

## **BAB II**

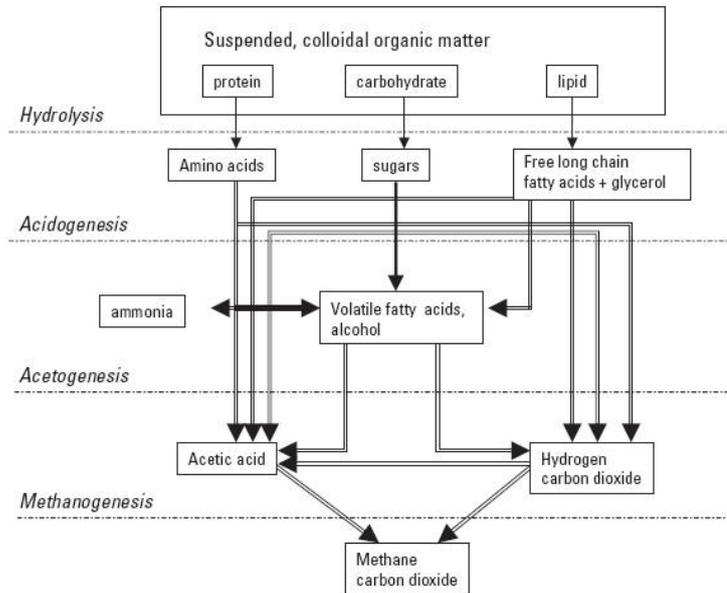
### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sampah Perkotaan (*Municipal Solid Waste*)**

Sampah perkotaan (MSW) ialah sampah yang terkumpul di daerah perkotaan. Di Indonesia, penggolongan sampah yang sering digunakan adalah sebagai sampah organik, atau sampah basah, yang terdiri atas daun-daunan, kayu, sisa makanan ternak, sayur, buah, dan lain-lain. Dan sebagai sampah anorganik, atau sampah kering yang terdiri atas kaleng, plastik, besi dan logam-logam lainnya, gelas dan mika. Sampah dapat mengalami penguraian melalui dua cara yaitu secara biokimia dan secara fisika. 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 (Damanhuri, 2004).

- **Penguraian Biokimia**

Sampah organik tersusun atas berbagai materi organik seperti karbohidrat, lemak dan protein, yang akan mengalami suatu proses pembusukan oleh mikroorganisme, material organik tersebut 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 samping berupa gas metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>).



**Gambar 2.1 Proses Biokimia Bahan Organik.**

Proses penguraian secara biokimia terjadi melalui beberapa proses yaitu hidrolisis, pengasaman, acetogenesis serta metanogenesis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1

- 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 4. (Sudrajat,2006)

**Tabel 4. Nilai kalor berdasarkan jenis sampah**

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 Akhir (*Landfill*)

*Landfill* adalah metode pembuangan sampah dengan cara menempatkan sejumlah besar sampah pada suatu lokasi yang digunakan sebagai tempat penampungan akhir. Pada perkembangannya, *Landfill* terdiri dari beberapa jenis yaitu :

### 1. *Open dumping*

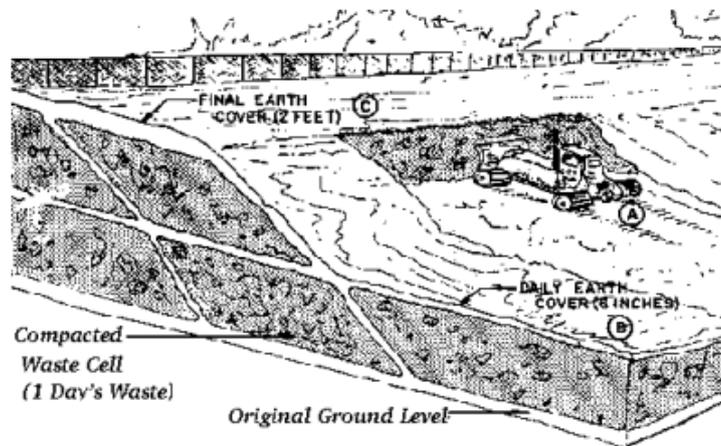
Sistem pembuangan jenis ini merupakan cara pembuangan sampah yang paling sederhana dimana sampah pada suatu TPA hanya dihamparkan pada suatu lokasi dan dibiarkan menumpuk sampai lokasi tersebut penuh.



**Gambar 2.2** *Open dumping landfill*

### 2. *Controlled landfill*

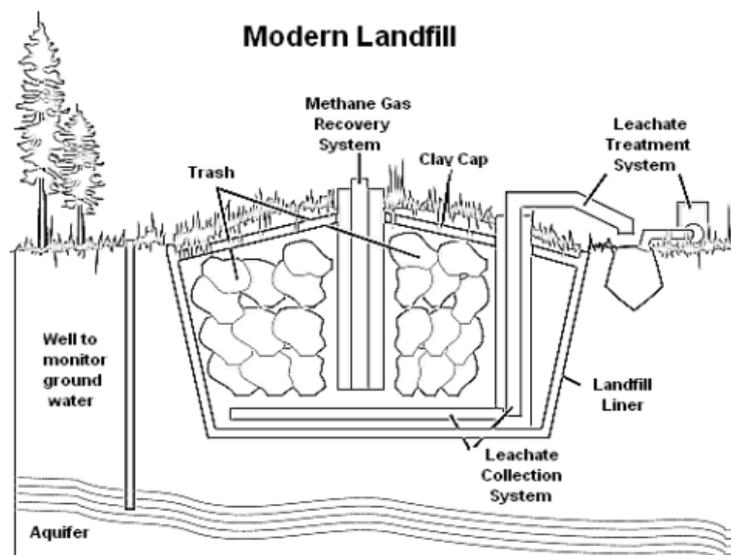
Sistem pembuangan jenis ini merupakan pengembangan dari sistem open dumping dimana dalam jangka waktu tertentu, sampah yang telah terkumpul pada TPA ditimbun menggunakan lapisan tanah untuk mengurangi potensi kerusakan lingkungan yang ditimbulkan.



**Gambar 2.3** *Controlled landfill*

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.



**Gambar 2.4** *Sanitary landfill*

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 (John, 1973). 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 (leachate). Agar landfill dapat berfungsi dengan baik, elemen-elemen strukturnya harus dirancang dengan tepat dan sesuai standar. Lapisan-lapisan yang harus ada pada sebuah landfill adalah lapisan tanah dasar, lapisan clay liner, geomembrane, pipa pengumpul lindi, konstruksi lapisan drainase, konstruksi lapisan penutup serta kolam-kolam pengolahan lindi. Diantara sistem pengolahan sampah di TPA, yang paling penting adalah teknik *capping* (menutup) lahan. Capping lahan penting untuk memahami bahwa rencana pengembangan sistem pengumpulan gas metan termasuk penyediaan sebuah tutup (*cap*) semi-impermeabel untuk memungkinkan terjadinya penyerapan kelembapan. Diperkenalkannya aturan baru di seluruh dunia yang menyatakan bahwa lahan TPA harus dilapisi/ditutup dengan membran yang sesuai untuk mencegah lepasnya gas LFG ke udara. Saat ini, lahan TPA merupakan salah satu kontributor produsen gas methane utama dan permasalahan gas rumah kaca (GRK) di seluruh dunia.

## **2.3 TPA Jatibarang Semarang**

### **2.3.1 Gambaran lokasi TPA Jatibarang Semarang**

TPA ini berlokasi sekitar 12 km barat daya dari pusat Kota Semarang. Luas total tempat ini adalah 40 ha, di mana sekitar 9 ha dari luas tersebut telah digunakan atau ditimbuni oleh sampah. Tempat ini berbukit-bukit dengan lereng yang curam. Lahan yang tersedia tidak lebih dari sekitar 22 hektar, termasuk kawasan aktif saat ini dan kawasan yang telah dipenuhi sampah Sebuah sungai

mengelilingi sebagian dari TPA ini, mengalir sepanjang perbatasan sebelah selatan TPA ke arah timur.



**Gambar 2.5 Gambar Udara Wilayah TPA Jatibarang, Semarang**

TPA ini dimiliki dan dioperasikan oleh Kota Semarang (PEMKOT Kota Semarang) dan dijalankan oleh Departemen Lingkungan Hidup (DLH) Kota Semarang. TPA ini telah beroperasi sejak tahun 1993. TPA ini memiliki 3 zona, yaitu zona aktif 1 dan 2 di mana sampah telah ditimbun hingga akhir 2017, dan zona ketiga, sebelumnya digunakan untuk cadangan, namun kini digunakan sebagai zona aktif. Luas wilayah untuk zona 1 sekitar 27.700 m<sup>2</sup>, dan zona 2 sekitar 35.800 m<sup>2</sup>. Terdapat jaringan pengumpulan lindi yang menyalurkan lindi ke sarana pengolahan yang terletak di ujung selatan lokasi dan dapat diakses dari jalan akses. Juga terdapat rumah pompa dengan sebuah genset kecil dan beberapa pompa. Lindi diolah dengan penggabungan proses anaerobik dan aerobik. Tampak beberapa aerator yang dioperasikan di kolam aerobik.

Rancangan TPA tersebut tidak diketahui namun hampir pasti tanpa sistem perlindungan alas dasar. Lindi dikumpulkan dan sampai tahap tertentu diolah dalam sarana pengolahan biologis. Sebuah sarana pengolahan biologis yang baru sedang dalam pembangunan. Sarana lainnya meliputi gedung perkantoran, jembatan timbang, dan jalan menuju lokasi pengolahan. Sarana bergerak

mencakup *bulldozer*, ekskavator, *wheel loader* (pemuat beroda), dan truk sampah. Sampah didistribusikan dengan menggunakan bulldozer, sebuah wheel loader, dan ekskavator. Namun, kehadiran ratusan pemulung dan beberapa ratus ekor sapi memiliki dampak terhadap pengoperasian mesin dan jumlah sampah yang dibuang ke lokasi TPA, dan juga berdampak terhadap pemadatan sampah sisa di TPA.

Dari karakterisasi sampah diperkirakan sekitar 66% merupakan sampah organik yang dapat diuraikan (sisa makanan, sampah kebun, dan kayu). Namun, pengamatan visual di lokasi tidak dapat memastikan pecahan sampah organik yang cukup tinggi. Hal ini mungkin disebabkan oleh proses penguraian sampah organik yang cepat di tingkat permukaan, dan selain itu juga dimakan oleh sapi. Meskipun sudah ada niat untuk mengoperasikan TPA Jatibarang sebagai TPA saniter, menurut standard ini harus digolongkan sebagai TPA/tempat pembuangan sampah yang tidak terkontrol, namun dengan beberapa perlindungan lingkungan melalui pengolahan lindi, permasalahan yang terjadi seperti kebakaran, kontaminasi air permukaan dan air tanah, polusi udara, bau dan yang lainnya dapat diidentifikasi.

### 2.3.2 Input Sampah di TPA Jatibarang Semarang

TPA Jatibarang merupakan tempat penimbunan sampah akhir di Semarang. Saat ini sarana tersebut menerima sekitar 780-800 ton/hari sampah. Menurut informasi yang tersedia dari DLH, tidak terdapat sampah industri atau sampah B3 yang dibuang ke TPA, namun ini belum diverifikasi.

**Tabel 5. Data Jembatan timbang TPA Jatibarang 2016**

Bulan	Sampah yang masuk (Ton/bulan)	Ton/hari
Januari	18.092	584
Februari	22.321	770
Maret	23.362	754
April	23.561	785
Mei	24.882	803
Juni	23.943	798

Juli	22.961	741
Agustus	23.195	748
September	24.805	827
Oktober	26.194	845
November	26.223	846
Desember	26.748	863
2016	286.287	
Rerata	23.857	784

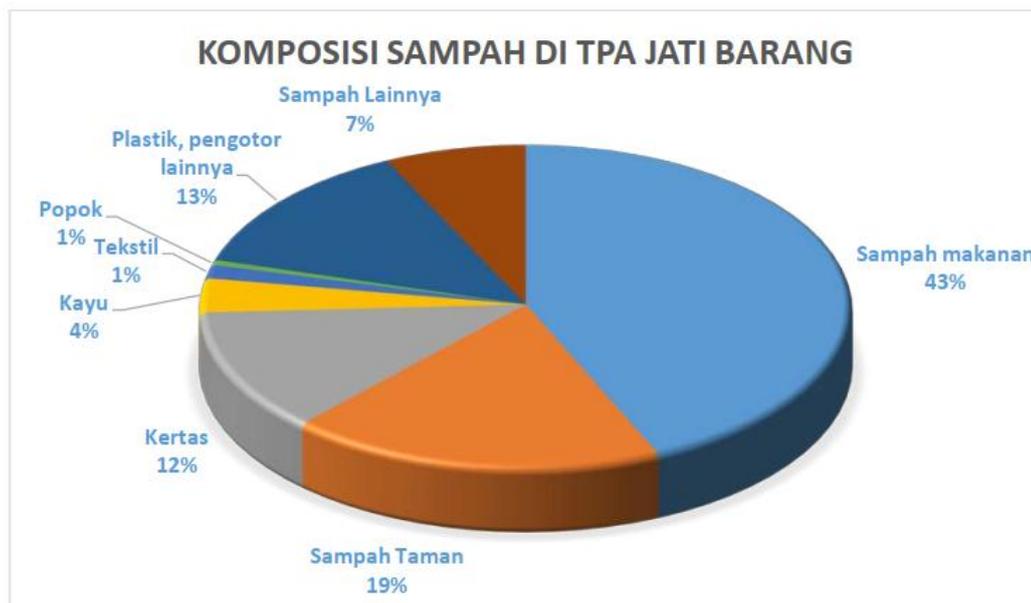
Dengan mempertimbangkan jumlah sampah yang dicatat per tahun yang memasuki TPA dan masa pakai TPA yang telah diperkirakan, maka dapat dihitung bahwa total sekitar 3,5 juta ton sampah telah ditimbun hingga saat ini dan sekitar 5.5 juta ton lagi akan ditimbun di tempat tersebut hingga penutupannya nanti di tahun 2025. Tabel 6. berikut ini menunjukkan rata-rata tonase sampah yang diterima di TPA setiap harinya.

**Tabel 6. Rata-rata Tonnase per Hari di TPA Jatibarang, Semarang**

Tahun	Tonnase per hari	Catatan
1999	575	
2000	578	
2001	582	
2002	585	
2003	590	
2004	597	
2005	603	
2006	606	
2007	609	
2008	610	
2009	614	
2010	620	
2011	625	

2012	675	
2013	750	
2014	800	
2015	800	
2016	800	
2017	800	

Pemilik/Operator dari TPA juga memiliki data mengenai komposisi sampah. Dari komposisi tersebut, sampah makanan mencapai 43,36% dari sampah tersimpan, diikuti oleh sampah taman pada 18,58%. Sampah plastik dan pengotor lainnya sebesar 13,4% sementara kertas pada 12,26%. Sisanya berupa kayu, kain, popok, dan sampah lainnya. Diagram lingkaran dibawah menjelaskan secara jelas komposisi sampah yang masuk.



**Gambar 2.6 Komposisi Sampah di TPA Jatibarang Semarang.**

Operasi TPA dilengkapi dengan penggunaan alat berat. Alat berat ini meliputi bulldozer, excavator, wheel loader, dan truk dumper. Alat-alat ini dimiliki oleh operator, dan diyakini apabila mesin-mesin digunakan secara penuh dapat memenuhi tata kelola yang layak di TPA.

#### 2.4. Landfill Gas (LFG)

*Landfill gas* (LFG) adalah gas yang dihasilkan dari proses fermentasi atau anaerobik dari bahan-bahan organik, seperti kotoran manusia, kotoran hewan, limbah domestik (rumah tangga), limbah pertanian, limbah perkebunan, dll. Kandungan yang paling utama dalam LFG adalah metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Hans et al, 2011). Presentase dari gas penyusun LFG dapat dilihat pada Tabel 7

**Tabel 7. Penyusun Gas LFG (B. Amrit, 2014)**

Gas Penyusun LFG	Rumus Kimia	Presentase (%)
Methana	CH <sub>4</sub>	50-70
Karbon dioksisa	CO <sub>2</sub>	30-40
Hidrogen	H <sub>2</sub>	5-10
Nitrogen	N <sub>2</sub>	1-2
Dinitrogen oksida	N <sub>2</sub> O	0,3
Hidrogen Sulfida	H <sub>2</sub> S	sangat sedikit

Tabel 7. memperlihatkan presentase gas penyusun LFG, terlihat bahwa kandungan gas terbesar yang terdapat pada LFG adalah metana sebesar 50 – 70 % dan diikuti oleh karbon dioksida sebesar 30 – 40 %. 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. Climate Change: Synthesis Report (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 CO<sub>2</sub>. Untuk mengetahui produksi gas yang dihasilkan dari Landfill dapat menggunakan perhitungan berdasarkan metode *first order decay* dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) 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 (Purwanta, 2009)]:

$$L_o = DDOC_M \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad 2.1$$

dimana:

- $L_o$  = potensi produksi metana (Gg)  
 $DDOC_m$  = massa DOC yang dapat dikomposisikan (Gg)  
 $F$  = fraksi pembentukan metana

dan untuk menghitung besarnya nilai  $DDOC_m$  diperlukan data jumlah sampah yang terdapat dalam suatu TPA dan dihitung dengan persamaan berikut

$$DDOC_M = W \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot MCF \quad 2.2$$

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

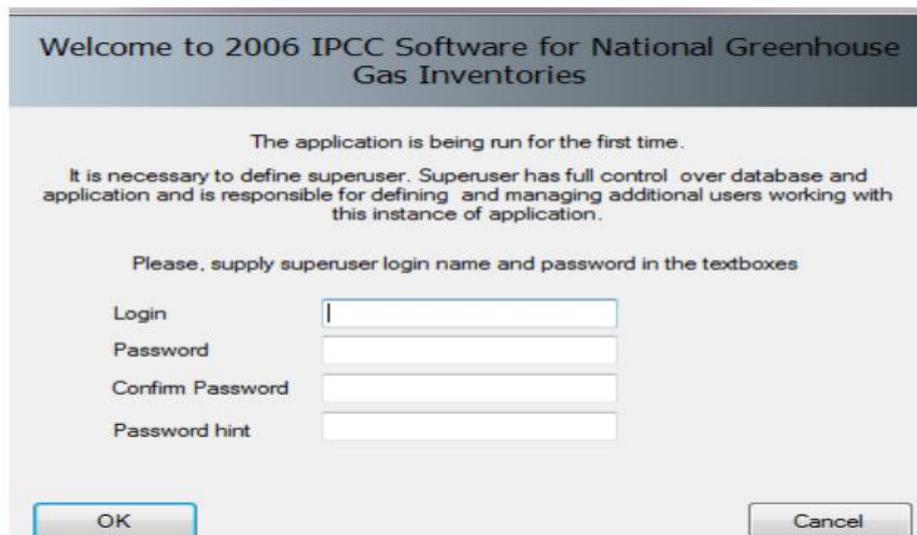
dan untuk menghitung kapasitas energi listrik yang dapat dibangkitkan dari *landfill* digunakan Tabel 8

**Tabel 8. Konversi energi**

Jenis Energi	Setara energi
1 Kg Gas Metana	6,13 x 10 <sup>7</sup> J
1 kWh	3,6 x 10 <sup>6</sup> J
1 m <sup>3</sup> Gas metana	4,0213 x 10 <sup>7</sup> J

## 2.5 IPCC Inventory Software

*Inter Governmental Panel on Climate Change* (IPCC) adalah suatu upanel ilmiah yang terdiri dari para ilmuwan dari seluruh dunia. IPCC didirikan pada tahun 1988 oleh dua organisasi PBB, *World Meteorological Organization* (WMO) dan *United Nations Environment Programme* (UNEP) untuk mengevaluasi risiko perubahan iklim akibat aktivitas manusia, dengan meneliti semua aspek berdasarkan pada literatur teknis/ilmiah yang telah dikaji dan dipublikasikan. Selain aktif melakukan berbagai kegiatan, IPCC juga membuat peranti yang membantu peneliti di seluruh dunia salah satunya untuk menghitung emisi GRK, yaitu *IPCC Inventory Software*, peranti tersebut dibuat berdasarkan metodologi yang telah diteliti dan dikembangkan dalam panel IPCC untuk menghitung berbagai produk emisi GRK termasuk gas metan. Langkah penggunaan peranti *IPCC Inventory Software* untuk menghitung potensi gas metan di suatu TPA dijelaskan sebagai berikut:



Welcome to 2006 IPCC Software for National Greenhouse Gas Inventories

The application is being run for the first time.

It is necessary to define superuser. Superuser has full control over database and application and is responsible for defining and managing additional users working with this instance of application.

Please, supply superuser login name and password in the textboxes

Login

Password

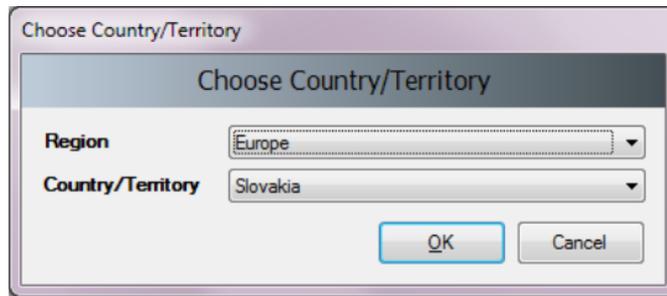
Confirm Password

Password hint

OK Cancel

**Gambar 2.7** Tampilan awal *IPCC Inventory Software*

Tampilan pada Gambar 2.7 menunjukkan proses pertama pembuatan *superuser* yang memiliki akses penuh terhadap aplikasi dan data yang berada di dalamnya. Selanjutnya kita dapat memilih lokasi dari pengguna yang diperlihatkan oleh Gambar 2.8



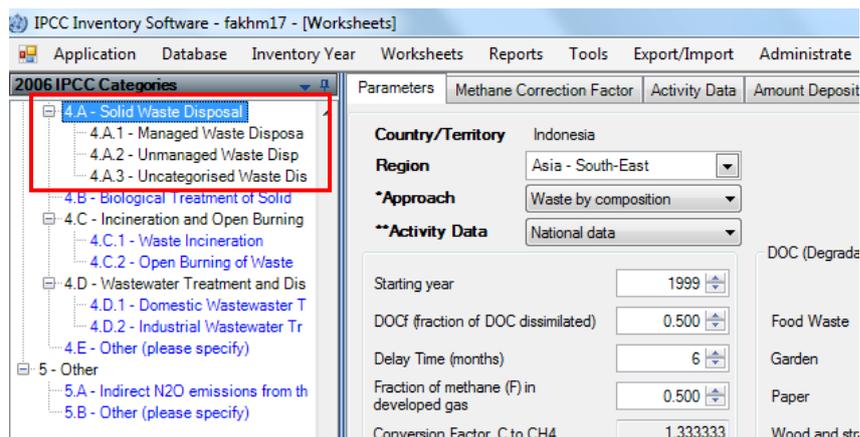
**Gambar 2.8 Form pemilihan negara pada *software* IPCC**

Selanjutnya user membuat tahun inventory untuk nilai default biasanya dimulai dari tahun 1990, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.9



**Gambar 2.9 Form tahun inventory pada *software* IPCC**

Untuk menghitung potensi emisi gas metan dari sebuah TPA, maka pilih item “4.A Solid Waste Disposal”, pada “IPCC Categories” seperti pada Gambar 2.10



**Gambar 2.10 Window IPCC**

Selanjutnya pada menu “**Parameter**” user dapat memilih beberapa parameter pengolahan data sesuai pilihan maupun asumsi yang digunakan. Parameter – parameter yang dapat dipilih diperlihatkan pada Gambar 2.11

Parameters Methane Correction Factor Activity Data Amount Deposited Methane Calculations Methane Recovery Results Long Term stored C in SWDS

Country/Territory Indonesia **1**

Region Asia - South-East Climate Zone Tropical wet **3**

\*Approach Waste by composition

\*\*Activity Data National data

Starting year **2** 1999

DOCf (fraction of DOC dissimilated) 0.500

Delay Time (months) 6

Fraction of methane (F) in developed gas 0.500

Conversion Factor, C to CH<sub>4</sub> 1.333333

Oxidation Factor (OX) 0.00

Parameters for carbon storage

% paper in industrial waste 0.00 %

% wood in industrial waste 0.00 %

DOC (Degradable organic carbon)		Methane generation rate constant (k)	
[weight fraction, wet basis]		[1 / years]	
Food Waste	0.150	Food Waste	0.400
Garden	0.200	Garden	0.170
Paper	0.400	Paper	0.070
Wood and straw	0.430	Wood and straw	0.035
Textiles	0.240	Textiles	0.070
Disposable nappies	0.240	Disposable nappies	0.050
Sewage sludge	0.050	Sewage sludge	0.400
Industrial Waste	0.150	Industrial Waste	0.170

**Gambar 2.11 Opsi menu pada jendela Parameter**

Dari Gambar 2.11 terdapat 3 bagian utama untuk memilih parameter dengan keterangan sebagai berikut:

1. Bagian 1, terdiri dari item “**Region**” yang digunakan untuk memilih lokasi TPA yang diinginkan user, . “**\*Approach**” digunakan untuk memilih metode pendekatan dalam mengolah data sampah hal ini terkait dengan DOC (*Degradable organic carbon*), terdapat dua pilihan pendekatan yaitu “Bulk waste data only” atau “Waste by composition” yang lebih detail, apabila user memiliki data DOC yang spesifik, maka nilai-nilai konstanta DOC dapat diisi secara manual. “**\*\*Activity Data**” digunakan untuk memilih pendekatan data dari sampah, bila user tidak memiliki data historis sampah, user dapat mengestimasi jumlah sampah berdasar tren populasi sesuai rumus “Population/GDP (Tier 1)”
2. Bagian 2, terdiri dari beberapa item seperti awal data sampah dihitung, kemudian nilai fraksi DOC (DOCf), juga fraksi pembentukan metana, bila user tidak memiliki data spesifik maka user dapat membiarkan nilai-nilai tersebut sesuai nilai default.
3. Bagian 3, terdiri dari item “**Climate Zone**”, terdapat beberapa pilihan untuk tipe iklim lokasi TPA, pilihan tersebut akan berkaitan dengan nilai k (Methane generation rate constant), apabila user memiliki data spesifik maka nilai-nilai tersebut juga dapat disesuaikan.

Apabila user selesai memilih pada menu ini maka user dapat menekan “save” untuk menyimpan pilihan. Selanjutnya user perlu menentukan parameter *methane correction factor* (MCF) pada jendela “**Methane Correction Parameter**” yang ditunjukkan pada Gambar 2.12

Municipal Solid Waste							
	Unmanaged – shallow	Unmanaged – deep	Managed – anaerobic	Managed – semi-aerobic	Uncategorised SWDS	Distribution Check	Weighted MCF
MCF	0.4	0.8					
Fixed distribution		100					
Year distribution	%	%	%	%	%	Total	
1999			100			100	0.8
2000			100			100	0.8
2001			100			100	0.8
2002			100			100	0.8
2003			100			100	0.8
2004			100			100	0.8
2005			100			100	0.8
2006			100			100	0.8
2007			100			100	0.8
2008			100			100	0.8
2009			100			100	0.8

**Gambar 2.12 Opsi menu pada jendela Methane Correction Factor**

Nilai MCF terkait dengan tipe TPA, IPCC memeberikan beberapa klasifikasi tipe TPA, semakin baik kualitas TPA maka nilai MCF akan semakin besar, apabila pada tahun tertentu tipe TPA berubah maka atau sampah dikelola dalam beberapa tipe TPA maka user dapat memasukkan presentase sampah tersebut pada tahun yang dimaksud sehingga akan menghasilkan estimasi yang lebih baik. Pada jendela menu “**Activity Data**” user perlu memasukkan data historis sampah dari tahun yang dimaksud dalam satuan Gigagram ( 1000 ton), tampilan pada opsi menu ini diperlihatkan oleh Gambar 2.13

Composition of waste going to solid waste disposal sites.											
Year	Total MSW (Gg)	% to SWDS (%)	Total to SWDS (Gg)	Food (%)	Garden (%)	Paper (%)	Wood (%)	Textile (%)	Nappies (%)	Plastics, other inert (%)	Total (=100 %)
IPCC Regional Defaults		100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
1999	4532.935	100	4532.935	43	19	12	4	1	1	20	100
2000	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2001	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2002	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2003	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2004	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2005	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2006	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2007	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2008	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100
2009	0	100	0	43	19	12	4	1	1	20	100

**Gambar 2.13 Opsi menu pada jendela Activity Data**

Pada jendela menu “Amount Deposited” user mengisi data sampah sesuai komposisinya, dan jumlahnya harus sesuai dengan isian data pada menu “Activity Data”. Tampilan pada menu tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.14

Year	Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Deposited MSW	Sludge	Inert	Industria
1999	1949	861	544	181	45	45	4532.935	0	0	
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Gambar 2.14 Opsi menu pada jendela Amount Deposited

Setelah user mengisi semua data yang diperlukan maka peranti IPCC Inventory Software akan melakukan perhitungan potensi produksi metana (Lo) untuk masing2 jenis komposisi sampah, sesuai dengan persamaan (1) dan (2). Hasil perhitungan tersebut terdapat pada menu parameter “Methane Calculation” seperti diperlihatkan oleh Gambar 2.15

Year	Amount deposited	MCF	Decomposable DOC (DDOCm) deposited	DDOCm not reacted, Deposition year	DDOCm decomposed, Deposition year	DDOCm accumulated in SWDS end of year	DDOCm decomposed	CH4 generated
1999	544	0.8	87.04	87.04	0	87.04	0	0
2000	0	0.8	0	0	0	81.15556	5.88444	3.92296
2001	0	0.8	0	0	0	75.66894	5.48662	3.65774
2002	0	0.8	0	0	0	70.55325	5.11569	3.41046
2003	0	0.8	0	0	0	65.78342	4.76984	3.17989
2004	0	0.8	0	0	0	61.33605	4.44737	2.96491
2005	0	0.8	0	0	0	57.18936	4.1467	2.76446
2006	0	0.8	0	0	0	53.323	3.86635	2.57757
2007	0	0.8	0	0	0	49.71804	3.60496	2.40331
2008	0	0.8	0	0	0	46.36679	3.36195	2.24983

Gambar 2.15 Opsi menu pada jendela Methane Calculation

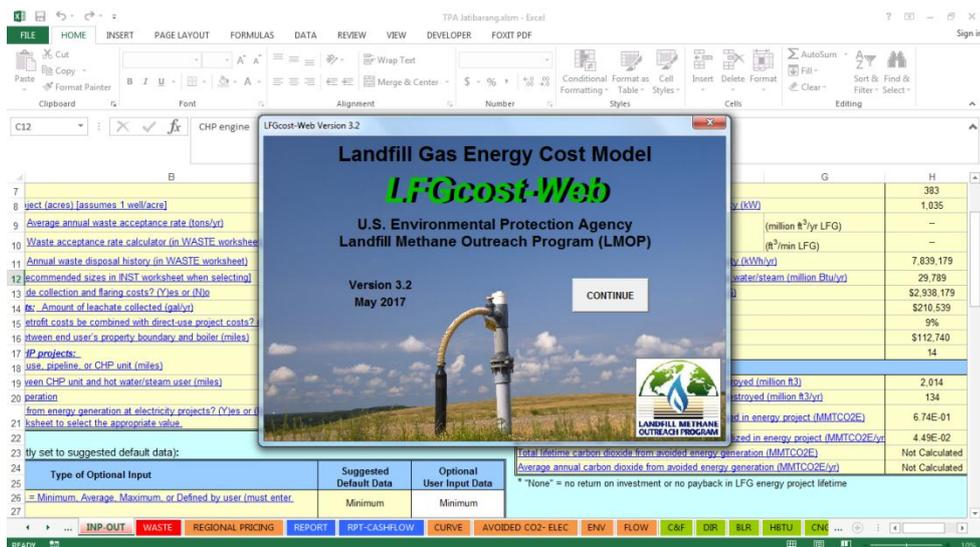
Hasil perhitungan potensi produksi gas metan yang dihasilkan dapat dilihat pada pilihan menu parameter “Results” seperti diperlihatkan pada Gambar 2.16

Year	Food A (Gg)	Garden B (Gg)	Paper C (Gg)	Wood D (Gg)	Textile E (Gg)	Nappies F (Gg)	Sludge G (Gg)	Industrial H (Gg)	Total I (Gg)	Methane recovery J (Gg)	Methane Emissions M = (I-J) * (1-OX) (Gg)
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	25.70185	7.17891	3.92296	0.71385	0.19471	0.14046	0	0	37.85274	0	37.85274
2001	17.22846	6.0566	3.65774	0.6893	0.18154	0.13361	0	0	27.94725	0	27.94725
2002	11.54859	5.10974	3.41046	0.66559	0.16927	0.12709	0	0	21.03073	0	21.03073
2003	7.74125	4.3109	3.17989	0.64269	0.15783	0.12089	0	0	16.15346	0	16.15346
2004	5.18911	3.63696	2.96491	0.62059	0.14716	0.115	0	0	12.67373	0	12.67373
2005	3.47837	3.06837	2.76446	0.59924	0.13721	0.10939	0	0	10.15705	0	10.15705
2006	2.33162	2.58868	2.57575	0.57863	0.12793	0.10405	0	0	8.30849	0	8.30849
2007	1.56293	2.18398	2.40331	0.55873	0.11928	0.09898	0	0	6.92721	0	6.92721
2008	1.04766	1.84255	2.24083	0.53951	0.11122	0.09415	0	0	5.87593	0	5.87593
2009	0.70227	1.55449	2.08934	0.52096	0.1037	0.08956	0	0	5.06032	0	5.06032
2010	0.47075	1.31147	1.94808	0.50304	0.09669	0.08519	0	0	4.41522	0	4.41522
2011	0.31555	1.10644	1.81638	0.48574	0.09015	0.08104	0	0	3.8953	0	3.8953

Gambar 2.16 Opsi menu pada jendela Results

## 2.6 LFGCost-Web (Landfill Gas Energy Cost Model)

LFGCost-Web adalah sebuah peranti (*spreadsheet tool*) yang dibangun oleh Environmental Protection Agency (EPA) dalam program Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Peranti ini memberikan estimasi potensi LFG khususnya gas metan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik, juga menghitung analisis ekonomi dari pembangunan sebuah sistem pengolahan LFG berdasarkan jenis proyek yang akan dibangun. Tampilan awal peranti tersebut adalah sebagai berikut



Gambar 2.17 Tampilan awal LFGCost-Web (Landfill Gas Energy Cost Model)

Pada peranti tersebut terdapat daftar *worksheets* yang ada, daftar dan fungsi dari masing-masing *sheet* tersebut dijelaskan pada Tabel 9. berikut

**Tabel 9. Daftar *sheet* pada peranti LFGCost-Web**

<b>Nama <i>Worksheet</i></b>	<b>Fungsi</b>
INST	Instruksi umum dan petunjuk penggunaan peranti
INP-OUT	Inputan yang diperlukan dan inputan opsional dari user, serta hasil output dari model
WASTE	Inputan sampah dari user atau rate penerimaan sampah tahunan
REGIONAL PRICING	Referensi harga jual daya di regional (Amerika Serikat)
REPORT	Rangkuman laporan dari inputan user, output perhitungan dan kurva emisi gas metana
RPT-CASHFLOW	Rangkuman detail analisis <i>cash flow</i> dalam kurun waktu 15 tahun
CURVE	Kurva LFG yang dihasilkan, LFG yang dapat dikumpulkan dan LFG yang digunakan
AVOIDED CO2-ELEC	Referensi faktor emisi jaringan daya di regional (Amerika Serikat)
ENV	Perhitungan keuntungan lingkungan
FLOW	Perhitungan LFG yang dihasilkan, LFG yang dapat dikumpulkan dan LFG yang digunakan
C&F	Desain dan biaya pengumpulan gas dan sistem flare baru
DIR	Desain dan biaya proyek penggunaan langsung LFG
BLR	Desain dan biaya proyek <i>boiler</i>

HBTU	Desain dan biaya proyek pemrosesan gas kualitas tinggi (High Btu)
CNG	Desain dan biaya proyek pemrosesan dan produksi CNG ( <i>Compressed Natural Gas</i> )
LCH	Desain dan biaya proyek penguap lindu
TUR	Desain dan biaya proyek <i>standard turbine-generator set</i>
ENG	Desain dan biaya proyek <i>standard reciprocating engine-generator set</i>
MTUR	Desain dan biaya proyek <i>microturbine-generator set</i>
SENG	Desain dan biaya proyek <i>small reciprocating engine-generator set</i>
CHPE	Desain dan biaya proyek CHP <i>reciprocating engine-generator set</i>
CHPT	Desain dan biaya proyek CHP <i>turbine-generator set</i>
CHPM	Desain dan biaya proyek CHP <i>microturbine-generator set</i>
ECN	Perhitungan dan analisis ekonomis
BUDGET-ENG	Alokasi-alokasi biaya proyek pembangkit listrik
BUDGET-DIR	Alokasi-alokasi biaya proyek penggunaan langsung LFG
ECON-BEN SUMMARY	Rangkuman keuntungan ekonomis dan analisis pembuatan lapangan kerja

Selanjutnya untuk memilih tipe proyek yang sesuai untuk digunakan pada suatu TPA, digunakan referensi pada Tabel 10. berikut

**Tabel 10. Tipe Proyek LFG dan Ukuran Proyek yang Direkomendasikan**

Tipe Proyek LFG	Rekomendasi Ukuran Proyek
Direct-use (Boiler, Greenhouse, etc.)	400 - 3,000 ft <sup>3</sup> /min LFG
Boiler Retrofit	≤ 3,000 ft <sup>3</sup> /min LFG
High Btu Processing Plant	1,000 - 10,000 ft <sup>3</sup> /min LFG
Onsite CNG Production and Fueling Station	50 to 600 ft <sup>3</sup> /min LFG
Leachate Evaporators	≥ 5,000 gallons leachate per day
Standard Turbine-Generator Sets	> 3 MW
Standard Reciprocating Engine-Generator Sets	≥ 800 kW
Microturbine-Generator Sets	30 - 750 kW
Small Reciprocating Engine-Generator Sets	100 kW - 1 MW
CHP Reciprocating Engine-Generator Sets	≥ 800 kW
CHP Turbine-Generator Sets	> 3 MW
CHP Microturbine-Generator Sets	30 to 300 kW

Pada *sheet* INP-OUTPUT user dapat mengisi nama TPA dari proyek yang akan dibangun, juga terdapat beberapa inputan yang perlu diisi oleh user, dan beberapa inputan opsional dalam nilai default, kecuali user memiliki data spesifik. Tampilan inputan yang harus diisi oleh user diperlihatkan pada Gambar 2.18

INPUTS / OUTPUTS Enter Landfill Name or Identifier:

[Go To Instructions](#)

**Required User Inputs:**

Type of Input Required	Required Input Data
<a href="#">Year landfill opened</a>	
<a href="#">Year of landfill closure</a>	
<a href="#">Area of LFG wellfield to supply project (acres) [assumes 1 well/acre]</a>	
Method for entering waste acceptance data [CHOOSE ONLY ONE METHOD]:	
<a href="#">Average annual waste acceptance rate (tons/yr)</a>	
<a href="#">Waste acceptance rate calculator (in WASTE worksheet)</a>	<a href="#">Go to WASTE</a>
<a href="#">Annual waste disposal history (in WASTE worksheet)</a>	<a href="#">Go to WASTE</a>
<a href="#">LFG energy project type [refer to recommended sizes in INST worksheet when selecting]</a>	
<a href="#">Will LFG energy project cost include collection and flaring costs? (Y/yes or N/no)</a>	
<a href="#">For Leachate Evaporator projects: Amount of leachate collected (gal/yr)</a>	
<a href="#">For Boiler Retrofits: Will boiler retrofit costs be combined with direct-use project costs? (Y/yes or N/no)</a>	
<a href="#">For Boiler Retrofits: Distance between end user's property boundary and boiler (miles)</a>	
<a href="#">For Direct-use, High Btu, and CHP projects: Distance between landfill and end use, pipeline, or CHP unit (miles)</a>	
<a href="#">For CHP projects: Distance between CHP unit and hot water/steam user (miles)</a>	
<a href="#">Year LFG energy project begins operation</a>	
<a href="#">Will model calculate avoided CO2 from energy generation at electricity projects? (Y/yes or N/no. If (Y) yes, go to the Avoided CO2- Elec worksheet to select the appropriate value.</a>	

**Gambar 2.18 Inputan pada LFGCost-Web**

Keterangan pada Gambar 2.18 tentang inputan yang harus dimasukkan user pada peranti LFGCost-Web ialah sebagai berikut

- **Year landfill opened**

Tahun dibukanya TPA atau rencana pembukaannya, terdiri dari 4 digit tahun

- **Year landfill closed**

Tahun ditutupnya TPA atau rencana penutupannya, terdiri dari 4 digit tahun

- **Area of LFG wellfield to supply project**

Jumlah sumur pada area TPA yang terdapat sampah dan akan diolah dan dibangun sumur ekstraksi, diasumsikan terdapat 1 sumur untuk area 1 acre (4046 m<sup>2</sup>) untuk mengsumsikan biaya pembuatan sumur ekstraksi vertikal, sistem pemipaan, flaring dan sistem-sistem lainnya untuk mengumpulkan LFG.

- **Method for entering waste acceptance data**

Kecuali user memiliki data sampah, user dapat memasukkan rata-rata penerimaan sampah per tahun pada TPA pada kolom “Average annual waste acceptance rate” dan sistem akan memberikan estimasi penerimaan sampah per tahun, Bila user memiliki data historis penerimaan sampah maupun total sampah pada tahu tertentu, user dapat memasukkan data tersebut pada worksheet “Waste”

- **LFG energy project type**

User dapat memilih tipe proyek energi sesuai Tabel 10.

- **Will LFG energy project cost include collection and flaring costs?**

User dapat memilih “Y” apabila proyek yang akan dilakukan memasukkan variabel pengumpulan LFG dan sistem *flare* ke dalam komponen biaya, atau pilih “N” bila pada lokasi proyek telah terdapat sistem pengumpul LFG dan sistem *flare* yang dibutuhkan, sehingga user tidak perlu memasukkan komponen tersebut ke dalam biaya proyek.

- **For Leachate Evaporator projects: Amount of leachate collected**

Jumlah air lindu yang akan diolah setiap tahunnya dalam satuan gallon

- **For Boiler Retrofits: Will boiler retrofit costs be combined with direct-use project costs?**

User dapat memilih “Y” apabila biaya proyek *boiler retrofit* dikombinasikan dengan biaya proyek untuk penggunaan langsung LFG dan memilih “N” untuk kondisi sebaliknya.

- **For Boiler Retrofits: Distance between end user’s property boundary and boiler**

Jarak antara proyek *boiler* dengan properti user dalam satuan mil

- **For Direct-use, High Btu, and CHP projects: Distance between landfill and end use, pipeline, or CHP unit**

Untuk proyek *direct-use*, jarak antara TPA dan *end user*, bila dikombinasikan *boiler retrofit* ialah jarak proyek dengan property milik user dalam satuan mil.

Untuk proyek *high-Btu*, ialah jarak antara TPA dan pipa *natural gas* atau end user gas *high-Btu* dalam satuan mil, untuk proyek CHP, ialah jarak antara TPA dengan *CHP engine, turbine, atau microturbine* dalam satuan mil.

- **For CHP projects: Distance between CHP unit and hot water/steam user**

Jarak antara proyek dengan CHP dengan *end user* air panas atau uap, disarankan untuk mengisi jarak maksimal 1 mil karena umumnya unit proyek CHP dan *end user* berada dalam lokasi sama, dan sering diasumsikan berjarak 0 mil.

- **Year LFG energy project begins operation**

Tahun dimulainya proyek dan operasional, terdiri dari 4 digit dibatasi dalam range tahun 2010-2025

- **Will model calculate avoided CO<sub>2</sub> from energy generation at electricity projects?**

Pilih “Y” jika pada proyek pembangkitan listrik akan menganalisis CO<sub>2</sub> yang berhasil dihindari dalam proyek, dan pilih “N” untuk kondisi sebaliknya. Pada proyek-proyek non pembangkit listrik maka analisis CO<sub>2</sub> yang berhasil dihindari dalam proyek akan tetap dilakukan apapun pilihan user pada kolom ini.

Selain inputn yang harus diisi oleh user, juga terdapat inputan opsional yang bila tidak diubah maka akan berada pada nilai default, tampilan inputan psional tersebut diperlihatkan oleh Gambar 2.19

Optional User Inputs (currently set to suggested default data):		
Type of Optional Input	Suggested Default Data	Optional User Input Data
LFG energy project size: Gas rate = Minimum, Average, Maximum, or Defined by user (must enter design flow rate below)?	Minimum	Minimum
For user-defined project size only: Design flow rate (ft <sup>3</sup> /min)	---	
Methane generation rate constant, k (1/yr) [0.04 for typical climates, 0.02 for arid climates, 0.1 for bioreactors or wet landfills]	0.04	0.04
Potential methane generation capacity of waste, Lo (ft <sup>3</sup> /ton)	3,204	3,204
Methane content of landfill gas (%)	50%	50%
Average depth of landfill waste (ft)	65	65
Landfill gas collection efficiency (%)	85%	85%
Utilization of CHP hot water/steam potential (%)	100%	100%
Expected LFG energy project lifetime (years)	15	15
Operating schedule:		
Hours per day	24	24
(does not apply to leachate evaporators) Days per week	7	7
Weeks per year	52	52
Global warming potential (GWP) of methane	25	25
Will cost of metering station that serves as custody transfer point be borne by end user?	Y	Y
Loan lifetime (years)	10	10

**Gambar 2.19 Inputan opsional pada LFGCost-Web**

Beberapa keterangan pada Gambar 2.19 tentang inputan opsional user pada peranti LFGCost-Web ialah sebagai berikut

- **LFG energy project size**

Digunakan untuk mendefinisikan kapasitas aliran gas metana untuk proyek energi, terdapat opsi “Minimum”, “Average”, dan ‘Maximum”, masing-masing opsi tersebut dihitung berdasarkan gas metana yang dihasilkan, user juga dapat menentukan sendiri desain kapasitas yang diinginkan.

- **Methane generation rate constant (k)**

Konstanta kecepatan pemebentukan gas metan, umumnya tergantung pada kondisi iklim di sekitar TPA, pada peranti menyediakan 3 pilihan opsi konstanta k, dan rekomendasi nilai yang dipilih ialah 0,04 yang umumnya relevan untuk kondisi iklim pada umumnya. Nilai 0,04 dipakai untuk area iklim dengan curah hujan  $\geq 25$  inch/tahun, 0,02 area iklim dengan curah hujan  $< 25$  inch/tahun, dan 0,1 untuk bio reaktor.

- **Potential methane generation capacity of waste (Lo)**

Nilai kapasitas pembentukan gas metan dalam satuan kaki kubik per ton (ft<sup>3</sup>/ton), bila user tidak memiliki data spesifik sampah, maka disarankan untuk mengisi parameter sesuai nilai default yaitu 3204 ft<sup>3</sup>/ton.

- **Methane content of landfill gas**

Kandungan gas metana pada LFG, umumnya berkisar pada range 45%-60%, disarankan menggunakan nilai 50%, kecuali user memiliki data spesifik.

- **Average depth of landfill waste**

Rata-rata kedalaman sampah dalam satuan kaki (ft), parameter ini terkait dengan analisis biaya pembuatan sumur ekstraksi.

- **Landfill gas collection efficiency**

Efisiensi dari peralatan yang digunakan untuk mengumpulkan LFG umumnya berada pada range 70%-95%, disarankan untuk memilih efisiensi sebesar 85%.

- **Initial year product price**

Harga jual dari proyek energi yang dilakukan, baik berupa energi listrik, maupun hasil pengolahan energi lain seperti, LNG, CNG, maupun uap atau air panas.

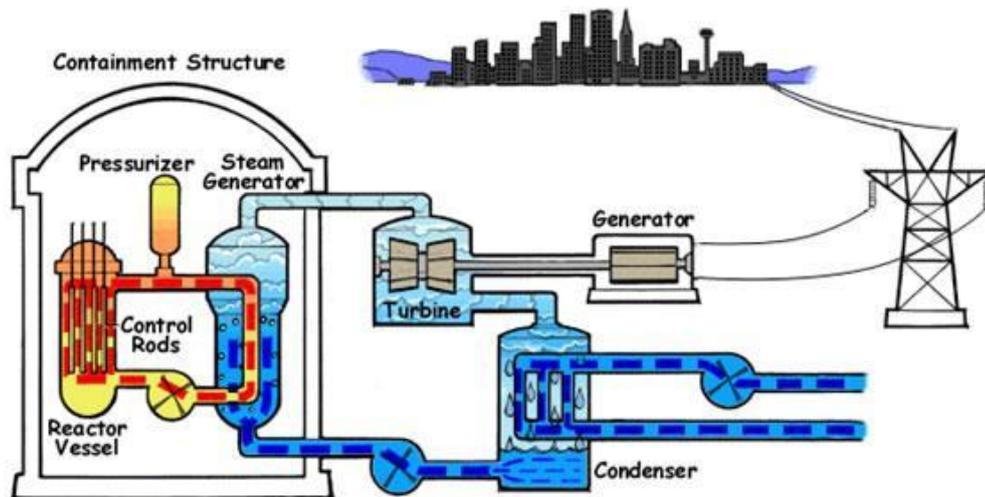
Hasil dari pengolahan data yang ada akan muncul pada parameter output seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.20 berikut

F		G	H
Type of Output		Output Data	
<b>Economic Analysis:</b>			
Design project size (ft <sup>3</sup> /min LFG)		0	
Generating capacity for projects generating electricity (kW)		--	
Average project size for projects NOT generating electricity: [based on actual LFG use]	(million ft <sup>3</sup> /yr LFG)	--	
	(ft <sup>3</sup> /min LFG)	--	
Average project size for projects generating electricity (kWh/yr)		--	
Average project size for CHP projects producing hot water/steam (million Btu/yr)		--	
Total installed capital cost for year of construction (\$)		\$0	
Annual costs for initial year of operation (\$)		\$0	
Internal rate of return (%)		0%	
Net present value at year of construction (\$)		\$0	
Years to Breakeven*		1	
<b>Environmental Benefits:</b>			
Total lifetime amount of methane collected and destroyed (million ft <sup>3</sup> )		0	
Average annual amount of methane collected and destroyed (million ft <sup>3</sup> /yr)		0	
GHG value of total lifetime amount of methane utilized in energy project (MMTCO <sub>2</sub> E)		0.00E+00	
GHG value of average annual amount of methane utilized in energy project (MMTCO <sub>2</sub> E/yr)		0.00E+00	
Total lifetime carbon dioxide from avoided energy generation (MMTCO <sub>2</sub> E)		0.00E+00	
Average annual carbon dioxide from avoided energy generation (MMTCO <sub>2</sub> E/yr)		0.00E+00	

**Gambar 2.20 Hasil output kalkulasi pada LFGCost-Web**

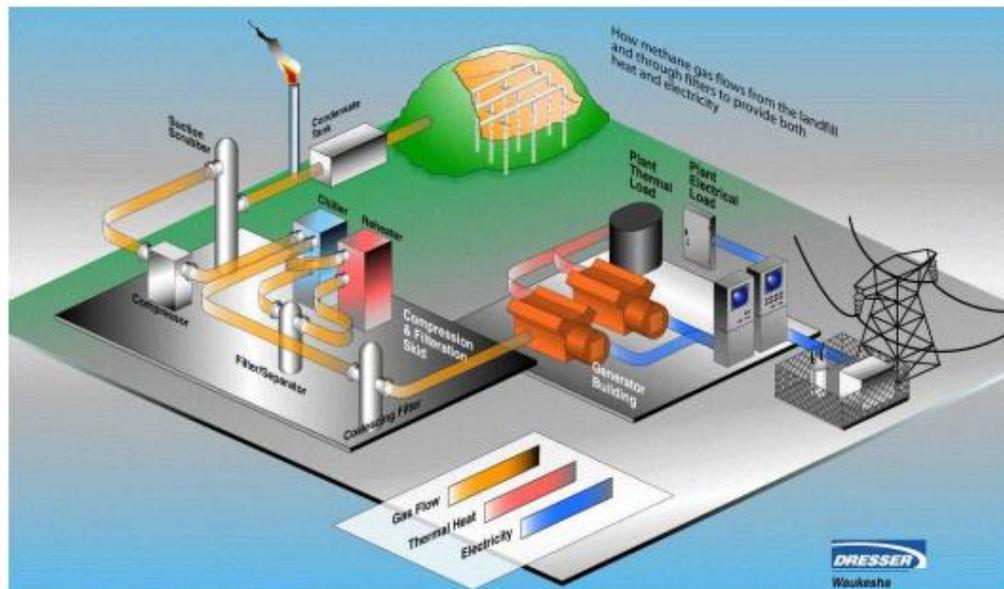
## 2.5 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Pembangkit listrik merupakan suatu sistem yang merubah energi gerak (mekanikal) menjadi energi listrik. Pembangkit listrik umumnya terdiri dari Turbin dan Generator Listrik. Turbin digunakan sebagai alat untuk memutar rotor dari Generator Listrik, sehingga putaran rotor itu menghasilkan energi listrik. Sistem pembangkitan tenaga listrik yang mengubah energi alam menjadi energi mekanik yang selanjutnya menjadi energi listrik dapat dikategorikan berdasarkan bahan bakar yang digunakannya. Beberapa jenis pembangkit listrik berdasarkan bahan bakarnya tersebut, dapat dikategorikan menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dll.



**Gambar 2.21 Pembangkit Listrik Tenaga Uap**

PLTSa ini adalah pembangkit yang menggunakan gas dari *landfill* hasil dekomposisi sampah, yang kemudian akan dimanfaatkan gas metana yang terkandung didalamnya sebagai bahan bakar generator (*gas engine*), yang kemudian akan menghasilkan listrik. Berikut adalah skema proyek pemanfaatan LFG untuk pembangkit listrik:

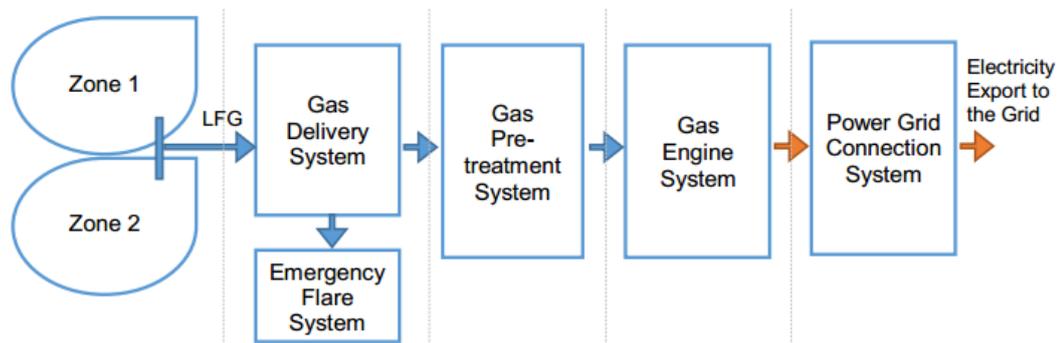


**Gambar 2.22 Proyek Pemanfaatan LFG untuk Pembangkit Listrik**

Dalam proyek pada Gambar 2.22, ada beberapa *treatment* pada sampah sehingga menghasilkan gas yang nantinya akan digunakan sebagai bahan baku pembangkit listrik. Gas yang dihasilkan oleh *landfill* (LFG) melalui proses anaerobik, ditangkap oleh sumur gas dan dibantu untuk dinaikkan ke permukaan dengan menggunakan blower. Selain gas, output yang dihasilkan dalam proses tersebut adalah air lindi (*leachate*). Dengan adanya lapisan geomembran didalam *landfill*, maka air lindi tidak akan mencemari tanah maupun air tanah kemudian air lindi dialirkan menuju tempat *evaporator* air lindi melalui pipa-pipa yang telah disediakan.

### 2.5.1 Teknologi Penghasil LFG dalam PLTSA

Di Indonesia, pengelolaan *sanitary landfill* untuk menghasilkan LFG dilakukan pada TPST Bantar Gebang, di Bekasi Jawa Barat. Saat ini gas pada *sanitary landfill* (LFG) belum dimanfaatkan secara optimal. LFG yang terdapat pada *sanitary landfill* hanya terbuang cuma-cuma ke atmosfer, padahal LFG sendiri memiliki potensi yang besar untuk meningkatkan efek pemanasan global karena kandungan yang terdapat didalamnya seperti  $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$ . Elemen-elemen utama dalam pengolahan sampah menjadi energi listrik diperlihatkan pada diagram skematik berikut



**Gambar 2.23 Elemen utama dalam sebuah sarana pengolahan sampah menjadi energi listrik**

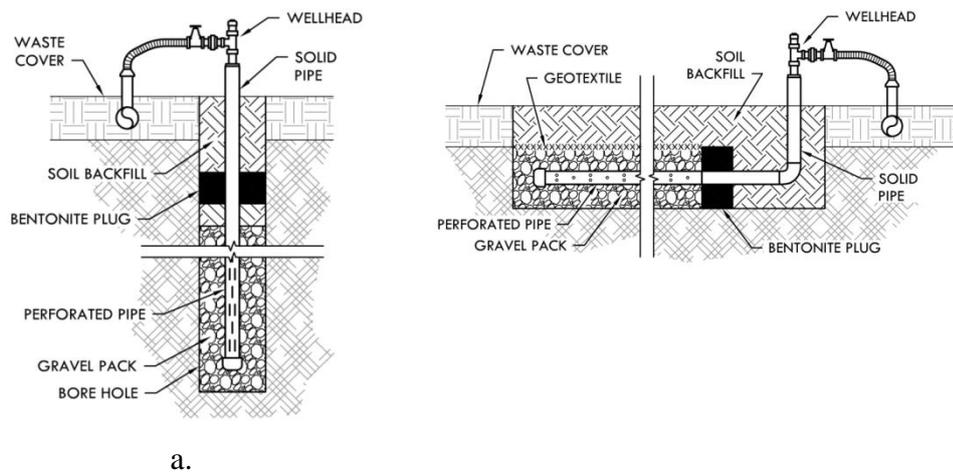
Beberapa teknologi yang digunakan untuk menghasilkan LFG dari suatu *sanitary landfill* ialah sebagai berikut

**1. LFG Collection System**

Dalam sistem kolektor LFG terdapat beberapa komponen sebagai berikut

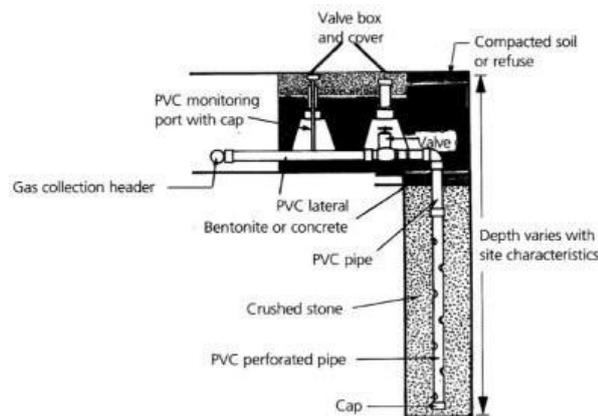
- **Gas Extraction Well**

Pada instalasi pipa penangkapan gas *landfill*, teknologi yang digunakan adalah dengan menggunakan sumur ekstraksi gas *vertical* dan sumur gas *horizontal*. Sumur ekstraksi gas ini berada dalam *landfill*, dan ditanam di dalam *landfill*. Instalasi pipa tersebut bisa disesuaikan dengan kedalaman masing-masing *landfill* yang ada. Hal ini dikarenakan fungsi dari pipa tersebut adalah untuk mengoleksi gas yang telah dihasilkan oleh *landfill*.



**Gambar 2.24 a. Sumur ekstraksi gal vertikal b. Sumur ekstraksi gas horizontal**

Pada *landfill* terdapat beberapa sumur gas (sumur bor), antar sumur dihubungkan dengan jaringan pipa. Konsentrasi gas CH<sub>4</sub> pada jaringan pipa utama diharapkan dapat >50%. Untuk keperluan mengendalikan gas yang akan masuk ke dalam sistem pembangkit, masing masing pipa sumur dipasang stop kran. Ini digunakan untuk dapat mengatur berapa banyak gas yang dapat dialirkan kedalam sistem pembangkit listrik.



**Gambar 2.25 Jenis Pipa Untuk Sumur Gas di *Landfill***

- **Instalasi pipa pada area *sanitary landfill***

Untuk menyalurkan gas yang diperoleh dari area *landfill* menuju area pembangkit listrik (*power house*) diperlukan sistem pemipaan. Gas LFG yang dialirkan ke sistem pembangkit listrik (*power house*) tersebut dimanfaatkan sebagai bahan bakar *gas engine*.



**Gambar 2.26 Instalasi pipa di TPST Bantar Gebang**

Gambar 2.26 memperlihatkan instalasi pipa-pipa yang digunakan dari sumur ekstraksi gas di TPST Bantar Gebang. Pada instalasi pipa yang digunakan pada sistem kolektor gas terdapat instrument *meauserement sting* yang digunakan untuk melihat kecepatan aliran gas di dalam pipa, dan mengatur kecepatannya secara independen melalui bukaan *valve*. Bagian *measurement sting* tersebut diperlihatkan oleh Gambar 2.26 berikut



**Gambar 2.27 Measurement Sting**

- **Sistem Pembuangan Air Lindi**

Sistem pembuangan lindi digunakan untuk memastikan tidak ada air lindi yang berada di area sumur ekstraksi LFG. Area ekstraksi LFG yang digenangi air akan mengganggu proses ekstraksi LFG. Sistem pembuangan air lindi terdiri dari sistem pompa yang akan beroperasi saat mendeteksi level air tertentu pada area ekstraksi.



**Gambar 2.28 Instalasi Pompa Lindi**

Sistem pompa akan ditempatkan pada area bawah sumur ekstraksi, air lindi yang dipompa akan disalurkan ke tempat penampungan lindi yang diperlihatkan oleh Gambar 2.29



**Gambar 2.29 Tank Drainase Air Lindi**

- **Capping (penutup *sanitary landfill*)**

*Capping* terbuat dari bahan *geomembran*, berfungsi untuk mengurung gas di dalam *sanitary landfill* sehingga gas tersebut tidak keluar ke alam bebas, mengurangi bau sampah yang ditimbulkan, dan juga digunakan untuk menahan agar air tidak masuk ke dalam *landfill* untuk meminimalisir terjadinya penyerapan kelembapan di *landfill*. Hal ini dikarenakan untuk

mencegah kebocoran pada *landfill* yang akan menyebabkan tercampurnya air dan udara yang mengandung oksigen ( $O_2$ ) ke dalam *landfill*. Masuknya udara dan air tersebut dapat menyebabkan rusaknya  $CH_4$  karena berinteraksi secara langsung dengan  $O_2$  yang akan menghasilkan  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Sehingga gas-gas berbahaya dari *sanitary landfill* yang menimbulkan efek rumah kaca ( $CH_4$  dan  $CO_2$ ) bisa dikendalikan, dan tidak berinteraksi dengan udara dan air yang dapat menyebabkan rusaknya  $CH_4$  yang merupakan bahan bakar utama untuk menghasilkan tenaga listrik.



**Gambar 2.30** Pemasangan *capping* pada sebuah *sanitary landfill*

Selain itu, *capping* juga diletakkan di dasar *landfill* yang berfungsi untuk menahan agar air lindi (*leachate*) yang diproduksi oleh sampah yang telah membusuk tidak masuk ke dalam tanah. Hal ini tentunya untuk mengantisipasi adanya pencemaran tanah dan juga air tanah, dengan adanya *capping* ini maka air lindi (*leachate*) tidak akan meresap/masuk ke dalam tanah.

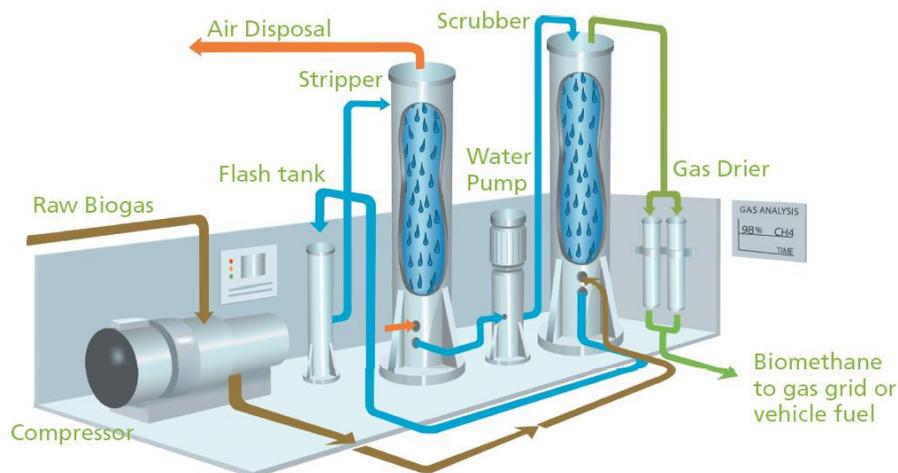
## 2. *Gas Delivery System*

Sistem transportasi gas digunakan untuk memindahkan gas yang telah diekstraksi ke tempat penyimpanan untuk diproses lebih lanjut. Gas tersebut

disimpan pada ruangan berpondasi beton, dan didekatnya juga dibangun sebuah *emergency flare*. Secara umum *gas delivery system* terdiri dari komponen sebagai berikut

- **Condensator (kondensator)**

Kondensator adalah alat yang digunakan untuk memisahkan antara gas- gas yang telah dihasilkan oleh *landfill* dengan air atau uap air. Karena yang dibutuhkan adalah gas hasil dari *landfill* dan dengan adanya air yang tercampur dari *landfill* maka gas tersebut tidak dapat digunakan untuk bahan bakar listrik. Oleh karena itu, gas tersebut perlu untuk di dipisahkan dengan air yang tercampur. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa gas tersebut menjadi murni gas, dan tidak ada campuran dari air yang terdapat pada *landfill*.



**Gambar 2.31 Kondensator dalam sistem LFG**

Dengan adanya sistem kondensator, maka gas-gas *landfill* yang bergerak dari sistem perpipaan akan menjadi gas murni yang terdiri dari CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, Nitrogen, dan O<sub>2</sub>.

- **Sistem Gas Blower**

*Blower* digunakan sebagai *gas booster* yaitu perangkat yang dapat meningkatkan dan menjaga tekanan dari LFG agar dapat ditransportasikan secara aman dalam tekanan yang konsisten. *Gas blower* biasanya terdiri dari dua *blower* yang terkopel, sehingga memungkinkan sebuah *blower* aktif dan

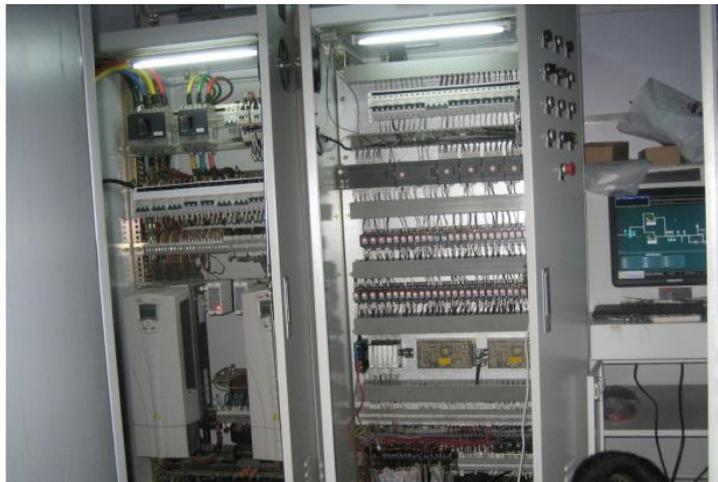
*blower* lainnya dalam kondisi *standby*. Masing – masing *blower* dilengkapi dengan sebuah *non return valve* dan *measurement point* untuk memonitor tekanan pada *blower*. Contoh sistem *gas blower* ditunjukkan oleh Gambar 2.32.



**Gambar 2.32 Sistem Gas Blower**

- **Sistem Kontrol**

Agar *gas delivery system* dapat beroperasi dengan baik, maka diperlukan mekanisme sistem kontrol, selain melakukan *monitoring* pada parameter-parameter sistem, sistem kontrol tersebut juga dapat mengaktifkan berbagai aktuator yang ada baik berupa pompa, *blower*, maupun berbagai *valve* yang ada, sistem kontrol juga berperan dalam memberikan peringatan alarm bila terjadi gangguan. Sistem kontrol tersebut biasanya terdiri dari PLC sebagai pengendali utama yang ditempatkan dalam sebuah panel elektrik. Contoh sistem kontrol diperlihatkan pada Gambar 2.33



**Gambar 2.33 Sistem Kontrol berbasis PLC**

- ***Data Logger & Monitoring System***

Untuk memudahkan user dalam mengoperasikan sistem kontrol dibuat suatu sistem *Human Machine Interface* (HMI) yang terdiri dari *data logger* yaitu sistem yang dapat menyimpan data pembacaan sensor, maupun berbagai *event* yang terjadi dalam sebuah sistem kontrol, dan sistem monitoring yang dapat digunakan untuk memantau kondisi sebuah *plant* dalam hal ini, *gas delivery system*. Contoh *data logger* dan *monitoring system* diperlihatkan oleh Gambar 2.34



**Gambar 2.34 Data logger & Monitoring System**

### 3. Gas Flare System

*Flare* adalah peralatan yang digunakan untuk memantik dan membakar LFG. Peralatan ini digunakan untuk mengendalikan kelebihan emisi gas metan yang dapat terjadi akibat penambahan volume sampah maupun peningkatan kualitas sistem konversi energi. *Flare* juga dapat digunakan sebagai sistem pemulihan energi (*energy recovery system*) dan mengendalikan emisi gas ketika *start up* maupun *down time*. Keberadaan sebuah sistem *flare* akan mencegah kelebihan emisi gas terlepas ke atmosfer. Sistem *flare* terdiri dari 2 jenis yaitu *open flare* dan *close flare* seperti diperlihatkan Gambar 2.35



(a)



(b)

**Gambar 2.35 a *Open flare* b. *Closed flare***

### 4. Gas Pre-treatment System

Agar LFG bisa digunakan dengan optimal pada mesin pembangkit listrik, maka diperlukan perlakuan khusus terlebih dahulu pada kondisi LFG yang dihasilkan dari sumur – sumur ekstraksi, secara garis besar *Gas Pre-treatment System* terdiri dari

- ***Gas De-humidifier***

LFG umumnya memiliki tingkat kelembapan tinggi melebihi 80%. Kondisi tersebut kurang ideal untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar, sehingga de-humidifikasi akan mengoptimalkan pembakaran LFG, juga mengurangi proses kondensasi pada oli, sehingga interval penggantian oli dapat berkurang. Proses de-humidifikasi juga akan mengurangi kondensasi air dan komponen korosif pada jaringan pipa gas yang ada. Sistem *gas de-humidifier* diperlihatkan oleh Gambar 2.36



**Gambar 2.36 *De-humidifier system***

- ***Gas Scrubber***

Sumber kerusakan utama pada mesin pembangkitan listrik bertenaga LFG adalah kandungan silika organik pada LFG, untuk meminimalisir hal tersebut diperlukan sistem *gas scrubber*. Di dalam sistem *gas scrubber* terdapat karbon aktif yang berfungsi memurnikan LFG dan membuang kontaminan-kontaminan yang berbahaya. Contoh sistem *gas scrubber* diperlihatkan oleh Gambar 2.37



**Gambar 2.37 Gas Scrubber**

Selain beberapa teknologi yang telah dibahas tersebut, dalam teknologi pengolahan LFG dari sebuah *sanitary landfill* biasanya terdapat beberapa sistem lain seperti sistem *chiller* dan sistem *heater* yang berguna untuk meregulasi temperatur gas metan dari LFG. Selanjutnya gas metan tersebut digunakan dalam pembangkitan listrik.

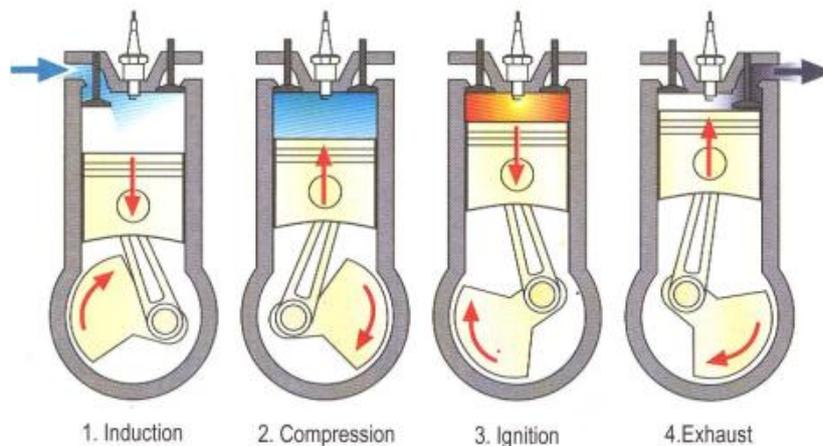
## **II.5.2 Pembangkitan Listrik (*Electricity Generation*)**

### **II.4.2.1 Gas Engine**

Prinsip kerja *gas engine* sama dengan motor bakar berbahan bakar bensin, pada *gas engine* bahan bakar yang digunakan adalah gas. Bahan bakar gas yang dapat digunakan adalah gas alam, maupun LFG yang dihasilkan oleh proses konversi seperti gasifikasi batubara maupun hasil gasifikasi melalui pirolisis atau anaerobik disgestifikasi biomasa. Perbedaan *gas engine* dengan motor bensin adalah sistem pengkabutan pada karburator, pada *gas engine* karburator tidak berfungsi sebagai pengkabut karena berbentuk bahan bakarnya sudah berbentuk fase gas. Gas Engine digunakan untuk proyek LFG kecil dengan kapasitas listrik sebesar 800 kW - 3 MW. atau di mana tingkat aliran LFG yang berkelanjutan ke mesin adalah sekitar 0,4-1.600.000 kaki kubik per hari (cfh) dengan kandungan 27-60% gas metana. Sehingga operasi dan pemeliharaan yang

dibutuhkan tidak mahal dan cocok untuk proyek LFG kecil. Dengan kemajuan teknologi saat ini, beberapa produk *gas engine* memiliki efisiensi sekitar 76%-86% dengan rincian 46,1% dalam memanfaatkan panas sisa pembakaran untuk membangkitkan energi listrik kembali (*thermal*) dan *electricity* sebesar 40,1%, setelah dilakukan pemanfaatan panas buang dari *gas engine* tersebut, tingkat efisiensi terhadap bahan bakar menjadi 86,2%. sehingga total efisiensi mesin *gas engine* sebesar 86,2%.

Dalam membangkitkan listrik, *gas engine* bekerja seperti mesin motor bakar yang lainnya. Pada sistem motor bakar perubahan LFG menjadi energi listrik dilakukan dengan memasukkan LFG kedalam conversion kit yang berfungsi menurunkan tekanan gas dari tabung penyimpanan sesuai dengan tekanan operasional mesin dan mengatur debit gas yang bercampur dengan udara didalam mixer, dari mixer LFG bersama dengan udara masuk kedalam mesin dan terjadilah pembakaran yang akan menghasilkan daya untuk menggerakkan generator yang menghasilkan listrik. Motor bakar terdiri dari motor kerja bolak-balik (*reprocating engines*), motor bensin (*otto*) dan motor diesel, dengan sistem 2 tak maupun 4 tak. Berikut prinsip kerja motor bakar 4 tak pada *gas engine*:



**Gambar 2.38 Prinsip Kerja Motor Bakar**

- *Intake*

Disebut langkah *intake* karena langkah pertama adalah menghisap melalui piston dari karburator. Pasokan bahan bakar tidak cukup hanya dari semprotan karburator. Cara kerjanya adalah sebagai berikut. Piston

pertama kali berada di posisi atas (atau disebut Titik Mati Atas). Lalu piston menghisap bahan bakar yang sudah disetting/dicampur antara bensin dan udara di karburator. Piston lalu mundur menghisap bahan bakar. Untuk membuka, diperlukan klep atau *valve inlet* yang akan membuka pada saat piston turun/menghisap ke arah bawah.

- **Kompresi**

Langkah ini adalah lanjutan dari langkah di atas. Setelah piston mencapai titik terbawah di tahapan intake, lalu valve intake tertutup, dan dilakukan proses kompresi. Yakni, bahan bakar yang sudah ada di ruang bakar dimampatkan. Ruangan sudah tertutup rapat karena kedua *valve (intake dan exhaust)* tertutup. Proses ini terus berjalan sampai langkah berikut yakni meledaknya busi di langkah ke 3

- ***Combustion* (Pembakaran)**

Tahap berikut adalah busi pada titik tertentu akan meledak setelah piston bergerak mencapai titik mati atas dan mundur beberapa derajat. Jadi, busi tidak meledak pada saat piston di titik paling atas (disebut titik 0 derajat), tetapi piston mundur dulu, baru meledak. Hal ini karena untuk menghindari adanya energi yang terbuang sia-sia karena pada saat piston di titik mati atas, masih ada energi laten (yang tersimpan akibat dorongan proses kompresi). Jika pada titik 0 derajat busi meledak, bisa jadi piston mundur tetapi mengengkol crankshaft ke arah belakang (motor mundur ke belakang, bukan memutar roda ke depan).

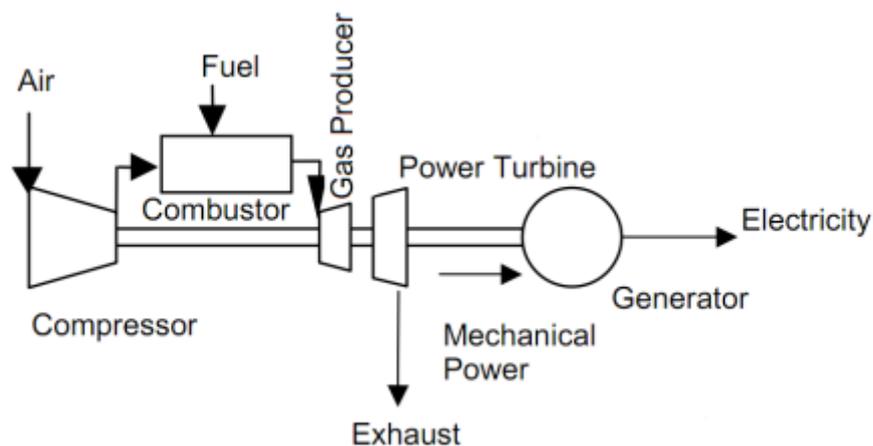
- ***Exhaust***

Langkah terakhir ini dilakukan setelah pembakaran. Piston akibat pembakaran akan terdorong hingga ke titik yang paling bawah, atau disebut Titik Mati Bawah. Setelah itu, piston akan mendorong ke depan dan klep exhaust membuka sementara klep intake tertutup. Oleh karena itu, maka gas buang akan terdorong masuk ke lubang Exhaust Port (atau kita bilang lubang sambungan ke knalpot). Dengan demikian, maka kita bisa membuang semua sisa gas buang akibat pembakaran. Dan setelah bersih kembali, lalu kita akan masuk lagi mengulangi langkah ke 1 lagi.

Setelah mengalami proses tersebut, *gas engine* akan menggerakkan generator, sehingga energi mekanis yang dihasilkan oleh generator dapat menghasilkan energi listrik.

#### 2.4.2.2 *Turbine Gas Engine*

*Turbin Gas Engine* adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran internal. Didalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin gas. Turbin gas sebagai penggerak mula untuk memutar generator sehingga menghasilkan listrik. Berbeda dengan motor bakar, pada turbin gas, panas yang dihasilkan dari membakar LFG digunakan untuk memutar turbin dan turbin dikopel dengan generator untuk menghasilkan energi listrik yang dialirkan ke beban. Panas sisa yang dihasilkan setelah dimanfaatkan turbin digunakan kembali oleh recuperator dan exhaust heat recovery untuk berbagai macam keperluan.



**Gambar 2.39 *Turbine Gas Engine***

Secara umum *gas turbine* yang terdapat pada *landfill* memiliki komponen-komponen dasar sebagai berikut:

- Kompresor

Kompresor mengambil udara luar dan kemudian memadatkan serta mengkompres molekul udara dengan cara memutar dan menstasionerkan bilah pada kompresor

- *Combustor*

Pada *combustor*, bahan bakar ditambahkan pada molekul udara yang terkompresi dan terbakar. Molekul yang terpanaskan akan terdistribusi dan bergerak dengan kecepatan tinggi menuju turbin

- Turbin

- Turbin mengkonversi energi dari gas berkecepatan tinggi menjadi daya rotasi pada bilah rotor turbin

- *Output shaft* dan *gearbox*

Daya rotasi pada turbin dibawa ke peranti bergerak melewati *output shaft* melalui *gearbox*

- *Exhaust*

*Exhaust* akan mengarahkan gas buang dari turbin ke atmosfer

Ukuran turbin gas bisa bervariasi dari 1 MW hingga 100 MW. Kemajuan pesat pada teknologi ini menghasilkan penurunan yang signifikan, baik pada biaya instalasi maupun emisi yang dikeluarkan. Bahan bakar yang dapat digunakan adalah gas alam, minyak dan gas bakar yang dihasilkan oleh proses konversi seperti gasifikasi batubara maupun hasil gasifikasi melalui pirolisis atau anaerobik digestifikasi biomassa. Selanjutnya turbin gas akan dikopel pada sebuah mekanisme generator untuk menghasilkan energi listrik

#### **2.4.2.3 Generator**

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Energi mekanik ini dapat diperoleh dari proses yang ada di turbin gas, turbin mesin uap, maupun air yang jatuh melalui sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, engkol tangan, energi surya atau matahari, udara yang dimampatkan, atau apa pun sumber energi mekanik yang lain. Selanjutnya energi mekanik ini diteruskan ke poros generator sehingga memutar

rotor generator dan menghasilkan daya listrik. Dewasa ini, produk generator merupakan suatu kesatuan dengan penggerak mula, sehingga dalam pemilihan generator ditentukan berdasarkan jenis bahan bakar penggerak mula serta spesifikasi teknis seperti kapasitas, frekuensi dan tegangan yang diinginkan. Selain itu, pada saat ini banyak generator yang sudah menjadi satu dengan mesin penggerak generator. Sehingga, dengan kecanggihan teknologi tersebut mesin generator sudah menjadi satu dengan mesin pembangkit listrik.

## 2.6 Analisis Tekno Ekonomi

Beberapa parameter yang digunakan untuk mengukur kelayakan usaha / proyek pada penelitian ini yaitu *Net Present Value (NPV)*, *Pay Back Periode (PBP)*, *Break Event Point (BEP)*, *Benefit Cost Ratio (BCR)* dan *Internal Rate of Return (IRR)*.

### 2.6.1 Net Present Value (NPV)

NPV adalah selisih harga sekarang dari aliran kas bersih (*Net Cash Flow*) di masa depan dengan harga sekarang dari investasi awal pada tingkat bunga tertentu. Untuk menghitung NPV digunakan persamaan berikut

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{NB_i}{(1+i)^n} = \sum_{i=1}^n B_i - C_i \quad (2.3)$$

dimana,

*NPV* = *Net Present Value* (Rp)

*NB* = *Net Benefit*

*B<sub>i</sub>* = *Benefit* yang telah didiskon

*C<sub>i</sub>* = *Cost* yang telah didiskon

*n* = tahun ke-

*i* = diskon faktor (%)

### 2.6.2 Pay Back Periode (PBP)

PBP adalah jangka waktu tertentu yang menunjukkan terjadinya arus penerimaan (cash in flows) yang secara kumulatif sama dengan jumlah investasi dalam bentuk present value. Untuk menghitung besar PBP digunakan persamaan berikut

$$PBP = T_{p-1} + \frac{\sum_{i=1}^n I_i - \sum_{i=1}^n B_{icp-1}}{B_p} \quad (2.4)$$

dimana,

PBP = *Pay Back Periode*

$T_{p-1}$  = Tahun sebelum terdapat PBP

$I_i$  = Jumlah investasi yang telah didiskon

$B_{icp-1}$  = Jumlah *benefit* yang telah didiskon sebelum PBP

$B_p$  = Jumlah *benefit* pada PBP

### 2.6.3 Break Even Poin (BEP)

BEP adalah keadaan atau titik dimana kumulatif pengeluaran (Total Cost) sama dengan kumulatif pendapatan (Total Revenue) atau laba sama dengan nol (0), atau dapat dijelaskan sebagai berikut

$$Total Revenue = Total Cost \text{ dan atau } Total Revenue - Total Cost = 0$$

### 2.6.4 Benefit Cost Ratio (BCR)

BCR adalah rasio antara manfaat bersih yang bernilai positif (*benefit* / keuntungan) dengan manfaat bersih yang bernilai negatif (*cost* / biaya). Suatu proyek dapat dikatakan layak bila diperoleh nilai  $BCR > 1$  dan dikatakan tidak layak bila diperoleh nilai  $BCR < 1$ . Untuk menghitung BCR dapat menggunakan persamaan (5) berikut :

$$BCR = \frac{\sum_{k=0}^n B_k}{\sum_{k=0}^n C_k} \quad (2.5)$$

dimana,

BCR = *Benefit Cost Ratio*

$B_k$  = keuntungan (*benefit*) pada tahun-k (Rp)

$C_k$  = biaya (*cost*) pada tahun-k (Rp)

$n$  = periode proyek (tahun)

$k$  = tahun ke-

### 2.6.5 Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) adalah besarnya tingkat keuntungan yang digunakan untuk melunasi jumlah uang yang dipinjam agar tercapai keseimbangan ke arah nol dengan pertimbangan keuntungan. IRR ditunjukkan

dalam bentuk %/periode dan biasanya bernilai positif ( $I > 0$ ). Untuk menghitung IRR dapat menggunakan persamaan (6) berikut ini

$$IRR = i_1 + \left( \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \times (i_2 - i_1) \quad (2.6)$$

dimana,

IRR = *Internal Rate of Return* (%)

NPV1 = *Net Present Value* dengan tingkat bunga rendah (Rp)

NPV2 = *Net Present Value* dengan tingkat bunga tinggi (Rp)

$i_1$  = tingkat bunga pertama (%)

$i_2$  = tingkat bunga kedua (%)