keseluruhan, jumlah sampah *biodegradable*, dan jumlah sampah *non biodegradable* diperoleh dari survei langsung atau dari data yang dimiliki oleh pihak terkait seperti dinas kebersihan atau pengelola TPA. Nilai kerapatan diperoleh dari pengujian dilapangan. Namun terkadang nilai ini juga dapat diperoleh dengan pendekatan berdasarkan nilai kerapatan di TPA lain yang memiliki kemiripan karakteristik. Persentase kandungan karbohidrat, protein, dan lemak dalam *volatile solids* dilakukan dengan pendekatan kandungan sampah yang dominan.

Tabel 4.9 Spesifikasi Inlet

Spesifikasi inlet		
Jumlah sampah	659,2	Ton/hari
Biodegradable	405,41	Ton/hari
Nonbiodegradable	253,79	Ton/hari
Kerapatan	0,5	ton/m ³
% Karbohidrat dalam VS	52,02	%
% Protein dalam VS	31,69	%
% Lemak dalam VS	16,3	%

Berdasarkan sumber dari dinas kebersihan kota, sampah di Kota Malang sekitar 659,2 ton/hari. Sampah biodegradable sekitar 405,41 ton dan sisanya merupakan non biodegradable. Untuk kerapatan sampah di TPA sekitar 0,5 ton/m³. Data ini diperoleh dari penelitian yang pernah dilakukan oleh BPPT. Untuk persentase kandungan karbohidrat, protein, dan lemak dalam volatile solids seperti yang telah diuraikan sebelumnya berturut-turut sebesar 52,02%, 31,69%, 16,3%.

Pada Tabel 4.10, menunjukkan spesifikasi landfill. Besaran luas area dan kedalaman diperoleh dari pengelola TPA. Nilai LFG yang hilang merupakan perkiraan dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh BPPT di TPA Supit Urang Kota Malang. Luas area TPA Supit Urang yang memungkinkan

digunakan untuk *landfill* 40.572,75 m² dengan kedalaman 20 m. Estimasi LFG yang hilang dari sistem ini dianggap 30%.

Tabel 4.10 Spesifikasi Landfill

Spesifikasi Landfill		
Luas area	40572,75	m ²
Kedalaman	20	m
LFG hilang	30	%

Dari Tabel 4.11 dapat diketahui, bahwa sistem landfill yang ada di TPA Supit Urang Kota Malang memiliki kapasitas 811455 m³ sampah *biodegradable*. Angka ini diperoleh melalui perhitungan luas area dan kedalaman tempat yang tersedia di TPA Supit Urang Kota Malang.

Tabel 4.11 Data Output untuk Sistem *Landfill*

Landfill sistem	
Volume sistem	811455 m ³
Waktu penuh landfill	2,74 Tahun = 1000.00 Hari
Masa aktif produksi LFG	3,84 Tahun = 1400.00 Hari
Jumlah produksi LFG	86778620,61 m ³
Rata-rata produksi LFG	61984,72901 m ³ /hari

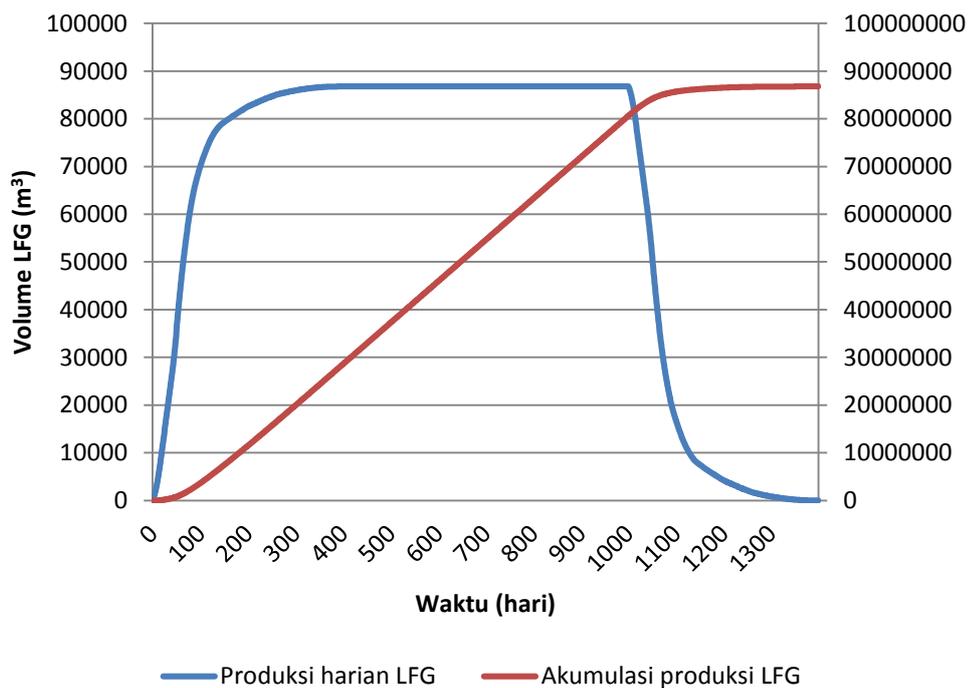
Jika t_l adalah waktu penuh *landfill* (Tahun), $V_{landfill}$ adalah kapasitas tempat (m³), m_{sd} adalah jumlah sampah perhari (Ton), ρ_s adalah kerapatan sampah, maka dapat dihitung waktu penuh landfill dengan Persamaan 2.1 sebagai berikut,

$$t_l = \frac{811455 \text{ m}^3}{365 \cdot 405,41 / 0,5}$$

$$t_l = 2,74 \text{ tahun}$$

Sistem ini akan terisi penuh setelah digunakan selama 2,74 tahun, atau sekitar 1000 hari. Untuk produksi biogas akan berlangsung selama 3,84 tahun atau 1400 hari. Jadi saat tidak ada lagi sampah yang dimasukkan ke dalam sistem, proses

pembentukan gas masih berlangsung. Hal ini dikarenakan, untuk satu ton sampah, proses gasifikasi dapat berlangsung sekitar 400 hari. Jumlah gas total landfill diperoleh dari Persamaan 2.7 seperti yang telah dibahas sebelumnya. Jumlah gas total yang dapat dihasilkan dari sistem *landfill* ini mencapai 86778620,61 m³. Jumlah ini merupakan total LFG yang dihasilkan sejak timbunan sampah pertama sampai dengan terakhir. Jika kita mengadopsi model multikomponen, maka produksi biogas yang dihasilkan di TPA Supit Urang Kota Malang dapat diperkirakan seperti Gambar 4.8. Pada grafik tersebut menunjukkan biogas yang dihasilkan sejak pengisian sampah dan penutupan *landfill* pada hari pertama sampai dengan *landfill* terisi penuh tanpa adanya pembaharuan sampah pada *landfill*.



Gambar 4.8 Grafik Produksi Harian LFG dan Akumulasi Produksi LFG di TPA Supit Urang Kota Malang Berdasarkan Pendekatan Model Multikomponen.

Spesifikasi filter tampak seperti pada Tabel 4.12. Laju LFG yang masuk terisi secara otomatis saat kita mengisikan data untuk kapasitas bahan bakar mesin HCCI yang digunakan. Kapasitas bahan bakar yang dapat digunakan oleh mesin

sekitar 63% dari LFG yang masuk ke sistem filter. Hal ini dikarenakan, sistem filter mereduksi sekitar 92.5% CO₂ yang ada di dalam biogas.

Tabel 4.12 Spesifikasi Filter

Spesifikasi Filter		
Laju LFG masuk	400	m ³ /Jam
Diameter	1.5	m ²
Tinggi	10	m
Kadar awal CH ₄ dalam LFG	58,4	%

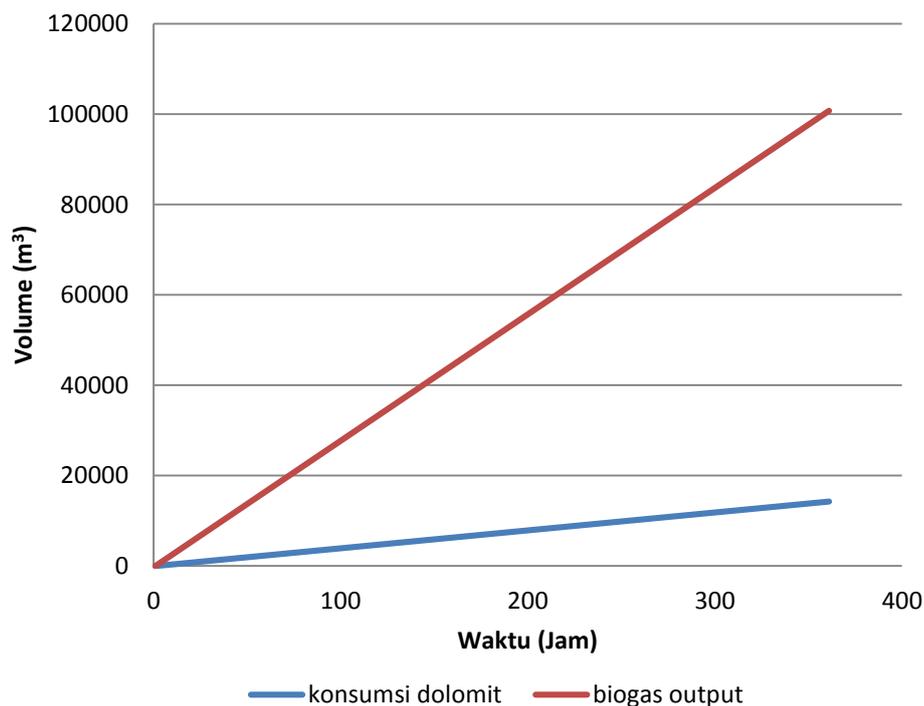
Nilai tinggi dan diameter juga terisi secara otomatis saat kita mengisikan data untuk kapasitas bahan bakar mesin HCCI. Nilai tinggi dan diameter filter menyesuaikan dengan laju biogas yang masuk ke filter agar proses penangkapan CO₂ dan Uap air dapat efektif (Makareviciene, 2015). Perbandingan laju input biogas dengan volume filter 22,65:1, perbandingan diameter dengan tinggi 0,15:1. Kadar awal CH₄ dapat diperoleh dengan melakukan uji laboratorium atau penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Kandungan CH₄ biogas yang ada di TPA Supit Urang Kota Malang berdasarkan arsip hasil penelitian yang ada, sebesar 58,4%.

Tabel 4.13 Data Output untuk Sistem Filter

Filter sistem		
Flow rate Dolomite Suspensi	39,6	m ³ /Jam
konsentrasi dolomit	2	%
Suhu suspensi Dolomite	20-30	Celsius
Flow rate output gas	252	m ³ /Jam
Kadar CH ₄ dalam gas	92,70	%

Data hasil simulasi filter dapat dilihat pada Tabel 4.13. Diketahui bahwa jumlah aliran suspensi dolomit yang dibutuhkan, yaitu sebesar 39,6 m³/jam dengan suhu 20-30 °C. Perbandingan laju aliran biogas yang masuk dengan laju aliran suspense dolomite 400/39,6 (Makareviciene, 2015). Dengan konsentrasi

dolomit dalam suspensi 2%, filter akan menghasilkan biogas dari LFG yang telah terpurifikasi sebanyak 252 m³/jam. Kadar CH₄ yang semula 58,4% dapat ditingkatkan menjadi 92,7%. Hal ini dikarenakan adanya reduksi gas CO₂ dari 40% menjadi sekitar 37%. Dengan demikian, nilai kandungan energinya juga bertambah tinggi.



Gambar 4.9 Perbandingan Produksi Biogas dan Konsumsi Dolomit pada Filter

Terlihat bahwa suspensi dolomit dapat berfungsi dengan baik dalam menyerap gas-gas non metana. Sehingga saat meninggalkan menara filter, kadar gas metana dalam LFG naik 34,30%. Sedangkan kadar CO₂ dalam LFG tinggal sekitar 3% dari kadar yang semula sekitar 40%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap 252 m³ gas yang masuk filter dibutuhkan suspensi dolomit sebanyak 39.6 m³ atau 1/7 dari jumlah biogas yang dihasilkan.

Dengan berjalannya proses, suspensi dolomit akan mengalami kejenuhan dan harus dilakukan diregenerasi agar sistem penyerapannya tetap bisa bekerja dengan baik. Selain itu, sistem filtrasi LFG dengan dolomit sebaiknya menggunakan aliran *in-out* LFG yang konstan secara kontinu. Dengan demikian,

jumlah suspensi yang digunakan juga dapat dialirkan secara konstan sesuai dengan laju aliran LFG yang masuk.

Untuk spesifikasi generator dengan mesin HCCI, perbandingan biogas dan udara, suhu, tekanan, dan efisiensi mengikuti hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Bedoya. Untuk kapasitas bahan bakar mesin, disesuaikan dengan energi listrik yang diinginkan. Jika satu mesin hanya mampu mengkonversi bahan bakar $125\text{m}^3/\text{jam}$ maka dibutuhkan dua buah mesin.

Tabel 4.14 Spesifikasi Generator HCCI

Spesifikasi Generator HCCI		
Kapasitas Bahan bakar mesin	252	m^3/Jam
Perbandingan biogas-udara	0,4	
Suhu	473	K
Tekanan	2,2	bar
Efisiensi	40	%

Tabel 4.15 Data Output Power Sistem

Power sistem	
Power Out put	1,044 MW
Lama operasi pembangkit	17,3 Tahun

Dengan laju aliran biogas pada Tabel 4.15, daya sekitar listrik yang dihasilkan oleh generator HCCI lebih kurang sebesar 1,04 MW. Dengan nilai keluaran daya ini, TPA dapat beroperasi selama 17,3 tahun sebagai sumber bahan baku listrik. Secara keseluruhan hasil simulasi pemodelan dengan program Excel dapat dilihat pada Gambar 4.10.

Nilai pada *power output* diperoleh dari perhitungan energi biogas yang masuk ke mesin dikalikan dengan nilai kadar CH_4 dalam gas. Selanjutnya dikalikan dengan masa jenis gas metan $0,656\text{kg}/\text{m}^3$, untuk mengetahui jumlah metan dalam kilogram. Jumlah metan tersebut selanjutnya dikalikan dengan $6,13 \cdot 10^7 \text{ J}/\text{kg}$, yang merupakan energi per kilogram CH_4 . Untuk mendapatkan daya,

energi dibagi dibagi dengan waktu. Jika dituliskan dalam model matematika, maka daya keluaran dapat dituliskan seperti Persamaan 4.8.

$$P_{out} = K_p \cdot B_o \cdot K_{bm} \quad (4.8)$$

Dengan:

K_p = konstanta ($7,09 \cdot 10^{-3}$ MW.Jam/ m^3)

P_{out} = daya keluaran generator HCCI (MW)

B_o = prosentase kadar CH4 dari landfill

K_{bm} = kapasitas konsumsi bahan bakar mesin HCCI (m^3 /Jam)

Sedangkan untuk waktu operasi pembangkit merupakan pembagian jumlah biogas setelah *loses*, dibagi dengan biogas yang masuk ke filter. Jika dikehendaki adanya hubungan dengan variable peubah, yaitu komponen *biodegradable* maka waktu operasional pembangkit dapat dituliskan dalam model matematika pada Persamaan 4.9.

$$t_{op} = K_t \cdot \rho \cdot V(1 - g_{los}) \cdot (\eta_k \cdot 0,18 + \eta_p \cdot 0,22 + \eta_l \cdot 0,31) / K_{bm} \quad (4.9)$$

Dengan:

K_t = konstanta (0,114 Ton.Jam/ m^3)

t_{op} = waktu operasional pembangkit (Tahun)

g_{los} = prosentase LFG yang hilang

ρ = kepadatan sampah (Ton/ m^3)

V = volume TPA (m^3)

K_{bm} = kapasitas konsumsi bahan bakar mesin HCCI (m^3 /Jam)

η_k = prosentase kandungan karbohidrat dalam *volatile solids*

η_p = prosentase kandungan protein dalam *volatile solids*

η_l = prosentase kandungan lemak dalam *volatile solids*

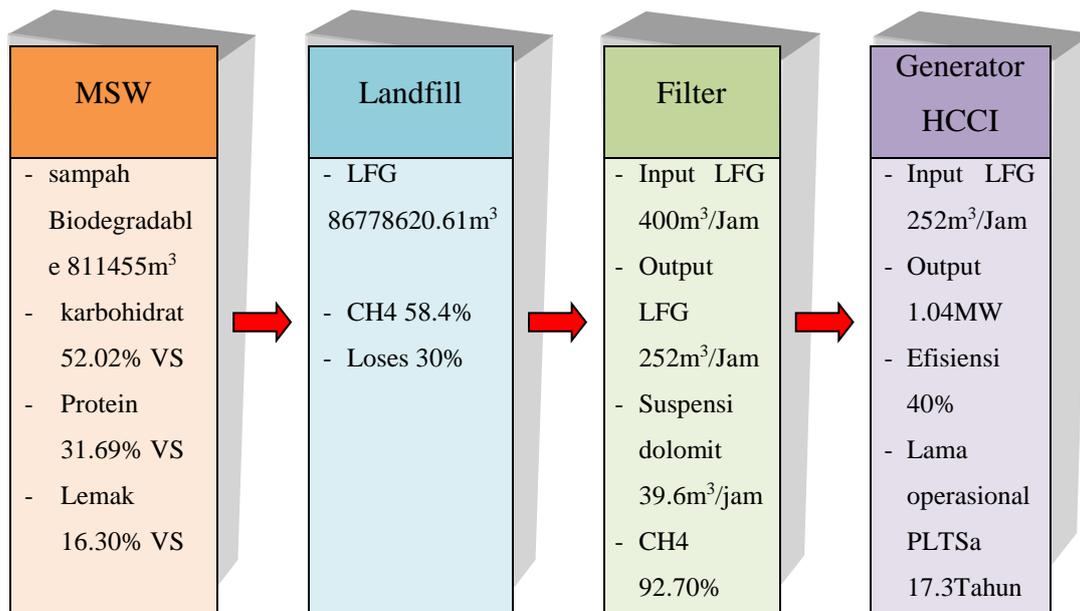
berdasarkan hasil perhitungan, pembangkit dapat beroperasi selama 17,3 tahun, dengan asumsi saat *landfill* sudah penuh tidak ada perbaruhan atau daur ulang.

DATA INPUT			DATA OUTPUT		
Spesifikasi inlet			Landfill sistem		
Jumlah sampah	659.2	Ton/hari	Volume sistem	811455 m ³	
Biodegradable	405.41	Ton/hari	Waktu penuh landfill	2.74 Tahun = 1000.00 Hari	
Nonbiodegradable	253.79	Ton/hari	Masa aktif produksi LFG	3.84 Tahun = 1400.00 Hari	
Kerapatan	0.5	ton/m ³	Jumlah produksi LFG	86778620.61 m ³	
% Karbohidrat dalam VS	52.02	%	Rata-rata produksi LFG	61984.72901 m ³ /hari	
% Protein dalam VS	31.69	%			
% Lemak dalam VS	16.3	%			
Spesifikasi Landfill			Filter sistem		
Luas area	40572.75	m ²	Flow rate Dolomite Suspensi	39.6 m ³ /Jam	
Kedalaman	20	m	konsentrasi dolomit	2 %	
LFG hilang	30	%	Suhu suspensi Dolomite	20-30 Celsius	
Spesifikasi Filter			Flow rate output gas	252 m ³ /Jam	
Laju LFG masuk	400	m ³ /Jam	Kadar CH4 dalam gas	92.70 %	
Diameter	1.5	m			
Tinggi	10	m			
Kadar awal CH4 dalam LFG	58.4	%			
Spesifikasi Generator HCCI			Power sistem		
Kapasitas Bahan bakar mesin	252	m ³ /Jam	Power Out put	1.044 MW	
Perbandingan biogas-udara	0.4		Lama operasi pembangkit	17.3 Tahun	
Suhu	473	K			
Tekanan	2.2	bar			
Efisiensi	40	%			

Gambar 4.10 Tampilan Simulasi Pemodelan dengan Excel

4.4 Diagram Alir Energi dalam Sistem PLTSa

Untuk studi kasus di TPA Supit Urang Kota Malang, dapat dibuat diagram energi sebagai berikut,



Gambar 4.11 Diagram Alir energi dalam Sistem PLTSa

4.5 Simulasi

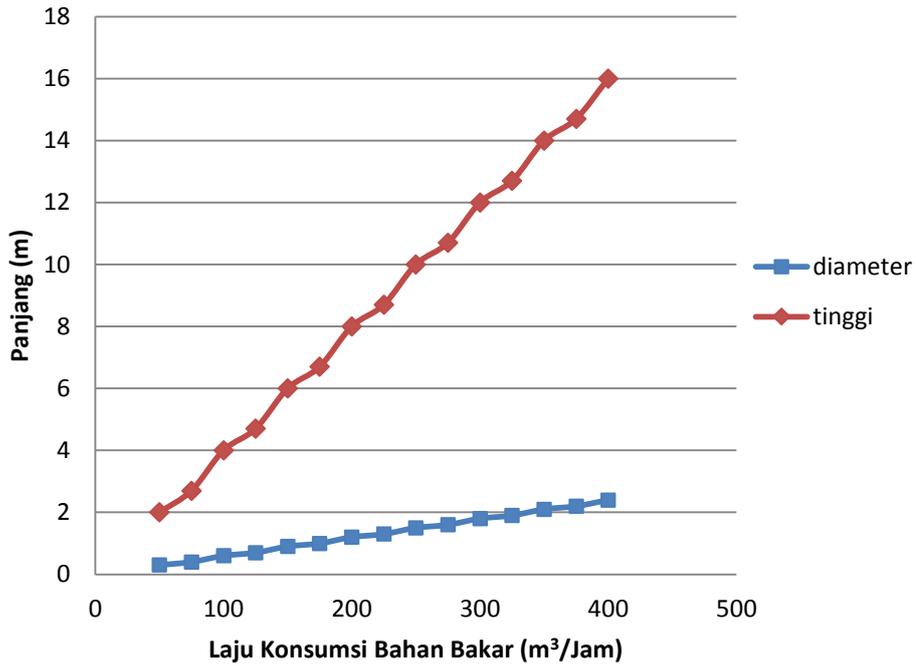
4.5.1 Pengaruh Kapasitas Konsumsi Bahan Bakar Generator HCCI

Konsumsi bahan bakar generator mesin HCCI dapat digunakan sebagai variable peubah. Perubahan variable tersebut akan memberikan pengaruh terhadap laju LFG yang masuk ke sistem filter, konsumsi dolomite, dimensi tabung pada filter, *Power output* dan lama operasional pembangkit. Dengan mengasumsikan tidak ada regenerasi sampah pada *landfill* serta menggunakan data sampah dan landfill yang ada di Kota Malang, maka nilai-nilai variable tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.16.

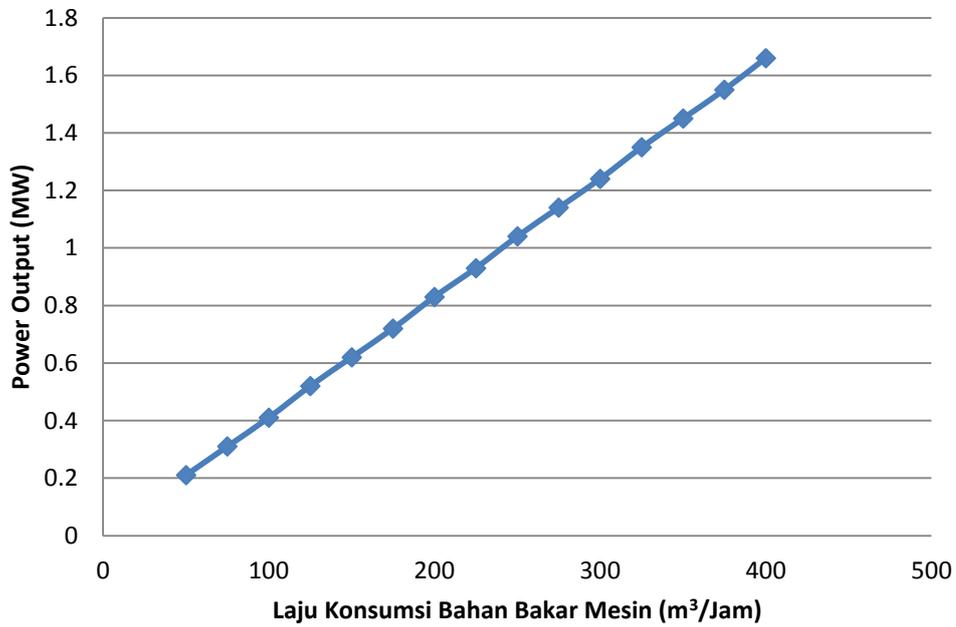
Tabel 4.16 Pengaruh Perubahan Kapasitas Konsumsi Bahan Bakar Generator HCCI terhadap Variabel Lain

Bahan Bakar (m ³ /Jam)	Input LFG pada Filter (m ³ /Jam)	Dolomite (m ³ /Jam)	Dimensi Tabung Pada Filter		Power Output (MW)	Operasional Pembangkit (Tahun)
			Diameter	Tinggi		
50	79.37	7.86	0.3	2.0	0.21	86.7
75	119.05	11.79	0.4	2.7	0.31	57.8
100	158.73	15.71	0.6	4.0	0.41	43.4
125	198.41	19.64	0.7	4.7	0.52	34.7
150	238.10	23.57	0.9	6.0	0.62	28.9
175	277.78	27.50	1.0	6.7	0.72	24.8
200	317.50	31.43	1.2	8.0	0.83	21.7
225	357.10	35.35	1.3	8.7	0.93	19.3
250	396.00	39.20	1.5	10.0	1.04	17.3
275	436.50	43.21	1.6	10.7	1.14	15.8
300	476.20	47.14	1.8	12.0	1.24	14.5
325	515.90	51.07	1.9	12.7	1.35	13.3
350	555.60	55.00	2.1	14.0	1.45	12.4
375	595.20	58.92	2.2	14.7	1.55	11.6
400	634.90	62.86	2.4	16.0	1.66	10.8

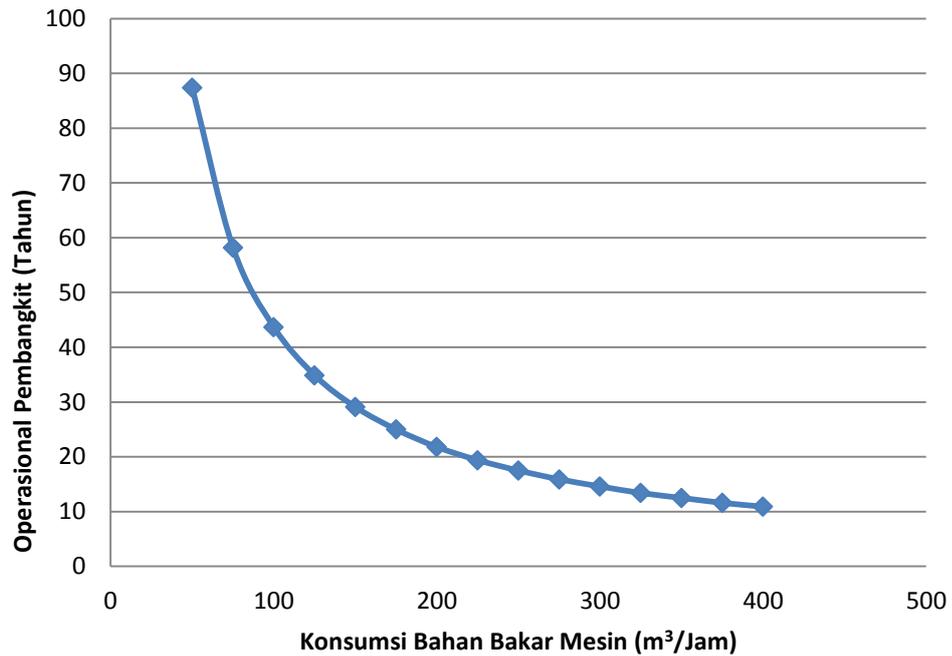
Jika hubungan konsumsi bahan bakar dan dimensi tabung pada filter ditampilkan dalam bentuk grafik, tampak seperti pada Gambar 4.12.



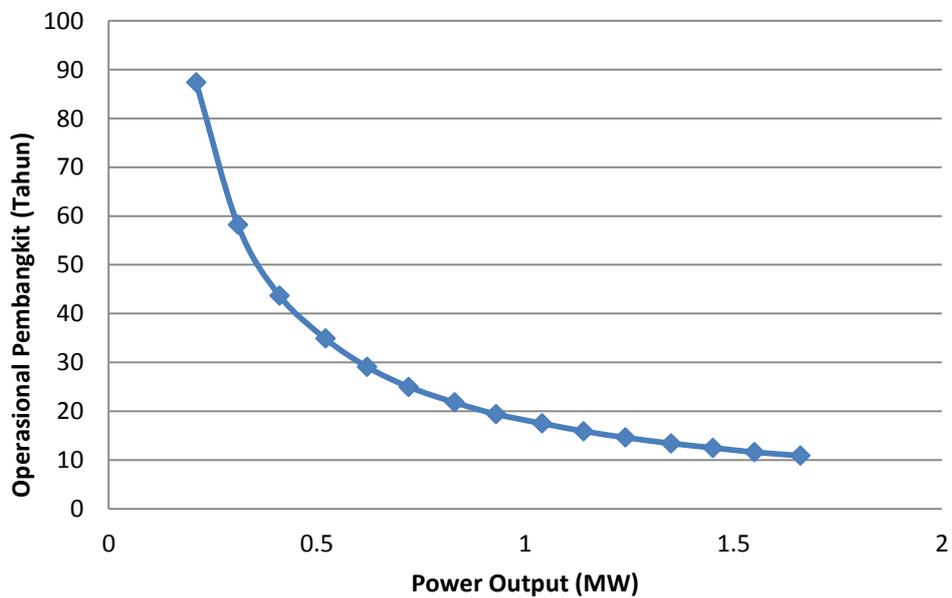
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Konsumsi Bahan Bakar dan Dimensi Tabung pada Filter.



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Konsumsi Bahan Bakar dan Power Output.



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Konsumsi Bahan Bakar dan Power Output yang Dihasilkan oleh Pembangkit.



Gambar 4.15 Grafik Hubungan Power Output yang Dihasilkan oleh Pembangkit dan Waktu Operasional Pembangkit

Perubahan konsumsi bahan bakar pada generator HCCI berbanding lurus dengan power output yang dihasilkan. Grafik hubungan kedua variable dapat

dilihat pada Gambar 4.13. Untuk grafik hubungan antara konsumsi bahan bakar dengan waktu operasional pembangkit dapat dilihat pada Gambar 4.14. Sedangkan grafik hubungan *power output* dan waktu operasional pembangkit dapat dilihat pada Gambar 4.15

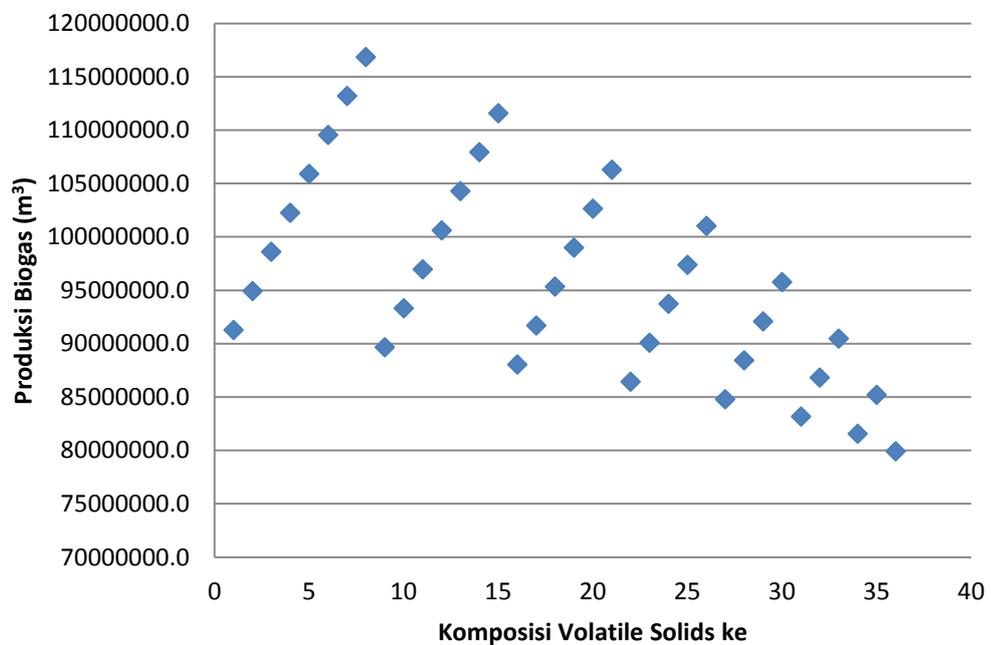
4.5.2 Pengaruh Komposisi Karbohidrat, Protein, dan Lemak pada MSW

Jumlah *volatile solids* yang terdiri atas karbohidrat, protein, dan lemak mempengaruhi jumlah produksi LFG. Ketersediaan LFG akan mempengaruhi lama operasional pembangkit. Dengan mengasumsikan ukuran *landfill* 811455 m³, kapasitas konsumsi bahan bakar pada generator HCCI 252 m³/Jam, maka akan diperoleh data seperti pada Tabel 4.17.

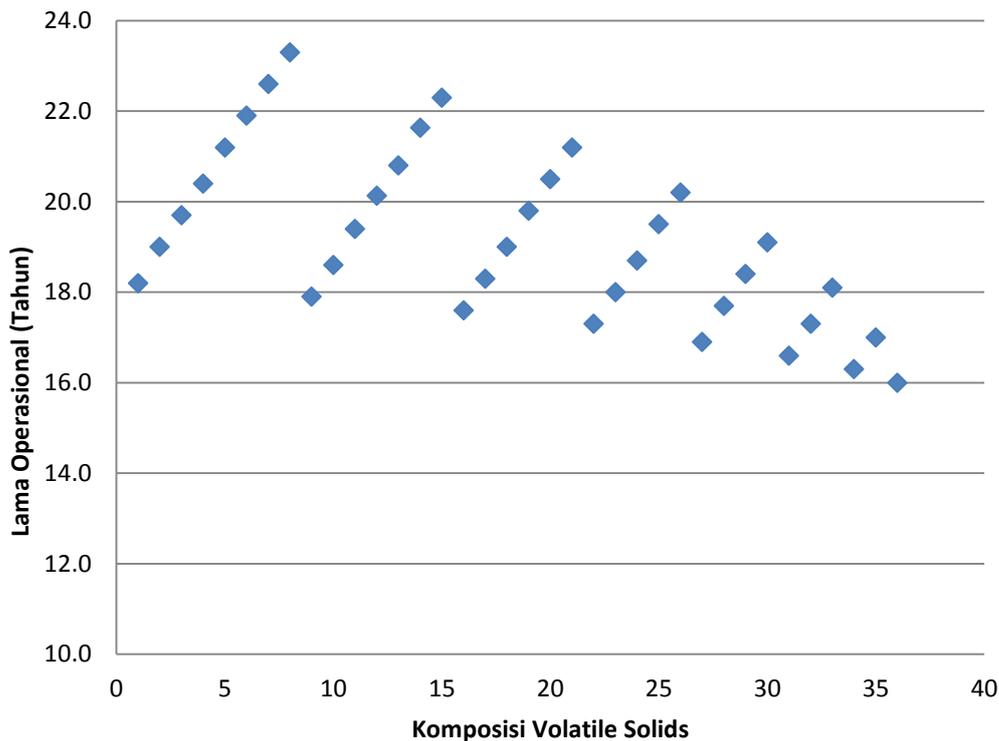
Tabel 4.17 Pengaruh Komposisi Karbohidrat, Protein, dan Lemak pada MSW terhadap Variabel Lain

Komposisi VS (%)			Komposisi ke	Jumlah LFG (m ³)	Operasional Pembangkit (Tahun)
Karbohidrat	Protein	Lemak			
10	80	10	1	91288687.5	18.2
10	70	20	2	94940235.0	19.0
10	60	30	3	98591782.5	19.7
10	50	40	4	102243330.0	20.4
10	40	50	5	105894877.5	21.2
10	30	60	6	109546425.0	21.9
10	20	70	7	113197972.5	22.6
10	10	80	8	116849520.0	23.3
20	70	10	9	89665777.5	17.9
20	60	20	10	93317325.0	18.6
20	50	30	11	96968872.5	19.4
20	40	40	12	100620420.0	20.1
20	30	50	13	104271967.5	20.8
20	20	60	14	107923515.0	21.6
20	10	70	15	111575062.5	22.3
30	60	10	16	88042867.5	17.6
30	50	20	17	91694415.0	18.3
30	40	30	18	95345962.5	19.0
30	30	40	19	98997510.0	19.8
30	20	50	20	102649057.5	20.5

Komposisi VS (%)			Komposisi ke	Jumlah LFG (m ³)	Operasional Pembangkit (Tahun)
Karbohidrat	Protein	Lemak			
30	10	60	21	106300605.0	21.2
40	50	10	22	86419957.5	17.3
40	40	20	23	90071505.0	18.0
40	30	30	24	93723052.5	18.7
40	20	40	25	97374600.0	19.5
40	10	50	26	101026147.5	20.2
50	40	10	27	84797047.5	16.9
50	30	20	28	88448595.0	17.7
50	20	30	29	92100142.5	18.4
50	10	40	30	95751690.0	19.1
60	30	10	31	83174137.5	16.6
60	20	20	32	86825685.0	17.3
60	10	30	33	90477232.5	18.1
70	20	10	34	81551227.5	16.3
70	10	20	35	85202775.0	17.0
80	10	10	36	79928317.5	16.0



Gambar 4.16 Grafik Hubungan Komposisi Komponen VS dan Produksi LFG



Gambar 4.17 Grafik Hubungan Komposisi Komponen VS dan Lama Operasional Pembangkit

Semakin besar kandungan lemak yang ada dalam sampah, maka semakin besar pula LFG yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan lemak memiliki rantai karbon yang lebih panjang dibandingkan dengan karbohidrat dan protein. Hal ini juga dibuktikan dengan nilai faktor pengali lemak berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, lebih besar dari pada faktor pengali untuk karbohidrat dan protein.

Komposisi 10% karbohidrat, 10% protein, dan 80% lemak (komposisi ke 8) menghasilkan nilai FLG terbesar, yaitu 116849520 m³. Sedangkan, jika sampah didominasi oleh komponen karbohidrat, akan menghasilkan nilai LFG yang kecil. Komposisi 80% karbohidrat, 10% protein, dan 10% lemak (komposisi ke 36) menghasilkan nilai FLG terkecil, yaitu 79928317,5 m³. Jika data pada Tabel 4.17 ditampilkan dalam bentuk grafik, maka akan tampak seperti pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.

4.5.3 Variasi Luas Area *Landfill* dan Kedalaman

Luas area *landfill* dan kedalaman memberikan pengaruh terhadap jumlah timbunan sampah. Hal ini juga memberikan pengaruh terhadap jumlah LFG yang dihasilkan. Sehingga nantinya akan mempengaruhi waktu operasional pembangkit. Untuk power output 1,04MW, variasi data luas area dan kedalaman landfill menghasilkan data waktu operasional pembangkit seperti pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Waktu Operasional Pembangkit Berdasarkan Variasi Data Luas Area dan Kedalaman Lanfill Untuk Power Output 1,04 MW

Luas Area <i>Landfill</i> (m ²)	Kedalaman <i>Landfill</i> (m)	Waktu Operasional Pembangkit (Tahun)
5000	5	0.5
10000	5	1.1
15000	5	1.6
20000	5	2.1
25000	5	2.7
30000	5	3.2
35000	5	3.7
40000	5	4.3
45000	5	4.8
50000	5	5.3
5000	10	1.1
10000	10	2.1
15000	10	3.2
20000	10	4.3
25000	10	5.3
30000	10	6.4
35000	10	7.5
40000	10	8.5
45000	10	9.6
50000	10	10.7
5000	15	1.6
10000	15	3.2
15000	15	4.8
20000	15	6.4
25000	15	8.0
30000	15	9.6

Luas Area <i>Landfill</i> (m ²)	Kedalaman <i>Landfill</i> (m)	Waktu Operasional Pembangkit (Tahun)
35000	15	11.2
40000	15	12.8
45000	15	14.4
50000	15	16.0
5000	20	2.1
10000	20	4.3
15000	20	6.4
20000	20	8.5
25000	20	10.7
30000	20	12.8
35000	20	15.0
40000	20	17.1
45000	20	19.2
50000	20	21.4

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan,

1. TPA Supit Urang Kota Malang memiliki karakteristik jumlah sampah biodegradabel sebanyak 405,41 ton/hari, kerapatan sampah 0,5 ton/m³, luas area 40572,75 m², dan kedalaman 20 m.
2. Dengan asumsi jumlah LFG yang hilang adalah 30%, maka aliran biogas terpurifikasi yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar generator adalah sebesar 252 m³/jam.
3. Pemodelan matematik pemanfaatan biogas tersebut mampu menghasilkan keluaran daya listrik sebesar 1,04 MW per tahun.
4. TPA bisa memasok biogas selama 17,3 tahun (tanpa melalui proses pemulihan).

5.2 Saran

1. Pemodelan PLTSa berbasis landfill terkontrol dengan menggunakan mesin generator HCCI dapat diadopsi di TPA wilayah lain dengan merubah variabel kondisi sampahnya.
2. Dimungkinkan untuk menggunakan sistem filtrasi non-dolomit yang memiliki kemampuan membersihkan dan menyerap gas-gas non metana yang tercampur dalam LFG.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Aceves S M. A multi-zone model for prediction of HCCI combustion and emissions, *SAE paper* 2000-01-0327
- Allen MR, Braithwaite A, Hills CC. Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites. *Environ Sci Technol* 1997;31: 1054e61.
- Arnold M, Kajolinna T. Development of on-line measurement techniques for siloxanes and other trace compounds in biogas, *Waste Manag* 2010;30: 1011e7
- BAPEPEDA, 2009. Study Kelayakan Penangkapan Gas Metan di TPA Supit Urang, Malang: Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kota Malang.
- Bedoya, Ivan D. Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NO_x emissions, *Energy Conversion and Management* 53 (2012) 154–162.
- Borjesson M, Ahlgren EO. Cost-effective biogas utilisation e a modelling assessment of gas infrastructural options in a regional energy system, *Energy* 2012;48:212e26.
- BPPT ,2013. Microturbine Cogenerations Technology Application Project, Kota Malang.
- BPPT, 2013. Analysis on Potential Waste to Energy at the Final Disposal Site (TPA), *MCTAP Bulletin*, Vol 04-page 12
- Cacho J G, Oliveros A. Development of a Biogas Fuel Supply System for an Internal Combustion Engine. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, Vol. 26, No. 3 2011
- Fiveland S, Assanis D. A four stroke homogenous charge compression ignition engine simulation for combustion and performance studies, *SAE paper* No.2000-01-0332
- Gawel R A. Design simulations for a biogas purification process using aqueous amine solutions, *Chemical Papers* 66 (11) 1010–1018 (2012)

- Gioannis G D. Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. *Estimation of gas generation rate constants. Waste Management (New York, N.Y.)*, 2009, 29(3): 1026–1034
- Gotz M. Evaluation of Organic and Ionic Liquids for Three-Phase Methanation and Biogas Purification Processes, *Energy Fuels* 2013, 27, 4705–4716
- Gourc J P, Staub M J, Conte M. Decoupling MSW settlement into mechanical and biochemical processes – modelling and validation on large-scale setups. *Waste Management (New York N.Y.)*, 2010, 30(8–9): 1556–1568
- Gupta P, Singh S R, Sachan A. A re-appraisal on intensification of biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012; 16(7): 4908-4916.
- Hernandez S P. Biogas purification for MCFC application, *international journal of hydrogen energy* 36 (2011) 8112 – 8118
- Hong S, Assanis D, Wooldridge M. Multi-dimensional modeling of NO and Soot emissions with detailed chemistry and mixing in a direct injection natural gas engine, *SAE paper NO. 2002-01-1112*
- Huang Y, Sung Sung C J, and Eng J A. Dilution Limits of n-Butane/Air Mixtures at Conditions Relevant to HCCI Combustion, *Combustion and Flame* 136, 457-466 (2004).
- Keshavarz M. Performance of Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine with Premixed Methane/Air Supported by DME for Electrical Power Generation Application, *The Journal of Engine Research/Vol. 18 / Spring 2010*
- Kumar A, Sharma M P. Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 5 (2014) 50–61
- Kymalainen M, Lähde K, Arnold M, Kurola JM, Romantschuk M, Kautola H. Biogasification of biowaste and sewage sludge e measurement of biogas quality, *J Environ Manag* 2012;95:122e7.
- Liu Y. Mass transfer performance of CO₂ absorption by alkanolamine aqueous solution for biogas purification, *Separation and Purification Technology* 133 (2014) 476–483

- Lo H M, Kurniawan. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors, *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6329–6335
- Mahar R B, Sahito A R, Yue D. Modeling and simulation of landfill gas production from pretreated MSW landfill simulator, *Front. Environ. Sci. Eng.* DOI 10.1007/s11783-014-0685-6, 2014
- Mahar R B. Modeling and simulation of landfill gas production from pretreated MSW landfill simulator, *Front. Environ. Sci. Eng.* DOI 10.1007/s11783-014-0685-6
- Mahasiswa Pendidikan Biologi, 2013. Observasi TPA Sumpit Urang Malang, Universitas Muhammadiyah, Malang.
- Makareviciene V and Sendzikiene E. Technological assumptions for biogas purification, *Environmental Technology*, 10.1080/09593330.2015.1008585
- Mali S T. Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill, *Bioresource Technology*, 2012, 110: 10–17
- Mulato Sri, 2014. *Materi Perkuliahan: Biomass*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Narros A, Del Peso MI, Mele G, Vinot M, Fernández E, Rodríguez ME. Determination of siloxanes in landfill gas by adsorption on Tenax tubes and TD-GC-MS, *In: Proceedings of the twelfth international waste management and landfill symposium*; 2009 Oct 5-9; Cagliari, Italy. Italy: CISA Publisher; 2009.
- Nathan S S. An experimental study of the biogas–diesel HCCI mode of engine operation, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1347–1353
- Nutiu E, Anaerobic purification installation with production of biogas and liquid fertilizers, *Procedia Technology* 12 (2014) 632 – 636
- Ogink R. and Golovitchev V. Gasoline HCCI Modeling: An Engine Cycle Simulation Code with a Multi-Zone Combustion, *SAE paper* 2002-01-1745
- Osorio F and Torres J C. Biogas Purification from Anaerobic Digestion in a Wastewater Treatment Plant for Biofuel Production. *Renewable Energy* 2009;34: 2164–71.

- Persson M, Jönsson O, Wellinger A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection, *Report in IEA Bioenergy Task 37-Energy from Biogas and Landfill Gas*. Aadorf: Nova Energie GmbH; 2007
- Poloncarzova M. Effective Purification of Biogas by a Condensing-Liquid Membrane, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011, 50, 669 –671
- Rasi S, Veijanen A, Rintala J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants, *Energy* 2007;32:1375e80.
- Rey M D, Font R, and Aracil I. Biogas from MSW landfill: Composition and determination of chlorine content with the AOX (adsorbable organically bound halogens) technique, *Energy* 63 (2013) 161e167
- Salati S, Scaglia B. Mechanical biological treatment of organic fraction of MSW affected dissolved organic matter evolution in simulated landfill, *Bioresource Technology* 142 (2013) 115–120
- Scott B F. Development of a two-zone HCCI combustion model accounting for boundary layer effects, *SAE paper* 2001-01-1028
- Sigot L, Duco G. Adsorption of octamethylcyclotetrasiloxane on silica gel for biogas purification, *Fuel* 135 (2014) 205–209
- Sorensen Bent, 2007. *Renewable Energy Conversion Transmission and Storage*. Elsevier Inc
- Stauss W. The Transformation of Germany's energy system: what is the role of biogas in the electricity market, *Corresponding author*, 978-1-4799-3254-2/13/\$31.00 ©IEEE
- Stefan, 2004. "Biogas Fuel For Internal Combustion Engines", *Tome II Fascicole 3*, annals of the faculty of engineering Hunedoara
- Surata, I Wayan. "Simple Conversion Method from Gasoline to Biogas Fueled Small Engine to Powered Electric Generator", *Energy Procedia* 52(2014) 626 – 632.
- Talyan V, Dahiya R P, Anand S, Sreekrishnan T R. Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi, *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 50(3): 240–259
- Tippayawong, N. Long-term operation of a small biogas/diesel dual-fuel engine for on-farm electricity generation, *Biosystem Engineering* 98(2007) 26 – 32.

- Trapani D, Bella D G, Viviani G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes, *Waste Management* 33 (2013) 2108–2115
- Tuiner M J and Annaland. Biogas Purification Using Cryogenic Packed-Bed Technology, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, 51, 5552–5558
- Uyan M. MSW landfill site selection by combining AHP with GIS for Konya, Turkey. *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-013-2567-9
- Widadi F I, 2009. Combustion Performance Analysis of HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine By Modelling Simulation, *Sepuluh Nopember Institute of Technology, Final Project – LS 1336*
- Widarti Budi N, 2012. *Degradasi Substrat Volatile Solid pada Produksi Biogas dari Limbah Pembuatan Tahu dan Kotoran Sapi*, Jurnal Rekayasa Proses, Vol. 6, No. 1
- Zacharof A I, Butler A P. Stochastic modelling of landfill processes incorporating waste heterogeneity and data uncertainty, *Waste Management (New York N.Y.)*, 2004a, 24(3): 241–250

LAMPIRAN A



Gambar A.1 Pintu Masuk TPA Supit Urang Kota Malang



Gambar A.2 Landfill yang Sudah Terisih Penuh
dan kolam penampungan Lindi



Gambar A.3 Proses Penutupan Timbunan Sampah dengan Tanah pada Sel Landfill yang Masih Beroperasi



Gambar A.4 Alat Ukur Tekanan dan Laju Aliran Biogas Untuk Menunjang Penelitian yang Ada Di TPA Supit Urang Kota Malang

LAMPIRAN B

Tabel B.1 Hasil Analisa Gas Landfill Di TPA Supit Urang Kota Malang

	ID	DATE	Time	CH4	CO2	O2	BALANCE	LEL CH4	PEAK CH4	PEAK CO2	MIN O2	REL.Pressure	Baro.Press	CO	H2S	H2	ANSWER 1	CH4/CO2
				%	%	%	%	%	%	%	%	mb	mb	ppm	ppm	ppm		%
Blok IV	580	11-Jul-13	15:41	58,40	56,90	-	-	-	58,40	56,90	-	0,51	948	6	42	low		1,03
	581	11-Jul-13	15:46	58,40	57,00	-	-	-	58,50	57,10	-	0,46	948	6	42	low		1,02
	582	11-Jul-13	15:51	58,40	57,00	-	-	-	58,40	57,00	-	0,46	949	6	41	low		1,02
Blok UMM																		
vacuum 50x	593	12-Jul-13	10:09	61,90	64,80	0,50	-	-	62,20	65,70	0,50	0,40	951	4	4	low		0,96
	594	12-Jul-13	10:14	56,00	53,30	2,50	-	-	56,80	62,20	1,00	0,41	951	3	22	low		1,05
	595	12-Jul-13	10:19	58,50	58,30	0,70	-	-	58,60	58,60	0,70	0,41	951	4	9	low		1,00
	596	12-Jul-13	10:24	51,30	55,40	0,20	-	-	55,60	59,30	0,20	0,40	951	4	5	low		0,93
	597	12-Jul-13	10:29	53,50	44,50	-	2,00	-	53,50	54,20	-	0,38	951	4	12	low		1,20
	598	12-Jul-13	10:34	61,70	49,80	-	-	-	61,70	49,90	-	0,36	951	4	28	low		1,24
Flare UMM	604	12-Jul-13	11:04	32,10	30,00	7,10	30,80	-	32,60	30,30	7,00	0,34	963	3	27	low		1,07
	605	12-Jul-13	11:09	32,10	30,00	7,20	30,70	-	32,50	30,30	7,00	15,03	951	4	26	low		1,07
	606	12-Jul-13	11:14	30,90	28,70	7,40	33,00	-	32,60	30,50	6,90	14,99	951	4	25	low		1,08
	607	12-Jul-13	11:19	30,20	27,80	7,50	34,50	-	31,70	29,20	7,20	15,19	951	4	24	low		1,09
	608	12-Jul-13	11:24	30,50	28,00	7,40	34,10	-	30,80	28,20	7,20	14,97	951	4	25	low		1,09

(Sumber: Arsip TPA Supit Urang Kota Malang, 2013)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kabupaten Pasuruan tanggal 30 Maret 1986 dari ayah bernama Sunarto dan ibu bernama Furotin. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Jalan Kepuh/X No.14 RT.08/RW.05 Desa Bandungrejosari, Kecamatan Sukun, Kota Malang. Menikah pada tahun 2009 dengan Enny Kusumawati, penulis dikarunia dua orang putra bernama Wira Farzana,S.A dan Alfariz Yukihiro,S.A. Pada tahun 1997, penulis menyelesaikan pendidikan di SDN Pandaan II. Tahun 2000 menyelesaikan pendidikan tingkat menengah di SMPN 1 Pandaan. Tahun 2003 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Pandaan. Tahun 2007 penulis menyelesaikan gelar Sarjana di Jurusan Pendidikan Fisika Universitas Negeri Malang. Dan pada tahun 2016 ini, penulis telah menyelesaikan gelar Magister di Bidang Keahlian Rekayasa Energi Terbarukan Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis dapat dihubungi melalui email sfhr03um@gmail.com.