

***FEASIBILITY STUDY PEMBANGUNAN PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA SAMPAH
(STUDI KASUS TPA. BAKUNG BANDAR LAMPUNG)***

(Skripsi)

Oleh:

**MUHAMMAD IKROMI
NPM: 1315031061**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2017**

ABSTRACT

FEASIBILITY STUDY OF SOLID WASTE POWER PLANT (Study Case: Bakung Landfill Site, Bandar Lampung City)

Waste which is disposed to landfill will be decomposed anaerobically and produces various gasses called landfill gas. In fact, This gas can be utilized for Solid Waste Power Plant primer fuel. This study aimed to calculate the landfill gas of Bakung landfill located at Bandar Lampung city using Tier-2 IPCC method, simulating the power generation system using ASPEN PLUS software and assess the feasibility of power generation project.

The simulation results showed that during 2018 - 2032 the average of landfill gas in Bakung landfill will be 2,931 Gg CO₂equivalents with 2,665 m³ million of methane. The average of electrical energy that can be generated was up to 5.8 million kWh/year with 500 kW designed power rating. Based on the results, it can be concluded that power generation of Bakung landfill was feasible and economically acceptable.

Keywords: Landfill Gas, ASPEN PLUS , Waste Power Generation, Feasibility Study.

ABSTRAK

***FEASIBILITY STUDY* PEMBANGUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH**

(Study Case: TPA Bakung Kota Bandar Lampung)

Sampah yang dibuang ke TPA akan mengalami proses dekomposisi secara anaerobik sehingga akan menghasilkan gas yang disebut dengan gas *landfill*. Gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa). Penelitian ini bertujuan untuk menghitung potensi gas *landfill* TPA Bakung Kota Bandar Lampung dengan menggunakan metode Tier-2 IPCC, mensimulasikan sistem pembangkit dengan menggunakan software ASPEN PLUS 2006 serta mengkaji kelayakan ekonomi pembangunan PLTSa.

Hasil menunjukkan bahwa pada tahun 2018 -2032 rata-rata potensi gas *landfill* TPA Bakung adalah sebesar 2.931 Gg Co2 Eqv dengan gas metana sebesar 2,665 Juta m³. energi listrik rata-rata yang dapat dibangkitkan adalah 5,8 juta kWh/tahun. Berdasarkan hasil yang diperoleh, pembangunan PLTSa di TPA Bakung adalah layak dan dapat diterima secara ekonomi.

Kata kunci : Gas *Landfill*, ASPEN PLUS, PLTSa, *Feasibility Study*

Judul Skripsi : **FEASIBILITY STUDY PEMBANGUNAN
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH
(STUDI KASUS TPA BAKUNG BANDAR
LAMPUNG)**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Ikromi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1315031061**

Program Studi : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



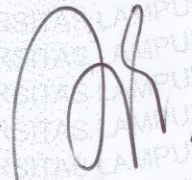
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T.,M.T.
NIP:197204281998032001

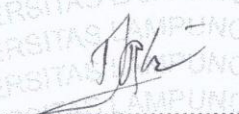

Dr. Eng. Dewi A Iryani, S.T.,M.T.
NIP:197208252000032001

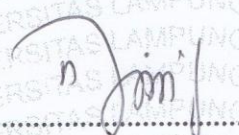
2. Ketua Jurusan Teknik Elektro


Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T.,M.T.
NIP: 197311281999031005

MENGESAHKAN

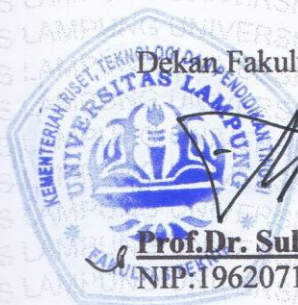
1. Tim Penguji


Ketua : Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T.,M.T. 

Sekretaris : Dr.Eng. Dewi A Iryani, S.T.,M.T. 

Penguji Bukan Pendamping : Osea Zebua, S.T.,M.T 

Dekan Fakultas Teknik




Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP: 196207171987031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 Juni 2017

LEMBAR PERNYATAAN ORISINILITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini saya:

Nama : Muhammad Ikromi
NPM : 1315031061
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Judul : Feasibility Study Pembangunan Pembangkit Listrik
Tenaga Sampah (Studi Kasus: TPA Bakung Bandar
Lampung)

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini adalah benar-benar karya saya sendiri. Tidak ada karya yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata cara penulisan karya ilmiah yang ditetapkan oleh Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 16 Juni 2017

Yang menyatakan



Muhammad Ikromi
NPM: 1315031061



MOTTO

**" IF OPPORTUNITY DOESN'T KNOCK,
JUST BUILD A DOOR "**

PERSEMBAHAN

Perjuangan adalah suatu proses yang menjadikan kita manusia
berkualitas.

Skripsi ini Kupersembahkan untuk kedua Orangtua dan saudara
Tercinta yang telah senantiasa mendukung serta menjadi tiang
fondasi semangat hidupku selama ini.

Muhammad ikromi -2013.

SANWACANA

Puji dan syukur selalu penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT karena berkat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “***Feasibility Study Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (Studi Kasus: TPA Bakung Bandar Lampung)***”.

Skripsi ini penulis buat untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan program S1 reguler di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Skripsi ini dalam prosesnya mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu kelancaran skripsi ini, yaitu:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Fadly Abdullah dan Ibu Sri Ida atas dukungan, kasih sayang, nasihat dan do'a hingga saat ini.
2. Bapak Prof. Dr. Suharno, M. Sc. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

5. Ibu Dr. Eng Dikpride Despa S. T., M. T. , selaku dosen pembimbing utama, terima kasih atas kesediaan dan arahnya dalam penyusunan skripsi ini. Terimakasih atas bimbingan, wejangan, saran dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
6. Ibu Dr. Eng. Dewi A Iryani S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah membuka wawasan sekaligus memberikan berbagai ilmu pengetahuan yang penulis tidak ketahui sebelumnya.
7. Bapak Osea Zebua S. T., M. T., selaku penguji utama skripsi sekaligus pembimbing akademik yang telah memberikan banyak pengarahan dan masukan.
8. Bapak serta Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro atas bimbingan dan ilmu yang telah diberikan selama perkuliahan.
9. Adik dan kakak tercinta yang telah memberikan motivasi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
10. Untuk teman – teman seperjuangan yaitu Abi Dimas , Deri, Embung Bewok, Rendi dan seluruh keluarga Teknik Elektro Angkatan 2013 atas motivasi, pertemanan serta kesetiaan selama masa perkuliahan .
11. Untuk Rasyid, Agus, Nurul, Citra, Ubay, Yona, Umi Niken dan seluruh asisten Laboratorium Teknik Pengukuran Besara Elektrik, terimakasih atas pengalaman dan cerita hidup yang telah kita bagi bersama.

Harapan terbesar penulis agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan pembaca umumnya. Penulis menyadari bahwa selama penyusunan dan penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kesalahan dan kekurangan serta

masih sangat jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu kritik dan saran serta masukan yang bersifat membangun sangat diperlukan untuk perbaikan yang lebih baik.

Bandar Lampung, 16 Juni 2017

Penulis

Muhammad Ikromi
NPM: 1315031061



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRACT	ii
ABSTRAK	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
MOTTO	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
SANWACANA	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	5
1.3. Perumusan Masalah	5
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	6
1.5. Manfaat	6
1.6. Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Sampah.....	8
2.2 Tempat Pembuangan (<i>Landfill</i>)	10
2.3 Gas <i>Landfill</i>	14

2.4 Metode Perhitungan Gas Rumah Kaca	17
2.5 Konversi Energi	26
2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Sampah	28
2.7 Konsep Tekno Ekonomi	47
BAB III METODE PENELITIAN	49
3.1 Studi Literatur	49
3.2 Metode Perhitungan Gas <i>Landfill</i>	51
3.3 Konversi Potensi Gas <i>Landfill</i> Menjadi Energi Listrik	58
3.4 Perencanaan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Sampah	59
3.5 Metode Analisis Tekno Ekonomi	61
3.5.1 Perhitungan <i>Payback Period</i>	61
3.5.2 Perhitungan <i>Net Present Value (NPV)</i>	62
3.5.3 Perhitungan <i>Return of Investment</i>	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	64
4.1. Analisis Potensi Gas <i>Landfill</i> TPA Bakung Kota Bandar Lampung	64
4.1.1 Proyeksi Pertumbuhan Penduduk Kota Bandar Lampung	64
4.1.2 Kondisi Aktual TPA Bakung Kota Bandar Lampung	66
4.1.3 Laju Timbulan Sampah Kota Bandar Lampung	68
4.1.4 Data Spesifik Sampah TPA Bakung	71
4.1.5 Analisis Potensi Gas <i>Landfill</i> TPA Bakung	
4.2 Analisis Potensi Listrik Gas <i>Landfill</i> TPA Bakung	75
4.3 Analisis Termodinamika Aliran Gas dan Spesifikasi Perancangan PLTSa	81

4.4 <i>Capital Budgeting</i> Pembangunan PLTSa Bakung.....	96
4.4.1 <i>Capital Budgeting</i> PLTSa 1 x 500 kW	96
4.4.2 <i>Capital Bbudgeting</i> PLTSa 2 x 250 kW	104
4.4.3 Harga Jual Listrik PLTSa Bakung.....	113
4.5 Analisis Tekno Ekonomi.....	115
4.5.1 <i>Net Present Value</i>	116
4.5.2 <i>Payback Period</i>	118
4.5.3 <i>Return of Investment</i>	120
4.5.4 Analisis Sensitivitas Biaya Investasi Terhadap NPV	123
4.5.5 Analisis Sensitivitas Biaya Operasional dan <i>Maintenance</i> Terhadap NPV.....	124
4.5.6 Analisis Sensitivitas Nilai Tukar Rupiah Terhadap NPV	125
BAB V KESIMPULAN	127
5.1. Kesimpulan	127
5.2 Saran	128
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Nilai kalor berdasarkan jenis sampah	10
Tabel 2.2. Presentase gas penyusun LFG	14
Tabel 2.3. Standar data regional laju pembentukan sampah.....	19
Tabel 2.4. Hasil survey laju pembentukan timbulan sampah padat berbagai kota diindonesia.....	20
Tabel 2.5. Komposisi sampah standar.....	20
Tabel 2.6. Data angka <i>default</i> DOC dan <i>dry matter content</i> Sampah padat kota	22
Tabel 2.7. Default IPCC 2006 MCF untuk berbagai tipe <i>landfill</i>	23
Tabel 3.1. Penjadwalan tugas akhir.	50
Tabel 3.2. Alat dan bahan sampling komposisi sampah	52
Tabel 3.3. Alat dan bahan uji berat kering	54
Tabel 3.4. Alat dan bahan uji kadar abu.....	55
Tabel 3.5. Tabel input data software IPCC 2006	57
Tabel 3.6. Konversi energi gas metana menjadi energi listrik.....	58
Tabel 3.7. Parameter awal perencanaan komponen PLTSa	60
Tabel 3.8. Parameter efisiensi perencanaan komponen PLTSa	60
Tabel 4.1. Proyeksi penduduk Kota Bandar Lampung	65
Tabel 4.2. Profil TPA Bakung Kota Bandar Lampung.....	67
Tabel 4.3. Jumlah sampah yang terangkut ke TPA Bakung Setiap tahun.....	69

Tabel 4.4.	Data karakteristik sampah TPA Bakung Bandar Lampung	72
Tabel 4.5.	Jumlah sampah TPA Bakung berdasarkan komposisi	73
Tabel 4.6.	Potensi gas <i>landfill</i> TPA Bakung	75
Tabel 4.7.	Potensi gas metana TPA Bakung	77
Tabel 4.8.	Energi listrik teoritis yang dapat dibangkitkan	80
Tabel 4.9.	Laju aliran gas pada separator.....	82
Tabel 4.10.	Laju aliran gas pada <i>chiller</i>	83
Tabel 4.11.	Laju aliran gas pada <i>blower</i>	85
Tabel 4.12.	Spesifikasi kerja <i>blower</i>	85
Tabel 4.13.	Laju aliran udara pada kompresor	88
Tabel 4.14.	Spesifikasi kerja kompresor	88
Tabel 4.15.	Laju aliran udara pada <i>combustion chamber</i>	89
Tabel 4.16.	Spesifikasi kerja <i>combustion chamber</i>	90
Tabel 4.17.	Laju aliran gas pada turbin	90
Tabel 4.18.	Spesifikasi kerja turbin	91
Tabel 4.19.	Perbandingan perkiraan energi listrik TPA Bakung Secara teoritis dan aktual	94
Tabel 4.20.	Biaya persiapan pembangunan PLTSa Bakung	97
Tabel 4.21.	Biaya konstruksi sipil PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW.....	98
Tabel 4.22.	Biaya <i>treatment system</i> PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW	99
Tabel 4.23.	Biaya pembangkit PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW	100
Tabel 4.24.	Biaya investasi awal pembangunan PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW	100
Tabel 4.25.	Biaya <i>fixed</i> O&M Pembangunan PLTSa Bakung 1 x 500 kW	104
Tabel 4.26.	Biaya <i>variable</i> O&M Pembangunan PLTSa Bakung 1 x 500 kW	104
Tabel 4.27.	Biaya persiapan pembangunan PLTSa Bakung 2 x 250 kW	105
Tabel 4.28.	Biaya konstruksi sipil PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	106

Tabel 4.29. Biaya <i>treatment system</i> PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	107
Tabel 4.30. Biaya pembangkit PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	107
Tabel 4.31. Biaya investasi awal pembangunan PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	108
Tabel 4.32. Biaya <i>fixed</i> O&M Pembangunan PLTSa Bakung 2 x 250 kW	110
Tabel 4.33. Biaya <i>variable</i> O&M Pembangunan PLTSa Bakung 2 x 250 kW	111
Tabel 4.34. Harga beli listrik PT.PLN berdasarkan teknologi, Kapasitas pembangkit dan tegangan jaringan	114
Tabel 4.35. Penjualan energi listrik PLTSa Bakung	115
Tabel 4.36. Aliran <i>cash flow</i> PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW	116
Tabel 4.37. Aliran <i>cash flow</i> PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	117
Tabel 4.38. Reduksi nilai investasi awal terhadap <i>procced</i> setiap tahun PLTSa Bakung dengan kapasitas 1 x 500 kW	119
Tabel 4.39. Reduksi nilai investasi awal terhadap <i>procced</i> setiap tahun PLTSa Bakung dengan kapasitas 2 x 250 kW	119
Tabel 4.40. Total <i>procced</i> & biaya investasi PLTSa Bakung kapasitas 1 x 500 kW	121
Tabel 4.41. Total <i>procced</i> & biaya investasi PLTSa Bakung kapasitas 2 x 250 kW	121

DAFTAR GAMBAR

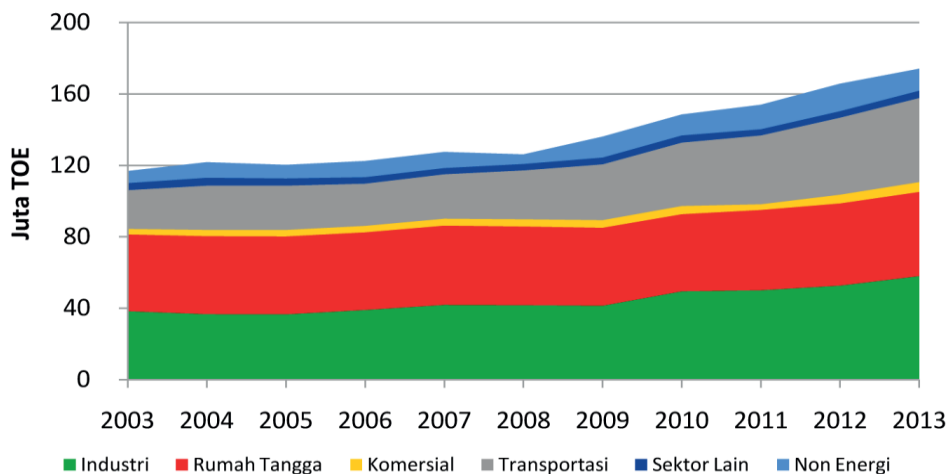
	Halaman
Gambar 1.1. Proyeksi konsumsi energi Indonesia disemua sektor.....	1
Gambar 2.1. Proses biokimia bahan organik	9
Gambar 2.2. Skema penimbunan sampah <i>sanitary landfill</i>	11
Gambar 2.3. Instalasi pipa vertikal	13
Gambar 2.4. Sistem <i>capping</i> pada <i>sanitary landfill</i>	14
Gambar 2.5. Fase penguraian material organik	16
Gambar 2.6. Skema penguraian karbon bahan organik	17
Gambar 2.7. Skema pembangkitan energi listrik.....	27
Gambar 2.8. Sistem pemanfaatan LFG menjadi listrik.....	29
Gambar 2.9. Gas <i>blower</i>	31
Gambar 2.10. Diagram kerja turbin gas	32
Gambar 2.11. Diagram P-T <i>Brayton Cycle</i>	36
Gambar 2.12. Sistem turbin gas siklus terbuka.....	39
Gambar 2.13. Sistem turbin gas siklus tertutup	40
Gambar 2.14 Segitiga daya	44
Gambar 2.15 Diagram fasor sistem tenaga listrik.....	44
Gambar 2.16. Diagram alir tekno ekonomi.....	47
Gambar 3.1. Diagram alir tugas akhir.....	50
Gambar 3.2. IPCC <i>inventory software</i>	57
Gambar 4.1. Perbandingan jumlah sampah terangkut ke TPA Bakung Dan jumlah sampah yang dikelola dengan cara lain.....	70

Gambar 4.2.	Persentase komposisi sampah spesifik TPA Bakung	72
Gambar 4.3.	Volume sampah kota bandar lampung sampai dengan 2032	74
Gambar 4.4.	Potensi gas <i>landfill</i> TPA Bakung	76
Gambar 4.5.	Potensi gas metana TPA Bakung pada tahun 2017 - 2032.....	79
Gambar 4.6.	Model simulasi PLTSa Bakung dengan ASPEN PLUS 2006 <i>Software</i>	81
Gambar 4.7.	Sistem konversi energi PLTSa Bakung.....	93
Gambar 4.8.	Perbandingan investasi awal dua <i>rating</i> PLTSa.....	112
Gambar 4.9.	Perbandingan biaya O&M dua <i>rating</i> PLTSa.....	112
Gambar 4.10.	Perbandingan NPV dua model pembangkit	117
Gambar 4.11.	Perbandingan <i>payback period</i>	120
Gambar 4.12.	Perbandingan ROI.....	122
Gambar 4.13.	Sensitivitas perubahan NPV terhadap biaya investasi	123
Gambar 4.14.	Sensitivitas perubahan NPV terhadap biaya O&M.....	124
Gambar 4.15.	Sensitivitas perubahan NPV terhadap nilai tukar rupiah	125

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara dengan jumlah penduduk terbesar ke-empat didunia sampai saat ini masih harus menghadapi permasalahan dan hambatan dalam pencapaian target pembangunan dalam bidang energi. Sebesar 96% konsumsi energi di Indonesia masih dipenuhi dengan penggunaan energi fosil (48% minyak bumi, 30% batubara dan 18% gas). Sampai saat ini, upaya penggunaan energi terbarukan belum dapat dikembangkan dengan baik. Adanya subsidi yang disediakan oleh pemerintah menyebabkan harga sumber energi fosil menjadi relatif murah sehingga berdampak pada tingginya konsumsi dan perilaku boros masyarakat dalam menggunakan energi.



Gambar 1.1 Proyeksi konsumsi energi Indonesia disemua sektor
(sumber: Dewan Energi Nasional RI 2014)

Gambar 1.1 menunjukkan bahwa penggunaan energi Indonesia diseluruh sektor terus mengalami kenaikan terhitung sejak tahun 2003 – 2013, konsumsi energi di Indonesia mengalami peningkatan dari 79 juta TOE menjadi 134 juta TOE dengan laju pertumbuhan 5,5% pertahun [1].

Sejalan dengan meningkatnya kebutuhan konsumsi akan energi tersebut, secara otomatis penyediaan energi primer dalam negeri juga akan terus mengalami peningkatan secara linear. Namun upaya untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri terkendala oleh ketersediaan infrastruktur seperti pembangkit listrik, pelabuhan, kilang minyak, saluran transmisi, maupun saluran distribusi. Disisi lain, Indonesia sedang menghadapi penurunan cadangan energi fosil yang terus terjadi dan belum dapat diimbangi dengan penemuan cadangan baru. Hal ini perburuk dengan keterbatasan infrastruktur energi yang tersedia sehingga akses masyarakat terhadap energi sangat terbatas. Kondisi ini menyebabkan Indonesia rentan terhadap gangguan yang terjadi di pasar energi global karena sebagian dari konsumsi tersebut terutama produk minyak bumi dipenuhi dari impor.

Lampung merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki permasalahan dalam memenuhi kebutuhan energi khususnya energi listrik. Hal ini dikarenakan jumlah penduduk yang terus meningkat namun tidak dibarengi dengan pembangunan pembangkit listrik yang sesuai. Sampai saat ini Lampung mengalami divisit energi listrik dikarenakan kurangnya pembangkit dan suplai energi listrik yang masih bergantung pada Provinsi Sumatra Selatan.

Bandar Lampung sebagai ibu kota Provinsi Lampung memiliki jumlah penduduk 977.686 jiwa pada tahun 2015 dan merupakan kabupaten dengan kepadatan penduduk nomor 4 di Provinsi Lampung [2]. Jumlah populasi

penduduk yang semakin meningkat menyebabkan terjadinya peningkatan produksi sampah padat kota. Sebagian sampah penduduk Kota Bandar Lampung dibuang dan dikumpulkan pada Tempat Pembuangan Sementara (TPS) untuk kemudian dialihkan ke tempat pembuangan akhir (TPA). Satu-satunya tempat pembuangan akhir di Kota Bandar Lampung adalah TPA Bakung yang menampung lonjakan sampah dari seluruh wilayah Kota Bandar Lampung. Jumlah sampah yang masuk ke TPA Bakung terus mengalami kenaikan seiring dengan perkembangan jumlah penduduk. Namun volume sampah yang besar ini tidak diikuti dengan manajemen sampah yang baik. Sampah yang tidak dikelola dengan baik akan menyebabkan berbagai permasalahan seperti dampak kesehatan, lingkungan maupun masalah terkait sosial dan ekonomi.

Sampah organik yang ditimbun akan mengalami proses dekomposisi secara anaerobik sehingga menghasilkan gas yang disebut dengan gas *landfill*. Gas tersebut mengandung berbagai jenis senyawa seperti karbon dioksida dan gas metana yang termasuk kedalam kelompok Gas Rumah Kaca (GRK)[3]. Gas *landfill* yang terkumpul dari proses fermentasi anaerobik bahan organik tersebut akan menyebabkan meningkatnya suhu disekitar TPA, menimbulkan bau tidak sedap bahkan dapat memicu terjadinya ledakan. Namun, apabila Gas metana yang terkandung pada gas *landfill* dikelola dengan baik, maka akan dapat memberikan berbagai keuntungan seperti mengurangi efek rumah kaca dan kerusakan lingkungan bahkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik yang disebut dengan pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa).

Sebagai satu-satunya TPA di Kota Bandar Lampung, TPA Bakung memiliki berbagai potensi energi yang apabila dimanfaatkan lebih lanjut akan dapat memberikan dampak positif terhadap lingkungan maupun penduduk kota. [4] telah mengkaji potensi konversi sampah anorganik yang berasal dari TPA Bakung menjadi bio-oil dengan menggunakan metode pirolisis isothermal dengan katalis alam, penelitian ini menunjukkan bahwa bio-oil yang dihasilkan dari sampah TPA Bakung mempunyai densitas dan viskositas yang setara dengan diesel 48. Namun, belum ada penelitian yang menghitung potensi energi yang dihasilkan dari kandungan gas *landfill* TPA Bakung sebagai bahan bakar pembangkit listrik alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Provinsi Lampung.

Pembangkit listrik yang memanfaatkan gas *landfill* sebagai bahan bakar utama dinamakan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) yang tergolong kedalam pembangkit energi listrik alternatif. Pemanfaatan dan pembangunan pembangkit listrik alternatif merupakan salah satu cara yang paling tepat untuk mencukupi kebutuhan energi listrik di Provinsi Lampung. Oleh sebab itu, kajian terhadap potensi gas *landfill* dari TPA Bakung sebagai bahan bakar utama Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) perlu dilakukan dalam rangka mengatasi permasalahan ketersediaan energi. Selain itu, kajian secara ekonomis mengenai perencanaan pembangunan PLTSa (dalam kasus TPA Bakung) perlu dilakukan untuk mengetahui apakah perencanaan pembangunan PLTSa tersebut dapat memberikan keuntungan dari aspek ekonomi sehingga diharapkan akan menghasilkan suatu rekomendasi-rekomendasi terkait perencanaan pembangunan PLTSa dikemudian hari.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan tugas akhir ini antara lain:

1. Menghitung potensi gas *landfill* yang dihasilkan dari penguraian limbah organik Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung Kota Bandar Lampung sebagai sumber energi listrik alternatif.
2. Menghitung konversi potensi gas *landfill* terhadap kapasitas energi listrik yang dapat dibangkitkan.
3. Menentukan spesifikasi terhadap komponen-komponen utama PLTSa Bakung berdasarkan metadata yang diperoleh.
4. Melakukan studi kelayakan ekonomi (*Feasibility Study*) terhadap pemanfaatan gas *landfill* sebagai pembangkit energi listrik alternatif.

1.3 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dirumuskan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapakah potensi gas *landfill* yang dihasilkan dari timbunan sampah TPA Bakung Kota Bandar Lampung ?.
2. Berapakah kapasitas energi listrik yang dapat dibangkitkan dari kandungan gas *landfill* TPA Bakung Kota Bandar Lampung ?.
3. Bagaimanakah spesifikasi dari komponen-komponen utama Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) yang dapat dibuat berdasarkan metadata yang diperoleh ?.
4. Apakah proyek pembangunan PLTSa dengan pemanfaatan sampah TPA Bakung dapat dilakukan dan layak secara ekonomis?

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian pada penulisan tugas akhir ini antara lain:

1. Data timbulan dan komposisi sampah didapatkan berdasarkan survey yang dilakukan langsung pada TPA Bakung dan metadata yang berasal dari beberapa instansi pemerintahan Provinsi Lampung .
2. Perhitungan gas *landfill* menggunakan metode Tier 2 IPCC.
3. Hanya mengkaji potensi dan pemanfaatan energi alternatif gas *landfill* sehingga menghasilkan pembangkit listrik.
4. Menetapkan spesifikasi PLTSa yang dilakukan mencakup pemilihan jenis turbin, spesifikasi turbin, dan jumlah unit generator yang dibutuhkan berdasarkan potensi gas *landfill* menggunakan ASPEN PLUS.
5. Tidak membahas mengenai *lifetime* peralatan pembangkit.
6. Analisis Tekno Ekonomi yang dilakukan hanya terkait masalah biaya investasi awal, *payback period*, *Net Present Value* dan *Return Of Investment* setelah pembangkit terealisasi.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah dapat memberikan informasi terkait potensi gas *landfill* (LFG) yang dihasilkan dari penguraian sampah di TPA Bakung Kota Bandar Lampung, memberikan informasi terkait potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan, perencanaan komponen pembangkit serta memberikan informasi mengenai studi kelayakan pembangunan proyek PLTSa yang ditinjau dari aspek ekonomi sehingga akan memberikan suatu bentuk rekomendasi yang dapat digunakan sebagai rujukan dimasa mendatang.

1.6 Sistematika Penulisan

laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

BAB I. PENDAHULUAN

Menguraikan tentang latar belakang penulisan laporan, tujuan, batasan masalah, manfaat, metodologi penulisan serta sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Menjelaskan konsep dasar mengenai teori-teori yang berkaitan dalam penyusunan tugas akhir ini

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini akan dijelaskan mengenai metode dan prosedur pelaksanaan dalam pengerjaan tugas akhir

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan mengenai jumlah emis gas *landfill* TPA Bakung Bandar Lampung, menjelaskan hasil rancangan komponen-komponen PLTSa dan hasil kajian kelayakan ekonomi (*Feasibility Study*).

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan yang didapatkan dari pembahasan dan analisa yang dilakukan sebelumnya serta saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sampah

Sampah ialah bagian dari sesuatu yang tidak dapat dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang harus dibuang, pada umumnya berasal dari kegiatan yang dilakukan oleh manusia, termasuk kegiatan industri [5]. Ilmu Kesehatan Lingkungan mengartikan sampah sebagai bagian dari benda atau hal lain yang tidak disenangi, tidak digunakan atau benda yang harus dibuang dari sisa aktifitas makhluk hidup.

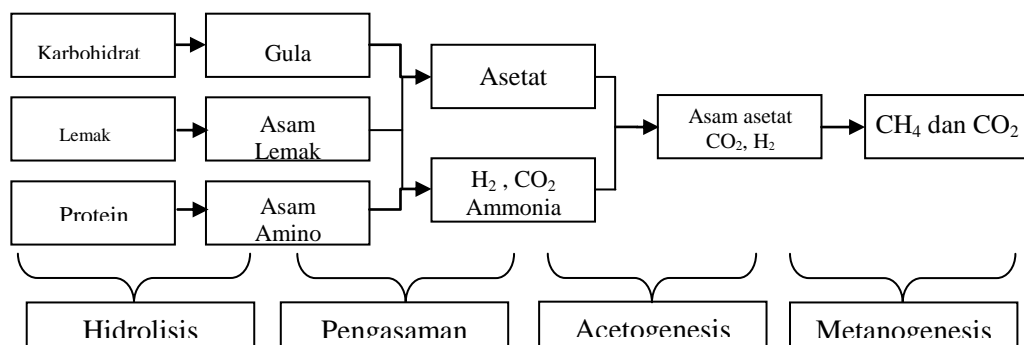
Sampah biasanya digolongkan kedalam tiga jenis berdasarkan sifatnya yaitu sampah organik, sampah anorganik dan sampah bahan berbahaya dan beracun (B3). Sampah organik adalah sampah yang memiliki komposisi bahan yang dapat mengalami penguraian secara biologis atau alami seperti sampah sisa makanan, kotoran hewan, kertas, kayu maupun sampah sisa perkebunan lainnya. Sampah anorganik merupakan sampah yang sukar terurai secara alami dan membutuhkan penanganan dan proses lebih lanjut untuk menghancurkannya. Beberapa jenis sampah anorganik bahkan baru akan terurai setelah kurun waktu yang sangat lama sehingga akan menimbulkan kerusakan lingkungan, Contoh dari sampah anorganik adalah besi, plastik, kaleng dan sebagainya, Sedangkan sampah bahan berbahaya dan beracun (B3) merupakan sampah yang dapat membahayakan lingkungan maupun manusia seperti limbah rumah sakit dan limbah pabrik [5].

1. Proses penguraian sampah

Sampah dapat mengalami penguraian melalui dua cara yaitu secara fisika dan secara biokimia. Penguraian sampah organik akan terjadi dengan sendirinya karena peranan bakteri pengurai sedangkan sampah anorganik dan B3 dapat terurai melalui tindakan lebih lanjut seperti pembakaran yang tergolong kedalam jenis penguraian secara fisika.

- Penguraian Biokimia

Sampah organik yang tersusun atas berbagai materi organik seperti karbohidrat, lemak dan protein yang apabila dibiarkan begitu saja akan mengalami suatu proses pembusukan oleh mikroorganisme, sehingga material organik tersebut akan terpecah menjadi substrat yang lebih halus akibat perubahan aktivitas sel biologis dari bahan organik yang diakibatkan oleh berbagai reaksi kimia. Proses inilah yang dinamakan dengan proses biokimia. Proses penguraian sampah secara biokimia akan menghasilkan produk sampingan berupa gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Proses penguraian secara biokimia melalui beberapa proses yaitu hidrolisis, pengasaman, acetogenesis serta metanogenesis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Proses biokimia bahan organik
(M. Rizal, 2011)

- Penguraian Fisika

Penguraian sampah secara fisika dapat dilakukan dengan proses pembakaran. Pada proses penguraian ini, sampah yang dibakar akan menghasilkan nilai kalor yang berbeda tergantung pada jenis dan jumlah sampah. Energi kalor yang dibangkitkan dari pembakaran sampah ini disebut sebagai energi biomassa yang diperlihatkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Nilai kalor berdasarkan jenis sampah[6]

No	Jenis sampah	Presentase (%)	Nilai Kalor (MJ/kg)	Total Kalor (MJ/ton)
1	Sampah daun	17	5,7	969
2	Sampah sayur dan buah	43	14,2	6.106
3	Kertas	3	15,6	468
4	Tekstil	5	36,8	1.840
5	Kotoran	12	6,9	828
6	Lain-lain	2	18,1	362
	Total Kalor		82	10.573

2.2 Tempat Pembuangan (*Landfill*)

Terdapat tiga jenis tempat pembuangan yaitu *open dumping*, *controlled landfill* dan *sanitary landfill*.

1. *Open dumping*

Sistem pembuangan jenis merupakan cara pembuangan sampah yang paling sederhana dimana sampah pada suatu TPA hanya dihamparkan pada suatu lokasi dan dibiarkan menumpuk sampai lokasi tersebut penuh.

2. *controlled landfill*

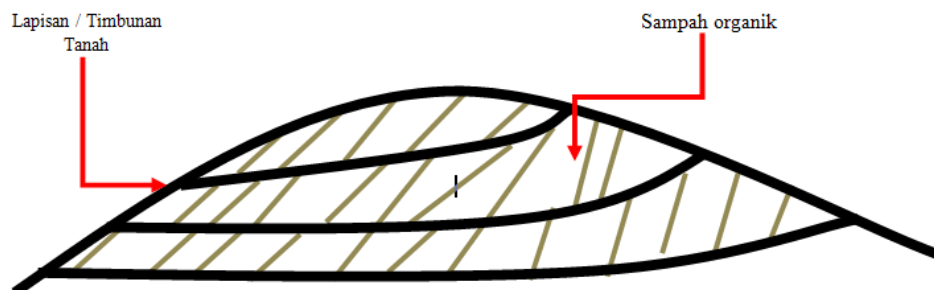
sistem pembuangan jenis ini merupakan pengembangan dari sistem *open dumping* dimana dalam jangka waktu tertentu, sampah yang telah

terkumpul pada TPA ditimbun menggunakan lapisan tanah untuk mengurangi potensi kerusakan lingkungan yang ditimbulkan.

3. *sanitary landfill*

sistem pembuangan jenis *sanitary landfill* merupakan sistem standar yang ditetapkan oleh dunia internasional. Sistem ini menerapkan penutupan sampah rutin setiap hari sehingga potensi gangguan terhadap lingkungan dapat diminimalisir. Selain itu, gas *landfill* yang dihasilkan dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik.

Manfaat dari *Sanitary Landfill* adalah mampu meningkatkan tanah yang rendah, tanah yang terbentuk dapat dimanfaatkan untuk daerah perumahan asalkan daerah tersebut tidak digali sumur karena air di daerah tersebut mengandung bahan berbahaya yang mengandung banyak racun berbahaya [7]. Teknologi *sanitary landfill* yang diterapkan pada tempat pembuangan akhir mampu untuk mencegah air tanah terkontaminasi oleh lindi (zat cair sisa penguraian materi organik) karena *Geomembrane* yang dipasang didasar TPA. Sampah organik secara periodik ditimbun menggunakan tanah dan dilapisi oleh *geomembrane* sebagai pencegah kebocoran air lindi sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.2



Gambar 2.2. Skema penimbunan sampah *sanitary landfill*

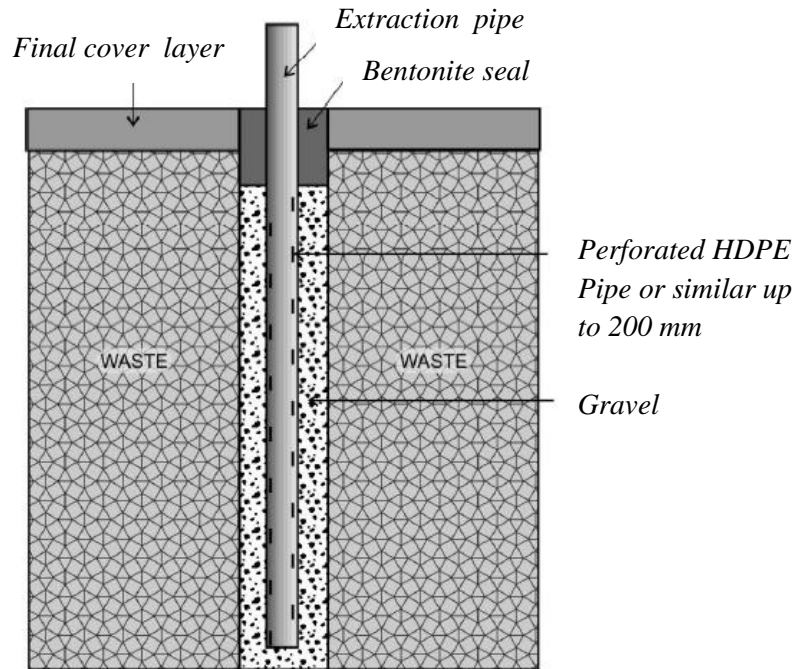
Dengan menerapkan sistem *sanitary landfill* pada tempat pembuangan akhir (TPA), maka gas *landfill* (LFG) yang dihasilkan dari proses pembusukan sampah dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan lebih lanjut menjadi sumber energi alternatif dan pembangkit listrik dengan tingkat efisiensi yang tinggi selain itu penerapan *sanitary landfill* dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan TPA.

Pengelolaan gas *landfill* dengan menggunakan teknologi *sanitary landfill* memerlukan beberapa prosedur instalasi. Perancangan sistem ekstraksi dan *capping* lahan merupakan bagian penting dalam pemanfaatan dan pengumpulan gas *landfill* dan berfungsi untuk memungkinkan terjadinya penyerapan kelembapan. Lahan tempat pembuangan akhir harus dilapisi dengan membran yang sesuai untuk mencegah lepasnya gas *landfill* ke udara[8].

1. Perencanaan sistem ekstraksi *Landfill*

Sistem ekstraksi untuk LFG pada sistem *sanitary landfill* dapat berupa pipa evaporasi dalam konfigurasi vertikal, horizontal maupun diagonal. Namun metode perencanaan sistem ekstraksi yang paling umum digunakan adalah dengan menggunakan pipa evaporasi dengan konfigurasi vertikal. Pada sistem ekstraksi ini, pipa dengan panjang 40-80 meter ditanam kedalam tanah dengan fungsi menyerap dan mengumpulkan gas *landfill* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. pipa yang digunakan biasanya adalah pipa yang terbuat dari *polyethylene* yang telah dibuat lubang-lubang epaporasi dengan diameter sebesar 200 mm. Sebelum pemasangan pipa dilakukan, maka akan digali terlebih dahulu sumur evaporasi dengan diameter 50 sampai dengan 100 cm. Setelah penggalian sumur selesai

maka pipa *polyethylene* dengan diameter 10-15 cm diletak ke tengah lubang sumur dan bagian disekitar sumur ditimbun.



Gambar 2.3 Instalasi pipa vertikal
(Sumber: Horacio Terraza, 2009)

Panjang pipa adalah 40 – 80 meter bergantung pada kedalaman TPA. Permasalahan yang paling ditemui pada konfigurasi ini adalah apabila terdapat genangan air didalam sumur gas. Apabila terdapat genangan air dalam sumur gas maka sumur gas tersebut tidak dapat beroperasi dengan baik. Oleh sebab itu ukuran pipa harus diperbesar untuk mencegah perembesan air kedalam sumur gas

2. Perencanaan Sistem *capping*

Untuk mencegah LFG terlepas ke udara bebas, maka tempat pembuangan sampah harus ditutup dengan *geomembran* yang berfungsi untuk mengumpulkan gas LFG kedalam *sanitary landfill* sehingga kandungan metan dan gas emisi lainnya tidak terlepas ke atmosfer, mencegah perembesan air, mengurangi tingkat

kelembapan serta mengurai bau tak sedap akibat penguraian sampah organik. Selain diletakan pada bagian atas *landfill*, geomembran juga digunakan sebagai dasar *landfill* guna menahan air lindi (*leacheate*) meresap dan mencemari air bersih dilapisan tanah yang lain. Sistem pelapisan timbunan sampah dengan *geomembrane* atau sistem *capping* ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Sistem *capping* pada *sanitary landfill*
(Sumber: Horacio Terraza, 2009)

2.3 Gas *Landfill* (LFG)

Gas *Landfill* atau LFG merupakan gas yang dihasilkan oleh mikroba pada saat bahan organik mengalami proses fermentasi dalam suatu keadaan anaerobik yang sesuai baik dari segi suhu, kelembaban, dan keasaman. LFG dapat terjadi akibat penguraian material organik yang terdapat pada tempat pembuangan akhir. Sebagian besar kandungan dari gas *landfill* adalah metana dan karbon dioksida[9].

Tabel 2.2 Presentase gas penyusun LFG [8]

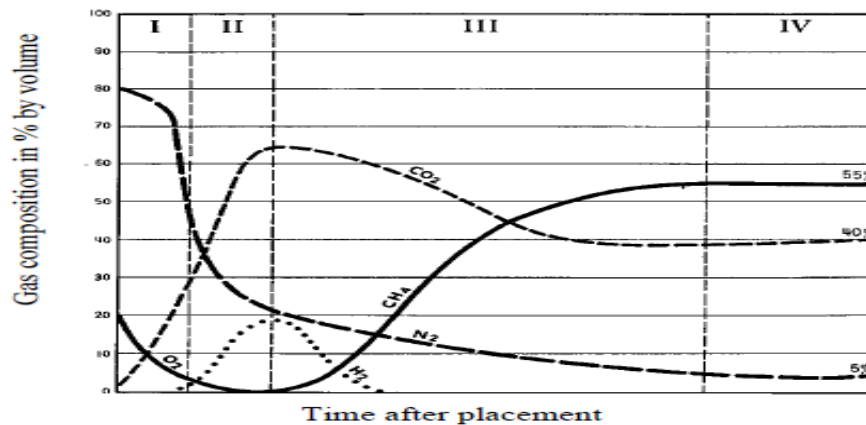
No	Gas Penyusun LFG	Rumus Kimia	Persentase kandungan
1	Metana	CH ₄	40 – 60 %
2	Karbon dioksida	CO ₂	25 -50 %
3	Nitrogen	N ₂	3 – 15 %
4	Oksigen	O ₂	0 – 4 %
5	Hidrogen	H ₂	0 – 1 %

Tabel 2.2 Presentase gas penyusun LFG (lanjutan)

No	Gas Penyusun LFG	Rumus Kimia	Persentase kandungan
6	Argon	Ar	0 – 0.4 %
7	Hydrogen sulfida	H ₂ S	0 – 200 ppm
8	Clorine	Cl	0 – 200 ppm
9	Fluorine	F	0 – 200 ppm

Tabel 2.2 memperlihatkan presentase gas penyusun LFG, terlihat bahwa kandungan gas terbesar yang terdapat pada LFG adalah metana sebesar 45 – 60 % dan diikuti oleh karbon dioksida sebesar 25 – 50 %. Baik gas metana maupun karbon dioksida memiliki peran dalam peningkatan pemanasan suhu bumi dan dikategorikan sebagai gas rumah kaca (GRK). *Landfill* gas yang dihasilkan pada tempat pembuangan akhir akan berbahaya apabila tidak dikelola dan dikendalikan dengan baik. Kandungan gas metana pada LFG merupakan gas yang mudah terbakar sehingga resiko terjadi ledakan disekitar lokasi TPA sangat tinggi. Menurut lenny Bernstein (2007) menyatakan bahwa pengaruh gas metana terhadap peningkatan pemanasan global 21 kali lebih besar dibandingkan dengan karbon dioksida. Proses *flaring* dan ekstraksi gas metana dapat dilakukan sebagai upaya menurunkan emisi gas metan dan mengubahnya menjadi CO₂.

Pembentukan gas *landfill* adalah melalui berbagai proses biologis. Gas *landfill* dihasilkan dari proses dekomposisi materi sampah organik. Diperkirakan 1.87 m³ gas *landfill* dihasilkan dari setiap kilogram bahan organik yang terurai (menjadi 50% gas metana). Penguraian material organik secara anaerobik terdiri dari 4 fase seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Fase penguraian material organik
(Sumber: Horacio Terraza, 2009)

Gambar 2.5 menunjukkan 4 fase penguraian material organik sampai menjadi gas *landfill*. Adapun penjelasan dari ke-empat fase tersebut adalah sebagai berikut[3]:

Fase I : Proses *Aerobic*

Proses berlangsung selama beberapa hari sampai dengan beberapa minggu

Fase II : Proses *Anaerobic dan non-methanogenic*

Proses berlangsung selama sebulan sampai dengan satu tahun

Fase III Proses *anaerobic, methanogenic, unsteady proses*

Proses berlangsung selama beberapa bulan sampai dengan dua tahun

Fase IV Proses *anaerobic, methanogenic, steady*

Proses berlangsung dalam 10 tahun sampai dengan 50 tahun. Setelah terjadi proses anaerobic, sampah akhirnya akan terdekomposisi secara sempurna setelah 30 sampai dengan 50 tahun.

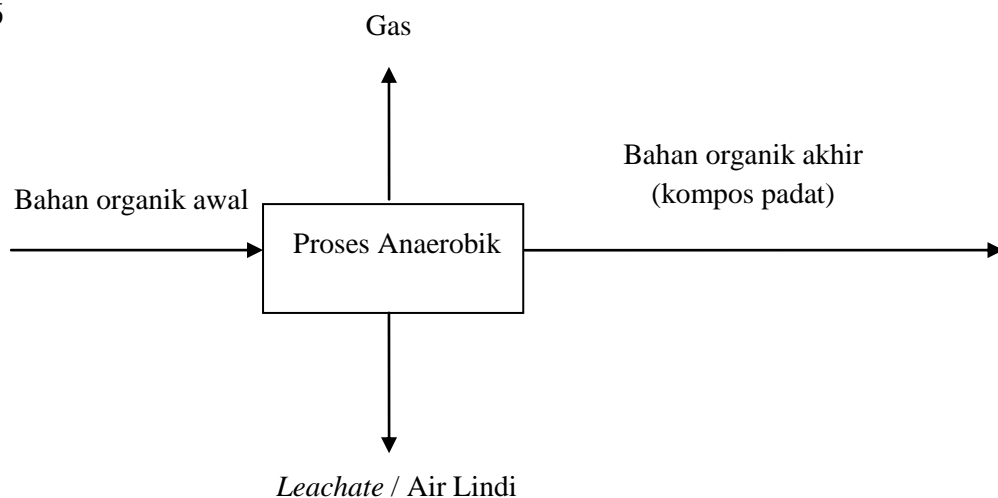
2.4 Metode Perhitungan Gas Rumah Kaca

Untuk mengetahui emisi gas rumah kaca yang terbentuk dari suatu proses dekomposisi bahan organik maka dapat dilakukan dengan beberapa metode pendekatan yaitu perhitungan menggunakan neraca carbon dan perhitungan menggunakan metode perkiraan. Kedua metode tersebut umum digunakan untuk menghitung volume gas rumah kaca yang dihasilkan dari suatu bahan organik yang terurai secara anaerobik dengan cara mengetahui kandungan karbon dan beberapa parameter pembentukan gas rumah kaca.

1. Metode Neraca Carbon[10]

Semua bahan organik memiliki unsur karbon (C) yang apabila dilakukan proses perbusukan secara aerobik maupun anaerobik, maka unsur karbon yang ada dalam bahan organik tersebut akan membentuk beberapa produk sampingan dimana apabila kandungan karbon pada semua produk tersebut bila di jumlahkan akan sama dengan jumlah karbon dari bahan organik awal sebelum proses penguraian terjadi. Adapun diagram alir neraca carbon ditampilkan pada Gambar

2.6



Gambar 2.6 Skema penguraian karbon bahan organik.

Persamaan yang digunakan untuk mencari keseimbangan kandungan karbon dari suatu bahan organik adalah

$$C_{char} = C_{MSW} + C_{LP} + C_{gas}$$

$$C_{gas} = C_{char} - C_{MSW} - C_{LP} \quad (2.1)$$

Dimana:

C_{char} = kandungan karbon awal

C_{MSW} = kandungan karbon kompos padat

C_{LP} = kandungan karbon *leachate*

C_{gas} = kandungan karbon pada emisi gas

2. Metode Perkiraan

Dengan mengetahui data aktifitas sampah, data penduduk dan karakteristik sampah pada suatu tempat pembuangan akhir (TPA), maka emisi gas rumah kaca yang dibangkitkan dari TPA tersebut dapat diperkirakan. Terdapat beberapa model yang dijadikan rujukan perhitungan emisi GRK salah satunya adalah *Environmental Protection Agency (EPA)* yang diterapkan di Amerika dan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Setiap model perhitungan GRK mempunyai kelemahan dan kelebihan masing-masing. Kelebihan dari model menurut IPCC salah satunya adalah memiliki spesifikasi parameter data yang spesifik terhadap suatu wilayah sehingga dapat diterapkan untuk negara atau wilayah yang belum memiliki data *specific country* yang akurat seperti Indonesia.

A. Metode Perhitungan GRK dengan IPCC [11]

Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihitung dari suatu tempat pembuangan akhir sangat bergantung pada parameter dan data aktifitas sampah, sehingga untuk mendapatkan nilai emisi GRK maka perlu dilakukan beberapa tahapan seperti pengumpulan sampah, perhitungan nilai *Degradable Organic Carbon* (DOC), *Dry Matter Content* dan faktor emisi.

1. Pengumpulan Data Karakteristik Sampah Padat

Untuk mengetahui nilai gas metana yang terkandung pada TPA maka diperlukan beberapa data karakteristik sampah yang mencakup jumlah sampah (MSW), *Degradable Organic Carbon* (DOC), *Dry Matter Content* dan faktor emisi gas metana.

a. Jumlah sampah padat

Jumlah sampah padat dipengaruhi oleh kepadatan penduduk yang mendiami wilayah tersebut sehingga pembentukan sampah kota di suatu wilayah diperkirakan dari laju pembentukan sampah per kapita dan jumlah penduduk di wilayah tersebut.

Tabel 2.3 Standar data regional laju pembentukan sampah [11]

No	Karakteristik	Asia Bagian Timur	Asia Bagian Tenggara	Indonesia (2000)
1	Laju pembentukan sampah (ton/kapita/th)	0.37	0.27	0.28
2	Fraksi sampah yang dibuang ke TPA/SWDS	0.55	0.59	0.80
3	Fraksi sampah yang dibakar	0.26	0.09	0.05
4	Fraksi sampah yang dikompos	0.01	0.05	0.10
5	Fraksi sampah yang tidak spesifik pengolahannya	0.18	0.27	0.05

Tabel 2.4 Hasil survey laju pembentukan timbunan sampah padat berbagai kota di Indonesia [11]

No	Tipe Kota	Ton/kapita/tahun
1	Kota metropolitan	0.28
2	Kota besar	0.22
3	Kota sedang	0.20
4	Kota kecil	0.19
	Rata-rata	0.22

Jumlah sampah padat kota merupakan gabungan dari beberapa komposisi sampah tergantung dari jenis kota, iklim, gaya hidup serta perilaku masyarakat diwilayah tersebut. Untuk meningkatkan tingkat akurasi data jumlah sampah padat kota maka dilaksanakan survey karakteristik sampah yang dikeluarkan oleh kementerian lingkungan hidup (KLH) hasil pilot project JICA-KLH-ITB dan BLH Sumatra Utara, 2011.

Apabila suatu kota atau wilayah belum memiliki data komposisi sampah yang akurat dan belum memenuhi syarat untuk melakukan survey komposisi, maka data standar IPCC 2006 dapat dijadikan rujukan.

Tabel 2.5 Komposisi sampah standar [11]

Komposisi sampah	Komposisi Sampah, % berat basah			
	Sumatra Selatan	Sumatra Utara	Rata-rata	Standar IPCC wilayah asia tenggara
Sisa makanan	59%	50%	54%	43%
Kertas + karton +nappies	15%	13%	14%	12,9%
Kayu	3%	14%	9%	9,9%
Kain+ produk tekstil	2%	3%	2%	2,7%
Karet dan kulit	0%	1%	0%	0,9%
Plastik	19%	10%	15%	7,2%
Logam	0%	0%	0%	3,3%
Gelas	1%	1%	1%	4,0%
Lain-lain	0%	7%	3%	16,3%

2. *Degradable Organic Carbon* (DOC) [10]

DOC merupakan suatu parameter yang akan mempengaruhi besarnya nilai gas metana yang terbentuk saat proses degradasi sampah organik pada tempat pembuangan akhir. Untuk sampah padat area perkotaan DOC sampah bulk diperkirakan berdasarkan angka rata-rata DOC masing-masing komponen sampah. DOC dihitung berdasarkan angka rata-rata DOC masing-masing komponen sampah.

$$DOC = \sum_i(DOC_i \times W_i) \quad (2.2)$$

Dimana:

DOC = Fraksi *degradable organic carbon* pada sampah bulk, Ggram C/Gram sampah

DOC_i = fraksi *degradable organic carbon* pada komponen sampah

W_i = fraksi komponen sampah jenis i (basis berat basah)

i = komponen sampah

3. *Dry Matter Content* (Kandungan Bahan Kering) Sampah Padat Kota [10]

Kandungan bahan kering adalah fraksi (%) berat kering suatu komponen sampah basah, yang dihitung berdasarkan rasio berat kering terhadap berat basah komponen sampah. Kandungan bahan kering ditentukan dengan pendekatan *gravimetry* (penimbangan berat sample yang representatif) dan dilakukan untuk setiap jenis komponen sampah yang dianggap memiliki kandungan air. Basis penentuan kandungan bahan kering adalah per jenis komponen sampah. Tidak semua komponen sampah memiliki kandungan air. Angka standar DOC dan *dry matter content* sampah kota berdasarkan IPCC GL 2006 diperlihatkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Data angka *default* DOC dan *dry matter content* sampah kota [10]

Komponen sampah	<i>Dry matter content</i> (% berat basah)	DOC (% berat basah)		<i>DOC content in % of dry waste</i>		<i>Total carbon content in % of dry weight</i>		<i>Fossil carbon fraction in % of total carbon</i>	
	<i>Default</i>	<i>Default</i>	<i>Range</i>	<i>Default</i>	<i>Range</i>	<i>Default</i>	<i>Range</i>	<i>Default</i>	<i>Range</i>
Kertas	90	40	36-45	44	40-50	46	42-50	1	0-5
Tekstil	80	24	20-40	30	25-50	50	25-50	20	0-0.5
Sisa makanan	40	15	8-20	38	20-50	38	20-50	-	-
Limbah kayu	85	43	39-46	50	46-54	50	46-54	-	-
Limbah taman	40	20	18-22	49	45-55	49	45-55	0	0
Napies	40	24	18-32	60	44-80	70	54-90	10	10
Karet dan kulit	84	(39)	(39)	(39)	(39)	67	67	20	20
Plastik	100	-	-	-	-	75	67-85	100	95-100
Logam	100	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Gelas	100	-	-	-	-	NA	NA	NA	NA
Lain-lain	90	-	-	-	-	3	8-5	100	50-100

4. Faktor Koreksi Metan

Tempat pembuangan akhir di sebagian besar kota-kota besar di Indonesia berupa pembuangan limbah padat yang tak dikelola, karena pada dasarnya berupa pembuangan terbuka (*open dumping system*) dan sesuai dengan konteks dari emisi GRK. Berdasarkan IPCC 2006 GLs, dikategorikan sebagai limbah- padat- dalam yang tak dikelola (ketebalan > 5m) dan/atau Tabel air tinggi. Keterangan mengenai tipe/jenis TPA digunakan untuk menentukan faktor koreksi CH₄ (MCF) dari IPCC 2006 GL (default value) diperlihatkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 *Default IPCC 2006 MCF untuk berbagai tipe landfill*

Tipe Lokasi TPA	Angka <i>Default</i> Faktor Koreksi Metan (MCF)
<i>Managed - anaerobic1</i>	1
<i>Managed - semi - aerobic2</i>	0.5
<i>Unmanaged3 - deep (>5 m waste) and /or high water table</i>	0.8
<i>Unmanaged4 - shallow (<5 m waste)</i>	0.4
<i>Uncategorised SWDS5</i>	0.6

Sejak tahun 1980 beberapa model matematika telah dikembangkan dalam perhitungan jumlah atau produksi gas *landfill* yang dihasilkan dari suatu tempat pembuangan akhir. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menggolongkan metode perhitungan emisi gas *landfill* yang dibangkitkan dari tumpukan sampah TPA kedalam 3 metode utama. Metode tersebut dibagi berdasarkan tingkat ketelitian dalam perhitungannya sehingga parameter-parameter data masukan dapat berbeda untuk setiap tingkatan metode.

1. Tier 1

Pada metode perhitungan ini, gas *landfill* yang dihasilkan dari tempat pembuangan akhir diasumsikan tetap sama sampai dengan waktu dimana materi organik / sampah tersebut terurai secara sempurna. Model jenis ini mengabaikan pengaruh umur sampah dan cocok diterapkan untuk perhitungan inventarisasi emisi Gas Rumah Kaca. Dalam metode Tier-1 ini juga sebagian besar menggunakan data standar untuk data aktivitas dan faktor emisi yang ditetapkan oleh IPCC pada masing-masing negara. Metode perhitungan emisi gas rumah kaca menggunakan metode Tier-1 dapat dilakukan apabila perhitungan emisi gas rumah kaca dilakukan pada lokasi yang belum memiliki data aktivitas yang *valid* dan belum mampu melakukan penelitian terkait parameter data aktivitas tersebut.

2. Tier-2

Perhitungan berdasarkan metode *first order decay* dimana data aktivitas yang digunakan merupakan data yang memiliki tingkat akurasi tinggi karena disurvei secara langsung dari TPA yang bersangkutan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas dari perhitungan emisi GRK, namun pada metode masih digunakan angka standar untuk beberapa faktor emisi. Untuk menghitung potensi Gas Metana dalam suatu gas *landfill* yang terdapat di TPA digunakan persamaan sebagai berikut [12]:

$$L_o = DDOC_m \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (2.3)$$

Dimana :

L_o = potensi Metana yang dibangkitkan (Gg)

$DDOC_m$ = masa DOC yang dapat dikomposisikan (Gg)

F = fraksi pembentukan gas metana

16/12 = perbandingan berat atomik metana dan carbon

Sedangkan untuk mengetahui besarnya nilai $DDOC_m$ maka diperlukan data jumlah sampah yang terdapat dalam suatu TPA dan dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [12]:

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot MCF \quad (2.4)$$

Dimana :

W = jumlah sampah (Gg)

DOC = *Degradable Organic Carbon* sampah (basis berat basah)

DOC_F = fraksi nilai DOC yang dapat terkomposisi

MCF = faktor koreksi Gas Metana

3. Tier-3

Metode jenis ini adalah pengembangan dari *first order model* yang turut menghitung jumlah sampah, kandungan karbon, dan konstanta k untuk setiap jenis sampah organik. L_o tidak digunakan secara eksplisit sebagai komponen dari karbon yang dapat terdegradasi digunakan dalam persamaan untuk menghitung produksi metana dan emisi. Model ini merupakan pemodelan perhitungan LFG yang terbaru dan mungkin adalah model perhitungan terbaik dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Model ini juga disebut dengan model *First Order Decay Model* dari IPCC karena model ini mampu menghitung emisi gas metana dalam satuan ton pertahun dari proses penguraian karbon pada sampah organik. Adapun persamaan untuk model perhitungan ini adalah [12]:

$$BE_{CH_4,SDWS,y} = \phi(1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j(y-x)} \cdot (1 - e^{ik_j}) \quad (2,5)$$

Dimana :

- $BE_{CH_4,SDWS,y}$ = jumlah gas metana yang dibangkitkan dari *landfill*
- Φ = faktor koreksi
- F = jumlah metana yang ditangkap pada tempat pembuangan akhir yang digunakan dalam berbagai keperluan
- GWP_{CH_4} = *Global Warming Potential* dari gas metana
- OX = faktor oksidasi
- F = nilai gas metana yang difaksi dari material organik

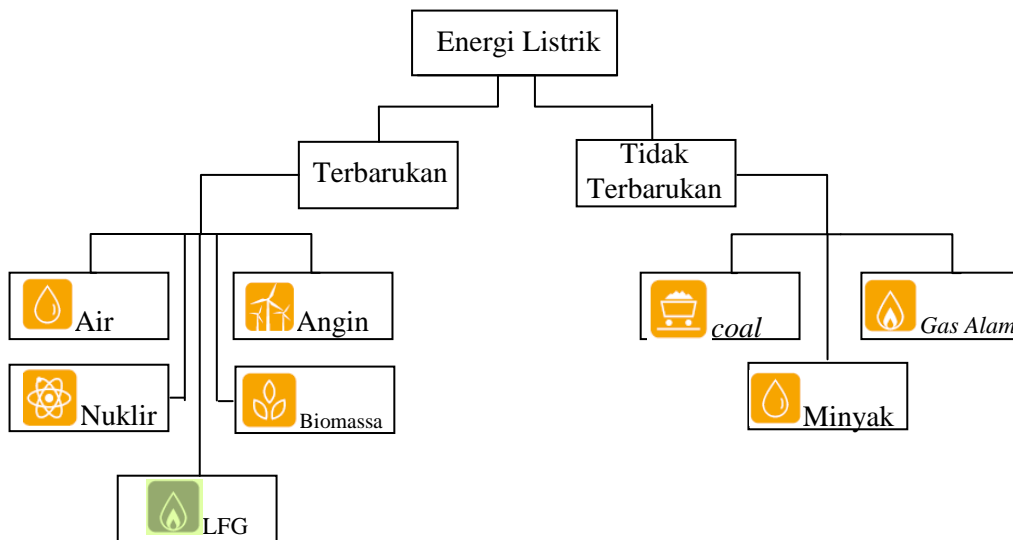
DOC_F	=	fraksi degradasi material karbon
MCF	=	faktor koefisien gas metan
$W_{j,x}$	=	jumlah sampah organik jenis j yang diambil dari tempat pembuangan akhir (TPA) pada tahun ke x .
DOC_j	=	fraksi <i>degradable carbon</i> pada sampah organik tipe j
k_j	=	<i>rating</i> penguraian untuk sampah tipe j
J	=	tipe katagori sampah (index)
x	=	tahun selama kredit terjadi, dimulai dari tahun pertama sampai dengan terakhir emisi dihitung.
y	=	tahun dimana gas metan dihitung.

Volume dari gas *landfill* yang dihasilkan dan dikumpulkan dari TPA bergantung pada parameter-parameter yang telah dijelaskan sebelumnya. Menurut Gendebien (1991) bahwa gas *landfill* yang diharapkan dapat diproduksi dari setiap ton sampah organik adalah sebesar $60 - 400 \text{ m}^3$.

2.5 Konversi Energi

Energi dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu zat untuk dapat melakukan proses kerja. Energi dibedakan menjadi dua macam yaitu energi primer dan energi sekunder. Energi primer adalah sumber daya energi yang telah disediakan langsung oleh alam sedangkan energi sekunder adalah energi primer yang telah dimanfaatkan lebih lanjut. Energi yang terdapat di alam bersifat kekal dimana energi tersebut tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan. Energi dapat diubah menjadi bentuk lain dengan menggunakan proses tertentu, hal inilah yang disebut dengan proses konversi energi [13].

Energi listrik merupakan energi yang dihasilkan oleh benda yang bermuatan listrik. Muatan listrik statis akan menimbulkan energi potensial listrik, sedangkan muatan listrik dinamis akan menimbulkan arus listrik dan energi magnet [14]. Energi listrik merupakan jenis energi sekunder, oleh sebab itu dibutuhkan sumber daya energi primer untuk dilakukan proses konversi energi. Perubahan berbagai sumber energi primer menjadi energi listrik diperlihatkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Skema pembangkitan energi listrik [15]

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa untuk membangkitkan energi listrik, sumber energi primer dapat berasal dari dua jenis energi. Sumber pembangkitan energi primer yang dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik digolongkan menjadi dua yaitu energi terbarukan dan energi tak terbarukan. Minyak dan batu bara merupakan contoh dari energi tak terbarukan yang hingga saat ini masih menjadi sumber utama pembangkit listrik. Energi tak terbarukan perlahan tetapi pasti akan berkurang jumlahnya dikarenakan pemakaian yang

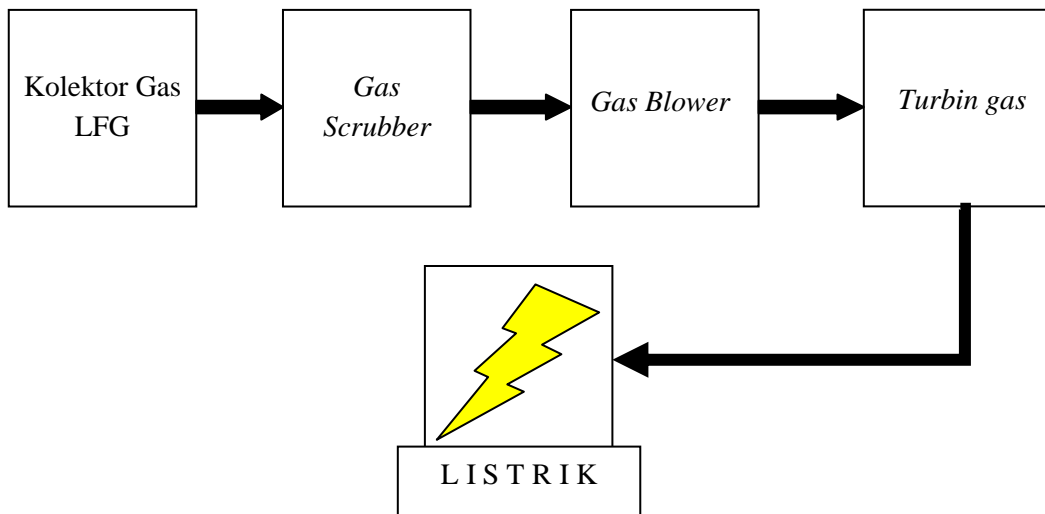
terus meningkat dan tidak dibarengi dengan pola konsumsi yang bijak. Oleh sebab itu pemakaian energi terbarukan untuk pembangkit listrik perlu dikembangkan sebagai energi alternatif yang optimal dan ramah lingkungan.

Gas *Landfill* (LFG) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai pemangkit listrik. Kandungan gas metana yang terdapat pada *landfill* gas dapat digunakan sebagai pemutar turbin melalui proses pembakaran. Penggunaan gas *landfill* yang dibangkitkan dari Tempat Pembuangan Sampah (TPA) sebagai pembangkit energi listrik dinamakan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) [16].

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Sampah

Berkurangnya ketersediaan energi fosil sebagai sumber daya utama dunia saat ini mendorong berbagai pihak untuk mencari energi alternatif pengganti demi menjamin kebutuhan energi manusia tetap mendapatkan pasokan energi yang cukup. Salah satu cara yang sedang dikembangkan adalah metode pemanfaatan energi alternatif atau yang sering disebut dengan *green technology*.

Pembangkit listrik tenaga sampah merupakan suatu pembangkit energi listrik yang menggunakan sampah sebagai bahan bakar untuk menggerakkan turbin. Perbedaan yang signifikan antara pembangkit listrik tenaga sampah dan pembangkit jenis lain adalah bahan bakunya yang berasal dari pengolahan sampah organik maupun anorganik. Sampah organik yang terdapat pada TPA akan menghasilkan gas *landfill* (LFG) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku penggerak turbin generator.



Gambar 2.8 Sistem pemanfaatan LFG menjadi listrik

Gambar 2.8 merupakan skema pembangkitan dari pembangkit listrik tenaga sampah dengan menggunakan gas *landfill* sebagai bahan bakar utama. Untuk membangun pembangkit listrik tenaga sampah, terdapat dua langkah utama yang harus diperhatikan yaitu pembangunan dan perancangan *Sanitary landfill* dan perancangan komponen elektrik pembangkit listrik tenaga sampah.

3. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga sampah

Terdapat beberapa komponen penting dalam perancangan pembangkit listrik tenaga sampah. Komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah adalah *gas scrubber*, *gas compressor*, turbin gas dan generator.

a. Gas Scrubber

Gas scrubber merupakan komponen yang berfungsi sebagai pemisah kandungan air (*liquid*) yang pada gas *landfill*. Kandungan *liquid* pada aliran gas merupakan akibat proses kondensasi di sepanjang pipa. *Gas scrubber* juga

digunakan sebagai alat yang mengatur kandungan gas sehingga sesuai dengan kebutuhan kompresor. Selain itu, kegunaan dari *gas scrubber* yaitu untuk menjaga agar aliran gas bersifat kering sehingga dapat mencegah terjadinya kerusakan komponen *blade* pada turbin.

Gas *scrubber* pada PLTSa akan menghasilkan gas murni yang telah didinginkan sehingga dibutuhkan kondensator dan *chiller*. Kondensator merupakan peralatan yang berguna sebagai separator (pemisah) gas LFG dari kandungan air atau gas dan zat pengotor lainnya. Zat non-metana yang masih terkandung pada LFG akan mengakibatkan gas tersebut tidak dapat digunakan sebagai bahan bakar pembangkit. Dengan adanya kondensator diharapkan hanya terdapat kandungan bahan bakar murni tanpa zat pengotor.

Gas metana yang telah dipisahkan dari kandungan gas lainnya akan didinginkan dengan peralatan yang dinamakan *Chiller*. Pendinginan gas berfungsi agar gas metana menjadi lebih stabil dan tidak berbahaya akibat sifat dari gas metana yang rentan terhadap ledakan apabila kondisi lingkungan memiliki suhu dan tekanan yang tinggi. Suhu gas yang diharapkan adalah suhu ruangan dengan kisaran 23°-27°C sehingga gas LFG yang dihasilkan mempunyai stabilitas yang baik dan tidak berbahaya apabila digunakan sebagai bahan bakar.

b. Blower

Gas yang telah diturunkan suhunya oleh *chiller* harus didorong atau ditekan menuju (*power house*) atau sistem pembangkit. Sistem pemipaan yang sangat panjang, jalur yang sangat rumit serta material yang ikut tercampur pada gas LFG akan mempersulit gas *landfill* menuju power house, oleh karena itu dengan adanya blower, maka gas *landfill* akan disedot dan didorong dengan mudah.

Fungsi lain dari *blower* adalah sebagai pemisah antara gas dan air. *Blower* merupakan peralatan terakhir yang dilalui oleh gas *landfill* sehingga gas keluaran dari *blower* merupakan gas bahan bakar yang telah dimurnikan kembali. Tampilan gas *blower* dapat dilihat pada gambar 2.9.

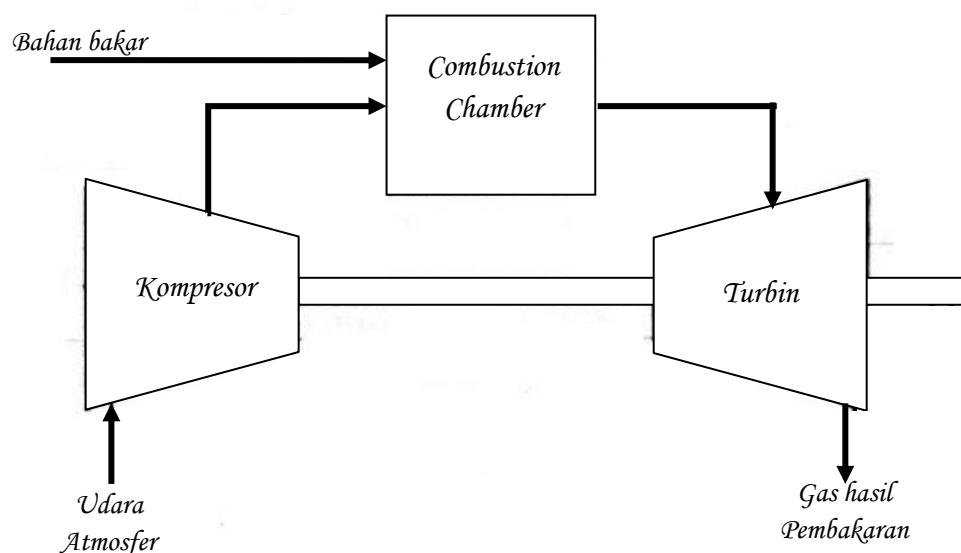


Gambar 2.9 *Gas Blower*
(sumber : Horacio Terraza, 2009)

c. Turbin Gas

Turbin gas merupakan suatu alat yang digunakan sebagai penggerak awal (*prime mover*) dengan memanfaatkan gas sebagai fluida kerja. Turbin gas akan mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran yang akan menggerakkan baling-baling turbin sehingga daya akan dibangkitkan [17]. Bagian turbin yang berputar dinamakan dengan rotor sedangkan stator merupakan bagian turbin yang diam. Poros daya akan diputar oleh rotor sehingga turbin akan mampu untuk menggerakkan beban. Turbin adalah salah satu bagian utama dari komponen penyusun turbin gas. Secara umum turbin gas terdiri dari tiga komponen utama yaitu gas kompresor, ruang pembakaran atau *combustion chamber* dan turbin penggerak

Penggunaan turbin gas pada pembangkit listrik tenaga sampah pada umumnya menggunakan prinsip kerja yang sama dengan *turbin gas*. Udara masuk menuju kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*), didalam kompresor udara akan dihisap dan tekanannya dinaikan, proses ini mengakibatkan meningkatnya temperatur udara. kompresor kemudian akan meneruskan udara yang telah terkompresi menuju ruang pembakaran atau *combustion chamber*. Proses yang terjadi didalam ruang pembakaran adalah pencampuran antara udara yang telah terkompresi dengan gas *landfill* sebagai bahan bakar utama PLTSa, pencampuran udara dan gas landfill akan menghasilkan proses pembakaran yang berlangsung dengan tekanan konstan. Gas yang dihasilkan dari proses pembakaran akan dialirkan menuju turbin gas melalui *nozzle*. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas akan digunakan untuk memutar kompresornya kembali dan juga untuk menggerakkan rotor pada generator listrik. Secara umum proses kerja turbin gas ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Diagram kerja gas turbin
(Sumber : Mohammed Ali Abdulhadi, 2010)

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Langkah kompresi
2. Langkah pembakaran
3. Langkah pemuaian
4. Langkah pembuangan gas

Hukum kekekalan energi pada turbin gas diterapkan pada proses kerja dan konversi bahan bakar. Perubahan energi, panas, kerja dan entropi merupakan beberapa parameter yang sangat penting untuk diperhatikan dalam proses kerja turbin gas dengan siklus brayton. Analisis perubahan energi dalam kalor, usaha, entalpi dan entropi dalam suatu sistem disebut dengan termodinamika [17].

Adapun skema hukum kekekalan energi dapat dinyatakan sebagai:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Nilai jumlah} \\ \text{energi total} \\ \text{dalam bentuk} \\ \text{kalor dan kerja} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Nilai jumlah} \\ \text{energi total} \\ \text{dari massa bahan} \\ \text{bakar yang masuk} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Total energi} \\ \text{dari massa} \\ \text{yang keluar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Perubahan} \\ \text{energi dalam} \end{array} \right]$$

Atau

$$Q - W + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{CV} \quad (2.6)$$

Jumlah dan perubahan energi dalam analisis termodinamika disebut dengan entalpi yang terdiri atas energi dalam sistem. Perubahan nilai entalpi dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \Delta H &= H_p - H_r \\ &= C_p(T_p - T_r) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana:

ΔH = perubahan entalpi.

H_p = entalpi produk.

H_r = entalpi reaktan.

C_p = panas spesifik bahan.

Bila H produk $>$ H reaktan, maka ΔH bertanda positif namun apabila H reaktan $>$ H produk. ΔH yang bernilai positif menunjukkan bahwa terjadi penyerapan kalor dari sistem ke lingkungan sedangkan ΔH negatif menandakan terjadinya pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan.

Hukum Hess menyatakan bahwa perubahan entalpi dari suatu reaksi memiliki nilai yang sama walaupun perubahan entalpi tersebut terjadi dalam satu kali proses maupun beberapa kali proses reaksi. Perubahan entalpi hanya dipengaruhi oleh keadaan awal dan keadaan akhir dari suatu proses. Apabila perubahan kimia berlangsung pada beberapa jalur berbeda, namun perubahan entalpi keseluruhan tetaplah memiliki nilai yang sama.

$$\Delta H_{reaksi} = \sum \Delta H_{f(\text{produk})} - \sum \Delta H_{f(\text{reaktan})} \quad (2.8)$$

Besaran termodinamika yang mengukur energi dalam sistem per satuan temperatur dinamakan dengan entropi. Energi dalam entropi tidak dapat digunakan untuk melakukan usaha. Entropi meningkat seiring dengan kebebasan dari molekul untuk bergerak yang dilambangkan dengan huruf (S). Penerapan entropi dapat dijumpai pada hukum termodinamika II yang menyatakan bahwa entropi sistem dan lingkungan akan selalu meningkat pada proses spontan dan tidak berubah pada proses kesetimbangan.

Perubahan entropi dari sistem akan lebih besar dari pada panas yang dihasilkan pada proses spontan hal ini dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.9)$$

$$dS_{total} = dS_{sistem} + dS_{lingkungan} > 0$$

Sedangkan perubahan entropi pada proses *reversible* dinyatakan dengan:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$dS_{total} = dS_{sistem} + dS_{lingkungan} = 0$$

Panas yang mengalir adalah:

$$Q_P = C_p dT$$

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

Sehingga pada tekanan tetap, perubahan entropi akan meningkat.

$$\Delta S_{reservoir} = -\frac{Q}{T_2}$$

$$dS = -C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2.10)$$

T_2 dan T_1 adalah suhu material setelah dan sebelum proses transfer panas.

Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa :

$$dQ = dU + dW \quad dW = PdV$$

sedangkan Hukum II Termodinamika menyatakan:

$$dQ_{Rev} = TdS$$

maka hubungan dari keduanya dinyatakan dengan

$$TdS = dU + PdV$$

Hubungan antara entalpi dan entropi adalah sebagai berikut:

$$H = U + PV \quad (2.11)$$

Dan

$$U = Q - W$$

Dimana :

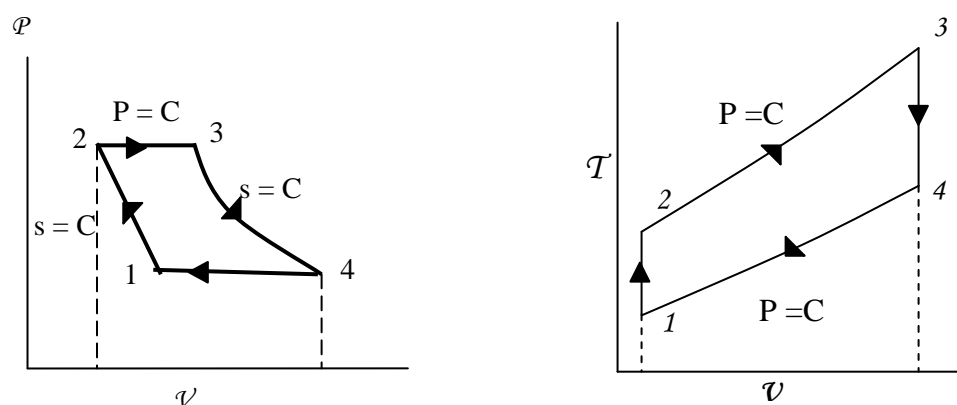
U = energi dalam sistem (Joule)

Q = kalor (joule)

W = usaha (joule)

Proses kerja turbin gas yang ideal dapat terjadi apabila besarnya daya yang masuk sama dengan daya yang dikonversikan. Namun pada kenyataannya tidak ada proses yang selalu dalam keadaan ideal. Kerugian energi dapat terjadi pada saat proses konversi energi pada turbin gas sehingga akan menurunkan kinerja dan efektifitas turbin.

Siklus kerja yang digunakan pada turbin gas adalah siklus Brayton. Siklus ini merupakan suatu siklus daya termodinamika ideal yang umum digunakan untuk menggambarkan proses konversi pada turbin gas maupun peralatan konversi sejenis. Siklus Brayton biasa diaplikasikan oleh perancang mesin turbin atau pabrikan dalam menganalisa *up-grading performance* mesin [16]. Adapun diagram siklus Brayton pada turbin gas ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Diagram P-T *Brayton cycle*
(Sumber: Mohammedali Abdulhadi, 2010)

Gambar 2.11 merupakan diagram P-T dari siklus Brayton dengan asumsi bahwa proses kompresi dan ekspansi terjadi secara *reversibel adiabatik*, tidak ada kerugian tekanan pada sisi masuk ruang keluar (*exhaust*) dan ruang bakar gas, serta diasumsikan bahwa fluida kerja adalah gas ideal dengan panas jenis yang nilainya tetap. Adapun proses dari gambar 2.11 adalah sebagai berikut:

- 1-2 : kompresi isentropik
- 2-3 : proses pembakaran dan penambahan panas Q_1 dengan tekanan tetap
- 3-4 : ekspansi isentropik

Adapun proses termodinamika untuk mencapai titik stabil pada masing-masing proses siklus adalah sebagai berikut [18] :

Proses 1-2: Kerja Kompresor

Kalor spesifik yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor pada kondisi aktual dinyatakan dengan:

$$W_K = \frac{C_{pa}(T_{02} - T_a)}{\eta_m} \quad (2.12)$$

Dimana:

C_{pa} = Panas jenis udara tekanan konstan (1,005 kJ/kg K)

T_a = Temperatur udara masuk kompresor keadaan statis (K)

T_{02} = Temperatur udara keluar kompresor keadaan stagnasi (K)

η_m = Efisiensi mekanis kompresor = 0,96

Proses 2-3: Penambahan energi panas

Siklus ideal menunjukkan bahwa pada proses pembakaran pada combustion chamber memiliki tekanan yang tetap, namun pada kondisi aktual akan terjadi

pengurangan tekanan dengan faktor pengurangan sebesar 0,02 – 0,03. Sehingga energi kalor yang masuk adalah:

$$Q_{in} = C_p(T_3 - T_2) \quad (2.13)$$

Dimana:

h_3 = entalpi gas keluar (kJ/kg)

T_3 = Temperatur gas keluar (kJ/kg)

T_2 = Temperatur gas keluar kompresor (kJ/kg)

Q_{in} = kalor masuk ruang bakar (kJ/kg)

Proses 3-4: Turbin

Proses ekspansi pada turbin secara aktual dinyatakan dengan :

$$W_T = C_{Pg}(T_{034}) \quad (2.14)$$

Dimana:

W_T = Kerja aktual yang keluar dari turbin (kJ/kg)

C_{Pg} = Panas spesifik gas pembakaran (1,148 kJ/kg K)

T_{034} = Temperatur ekuivalen dari kerja turbin

Selisih kerja yang ditimbulkan antara kerja turbin dan kerja yang dibutuhkan oleh kompresor untuk setiap 1 kg gas dinyatakan dengan:

$$W_{net} = W_t - W_k \quad (2.15)$$

Dengan demikian efisiensi termal instalasi adalah

$$\eta_{th} = \frac{3600}{S_{fcLHV}} \times 100\% \quad (2.16)$$

Dimana:

LHV = Low heating Value bahan bakar (47320 kJ/kg)

S_{fc} = Pemakaian bahan bakar spesifik

Dimana

$$S_{fc} = \frac{f}{W_T - W_K} \quad (2.17)$$

Besarnya efisiensi akan dipengaruhi oleh pressure ratio, maka presentasi daya yang digunakan untuk menggerakkan kompresor dinyatakan dengan:

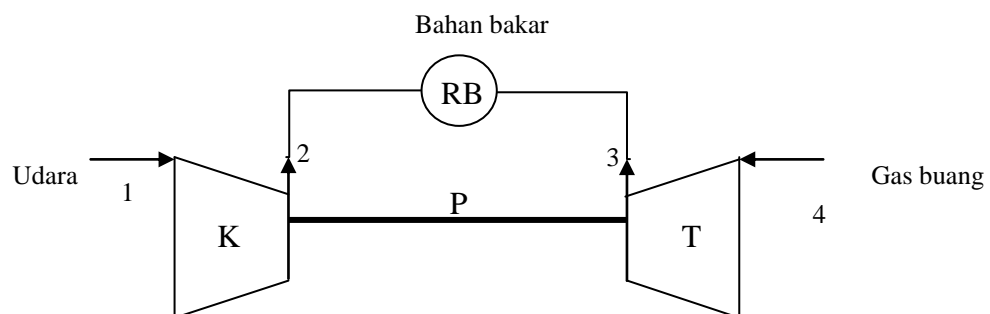
$$\eta_{Nk} = \frac{\eta_k}{\eta_T} \times 100\% \quad (2.18)$$

Dimana:

$$N_k = m_{at} \cdot (T_{02} - T_{01})$$

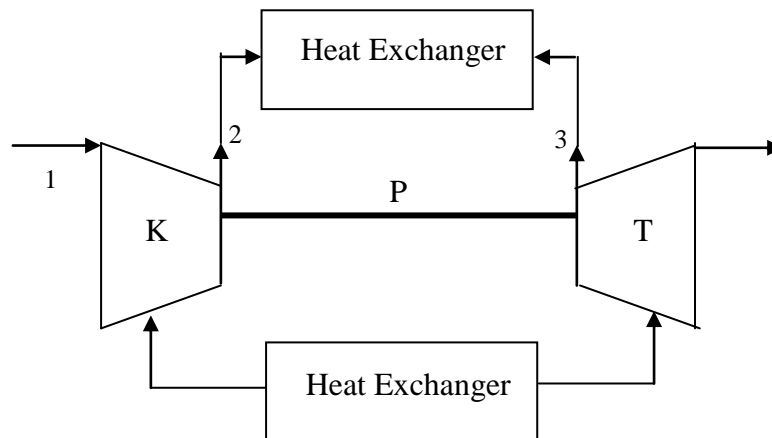
Adalah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor dan m_{at} adalah massa udara total yang disuplai kompresor.

Klasifikasi turbin gas berdasarkan siklusnya dibagi menjadi dua yaitu turbin gas dengan siklus terbuka dan turbin gas siklus tertutup. Pada siklus terbuka, gas yang dihasilkan setelah proses pembakaran akan langsung dilepaskan ke udara bebas dengan kata lain gas buang hasil ekspansi tidak dimanfaatkan kembali. Turbin gas yang menggunakan siklus terbuka memiliki susunan instalasi yang sederhana karena hanya terdiri dari turbin, ruang bakar dan kompresor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Sistem Turbin gas siklus terbuka
(Sumber: Fazar Muhammadiyah, 2009)

Siklus tertutup merupakan siklus turbin gas dimana fluida kerja dirancang untuk tidak berhubungan dengan atmosfer luar secara langsung sehingga kemurnian bahan bakar dapat terjaga. Penerapan siklus tertutup dapat memberikan beberapa keuntungan salah satunya adalah dapat mencegah kerusakan mesin maupun komponen lain yang disebabkan korosi maupun erosi. Tekanan tinggi (*High Pressure*) dapat digunakan pada siklus ini, namun fluida kerja tidak akan mengalami perubahan fasa. Diagram instalasi siklus tertutup pada turbin gas ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Sistem turbin gas siklus tertutup
(Sumber: Fazar Muhammadiyah, 2009)

Pada instalasi tenaga uap turbin dalam menggerakkan generator, daya yang dihasilkan oleh turbin akan sama dengan daya pada generator. Namun untuk kasus turbin gas daya yang dibangkitkan turbin tidaklah sama dengan daya yang dikeluarkan pada generator karena daya yang dihasilkan turbin akan dibagi sebagian untuk menggerakkan kompresor. Perbandingan dayanya kurang lebih 3:2:1, misalnya agar dapat memutar generator listrik 1000 kW, turbin gas harus mempunyai daya sebesar 3000 kW, dan 2000 kW untuk daya kompresor [19].

Untuk menentukan besarnya daya yang dibutuhkan turbin dapat digunakan persamaan sebagai berikut [20]:

$$\begin{aligned}
 PT &= PV + PN. \\
 &= ms \cdot h_T \cdot T.
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Dimana:

- PT : daya yang dibutuhkan turbin keseluruhan (kW)
 PV : daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor (kW)
 PN : daya yang berguna untuk menggerakkan generator listrik (kW)
 ms : kapasitas gas panas dalam KJ/detik
 h_T : panas jatuh isentropis didalam turbin yang didapatkan dari diagram h - s (kJ/kg)
 T : randemen turbin

d. Generator AC dan Pembangkitan Daya

Generator merupakan suatu mesin listrik yang berfungsi sebagai pengubah energi mekanik menjadi tenaga listrik dengan sumber bolak-balik menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Energi mekanik yang dibutuhkan oleh generator disuplai oleh *primer mover* [21].

Generator merupakan mesin yang terdiri dari dua komponen utama yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang berputar sedangkan stator adalah bagian generator yang diam. Untuk mencari kecepatan putar generator maka dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut[22]:

$$n = \frac{120 \times f}{p}
 \tag{2.20}$$

Dimana :

- n = kecepatan motor (rpm)
 f = frekuensi (Hz)
 p = jumlah kutub rotor

sedangkan tegangan yang dibangkitkan dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_{rms} = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \theta_{max} \cdot \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (2.21)$$

Dimana:

- E_{rms} = tegangan induksi
 n = putaran (rpm)
 N = jumlah lilitan
 f = frekuensi (Hz)
 N_s = jumlah kumparan stator
 P = jumlah kutub
 θ_{max} = fluks magnetik (Weber)
 N_{ph} = jumlah fasa

Sedangkan fluks maksimum yang dihasilkan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\theta_{max} = A_{magn} \cdot B_{max} \quad (2.22)$$

Dimana:

- A_{magn} = area luas magnet
 B_{max} = densitas fluks magnet

Untuk menghasilkan gaya gerak listrik induksi di ujung-ujung kumparan rotor maka dibutuhkan dua cincin yang ikut berputar dengan kumparan.

Sedangkan besarnya tegangan yang dibangkitkan generator bergantung pada nilai kecepatan garis medan magnet stator yang dipotong. Karena sebagian besar dioperasikan pada kecepatan konstan, maka jumlah gaya gerak listrik yang dihasilkan akan bergantung penguatan medan.

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horsepower* (HP), *Horsepower* merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 Watt. Terdapat perbedaan antara daya dan energi. Energi adalah daya dikalikan waktu sedangkan daya listrik merupakan hasil perkalian tegangan dan arus, dimana satuan daya listrik dinyatakan dengan watt. Dalam suatu sistem listrik sumber AC, terdapat tiga jenis daya untuk beban yang memiliki impedansi (Z) antara lain:

a. Daya Aktif (P)

Daya aktif (*Active Power*) atau yang disebut juga dengan daya nyata merupakan besarnya daya yang dibutuhkan oleh beban untuk dapat bekerja atau beroperasi. Satuan daya ini dinyatakan dalam watt [22].

$$P = V \cdot I \cos \varphi \quad (2.23)$$

Dimana

P = daya aktif (W)

V = tegangan (V)

I = arus (I)

$\cos \varphi$ = faktor daya

b. Daya Reaktif (Q)

Daya Reaktif merupakan nilai daya yang timbul sebagai akibat adanya efek induksi elektromagnetik oleh beban yang mempunyai nilai induktif . besarnya daya reaktif dinyatakan dalam satuan Var [22].

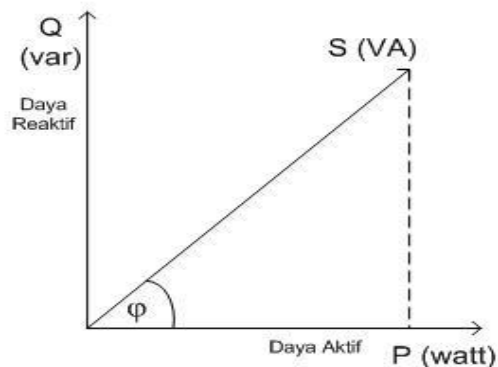
$$Q = V.I \sin \varphi \quad (2.24)$$

c. Daya Semu (S)

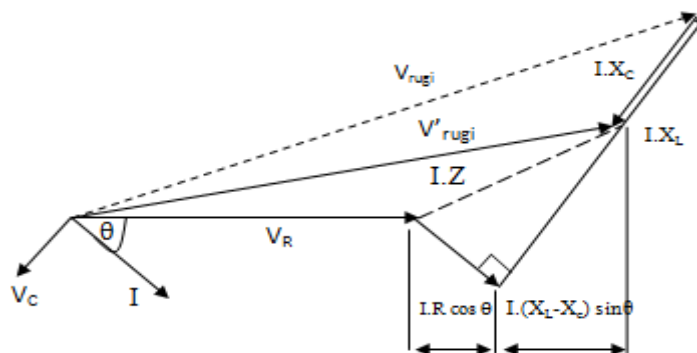
Pada beban impedansi (Z), daya semu adalah daya yang terukur atau terbaca pada alat ukur. Daya semu adalah penjumlahan daya aktif dan daya reaktif secara vektoris. Satuan daya semu dinyatakan dengan VA [22].

$$S = V.I \quad (2.25)$$

Hubungan antara daya aktif, reaktif dan semu dinamakan dengan segitiga daya yang terlihat pada gambar 2.14



Gambar 2.14 Segitiga daya.



Gambar 2.15 Diagram fasor sistem tenaga listrik.

Dari gambar diatas terlihat bahwa semakin besar nilai daya reaktif akan meningkatkan sudut antara daya nyata dan daya semu atau biasa disebut *power factor* $\cos \phi$. Sehingga daya yang terbaca pada alat ukur akan lebih besar daripada daya yang sesungguhnya dibutuhkan oleh beban.

Dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat perbedaan nilai antara daya pada ujung pengirim dengan daya yang berada pada ujung penerima, hal ini disebabkan karena saluran distribusi memiliki nilai tahanan, induktansi dan juga kapasitansi. Nilai impedansi yang dihitung pada saluran transmisi atau distribusi merupakan impedansi seri yang hanya terdiri dari resistansi dan reaktansi induktif konduktor. Ada beberapa macam penyebab rugi-rugi saluran antara lain:

- a. Kerugian akibat korosi logam konduktor.
- b. Kerugian akibat panas.
- c. Kerugian akibat saluran yang panjang.

Secara umum formulasi untuk menghitung rugi-rugi daya saluran distribusi adalah:

$$P = I^2 \cdot Z \quad (2.26)$$

Besarnya rugi-rugi tegangan total yang terjadi disepanjang saluran adalah

$$V_{line-losses} = I \cdot Z \cdot l \quad (2.27)$$

Dimana

- | | | |
|-------------------|---|--|
| $V_{line-losses}$ | = | rugi-rugi tegangan total (V) |
| I | = | arus yang mengalir sepanjang saluran (A) |
| Z | = | impedansi saluran (Ω) |
| l | = | panjang saluran (km) |

Dari rumus diatas diketahui bahwa besarnya rugi-rugi tegangan disepanjang saluran sebanding dengan panjang saluran sehingga apabila saluran udara yang dirancang memiliki jarak yang panjang, maka rugi-rugi tegangan yang terjadi disepanjang saluran juga akan semakin besar.

Tegangan jatuh (*Drop Voltage*) adalah nilai selisih diantara tegangan disisi pengirim dan tegangan disisi penerima yang disebabkan oleh besarnya nilai hambatan dan arus saluran. Pada saluran dengan sumber bolak-balik, nilai drop tegangan ditentukan oleh impedansi dan admitansi saluran, faktor daya dan juga beban. Jatuh tegangan relatif dinamakan regulator tegangan dengan persamaan:

$$V_{reg} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (2.28)$$

Dimana :

V_s = tegangan sisi pengirim (V)

V_r = tegangan sisi penerima (V)

V_{reg} = regulator tegangan (%)

Daya yang dibangkitkan oleh generator akan digunakan untuk mencukupi kebutuhan beban industri, komersial maupun rumah tangga. Besarnya faktor beban harian yang dipikul oleh sebuah sistem tenaga listrik dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [22]:

$$Daily L.F = \frac{average\ load}{peak\ load} \quad (2.29)$$

$$Daily L.F = \frac{average\ load \times 24\ hr}{peak\ load \times 24\ hr} = \frac{energy\ consumed\ during\ 24\ hr}{peak\ load \times 24\ hr} \quad (2.30)$$

Sehingga faktor beban dalam satu tahun dinyatakan pada persamaan berikut:

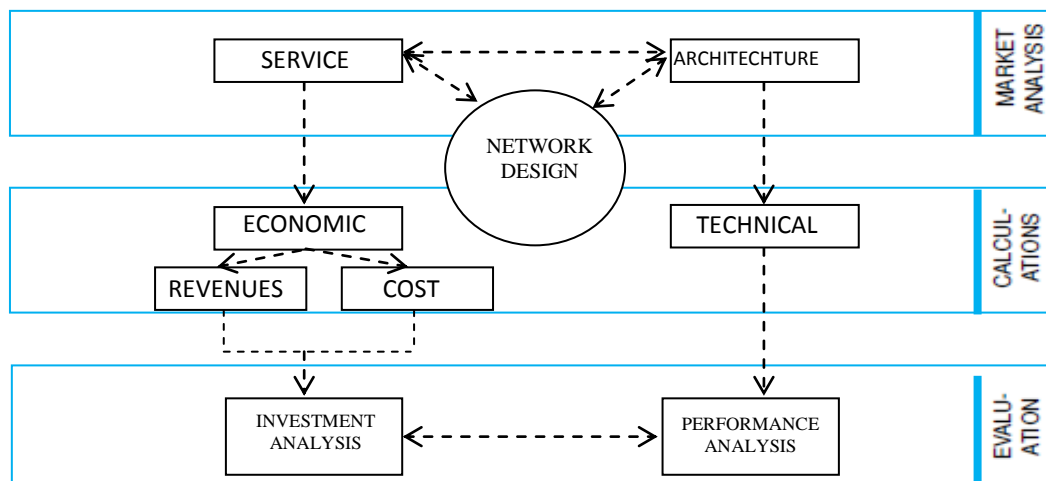
$$Annual L.F. = \frac{total\ annual\ energy}{peak\ load \times 8760} \quad (2.31)$$

2.7 Konsep Tekno Ekonomi

Tekno ekonomi merupakan suatu konsep yang melibatkan pengambilan keputusan terhadap proyek penggunaan sumber daya yang terbatas. Hasil keputusan yang disimpulkan pada tekno ekonomi biasanya akan berdampak jauh ke masa depan dan konsekuensi tersebut tidak dapat dipastikan [23]. Oleh karena itu dalam analisis tekno ekonomi suatu proyek perlu diperhatikan prediksi kondisi masa yang akan datang, proyek terdani serta laju perkembangan teknologi.

Analisis tekno ekonomi dimulai dengan menentukan rumusan masalah dan juga menjelaskan data masukan dan parameter tertentu berdasarkan analisis keadaan pasar [24]. Investasi awal merupakan perhatian utama dalam pembangunan suatu proyek, tujuan dari analisis investasi adalah untuk memperoleh informasi terkait dana yang akan digunakan dalam proses perencanaan, pengendalian dan pembuatan keputusan dari suatu proyek .

Diagram alir analisis tekno ekonomi dari suatu perencanaan pembangunan ditampilkan pada Gambar 2.14 .



Gambar 2.16 Diagram alir tekno ekonomi [25]

Dalam rangka mengetahui kondisi ekonomi suatu proyek pembangunan dimasa yang akan datang, maka dilakukan metode perhitungan sebagai berikut:

1. Mengetahui Rencana Investasi Total

Penggunaan modal secara keseluruhan harus diketahui untuk mengejar sasaran yang menjadi rencana. Rencana yang dimaksud mencakup rencana produksi, rencana administrasi dan rencana penjualan.

2. Menyusun Rencana Pembiayaan

Biaya investasi awal yang direncanakan disusun berdasarkan tingkat kebutuhan dan tingkat kemampuan ekonomi investor.

3. Melakukan Perhitungan Analisis Keuangan

Pada umumnya ada tiga hal yang diperhatikan pada saat perhitungan aliran kas dari suatu investasi yang mencakup *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)* dan *Payback Period (PBP)*.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

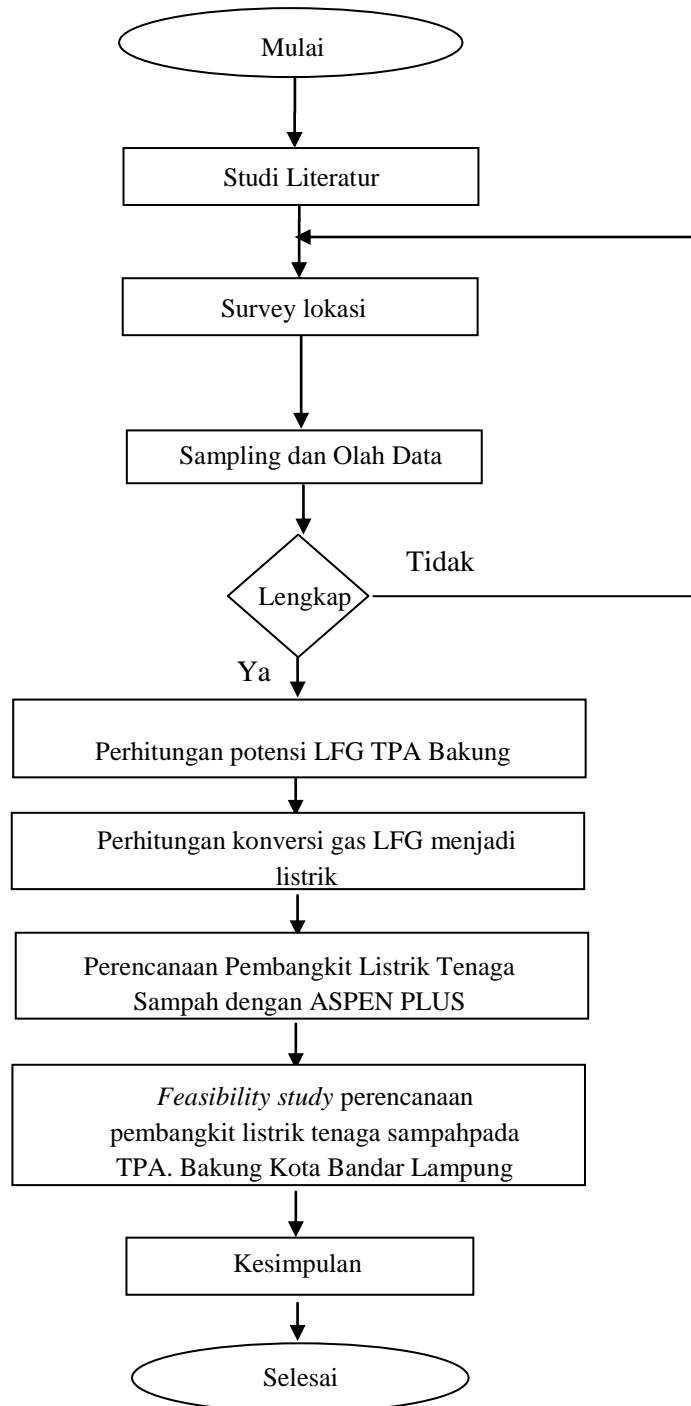
3.1 Studi Literatur

Tugas akhir ini akan dilaksanakan secara bertahap yang dimulai dari tanggal 1 November dan berakhir pada tanggal 1 April 2017. Adapun tahapan-tahapan yang ditempuh untuk mendapatkan hasil akhir dijadwalkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Penjadwalan tugas akhir

No	Kegiatan	Waktu / Bulan					
		Nov 2016	Des 2016	Jan 2017	Feb 2017	Mart 2017	Aprl 2017
1	Studi Literatur						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identifikasi masalah, tujuan dan rumusan masalah. 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Penentuan metode dan model perhitungan. 						
2	Seminar Proposal						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Survey lokasi dan metode oleh data 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sampling dan pengumpulan data. 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ perhitungan potensi LFG TPA Bakung. 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ konversi gas metana menjadi energi listrik (kWh). 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pemilihan dan Perancangan PLTSa. 						
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analisis Tekno Ekonomi. 						
3	Seminar Hasil.						
4	Ujian Komprehensif.						

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari berbagai referensi yang berkaitan dengan pelaksanaan tugas akhir. Adapun diagram alir pelaksanaan tugas akhir dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir tugas akhir

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data yang didapatkan dari berbagai pihak mengenai jenis dan jumlah sampah organik yang terdapat pada TPA Bakung. Dengan adanya studi literatur maka data yang didapat akan diidentifikasi secara rinci sedangkan metode perhitungan yang dibutuhkan merupakan metode perhitungan potensi LFG pada TPA, perhitungan konversi LFG menjadi energi listrik, perhitungan mengenai spesifikasi sistem *sanitary landfill*, perhitungan spesifikasi komponen pembangkit tenaga listrik serta *feasibility study* yang mencakup perhitungan biaya investasi awal, *net present value* dan *return of investment*.

3.2 Metode Perhitungan Gas *Landfill*

Untuk mengetahui jumlah gas metana yang dihasilkan TPA Bakung setiap tahun, maka perlu dilakukan terlebih dahulu proyeksi jumlah penduduk Kota Bandar Lampung. Hal ini dikarenakan jumlah sampah yang diangkut dan tertimbun di TPA Bakung setiap tahunnya tidak akan sama. Jumlah timbulan sampah kota akan berbanding lurus dengan populasi penduduk. Untuk memproyeksikan jumlah populasi Kota Bandar Lampung digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_t = P_0 \cdot e^{rt} \quad (3.1)$$

Dimana:

P_t = Populasi penduduk tahun ke-t

P_0 = Populasi tahun dasar

r = laju pertumbuhan penduduk

t = rentang waktu antara tahun dasar sampai tahun ke-t

Kandungan Gas metana pada gas *landfill* yang dibangkitkan dari tempat pembuangan akhir (TPA) Bakung dihitung dengan menggunakan model IPCC Tier-2. Perhitungan gas metana dengan metode IPCC Tier-2 memerlukan proses sampling 1 m³ sampah untuk mengetahui jumlah dan komposisi sampah yang ada pada TPA Bakung.

Sampling sampah yang dilakukan adalah berbasis 1m³ yang merepresentasikan komposisi total sampah yang ditimbun pada TPA, dengan demikian dibutuhkan kotak sampling yang memiliki dimensi 1 m x 1m x 1m. Dikarenakan ukuran tersebut terlalu besar, maka ukuran kotak sampling tersebut diperkecil menjadi 50 x 20 x 25 cm. Sehingga, Untuk mendapatkan nilai 1m³ maka dibutuhkan 40 kali volume kotak yang digunakan. Lokasi sampling dilakukan pada 8 lokasi yang berbeda-beda sesuai dimana truk menumpahkan sampah sebelum dilakukan proses pemerataan oleh alat berat. Adapun prosedur sampling yang dilakukan adalah sebagai berikut:

A. Sampling Komposisi Berat Basah Sampah Padat Kota

Proses ini berguna untuk mengetahui persentase komposisi sampah yang tertimbun di TPA Bakung dengan menggunakan sampling berbasis 1m³ berdasarkan standar SNI 19-3964-1994. Alat dan bahan yang diperlukan dalam melakukan sampling berat basah ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Alat dan Bahan sampling komposisi sampah

No	Alat dan Bahan	No	Perlengkapam APD
1	Timbangan Digital	1	Safety Helmet
2	Skop	2	Sarung tangan
3	Kotak 25 x 20 x 50 cm	3	Masker

Tabel 3.2 Alat dan bahan sampling komposisi sampah (lanjutan)

No	Alat dan Bahan	No	Perlengkapan APD
4	Plastik sampel	4	Sepatu Boots
5	Kantung plastik 25 liter		

Adapun prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan alat dan bahan
2. Mengambil sampel sampah secara acak dilahan dimana truk menumpahkan sampah. Sampling dilakukan dengan kotak berukuran 50 x 20 x 25 cm sebanyak 40 kali.
3. Melakukan pemisahan sampah berdasarkan jenis sampah dengan cara memasukan sampah kedalam kantung plastik 25 liter untuk masing-masing jenis sampah.
4. Menimbang berat masing-masing komposisi sampah (berat basah).
5. Menentukan komposisi masing-masing jenis sampah dengan menggunakan persamaan berikut:

$$W_i = \frac{\text{Berat sampah } i}{\text{Berat total sampah}} \times 100\% \quad (3.2)$$

B. Sampling Kandungan Air Sampah Padat Kota

Proses berat kering untuk masing-masing komposisi sampah sesuai standar SNI 19-2891-1992. Berat kering sampah penting diketahui untuk mendapatkan karakteristik DOC_i masing-masing jenis sampah. Proses ini dilakukan di Laboratorium Kimia Terapan, Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung. Alat dan bahan yang dibutuhkan diperlihatkan pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Alat dan bahan uji berat kering

No	Alat dan Bahan	No	Perlengkapam APD
1	Oven	1	Jas Laboratorium
2	Neraca Analitik dan Desikator	2	Sarung tangan

Adapun Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel berat basah masing-masing komposisi sampah dan menimbang masing-masing sampel tersebut sebelum proses pengeringan dilakukan.
2. Mengeringkan sampel berat basah tersebut dengan cara memasukan kedalam oven selama 2 jam dengan suhu 105°C.
3. Menimbang berat kering masing-masing komposisi sampah menggunakan neraca analitik.
4. Mengulangi proses pengeringan sampai didapatkan bobot konstan.
5. Menghitung persentase kandungan air untuk masing-masing komposisi sampah menggunakan persamaan:

$$\% \text{ kandungan air} = \frac{\text{berat basah} - \text{berat kering}}{\text{Berat basah}} \times 100\% \quad (3.3)$$

C. Menghitung Kadar Abu (*Ash Content*) Sampel

Proses perhitungan kadar abu dilakukan sesuai dengan standar SNI 044:2009. Zat pengotor yang dimaksud adalah zat atau bahan yang tidak berasal dari bobot murni sampel. Zat pengotor ini dapat terjadi dikarenakan sampel yang diambil dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung terpapar secara langsung dengan debu, tanah maupun zat lain yang dapat menyebabkan penambahan bobot sampel. Adapun alat dan bahan pada tahap ini diperlihatkan pada Tabel 3.4

3.4 Alat dan bahan uji kadar abu

No	Alat dan Bahan	No	Perlengkapam APD
1	Cawan porselen 30ml	1	Jas Laboratorium
2	Furnace	2	Sarung tangan
3	Neraca Analitik	3	Masker
4	Desikator	4	Kacamata

Adapun prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengambil masing-masing contoh sampel dan menimbang berat awal sampel tersebut pada neraca analitik.
2. Mengeringkan cawan porselen 30 ml dengan menggunakan furnace dengan suhu 500°C selama 1 jam, angkat dan dinginkan kedalam desikator.
3. Memasukan sampel kedalam cawan porselen dan memasukan cawan yang telah berisi sampel tersebut kedalam furnace dengan suhu 500°C selama 30 menit.
4. Mendinginkan cawan berisi sampel dengan desikator kemudian menimbang berat akhir sampel.
5. Mengulangi prosedur sampai diperoleh bobot konstan.
6. Menghitung persentase kandungan abu dengan menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Berat Abu} = \frac{\text{Berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{Berat Awal}} \times 100\% \quad (3.4)$$

7. Menghitung bahan kering untuk masing-masing komposisi sampah menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Dry ontent} = 100\% - (\% \text{ Kandungan air} + \% \text{ Berat Abu}) \quad (3.5)$$

D. Menghitung *Degradable Organic Carbon* (DOC) komposisi sampah

DOC merupakan karakteristik yang berperan besar dalam menentukan emisi gas metana yang terbentuk dari proses degradasi sampah. Untuk mengetahui besarnya DOC masing-masing komposisi sampah, maka perlu dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui kandungan karbon yang dapat terkomposisi pada

hasil sampel kompos padat sampah kering yang ada. Proses ini dilakukan di Laboratorium Pengolahan Limbah Agroindustri, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung. $DOC_{i-berat\ kering}$ yang dilakukan hanyalah pada sampah organik jenis sisa makanan, sampah taman dan sampah kain/tekstil, sedangkan untuk $DOC_{i-berat\ kering}$ sampah lainnya digunakan data *default* IPCC pada Tabel 2.6 . Hal ini dikarenakan sampah taman dan sampah sisa makanan merupakan sampel yang menunjukkan identitas TPA Bakung sehingga $DOC_{i-berat\ kering}$ nya tidak dapat disamakan dengan DOC_i standar IPCC.

Setelah didapatkan persen kandungan $DOC_{i-berat\ kering}$ untuk masing-masing sampel, maka $DOC_{i-berat\ basah}$ dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$DOC_{i-berat\ basah} = DOC_{i-berat\ kering} \times Dry\ Content_{sampah-i} \quad (3.6)$$

Untuk mempermudah perhitungan emisi metana pada TPA Bakung maka digunakan program IPCC *Inventory Software* yang telah dikembangkan oleh IPCC yang merupakan suatu program yang dirancang untuk memperkirakan emisi gas metana dengan menggunakan metode Tier-2. emisi yang dihitung merupakan emisi total dari gas rumah kaca yang dibangkitkan dalam suatu Tempat Pembuangan Akhir (TPA) antara lain gas metana, karbon dioksida, aseton maupun polutan udara lainnya.

Gambar 3.2 IPCC *inventory software*

Dengan mengetahui tahun TPA Bakung beroperasi dan tahun TPA ditutup (*closure year*) maka akan didapatkan grafik produksi gas LFG yang dihasilkan selama TPA tersebut beroperasi. Potensi gas LFG akan direpresentasikan kedalam bentuk Tabel, grafik maupun penjelasan tekstual guna memberikan informasi terperinci mengenai potensial LFG TPA Bakung per hari. Interpretasi data ini kemudian akan menjadi input data utama dalam perencanaan sistem komponen listrik pembangkit listrik tenaga sampah.

Tabel 3.5 Tabel input data *software* IPCC 2006

No	Parameter	Sumber
1	Laju pertumbuhan penduduk Kota Bandar Lampung	Data
2	Laju timbulan sampah kota	Data
3	Komposisi sampah pada TPA	
4	Rasio pembangkit metan	Default IPCC
5	Faktor konversi C ke CH ₄	Default IPCC
6	Faktor oksidasi	Default IPCC
7	Kandungan metana [10]	60 %
8	DOC _f	0,6
9	DOC _i -basis basah	Perhitungan

3.3 Konversi potensi gas *landfill* menjadi energi listrik

Untuk dapat mengkonversi gas *landfill* menjadi sumber energi alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA), maka dibutuhkan peralatan-peralatan konversi energi misalnya *turbin gas*, *microturbines* dan *Otto cycle engine*. Penentuan jenis peralatan yang digunakan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi metana dan tekanan gas, kebutuhan beban maupun ketersediaan dana [26]. Untuk mengetahui kapasitas energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh timbunan sampah di TPA Bakung Kota Bandar Lampung, maka perlu dilakukan perhitungan konversi energi dari gas LFG menjadi listrik. Dimana gas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTSA hanyalah gas metana sehingga dengan menentukan jumlah kandungan gas metana pada LFG adalah 60%, maka jumlah energi listrik yang dikonversikan dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 3.1.

Tabel 3.6 Konversi energi gas metana menjadi energi listrik[26]

Jenis Energi	Setara Energi
1 Kg Gas Metana	$6,13 \times 10^7$ J
1 kWh	$3,6 \times 10^7$ J
1 m ³ Gas metana	$4,0213 \times 10^7$ J
	11,17 kWh

Untuk menghitung potensi energi listrik yang dibangkitkan prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung jumlah gas LFG yang dihasilkan dengan metode IPCC Tier-2 berdasarkan persamaan 2.3 yang akan diinterpretasikan dalam satuan m³.

Sedangkan jumlah timbunan sampah untuk setiap tahun dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$W_t = P_t \times \text{laju timbunan sampah} \quad (3.7)$$

Dimana:

W_t = sampah pada tahun ke-t

P_t = jumlah penduduk tahun ke-t

Diketahui bahwa Kota Bandar Lampung termasuk kedalam golongan kota sedang dengan laju timbunan sampah sebesar 0,2/ton/kapita/tahun atau 0,75/individu/hari.

2. Menghitung potensi energi listrik

Energi listrik yang dibangkitkan dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut

$$E = \text{Metan} \times \text{Faktor Konversi} \text{ (kWh)} \quad (3.8)$$

3. Menghitung energi listrik netto yang dibangkitkan Turbin gas

$$p = \text{efisiensi mesin} \times E \text{ (kWh)} \quad (3.9)$$

3.4 Perencanaan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Pada tugas akhir ini, komponen utama Pembangkit Listrik Tenaga Sampah yang akan direncanakan meliputi pemilihan jenis turbin, spesifikasi turbin, dan jumlah unit generator yang dibutuhkan berdasarkan potensi gas *landfill*. Tugas akhir ini tidak membahas proses dan analisa termodinamika turbin gas secara rinci, melainkan hanya menentukan jenis turbin beserta beberapa spesifikasi yang sesuai dengan kapasitas energi listrik yang dibangkitkan oleh gas LFG.

Adapun data awal yang yang direncanakan untuk perencanaan komponen PLTSa diperlihatkan pada Tabel 3.4

Tabel 3.7 Parameter awal perencanaan komponen PLTSa [16]

No	Parameter Perencanaan	Spesifikasi
1	Daya Generator	Perhitungan potensi LFG
2	Bahan Bakar	Gas <i>landfill</i>
3	Kecepatan Putar Turbin	3000 rpm
4	Fluida Kerja Siklus	Gas/Udara
5	Temperatur <i>Input</i> Kompresor	30°C
6	Temperatur Gas <i>Input</i> Turbin	1005°C
7	Ratio Kompresi	10,4
8	Tipe Turbin	Perhitungan Potensi LFG
9	Tekanan Barometer	1,013 bar

Pada umumnya setiap peralatan yang digunakan dalam pembangkit listrik memiliki efisiensi tersendiri. Pada pengerjaan tugas akhir ini efisiensi yang dibutuhkan adalah efisiensi kerja serta efisiensi mekanis peralatan yang diperlihatkan pada Tabel 3.8 sebagai berikut.

Tabel 3.8 Parameter efisiensi perencanaan komponen PLTSa

Peralatan	Efisiensi kerja	Efisiensi mekanis
Gas scrubber	0,95[17]	-
Gas blower	0,85[17]	0,96 [27]
Kompresor	0,85[17]	0,96 [26]
Combustion Chamber	0,98[17]	0,96 [26]
Turbin	0,95[17]	0,96 [26]

Untuk mempermudah perhitungan spesifikasi dari PLTSa yang dirancang, maka digunakan software ASPEN PLUS 2006 yang merupakan suatu perangkat lunak dengan fungsi sebagai model simulator untuk satu atau beberapa rangkaian proses. Dalam pengerjaan tugas akhir ini, hasil yang diperoleh dari simulasi menggunakan ASPEN PLUS 2006 akan digunakan sebagai rujukan dalam penetapan spesifikasi dan kapasitas PLTSa Bakung Kota Bandar Lampung.

3.5 Metode Analisis Tekno Ekonomi

Feasibility study pada tugas akhir ini bertujuan untuk memberikan gambaran kelayakan ekonomik tentang perencanaan pembangkit energi listrik tenaga sampah. Sebelum proyek dilakukan maka penelitian dan penilaian ekonomik perlu dilakukan sebelum meningkat menjadi pelaksanaan pembangunan. *Feasibility study* pada tugas akhir ini akan memberikan gambaran umum tentang anggaran yang dibutuhkan apabila pembangkit listrik tenaga sampah terealisasi. Dalam pelaksanaan tugas akhir ini, analisis ekonomi yang diprioritaskan adalah payback period (PBP), net present value (NPV) dan nilai return of investment.

3.5.1 Perhitungan *Payback Period*

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini, dibutuhkan suatu metode yang dapat menganalisa biaya usulan investasi pembangkit listrik tenaga sampah. Metode ini disebut dengan *payback period* yang didefinisikan sebagai jumlah waktu yang dibutuhkan oleh investor untuk dapat mengembalikan biaya awal investasi dari pembangkit listrik tenaga sampah. Adapun persamaan *payback period* adalah sebagai berikut [28]:

$$PBP = n + \frac{a-b}{c-b} \times 1 \text{ Tahun} \quad (3.10)$$

Dimana :

- n = Tahun terakhir saat arus kas masih belum menutupi nilai investasi
- a = jumlah atau nilai investasi
- b = jumlah kumulatif arus kas tahun ke-n
- c = jumlah kumulatif arus kas tahun ke-n+1

Dengan ketentuan bahwa untuk PLTSa, PBP maksimal yang diperbolehkan adalah 4 – 6 tahun [29], sehingga apabila PBP kurang 6 maka proyek layak untuk dijalankan sedangkan apabila PBP lebih dari 6 tahun maka proyek dianggap tidak layak untuk dijalankan.

3.5.2 Perhitungan *Net Present Value* (NPV)

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, proyek pembangkit listrik tenaga sampah yang direncanakan memerlukan perhitungan terhadap jumlah total aliran kas (*cash flow*) yang ada dimasa depan sesuai dengan panjangnya umur ekonomis proyek yang diinterpretasikan kedalam nilai uang sekarang (*present value*).

NPV adalah metode perhitungan untuk mengetahui jumlah total pendapatan/*net cash flow* selama umur ekonomis investasi ditambah dengan nilai sisa akhir proyek yang dihitung pada waktu sekarang. NPV merupakan arus kas yang diperkirakan pada masa yang akan datang yang dikurangi pada nilai saat ini [16]. Untuk melakukan perhitungan NPV secara akurat, maka biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan perlu diperkirakan terlebih dahulu. Metode ini memindahkan *cash flow* yang menyebar sepanjang umur investasi ke waktu awal investasi ($t=0$) atau kondisi sekarang dengan penerapan ekuivalensi mata uang. Adapun persamaan yang digunakan adalah[16]:

$$NPV = I + \sum_n^n = 1 \left(\frac{An}{L(1+r)^n} + \frac{Vn}{L(1+r)^n} \right) \quad (3.11)$$

Dimana:

I = biaya investasi awal

r = *rate of return* yang diharapkan

- A_n = *cash flow/proceed*
 n = nilai ekonomis dari investasi
 V_n = nilai residu dari investasi pada akhir periode ekonomis

Untuk mengetahui apakah proyek perencanaan pembangkit listrik tenaga sampah ini layak secara ekonomis maka besarnya nilai NPV haruslah diatas 0 (positif), sedangkan apabila NPV yang dihitung mempunyai nilai dibawah 0 (negatif) maka proyek ini tidak menguntungkan secara ekonomis. Namun apabila nilai NPV adalah nol maka proyek tidak menguntungkan maupun tidak merugikan. Perlu diperhatikan bahwa apabila nilai NPV yang dihitung menunjukkan hasil yang negatif maka keberlanjutan proyek pembangkit listrik tenaga sampah ini tidak layak direalisasikan karena tidak membawa keuntungan ekonomis.

3.5.3 Perhitungan *Return of investment*

Return of Investment (ROI) merupakan rasio uang yang diperoleh atau hilang pada suatu investasi, relatif terhadap jumlah uang yang diinvestasikan [30]. Bunga bank yang ditetapkan pada tugas akhir ini adalah 30% sehingga besarnya nilai ROI harus lebih besar dari 30%. ROI dihitung berdasarkan persamaan:

$$ROI = \frac{\sum_t^n \text{Benefit}_t - \text{Investment Cost}}{\text{Investment Cost}} \quad (3.12)$$

Semakin besar rasio yang didapatkan maka akan semakin menunjukkan bahwa perencanaan pembangunan pembangkit listrik tenaga sampah ini tergolong baik. rasio ini berguna sebagai informasi jumlah keuntungan yang dikeluarkan untuk investasi dalam satuan rupiah.

XI. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Potensi gas *landfill* yang dihasilkan TPA Bakung Kota Bandar Lampung adalah sebesar 862,0 Ton pada tahun 2018 dan akan terus meningkat setiap tahunnya hingga sebesar 4.304,7 Ton pada tahun 2032. Dengan kandungan gas metana sebesar 517,193 Ton pada tahun 2018 dan 2.420,8 Ton pada tahun 2032.
2. Potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh emisi gas metana yang terkandung dalam gas *landfill* TPA Bakung Kota Bandar Lampung secara aktual adalah sebesar 1,7 juta kWh pada tahun 2018 dan 8,03 juta kWh pada tahun 2032.
3. Kapasitas pembangkit yang dapat dibangun untuk PLTSa Bakung adalah 1 x 500 kW atau 2 x 250 kW.
4. Analisis Tekno Ekonomi yang dilakukan memperoleh hasil bahwa untuk kapasitas pembangkit 1 x 500 kW, NPV proyek adalah sebesar Rp.18,78 Miliar, dengan *payback period* 4,95 tahun dan ROI sebesar 105%. Sedangkan untuk kapasitas pembangkit 2 x 250 kW, nilai NPV yang didapatkan adalah sebesar 14,15 Miliar, *Payback period* 5,47 Tahun dan ROI 91%. sehingga proyek pembangunan PLTSa Bakung Kota Bandar Lampung ini layak untuk dijalankan secara ekonomi.

1.2 Saran

Adapun saran pada pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Perhitungan gas *landfill* dan gas metana dapat dilakukan dengan software IPCC terbaru 2012 sehingga default parameter yang tersedia akan menunjang tingkat ketelitian perhitungan.
2. Perlu diperhatikan mengenai waktu paruh untuk setiap jenis sampah.
3. Untuk menjaga kualitas pelayanan pembangkitan energi listrik terhadap pelanggan, sebaiknya kapasitas pembangkit yang dibangun adalah sebesar 2 x 250 kW.
4. Perlu dilakukan studi kelayakan proyek dalam segi lingkungan dan manajemen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewan Energi Nasional RI, *Outlook Energi Indonesia*, Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2014.
- [2] BPS Lampung, "Jumlah penduduk dan laju pertumbuhan penduduk menurut kabupaten", [Online]. Tersedia: <http://www.bps.lampung.go.id> [Diakses: 27 Desember 2016].
- [3] H. Terraza dan H. Willumsen, *Guidance Note on LFG Capture and sUtilization*, New York : Inter-American Development Bank, 2010.
- [4] A. Mustofa, "*Karakteristik Bio-Oil Sampah Padat Kota Bandar Lampung Menggunakan Metode Pirolisis Isotermal Berkatlis Alam*", Skripsi., Jurusan Teknik Mesin., Universitas Lampung., Bandar Lampung., 2016.
- [5] M Rizal, "Analisis Pengelolaan Persampahan Perkotaan (Studi kasus pada Kelurahan Boya Kecamatan Banawa Kabupaten Donggala)," *SMARTek Journal Publication*, Vol.9 No.2, pp. 155–172, 2011.
- [6] H.R Sudrajat, *Mengelola Sampah Kota*, Jakarta : Niaga Swadaya, 2006.
- [7] John M. Bell, *Sanitary Landfill Method of Solid Waste Disposal,* . West Lafayette : School of Civil Engineering Purdue, 1973.
- [8] V. P. Garcilasso, S. M. S. G. Velázquez, S. T. Coelho, and L. S. Silva, 2011. "Electric energy generation from landfill biogas - Case study and barriers," *Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, pp. 5250–5253. 2011.
- [9] S. Manfredi, D. Tonini, and T. H. Christensen, "Landfilling of Waste : Accounting of Greenhouse Gases And Global Warming Contributions," *Journal of Urban Climate*, March, pp. 825–836, 2009.
- [10] Susilowati, Sutrisni. "*Pendugaan Cadangan Carbon (Carbon Stock) dan Neraca Carbon pada Perkebunan Karet (Studi Kasus: PTPN VIII Cibubur Sukabumi, Jawa Barat)*" Bogor : Institut Pertanian Bogor, Skripsi 2011.
- [11] Kementerian Lingkungan Hidup RI, *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional, Buku III, vol. 4*, Jakarta:Kementerian Lingkungan Hidup. 2012.
- [12] Purwanta Wahyu, "Penghitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Sektor Sampah Perkotaan Di Indonesia", *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol 10, no. 1, pp. 1–8, Januari 2009.
- [13] Archie W. Culp, *Prinsip-Prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga, 1998.
- [14] B. Waluyo, "Proyeksi Penyediaan Energi Di Wilayah Lampung Menggunakan Perangkat Lunak *Longe-Range Energy Alternatives Planning System (LEAP)*", Skripsi., Jurusan Teknik Mesin., Universitas Lampung., Bandar Lampung, 2013.

- [15] Vattenfall's Energy Fortopolio, *Six Sources of Energy – One Energy System*, Stockholm : Alloffset print, 2011.
- [16] Syarifudin, "Analisis Manfaat Dan Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Untuk Desa Terpencil Di Indragiri Hilir (Studi Kasus: TPA Sei Beringin)", Skripsi., Jurusan Teknik Elektro., Universitas Indonesia., Depok, 2012.
- [17] Salazar, Fernando, *Internal Combustion Engines*, Notre Dame-Indiana : Departement of Aerospace and Mechanical Engineering, 1998.
- [18] E. Saputra, "Perancangan Turbin Gas Penggerak Generator pada Instalasi PLTG dengan Daya 130 MW", Skripsi, Jurusan Teknik Mesin., Universitas Sumatera Utara (USU)., Medan, 2008.
- [19] F.M. Siregar, "Performansi Mesin Non-Stationer (Mobile) Berteknologi VVT-i dan Non VVT-i", Skripsi, Jurusan Teknik Mesin., Universitas Sumatera Utara (USU)., Medan, 2009.
- [20] D. Mahdiansah, "Pengaruh Putaran Dan Pembukaan Katup Gas Terhadap Kinerja *Variable Compression Ratio Petrol Engine* (VCRPE)", Skripsi., Jurusan Teknik Mesin., Universitas Hasanuddin., Makassar, 2012.
- [21] Sulasno, *Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan*, Yogyakarta: PT.Graha Ilmu, 2009.
- [22] D. N. Mustofa, "Perancangan Pembangkit Listrik Menggunakan Generator Magnet Permanen Dengan Motor DC", Skripsi., Jurusan Teknik Elektro., Universitas Pakuan., Bogor, 2014.
- [23] A. Hanif, "Studi Pemanfaatan Biogas Sebagai Pembangkit Listrik 10 kW Kelompok Tani Mekarsari Desa Dander Bojonegoro Menuju Desa Mandiri Energi", Skripsi., Jurusan Teknik Elektro., Institut Teknologi Sepuluh November., Surabaya, 2011.
- [24] Ropa'I Haki, "Analisis Kajian Tekno Ekonomi Revitalisasi Jalur Kereta Api Pidada - Pelabuhan Panjang", Skripsi., Jurusan Teknik Sipil., Universitas Lampung., Bandar Lampung, 2013.
- [25] M. Kantor *et al.*, "General framework for techno-economic analysis of next generation access networks.", In Proc. NOC2008., pp. 152-164, March 2010
- [26] Bent Soresen, *Renewable Energy Conversion ,Transmission and Storage*, Roskilde: Elsevier Inc, Department of Environmental, Social and Spartial Change, 2007.
- [27] M. Roy Franc, "Perancangan Turbin Uap untuk PLTGU dengan Daya Generator Listrik 80 MW dan Putaran Turbin 3000 rpm", Skripsi., Jurusan Teknik Mesin., Universitas Sumatera Utara., Medan, 2009.
- [28] M. Ibrochim, "Analisis Tekno-Ekonomis Desain Konfigurasi Pusat Listrik Tenaga Angin (*Wind Farm*) Dan Perhitungan *Feed In Tarif* Di Indonesia, Tesis., Jurusan Teknik Elektro., Universitas Indonesia., Jakarta, 2012.

- [29]E. Hutrindo, *Modul Evaluasi Aspek - Ekonomi. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah*, Jakarta: Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Ketenaga Listrik, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, 2015.
- [30]D. Lumjang, T. Elektro, T. Elektro, U. Brawijaya, and J. M. T. Haryono, "Kajian Kelayakan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Gunung Sawur 1 dan Gunung Sawur 2,"
- [31]T. A. Ramadhani, "Analisis Timbulan Dan Komposisi Sampah Rumah Tangga Di Kelurahan Mekar Jaya (Depok) Dihubungkan dengan Tingkat Pendapatan- Pendidikan-Pengetahuan-Sikap-Perilaku Masyarakat", Skripsi., Program Studi Teknik Lingkungan., Universitas Indonesia., Depok, 2011.
- [32]Kenneth Wark, Jr. and Donald E. Richard.1999, *Thermodynamics 6th Edition*, Singapore-Printed: McGraw-Hill, 1999.
- [33]J.M Smith, *Introduction to Chemical Enginnering Thermodynamics 5th Edition*, New York: McGraw-Hill Ltd.1996.
- [34]J.P. Holman, *Thermodynamics 3rd Edition*, New York: McGraw-Hill, 1983.
- [35]K.A.B. Pathirathna, *Gas Turbine Thermodynamics and Performance Analysis Methods Using Aviable Catalog Data*, Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan, Master Thesis, 2013.
- [36]R. Ihsan,. "Studi Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) di TPA Kota Banda Aceh", Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro., pp. 146-151, Agustus 2014.
- [37]Admin, "Matches Practices Process and Cost Engineering", [Online]. Tersedia: <http://www.matche.com/equipcost/> [Diakses 11 Maret 2017].
- [38] W. Nguz Mbav, S.Chowdhury, "*Feasibility and Cost Optimization Study of Landfill Gas to Energy Projects Based on A Western Cape Landfill Site in South Africa*", IEEE Transaction on Power Delivery, VoI 3, no.4, pp:197-203. July 2015.
- [39]Universitas Hasanuddin Admin, " Peraturan Pemerintah Republik Indonesia nomor 30 Tahun 2015", UNHAS, [Online]. Tersedia: <http://htl.unhas.ac.id>. [Diakses 23 Maret 2017]
- [40]Biro Hukum PEMPROV Lampung, "Penetapan Upah Minimum Kota ", [Online]. Tersedia: jdih.lampungprov.go.id/ [Diakses 14 Maret 2017].