

### BAB III

## OPTIMALISASI PLTBIOGAS DALAM SISTEM PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK PADA MAL METROPOLITAN

### 3.1. Kondisi Eksisting Sistem Penyediaan Energi Listrik Mal

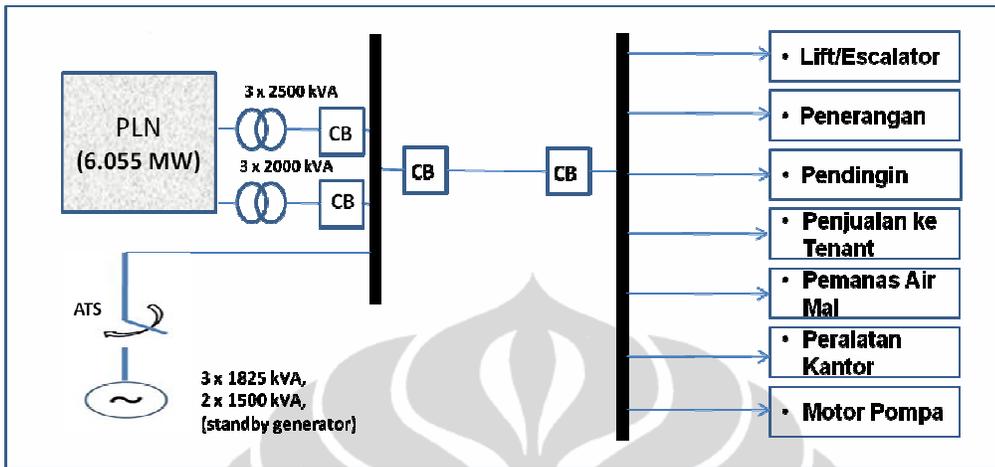
Mal Metropolitan Bekasi yang berdiri sejak tahun 1993, secara geografis terletak di Propinsi Jawa Barat tepatnya di Jalan KH. Noer Ali No.1, Bekasi, Jawa Barat merupakan salah satu pelanggan besar sektor bisnis dengan tarif B3 dan daya terpasang 6.055 kVA (4.844 kW,  $\cos\theta = 0.8$ ). Namun pencatatan dan pengawasan konsumsi daya (AMR Recording) serta proses administrasi pembayaran daya terpakai masih berada di wilayah distribusi PT PLN (Persero) distribusi Jakarta Raya dan Tangerang, yakni di Area Pelayan Pondok Kopi dan Area Jaringan Kramat Jati.



**Gambar 3.1 Gambar Mal Metropolitan Bekasi**

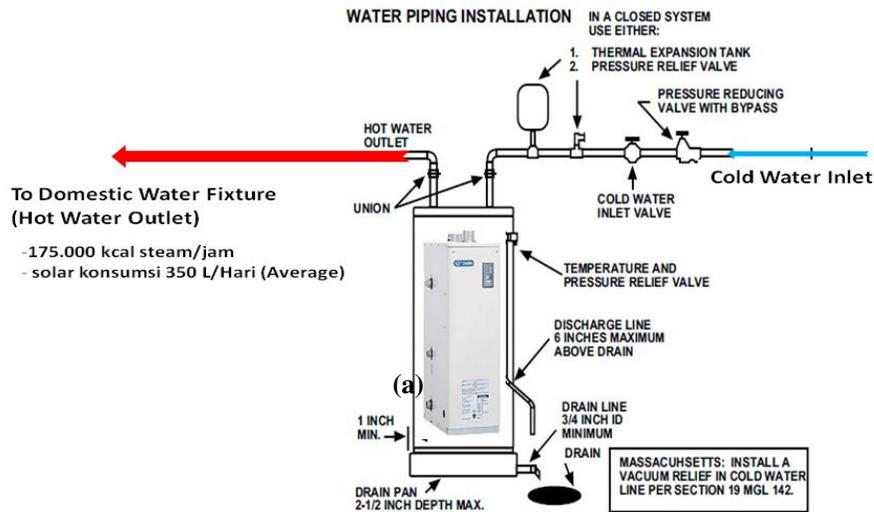
Diagram sistem suplai energi listrik di mal Metropolitan yang eksisting saat ini adalah pasokan energi utama berasal dari PT PLN (Persero) dengan kapasitas daya terpasang 6.055 MW. Sebagaimana diperlihatkan pada gambar di bawah ini. Instalasi listrik dari PLN terhubung ke trafo milik mal yakni trafo Unindo (3x 2500 kVA) dan Trafindo (2 x 2000 kVA). Selain mengandalkan pasokan energi listrik dari PLN, mal juga memiliki sumber energi cadangan sebesar 8475 kVA yang terdiri dari generator diesel (genset) yakni Caterpillar 3516 series (3 x 1.825 kVA) dan FG Wilson model P1500 (2 x 1500 kVA) yang dioperasikan bila

pasokan beban dari PLN terputus atau untuk acara-acara khusus yang diselenggarakan mal.



**Gambar 3.2. Diagram Sistem Kelistrikan Eksisting pada Mal Metropolitan Bekasi**

Sedangkan sistem suplai energi termal hotel Horizon Bekasi adalah sebagai berikut:

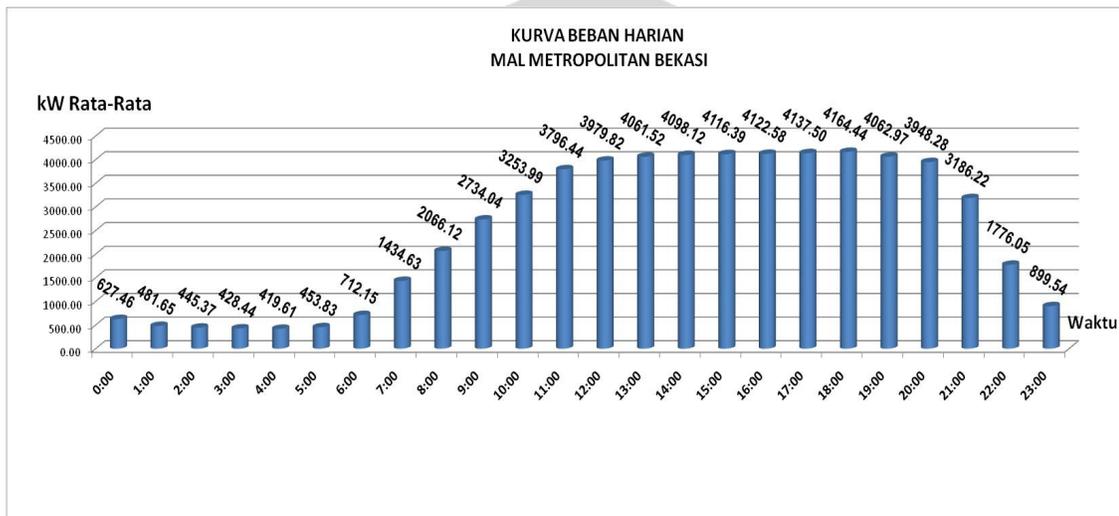


**Gambar 3.3. Sistem Suplai Air Panas Hotel Horizon, Bekasi**

Besarnya daya terpasang dan klasifikasi tarif mal sebagai pelanggan bisnis besar tentu sangat mempengaruhi biaya operasional baik biaya tetap maupun biaya variabel mal tersebut.

Selain beban listrik, di hotel Horizon Bekasi, yang terletak satu gedung dengan mal, terdapat beban air panas yang disuplai oleh 2 (dua) unit *water heater* dengan bahan bakar solar dan beroperasi rata-rata 8 jam perhari.

Berdasarkan periode pemakaian beban Desember 2008 sampai dengan Oktober 2009, dapat dibuat kurva pemakaian beban harian rata-rata sebagaimana ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Pada karakteristik kurva beban harian terlihat bahwa beban puncak harian tertinggi terjadi pada pukul 18.00 wib sebesar 4.164,44 kW dan cenderung turun setelah pukul 21.00 wib sesuai dengan jam operasional mal tersebut. Dengan mengatur pola beban atau melakukan pengalihan beban pada saat kondisi beban puncak tentu sangat membantu pengurangan biaya pemakaian energi listrik.



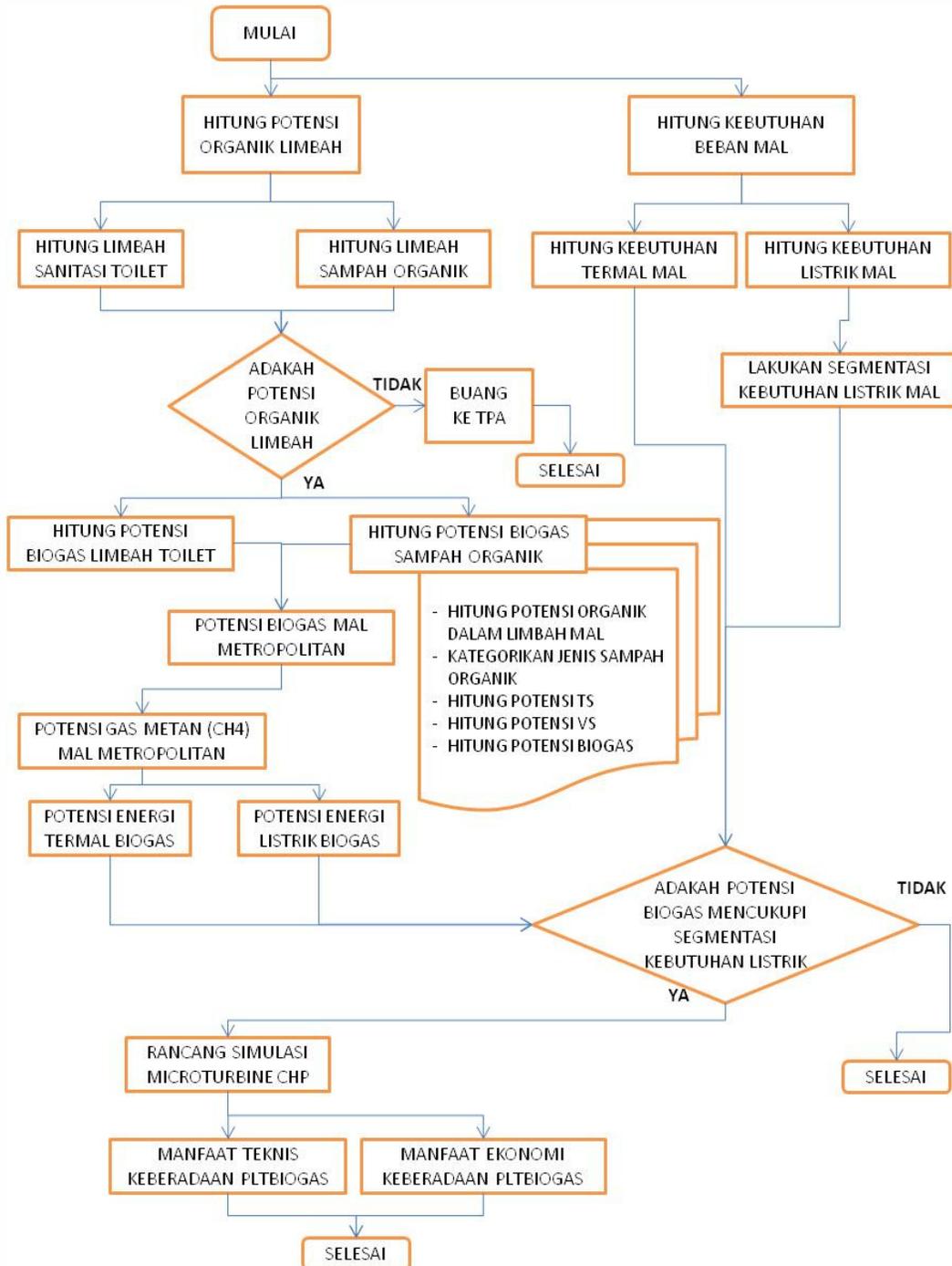
**Gambar 3.4. Kurva Beban Harian Mall Metropolitan Bekasi** <sup>[15]</sup>

Biaya Pemakaian energi listrik periode pembayaran Januari sampai dengan November 2009 cenderung stabil<sup>[15]</sup>. Jumlah dan biaya penggunaan energi listrik rata-rata perbulan sebesar 1.904.313 kWh dan Rp. 1.664.314.000. Jumlah pembayaran terbesar terjadi pada bulan Mei untuk periode pemakaian energi listrik bulan April sebesar Rp. 1,808 milyar dan 2.078 MWH. Tingginya biaya penyediaan energi listrik dan adanya potensi energi terbarukan yang tidak dimanfaatkan menjadi alasan penulis untuk melihat potensi energi alternatif khususnya biogas dari pemanfaatan limbah organik yang terdapat disekitar mal.

### 3.2. Alur Kerja Pemanfaatan Limbah Organik Mal sebagai Sumber Energi Listrik dan Termal

Proses pemanfaatan limbah organik dimulai dari melakukan pemilahan dan penimbangan sampah untuk mengetahui jenis dan jumlah limbah organik.

Setelah mengetahui potensi limbah organik dalam limbah buangan maka dapat dihitung potensi biogas, gas metan dan rancangan kapasitas pembangkit dan analisa manfaat teknis dan ekonomis keberadaan pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBiogas) pada mal Metropolitan, sebagaimana alur kerja di bawah ini:



Gambar 3.5. Alur Kerja Pemanfaatan Limbah Organik Mal Metropolitan

### 3.3. Potensi Energi Biogas pada Mal Metropolitan Bekasi

Pada mal Metropolitan serta hotel Horizon Bekasi, yang berada satu gedung dengan mal, terdapat limbah buangan mal yang memiliki potensi limbah organik yang dapat dibagi berdasarkan jenis:

- Sampah organik, terdiri limbah sayuran, sisa nasi, ikan dan daging yang dihasilkan dari limbah buangan *tenant* mal seperti rumah makan dan supermarket serta restoran hotel Horizon.
- Limbah organik sanitasi toilet (*feces*) yang berasal dari pengunjung mal dan hotel.

#### 3.3.1. Potensi Sampah Buangan Mal

Sampah buangan mal yang berasal dari seluruh *tenant* mal dan restoran hotel Horizon ditampung dalam 2 buah bak penampungan yang mampu menampung sampah sebanyak 7 M<sup>3</sup> tiap bak. Bak pertama berfungsi sebagai bak penampungan akhir dan siap di bawa ke tempat pembuangan akhir (TPA) sampah dan bak kedua merupakan bak penampungan sementara untuk mengumpulkan sampah seketika dan keesokan harinya siap dibawa ke TPA. Berdasarkan pengamatan rutin petugas dinas kebersihan pemerintah kotamadya Bekasi tiap harinya mal membuang 7 M<sup>3</sup> sampah yang banyak mengandung unsur organik dan yang setara dengan 2,8 ton perhari.

Berdasarkan laporan pembuangan sampah mal Metropolitan Bulanan <sup>[16]</sup> diketahui bahwa tiap hari rata-rata dihasilkan 7 M<sup>3</sup> sampah pada bak penampungan sampah mal. Mayoritas sampah pada bak ini sudah tidak bernilai secara ekonomis lagi karena sudah diseleksi lebih dahulu oleh pemulung dan umumnya terdiri dari sampah organik dari sisa rumah makan dan supermarket yang terdapat di mal serta restoran hotel Horizon. Tiap tahun diperoleh rekapitulasi jumlah pembuangan sampah ke tempat pembuangan akhir sebesar 2.555 M<sup>3</sup> atau setara dengan 1.022 ton dimana setiap 2,5 M<sup>3</sup> sampah basah setara dengan 1 ton berat. Dengan pembayaran tiap M<sup>3</sup> sampah sebesar Rp 40.000 maka pertahun dikeluarkan biaya pembuangan sampah rata-rata sebesar Rp. 110.716.700

Sampai saat ini, siklus proses pembuangan sampah yang ada di mal mengalami tahapan penumpukkan di bak penampungan dan di koridor luar

halaman belakang mal oleh *tenant*, pemilahan sampah oleh pemulung terhadap sampah yang masih bernilai ekonomis dan pengemasan di bak penampungan dan pembuangan akhir sampah. Sedangkan proses penentuan potensi limbah organik dari sampah yang ada yang dilakukan penulis adalah pemilahan dan penimbangan sampah dari bak penampungan pada mal.

### 3.3.2. Proses Pemilahan dan Penimbangan untuk mendapatkan Limbah Mal

Untuk mengetahui karakteristik sampah mal dan untuk mengetahui jumlah potensi organik dalam sampah mal, penulis bersama dengan petugas Dinas Kebersihan Pemerintahan Kotamadya Bekasi serta pihak mal melakukan pemilahan dan penimbangan jenis sampah dari bak penampungan akhir yang terdapat di mal. Dari hasil pemilahan dan penimbangan diperoleh karakteristik sampah pada mal sebagai berikut:

**Tabel 3.1. Potensi Sampah Organik Mal**

| Jenis Limbah                                 | Sampah Organik Perhari |              |
|--|------------------------|--------------|
|  | Ton/Hari               | %/hari       |
| <b>Sampah Organik Restoran/Supermarket</b>   |                        |              |
| Jumlah Kertas/Karton/Tisu                    | 0,218                  | 8%           |
| Jumlah Sayuran/Buah                          | 1,069                  | 38%          |
| Jumlah Nasi/Ikan/Daging                      | 1,185                  | 42%          |
| Jumlah Lemak (Minyak Goreng)                 | 0,267                  | 10%          |
| Jumlah Tulang/Kayu/Plastik/sterofom          | 0,143                  | 5%           |
| <b>Total Potensi Sampah Organik Pertahun</b> |                        | <b>1.022</b> |

Dimana:

- dalam tulisan ini yang diperhitungkan sebagai bagian organik dari sampah organik hanya sampah yang terdiri dari Nasi/Ikan/Daging dan Sayuran/Buah
- berat pertahun masing masing 378,97 ton dan 420,29 ton.

### 3.3.3. Kondisi Toilet Mal Proses dan Potensi Limbah Sanitasi Toilet.

Selain sampah organik, pada mal juga terdapat limbah toilet. Pada mal seluruhnya terdapat 22 toilet yang terdiri dari 33 ruangan toilet pria (tidak termasuk urinair) dan 41 ruangan toilet wanita sebagaimana Tabel 3.5 di bawah ini. Untuk mendapatkan jumlah real pengunjung toilet dilakukan kuisioner pada tanggal 17, 20 dan 21 Januari 2010. Jumlah pengunjung yang melakukan buang air besar diambil rata-rata secara interpolasi dan dijadikan jumlah acuan pengunjung toilet yang melakukan buang air besar selama setahun pada toilet mal Metropolitan Bekasi.

**Tabel 3.2. Kondisi Toilet Mal Metropolitan Bekasi.**

| Lokasi                           | Keterangan   | Lokasi                            | Keterangan   |
|----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| A. Mal Metropolitan 1 (Atrium I) |  | B. Mal Metropolitan 2 (Atrium II) |  |
| 1. Lantai Dasar                  | Pria : 5 ruangan toilet<br>Wanita : 6 ruangan toilet | 1. Lantai Dasar                   | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 3 ruangan toilet |
| 2. Lantai 1                      | Pria : 4 ruangan toilet<br>Wanita : 5 ruangan toilet | 2. Lantai 1                       | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 3 ruangan toilet |
| 3. Lantai 2                      | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 4 ruangan toilet | 3. Lantai 2                       | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 3 ruangan toilet |
| 4. Lantai 3A                     | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 5 ruangan toilet | 4. Lantai 3                       | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 3 ruangan toilet |
| 5. Lantai 3B                     | Pria : 2 ruangan toilet<br>Wanita : 3 ruangan toilet | 5. Basement Umum                  | Pria : 3 ruangan toilet<br>Wanita : 4 ruangan toilet |
| 6. Basement Manajement           | Wanita : 2 ruangan toilet                            |                                   |  |
| 7. Basement GM                   | Pria : 1 ruangan toilet                              |                                   |  |

Berdasarkan data kuisioner pengunjung mal yang telah dilakukan<sup>[32]</sup> dan asumsi berdasarkan hasil wawancara dengan pihak manajemen hotel Horizon maka dapat diperkirakan potensi limbah organik yang berasal sanitasi toilet baik dari pengunjung mal yang menggunakan toilet maupun dari pengunjung hotel Horizon Bekasi adalah sebagaimana terlihat pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.3. Potensi Limbah Sanitasi Toilet**

| Jenis Limbah   | Limbah Organik Perhari |  |
|--|------------------------|--|
|  | Orang/Hari             | Potensi Organik Limbah Toilet ( 0,5 kg/orang/ penggunaan toilet) |
| Limbah Toilet (Feces) Mall Metropolitan dan Hotel Horizon  |                        |  |
| - Pengguna Toilet Mal Harian Rata-Rata                     | 2.577                  |  |
| - Jumlah Pengguna Toilet Hotel (rata-rata/hari) Asumsi 25% | 763                    |  |
| - Total Pengguna Toilet Rata-Rata Perhari                  | <b>3.340</b>           |  |
| - Total Pengguna Toilet Rata-Rata Pertahun                 | <b>1.218.978</b>       | <b>2.257,55</b>  |

Dimana :

- Nilai 0,5 kg adalah berat feces rata-rata orang asia tenggara <sup>[19]20</sup>
- Pengguna toilet untuk buang air besar rata-rata harian pada mal diambil dari data rata-rata pengukuran tanggal 25 Oktober 2009, 17, 20 dan 21 Januari 2010 <sup>[32]</sup>.
- Nilai 25% adalah asumsi hanya 25% dari pengunjung toilet hotel yang melakukan buang air besar di toilet.

### 3.3.4. Potensi Biogas dari Sampah Organik

#### 3.3.4.1. Metode Konversi Sampah Organik

Banyak metode yang dapat menjadi acuan perhitungan biogas dari limbah organik-sampah padat perkotaan (*Municipal Solid Waste-MSW*). Pada prinsipnya penguraian limbah organik menjadi biogas dan parameter-parameter optimasi proses pembentukan biogas sebagaimana yang telah dijelaskan dalam Bab 2. Sampah organik akan menjalani proses penguraian dan materi cairnya akan terbuang dan yang diproses adalah bagian padat dari sampah organik tersebut yang disebut *Total Solid (TS)*. Bagian padat selama masa penguraian tertentu dalam *digester anerob (retention time)* akan mengalami tahap gasifikasi dan akan tertinggal sisa material organik yang tidak dapat diuapkan. Banyaknya gas yang dihasilkan dari potensi bagian padat sampah organik inilah yang disebut *Volatile solid (VS)*. Beberapa literatur menyatakan nilai VS setara dengan nilai biogas yang dihasilkan.

Dalam pengujian skala laboratorium, nilai VS diperoleh dengan membakar sejumlah tertentu TS sampai kondisi abu, yang merupakan material yang tidak dapat diuapkan lagi. Menurut Shefali Verma <sup>[28]</sup>, nilai awal TS yang dibakar dikurangi kadar abu yang tertinggal adalah nilai VS yang sebenarnya.

Dalam literatur tersebut dinyatakan untuk karakteristik MSW dikenal beberapa kategori seperti yang banyak mengandung sampah organik berserat yang gampang dicerna (*high solid-HS*) seperti sisa makanan, potongan rumput atau potongan pohon dan dedaunan, sampah dapur, memiliki kadar TS antara 22-40% per ton sampah kering. Tingkat kesukaran sedang untuk dicerna (*medium solid-MS*) seperti kertas, kardus/karton dan sejenisnya memiliki nilai TS antara 15-20% per ton sampah kering. Sampah MSW yang sukar dicerna (*Low Solid-LS*) memiliki nilai TS kurang dari 10%.

Namun literatur lainnya yang melakukan pengujian skala laboratorium, D. Elango <sup>[9]</sup> yang melakukan pengujian terhadap limbah padat perkotaan-MSW, dalam pengujiannya melakukan pemilahan sampel MSW sehingga diperoleh karakteristik sampah sebagai berikut:

Dalam salah satu sampel pengujiannya terhadap limbah padat perkotaan (MSW), D. Elango <sup>[9]</sup> memperoleh karakteristik limbah MSW hasil pengujian skala laboratorium dengan persentase rata-rata penyusunan sampah sebagai berikut:

**Tabel 3.4. Karakteristik Limbah –MSW Pengujian Laboratorium <sup>[9]</sup>**

| Komposisi                                   | (%) |
|---|-----|
| Plastik                                     | 1   |
| Batu-batuan                                 | 5.2 |
| Potongan kain                               | 3.1 |
| Kertas                                      | 3.5 |
| Sampah Organik (sisa makanan, sayuran, dll) | 52  |
| Rumput, kayu, dedaunan                      | 32  |
| Kaca  | 2.5 |

Nilai persentasi rata-rata penyusutan sampah organik menjadi TS, VS dan Biogas sebagaimana terdapat dalam Tabel 3.5 di bawah ini. Dengan menjaga kondisi ideal seluruh parameter proses pembuatan biogas dari limbah organik sebagaimana dijelaskan dalam Bab 2, maka nilai-nilai konversi limbah organik menjadi biogas untuk sampah padat perkotaan (MSW) akan diperoleh sebagaimana pada Tabel 3.5 tersebut.

**Tabel. 3.5. Pengujian Proses Pembuatan Biogas Skala Laboratorium**

| Organic Feeding Rate (kg/m <sup>3</sup> /day) | Total Solid Reduction |  | Organic Rest (kg/m <sup>3</sup> /day) | Volatile Solid Reduction |  | Organic Rest (kg/m <sup>3</sup> /day) | Biogas Gas yield (M <sup>3</sup> /Kg VS) |   |
|---|-----------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|--|---|
|   | (%)                   | Solid Reduction (kg/m <sup>3</sup> /day) |                                       | (%)                      | Volatile Solid Result (kg/m <sup>3</sup> /day) |                                       | (%)                                      | Biogas Produce (kg/m <sup>3</sup> /day) |
| 0,5   | 71%                   | 0,355                                    | 0,145                                 | 73%                      | 0,10585  | 0,03915                               | 13%                                      | 0,0137605                               |
| 1   | 85%                   | 0,849                                    | 0,151                                 | 85%                      | 0,128048                                       | 0,022952                              | 25%                                      | 0,032012                                |
| 2,3   | 86%                   | 1,978                                    | 0,322                                 | 86%                      | 0,27692  | 0,04508                               | 32%                                      | 0,0886144                               |
| 2,9   | 88%                   | 2,5375                                   | 0,3625                                | 87%                      | 0,315375                                       | 0,047125                              | 36%                                      | 0,113535                                |
| 3,5   | 85%                   | 2,975                                    | 0,525                                 | 84%                      | 0,441  | 0,084                                 | 33%                                      | 0,14553                                 |
| 4,3   | 82%                   | 3,526                                    | 0,774                                 | 83%                      | 0,64242  | 0,13158                               | 28%                                      | 0,1766655                               |
| <b>2,42</b>                                   | <b>83%</b>            | <b>2,04</b>                              | <b>0,38</b>                           | <b>83%</b>               | <b>0,32</b>                                    | <b>0,06</b>                           | <b>28%</b>                               | <b>0,10</b>                             |

Dimana:

- Sebagaimana dinyatakan D Elango <sup>[9]</sup>, dengan jumlah rata-rata sampah yang dimasukkan seberat 2,42 kg dengan laju penyusutan padatan rata-rata senilai 83% atau 2,04 kg, maka diperoleh padatan sampah organik (*total solid waste-TS*) seberat 0,38 kg.
- Dari potensi TS seberat 0,38 kg rata-rata perhari dengan laju penguapan 83% dari nilai TS maka diperoleh potensi uap/gas limbah organik (*volatile solid-VS*) sebesar 0,32 kg/m<sup>3</sup> perhari

- Bila laju perubahan VS menjadi Biogas rata-rata perhari sebesar 28% maka potensi limbah biogas yang dihasilkan dari limbah organik sebesar 0.10 kg/m<sup>3</sup> perhari.

Untuk kertas/karton/tisu serta tulang/kayu/plastik/sterofom tidak ada literatur khusus yang mengatur potensi biogas dari limbah ini saat diproses dalam *digester anaerob*. Mempertimbangkan hal tersebut di atas, penulis hanya memperhitungkan hanya sampah yang berasal dari limbah sayuran/buah dan limbah nasi/ikan/daging.

### 3.3.4.2. Perhitungan Potensi Biogas dari Sampah Organik.

Berdasarkan kemiripan karakter limbah MSW yang dihasilkan pada mal sebagaimana Tabel 3.1. dengan karakter limbah yang digunakan dalam penelitian D. Elango <sup>[9]</sup> sebagaimana Tabel 3.4 di atas, penulis menggunakan parameter-parameter konversi limbah organik rata-rata yang dihasilkan dalam percobaan laboratorium sebagaimana Tabel 3.5 di atas dalam tulisan ini.

Dari hasil perhitungan diperoleh potensi biogas dari sampah organik selama setahun sebesar 152.242,88 M<sup>3</sup> dan potensi energi yang dihasilkannya setara dengan 857.888,6 kWh pertahun. Lebih lengkap potensi biogas dan konversinya menjadi energi listrik sebagaimana tabel di bawah ini:

**Tabel 3.6. Potensi Energi Biogas dari Sampah Organik.<sup>[9]</sup>**

| Jenis Limbah                                     | Produksi Biogas dari Sampah Organik<br>(Hasil Fermentasi Anaerob) pertahun |                                   |  |   | Potensi Energi Gas<br>Metan Pertahun              |   |
|--|--|-----------------------------------|--|---|---|---|
|  | M <sup>3</sup> /Kg<br>TS*1000<br>pertahun                                  | M <sup>3</sup> /Kg VS<br>pertahun | Biogas<br>(M <sup>3</sup> /Kg<br>VS<br>pertahun) | Gas Metan<br>60%,<br>(M <sup>3</sup> /Kg<br>TS/tahun) | kJ (1 m <sup>3</sup> Metan<br>60% = 33.810<br>kJ) | KWh Gas<br>Metan (1<br>kWh = 3,6<br>MJ) |
| Sampah Organik<br>Restoran /<br>Supermarket      |  |                                   |  |   |   |   |
| Jumlah<br>Sayuran/Buah                           | 313.535,93   | 260.130,31                        | 72.186,16  | 43.311,70   | 1.464.368.476,8                                   | 406.769,02                              |
| Jumlah Nasi/<br>Ikan /Daging                     | 347.721,18   | 288.492,67                        | 80.056,72  | 48.034,03   | 1.624.030.552,2                                   | 451.119,60                              |
| Potensi Biogas<br>Limbah Sampah<br>Organik/tahun | 661.257,11   | 548.622,98                        | 152.242,88                                       | 91.345,73   | 3.088.399.029                                     | 857.888,6                               |

Dimana:

- Laju pencernaan sampah organik menjadi total solid sebesar 83% menyebabkan terdapatnya jumlah TS sebesar 680.504,42 m<sup>3</sup> pertahun<sup>[9]</sup>. Demikian seterusnya dengan mengacu kepada tabel 3.6 di atas maka akan diperoleh jumlah biogas sebanyak 156.674,23 m<sup>3</sup> pertahun.
- Nilai metan 60% dalam biogas sebagaimana dinyatakan K. Muthupandi <sup>[13]</sup> untuk sampah organik yang banyak mengandung daun, nasi dan dedaunan.
- Nilai konversi gas metan dimana 1 m<sup>3</sup> = 33.810 kJ sebagaimana terdapat dalam literatur <sup>[2]<sup>29</sup></sup> dan konversi 1 kWh=3,6 MJ

Proses perhitungan potensi biogas dari sampah organik dan parameter/asumsi sebagai faktor pengali sebagaimana dijelaskan dalam tabel di bawah ini:

**Tabel 3.7. Skema Proses Perhitungan Sampah Organik**

| Level | Parameter Ukur (Name/Unit)   | Nilai         | Faktor Pengali | Keterangan   |
|-------|--|---------------|----------------|--|
| 8     | Jumlah Organik Sampah/tahun (Ton)                                    | 799.263       |                |  |
|       |  |               | X 1.000        | Faktor Pengali Kg  |
| 7     | Jumlah Organik Sampah/tahun (Kg)                                     | 799.263       |                |  |
|       |  |               | X 0,83         | Faktor Pengali TS <sup>[9]</sup>   |
| 6     | Total Solid Reduction (kg/m <sup>3</sup> )/tahun                     | 661.257,11    |                |  |
|       |  |               | X 0,83         | Faktor Pengali VS <sup>[9]</sup>   |
| 5     | Volatile Solid (kg/m <sup>3</sup> TS)/tahun                          | 548.622,98    |                |  |
|       |  |               | X 0,28         | Faktor Pengali Biogas <sup>[9]28</sup>                                   |
| 4     | Biogas (M <sup>3</sup> /Kg VS)/tahun                                 | 152.242,88    |                |  |
|       |  |               | X 0.6          | Faktor Pengali Metan <sup>[13]</sup>                                     |
| 3     | Gas Metan (Biogas 60% CH <sub>4</sub> , M <sup>3</sup> /Kg TS)/tahun | 91.345,73     |                |  |
|       |  |               | X 33.810       | Faktor Pengali 1 m <sup>3</sup> Metan 60% = 33.810 kJ <sup>[2]29</sup> . |
| 2     | Potensi Energi Termal (kJ/tahun)                                     | 3.088.399.029 |                |  |
|       |  |               | / 3600         | Faktor pembagi 1 kWh = 3,6 MJ  |
| 1     | Potensi Energi Listrik (kWh/tahun)                                   | 857.888,6     |                |  |

### 3.3.5. Potensi Biogas Limbah Toilet

#### 3.3.5.1. Metode Konversi Limbah Sanitasi Toilet

Potensi biogas dari limbah sanitasi toilet sebesar 70.864,43 M<sup>3</sup> pertahun yang setara dengan energi listrik 399.321,06 kWh

**Tabel 3.8. Potensi Energi Biogas dari Sanitasi Toilet.<sup>[14]</sup>**

| Jenis Limbah   | Produksi Biogas dari Limbah Toilet (Hasil Fermentasi Anaerob) pertahun |                              |   |   | Potensi Energi Gas Metan Pertahun          |                                |            |
|--|--|------------------------------|---|---|--|--------------------------------|------------|
|  | M <sup>3</sup> /Kg TS/ tahun   | M <sup>3</sup> /Kg VS/ tahun | Biogas Rate (35°C, M <sup>3</sup> / Kg TS/ tahun) | Gas Metan 60%, M <sup>3</sup> /Kg TS pertahun | kJ (1 m <sup>3</sup> Metan 60%= 33.810 kJ) | KWh Gas Metan (1 kWh = 3,6 MJ) |            |
| Potensi Organik Limbah Toilet (0,5 kg/ orang/ penggunaan toilet) | 609.489  | 121.898                      | N/A   | 52.416,05                                     | 31.449,63                                  | 1.063.312.037,9                | 295.364,45 |

Dimana:

- limbah sanitasi toilet yang diperhitungkan hanya limbah sanitasi feces tidak termasuk urine.
- potensi TS Feces diperoleh dengan mengalikan seluruh potensi jumlah limbah organik toilet dengan faktor pereduksi 0.2. Faktor pereduksi merupakan asumsi bahwa persentase padatan dalam limbah sanitasi toilet (feces) hanya 20% dibandingkan dengan volume air yang digunakan untuk mendorong feces tersebut sampai ke *septic tank* atau tangki *digester anaerob*, sebagaimana dalam literatur <sup>[13]</sup>
- nilai konversi dari TS yang ada sebesar 0,43 sesuai literatur yang sama.
- bila dalam proses awal sudah dilakukan pemisahan antara saluran pembuangan air bilasan toilet sehingga jumlah air pendorong feces menjadi sedikit maka faktor pereduksi (0.2) ditiadakan dan total jumlah berat feces langsung dikalikan nilai konversi 0,43 atau nilai potensi organik diasumsikan langsung sama dengan nilai TS (*Total Solid*), sebagaimana literatur <sup>[13]19,20</sup>.

### 3.3.5.2.Perhitungan Potensi Biogas dari Limbah Sanitasi Toilet

Proses perhitungan potensi biogas dari limbah sanitasi toilet dan parameter/asumsi sebagai faktor pengali sebagaimana dijelaskan dalam tabel di bawah ini:

**Tabel 3.9. Skema Proses Perhitungan Limbah Sanitasi Toilet**

| Level | Parameter Ukur (Name/Unit)   | Nilai           | Faktor Pengali | Keterangan   |
|-------|--|-----------------|----------------|--|
| 8     | Jumlah Pengunjung Toilet Perhari (orang)                             | 3.340           |                |  |
|       |  |                 | X 365          | Faktor Pengali Hari  |
| 7     | Jumlah Pengunjung Toilet Pertahun (orang)                            | 1.218.978       |                |  |
|       |  |                 | X 0,50         | Faktor Pengali Feces/orang/hari <sup>[19]</sup>                          |
| 6     | Potensi Organik Feces/tahun (Kg)                                     | 609.489         |                |  |
|       |  |                 | X 0,2          | Faktor Pengali TS <sup>[13]</sup>  |
| 5     | Total Solid (kg/m <sup>3</sup> )/tahun                               | 121.898         |                |  |
|       |  |                 | X 0,43         | Faktor Pengali Biogas <sup>[13]</sup>                                    |
| 4     | Biogas (M <sup>3</sup> /Kg TS)/tahun                                 | 52.416,05       |                |  |
|       |  |                 | X 0.6          | Faktor Pengali Metan <sup>[13]</sup>                                     |
| 3     | Gas Metan (Biogas 60% CH <sub>4</sub> , M <sup>3</sup> /Kg TS)/tahun | 31.449,63       |                |  |
|       |  |                 | X 3.810        | Faktor Pengali 1 m <sup>3</sup> Metan 60% = 33.810 kJ <sup>[2]29</sup> . |
| 2     | Potensi Energi Termal (kJ/tahun)                                     | 1.063.312.037,9 |                |  |
|       |  |                 | / 3600         | Faktor pembagi 1 kWh = 3,6 MJ  |
| 1     | Potensi Energi Listrik (kWh/tahun)                                   | 295.364,45      |                |  |

### 3.3.6. Total Potensi Biogas pada Mal Metropolitan Bekasi

Keseluruhan total potensi biogas pada mal adalah 204.658,93 M<sup>3</sup> pertahun dan bila diasumsikan kandungan gas metan dalam biogas mencapai 60% maka potensi gas metan yang dihasilkan setara dengan 122.795,36 M<sup>3</sup> pertahun. Potensi energi listrik yang mampu dibangkitkan sesuai potensi gas metan yang ada setara 1.153.253,1 kWh pertahun. Lebih lengkap total potensi energi biogas sebagaimana tabel di bawah ini:

**Tabel 3.10 Total Potensi Energi Biogas Mal**

| Potensi Biogas (35°C, M <sup>3</sup> /Kg TS, pertahun) | Gas Metan 60%, M <sup>3</sup> /Kg TS pertahun | Potensi Energi Gas Metan Pertahun          |                                | Potensi Energi Gas Methane bila dikonversi dengan Microturbine |   |
|--|---|--|--------------------------------|--|---|
|  |   | kJ (1 M <sup>3</sup> Metan 60%= 33.810 kJ) | KWh Gas Metan (1 kWh = 3,6 MJ) | Efisiensi Listrik (25,2%, kWh <sub>e</sub> )                   | Efisiensi Thermal (64%, kWh <sub>th</sub> ) |
| 204.658,93   | 122.795,36                                    | 4.151.711.066,79                           | 1.153.253,1                    | 290.619,77   | 738.081,97                                  |

### 3.4. Segmentasi Beban Mal

Beban-beban utama yang terhubung ke suplai energi listrik adalah beban sistem tata udara (AC), beban sistem penerangan (diluar *tenant*), peralatan wahana (*lift* dan *escalator*), peralatan standar kantor, motor pompa, *boiler* (pemanas air dan *laundry*) dan sejumlah energi listrik tertentu yang dijual kepada penyewa gedung (*Tenant*) secara sistem curah.

Segmentasi beban dan penggunaan energi listrik perbulan sebagaimana diperlihatkan dalam LAMPIRAN 3 dan karakteristik beban termal sebagaimana diperlihatkan dalam LAMPIRAN 4 dalam tulisan ini.

Secara keseluruhan rekapitulasi penggunaan energi listrik pada mal di bulan Oktober 2009, sebagaimana diperlihatkan pada tabel di bawah ini:

**Tabel 3.11. Pemakaian Energi Listrik Bulan Oktober 2009<sup>[16]</sup>**

| Deskripsi                             | Energi (kWh/Bulan) | Daya (kW) | Lama Pemakaian rata-rata (Jam/Hari) | Biaya Listrik/ Segmentasi Beban (Rp. 873,97/kWh) |
|---------------------------------------|--------------------|-----------|-------------------------------------|--|
| Sistem Tata Udara (AC)                | 914.627            | 3.052     | 10,0                                | 799.356.384                                      |
| Sistem Penerangan                     | 55.680             | 176       | 10,5                                | 48.662.650                                       |
| Peralatan Wahana (Lift dan Escalator) | 62.640             | 174       | 12,0                                | 54.745.481                                       |

**Tabel 3.11. Pemakaian Energi Listrik Bulan Oktober 2009<sup>[16]</sup>.....(Lanjutan)**

|   |         |       |      |             |
|---|---------|-------|------|-------------|
| Peralatan standar kantor                    | 4.092   | 8     | 17,6 | 3.576.285   |
| Motor Pompa                                 | 3.377   | 23    | 5,0  | 2.951.222   |
| Heater Pemanas Air dan Laundry              | 54.380  | 260   | 7,0  | 47.526.489  |
| Penjualan Energi Ke <i>Tenant</i> (Penyewa) | 859.044 | 2.386 | 12,0 | 750.779.034 |

Dari tabel di atas terlihat bahwa beban Motor Pompa dan Peralatan Standar Kantor, sebagai beban utama yang akan dipasok oleh Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBiogas) membutuhkan pembangkit yang setara dengan kapasitas 31 kW perbulan. Bila PLTBiogas mampu menyediakan kebutuhan daya ini maka mal akan mendapat manfaat sebagai berikut:

- pengurangan biaya pemakaian energi listrik sebesar Rp. 6,5 juta perbulan
- pengurangan bahan bakar diesel untuk *water heater* setiap bulannya dengan jumlah output termal sesuai dengan spesifikasi dan efisiensi *microturbines* yang digunakan membangkitkan energi listrik dan termal.
- pengurangan biaya pembuangan limbah yang mencapai rata-rata Rp. 8.516.600 perbulan (Rp. 40.000/M<sup>3</sup>) atau Rp. 110.716.700 pertahun ke tempat pembuangan akhir sampah
- serta biaya penjualan dari hasil pengurangan emisi karbon diudara (*carbon emission rate-CER*).

Kebutuhan energi termal pada hotel Horizon yang berada satu lokasi dengan mal sebagaimana diperlihatkan dalam tabel di bawah ini.

**Tabel. 3.12. Resume Kebutuhan Energi Termal dari *Water Heater***

| <b>INPUT BAHAN BAKAR DIESEL</b>  | <b>NILAI</b>     |
|--|------------------|
| Bahan bakar 2 unit waterheater/hari(Liter)   | 656              |
| Biaya bahan bakar / hari (Rp)  | 5.578.125        |
| Biaya bahan bakar / tahun (Rp)   | 2.036.015.625    |
| <b><i>Thermal Energy dihasilkan Diesel /hari (MJ<sub>th</sub>)</i></b><br>(Diesel HHV 137.380 BTU/Gallon = 38,29 MJ/L) | <b>25.128</b>    |
| <b><i>Thermal Energy dihasilkan Diesel /tahun (MJ<sub>th</sub>)</i></b>  | <b>9.171.652</b> |

**Tabel. 3.12. Resume Kebutuhan Energi Termal dari *Water Heater*.....(Lanjutan)**

| <b>OUTPUT TERMAL</b>   | <b>NILAI</b> |
|--|--------------|
| Thermal Energy Steam Output per hour (kcal/h) untuk 2 unit   | 350.000      |
| Thermal Energy Steam Output per hour (kWh <sub>th</sub> )<br>(1 kcal/h = 1,163 x 10 <sup>-3</sup> kWh) | 407          |
| Thermal Energy Steam Output per day (kWh <sub>th</sub> )   | 6.106        |
| Thermal Energy Steam Output per tahun (kWh <sub>th</sub> )   | 2.228.599    |
| <b><i>Thermal Energy Steam Output per per tahun (MJ<sub>th</sub>)</i></b><br>(1 kWh = 3,6 MJ)          | 8.022.956    |

### 3.5. Resume Kebutuhan Beban dan Perkiraan Potensi Biogas Mal

Sebagaimana dapat dijelaskan dari Gambar 3.5 di atas bahwa untuk menganalisa lebih lanjut apakah investasi pembangunan PLTBogas layak dilakukan maka terlebih dahulu dilakukan analisis apakah potensi energi biogas layak untuk memenuhi kebutuhan sebagian beban kelistrikan pada mal Metropolitan. Karena prioritas utama pemanfaatan sampah organik untuk memenuhi sebagian kebutuhan energi listrik, maka berdasarkan potensi biogas yang ada maka ditentukan beban mana yang akan dipikul PLTBogas tersebut.

Bila kita analisa perbandingan antara potensi energi biogas yang ada terhadap segmentasi kebutuhan beban dapat diketahui beberapa kondisi, sebagai berikut:

- Dari segmentasi beban listrik diketahui bahwa
  - a. Beban sistem tata udara (AC) membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 914.627 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 3.052 kW yang beroperasi rata-rata 10 jam perhari
  - b. Beban sistem penerangan membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 55.680 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 176 kW yang beroperasi rata-rata 10,5 jam perhari.
  - c. Beban peralatan wahana (Lift dan Escalator)membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 62.640 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 174 kW yang beroperasi rata-rata 12 jam perhari.

- d. Beban peralatan standar kantor membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 4.092 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 8 kW yang beroperasi rata-rata 17,6 jam perhari.
  - e. Beban motor pompa membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 3.377 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 23 kW yang beroperasi rata-rata 5 jam perhari.
  - f. Beban heater pemanas air dan *laundry* membutuhkan pasokan energi listrik perbulan sebesar 54.380 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara dengan 260 kW yang beroperasi rata-rata 7 jam perhari.
  - g. Penjualan energi listrik ke *tenant* setiap bulannya sebesar 859.044 kWh yang dihasilkan oleh pembangkit setara 2.386 kW yang beroperasi rata-rata 12 jam perhari.
- Dari kebutuhan beban termal diketahui bahwa *water heater* membutuhkan energi termal yang setara dengan 2.228.599 kWh<sub>th</sub> pertahun atau 185,716.6 kWh<sub>th</sub> perbulan.
  - Dari potensi energi biogas diketahui bahwa:
    - a. Potensi energi biogas (dengan asumsi mengandung 60% gas metan) setara dengan 1.153.253,1 kWh pertahun atau 96.104,42 kWh perbulan.
    - b. Bila potensi biogas (dengan asumsi mengandung 60% gas metan) dikonversikan dengan *microturbine* atau *gas engine* yang memiliki efisiensi kelistrikan 25,2% tanpa memanfaatkan panas sisa pembakaran untuk membangkitkan energi listrik kembali maka diperoleh potensi energi listrik yang setara dengan 290.619,77 kWh<sub>e</sub> pertahun (24.218,31 kWh perbulan).
    - c. Bila data potensi energi biogas (yang mengandung 60% gas metan) dikonversikan dengan *microturbine* atau *gas engine* yang memiliki efisiensi termal 64% maka akan diperoleh energi termal setara dengan 738.081,97 kWh<sub>th</sub> pertahun (61.506,83 perbulan)
  - Dari data potensi energi biogas yang dikonversikan dengan *microturbines* diperoleh potensi energi listrik 24.218,31 kWh perbulan atau 290.619,77 kWh pertahun (sesuai Tabel 3.10). Sedangkan dari segmentasi beban listrik diketahui bahwa hanya beban-beban motor pompa dan peralatan

standar kantor yang menggunakan energi listrik dibawah 24.218,31 kWh perbulan yakni 7.469 kWh perbulan atau 89.626 kWh pertahun.

Karena dalam tesis ini penulis memprioritaskan masuknya PLTB Biogas untuk digunakan menyediakan energi listrik maka diprioritaskan pemenuhan kebutuhan beban motor pompa dan peralatan standar kantor yang membutuhkan pembangkit dengan output minimal setara dengan 31 kW.

- Saat ini teknologi *microturbines* dengan sistem CHP yang umum beredar adalah dengan kapasitas 30 kW, 70 kW, 100 kW, dan 350 kW.

Dengan asumsi jam kerja beban motor pompa dan peralatan standar kantor rata-rata 11,3 jam perhari, penggunaan peralatan listrik khususnya peralatan dispenser air pada peralatan standar kantor diatur hanya pada jam kerja (8 jam perhari), beban motor pompa dan peralatan standar kantor diatur sedemikian rupa agar tidak dioperasikan serentak, maka kapasitas yang paling sesuai untuk memenuhi kebutuhan beban adalah *microturbine-CHP* dengan kapasitas 70 kW<sup>[30]</sup>.

Dengan efisiensi listrik 25,2% dan menggunakan kembali panas sisa pembakaran untuk membangkitkan energi listrik, maka *microturbine-CHP* ini mampu menghasilkan energi listrik melebihi kebutuhan beban motor-motor pompa dan peralatan kantor.

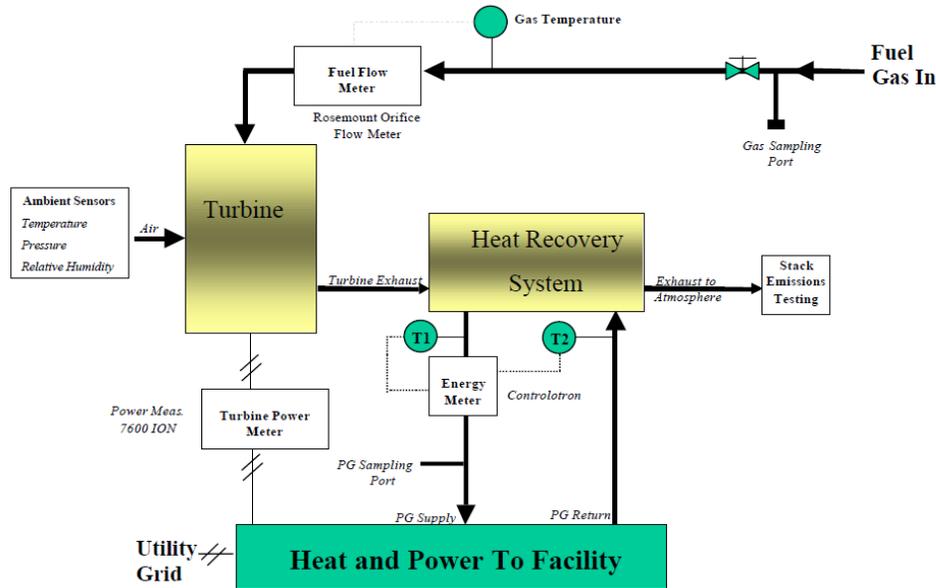
### 3.6. Konversi Energi Biogas dengan Mikroturbin<sup>[35]</sup>.

Mikroturbin adalah pembangkit yang menggunakan gas untuk membangkitkan tenaga listrik dalam skala kecil (sampai dengan 1 MWe) dan biasanya penggunaannya menghasilkan bentuk energi berbeda yakni energi panas dan energi listrik dari satu sumber bahan bakar yang disebut juga proses kombinasi energi panas dan listrik (*Combined Heat and Power-CHP*). Energi mekanik yang dihasilkan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik, sedangkan energi termalnya bisa digunakan langsung untuk suatu proses ataupun secara tidak langsung untuk menghasilkan uap, air panas atau sumber panas pada alat pendingin (*absorption chiller*).

Teknologi CHP telah dikenal dan dimanfaatkan dengan baik di berbagai negara maju dan sebagian negara berkembang khususnya untuk membangkitkan energi listrik dan panas dari bahan bakar gas. Dengan konsep CHP, efisiensi

energi secara keseluruhan dalam suatu sistem gas engine atau gas turbine meningkat secara signifikan. Dalam beberapa kasus bisa bertambah lebih dari 30% dibanding sistem konversi energi konvensional yang hanya memanfaatkan bahan bakar gas menjadi energi listrik.

Gambaran sederhana siklus kombinasi panas dan listrik dalam *microturbines* sebagaimana ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.6. Siklus Energi Panas dan Listrik pada Mikroturbin** <sup>[35]</sup>.

### 3.7. Perangkat Lunak *EconCalculator Biogas* <sup>[12]</sup>

Perangkat lunak ini adalah perangkat lunak berbasis excel yang dibuat oleh universitas UC Davis, *University of California* dan dapat diunduh secara gratis melalui website [http://biomass.ucdavis.edu/materials/calculator/EconCalculator Biogas.xls](http://biomass.ucdavis.edu/materials/calculator/EconCalculator%20Biogas.xls). Dengan perangkat lunak ini dapat dihitung aspek teknis dan aspek ekonomis pembangunan pembangkit listrik tenaga biogas.

#### 3.7.1. Parameter Teknis Pembangunan PLTBogas.

Untuk melakukan perhitungan pada perangkat lunak ada beberapa parameter teknis yang menjadi data input yang diperlukan. Data-data teknis sebagai data input yang diperlukan dalam perhitungan teknis pembangunan PLTBogas adalah seperti terlihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 3.13. Parameter Input Teknis Perangkat Lunak

| PARAMETER   | SATUAN                            |
|---|-----------------------------------|
| Gross Electrical Capacity                             | (kWe)                             |
| Net Electrical Capacity                               | (kWe)                             |
| Capacity Factor                                       | (%)                               |
| Net Efficiency Biogas to Electricity                  | (%)                               |
| Methane Concentration in Biogas                       | (% by volume)                     |
| Methane Production                                    | (m <sup>3</sup> /kg VS destroyed) |
| Biodegradability                                      | (kg VS destroyed/kg VS added)     |
| Ratio of Volatile Solids to Total Solids in Feedstock | (kg/kg)                           |
| Total Solids Fraction of Wet Feedstock                | (kg/kg)                           |
| Aggregate fraction of heat recovered (%)              |                                   |

Sedangkan data output sebagai hasil perhitungan akan diperoleh berdasarkan persamaan-persamaan sebagai berikut:

- Parasitic Load (kWe) =  

$$\text{Gross Electrical Capacity (kWe)} - \text{Net Electrical Capacity (kWe)} \dots \dots \dots (1)$$
- Annual Hours = Capacity Factor (%) x 8760 (hr)..... (2)
- Biogas Density (kg/m<sup>3</sup> at 298K, 1 atm) =  

$$\frac{101325 \times (\text{Methane concentration} \times 16) + (1 - \text{Methane concentration} \times 44)}{8314 \times 298} \dots \dots \dots (3)$$

dimana nilai 101325 adalah konstanta reaksi 1 atm methane yang ini terjadi pada tekanan 101325 Pa, dengan suhu 298 derajat Kelvin dan melepaskan reaksi panas sebesar 8314 kJ.

- Biogas Heating Value (kJ/kg) = 
$$\frac{36316 \times \text{Methane Concentration}}{\text{Biogas Density}} \dots \dots \dots (4)$$

dimana nilai 36316 adalah konstanta konversi nilai kalori biogas 60% gas metan yang bereaksi pada 1 atm, dalam satuan kg dan suhu 298 derajat Kelvin.

- Biogas Heating Value (kJ/m<sup>3</sup>) = 36356 x Methane Concentration..... (5)  
 dimana nilai 36356 adalah konstanta perubah satuan *biogas heating value* dalam satuam m<sup>3</sup>.

- Biogas Consumption Rate (kg/h) =  

$$\frac{\text{Net Electrical Capacity (kWe)} \times 3600 \dots \dots \dots (6)}{\text{Net Efficiency Biogas to Electricity} \times \text{Biogas Heating Value}}$$
 dimana nilai 3600 adalah nilai konversi satuan kW menjadi kJ.

- Biogas Consumption Rate (m<sup>3</sup>/h) = 
$$\frac{\text{Biogas Consumption Rate (kg/h)}}{\text{Biogas Density (kg/m}^3 \text{ at 298K, 1 atm)}} \dots\dots\dots (7)$$
- Power in Biogas (kW) = 
$$\frac{\text{Biogas Consumption Rate (kg/h)} \times 3600}{\text{Biogas Heating Value (kJ/kg)}} \dots\dots\dots (8)$$
- Gross Efficiency Biogas to Electricity (%) = 
$$\frac{\text{Gross Electrical Capacity} \times 100}{\text{Power in Biogas}} \dots\dots\dots (9)$$
- Annual Net Electricity Generation (kWh) =  
Net Electrical Capacity x Annual Hours ..... (10)
- Annual Biogas Consumption (kg/y) =  
Biogas Heating Value (kJ/kg) x Annual Hour ..... (11)
- Annual Biogas Consumption (m<sup>3</sup>/y) = 
$$\frac{\text{Annual Biogas Consumption (kg/y)}}{\text{Biogas Density (kg/m}^3 \text{ at 298K, 1 atm)}} \dots\dots\dots (12)$$
- Biogas Consumption Per Unit Net Output Power (m<sup>3</sup>/kWh) =  
$$\frac{\text{Annual Net Electricity Generation (kWh)}}{\text{Annual Biogas Consumption (m}^3 \text{/y)}} \dots\dots\dots (13)$$
- Methane Production (m<sup>3</sup>/kg VS added) =  
Methane Production x Biodegradability ..... (14)
- Methane Production (m<sup>3</sup>/kg TS) =  
Methane Production (m<sup>3</sup>/kg VS added) x Ratio of Volatile Solids to Total  
Solids in Feedstock (kg/kg) ..... (15)
- Methane Production (m<sup>3</sup>/kg Wet Feedstock) =  
Methane Production (m<sup>3</sup>/kg TS) x Total Solids Fraction Wet Feedstock (kg/kg).. (16)
- Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg VS destroyed) =  
$$\frac{\text{Methane Production (m}^3 \text{/kg VS destroyed)}}{\text{Methane Concentration in Biogas (\% by volume)}} \dots\dots\dots (17)$$
- Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg VS added) =  
Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg VS destroyed) x Biodegradability (kg VS destroyed /  
kg VS added)..... (18)
- Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg TS) =  
Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg VS added) x Ratio of Volatile Solids to Total Solids  
in Feedstock (kg/kg) ..... (19)

- Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg Wet Feedstock) =  
Biogas Production (m<sup>3</sup>/kg TS) x Total Solids Fraction Wet Feedstock (kg/kg)..... (20)
- Annual Volatile Solids (VS) Consumption (t/y) =  
$$\frac{\text{Annual Biogas Consumption (m}^3\text{/y)}}{\text{Biogas Production (m}^3\text{/kg VS added)}} \dots\dots\dots (21)$$
- Annual Total Solids (TS) Consumption (t/y) =  
$$\frac{\text{Annual Volatile Solids (VS) Consumption (t/y)}}{\text{Ratio of Volatile Solids to Total Solids in Feedstock (kg/kg)}} \dots\dots\dots (22)$$
- Hourly Total Solids (TS) Consumption (t/h) =  
$$\frac{\text{Annual Total Solids (TS) Consumption (t/y)}}{7.884} \dots\dots\dots (23)$$
- Annual sludge production (t/y) =  
$$\frac{\text{Annual Total Solids Consumption (t/y)} - \text{Annual Biogas Consumption (kg/y)}}{1000} \dots\dots (26)$$
- Total heat production rate (kWth) =  
Power in Biogas (kW) - Gross Electrical Capacity (kWe) ..... (27)
- Recovered heat (kWth) = 
$$\frac{\text{Total heat production rate (kWth)}}{\text{Aggregate fraction of heat recovered (\%)}} \dots\dots\dots (28)$$
- Annual heat sales (kWh/y) = 
$$\frac{\text{Recovered heat (kWth)}}{\text{Annual Hours}} \dots\dots\dots (29)$$
- Overall CHP Efficiency Gross (%) =  
$$\frac{[(\text{Gross Electrical Capacity} \times \text{Annual Hours}) + \text{Annual heat sales (kWh/y)}] \times 100}{\text{Power in Biogas (kW)} \times \text{Annual Hours (hr)}} \dots\dots (30)$$
- Overall CHP Efficiency Net (%) =  
$$\frac{[\text{Annual Net Electricity Generation (kWh)} + \text{Annual heat sales (kWh/y)}] \times 100}{[\text{Power in Biogas (kW)} \times \text{Annual Hours}]} \dots\dots (31)$$

### 3.7.2. Data Ekonomi Pembangunan PLTBogas

Data ekonomi pembangunan PLTBogas adalah data investasi modal dan manfaat ekonomi yang diperoleh baik dari penjualan energi listrik dan termal ataupun manfaat ekonomi lainnya dengan keberadaan PLTBogas pada mal Metropolitan

Dengan bantuan perangkat lunak *EconCalculator Biogas* dapat diperoleh manfaat ekonomi langsung pembangunan PLTBiogas khususnya dengan pemanfaatan energi listrik dan termal yang dihasilkannya. Data-data ekonomi sebagai output ekonomi keberadaan PLTBiogas yang disimulasikan dengan *software* tersebut dijadikan data dasar untuk menganalisis optimalisasi biaya investasi dan perubahan faktor eksternal yang mempengaruhinya yang disebut juga sebagai analisis sensitivitas biaya investasi<sup>[17]<sup>24</sup>, 34</sup>.

Parameter-parameter ekonomi sebagai data input pada perangkat lunak *EconCalculator Biogas* meliputi biaya pengeluaran tahunan (*Expenses--base year*), pajak-pajak, pendapatan diluar dari energi, eskalasi/inflasi, finansial, jadwal depresiasi (*Depreciation Schedule*), jadwal kredit pajak (*Tax Credit Schedule*) dan *Annual Cash Flows*. Lebih lengkap tentang data input dan output parameter ekonomi dan proses perhitungan ekonomis dari analisis biaya investasi lebih jelas diperlihatkan pada LAMPIRAN 5.

### 3.7.3. Manfaat Ekonomi Lain Pembangunan PLTBiogas

Selain manfaat ekonomi langsung, juga dapat diperoleh nilai penjualan pengurangan emisi karbon (*Carbon Emission Reduction-CER*) sebagai sumber alternatif pendapatan karena CH<sub>4</sub> bernilai polutan 21 kali lebih banyak daripada CO<sub>2</sub>.

Bila potensi CER diperhitungkan maka pembangunan PLTBiogas ini mampu memberikan manfaat ekonomi pertahun sebagaimana pada LAMPIRAN 6.

### 3.8. Analisis Sensitivitas Manfaat Ekonomi Pembangunan PLTBiogas

Analisis sensitivitas dibutuhkan dalam rangka mengetahui sejauh mana dampak parameter-parameter investasi yang telah ditetapkan sebelumnya boleh berubah karena adanya faktor situasi dan kondisi selama umur investasi, sehingga perubahan tersebut hasilnya akan berpengaruh secara signifikan pada keputusan yang telah diambil.

Seperti pada perhitungan biaya investasi, yang diperoleh dengan mengumpulkan dan mengolah data data capital cost, pengeluaran tahunan, pajak-pajak, dan proyeksi pendapatan. Namun selama proses evaluasi dan implementasi fisik dilaksanakan kemungkinan terjadinya perubahan kondisi dan fluktuasi harga

yang besar diluar perkiraan dapat saja terjadi. Pertanyaan yang muncul setelah itu adalah seberapa besar perubahan dan fluktuasi harga tersebut dapat diabaikan dan tidak akan mengubah hasil keputusan evaluasi yang telah diambil sebelumnya. Batasan nilai-nilai perubahan/fluktuasi tersebut yang akan mampu mengubah kembali keputusan sebelumnya disebut dengan tingkat sensitivitas dari suatu parameter yang telah diuji. Diharapkan, dengan mengetahui nilai-nilai sensitivitas dari masing-masing parameter investasi memungkinkan dilakukannya tindakan-tindakan antisipatif di lapangan dengan cepat.

Metode analisa investasi yang digunakan adalah *Net Present Value* untuk menentukan besaran suku bunga kritis yang mempengaruhi operasional perusahaan. Secara logika sederhana menjelaskan bahwa perusahaan yang dianggap sehat harus mengetahui seberapa besar kemampuan *cash flow* dalam mengembalikan modalnya dan seberapa besar pula kewajiban yang harus dipenuhi secara berkala. Kemampuan *cash flow* dalam mengembalikan modal inilah yang disebut dengan Internal Rate of Return (IRR), sedangkan kewajiban disebut dengan Minimum Attractive Rate of Return (MARR). Investasi dikatakan layak/menguntungkan bila  $IRR \geq MARR$ .

Dengan melakukan beberapa asumsi terhadap penilaian IRR yakni nilai IRR setara dengan nilai minimum MARR dan nilai IRR diperoleh disaat nilai NPV sama dengan 0 (nol) maka, nilai IRR juga setara dengan nilai suku bunga sensitivitas "i" yang diperoleh dari melakukan interpolasi terhadap nilai NPV yang paling mendekati titik nol dan bernilai berlawanan yakni bernilai positif dan negatif.

Selain itu juga dilakukan analisis sensitivitas dengan pendekatan Perubahan Biaya Operasi terhadap Nilai Pulang Modal (Break Event Point-BEP). Bila dilakukan perubahan nilai-nilai biaya operasional (dilakukan secara bertahap mulai dari 4%, 8%, 10%, 15%, 20%) terhadap biaya simulasi awal pembangunan pembangkit maka akan diperoleh variasi tahun pencapaian pengembalian modal dan nilai cash flow sesaat pencapaian BEP untuk simulasi pembangunan PLT Biogas 70 kW.