

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terkait

Penelitian tuags akhir ini akan dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian referensi-referensi dari teori yang bersangkutan dengan judul, masalah penelitian, tujuan penelitian, dan metode. Teori-teori yang dibahas didapatkan mulai dari buku, jurnal, dan dari sumber-sumber yang relevan.

Studi perancangan pembangkit listrik tenaga biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit telah banyak dilakukan. Ada beberapa peneliti yang telah melakukan perancangan pembangkit listrik tenaga biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit. Dibawah ini, akan dijelaskan bahwa perancangan pembangkit listrik tenaga biogas dari limbah cair kelapa sawit berhasil dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif.

Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Biomassa Sawit (PLTBS) Kapasitas 5 MW. Beliau melakukan penelitian ini dengan tujuan bagaimana merancang suatu pembangkit listrik dari limbah kelapa sawit. Metode yang digunakan menggunakan siklus *rankine* untuk menentukan kapasitas daya terbangkit sesuai dengan hasil analisis potensi daya terbangkit sebelumnya. Hasil penelitian yang didapatkan bahwa pembangkit listrik biomassa layak dibangun dengan nilai kalor rata-rata biomassa sawit tandan kosong 6.727 kJ/kg, cangkang 16.413 kJ/kg dan serabut 8.813 kJ/kg [7].

Analisis Biaya Produksi Per Kwh Menggunakan Bahan Bakar Biogas Limbah Cair Kelapa Sawit (Aplikasi pada PLTBGS PKS Tandan). Beliau melakukan penelitian dengan tujuan untuk mendapatkan nilai jual limbah cair kelapa sawit. Metode yang digunakan dengan melakukan analisis biaya per kWh berbahan dasar limbah cair kelapa sawit sebagai bahan bakar, dengan menghitung biaya modal, biaya bahan bakar serta biaya operasional dan perawatan. Hasil yang didapatkan, biaya produksi listrik per kWh berdasarkan suku bunga 6%, 9%, 12% adalah Rp. 569,13 per kWh, Rp. 639,34 per kWh, Rp. 770,89 per kWh dan biaya produksi listrik per kWh tanpa memperhitungkan biaya pengembalian modal adalah Rp. 250 per kWh [10].

Perhitungan Efisiensi *Boiler* PLTU Unit 20 PT. PJB UBJOM Rembang pada Beban 315 MW Dengan Menggunakan Metode Langsung (*Direct Method*). Beliau melakukan penelitian dengan tujuan mengetahui tingkat efisiensi ketel uap. Metode yang digunakan adalah metode langsung (*direct method*) dengan siklus *rankine* untuk menentukan efisiensi *boiler* dan mengetahui besarnya penurunan performa dan mengetahui penyebabnya. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa penurunan unjuk kerja *boiler* mengalami penurunan performa sebesar 13%, dari 83% pada saat komisioning menjadi 70% pada kondisi sekarang [17].

Potensi Limbah Cair Minyak Kelapa Sawit untuk Produksi Biogas. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan percobaan dilaboratorium Bioteknologi Perkebunan Indonesia Bogor menggunakan senyawa kimia NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>, pH 4,4, 5,5 dan 7 tanpa agitasi kondisi anaerob. Hasil penelitian ini menunjukkan rata-rata kandungan COD, 49,0-63,6, BOD 23,5-29,3, dimana total produksi biogas sebesar 121 liter [39].

Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Berbasis Limbah Cair Kelapa Sawit (POME) Di PT. Sumber Sawit Sejahtera Kabupaten Pelalawan Provinsi Riau. Tujuan dalam penelitian ini untuk mengetahui rancangan dan kelayakan dari pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBG) *on-grid system* dari limbah cair kelapa sawit di PT.SSS, dimana perancangan ini di lakukan pada tahun 2020, dan usia proyek mencapai 20 tahun. Metode yang digunakan adalah *anaerob digester complet mix*, simulator software RETScreen, perhitungan manual dari aspek ekonomi. Didapatkan hasil bahwa pembangkit layak dilanjutkan dengan efisiensi genset sebesar 41%, NPV sebesar 396.549.871.696, IRR 11%, dan PBP 5,7 tahun [12].

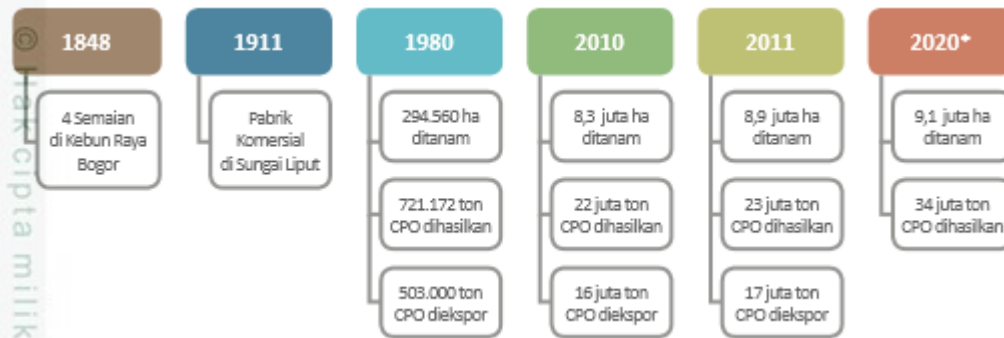
Analisis Potensi Pembangkit Listrik Biogas Berbasis Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Studi Kasus PKS PT Intan Sejati Andalan, Riau. Metode yang digunakan dengan melakukan pengujian laboratorium untuk mendapatkan kadar organik yang terkandung dalam limbah cair di PKS ISA, kemudian melakukan perhitungan daya listrik dibangkitkan, dengan melihat fluktuasi produksi dan proyeksi dimasa depan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ISA POM memiliki kinerja yang baik dengan kapasitas terpasang 60 ton/jam, dan ketersediaan tanaman lebih dari 99%. Rata-rata POME aliran 22,55 m<sup>3</sup>/jam dengan 33-45 °C, maka dapat disimpulkan bahwa potensi dari pemanfaatan POME menghasilkan daya cukup untuk memenuhi kebutuhan energi listrik [3].

Mengacu pada penelitian sebelumnya, yang menjelaskan tentang beberapa sumber yang terkait dengan metode dalam menentukan perancangan pembangkit listrik tenaga biogas berbahan POME, peneliti mengambil kesimpulan bahwa efisiensi konversi dari generator set sedang, dan jika menggunakan konversi ketel uap efisiensi tinggi [5]. Untuk itu peneliti tertarik untuk melakukan tugas akhir dengan tema “Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Berbahan Limbah Cair Kelapa Sawit (Studi Kasus di PT. Sari Lembah Subur Kabupaten Pelalawan Provinsi Riau)”. Dari hasil penelitian tersebut akan memberikan kontribusi yang baik terhadap instansi.

## 2.2 Perkembangan dan Produksi Kelapa Sawit

Kelapa sawit adalah tanaman perkebunan atau industri berupa pohon batang lurus dari famili *Palmae*. Tanaman tropis ini dikenal sebagai penghasil minyak sayur yang berasal dari negara Amerika Serikat. Brazil dipercaya sebagai tempat dimana pertama kali kelapa sawit tumbuh, kemudian menyebar ke Afrika, Amerika Equatorial, Asia Tenggara, dan Pasifik Selatan. Benih kelapa sawit untuk pertama kali ditanam di Indonesia pada tahun 1984 berasal dari Mauritius, Afrika. Perkebunan kelapa sawit pertama dibangun di Tanah Hitam, Hulu Sumatera Utara oleh Schadt (Jerman) pada tahun 1911[1]. Komoditas perkebunan kelapa sawit merupakan andalan bagi pendapatan nasional dan devisa negara Indonesia, yang dapat dilihat dari nilai ekspor komoditas perkebunan, pada tahun 2014 total ekspor perkebunan mencapai US\$ 28,324 milyar atau setara dengan Rp. 367,040 triliun (asumsi 1 US\$ = Rp. 13.000,00,-). Kontribusi sub sektor perkebunan terhadap perekonomian nasional semakin meningkat setiap tahun. Luas area dan produksi kelapa sawit (minyak nabati), menurut status perusahaan tahun 1970 – 2015 menyebutkan pada tahun 2016 total luas area (Ha) 11.672.861 Hektar, dan total produksi (ton) 33.500.691 ton. Untuk luas area dan produksi kelapa sawit khusus Riau pada tahun 2016 adalah 2.262.095 Hektar, total produksi 7.717.612 ton. Daerah Kabupaten Pelalawan total luas area 118.882 hektar dan total produksi 449.793 ton [15]. Perkebunan kelapa sawit dengan luas area 8,9 hektar menghasilkan 23 juta ton *CPO*. Didalam proses pengolahan kelapa sawit ada *output* dalam bentuk limbah padat dan cair, dalam hal ini akan dibahas limbah cair atau disebut POME (*Palm Oil Mill Effluent*). Didalam kandungan POME terdapat unsur biogas terdiri dari 50-70% metana, 25-45% karbon dioksida. Jika pengolahan POME tidak terkendali, metana di dalam biogas akan langsung terlepas ke atmosfer sebagai gas rumah kaca, dan metana ini lebih berbahaya 21 kali lipat dibandingkan dengan karbon dioksida. Untuk mengolah limbah dengan dibangunnya sebuah sistem pembangkit listrik berbasis limbah cair kelapa sawit dengan bahan bakar biogas dalam pemanfaatannya. Untuk proyeksi daya dari POME berdasarkan kapasitas PKS di Indonesia 60 tonTBS/jam menghasilkan POME 63 m<sup>3</sup>/jam potensi daya 3,2 MWe [5].





Gambar 2.1 Perkembangan Industri Kelapa Sawit di Indonesia [5].

Proses pengolahan tandan buah segar (TBS) kelapa sawit untuk produksi minyak kelapa sawit menghasilkan beberapa jenis limbah. Proses ekstraksi minyak, pencucian, dan pembersihan di pabrik menghasilkan limbah cair kelapa sawit atau *palm oil mill effluent* (POME). Dalam ekstraksi terdapat 3 langkah proses yang menghasilkan POME:

- a. Sterilisasi TBS
- b. Penjernihan minyak kelapa sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO), yaitu pemerasan, memisahkan, dan penjernihan.
- c. Pemerasan tandan kosong [5].

### 2.3 Hasil Samping Pengolahan Pabrik Kelapa Sawit

Selain menghasilkan CPO proses pengolahan sebuah pabrik memiliki hasil samping diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Tandan kosong

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah salah satu produk samping (*by-product*) berupa padatan dari industri pengolahan kelapa sawit. ketersediaan tandan buah kosong kelapa sawit cukup tinggi bila ditinjau dari data total produksi untuk kabupaten pelalawan yaitu 810.702 ton [15]. Manfaat dari limbah tandan kosong ini adalah untuk pupuk kompos, *pulp* kertas, papan partikel, energi [20]. Khusus untuk pupuk kompos perlu adanya penambahan mikroba alami untuk proses fermentasi (pengomposan) secara aerob agar mendapatkan pupuk organik yang lebih baik.

Manfaat pupuk kompos dari tandan kosong adalah

1. Memperbaiki struktur tanah liat menjadi ringan.
2. Membantu kelarutan unsur-unsur hara yang diperlukan bagi pertumbuhan tanaman.
3. Bersifat homogen dan mengurangi risiko sebagai pembawa hama tanaman.
4. Merupakan pupuk yang tidak mudah tercuci oleh air yang meresap dalam tanah.

5. Dapat diaplikasikan pada musim apa saja.

b. Cangkang

Cangkang bagian paling keras pada komponen buah kelapa sawit, cangkang merupakan hasil olah dari pemrosesan kernel inti buah kelapa sawit memiliki bentuk seperti tempurung buah kelapa dan setiap kg cangkang mengandung nilai kalor +/- 2655 kCal [19]. Adapun manfaat dari cangkang kelapa sawit selain bagi industri, usaha, dan rumah tangga, juga sebagai karbon aktif, arang, papan partikel, campuran pengeras jalan di sekitaran lokasi pabrik, bahan bakar ketel uap, bahan campuran untuk pakan ternak [20].

c. Pelepah

Pohon kelapa sawit dengan usia 7-8 tahun memiliki panjang pelepah +/- 5-6 meter. Dengan pangkal pelepah memiliki lebar +/- 7-8 cm. Pemanfaatan pelepah sendiri bisa digunakan sebagai “*fiber board*” untuk bahan baku mebel, kursi, meja dan lemari. Juga sebagai bahan bakar energi terbarukan dalam teknologi gasifikasi pembangkit listrik tenaga gas dari pembakaran limbah pelepah kelapa sawit [1].

d. Fiber (Serat)

Serat merupakan limbah sisa perasan buah sawit berupa serabut seperti benang yang diproduksi dari stasiun *fiber cyclone* setelah melewati proses ekstraksi melalui unit *screw press*. Bahan ini mengandung protein +/- 4% dan serat +/- 36%, serta mempunyai kalor 2.637 Kkal/kg sampai 4.554 Kkal/kg [10]. dikarenakan memiliki nilai kalor yang tinggi, maka digunakan sebagai sumber bahan bakar boiler untuk sumber energi listrik. Kandungan nilai kalor pada bagian fiber, cangkang, tandang kosong, pelepah kelapa sawit bisa dilihat pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Kandungan Nilai Kalor Limbah Kelapa Sawit [10].

| No. | Bahan uji laboratorium | Kalor (Kkal/kg)       |
|-----|------------------------|-----------------------|
| 1.  | Tandan Kosong          | 1800 Kkal/kg          |
| 2.  | Cangkang               | 3.400 Kkal/kg         |
| 3.  | Pelepah                | 4.176 Kkal/kg         |
| 4.  | Serat                  | 2.637 – 4.554 Kkal/kg |

**2.3.4 Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (Palm Oil Mill Effluent/POME)**

Pome merupakan hasil samping dari produksi di PKS yang paling besar bila dibandingkan dengan hasil produk yang lain, dan POME mempunyai kandungan senyawa kompleks tinggi seperti, karbohidrat, protein, mineral, dan lemak [5]. Pengolahan tandan

buah segar kelapa sawit untuk produksi minyak kelapa sawit menghasilkan beberapa macam jenis limbah. Dari mulai proses ekstraksi minyak, kemudian pencucian, dan pembersihan di pabrik. Hasil dari proses ini adalah limbah cair kelapa sawit yang dikenal POME.

Pabrik kelapa sawit menghasilkan 0,7-1 m<sup>3</sup> POME untuk setiap 1 ton tandan buah segar yang melalui proses pengolahan. POME yang baru dihasilkan umumnya panas (suhu 60-80 °C), bersifat asam (Ph 3,3-4,6), kental, berwarna kecoklatan dengan kandungan padatan, minyak dan lemak, *chemical oxygen demand* (COD), dan *biological oxygen demand* (BOD) yang tinggi [5]. Kandungan POME jika dibuang begitu saja ke aliran sungai maka akan sangat berdampak fatal bagi ekosistem sungai itu sendiri dan lingkungan sekitar tanpa melalui proses standart baku mutu air bersih limbah cair kelapa sawit. Hal ini merupakan salah satu tantangan bagi perusahaan untuk menggunakan sistem teknologi yang efisien dan lebih efektif pastinya. Proses yang paling konvensional adalah dengan mendiamkan POME tersebut dikolam agar terurai oleh mikroba secara alami [21]. Dewasa ini telah terjadi perkembangan pemikiran dimana limbah yang dulunya dikategorikan sebagai produk samping yang menimbulkan masalah dan selayaknya harus ditanggulangi (*end-of-pipe*), strategi pengolahan lingkungan didasarkan pada pendekatan kapasitas daya dukung (*carrying capacity approach*), akibat terbatasnya daya dukung lingkungan alamiah untuk menetralkan pencemaran ke arah pendekatan mengolah limbah terbentuk (*end-of-pipe treatment*). Pendekatan ini terfokus pada pengolahan dan pembuangan limbah untuk mencegah pencemaran dan kerusakan lingkungan. Namun pada kenyataannya pencemaran dan kerusakan lingkungan tetap terjadi dan cenderung terus berlanjut, karena dalam praktiknya pendekatan melalui pengolahan limbah menghadapi berbagai kendala. Seperti:

- a. Bersifat reaktif, yaitu bereaksi setelah limbah terbentuk.
- b. Tidak efektif dalam memecahkan masalah pencemaran lingkungan karena mengolah limbah hanyalah mengubah bentuk limbah dan memindahkannya dari satu media ke media lain.
- c. Biaya investasi dan operasi pengolahan dan pembuangan limbah mahal, yang mengakibatkan biaya proses produksi meningkat dan harga jual produk juga naik. Hal ini menjadi salah satu alasan pengusaha untuk tidak memasang alat pengolahan limbah atau mengoperasikan sekedarnya saja.
- d. Peraturan perundang – undangan yang menetapkan persyaratan limbah yang boleh dibuang setelah dilakukan pengolahan pada umumnya cenderung untuk dilanggar bila pengawasan dan penegak hukum lingkungan tidak efektif dijalankan [20].



Pada tabel 2.2 dijelaskan standart baku mutu limbah cair kelapa sawit yang di alirkan ke sungai, serta kadar senyawa terkandung dalam limbah cair kelapa sawit sebelum melalui *treatment* pengolahan [5].

**Tabel 2.2** Karakteristik POME Tanpa Diolah dan Baku Mutu Sesuai Peraturan [5].

| No. | Parameter                     | Unit                    | POME Tanpa Diolah |           | Baku Mutu Sesuai Peraturan |                |
|-----|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------|----------------------------|----------------|
|     |                               |                         | Rentang           | Rata-rata | Sungai                     | Aplikasi Lahan |
| 1.  | BOD                           | mg/l                    | 8.200-35.000      | 21.280    | 100                        | 5.000          |
| 2.  | COD                           | mg/l                    | 15.103-65.100     | 34.740    | 350                        | -              |
| 3.  | TSS                           | mg/l                    | 1.330-50.700      | 31.740    | 250                        | -              |
| 4.  | Amonia (NH <sub>3</sub> N)    | mg/l                    | 12-126            | 41        | 50                         | -              |
| 5.  | Ph                            |                         | 3.3-4.6           | 4         | 6-9                        | 6-9            |
| 6.  | Maksimal POME yang dihasilkan | m <sup>3</sup> /ton CPO |                   |           | 2.5                        |                |

COD merupakan ukuran total oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi semua zat organik yang bersifat biologis maupun yang tidak bereaksi (*inert*) menjadi karbon dioksida dan air. Oleh sebab itu, nilai COD selalu lebih besar dari nilai BOD. Sementara BOD merupakan ukuran jumlah oksigen yang dikonsumsi bakteri ketika menguraikan zat organik dalam kondisi aerobik [5].

## 2.4 Potensi dan Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit

### 2.4.1 Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit

Pemanfaatan limbah cair dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Komponen terbesar yang terkandung dalam biogas adalah CH<sub>4</sub> (55% - 70%) dan CO<sub>2</sub> (30% - 45%) serta jumlah kecil nitrogen dan hidrogen sulfida [22]. Apabila kandungan gas metan dalam biogas lebih dari 50%, biogas tersebut layak digunakan sebagai bahan bakar karena bersifat mudah meledak dan terbakar. Gas metan memiliki nilai kalor 50,1 MJ/kg. [22]. Jika densitas metan 0,717 kg/m<sup>3</sup>, gas 1 m<sup>3</sup> metana, akan memiliki energi sebesar 35,9 MJ atau sekitar 10 kWh, dengan asumsi efisiensi konversi biogas menjadi listrik 33%. [22]. Kandungan yang terdapat dalam biogas mempengaruhi sifat dan kualitas biogas sebagai bahan bakar, seperti pada tabel 2.3 berikut ini:

**Tabel 2.3** Komposisi Biogas [22].

| No. | Komposisi Biogas                    | Jumlah |
|-----|-------------------------------------|--------|
| 1.  | Metan (CH <sub>4</sub> )            | 55-70% |
| 2.  | Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )  | 30-45% |
| 3.  | Nitrogen (N <sub>2</sub> )          | 0-0,3% |
| 4.  | Hidrogen Sulfida (H <sub>2</sub> S) | 1-5%   |

#### 2.4.2 Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit

Teknologi pengolahan limbah cair (*palm oil mill effluent/POME*) yang telah banyak digunakan untuk mengambil biogas dari POME seperti *Bio Reaktor* dan *Covered Lagoon* atau sistem *capped anaerobic pond*, dengan menutup kolam limbah konvensional dengan bahan *reinforced polypropylene* sehingga berfungsi sebagai *anaerobic digester*, proses degradasi material organik ini tanpa oksigen [22].

Kolam anaerobik menggunakan HDPE (*high density polyethylene*) membran mampu menahan gas metan hasil perombakan kolam secara anaerobik serta memiliki fleksibilitas tinggi dan pengaturan suhu sehingga membantu bakteri tumbuh. Proses pembentukan gas metan dengan bantuan bakteri seperti *Methanodocus*, *Methanosarcina* dan *Methanobacterium* [22].

Pertama, mikroba hidrolitik akan memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih kecil. Bahan organik kompleks umumnya adalah polimer hasil pecahannya merupakan monomer-monomer. Hasil pecahannya bahan organik kompleks tersebut antara lain: glukosa, asam, amino, dan asam lemak. Kedua, kelompok mikroba ini akan merombak monomer-monomer organik menjadi asam yaitu: senyawa asam-asam organik, alkohol, dan keton. Ketiga, kelompok mikroba *acetogenik* akan merombaknya menjadi: asam asetat, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>. Keempat, kelompok mikroba menghasilkan metan (*metanogenik*) akan mengubah asam-asam tersebut menjadi gas metan. Gas metan tersebut akan dibakar di suatu *flaring* unit (biogas genset). Hasil karbondioksida yang dapat terurai di atmosfer. Setelah dibangkitkan gas metana (CH<sub>4</sub>) sisa proses fermentasinya dalam bentuk lumpur (*slurry*) adalah bisa digunakan untuk bahan pupuk dan penyubur tanaman dan tanah pertanian. Temperatur yang optimal untuk digester adalah temperatur 30-35°C [22].

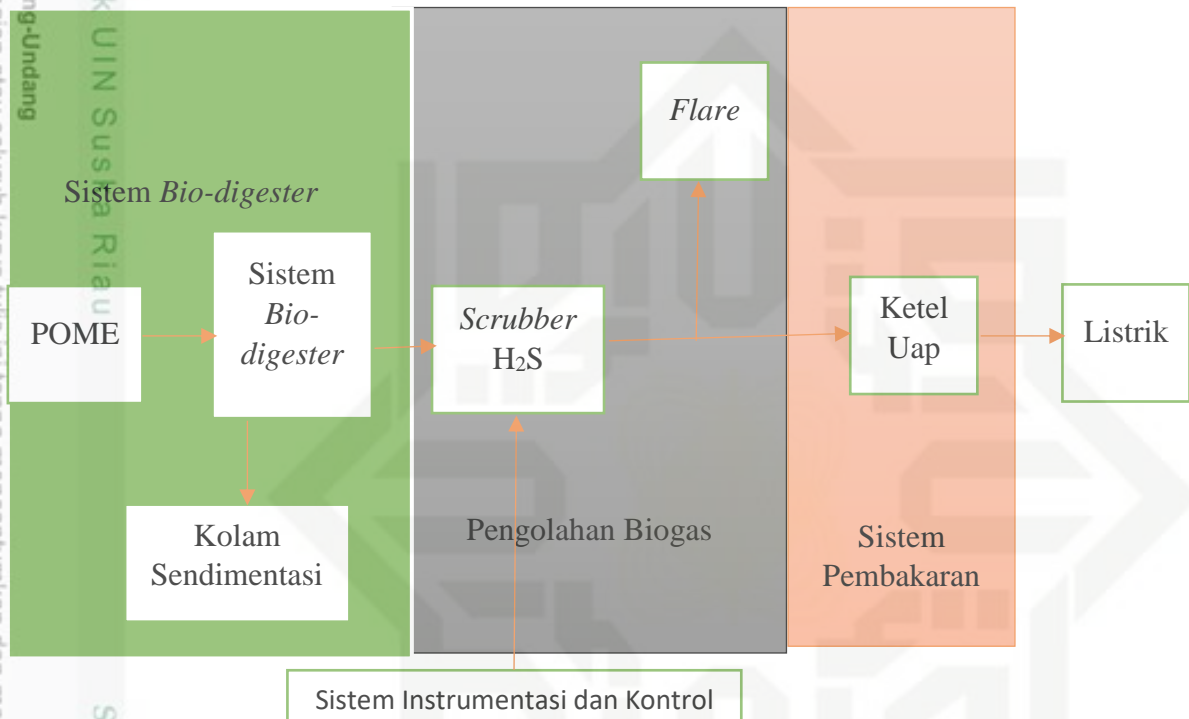
#### 2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Biogas

Pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBG) merupakan suatu pembangkit energi listrik menggunakan biogas sebagai bahan bakar utama yang dihasilkan dari proses fermentasi pengolahan limbah di dalam suatu digester, dimana untuk mengkonversi potensi biogas dari



digester menggunakan boiler atau ketel uap. Teori alur perancangan mengikuti referensi dari *e-book* yang disusun oleh Sri Rahayu dan kawan-kawan dengan tema “konversi POME menjadi biogas”. Buku ini menjelaskan konversi POME menjadi energi listrik, dan juga sebagai petunjuk untuk melakukan perancangan PLTBG [5].

Berikut adalah diagram pembangkit listrik tenaga biogas berbahan dasar limbah cair kelapa sawit.



**Gambar 2.2** Diagram pembangkit listrik tenaga biogas [5].

- a. Sistem *bio-digester* terdiri dari proses pengolahan awal, *bio-digester*, dan kolam sedimentasi. Dalam proses ini, POME dikondisikan untuk mencapai nilai-nilai parameter yang dibutuhkan untuk masuk ke digester. Pada tahap ini, dilakukan proses penyaringan untuk menghilangkan partikel besar seperti kotoran dan serat. Proses pengadukan dan netralisasi pH dilakukan untuk mencapai pH optimal pada 6,5-7,5. Sebuah sistem pendingin (*cooling tower* atau *heat exchanger*) berfungsi untuk menurunkan suhu POME menjadi sekitar 40°-50°C. Suhu digester harus dijaga dibawah 40°C agar kondisi mesofilik optimal. Penurunan suhu ini juga dibantu dengan proses resirkulasi air limbah keluaran dari digester [5].
- b. *Scrubber Hidrogen Sulfidai* (H<sub>2</sub>S)  
 Alat ini digunakan untuk menurunkan konsentrasi H<sub>2</sub>S ke tingkat yang disyaratkan oleh ketel uap, biasanya dibawah 200 ppm. Hal ini untuk mencegah korosi, mengoptimalkan operasi, dan memperpanjang umur ketel uap. Ada 3 jenis *scrubber*

yang digunakan dalam *desulfurisasi* dalam biogas, yaitu *scrubber* kimia, *scrubber* biologis, *scrubber* air. *Scrubber* kimia menggunakan bahan kimia seperti NaOH untuk mengubah H<sub>2</sub>S menjadi SO<sub>4</sub>. *Scrubber* biologis menggunakan bakteri sulfur-oksidasi untuk mengubah H<sub>2</sub>S menjadi SO<sub>4</sub>. *Scrubber* air bekerja berdasarkan penyerapan fisik dari gas-gas terlarut dalam air dan menggunakan air bertekanan tinggi. *Scrubber* biologis biasa digunakan pada aplikasi POME menjadi energi listrik karena biaya operasionalnya lebih rendah daripada yang lain [5].

c. Sistem Instrumentasi dan Kontrol

Operator menggunakan sistem instrumentasi dan kontrol untuk memantau parameter seperti pH, aliran cairan dan gas, serta tekanan gas. Sistem kontrol digunakan untuk menghentikan sistem secara manual maupun otomatis saat kondisi tidak aman [5].

d. *Flare*

Digunakan di industri proses atau pabrik untuk membakar kelebihan gas. Dengan alasan keamanan, pembangkit listrik tenaga biogas harus memasang *flare* untuk membakar kelebihan biogas, terutama pada saat biogas tidak bisa diumpankan ke ketel uap atau peralatan pembakaran lainnya. Umumnya ini terjadi pada puncak panen tandan buah segar, yang menyebabkan kelebihan produksi biogas.

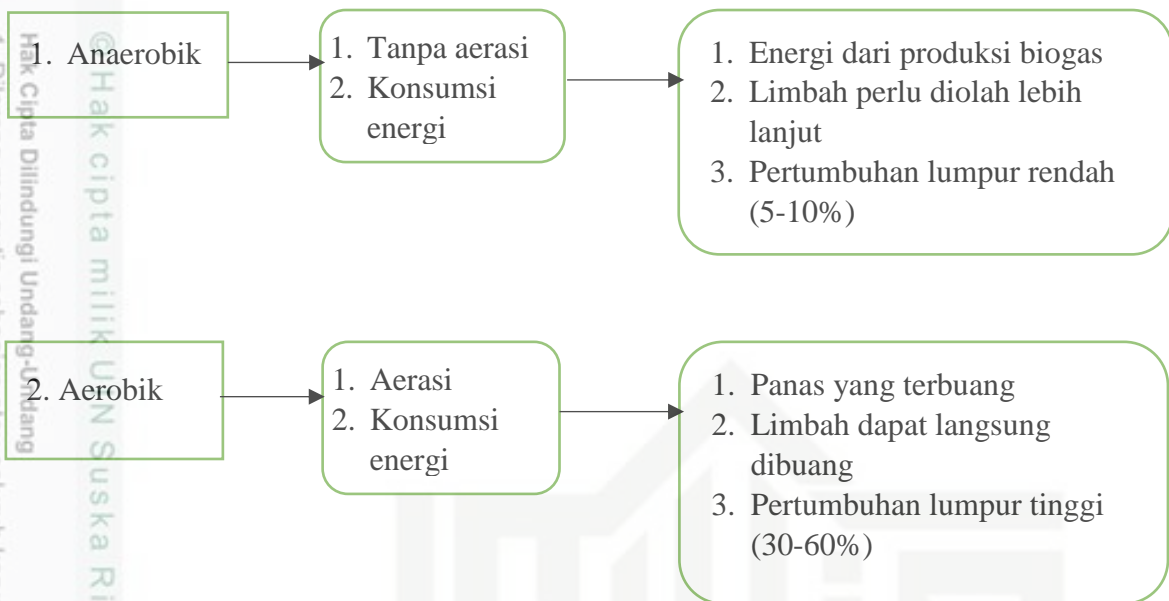
e. Ketel Uap

Biogas yang dihasilkan dari proses penguraian anaerobik dapat menjadi bahan bakar ketel uap. Ketel uap biasanya dipasang *burner* dibagian dinding luar ketel uap. Biogas merupakan bahan bakar alternatif bagi ketel uap untuk menghasilkan panas atau listrik menggantikan bahan bakar biomassa, seperti cangkang dan serat, yang biasa digunakan di pabrik kelapa sawit [5].

## 2.6 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Biogas

### 2.6.1 Kolam Limbah Cair Kelapa Sawit

Kolam penampungan limbah cair kelapa sawit ini tempatnya sebelum POME dialirkan masuk ke digester dimana kolam ini memiliki potensi gas metan yang tinggi dikenal dengan kolam sistem anaerobik, dan kolam penampungan selanjutnya tempatnya sesudah POME keluar dari digester dengan keluaran dalam bentuk lumpur dan sesuai standart baku mutu limbah cair kelapa sawit untuk kemudian di alirkan ke perkebunan sebagai pupuk dan dibuang ke sungai, biasa dikenal dengan dengan kolam sistem aerobik. Berikut ini perbandingan kolam sistem anaerobik dan aerobik.



**Gambar 2.3** Perbandingan Kolam Sistem Anaerobik dan Aerobik [5].

### 2.6.2 Jenis Digester

Potensi biogas di Indonesia sangat besar mulai dari proses pengomposan kotoran ternak dan limbah pertanian, pengolahan limbah cair dan residu proses produksi CPO [22]. Untuk memperoleh biogas dari bahan organik tersebut diperlukan suatu peralatan yang disebut digester *anaerob* atau digester tanpa udara.

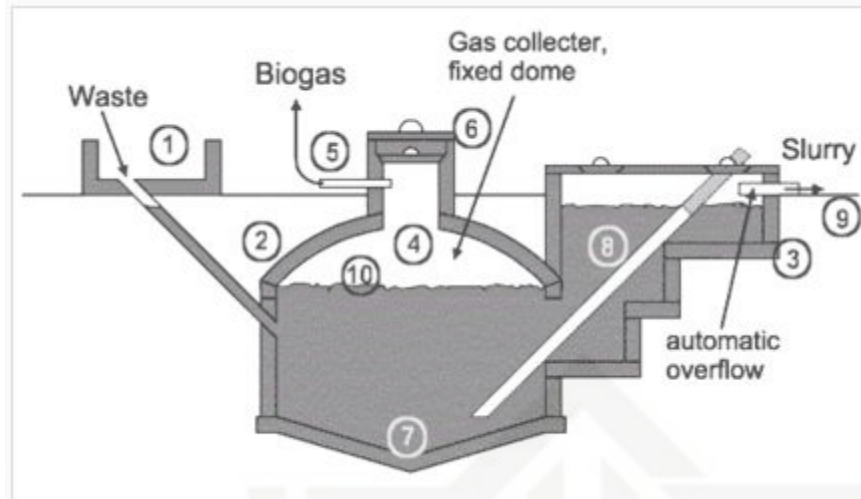
Pada digester terjadi proses penguraian material organik yang terjadi secara anaerob (tanpa udara). Pada umumnya, biogas dapat berbentuk pada hari ke 4-5 setelah digester diisi dan mencapai puncak pada hari ke 20-25. Ada tiga kelompok bakteri yang berperan dalam proses pembentukan biogas, yaitu:

- a. kelompok bakteri fermentatif, yaitu jenis *steptococci*, *bacteriodes*, dan beberapa jenis *enterobactericeae*.
- b. Kelompok bakteri *asetogenik*, yaitu *desulfovibrio*.
- c. Kelompok bakteri metana, yaitu dari jenis *mathanobacterium*, *mathanobacillus*, *methanosacaria*, dan *methanococcus*.

#### 1. Fixed Dome Digester

Digester *fixed dome* atau kubah tetap memiliki struktur terletak dibawah tanah dan beroperasi dalam model setengah *continou*. Struktur mencakup bagian yang bergerak dan pembuangan bahan yang uum terdiri dari batu dan semen. Teknologi ini tidak memiliki sistem pencampuran dan untuk alasan perlu untuk menghilangkan padatan sedimen yang ditangguhkan dari 2 sampai 3 kali per tahun.





**Gambar 2.4** Fixed Dome digester [28].

Dalam jenis digester ini, bahan baku dimasukkan dalam tangki pencampuran untuk kemudian lolos ke ruang pencernaan. Tempat penyimpanan biogas dibagian atas kubah dari digester. Ketika gas telah diproduksi, bubur atau *slurry* diarahkan ke tangki perpindahan. Bubur kembali ke ruangan digester setelah gas yang dikonsumsi. Gerakan ini menciptakan pencampuran substrat. Disain digester ini membuatnya cocok untuk suhu dingin, karena struktur bawah tanah dan memiliki sistem isolasi untuk menjaga suhu didalam digester [12]. Tabel berikut menjelaskan kelebihan dan kekurangan dari digester *fixed dome*.

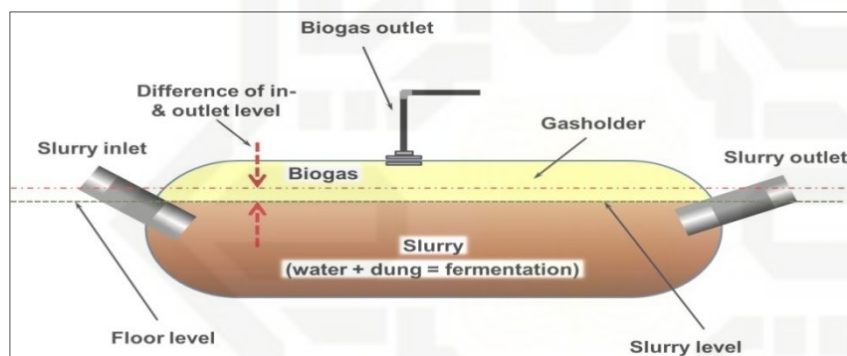
**Tabel 2.4** Kekurangan dan Kelebihan dari Digester *Fixed Dome* [23].

| Kelebihan   | Kekurangan   |
|---|--|
| a. Biaya investasi rendah<br>b. Waktu hidup sekitar 20 tahun<br>c. Tidak ada ruang dangkal diperlukan, karena struktur bawah tanah<br>d. Tekanan gas baik<br>e. Pencampuran substrat dalam digester menghindari akumulasi besar padatan di bawah digester | a. Sulit untuk membangun khususnya di daerah batuan dasar<br>b. Keterampilan teknis tinggi yang diperlukan untuk pembangunan agar menghindari kegagalan struktural dan kebocoran gas<br>c. Tinggi biaya bahan transportasi dibandingkan digester tubular |

**2. Plug Flow Bag Digester**

Teknologi ini juga dikenal sebagai tubular plastik digester. Sangat mudah untuk menerapkannya, mudah, dan teknologi secara luas terkenal didaerah pedesaan [23]. Digester tubular juga telah diadaptasi untuk daerah pegunungan untuk suhu rendah dan kondisi ekstrim. Digester tubular mudah menyesuaikan dengan lingkungan dan ketersediaan sumber.

Bahan yang umum digunakan untuk membangun digester tubular adalah *polyethylene*, tetapi juga (*geomembran*) HDPE (*high density polyethylene*) mulai digunakan. Digester HDPE lebih mahal dibandingkan *polyethylene* biasa tetapi mereka memiliki waktu hidup yang lebih lama 20 hingga 30 tahun. Digester terdiri dari tas tubular melalui mana lumpur mengalir dari *inlet* ke *outlet*. Biogas yang dikumpulkan di atas digester dengan pipa gas terhubung ke *reservoir*. Biogas melewati dari *reservoir* ke tujuan akhir mereka, misalnya dapur. Teknologi ini dihitung dengan sistem pemanas atau sistem pencampuran. Tekanan gas dari digester dapat diatur dengan menempatkan beban pada tas digester ini. Namun, ini harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kerusakan digester. Digester tubular yang rapuh dan karena itu perlu perlindungan dari radiasi matahari dan hewan. Rentang hidup dari digester ini bervariasi dari 2 sampai 5 tahun tergantung pada praktek pemeliharaan [23].



**Gambar 2.5** Plug Flow Bag Digester [23].

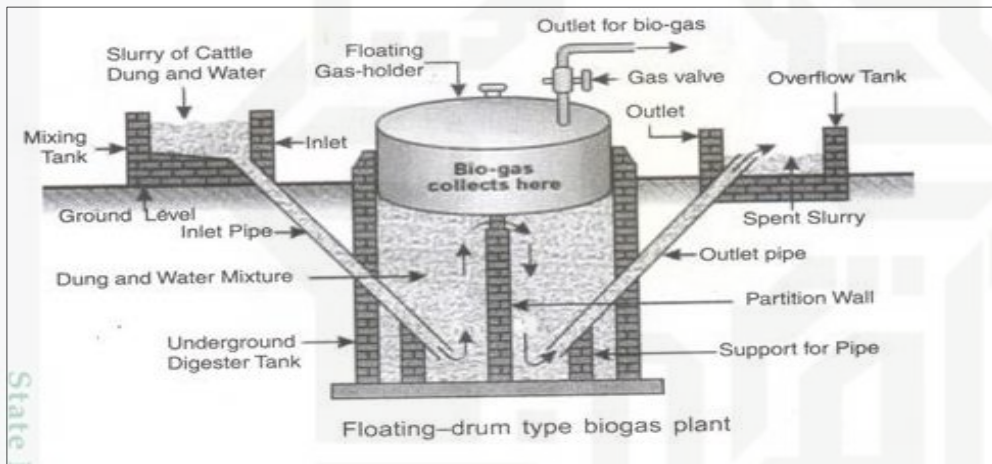
Di lokasi yang tinggi dan suhu rendah, perlu untuk melindungi digester untuk meminimalkan fluktuasi suhu pada malam hari. Untuk tujuan ini, digester plastik tubular dimakamkan diparit dan ditutup dengan rumah kaca. Umumnya, lama waktu digestifikasi dari 6- sampai 90 hari dibutuhkan untuk kondisi didaerah pergunungan yang dingin. Selanjutnya, volume *bio-digester* untuk kondisi dingin perlu lebih besar dibandingkan dari digester dilaksanakan di iklim yang hangat [23].

**Tabel 2.5** Kelebihan dan Kekurangan Digester Tubular [23].

| Kelebihan  | Kekurangan   |
|--|--|
| a. Biaya investasi rendah  | a. Membutuhkan perlindungan eksternal untuk menghindari kecelakaan yang dapat merusak digester |
| b. Mudah beradaptasi dengan cuaca dan daerah batuan dasar karena penggunaan atap | b. Membutuhkan <i>reservoir</i> gas ekstrenal  |
| c. Kapasitas volume bisa disesuaikan kecil hingga besar                          | c. Mudah untuk istirahat atau berhenti dan sulit untuk memperbaiki.                            |

### 3. Indian Floating Drum Digester

Desain *Indian Floating Drum Digester* mirip dengan digester *fix dome* akan tetapi memiliki perbedaan fungsi wadah gas terapung untuk mengumpulkan biogas. Sistem ini telah diterapkan untuk mengolah limbah makanan di India dan China. Struktur digester terdiri atas tangki pencampuran (digester beton) dengan dua kamar. Ruang-ruang dibagi oleh dinding partisi terhubung satu sama lain dibagian atas digester. Digester ini memiliki drum *stainless* silinder atau pemegang gas, dan tangki stop kontak melalui bubur atau *slurry* [24]. Selama proses tersebut, *substrat* atau bubur dicampur dalam tangki pencampuran dan diumpukan ke digester. Drum silinder mengapung di atas bubur mengumpulkan gas yang dihasilkan. Masalah ini diuraikan dalam ruang pertama dan setelah itu telah mencapai volume maksimal meluap ke ruangan berikutnya. Setelah itu bubur meninggalkan sistem dengan pipa *outlet* [24].



**Gambar 2.6** *Indian Floating Drum Digester* [25].

Biaya teknologi ini lebih tinggi dibandingkan dengan digester kubah *fixed dome* karena drum terapung terbuat dari baja [25]. Pemeliharaan rutin digester diperlukan pada lapisan penutup drum terapung harus dilakukan sekali pertahun untuk menghindari karat. Apabila dilakukan perawatan secara teratur digester dapat bertahan sampai 3-5 tahun di daerah lembab atau 8-12 tahun di lokasi kering [24]. Rata-rata umpan harian tergantung pada ukuran digester. Sebagai contoh, sebuah digester dari 2,5 m<sup>3</sup> memiliki OLR (*Organic Loading Rate*) dari 12,47 kg per hari ketika menggunakan limbah makanan [23].



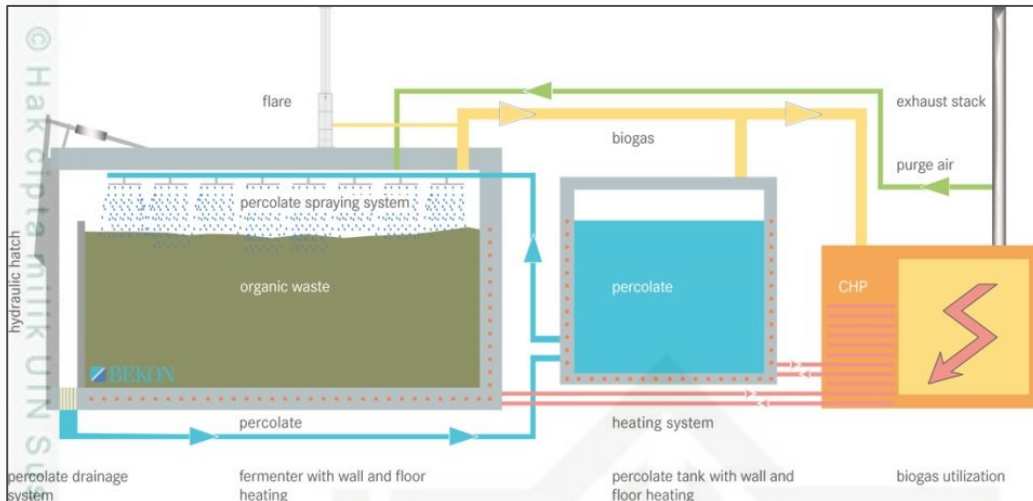
**Tabel 2.6** Kelebihan dan Kekurangan dari Digester *Indian Floating Drum* [23].

| Kelebihan  | Kekurangan  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Waktu hidup sekitar 15 tahun</li> <li>b. Tekanan konstan gas metan berat gendang</li> <li>c. Teknologi yang diterapkan di beberapa bagian dunia</li> <li>d. Kesalahan selama <i>construction</i> digester tidak mewakili masalah besar dalam operasi dan hasil gas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Sulit untuk membangun khusus di daerah batuan besar</li> <li>b. Keterampilan teknis tinggi diperlukan untuk konstruksi</li> <li>c. Teknologi mahal dibandingkan digester tubular</li> <li>d. Pemeliharaan berkelanjutan diperlukan untuk menghindari kerusakan di drum terapung.</li> </ul> |

#### 4. *Garage* Digester

Digester ini cocok untuk pengolahan bahan baku yang kering. Teknologi ini memiliki sistem yang lebih maju dan banyak digunakan di negara-negara Eropa [26]. Digester ini memiliki biaya investasi yang lebih tinggi pengolahan bahan baku. Hal ini dapat dirancang untuk pengolahan dari 5.000 ke 100.000 ton sampah organik per tahun [23].

*Gerage* digester memiliki proses fermentasi kering. *Gerage* digester mampu mengolah fraksi organik MSW, limbah pertanian dan limbah makanan. Teknologi ini kompak dan memiliki bentuk dan dirancang untuk menggunakan *wheel loader* untuk menghapus dan mengisi digester. Hal ini menghemat waktu dan membuat proses lebih efisien [26]. Teknologi ini menghitung dengan sistem terintegrasi untuk memanaskan dinding dan lantai dari digester, proses AD dilakukan dibawah suhu *mesophilic* (kira-kira 38°C). Digester dibangun dengan beton bertulang untuk menghindari kebocoran dari biogas. Proses fermentasi dalam digester antara 4-5 minggu. Setelah periode ini berlalu, digester akan dibersihkan untuk beban berikutnya. Waktu untuk melakukan operasi ini adalah satu hari kerja. Kemudian diangkut ke pencampuran, dimana sekitar 50% dipisahkan untuk pengomposan dan sisanya 50% dicampur dengan *substrat* segar. Proses pengisian bahan baru ini juga membutuhkan waktu satu hari. Semua operasi ini dilakukan dengan menggunakan *wheel loader* [26].



**Gambar 2.7** Garage Digester [23].

Gerage digester memiliki kelebihan dan kekurangan dari digester lainnya, seperti ditunjukkan pada tabel 2.7 berikut ini:

**Tabel 2.7** Kelebihan dan Kekurangan dari Digester Gerage [27].

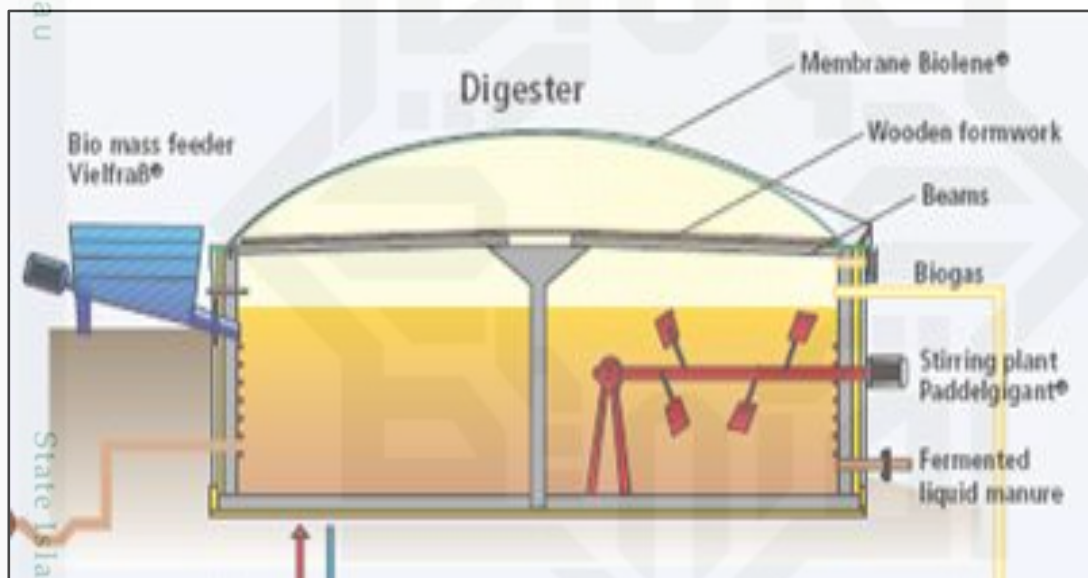
| Kelebihan  | Kekurangan   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Waktu hidup sekitar 30 tahun</li> <li>b. Tekanan gas konstan</li> <li>c. Suhu konstan didalam digester</li> <li>d. Perusahaan pemasok memberikan <i>training</i> dari personil</li> <li>e. Kontrol yang lebih baik dari proses <i>anaerobic digestion</i></li> <li>f. Memiliki konstruksi yang kokoh</li> <li>g. Mudah beradaptasi dengan lingkungan</li> <li>h. Kapasitas volume besar</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Biaya investasi tinggi</li> <li>b. Teknologi belum teruji di Indonesia</li> <li>c. Butuh perawatan dan biaya operasional yang besar karena menggunakan sistem <i>batch</i>.</li> </ul> |

### 5. Complete-Mix Digester

Jenis digester ini merupakan sistem aliran bahan baku secara *continous* (mengalir). Aliran bahan baku dan residu keluar pada selang waktu tertentu lama bahan baku selama dalam digester disebut dengan waktu retensi hidrolis (*hydraulic retention time*). Secara umumnya digester ini berbentuk tangki atau tabung yang dindingnya terbuat dari beton bertulang yang memungkinkan tidak terjadi kebocoran pada dindingnya dan untuk penampungan gasnya terbuat dari pasltik HDPE (high density polyethylene). Teknologi

digester *complete-mix* ini memiliki sistem yang lebih maju dan banyak digunakan dinegara-negara eropa [26]. Jenis ini memiliki biaya investasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi yang sebelumnya, tapi itu memungkinkan mengandalikan proses *anaerobic digestion* dalam cara yang lebih efisien dan juga memiliki kapasitas yang lebih besar untuk masukan bahan baku. Hal ini dapat dirancang untuk masukan bahan baku dari 5.000 hingga 100.000 ton sampah organik per tahun [23].

Digester *complete-mix* ini mampu mengolah fraksi organik MSW (*Municipal Solid Waste*), limbah pertanian dan limbah makanan. Teknologi ini menghitung dengan sistem terintegrasi untuk memanaskan dinding dan lantai dari digester mana proses AD dilakukan dibawah suhu *mesophilic* (kira-kira 38°C). Digester dibangun dengan beto bertulang untuk menghindari kebocoran dari biogas [23].



**Gambar 2.8** Complete-Mix Digester [26].

Proses fermentasi dalam digester ini minimal 17 hari dan maksimal 35 hari. Tergantung dari jenis teknologi pengaturan suhu yang digunakan. Digester ini perlu alat pengadukan untuk membuat semua bahan tercampur secara merata [26]. Kelebihan dan kekurangan dari digester *complete mix* ini dapat di lihat pada tabel 2.8 dibawah ini:

**Tabel 2.8** Kelebihan dan Kekurangan dari Digester *Complete-mix* [27].

| Kelebihan                          | Kekurangan                             |
|------------------------------------|--|
| a. Waktu hidup sekitar 30-40 tahun | a. Biaya investasi tinggi              |
| b. Tekanan gas konstan             | b. Teknologi belum teruji di Indonesia |
| c. Suhu konstan didalam digester   |  |



**Tabel 2.8** Kelebihan dan Kekurangan dai Digester *Complete-mix* (lanjutan) [27]

|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>d. Kontrol yang lebih baik dari proses <i>anaerobic digestion</i></li> <li>e. Memiliki konstruksi yang kokoh</li> <li>f. Mudah beradaptasi dengan lingkungan</li> <li>g. Kapasitas volume yang lebih besar</li> </ul> <p>Teknologi yang diterapkan di beberapa bagian dunia</p> |  |
|--|--|

### 2.6.2.1 Komponen Utama Digester

Komponen pada biodigester sangat bervariasi, tergantung pada jenis digester yang digunakan. Tetapi, secara umum biodigester terdiri dari komponen-komponen utama sebagai berikut:

- a. Saluran masuk *slurry* (kotoran segar). Saluran ini digunakan untuk memasukan *slurry* (campuran kotoran ternak dan air) kedalam reaktor utama. Pencampuran ini berfungsi untuk memaksimalkan potensi biogas, memudahkan pengaliran, serta menghindari terbentuknya endapan pada saluran masuk.
- b. Saluran keluar residu. Saluran ini digunakan untuk mengeluarkan kotoran yang telah difermentasi oleh bakteri. Saluran ini bekerja berdasarkan prinsip kesetimbangan tekanan hidrostatik. Residu yang keluar pertama kali merupakan *slurry* masukan yang pertama setelah retensi. *Slurry* yang keluar sangat baik untuk pupuk karena mengandung kadar emisi nutrisi yang tinggi.
- c. Katup pengaman tekanan (*control valve*). Katup pengaman ini digunakan sebagai pengatur tekanan gas dalam biodigester. Katup pengaman ini menggunakan prinsip pipa T. Bila tekanan gas dalam saluran gas lebih tinggi dari kolam air, maka gas akan keluar melalui pipa T, sehingga tekanan dalam biodigester akan turun.
- d. Sistem pengaduk. Pengadukan dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya:
  1. Pengadukan mekanis
  2. Sirkulasi *substrat* biodigester, atau
  3. Sirkulasi ulang biogas ke atas biodigester menggunakan pompa

Pengadukan ini bertujuan untuk mengurangi pengendapan dan meningkatkan produktivitas digester karena kondisi *substrat* yang seragam.

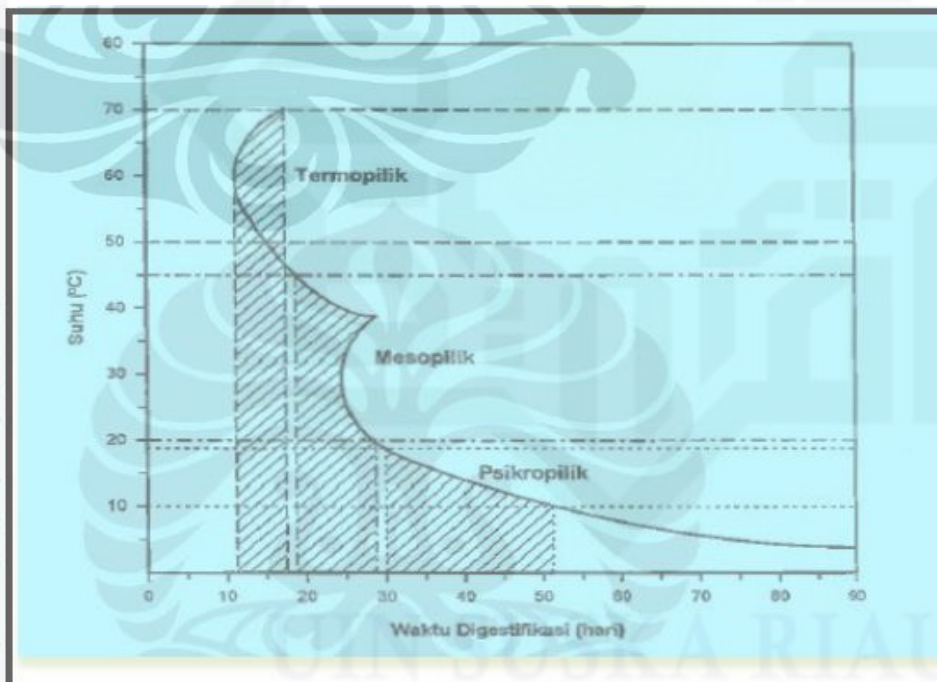
- e. Saluran gas. Saluran gas ini disarankan terbuat dari bahan polimer untuk menghindari korosi. Untuk pembakaran gas pada tungku, pada ujung saluran pipa bisa disambung dengan pipa baja anti karat.
- f. Tangki penyimpanan gas. Terdapat dua jenis tangki penyimpanan gas, yaitu tangki bersatu dengan reaktor (*floating dome*) dan terpisah dengan reaktor (*fixeddome*). Untuk tangki terpisah, konstruksi dibuat khusus sehingga tidak bocor dan tekanan yang terdapat dalam tangki seragam, serta dilengkapi *H<sub>2</sub>S removal* untuk mencegah korosi [12].

### 2.6.2.2 Waktu Digestifikasi

Waktu digestifikasi *anaerobic* didalam digester dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu suhu dan rasio C/N.

#### a. Suhu

Hubungan waktu digestifikasi dan suhu dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



**Gambar 2.9** Waktu digestifikasi *anaerobic* [31].

Ada tiga kondisi digestifikasi *anaerobic* berdasarkan suhu digesternya, antara lain:

1. Kondisi psikoprilik. Pada kondisi ini suhu digester antar 10-18°C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 30-52 hari.
2. Kondisi mesopilik. Pada kondisi ini suhu digester antara 20-45°C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 18-28 hari. Dibandingkan dengan digester kondisi termopilik,

digester kondisi mesopilik pengoperasiannya lebih mudah, tapi biogas yang dihasilkan lebih sedikit dan volume digester lebih besar.

3. Kondisi termopilik. Pada kondisi ini suhu digester antara 50-70°C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 11-17 hari. Digester pada kondisi termopilik menghasilkan banyak biogas, tapi biaya investasinya tinggi dan pengoperasiannya rumit [12].

#### b. Rasio C/N

Untuk menentukan bahan organik digester adalah dengan melihat rasio atau perbandingan antara karbon dan nitrogen. Beberapa percobaan menunjukkan bahwa metabolisme bakteri *anaerobic* akan baik pada rasio C/N antara 20-30. Jika rasio C/N tinggi, nitrogen akan cepat dikonsumsi bakteri *anaerobic* guna memenuhi kebutuhan proteinnya, sehingga bakteri tidak akan bereaksi kembali saat kandungan karbon tersisa. Jika rasio C/N rendah, nitrogen akan terlepas dan berkumpul membentuk amoniak sehingga akan meningkatkan nilai pH bahan. Nilai pH yang lebih tinggi dari 8,5 akan dapat meracuni bakteri *anaerobic*. Untuk menjaga rasio C/N, bahan organik rasio tinggi dapat dicampur bahan organik rasio C/N rendah.

Ada dua kali retensi yang signifikan dalam digester *anaerobic*, yaitu: padatan waktu retensi (SRT) dan waktu retensi hidrolis (HRT). SRT adalah rata-rata waktu bakteri (padatan) berada di digester *anaerobic*. HRT adalah waktu yang dibutuhkan air limbah atau lumpur dalam digester *anaerobic*.

Waktu generasi, yaitu: waktu yang dibutuhkan untuk populasi bakteri berkembang. Pembentukan bakteri metana relatif lebih panjang dibandingkan dengan bakteri *aerob* dan *anaerob fakultatif* bakteri. SRT khas untuk digester *anaerobic* adalah lebih dari 12 hari. Sedangkan bila waktunya kurang dari 10 hari tidak dianjurkan, karena pada penahanan kurang dari 10 hari perkembangan bakteri didalam digester belum terbentuk secara sempurna. SRT tidak terlalu dipengaruhi oleh sifat air limbah atau lumpur didalam digester, kecuali air limbah atau lumpur beracun bagi bakteri [12].

Nilai SRT yang tinggi menguntungkan untuk digester *anaerobic*. Nilai yang tinggi pada SRT dapat memaksimalkan kapasitas penghapusan, mengurangi volume digester, dan menyediakan penyangga kapasitas untuk perlindungan terhadap efek dari beban kejutan dan senyawa beracun di air limbah dan lumpur. Nilai SRT tinggi juga membantu untuk mengizinkan biologis aklimatisasi untuk senyawa beracun. Nilai yang tinggi pada SRT dapat dicapai melalui dua langkah yaitu: volume digester dapat ditingkatkan, dan konsentrasi bakteri (padatan) dapat ditingkatkan.



Konversi padatan volatil untuk produk gas dalam digester *anaerobic* dikendalikan oleh HRT. Nilai HRT mempengaruhi laju dan luasnya produksi metana. Dari semua operasional kondisi dalam sebuah digester *anaerobic*, misalnya, suhu, padatan konsentrasi, dan padatan volatil isi dari lumpur pakan, KRT merupakan operasional yang penting dalam mempengaruhi konversi padatan volatil untuk produk gas.

Pada hari ke 1-24 terdapat beda nyata atau memberikan pengaruh terhadap volume produksi biogas limbah cair kelapa sawit, kondisi *thermophilic* dan pada kondisi *mesophilic*, hal ini disebabkan karena pada hari tersebut telah berlangsung *lag phase* dan *log or exponential growth phase*, dimana pada fase-fase tersebut bakteri dalam merombak bahan-bahan organik untuk menghasilkan biogas membutuhkan makanan untuk pertumbuhan selnya. Sedangkan pada hari ke 25-70 telah berlangsung *stationary phase* dimana pada hari tersebut makanan hampir habis dan kematian bakteri akan terus meningkat sehingga tercapai keadaan dimana jumlah bakteri yang mati dan tumbuh mulai berimbang. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan tandan kosong kelapa sawit memberikan pengaruh sampai hari ke 24 sedangkan pada hari ke 25-70 tidak memberikan pengaruh terhadap volume produksi biogas limbah cair kelapa sawit [12].

HRT berhubungan dengan volume digester dan volume *substrat* yang masuk persatuan waktu, meningkatnya *organic loading rate* akan mengurangi HRT, waktu retensi harus cukup lama untuk memastikan bahwa jumlah mikroorganisme yang keluar bersama dengan *effluent* tidak lebih tinggi dari jumlah mikroorganisme yang direproduksi. HRT yang singkat memberikan laju aliran *substrat* yang baik, namun hasil gas yang diperoleh akan lebih rendah. Dengan mengetahui HRT yang ditargetkan, jumlah *input substrat* dan laju dekomposisi *substrat* maka dapat dibuat perhitungan untuk volume tangki digester [12].

### 2.6.2.3 Disain Digester

Disain digester tergantung perhitungan potensi biogas yang dihasilkan, ukuran tangki digester biogas tergantung dari jumlah, kualitas dan jenis limbah organik yang tersedia dan temperatur saat proses fermentasi *anaerobic*. Jumlah bahan baku biogas yang dimasukan dalam digester terdiri dari sampah organik dan air, sehingga pemasukan bahan baku sangat tergantung dengan seberapa banyak air yang dimasukan kedalam digester untuk mencapai kadar bahan baku padatannya (TS) sekitar 8%. Pencampuran bahan organik untuk kotoran hewam dengan air dibuat perbandingan 1:3 dan 2:1. Sampah organik pasar relatif lebih banyak mengandung air sehingga perbandingan pencampuran antar sampah organik dengan air 1:2, untuk perhitungan ini dapat didasarkan pada jumlah COD limbah POME [3].

Dikarenakan perancangan PLTBG ini dilakukan pada tahun 2020, maka diperlukan prediksi untuk mengetahui jumlah TBS yang diolah dan kandungan COD ditahun 2020. Disin penulis menggunakan model regresi linier sederhana. Perkiraan jumlah TBS dan kandungan COD dapat dihitung dengan persamaan.

$$P_x (2020) = P_a (1+r)^x \tag{2.1}$$

Dimana :

$P_x$  = variabel tidak tetap (banyak tahun)

$P_a$  = nilai variabel yang akan diprediksi (total jumlah TON TBS dalam periode tahun).

$r$  = kenaikan nilai COD (tahun awal operasi)

Dalam mendisain digester yang di perlukan adalah menghitung potensi energi yang ada pada limbah cair kelapa sawit. Perhitungan pembangkit energi biogas dapat dilakukan dengan menggunakan nilai dari parameter *input* yang didapat dari pabrik. Parameter itu meliputi jam operasi per hari, hari operasi dalam setahun, tandan buah segar yang diolah dalam setahun, rasio POME yang dihasilkan TBS yang diolah, dan kadar COD limbah cair yang di analisa dengan *Spektrofot meter*. Dari pengertian diatas di dapat persamaan:

$$\text{Bahan baku harian} = \frac{\text{total TBS yang diolah} \left(\frac{\text{ton}}{\text{tahun}}\right)}{\text{hari operasi dalam setahun}} \tag{2.2}$$

$$\text{Aliran limbah cari harian} = \text{volume limbah cair per hari} \times \text{rasio POME} \tag{2.3}$$

$$\text{COD loading} = \text{COD} \times \text{aliran limbah} \tag{2.4}$$

$$\text{Produksi CH}_4 = \text{COD loading} \times \text{COD}_{eff} \times \frac{\text{CH}_4}{\text{COD}} \tag{2.5}$$

$$\text{Kapasitas pembangkit} = \text{produksi CH}_4 \times \text{CH}_{4,ev} \times \text{Boiler}_{eff} \tag{2.6}$$

dimana:

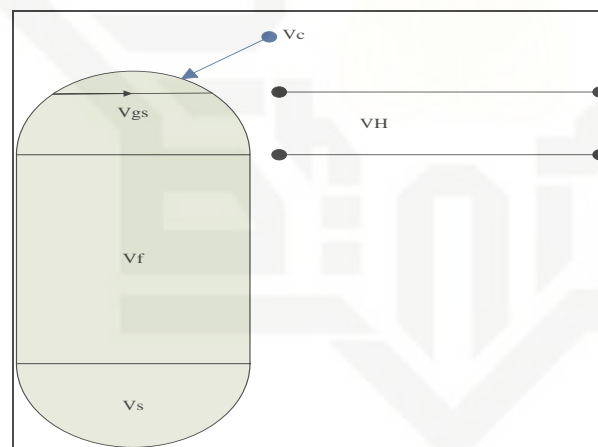
- bahan baku harian = produksi per hari (ton TBS/hari)
- aliran limbah cair harian = limbah cair yang dihasilkan (m<sup>3</sup>/hari)
- COD *loading* = kandungan COD (kg COD/hari)
- Produksi CH<sub>4</sub> = CH<sub>4</sub> yang dihasilkan dari COD (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/hari)
- Kapasitas pembangkit = (MWe)
- Rasio POME = rasio volume POME yang dihasilkan per TBS yang diolah  
 $\text{POME} = \text{TBS} (\text{m}^3 \text{ POME}) = (\text{ton TBS}) [5].$

Persamaan diatas dihitung berdasarkan asumsi parameter operasi tabel 2.6 dibawah berikut ini:

**Tabel 2.9** Asumsi Parameter Operasi [5].

| Parameter                                   | Simbol                | Nilai     | Satuan                                  | Keterangan                              |
|---|-----------------------|-----------|---|---|
| Rasio konversi CH <sub>4</sub> terhadap COD | CH <sub>4</sub> /COD  | 0,35-0,45 | Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg COD | Volume metana yang dihasilkan COD       |
| Efisiensi COD                               | COD <sub>eff</sub>    | 80-95     | %                                       | Persentase COD yang dirubah ke metana   |
| Nilai energi metana                         | CH <sub>4,ev</sub>    | 35,5-40,5 | MJ/m <sup>3</sup>                       | Kandungan energi metana                 |
| Rata-rata efisiensi kelistrikan             | Boiler <sub>eff</sub> | 50-55     | %                                       | Efisiensi mesin konversi energi listrik |

Sesuai dengan standar nilai energi metan adalah 35,5, rasio konversi CH<sub>4</sub> terhadap COD adalah 0,35. Dibawah ini gambar bentuk penampang silinder digester *anaerob* (*cylindrical shaped bio-gas digester body*):



**Gambar 2.9** Penampang Digester Biogas Silinder [31].

Total volume digester

$$V = V_c + V_{gs} + V_f + V_s \quad (2.7)$$

Berdasarkan jumlah volume bahan baku (Q), maka dapat ditentukan volume kerja digester (*working volume digester*) yang merupakan penjumlahan volume ruangan penyimpanan (V<sub>gs</sub>) dan volume ruangan fermentasi (V<sub>s</sub>) [31].

$$\text{Volume kerja digester} = V_{gs} + V_f \quad (2.8)$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa

$$V_{gs} + V_f = Q \times \text{HRT} \quad (2.9)$$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Keterangan:

$V_c$  = volume ruangan penampungan gas (*gas collecting chamber*)

$V_{gs}$  = volume ruangan penyimpanan gas (*gas storage chamber*)

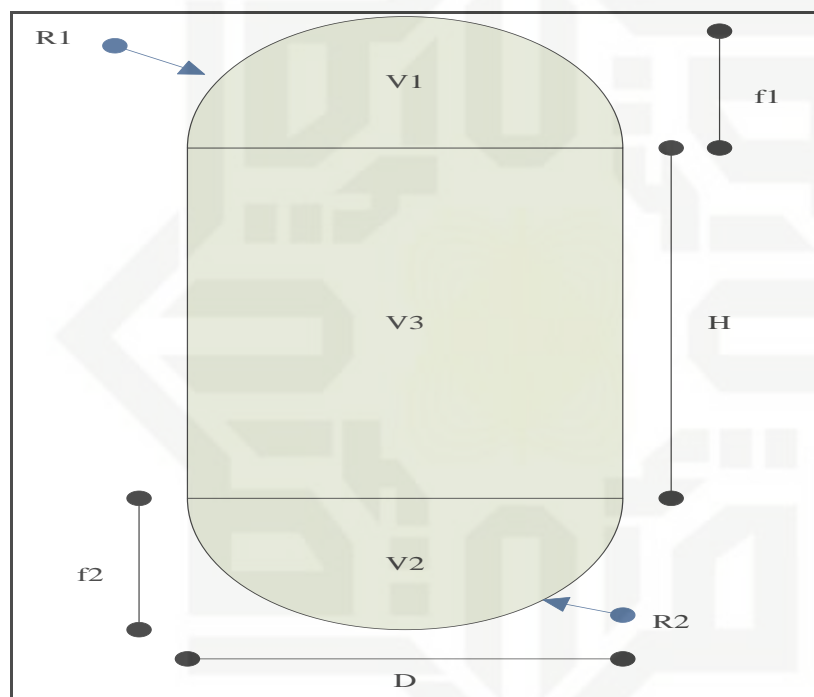
$V_f$  = volume ruangan fermentasi (*fermentation chamber*)

$V_H$  = volume ruangan hidrolik (*hydraulic chamber*)

$V_s$  = volume lapisan penampungan lumpur (*sludge layer*)

HRT = waktu dihefifikasi

Untuk mendisain tangki digester biogas, dapat dilihat pada gambar dimensi geometrikal tangki digester dibawah berikut ini:



**Gambar 2.10** Dimensi Geometrikal Tangki Digester [31].

Berdasarkan gambar 2.11 diatas dimensi geometrikal tangki digester diatas ketentuan bentuk geometrikal ruangan-ruangan digester sebagai berikut:

**Tabel 2.10** Dimensi Geometrikal Ukuran Tangki Digester Silinder [31].

| Volume (isi)                          | Dimensi Geometrikal  |
|---------------------------------------|----------------------|
| $V_c \leq 5\%V$                       | $D = 1,3078 V^{1/3}$ |
| $V_s \leq 15\%V$                      | $V_1 = 0,0827 D^3$   |
| $V_{gs} + V_f = 80\% V$               | $V_2 = 0,05011 D^3$  |
| $V_{gs} = 0,5 (V_{gs} + V_f + V_s) K$ | $V_3 = 0,3142 D^3$   |

**Tabel 2.10** Dimensi Geometrikal Ukuran Tangki Digester Silinder (*lanjutan*) [31].

|  |   |
|--|---|
| Dimana K = rasio konversi CH <sub>4</sub> terhadap COD | $R1 = 0,725 D$<br>$R2 = 1,0625 D$<br>$F1 = D/5$<br>$F2 = D/8$<br>$H = \sqrt{3/3, 14 D}$ |
| Tinggi digester = H + F1 + F2                          |   |

### 2.6.3 Pemurnian Biogas (Purifikasi Biogas)

Biogas merupakan salah satu produk dari teknologi hijau yang sekarang sedang dikembangkan. Hal ini dikarenakan gas yang dihasilkan dari proses biologi (*anaerobic digester*) mampu menghasilkan gas-gas seperti CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O dan gas-gas lain. Dalam hal ini tentu saja yang dimanfaatkan adalah gas metana (CH<sub>4</sub>), karena CH<sub>4</sub> memiliki nilai kalor atau panas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar.

Kemurnian CH<sub>4</sub> yang dihasilkan dari biogas tersebut menjadi pertimbangan yang sangat penting, hal ini dikarenakan berpengaruh terhadap nilai kalor/panas yang dihasilkan. Sehingga CH<sub>4</sub> yang dihasilkan perlu dilakukan pemurnian terhadap *impurities-impurities* yang lain. Dalam hal ini *impurities* yang berpengaruh terhadap nilai kalor atau panas adalah CO<sub>2</sub>, keberadaan CO<sub>2</sub> dalam gas CH<sub>4</sub> sangat tidak diinginkan, hal ini dikarenakan semakin tinggi kadar CO<sub>2</sub> dalam CH<sub>4</sub> maka akan semakin menurunkan nilai kalor CH<sub>4</sub> dan sangat mengganggu dalam proses pembakaran. Hal ini menyebabkan kemurnian CH<sub>4</sub> menjadi rendah [33].

Pemurnian biogas mempunyai berbagai metode yang digunakan di industri, pemilihan teknologi ini berdasarkan tingkat kemurnian dan harga, dan jenis-jenis teknologi pemurnian biogas [34].

#### 1. Pemurnian Biogas Menggunakan *Water Scrubber* (ws)

Pemurnian biogas menggunakan *water scrubbing* berdasarkan proses *absorpsi* fisis. Pemurnian ini dilakukan dengan prinsip kontak gas-cair secara arus berlawanan pada suhu lingkungan dan tekanan 8 bar. Gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S terlarut ikut didalam cairan *absorben* melalui aliran bawah kolom. Hal ini disebabkan gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S lebih baik dibandingkan gas CH<sub>4</sub> didalam air. Air yang mengandung CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S kemudian diregenerasi ke dalam kolom *stripper*.

**Tabel 2.11** Dimensi *Absorber* dan *Stripper* Pemurnian Biogas *Water Scrubber* [34].

| Kapasitas (ton/hari) | Jumlah Biogas (m <sup>3</sup> /hari) | <i>Absorber</i>              | <i>Stripper</i>            |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 4                    | 300                                  | D = 5,70 cm<br>H = 1,52 m    | D = 12,42 cm<br>H = 0,91 m |
| 20                   | 1.500                                | D = 12,73 cm<br>H = 3,05 m   | D = 27,78 cm<br>H = 1,67 m |
| 100                  | 7.500                                | D = 28,42 cm<br>H = 5,68 m   | D = 62,11 cm<br>H = 3,21 m |
| 500                  | 37.500                               | D = 63,62 cm<br>H = 11,45 m  | D = 138 cm<br>H = 5,56 m   |
| 2.500                | 187.500                              | D = 100,42 cm<br>H = 22,72 m | D = 300 cm<br>H = 12,40 m  |

## 2. Pemurnian Biogas Menggunakan MEA atau DEA

Pemurnian biogas menggunakan prinsip *Chemical Absorption* melibatkan reaksi kimia antara gas dan cairan *absorben*. *Absorben* yang umumnya digunakan adalah *amina* seperti *mono-ethanolamin* (MEA), *di-ethanolamin* (DEA), *metil di-ethanolamin* (MDEA) serta senyawa alkali seperti sodium, potasium dan kalsium hidroksida. Alasan pemilihan MEA dan DEA adalah kondisi proses yang dapat dilakukan pada suhu lingkungan dan tekanan 1 bar, namun untuk proses regenerasi *absorben*, proses membutuhkan panas hingga suhu 90–120 °C. Hal ini sangat menguntungkan saat aplikasi di lapangan untuk skala kecil.

**Tabel 2.12**

| Kapasitas (ton/hari) | Jumlah Biogas (m <sup>3</sup> /hari) | <i>Absorber</i>             | Kolom Regenerasi          |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 4                    | 300                                  | D = 5,40 cm<br>H = 1,44 m   | D = 1,36<br>H = 2,72 m    |
| 20                   | 1.500                                | D = 12, 12 cm<br>H = 2,90 m | D = 2,65 m<br>H = 5,30 m  |
| 100                  | 7.500                                | D = 27,12 cm<br>H = 5,50 m  | D = 3,00 m<br>H = 10,96 m |



**Tabel 2.12** Dimensi *Absorber* dan Kolom Regenerasi Pemurnian Biogas MEA  
(*lanjutan*)[34].

|       |         |                              |                           |
|-------|---------|------------------------------|---------------------------|
|       |         | H = 11,35 m                  | H = 20,56 m               |
| 2.500 | 187.500 | D = 100,32 cm<br>H = 22,54 m | D = 3,00 m<br>H = 28,56 m |

Pemurnian biogas dengan menggunakan kolam pemurnian DEA dapat di lihat pada tabel 2.13 berikut:

**Tabel 2.13** Dimensi *Absorben* dan Kolom Pemurnian Biogas DEA [34].

| Kapasitas (ton/hari) | Jumlah Biogas (m <sup>3</sup> /hari) | <i>Absorber</i>              | Kolom Regenerasi          |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 4                    | 300                                  | D = 6,14 cm<br>H = 1,44 m    | D = 2,00 m<br>H = 4,00 m  |
| 20                   | 1.500                                | D = 13,72 cm<br>H = 3,15 m   | D = 3,00 m<br>H = 9,18 m  |
| 100                  | 7.500                                | D = 30,68 cm<br>H = 5,92 m   | D = 3,00 m<br>H = 15,52 m |
| 500                  | 37.500                               | D = 67,68 cm<br>H = 11,75 m  | D = 3,00 m<br>H = 25,67 m |
| 2.500                | 187.500                              | D = 100,73 cm<br>H = 23,12 m | D = 3,00 m<br>H = 33,54 m |

3. Pemurnian Biogas Menggunakan *Pressure Swing adsorption* (PSA).

Metode *pressure swing adsorption* melibatkan transfer zat terlarut dalam *fluida* menuju permukaan dari material padat, dimana penjeratan zat terlarut akibat gaya fisis atau gaya *van der Waals* secara selektif. Bahan yang digunakan sebagai *adsorben* di antaranya *zeolit*, karbon aktif atau silika. Sebelum dilakukan metode *pressure swing adsorption*, sebaiknya biogas sudah lebih dulu dihilangkan gas H<sub>2</sub>S bersifat racun bagi *adsorben* dan sulit diregenerasi. Untuk menghilangkan H<sub>2</sub>S dapat dilakukan dengan *absorpsi* menggunakan *iron oxide* (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [34].

**Tabel 2.14** Dimensi Kolom *Adsorption* Pemurnian Biogas *Pressure Swing Adsorption* [34].

| Kapasitas (ton/hari) | Jumlah Biogas (m <sup>3</sup> /hari) | Absorber                     |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 4                    | 300                                  | D = 6,50 cm<br>H = 1,20 cm   |
| 20                   | 1.500                                | D = 11,76 cm<br>H = 25 cm    |
| 100                  | 7.500                                | D = 20,53 cm<br>H = 41,96 cm |
| 500                  | 37.500                               | D = 35,10 cm<br>H = 70,21 cm |
| 2.500                | 187.500                              | D = 60,03 cm<br>H = 100,2 cm |

4. Pemurnian Biogas Menggunakan *Cryogenic Separation* (CS).

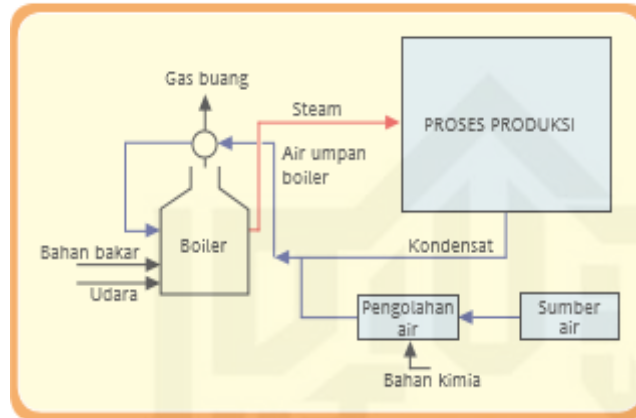
Metode *Cryogenic Separation* pada pemurnian biogas melibatkan pemisahan campuran gas dengan cara kondensasi dan destilasi pada suhu sangat rendah. Proses ini memiliki keuntungan yaitu menghasilkan komponen murni dalam bentuk cairan yang mudah dipindahkan namun biaya proses ini cukup tinggi. Dalam pemisahan ini biogas ditekan hingga 40 bar suhu -80°C. Kompresi ini dilakukan dari *multi-stage* dan *inter-cooling*.

**Tabel 2.15** Dimensi Menara Destilasi Pemurnian Biogas *Cryogenic Separation* [34].

| Kapasitas (ton/hari) | Jumlah Biogas (m <sup>3</sup> /hari) | Absorber                 |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 4                    | 300                                  | D = 0,30 m<br>H = 1,5 cm |
| 20                   | 1.500                                | D = 0,50 m<br>H = 2,5 m  |
| 100                  | 7.500                                | D = 1,1 m<br>H = 5,2 m   |
| 500                  | 37.500                               | D = 1,6 m<br>H = 8,2 m   |

### 2.6.4 Ketel Uap atau Boiler

Ketel uap atau *boiler* merupakan salah satu peralatan industri yang menghasilkan *steam* (uap/kukus) yang akan digunakan sebagai pemanas pada proses-proses produksi di industri.



**Gambar 2.11** Prinsip Kerja Boiler [14].

Pembakaran bahan bakar seperti batu bara, bahan bakar minyak, gas, ataupun kayu akan menghasilkan panas yang digunakan untuk memanaskan air menjadi *steam*. *Steam* yang dihasilkan oleh ketel uap kemudian dialirkan melalui sistem perpipaan ke peralatan proses yang membutuhkan pemanasan. Setelah digunakan pada proses produksi, *steam* akan terkondensasi, kemudian kondensat tersebut akan dikembalikan kepada ketel uap untuk dipanaskan kembali [14].

Dari proses pembakaran di ketel uap, akan dihasilkan gas buang, yang mengandung gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang merupakan gas rumah kaca. Selain itu gas buang dapat pula mengandung polutan misalnya gas karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), partikel, logam berat, dan dioksin yang dapat mencemari lingkungan. Ketel uap ramah lingkungan adalah ketel uap yang efisien dan menghasilkan emisi polutan yang rendah. Selain itu, beberapa peralatan lainnya dalam sistem ketel uap adalah sistem pengolahan air umpan ketel uap, peralatan pemanfaatan sisa panas (*heat recovery*), dan peralatan pengolahan gas buang untuk mengurangi emisi polutan [14].



Permasalahan sering terjadi pada ketel uap biasanya :

a. pembentukan kerak

Terbentuknya kerak pada dinding ketel uap terjadi akibat adanya mineral-mineral pembentukan kerak, seperti ion-ion  $Ca_2$ ,  $Mg_2$ , dan akibat pengaruh gas penguapan.

b. Peristiwa Korosi

Korosi dapat disebabkan oleh oksigen dan karbon dioksida yang terdapat dalam uap yang terkondensi. Korosi merupakan peristiwa logam kembali ke bentuk asalnya dalam misalnya besi menjadi oksida besi, aluminium dan lainnya.

c. Pembentukan Deposit

Deposit merupakan peristiwa pengumpulan zat dalam air umpan ketel uap yang disebabkan oleh adanya zat padat tersuspensi misalnya oksida besi, oksida tembaga. Peristiwa ini juga bisa disebabkan oleh kontaminasi uap dari produk hasil proses produksi.

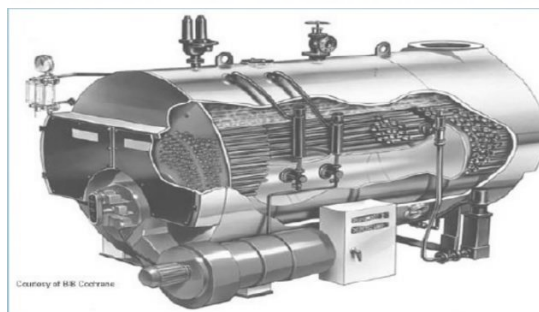
d. Kontaminasi Uap (*steam carryover*)

Ketika air ketel uap mengandung garam terlarut dan zat tersuspensi dengan konsentrasi tinggi, ada kecenderungan untuk membentuk busa secara berlebihan sehingga dapat menyebabkan *steam carryover* zat padat dan cairan pengotor ke dalam uap. *Steam carryover* terjadi jika mineral-mineral dari ketel ikut keluar bersama dengan uap ke alat-alat seperti *superheater*, turbin [17].

Adapun jenis-jenis dari ketel uap adalah sebagai berikut:

a. Ketel Pipa Api (*fire tube boiler*)

Pada ketel pipa api, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan ketel ada di dalam *shell* untuk dirubah menjadi *steam*. Ketel pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* 14.000 kg/jam dengan tekanan 18 kg/cm<sup>2</sup>. Ketel pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, biogas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar ketel pipa api dikonstruksikan sebagai ‘paket’ boiler (dirakit pabrik) untuk semua bahan bakar.

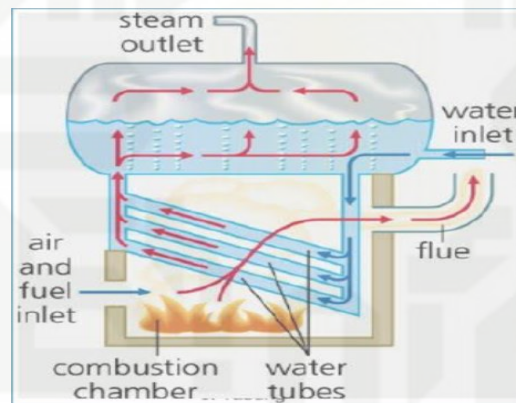


Gambar 2.12 Ketel Uap Pipa Api [40].

b. Ketel Uap Pipa Air (*water tube boiler*)

Pada ketel uap pipa air, air diumpungkan ketel uap melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk *steam* pada daerah uap dalam drum. Ketel uap ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Ketel uap yang modern dirancang dengan tekanan sangat tinggi. Banyak ketel uap pipa air yang dikonstruksikan secara paket jika digunakan bahan bakar minyak bakar dan biogas. Untuk ketel uap pipa air menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel uap pipa air sebagai berikut:

1. *Fored, include* dan *balanced draft* membantu untuk meningkatkan efisiensi pembakaran.
2. Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari *plant* pengolahan air.
3. Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.



**Gambar 2.13** Ketel Uap Pipa Air [40].

Dalam penelitian ini akan digunakan jenis ketel uap pipa air (*water tube boiler*).



**Gambar 2.14** Ketel Uap Pipa Air (*Water Tube Boiler*) [29].

### 2.6.4.1 Konsep Penilaian Ketel Uap

Ketel uap ramah lingkungan merupakan ketel uap yang memiliki efisiensi tinggi dan emisi yang rendah. Berikut adalah kriteria-kriteria ketel uap yang dianggap ideal sesuai energi bersih.

#### 1. Penilaian Ketel Uap

Penilaian sebuah ketel uap dapat dilakukan pada saat perancangan ketel uap baru maupun modifikasi ketel uap lama. Untuk modifikasi ketel uap lama, dapat dilakukan penilaian bagi ketel uap terpasang dan bagi ketel uap termodifikasi, sehingga dapat dilihat peningkatan nilai setelah modifikasi. Pada penelitian ini akan dilakukan pembelian ketel uap baru [14].

Jenis bahan bakar terutama didasarkan pada keberlanjutan dan emisi CO<sub>2</sub>. Biogas merupakan bahan bakar acuan (*benchmark*) karena bersifat berkelanjutan (*sustainable*). Bahan bakar biomassa maupun minyak bakar berbasis biomassa (*bio-oil*) mendapat penalti (disebut “*gap*”) terendah, sehingga ketel uap berbahan bakar tersebut akan mendapatkan nilai yang tinggi. *Gap* untuk masing-masing jenis bahan bakar adalah sebagai berikut.

**Tabel 2.16** *Gap* Untuk Jenis Bahan Bakar [14].

| Bahan bakar Berbasis Biomassa              |            |  |
|--|------------|--|
| Jenis Bahan Bakar                          | <i>Gap</i> | Keterangan   |
| Biogas                                     | 0          | Contohnya biogas yang diperoleh dari pengolahan limbah ternak, pengolahan air limbah, dll.   |
| <i>Pure biomass</i>                        | -40        | Biomassa “murni” misalnya serpihan kayu maupun kulit kayu, cangkang sawit, dsb yang belum tercampur dengan bahan <i>non-organic</i> .  |
| <i>Waste biomass</i>                       | -40        | Limbah biomassa adalah biomassa yang telah melalui suatu proses, contohnya <i>sludge</i> hasil instalasi pengolahan air limbah, <i>fraksi</i> biomassa dari limbah domestik. |
| <i>Bio-oil</i>                             | -40        | <i>Bio-oil</i> merupakan minyak bakar berbasis biomassa, seperti <i>biodiesel</i> dan <i>bioethanol</i> .  |
| <i>Bio-ethanol</i>                         | -40        | Hasil fermentasi biomassa  |
| <i>Biodiesel (fatty acid methyl ester)</i> | -44        | Merupakan hasil transesterilisasi minyak nabati dengan metanol.  |

Untuk ketel uap yang menggunakan campuran bahan bakar, maka perhitungan *gap* dilakukan berdasarkan persentase campuran bahan bakar berdasarkan nilai bakarnya.



$$Gap = (1-f) G_1 + G_2 \quad (2.10)$$

$f$  = fraksi penggunaan bahan bakar sekunder, berdasarkan nilai bakar (HHV)

$$f = \frac{w \cdot HHV_2}{(1-w) \cdot HHV_1 + w \cdot HHV_2} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$w$  = fraksi massa bahan bakar sekunder terhadap total massa bahan bakar

$HHV_1$  = HHV bahan bakar utama, kJ/kg

$HHV_2$  = HHV bahan bakar sekunder, kJ/kg [14].

Analisis ultimat bahan bakar dan HHV digunakan untuk perhitungan efisiensi ketel uap. Apabila analisis ultimat dari bahan bakar yang digunakan tidak tersedia, nilai *default* masing-masing bahan bakar dapat digunakan [14].

## 2. Efisiensi

Efisiensi merupakan suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi ketel uap adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh *fluida* kerja didalam ketel uap dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Untuk tingkat efisiensi pada ketel uap berkisar antara 70% - 90% [17]. Efisiensi akan dihitung berdasarkan komposisi, HHV, serta O<sub>2</sub>% di gas buang dan temperatur gas buang. Efisiensi yang dihitung berbasis HHV, dengan metode hilang panas. Hilang panas utama yang terjadi adalah hilang panas gas buang, yang meliputi hilang panas gas buang, panas laten uap air yang dihasilkan dari hidrogen dan kelembaban pada bahan bakar serta panas sensibel dari gas buang, sedangkan hilang panas lainnya diasumsikan sebesar 2% [14].

Energi yang didapat dari *fluida* kerja (air dan *steam*) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar ketel uap. Metodologi ini dikenal sebagai metode *input-output* atau metode langsung, karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran (*steam*) dan panas masuk bahan bakar (*input*) untuk evaluasi efisiensi [17].

Didapatkan dengan rumus:

$$\text{Efisiensi ketel uap } (\eta) = \frac{\text{Panas Pembentukan Uap}}{\text{Panas Masuk}} \quad (2.12)$$

$$\text{Efisiensi ketel uap } (\eta) = \frac{W_s \cdot h_{\text{main steam}} - h_{\text{feedwater}}}{W_f \cdot HHV} \quad (2.13)$$

Keterangan:

$W_s$  = kapasitas produksi uap (kg/h)

$h_{\text{main steam}}$  = entalpi uap (kkal/kg)

$h_{\text{feedwater}}$  = entalpi *feedwater* (kkal/kg)

$W_f$  = konsumsi bahan bakar (kg/h)

HHV = nilai kalor pembakaran (kkal/kg) [17].

### 3. Emisi CO<sub>2</sub>

Emisi CO<sub>2</sub> akan dihitung berdasarkan kandungan karbon pada bahan bakar, HHV, kapasitas dan kondisi *steam*, serta efisiensi dihitung. Emisi CO<sub>2</sub> dinyatakan dalam ton/jam, ton/hari, dan ton/tahun berdasarkan waktu operasi. Bahan bakar berbasis biomassa dianggap netral karbon [14].

### 4. Emisi polutan

Emisi beberapa jenis polutan dari ketel uap telah diatur dalam Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Emisi untuk Ketel Uap.

**Tabel 2.17** Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Emisi Nasional Untuk Ketel Uap [14].

| No. | Parameter                                  | Baku mutu (mg/m <sup>3</sup> , 6% oxygen) |                                 |       |             |     |     |
|-----|--|---|---------------------------------|-------|-------------|-----|-----|
|     |  | Biomassa                                  |                                 |       | Fossil Fuel |     |     |
|     |  | Fiber/<br>shell                           | Dry cane/<br>leaves/<br>bagasse | Other | Coal        | Oil | Gas |
| 1.  | Partikel                                   | 300                                       | 250                             | 350   | 230         | 200 | -   |
| 2.  | SO <sub>2</sub>                            | 600                                       | 600                             | 800   | 750         | 700 | 150 |
| 3.  | NO <sub>x</sub> sebagai<br>NO <sub>2</sub> | 800                                       | 800                             | 1000  | 825         | 700 | 650 |
| 4.  | HCL  | 5   | -                               | 5     | -           | -   | -   |
| 5.  | Cl <sub>2</sub>                            | 5   | -                               | 10    | -           | -   | -   |
| 6.  | NH <sub>2</sub>                            | 1   | -                               | 0,5   | -           | -   | -   |
| 7.  | HF   | 8   | -                               | 10    | -           | -   | -   |
| 8.  | Opasitas                                   | 30%                                       | 30%                             | 30%   | 20%         | 15% | -   |
| 9.  | TRS sebagai<br>H <sub>2</sub> S            | -   | -                               | 35    | -           | -   | -   |

*Gap* akan diberikan jika ketel uap menghasilkan emisi yang melebihi baku mutu. Untuk bahan bakar biomassa, digunakan baku mutu untuk biomassa lain pada Tabel 2.17. Pematuhan terhadap peraturan baku mutu harus diutamakan dalam penilaian ketel uap.

$$Gap = (\text{emisi ketel uap} - \text{baku mutu emisi}) * \text{faktor pengali} \quad (2.12)$$

Faktor pengali yang dipilih adalah 0,2, dengan emisi dan baku mutu emisi dinyatakan dalam  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Untuk karbon monoksida dan hidrokarbon, digunakan nilai batas sebesar 400 dan 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  sebagai pengganti nilai baku mutu, karena belum tersedianya baku mutu nasional untuk CO dan hidrokarbon [14].

### 5. Limbah Padat

Limbah padat dihasilkan pada pembakaran bahan bakar padat seperti batu bara dan biomassa. Limbah padat terdiri dari mineral yang terkandung dalam bahan bakar serta karbon yang tak terbakar. Jumlah limbah padat yang dihasilkan berupa *fly ash* dan *bottom ash*. *fly ash* adalah abu yang terbawa oleh gas buang dan tertangkap dalam penangkap abu (*electrostatic precipitator/ fiber filter*), sedangkan *bottom ash* adalah abu yang terkumpul pada bagian bawah tungku ketel uap.

### 6. Teknologi Ketel Uap

#### a. Teknologi pembakaran

Teknologi pembakaran berpengaruh besar pada efisiensi energi, emisi  $\text{CO}_2$ , dan emisi polutan. Untuk bahan bakar padat, teknologi yang disarankan adalah *pulverized coal* (PC) atau *suspension firing*. Teknologi pembakaran bahan bakar padat haruslah ditentukan pada saat perancangan, karena tidak dapat dilakukan modifikasi penggantian teknologi pembakaran. Tabel berikut ini menampilkan *gap* atau penalti yang dikenakan untuk teknologi bahan bakar padat.

**Tabel 2.18** Penalti Untuk Teknologi Bahan Bakar Padat [14].

| Teknologi                         | <i>Gap</i> | Keterangan  |
|-----------------------------------|------------|---|
| <i>Pulverized coal combustion</i> | 0          | Merupakan teknologi yang disarankan, mudah dioperasikan, efisiensi pembakaran tinggi.       |
| <i>Circulating fluidized bed</i>  | -10        | Efisiensi pembakaran tinggi, emisi rendah, namun sering timbul masalah dalam pengoperasian. |
|                                   | -20        |   |
| <i>Stoker combustion system</i>   | -30        | Efisiensi pembakaran rendah, emisi tinggi.  |



Selain itu, untuk bahan bakar gas dan cair serta penggunaan PC pada bahan bakar padat, penggunaan *low NO<sub>x</sub> burner* (LNB) sangat disarankan dengan tujuan untuk menurunkan emisi NO<sub>x</sub>. Pemasangan LNB dapat dilakukan sebelum ketel uap digunakan (pada saat awal pembelian ketel uap baru), dapat juga dipasangkan pada boiler lama sebagai modifikasi. Apabila teknologi LNB tidak digunakan, ketel uap akan dikenakan *gap* sebesar -20 [14].

b. Teknologi Pengendalian Proses

Pengendalian proses merupakan parameter yang mempengaruhi efisiensi energi. Contohnya adalah teknologi pengaturan jumlah udara pembakaran atau rasio udara. Hal ini paling menggambarkan udara lebih adalah kandungan oksigen di gas buang. Karena itu, pengendalian laju udara berdasarkan % O<sub>2</sub> (*O<sub>2</sub> trim*) merupakan teknologi yang disarankan. Apabila *O<sub>2</sub> trim control* tidak terpasang, maka ketel uap akan dikenakan *gap* sebesar -20.

Sistem pengendalian proses laju bahan bakar dengan *modulating* akan lebih baik dibandingkan dengan pengendalian secara *on/off* karena akan mengurangi hilang panas pada saat ketel uap tidak beroperasi. Apabila *modulating control* tidak terpasang, maka ketel uap dikenakan *gap* sebesar -20.

c. Peralatan Lingkungan

Peralatan lingkungan adalah peralatan pengendalian emisi ke lingkungan, yaitu pengolahan gas buang sebelum gas tersebut dilepaskan pada cerobong. Peralatan lingkungan tersebut dapat dipasang pada ketel uap baru maupun ketel uap lama. Ketel uap yang dilengkapi dengan peralatan lingkungan akan diberikan nilai tambahan sebesar +10 poin untuk setiap peralatan, yaitu peralatan *desulfurisasi*, penangkap abu, dan SCR/SNCR untuk menurunkan emisi NO<sub>x</sub>. Untuk penanganan emisi partikel dengan menggunakan *wet scrubber* akan diberikan nilai tambahan sebesar +5 poin.

d. Peralatan Pemanfaatan Sisa Panas (*Heat Recovery*).

Pemanfaatan sisa panas dari gas buang akan meningkatkan efisiensi ketel uap dengan cara memanfaatkan panas gas buang untuk memanaskan air umpan di *economizer* atau memanaskan udara pembakaran (*air preheater*). Selain itu, *air blowdown* dari ketel uap memiliki tekanan dan temperatur yang cukup tinggi untuk dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan panas yang dapat dimanfaatkan dalam proses.

Apabila *economizer* ataupun pemanas udara pembakaran dan pemanfaatan panas *blowdown* tidak terpasang pada sistem ketel uap, maka dikenakan *gap* sebesar -15. Pemanfaatan *flash steam* pun merupakan salah satu cara untuk meningkatkan pemanfaatan

panas dari *steam*. Apabila *flash steam* dibuang, maka hal tersebut merupakan pemborosan panas *steam*. Pemanfaatan *flash steam* masih belum umum dilakukan pada sistem ketel uap industri di Indonesia, sehingga apabila hal tersebut tidak dilakukan, tidak akan dikenakan *gap*, sebaliknya apabila hal tersebut dilakukan, akan dikenakan penambahan nilai sebesar +10.

e. Sumber Air

Demi menjaga cadangan air bersih, maka disarankan untuk mendaur ulang air dari proses sebagai air umpan ketel uap. Untuk itu, ketel uap yang menggunakan air daur ulang tidak dikenakan *gap*, sedangkan ketel uap yang menggunakan air baru akan dikenakan *gap* sebesar -20.

f. Umur Ketel Uap

Secara umum, semakin tua peralatan, maka performanya pun semakin menurun. Selain itu, terdapat perkembangan teknologi secara umum (*technology trajectory*), sehingga ketel uap yang lebih tua cenderung memiliki teknologi dengan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan teknologi ketel uap baru. Untuk itu pemberian penalti akan dikenakan sesuai dengan tabel berikut ini.

**Tabel 2.19** Penalti atau *Gap* Untuk Umur Ketel Uap [14].

| Umur Ketel Uap | <i>Gap</i> atau Penalti |
|----------------|-------------------------|
| 0 – 3 tahun    | 0                       |
| 3 – 15 tahun   | -15                     |
| > 15 tahun     | -30                     |

Ketel uap yang telah dievaluasi akan memperoleh nilai akhir berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{Nilai akhir} = 1000 + \sum \text{Gap (negatif)} + \text{kompensasi dari peralatan lingkungan} + \text{kompensasi dari daur ulang bahan bakar.} \quad (2.14)$$

**Tabel 2.20** Nilai dan Kategori Ketel Uap [14].

| No.                                    | Keterangan   | Nilai (Kategori)    |
|--|--|---------------------|
| <b>Ketel Uap Berbahan Bakar Biogas</b> |  |                     |
| 1.                                     | Ketel uap berbahan bakar biogas, semua kriteria terpenuhi  | 1023 (sangat ramah) |
| 2.                                     | Ketel uap baru bahan bakar biogas menggunakan air umpan segar (bukan daur ulang)   | 1003 (sangat ramah) |
| 3.                                     | Ketel uap baru bahan bakar biogas menggunakan air umpan segar, dioperasikan pada O <sub>2</sub> 3% dan temperatur gas buang 180 °C                             | 943 (ramah)         |
| 4.                                     | Ketel uap biogas menggunakan air umpan segar, dioperasikan pada O <sub>2</sub> 3% dan temperatur gas buang 180 °C, tidak dilengkapi dengan O <sub>2</sub> trim | 923 (ramah)         |
| 5.                                     | Ketel uap lama bahan bakar biogas, seperti pada poin (4) namun berusia > 3 tahun   | 918 (cukup ramah)   |

## 2.7 Biaya Investasi

Ketersediaan dana (investasi) dan pengembalian investasi sangat perlu untuk melakukan sebuah proyek pembangkit listrik tenaga biogas. Hal ini ditujukan untuk menarik minat investor agar mau menanamkan investasi di bidang energi terbarukan, khususnya pembangkit biogas dari limbah cair kelapa sawit (POME). Untuk menunjang ketertarikan investor di butuhkan analisa ekonomi yang menunjang. Hal ini diperlukannya perkiraan suku bunga pada tahun pendirian pembangkit agar investor dapat langsung menilai pertumbuhan dari modal yang akan di tanamkan. Untuk penelitian ini penulis menggunakan tabel *cast flow* untuk memprediksi suku bunga pada saat pembangunan pembangkit.

### 2.7.1 Biaya Proyek

Biaya proyek biogas terdiri dari biaya teknik, pengadaan, dan pembangunan atau *engineering, procurement, and contruction* (EPC) dan biaya lainnya (*non-EPC*). Biaya EPC merupakan semua biaya yang berkaitan dengan kegiatan rekayasa, pengadaan, dan konstruksi. Digester biogas dan sistem konversi biogas pada umumnya adalah dua komponen dengan biaya investasi yang besar. Biaya sistem konversi ini tergantung dari skenario pemanfaatan yang digunakan, sedangkan biaya *non-EPC* meliputi biaya pengembangan, modal kerja, dan pembiayaan.



Pada bagian ini menggambarkan metodologi untuk mengestimasi biaya-biaya yang mungkin timbul dari pemanfaatan PLTBG. Biaya-biaya ini meliputi 2 komponen biaya utama yaitu biaya investasi modal dan biaya O & M. Perhitungan biaya produksi energi listrik PLTBG dibagi menjadi 2 tahap, yaitu tahap perhitungan biaya produksi biogas dan tahap perhitungan biaya produksi energi listrik PLTBG.

a. Biaya investasi dan O & M produksi biogas sebagai berikut:

1. Biaya investasi sistem digester

Biaya investasi ini meliputi biaya investasi digester *anaerob* beserta komponen pelengkapannya seperti kontrol sistem emisi, pekerjaan sipil, pompa set, instalasi pipa, dan pekerjaan elektrikal. Jenis digester *anaerob* yang digunakan adalah beton bertulang dilapisi dengan pelindung berbahan busa dan *steroform*. Perhitungan biaya investasi digester dapat diketahui dengan menggunakan persamaan [5] dimana harga digester *complete mix* 3021,368 US\$/Kw.

2. Biaya investasi penyimpanan biogas

Biaya investasi ini mencakup biaya *pressurized storage vessels* (tangki baja *stainless steel*), *scrubbers* (peralatan pemurnian biogas), kompresor, *piping* dan *housing*. Perhitungan biaya investasi biogas *storage system* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut =  $0,05407 \times \text{Volume biogas/tahun}$  (US\$) (2.13)

3. Biaya investasi pemurnian biogas

Biaya investasi pemurnian biogas ini terdiri dari sistem kontrol, pemasangan dan tenaga kerja, sedangkan biogas yang diproduksi yaitu sebanyak 5.273,43 m<sup>3</sup>/hari. Jenis pemurnian biogas yang digunakan yaitu jenis *water scrubber* dengan kapasitas 7.500 m<sup>3</sup>, berdasarkan penelitian wahyu (2012), biaya investasi pada pemurnian biogas dengan kapasitas 7.500 m<sup>3</sup> sebesar US\$ 139.207,25.

4. Biaya pengolahan *sludge*

Biaya ini merupakan biaya investasi bak penampungan *sludge*, bak ini digunakan untuk menampung *sludge* yang dihasilkan dari digester sebelum dijual. *Sludge* yang dihasilkan digester ini sebesar 30% dari jumlah bahan baku [31].

b. Biaya Investasi Produksi Listrik

Merupakan jumlah dari semua biaya investasi yang telah dikeluarkan oleh investor. Dimulai dari biaya investasi dibidang produksi biogas sampai dengan biaya investasi disektor produksi listrik.

**2.7.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan**

1. Biaya Operasional dan Pemeliharaan Sistem Digester

Biaya operasional dan pemeliharaan sistem digester ini terdiri dari penggunaan tenaga kerja berupa operator untuk mengoperasikan perlatan, biaya keperluan opsional dan biaya *spare part*. Biaya operasional dan perawtan pada sistem digester pertahun sebesar 6,7 % dari biaya investasi digester.

2. biaya O&M Tenaga Kerja

Biaya O&M *biogas handling* terdiri dari biaya tenaga kerja untuk mengopersikan kompresor, biaya pemeliharaan dan penggantian *sparepart*. Dalam penelitian ini ditentukan biaya O&M pertahun sebesar 10,2% dari biaya investasi biogas *storage system* [31].

3. Biaya Operasional dan Pemeliharaan Sistem Pembangkit Listrik

Biaya operasional dan pemeliharaan sistem pembangkit listrik terdiri dari biaya tenaga kerja dan pemeliharaan, biaya pemeliharaan komponen lainnya pada proses konversi listrik. Biaya perawatan sistem pembangkit listrik ini sebesar Rp. 110,4/kWh [31].

**2.7.3 Biaya Produksi Biogas dan Listrik**

Menentukan biaya produksi pada pembangkit listrik tenaga biogas terbagi menjadi dua komponen yaitu biaya produksi biogas, biaya produksi listrik dan biaya PLTBG.

1. Perhitugnan Biaya Produksi Biogas

Biaya produksi produksi biogas pertahun ditentukan dari biaya operasional dan pemeliharaan tahunan serta biaya penyusutan dari modal selama masa usia proyek (20 tahun). Dengan menggunakan persamaan.

$$Biaya\ penyusutan\ modal = \frac{Total\ biaya\ investasi\ produksi\ biogas}{usia\ proyek} \quad (2.15)$$

Dan untuk jumlah produksi biogas pertahunnya dapat dihitung dengan persamaan.

$$Biaya\ produksi\ biogas = \frac{Biaya\ produksi\ pertahun}{jumlah\ produksi} \quad (2.16)$$

## 2. Biaya Produksi Listrik

Menentukan biaya produksi listrik berdasarkan penyusutan biaya investasi produksi listrik selama umur proyek (20 tahun) dan biaya operasional dan perawatan peralatan produksi listrik. Besarnya biaya penyusutan modal selama 20 tahun dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Biaya penyusutan modal} = \frac{\text{Total biaya investasi produksi listrik}}{\text{usia proyek}} \quad (2.17)$$

## 3. Biaya Produksi PLTBG

Biaya produksi biogas pertahun ditentukan dari biaya operasional dan pemeliharaan tahunan serta biaya penyusutan dari modal selama masa usia proyek (20 tahun). Besarnya biaya penyusutan modal selama 20 tahun.

### 2.7.4 Biaya Produksi Energi Listrik PLTBG

Komponen biaya investasi antara lain adalah ketel uap, *economizer*, turbin, generator dan pemasangan komponen lainnya. *Economizer* berfungsi untuk memanfaatkan panas gas buang untuk pemanasan awal air umpan ketel uap [19]. Pada penelitian ini akan dilakukan pembelian ketel uap baru khusus berbahan bakar biogas, agar tidak mengganggu sitem instalasi yang sudah ada. Penggunaan listrik di pakai *internal* karena selain untuk bahan bakar ketel uap, biogas juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor gas perumahan lingkungan pabrik dan juga di salurkan dengan jaringan PLN, dengan tujuan mendapatkan keuntungan dari penjualan energi listrik. Perhitungan biaya investasi dan O&M produksi energi listrik PLT biogas dilakukan pada jenis teknologi konversi pembangkit yang tersedia dipasaran.

### 2.7.5 Perhitungan Biaya Pendapatan

Perhitungan biaya pendapatan dilakukan terhadap jenis teknologi yang akan digunakan dalam hal ini tegangan yang dihasilkan PLTBG dialirkan ke jaringan PLN. Pendapatan dari PLTBG dari limbah cair kelapa sawit berasal dari penjualan listrik. Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM terbaru Nomer 27/2014 Mengatur *feed in tarif* untuk energi terbarukan dari biomassa dan biogas. *Feed in tarif* ini sebesar Rp. 1.050,00/kWh untuk sambungan pada tegangan menengah dan Rp. 1.400,00/kWh.  $NVP > 0$  (nol) proyek diterima.