

**POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA DARI BIOGAS
SKALA RUMAH TANGGA TIPE *FLOATING DRUM***

(Skripsi)

Oleh
Firman Kusuma Yudha



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA DARI BIOGAS SKALA RUMAH TANGGA TIPE *FLOATING DRUM*

**Oleh
Firman Kusuma Yudha**

Biogas adalah salah satu sumber energi terbarukan yang mampu mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Digester biogas tipe *floating drum* adalah jenis biogas yang dapat dilihat secara langsung volume gas yang tersimpan pada drum karena pergerakannya. Pemanfaatan bahan untuk fabrikasi digester berkontribusi positif terhadap emisi GRK. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi performa dari sistem digester biogas dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA). Sistem batas terdiri dari pembuatan digester, operasi dan pemeliharaan, dan pemanfaatan biogas.

Penelitian ini dilakukan dengan membuat inventarisasi untuk mengumpulkan informasi terkait pada jumlah bahan yang digunakan untuk membangun digester biogas *floating drum* skala rumah tangga bersama dengan faktor emisi masing-masing bahan. Parameter penting lainnya termasuk hasil biogas dan kandungan metana. Pengurangan emisi dihitung dari penghematan LPG karena pemanfaatan biogas untuk bahan bakar kompor dapur.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem digester biogas *floating drum* skala rumah tangga berpotensi mengurangi emisi GRK sebesar 5259,46 kg CO₂ eq /tahun selama lima tahun masa layanan hidup. Emisi GRK (dalam kg CO₂eq / tahun) terdiri dari 458,12 untuk konstruksi digester, -329,37 untuk pemanfaatan biogas, -4740,75 untuk manajemen kotoran sapi dan -280,96 untuk pemanfaatan ampas (*slurry*).

Kata kunci : Biogas tipe floating drum, Life Cycle Assessment (LCA), emisi GRK.

ABSTRACT

POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA DARI BIOGAS SKALA RUMAH TANGGA TIPE *FLOATING DRUM*

**By
Firman Kusuma Yudha**

Biogas is one of renewable energy sources capable to reduce greenhouse gas (GHG) emission. Floating drum biogas digester is a type of biogas that can be seen directly the volume of gas stored on the drum because of its movement. The utilization of materials for digester fabrication, however, positively contributes to GHG emission. The purpose of this research is to evaluate the performance GHG emission of floating drum biogas digester by using life cycle assessment (LCA) approach.

The boundary system consists of fabrication of the digester, operation and maintenance, and utilization of the biogas. The research is conducted by making an inventory to collect related information on the quantity of materials utilized to construct a family size floating drum biogas digester along with emission factor of each material. Other important parameters include biogas yield and its methane content. Emission reduction is calculated from LPG saving due biogas utilization to fuel kitchen stove.

Result showed that a family size floating drum biogas digester system potentially reduced GHG emission by 5.259,46 kg CO₂eq/year for a five years of service life time. The GHG emission (in kg CO₂eq/year) is comprised of 458,12 for digester construction, -329,37 for biogas utilization, -4740,75 for manure management and -280,96 for slurry digestate utilization.

Keywords : Biogas type floating drum, Life Cycle Assessment (LCA), GHG emission

**POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA DARI BIOGAS
SKALA RUMAH TANGGA TIPE *FLOATING DRUM***

Oleh
Firman Kusuma Yudha

(Skripsi)

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNOLOGI PERTANIAN

pada

Jurusan Teknik Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

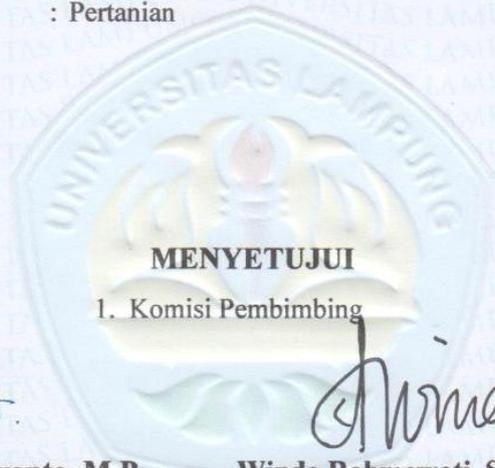
Judul Skripsi : **POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH
KACA DARI BIOGAS SKALA RUMAH TANGGA
TIPE *FLOATING DRUM***

Nama Mahasiswa : **Firman Kusuma Yudha**

No. Pokok Mahasiswa : 1514071020

Jurusan : Teknik Pertanian

Fakultas : Pertanian



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
NIP 19650527 199303 1 002

Winda Rahmawati, S.T.P., M.Si., M.Sc.
NIP 19890520 201504 2 001

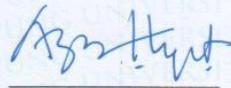
2. Ketua Jurusan Teknik Pertanian

Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
NIP 19650527 199303 1 002

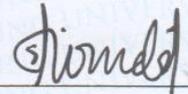
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

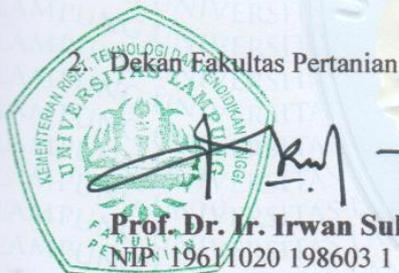
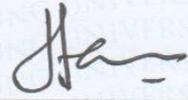
Ketua : **Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.**



Sekretaris : **Winda Rahmawati, S.T.P., M.Si., M.Sc.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Ir. Tamrin, M.S.**



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **02 Oktober 2019**

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya bernama **Firman Kusuma Yudha** NPM **1514071020**, dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Komisi Pembimbing, 1) **Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.** dan 2) **Winda Rahmawati, S. TP., M.Si. M.Sc.** berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini berisi material yang dibuat sendiri dan hasil rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal, dll) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil dari plagiat karya orang lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, Oktober 2019

Yang membuat pernyataan



Firman Kusuma Yudha
NPM. 1514071020

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pringsewu pada tanggal 10 Februari 1997, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Suwarto dan Ibu Tukuni. Penulis menempuh pendidikan Taman Kanak-kanak di TK Aisyiyah Bustanul Athfal Parerejo tahun 2002 – 2003 dan Sekolah Dasar di SD N 3 Parerejo tahun 2003 sampai dengan tahun 2009.

Penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 1 Gadingrejo pada tahun 2009 – 2012 dan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Gadingrejo pada tahun 2012 – 2015.

Pada tahun 2015, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Mekanisasi Pertanian dan Rekayasa Energi Terbarukan. Penulis pernah sebagai anggota di organisasi Persatuan Mahasiswa Teknik Pertanian (PERMATEP) FP Unila.

Pada bulan Januari – Februari 2017 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Pekon Betung, Kecamatan Pematang Sawa, Kabupaten Tanggamus.

Pada bulan Juli – Agustus tahun 2018 penulis melaksanakan Praktik Umum di Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia, Jember, Jawa Timur dengan judul **“Mempelajari Kinerja Mesin Sangrai Kopi (*Roaster*) Di Pusat Penelitian Kopi Dan Kakao Indonesia, Jember – Jawa Timur”**.

Persembahan

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kemudahan serta keberkahan dalam setiap langkah dan perjuangan

Ku persembahkan karya ini kepada :

Kedua orangtua ku

Ayah (Suwanto) dan Ibu (Tukini) yang selalu memberiku semangat, doa, nasihat, dan kasih sayang serta pengorbanan yang tak tergantikan untuk menjalani rintangan yang ada didepanku.

Kakak dan Adikku

Fenda Setyaningsih dan Rafid Dhaifulaah Al-Hakim yang telah memberikan doa dan semangat untukku.

Serta

Almamater Tercinta Universitas Lampung

Fakultas Pertanian

Jurusan Teknik Pertanian

Teknik Pertanian Angkatan 2015

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena rahmat dan lindungan-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul **“Emisi Gas Rumah Kaca Dari Biogas Skala Rumah Tangga Tipe *Floating Drum*”** sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknologi Pertanian. Penulis menyadari bahwa terselesaikannya kuliah dan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si., selaku Dekan Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P., selaku Ketua Jurusan Teknik Pertanian.
3. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan selama perkuliahan, memberikan banyak masukan, bimbingan, dan saran selama penelitian hingga penyusunan skripsi.
4. Ibu Winda Rahmawati, S.TP., M. Si., M. Sc., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak masukan, bimbingan, dan saran dalam proses penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Ir. Tamrin, M.S., selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembahas yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan selama perkuliahan, memberikan masukan dan saran-sarannya.

6. Seluruh dosen di Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah memberkan ilmu pengetahuan selama penulis berada dibangku kuliah.
7. Ayah dan Mami tercinta yang telah memberikan kasih sayang, dukungan moral, material dan doa.
8. Bapak Saryun yang telah memberikan tempat untuk penelitian, berbagi informasi, pengalaman, serta canda tawanya.
9. Deny sanjaya irawan selaku tim penelitian biogas dan mahasiswa Teknik Pertanian angkatan 2015 yang memeberikan doa serta semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Teman-teman PU Riski, Rizki Firmansyah, dan Mimah yang telah memberikan semangat.
11. Teman-teman seperjuangan TEP 15 yang penulis sayangi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, Oktober 2019

Penulis

Firman Kusuma Yudha

Ucapan Terima Kasih

Penelitian Ini Didanai Dari Penelitian Skim STRANAS
Atas Nama Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
Nomor Kontrak 1852/UN 26.21/PM 2018

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sejarah Biogas	6
2.2 Biogas	6
2.3 Prinsip Kerja Biogas.....	7
2.4 Pembentukan Biogas	8
2.4.1 Tahap <i>Hidrolisis</i>	9
2.4.2 Tahap <i>Asidofikasi</i> (Pengasaman)	10
2.4.3 Tahap Pembentukas Gas Metana	10
2.5 Digester	12
2.6 Faktor Yang Mempengaruhi Produksi Biogas	16
2.6.1 <i>Total Solid</i> (TS).....	16
2.6.2 <i>Temperatur</i>	16
2.6.3 Derajat keasaman (pH).....	16
2.6.4 Rasio C-N.....	16
2.6.5 <i>Hydraulic Retention Time</i> (HRT).....	18
2.7 Pemanasan Global	19
2.8 Efek Rumah Kaca.....	20
2.9 Gas Rumah Kaca	22
2.9.1 Energi	23
2.9.2 Industri	24
2.9.3 Pertanian.....	26
2.9.4 Tataguna Lahan dan Kehutanan.....	27
2.9.5 Limbah	27

2.10	<i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	28
2.10.1	<i>Goal and Scoping</i>	30
2.10.1.1	<i>Data Quality Requirement</i>	32
2.10.2	<i>Life cycle inventory analysis (LCI)</i>	33
2.10.3	<i>Life cycle impact assessment (LCIA)</i>	35
2.10.4	<i>Life cycle interpretation</i>	37
2.10.5	Prinsip-Prinsip LCA.....	38
III. METODELOGI PENELITIAN		41
3.1	Waktu dan Tempat.....	41
3.2	Alat dan Bahan.....	41
3.3	Tahapan Penelitian.....	41
3.4	Tahapan Persiapan.....	42
3.5	Metode Pengumpulan Data.....	43
3.5.1	Studi Pustaka.....	43
3.5.2	Observasi dan Pengukuran Lapangan.....	43
3.5.3	Wawancara.....	44
3.6	Metode Analisis dan Pengolahan Data.....	44
3.6.1	Penentuan <i>Goal and Scope</i> (Tujuan dan Cakupan).....	45
3.6.2	<i>Inventory Analysis</i> (Analisis Inventori).....	45
3.6.3	<i>Impact Assessment</i> (Penilaian Dampak).....	47
3.6.4	<i>Interpretation and Improvement</i>	50
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Gambaran Umum Kondisi Digester Biogas.....	51
4.1.1	Digester Terapung (<i>Floating Drum</i>).....	51
4.2	Produksi Biogas.....	53
4.3	Komposisi Biogas.....	56
4.3.1	Kandungan Ampas Biogas.....	57
4.4	Analisa <i>Life Cycle Assesment (LCA)</i>	58
4.4.1	Penentuan <i>Goal and Scope</i>	58
4.4.2	Analisis Inventori (<i>Inventory Analysis</i>).....	59
4.4.3	Penilaian Dampak (<i>Impact Assessment</i>).....	60
4.4.3.1	Digester Biogas Skala Rumah Tangga.....	60
4.4.3.2	Potensi Penurunan Emisi GRK.....	61
4.4.3.2.1	Manajemen Kotoran Sapi.....	62
4.4.3.2.2	Pemanfaatan Biogas.....	62
4.4.3.2.3	Pemanfaatan Pupuk (<i>Slurry</i>).....	62
4.4.4	Interpretasi dan Analisis Perbaikan (<i>Improvement Analysis</i>).....	66
V. KESIMPULAN DAN SARAN		68
5.1	Kesimpulan.....	68
5.2	Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA		70
LAMPIRAN		73

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Proses Pembentukan Biogas	9
2. Digester <i>Floating Drum</i> (Nurhasanah dkk.,2006)	13
3. Digester <i>Fixed Dome</i> (Nurhasanah dkk.,2006).....	14
4. Digester Tipe Balon (FAO, 1996).....	14
5. Digester percobaan sistem batch (Ratnaningsih dkk., 2009)	15
6. Kerangka tahapan dalam LCA	30
7. Diagram alir penelitian.....	42
8. Digester biogas tipe <i>floating drum</i>	46
9. Diagram ruang lingkup LCA	46
10. Digester <i>floating drum</i>	52
11. Uji nyala hari ke-10.....	55
12. Uji nyala hari ke-18.....	55
13. Uji nyala hari ke-20.....	55
14. Hasil Analisa Komposisi Biogas.....	56
15. Pengaruh waktu hidup layanan terhadap emisi GRK	61
16. Emisi GRK dari sistem biogas tipe <i>floating drum</i>	64
17. Sapi milik warga	74
18. Pembuatan sumur digester	74

19. Tempat digester.....	75
20. Pemasukan feses ke ruang digester	75
22. Pengadukan campuran feses sapi dengan air	76
22. Sistem digester biogas.....	76
23. Tempat Input	77
25. Saluran pembuangan (output)	77
25. Setelah pemasangan saluran instalasi	78
26. Saat digester terisi gas.....	78
27. Penimbangan PVC ½ inc	79
41. Penimbangan PVC 3 inc	79
29. Hasil analisis kandungan biogas	80
30. Hasil analisis NPK	81

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komponen penyusun biogas.	7
2. Kandungan gas metan untuk berbagai jenis sumber biogas	11
3. Potensi pemanasan global dari berbagai jenis GRK	23
4. Potensi pemanasan global dari berbagai jenis GRK	25
5. Faktor emisi GRK dari input dan output bahan	48
6. Hasil kandungan N,P,K sari ampas (<i>slurry</i>) biogas	57
7. Bahan dan sumber daya yang digunakan dalam sistem biogas	59
8. Emisi GRK untuk digester biogas rumah tangga dan produksi biogas.....	60
9. Perhitungan nilai GWP tahunan.....	63

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tingginya penggunaan energi di Indonesia dipengaruhi oleh tingginya pertumbuhan penduduk dan meningkatnya perkembangan industri. Penggunaan bahan bakar fosil secara berlebihan menyebabkan kelangkaan energi karena bahan bakar fosil tidak dapat diperbaharui. Karena itu pengembangan energi alternatif sangat dibutuhkan.

Biogas merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat menjawab kebutuhan energi alternatif. Biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses penguraian bahan-bahan organik oleh mikroorganisme dalam keadaan anaerob (Wahyuni, 2015). Biogas yang dihasilkan dapat digunakan untuk memasak, penerangan, dan bahan bakar motor atau genset. Biogas memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Sifatnya yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui merupakan satu keunggulan biogas dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Wahyuni, 2015).

Gas rumah kaca merupakan gas-gas yang ada di atmosfer yang menyebabkan efek gas rumah kaca, karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitroksida (N_2O), dan chlorofluorocarbon (CFC). Gas-gas tersebut sebenarnya muncul secara alami di lingkungan, tetapi dapat juga timbul akibat aktivitas manusia. Dalam troposfer

terdapat gas-gas rumah kaca yang menyebabkan efek rumah kaca dan pemanasan global. Gas Rumah Kaca dapat terbentuk secara alami maupun sebagai akibat pencemaran. Perubahan iklim menunjukkan adanya perubahan pada iklim yang disebabkan secara langsung maupun tidak langsung oleh kegiatan manusia yang mengubah komposisi atmosfer global dan juga terhadap variabilitas iklim alami yang diamati selama periode waktu tertentu (Rahmawati, 2013).

Indonesia yang merupakan negara yang turut menyumbang emisi dari berbagai sektor, salah satunya sektor pertanian yang didalamnya mencakup pertanian dan peternakan. Hal ini tercantum dalam Peraturan Presiden No 61 tahun 2011 Pasal 2, tentang Rencana Aksi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca yang disingkat RAN-GRK. Target penurunan GRK dari sektor pertanian sebesar 0,008 gigaton pada tahun 2020. GRK terdiri dari gas-gas karbon, terutama gas Karbondioksida (CO₂) dan Metana (CH₄). GRK merupakan gas alam sederhana, yang dihasilkan secara alami oleh makhluk hidup, baik hewan, maupun tumbuhan (Rusbiantoro, 2008).

Dalam Rencana Aksi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca, Pemerintah Indonesia menindaklanjuti kesepakatan *Copenhagen Accord* hasil *The Conference of Parties* ke-15 (COP-15) di Copenhagen dan memenuhi komitmen Pemerintah Indonesia dalam pertemuan G-20 Pittsburg menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 26% dengan usaha sendiri dan mencapai 41% jika mendapat bantuan internasional pada tahun 2020 dari kondisi tanpa adanya rencana aksi (*business as usual/BAU*), perlu disusun langkah-langkah untuk menurunkan Emisi Gas Rumah Kaca.

Teknologi biogas (*anaerobic digestion*) merupakan salah satu cara mengelola limbah organik sekaligus sebagai strategi mitigasi emisi gas rumah kaca GRK dan penyediaan energi secara berkelanjutan (Bond and Templeton, 2011). Secara nasional, pemanfaatan teknologi biogas dalam penyediaan energi merupakan bentuk implementasi kebijakan untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan sebagaimana tercantum dalam Peraturan Presiden (Perpres) No. 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Undang-undang (UU) No. 30 Tahun 2007 tentang Energi.

Menurut Yu *et al.*(2008), teknologi biogas berperan dalam mitigasi emisi GRK dengan cara mengurangi emisi GRK yang ditimbulkan saat pengelolaan limbah ternak (*manure management*) dan mengganti penggunaan bahan bakar yang meningkatkan emisi GRK seperti LPG (*liquified petroleum gas*) dan kayu bakar dengan biogas (substitusi energi). Selain memiliki dampak terhadap lingkungan (mitigasi emisi GRK), literatur juga mengungkapkan bahwa pemanfaatan teknologi biogas berpengaruh terhadap aspek sosial dan ekonomi masyarakat khususnya bagi para pengguna (*adopter*).

Permasalahan dan isu kerusakan lingkungan yang mengakibatkan pemanasan global, diperlukan suatu metode pendekatan sistematis untuk menganalisis dampak lingkungan. Salah satu metode yang tepat untuk menganalisis dampak lingkungan ini adalah *Life Cycle Assessment (LCA)*. LCA bertujuan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan, sumber polusi dan emisi gas rumah kaca yang kemudian bisa mengetahui potensi dampak pada pemanasan global, perubahan iklim, *eutrophication*, *acidification*, dan kesehatan manusia

(Pleanjaidkk, 2007). Baru-baru ini, perspektif LCA telah diadopsi untuk mengevaluasi aspek energi dan lingkungan dari sistem biogas. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi emisi gas rumah kaca untuk pembangunan digester biogas skala rumah tangga. Pendekatan LCA (*life cycle assessment*) digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem biogas skala rumah tangga.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana mengevaluasi performa dari sistem digester biogas dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dengan pendekatan *Life Cycle Assessment(LCA)*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi performa dari sistem digester biogas dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dengan pendekatan *Life Cycle Assessment(LCA)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini ialah :

1. Mendapatkan teknologi pengelolaan limbah penampungan kotoran sapi yang lebih efisien, efektif, dan berguna untuk bahan bakar.
2. Mendapatkan informasi hasil penerapan teknologi tepat guna sebagai upaya mitigasi emisi gas rumah kaca dan produksi energi terbarukan dengan teknologi bersih dan ramah lingkungan

3. Pengelolaan limbah kotoran sapi dengan pemanfaatan keanekaragaman hayati mikroba anaerob yang ada dalam sistem pencernaan anaerob tertutup (biodigester) sebagai bahan penghasil bioenergi (biogas).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Biogas

Menurut beberapa literatur, sejarah keberadaan biogas sendiri sebenarnya sudah ada sejak kebudayaan Mesir, China, dan Romawi Kuno. Masyarakat pada waktu itu diketahui telah memanfaatkan gas alam ini yang dibakar untuk menghasilkan panas. Namun, orang pertama yang mengaitkan gas bakar ini dengan proses pembusukan bahan sayuran adalah Alessandro Volta (1776), sedangkan Willam Henry pada tahun 1806 mengidentifikasi gas yang dapat terbakar tersebut sebagai metan. Becham (1868), murid Louis Pasteur dan Tappeiner (1882) memperlihatkan asal mikrobiologis dari pembentukan metan (Wahyono dan Sudarno, 2012).

2.2 Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob. Biogas dapat dihasilkan pada hari ke 4–5 sesudah *biodigester* terisi penuh, dan mencapai puncaknya pada hari ke 20–25. Akan tetapi perlu juga dipertimbangan ketinggian lokasi pembuatannya karena pada temperatur dingin biasanya bakteri lambat berproses sehingga biogas yang dihasilkan mungkin lebih lama. Komponen biogas yang paling penting adalah gas metan, selain itu juga gas-gas lain yang dihasilkan dalam *digester*. Biogas memiliki nilai kalori sebesar 5500–6700 kcal/m³. Angka ini setara dengan

menggunakan lampu 60 watt selama 6–7 jam. Kesetaraan biogas dengan sumber energi lain, yaitu 1 m³ biogas setara dengan elpiji 0,46 kg, minyak tanah 0,62 liter, minyak solar 0,52 liter, bensin 0,80 liter, gas kota 1,50 m³, dan kayu bakar 3,50 kg (Wahyono dan Sudarno, 2012). Biogas dapat dijadikan sebagai bahan bakar karena mengandung gas metana (CH₄) dengan persentase yang cukup tinggi dan titik nyala sebesar 645°C-750°C. Komponen biogas selengkapnya adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Komponen penyusun biogas

Jenis Gas	Jumlah (%)
Metana (CH ₄)	54-70
Karbon dioksida (CO ₂)	27-45
Air (H ₂ O)	0,3
Hidrogen sulfide (H ₂ S)	Sedikit sekali
Nitrogen (N ₂)	0,5-3
Hidrogen	5-10

Sumber:(Firdaus, 2009)

2.3 Prinsip Kerja Biogas

Biogas memerlukan suatu ruangan yang kedap udara atau kondisi anaerob seperti tangki atau bangunan yang berfungsi sebagai tempat pencernaan atau tempat terjadinya fermentasi, tempat ini disebut digester. Bahan organik di dalam digester tertutup dan diproses secara anaerobik tergantung pada jumlah bahan baku. Gas yang dihasilkan dapat berupa karbondioksida (CO₂), hidrogen (H₂), metan (CH₄), nitrogen (N₂), dan amoniak (NH₃).

1. Karbondioksida timbul karena aktivitas bakteri, gas ini dapat timbul sebagai hasil pernafasan aerob maupun anearob, kebanyakan senyawa yang cepat terurai oleh bakteri serta menghasilkan CO₂ adalah golongan gula.
2. Hidrogen, gas ini biasa timbul bersama CO₂ sebagai hasil penguraian karbohidrat atau asam amino. *Echerichia coli* dalam keadaan tertentu dapat menguraikan asam semut (HCOOH) menjadi CO₂ dan H₂
3. Gas metan, gas ini timbul sebagai hasil penguraian bermacam-macam senyawa organik. Metano bacterium dalam keadaan anaerob menghasilkan metan.
4. Nitrogen, gas ini timbul akibat penguraian nitrat maupun nitrit, peristiwa ini dikenal sebagai denitrifikasi. Denitrifikasi terjadi di tempat-tempat tertutup.
5. Amoniak, merupakan hasil penguraian protein dan senyawa-senyawa lain yang mengandung nitrogen (Made, 2012).

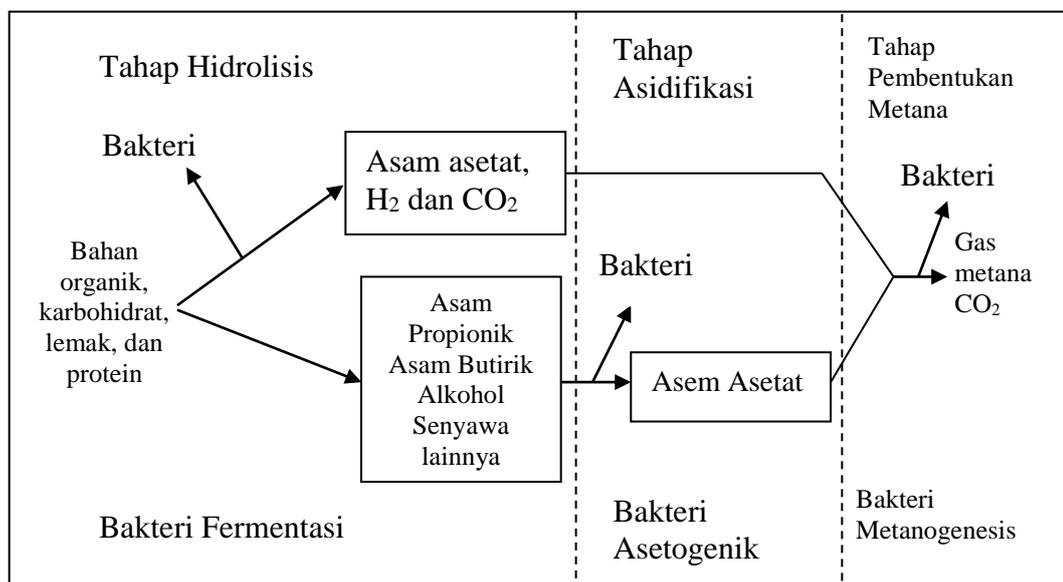
2.4 Pembentukan Biogas

Pada prinsipnya teknologi biogas adalah teknologi yang memanfaatkan proses fermentasi (pembusukan) dari sampah organik secara anaerobik (tanpa udara) oleh bakteri metan sehingga dihasilkan gas metan. Gas metan adalah gas yang mengandung satu atom C dan 4 atom H yang memiliki sifat mudah terbakar (Nandiyanto, 2007). Proses pencernaan anaerobik merupakan dasar dari reaktor biogas yaitu proses pemecahan bahan organik oleh aktivitas bakteri metanogenik dan bakteri asidogenik pada kondisi tanpa udara (Haryati, 2006).

Bakteri ini secara alami terdapat dalam limbah yang mengandung bahan organik, seperti kotoran binatang, feses manusia, dan sampah organik rumah tangga.

Bahan organik yang bisa digunakan sebagai bahan baku industri ini adalah

sampah organik, limbah yang sebagian besar terdiri dari kotoran dan potongan-potongan kecil sisa-sisa tanaman, seperti jerami dan sebagainya serta air yang cukup banyak. Teknologi biogas pada dasarnya memanfaatkan proses pencernaan yang dilakukan oleh bakteri methanogen yang produknya berupa gas metan (CH_4). Gas metan hasil pencernaan bakteri tersebut dapat mencapai 60% dari keseluruhan gas hasil reaktor biogas sedangkan sisanya didominasi karbondioksida (CO_2).



Gambar 1. Proses Pembentukan Biogas

2.4.1. Tahap *Hidrolisis*

Pada tahap *hidrolisis*, bahan organik *dienzimatik* secara eksternal oleh *enzim ekstraselular* (*selulose*, *amilase*, *protease* dan *lipase*) mikroorganisme. Bakteri memutuskan rantai panjang karbohidrat kompleks, protein dan *lipida* menjadi senyawa rantai pendek. Sebagai contoh *polisakarida* diubah menjadi *monosakarida* sedangkan protein diubah menjadi *peptida* dan *asam amino*.

2.4.2 Tahap *Asidifikasi* (Pengasaman)

Pada tahap ini bakteri menghasilkan asam, mengubah senyawa rantai pendek hasil proses pada tahap hidrolisis menjadi asam asetat, hidrogen (H₂) dan karbondioksida. Bakteri tersebut merupakan bakteri anaerobik yang dapat tumbuh dan berkembang pada keadaan asam. Untuk menghasilkan asam asetat, bakteri tersebut memerlukan oksigen dan karbon yang diperoleh dari oksigen yang terlarut dalam larutan. Pembentukan asam pada kondisi anaerobik tersebut penting untuk pembentuk gas metana oleh mikroorganisme pada proses selanjutnya. Selain itu bakteri tersebut juga mengubah senyawa yang bermolekul rendah menjadi alkohol, asam organik, asam amino, karbondioksida, H₂S, dan sedikit gas metana.

2.4.3 Tahap Pembentukan Gas Metana

Pada tahap ini bakteri metanogenik mendekomposisikan senyawa dengan berat molekul rendah menjadi senyawa dengan berat molekul tinggi. Sebagai contoh bakteri ini menggunakan hidrogen, CO₂ dan asam asetat untuk membentuk metana dan CO₂. Bakteri penghasil asam dan gas metana bekerjasama secara simbiosis. Bakteri penghasil asam membentuk keadaan atmosfer yang ideal untuk bakteri penghasil metana. Sedangkan bakteri pembentuk gas metana menggunakan asam yang dihasilkan bakteri penghasil asam. Tanpa adanya proses simbiotik tersebut, akan menciptakan kondisi toksik bagi mikroorganisme penghasil asam (Amaru, 2004).

Kandungan gas *methane* untuk beberapa jenis sumber biogas dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini :

Tabel 2. Kandungan Gas *Methane* Untuk Beberapa Jenis Sumber Biogas

Jenis Sumber Biogas	Kandungan Gas <i>Methane</i> (%)
<i>Cattle manure</i>	65
<i>Poultry manure</i>	60
<i>Pig manure</i>	67
<i>Farmyard manure</i>	55
<i>Straw</i>	59
<i>Grass</i>	70
<i>Leaves</i>	58

Sumber : (Maynell, 1981)

Menurut (Amaru, 2004) proses anaerob akan optimal bila diberikan bahan makanan yang mengandung karbon dan nitrogen secara bersamaan. C/N ratio menunjukkan perbandingan jumlah dari kedua elemen tersebut. Pada bahan yang memiliki jumlah karbon 15 kali dari jumlah nitrogen akan memiliki C/N ratio 15 berbanding 1. C/N ratio dengan nilai 30 (C/N=30/1 atau karbon 30 kali dari jumlah nitrogen) akan menciptakan proses pencernaan pada tingkat yang optimum, bila kondisi yang lain juga mendukung. Bila terlalu banyak karbon, nitrogen akan habis terlebih dahulu. Hal ini akan menyebabkan proses berjalan dengan lambat. Bila nitrogen terlalu banyak (C/N ratio rendah; misalnya 30/15), maka karbon habis lebih dahulu dan proses fermentasi berhenti.

Karakteristik biogas adalah sebagai berikut:

1. Biogas kira-kira memiliki berat 20% lebih ringan dibandingkan udara dan memiliki suhu pembakaran antara 650°C sampai 750°C.

2. Biogas tidak berbau dan berwarna yang apabila dibakar akan menghasilkan nyala api biru cerah seperti gas LPG.
3. Nilai kalor gas metana adalah 20 MJ/m^3 dengan efisiensi pembakaran 60 % pada konvensional kompor biogas.
4. Nilai kalor rendah (LHV) $\text{CH}_4 = 50,1 \text{ MJ/kg}$.
5. Densitas $\text{CH}_4 = 0,717 \text{ kg/m}^3$.

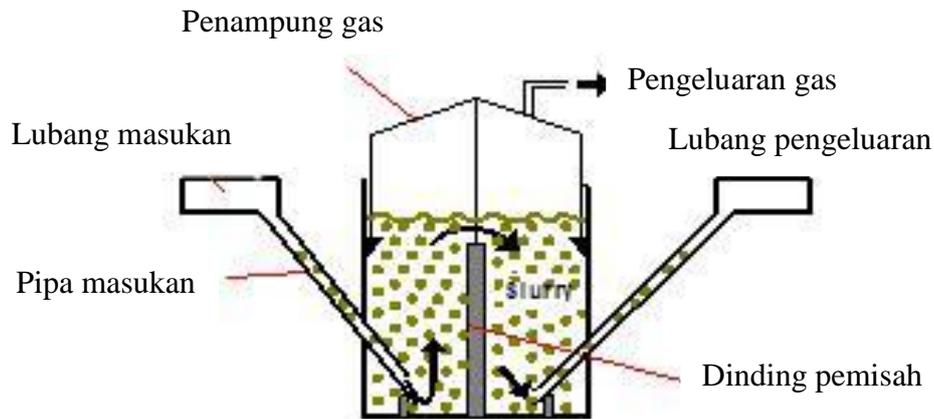
2.5 Digester

Untuk mendapatkan biogas dengan memanfaatkan bahan organik diperlukan suatu ruangan yang kedap udara seperti tangki atau bangunan yang berfungsi sebagai tempat pencernaan atau tempat terjadinya fermentasi, tempat ini disebut digester (Made, 2012). Digester dapat terbuat dari berbagai jenis bahan dan berbagai ukuran, disesuaikan dengan kebutuhan. Digester memiliki fungsi untuk membuat keadaan anaerob, agar proses fermentasi berlangsung dengan baik. Beberapa contoh digester fermentasi basah yang umum digunakan adalah:

a) Digester *floating drum*

Instalasi biogas jenis terapung pertama kali dikembangkan di India pada tahun 1937 sehingga memiliki nama lain yaitu reaktor India (Suyati, 2006). Instalasi biogas ini memiliki bagian digester yang sama dengan instalasi biogas kubah. Perbedaannya terletak pada bagian penampung gas yang menggunakan peralatan bergerak menggunakan drum. Drum ini dapat bergerak naik turun yang berfungsi untuk menyimpan gas hasil fermentasi dalam digester. Pergerakan drum mengapung pada cairan dan tergantung dari jumlah gas yang dihasilkan. Keuntungan dari instalasi biogas ini adalah dapat melihat secara langsung volume gas yang tersimpan pada drum karena pergerakannya. Tempat penyimpanan yang

terapung membuat tekanan konstan. Kerugian dari instalasi biogas ini adalah biaya material konstruksi dari drum lebih mahal. Faktor korosi pada drum juga menjadi masalah sehingga bagian pengumpul gas pada instalasi biogas ini memiliki umur yang lebih pendek dibandingkan menggunakan tipe kubah tetap.

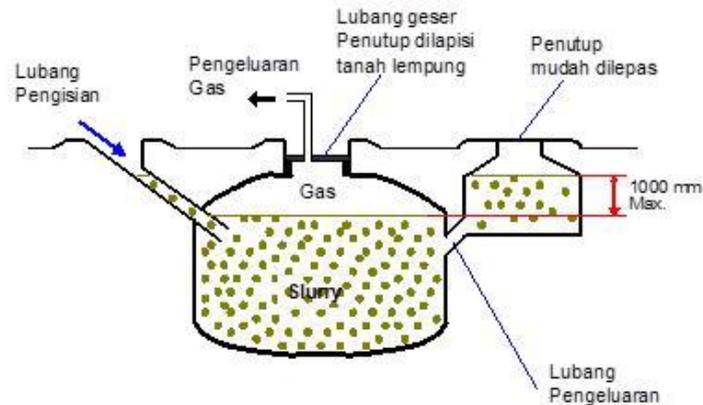


Gambar 2. Digester *Floating Drum* (Nurhasanah dkk., 2006)

b) Digester kubah tetap (*fixed dome*)

Instalasi biogas tipe ini disebut juga reaktor China (Suyati, 2006). Instalasi biogas ini dibuat pertama kali di China sekitar tahun 1930. Instalasi biogas ini memiliki 2 bagian yaitu digester sebagai tempat pencernaan material biogas dan sebagai rumah bagi bakteri pembentuk asam ataupun bakteri pembentuk gas metana. Bagian ini dapat dibuat dengan kedalaman tertentu, menggunakan batu-batu atau beton. Strukturnya harus kuat karena menahan gas agar tidak terjadi kebocoran. Bagian yang kedua adalah kubah tetap (*fixed dome*). Bentuk yang menyerupai kubah ini merupakan pengumpul gas yang tidak bergerak (*fixed*). Keuntungan dari instalasi ini adalah biaya konstruksi lebih murah dari pada instalasi biogas terapung (*floating drum*), karena tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga tidak menggunakan besi yang harganya relatif mahal dan perawatannya lebih mudah.

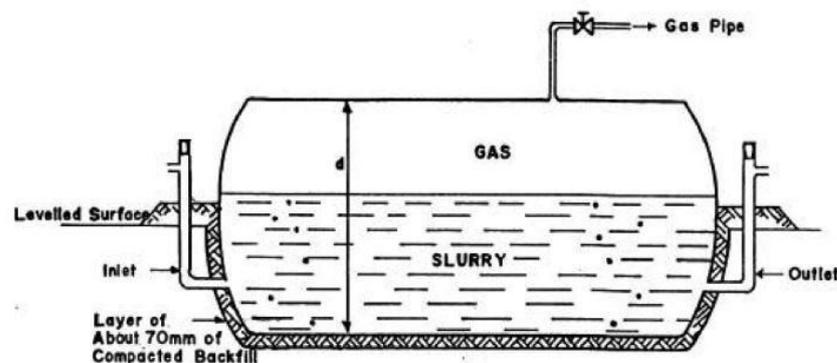
Kerugian dari instalasi ini adalah seringnya terjadi kehilangan gas pada bagian kubah karena konstruksi tetapnya.



Gambar 3. Digester *Fixed Dome* (Nurhasanah dkk., 2006).

c) Tipe balon

Digester ini dikembangkan di Taiwan pada tahun 1960. Digester tipe ini mudah dipindahkan dan mudah cara pemakaiannya. Digester tipe balon terlihat seperti Gambar 4 (FAO, 1996)

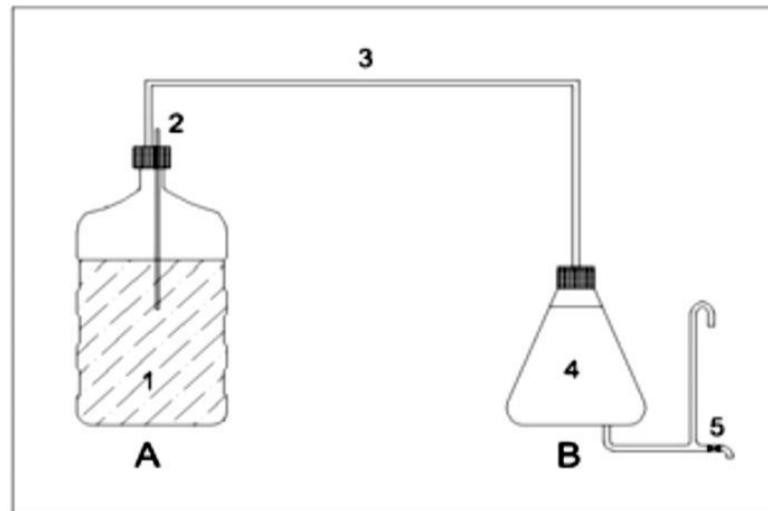


Gambar 4. Digester Tipe Balon (FAO, 1996)

d) Digester *batch*

Tipe digester ini tidak membutuhkan banyak perhatian selama poses. Meskipun demikian hampir semua bahan organik tetap akan diproses. Efisiensi maksimal dari proses hanya dapat diharapkan bila digester diisi dengan hati-hati. Tipe *batch* memiliki keuntungan lain yaitu dapat digunakan ketika bahan tersedia pada

waktu-waktu tertentu dan bila memiliki kandungan padatan tinggi (25%). Bilabahan tersebut sulit untuk diproses, tipe *batch* akan lebih cocok, karena lama proses dapat ditingkatkan dengan mudah. Bila dalam proses terjadi kesalahan, misalnya karena bahan keracunan, proses dapat dihentikan dan mulai dengan yang baru.



Gambar 5. Digester percobaan sistem batch (Ratnaningsih dkk., 2009)

Keterangan:

A. Tabung air mineral 6000 ml berisi bahan penelitian

B. Tabung erlenmeyer 1000 ml berisi larutan NaCl

1. Campuran penelitian dengan *starter*

2. Termometer

3. Selang penghubung

4. Larutan NaCl 10%

5. Leher angsa

2.6 Faktor Yang Mempengaruhi Produksi Biogas

Faktor yang mempengaruhi keberhasilan produksi biogas ialah faktor pendukung untuk mempercepat proses fermentasi yaitu kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan bakteri perombak. Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap produksi biogas yakni sebagai berikut:

2.6.1 Total Solid (TS)

Secara analitik, kandungan total solids (total padatan) didefinisikan sebagai semua materi yang tersisa sebagai residu setelah penguapan 103–105°C (di dalam oven). Materi yang memiliki tekanan uap pada temperatur tersebut akan hilang selama penguapan. Berdasarkan proses produksi biogas per volume bahan, maka campuran bahan organik dan starter diharapkan kadar TS sekitar 7–9%. Hal ini menunjukkan bahwa TS optimum untuk produksi biogas antara 7–9% (Budiyono, 2009).

2.6.2 Temperatur

Temperatur merupakan syarat aktif bakteri penghasil biogas dan untuk berlangsungnya proses pembentukan biogas. Bakteri metanogenik tidak aktif pada temperatur sangat tinggi atau rendah. Kondisi optimum yaitu pada temperatur sekitar 32–35°C pada kondisi mesofilik atau 50–55°C pada termofilik. Jika temperatur turun menjadi 10°C, produksi gas akan terhenti. Biogas yang dihasilkan pada kondisi di luar temperatur tersebut mempunyai kandungan karbondioksida yang lebih tinggi (Tuti, 2006).

2.6.3 Derajat keasaman (pH)

Pembentukan biogas lebih besar pada proses fermentasi tahap dua disebabkan adanya proses hidrolisis yang merupakan proses degradasi senyawa kompleks

sehingga mempermudah proses pembentukan asam oleh bakteri aseogenik dan juga proses pembentukan metan oleh bakteri metanogenesis. Pembentukan asam yang terlalu cepat menyebabkan banyaknya bakteri metanogenesis yang mati karena tidak tahan dengan suasana asam (Gita dan Ika, 2013). Derajat keasaman sangat berpengaruh terhadap kehidupan bakteri. Kegagalan proses pencernaan anaerobik dalam digester biogas bisa dikarenakan tidak seimbangnya populasi bakteri metanogenik terhadap bakteri asam yang menyebabkan lingkungan menjadi sangat asam (pH kurang dari 7) yang menghambat kelangsungan hidup bakteri metanogenik. Kondisi keasaman yang optimal pada pencernaan anaerobik yaitu sekitar pH 6,8–8, laju pencernaan akan menurun pada kondisi pH yang lebih tinggi atau rendah (Tuti, 2006).

2.6.4 Rasio C-N

Nilai atau bandingan antara unsur C (karbon) dengan unsur N (nitrogen) secara umum dikenal dengan nama rasio C-N. Perubahan senyawa organik menjadi gas metan dan gas karbondioksida memerlukan persyaratan rasio C-N antara 20–30. Bakteri anaerob mengonsumsi karbon sekitar 30 kali lebih cepat dibanding nitrogen. Rasio optimum untuk digester anaerobik berkisar 20–30. Jika rasio C-N terlalu tinggi, nitrogen akan dikonsumsi dengan cepat oleh bakteri metanogen untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhannya dan hanya sedikit yang bereaksi dengan karbon akibatnya gas yang dihasilkan menjadi rendah. Sebaliknya jika rasio C-N rendah, nitrogen akan dibebaskan dan berakumulasi dalam bentuk amonia (NH_4) yang dapat meningkatkan pH, jika pH lebih tinggi dari 8,5 akan menunjukkan pengaruh negatif pada populasi bakteri metanogen (Tuti, 2006).

Sedangkan rasio C-N yang ideal untuk isian digester menurut (Wahyuni, 2011) adalah 25–30.

2.6.5 Hydraulic Retention Time (HRT)

Waktu tinggal hidrolis (HRT), juga dikenal sebagai waktu tinggal hidrolis atau dapat dikatakan lamanya limbah akan tinggal di dalam sistem pengolahan. Lebih lama limbah tinggal maka proses pengolahan lebih baik tetapi konstruksi menjadi besar. Sebaliknya bila terlampaui cepat maka substrat hanya lewat saja hingga tidak terjadi proses pengolahan. HRT bertujuan untuk menetapkan jumlah waktu yang tersedia untuk pertumbuhan bakteri dan konversi berikutnya dari bahan organik ke gas, dengan rumus (Denis dan Burke, 2001):

$$\text{HRT} = V / Q \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

HRT = Waktu tinggal hidrolis (hari)

V = Volume kerja tangki (m³)

Q = Laju pembebanan substrat (m³/hari)

Konversi padatan yang mudah menguap untuk produk gas dalam digester anaerobik dikendalikan oleh HRT. Desain HRT adalah fungsi dari disposisi akhir dari lumpur dicerna. Namun Meningkakant dalam tahanan waktu > 12 hari tidak memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kerusakan volatile padatan. Nilai HRT mempengaruhi laju dan tingkat produksi metan. Dari semua operasi, kondisi oprasional dalam sebuah digester anaerobi , misalnya, temperatur, padatan konsentrasi, dan mudah menguap kandungan padatan lumpur pakan. HRT adalah kondisi operasional yang paling penting yang mempengaruhi konversi volatil padatan untuk produk gas (Gerrardi, 2003).

2.7 Pemanasan Global

Pemanasan global (*global warming*) disebabkan oleh peningkatan jumlah gas rumah kaca secara besar-besaran, salah satunya adalah CO₂ yang dihasilkan dari bahan bakar fosil dan penggundulan hutan. Konsentrasi gas berbahaya yang naik ke atmosfer menyebabkan efek rumah kaca sehingga panas matahari tetap terperangkap dalam atmosfer dan mengakibatkan kenaikan suhu permukaan bumi. Kenaikan suhu ini memberi dampak langsung pada perubahan lingkungan dan sangat membahayakan kehidupan semua ekosistem di dalamnya.

Dampak lingkungan yang terjadi dapat ditunjukkan dengan fakta-fakta antara lain; mencairnya es di kutub utara dan selatan, meningkatnya level permukaan laut, gelombang panas menjadi semakin panas, habisnya gletser serta perubahan iklim (*climate change*) yang semakin ekstrim. Climate change adalah perubahan iklim yang berhubungan langsung atau tidak langsung dengan aktifitas manusia dan dapat mengubah komposisi atmosfer global dengan penambahan variabel iklim alami yang berbanding lurus dengan periode waktu (UNFCCC, 1992).

Perubahan iklim yang terjadi terus menjadi ancaman langsung bagi keberlangsungan hidup seluruh makhluk di muka bumi ini, dan hal ini merupakan tanggung jawab kita sebagai manusia untuk memperbaiki setiap kerusakan lingkungan untuk mengembalikan keseimbangan alam. Manusia memiliki sedikit pengaruh pada iklim sampai mereka mulai hidup menetap dan bermukim untuk bertani sekitar 11.500 tahun yang lalu (Goldstein, 2009). Kebutuhan lahan untuk bertani mengharuskan adanya pembebasan lahan hutan, sehingga

pohon-pohon yang sebelumnya berfungsi sebagai penyerap karbondioksida dari atmosfer harus melepaskan karbon tersebut dan konsentrasi karbondioksida di atmosfer terus meningkat yang ikut mempengaruhi kenaikan suhu bumi.

Peningkatan jumlah karbon di atmosfer terus meningkat dari tahun ke tahun.

Sejak dimulainya revolusi industri pada abad 18, bahan bakar fosil berupa batu bara dan minyak bumi terus digunakan. Proses pembakaran dari bahan bakar yang digunakan ini terus melepaskan CO₂ dan mengakibatkan kenaikan jumlah konsentrasi karbon di atmosfer. Konsentrasi yang berlebihan ini mempengaruhi kenaikan suhu permukaan bumi yang terus naik karena panas dari radiasi matahari benar-benar terperangkap oleh mantel bumi.

2.8 Efek Rumah Kaca

Pemanasan global merupakan akibat dari efek rumah kaca. Efek rumah kaca ditemukan pertama kali oleh Jean-Baptiste Joseph Fourier, seorang ahli fisika dan matematika dari Perancis pada tahun 1824. Penemuan Fourier kemudian diteruskan oleh seorang fisikawan Swedia yang bernama Svante Arrhenius pada tahun 1894 (Rusbiantoro, 2008).

Efek rumah kaca adalah suatu kondisi dimana bumi seperti dikelilingi oleh kaca. Sinar matahari yang masuk berupa radiasi gelombang pendek yang sebagian diserap oleh bumi dan sebagian lagi dipantulkan kembali ke angkasa berupa radiasi gelombang panjang infra merah. Ketika sampai di atmosfer, radiasi infra merah tersebut diserap oleh kaca dan dipantulkan kembali ke bumi dan akan tersimpan di permukaan bumi. Akumulasi radiasi matahari di atmosfer bumi menyebabkan suhu di bumi menjadi semakin menghangat (Rusbiantoro, 2008).

Efek rumah kaca di atmosfer terjadi karena adanya gas-gas yang menyerap dan memancarkan radiasi infra red. Gas-gas tersebut disebut dengan gas-gas rumah kaca. Gas-gas rumah kaca menyerap radiasi panas *infra red* yang dipancarkan oleh permukaan bumi, panas akibat penyerapan radiasi matahari oleh atmosfer itu sendiri dan panas yang diserap oleh awan. Penyerapan itu menyebabkan atmosfer dekat permukaan bumi menjadi menghangat sehingga akhirnya atmosfer memancarkan radiasi panas infra red ke segala penjuru, termasuk ke bawah ke permukaan bumi. Oleh karena itu, jika siklus itu berlangsung demikian cepat maka penghangatan atau pemanasan bumi juga akan menjadi semakin cepat (Team SOS, 2011: 10).

Jika CFC (*Chloro Fluoro Carbon*) terus meningkat, maka akan mengakibatkan kandungan ozon (O_3) di atmosfer semakin menipis dan akan mengakibatkan adanya lubang di kutub utara dan selatan. Jika lubang ozon semakin membesar, maka sinar ultraviolet (UV) mampu menerobos masuk ke atmosfer dan menyebabkan terjadinya radiasi. Jika lapisan ozon semakin menipis dan berlubang, maka bumi ini seakan tidak ada lagi pelindung dari radiasi UV. CFC ini dua ribu kali lebih efektif memperangkap radiasi gelombang panjang daripada karbon (Rusbiantoro, 2008).

Meningkatnya konsentrasi gas-gas rumah kaca disebabkan oleh dua hal, yaitu secara alami dan akibat dari aktivitas manusia. Jika peningkatan konsentrasi gas-gas rumah kaca terjadi secara alami, maka peningkatannya suhu di bumi akan naik secara bertahap. Namun yang terjadi sekarang ini, konsentrasi gas-gas rumah kaca meningkat lebih cepat. Yang seharusnya bisa dicapai dalam berpuluh-puluh tahun,

sekarang ini hanya ditempuh dalam beberapa tahun saja. Ini diakibatkan oleh aktivitas yang dilakukan oleh manusia.

2.9 Gas Rumah Kaca

Matahari sebagai pusat tata surya memberikan pengaruh yang besar bagi planet-planet yang ada termasuk bumi. Energi matahari memiliki pengaruh yang besar bagi kehidupan di bumi. Sebagian sinar matahari yang menuju ke bumi dibelokkan oleh atmosfer dan dipantulkan kembali ke luar angkasa dan sebagiannya lagi mencapai permukaan bumi dan dipantulkan ke atmosfer sebagai suatu jenis energi yang bergerak lambat dan disebut radiasi inframerah. Radiasi inframerah ini menyebabkan panas dan diserap oleh gas rumah kaca seperti uap air, karbondioksida, ozon serta metana yang kemudian terjebak di atmosfer sehingga terus mempengaruhi kenaikan suhu di permukaan bumi.

Gas rumah kaca (GRK) adalah gas-gas di atmosfer yang berfungsi sebagai mantel bumi untuk menyerap radiasi matahari di atmosfer sehingga menjaga suhu permukaan bumi tetap hangat. Akan tetapi berlebihan gas-gas tersebut akan menyebabkan pemanasan yang tidak lazim atau pemanasan global. Gas rumah kaca yang berlebihan ini disebabkan oleh proses alam serta berbagai kegiatan manusia.

Konvensi PBB mengenai perubahan iklim (*United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC*) menyatakan enam gas yang digolongkan sebagai GRK yakni Karbon Dioksida (CO₂), Dinitroksida (N₂O), Metana (CH₄), Sulfurheksafluorida (SF₆) dan Perfluorokarbon (PFCs). Semua GRK ini memiliki potensi pemanasan global yang berbeda dan dihasilkan

oleh berbagai kegiatan manusia terutama pembakaran bahan bakar fosil dan penggundulan hutan. Hal ini berarti, untuk 1 ton CH₄, kekuatan destruktif yang diakibatkan akan mencapai 25 kali dari kekuatan destruktif dari 1 ton CO₂.

Tabel 3. Potensi pemanasan global dari berbagai jenis GRK

Gas rumah kaca	GWP lebih dari 100 tahun	Sumber-sumber tipikal
Carbon dioxide (CO ₂)	1	Pembakaran energi, reaksi biokimia
Methane (CH ₄)	25	Penguraian/dekomposisi
Nitrous Oxide (N ₂ O)	298	Pupuk, emisi mobil, manufaktur
Sulfur hexafluoride (SF ₆)	22.800	Swith gears, substations
Perfluorocarbon (PFC)	7.390-12.200	Peleburan aluminium
Hydrofluorocarbon (HFC)	124-14.800	Refrigeran, gas industri

Sumber: (Fiske dkk, 2012)

Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC) mengelompokkan sumber emisi GRK (Gas Rumah Kaca) dalam 5 kategori sumber yakni energi, proses industri, pertanian, tataguna lahan dan kehutanan, dan limbah.

2.9.1. Energi

Emisi karbon yang dihasilkan dari sektor energi pada inventarisasi GRK dibagi dalam dua kategori utama yaitu emisi dari pembakaran bahan bakar dan emisi fugitive. Pembakaran bahan bakar adalah oksidasi bahan bakar secara sengaja dalam suatu alat dengan tujuan menyediakan panas atau kerja mekanik kepada suatu proses dan emisi fugitive adalah emisi GRK yang secara tidak sengaja terlepas pada kegiatan produksi dan penyediaan energi.

Emisi GRK dari bangunan terutama bersumber dari penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi, dan penggunaan langsung bahan bakar fosil yang secara signifikan selalu dihasilkan dari material-material konstruksi, refrigeran dan sistem pendingin. Dalam proses pembangunan, energi yang digunakan selalu berhubungan dengan beberapa aktivitas berikut:

1. Proses produksi material bangunan
2. Proses distribusi material bangunan dari tempat produksi ke site bangunan
3. Proses konstruksi bangunan
4. Operasional bangunan
5. Proses renovasi ataupun pembongkaran bangunan secara utuh

2.9.2. Industri

Emisi CO₂ yang dihasilkan dari sektor industri cukup tinggi yang terjadi pada proses produksi karena penggunaan energi yang cukup banyak dan umumnya masih memakai bahan bakar fosil. Proses industri menghasilkan emisikarbon yang cukup besar dari proses awal pengambilan bahan baku, proses pengolahan atau produksi sampai proses distribusi. Semua sektor industri memberikan kontribusi GRK tetapi kontributor terbesar adalah pada industri semen, industri baja, industri pulp dan kertas, industri petrokimia, industrikeramik, industri pupuk, industri makanan dan minuman (Badan Pengkajian Kebijakan Iklim dan Mutu Industri, 2012).

Tabel 4. Potensi pemanasan global berbagai jenis GRK

No.	Subsektor Industri	Emisi GRK (Mton CO ₂ e) Inventory tahun 2010	Prosentase (%)	Target penurunan emisi GRK pada 2020 (skenario 26%) Mton CO ₂ e	Target penurunan emisi GRK pada 2020 (skenario 41%) Mton CO ₂ e
1.	Semen	32	27,97	0,280	1,398
2.	Baja	8.34	7,29	0,073	0,364
3.	Pulp dan kertas	31,02	27,11	0,271	1,356
4.	Tekstil	11,09	9,69	0,097	0,485
5.	Petrokimia	11,46	10,02	0,100	0,501
6.	Keramik	1,36	1,19	0,012	0,059
7.	Pupuk	11,23	9,82	0,098	0,491
8.	Makanan dan minuman	7,91	6,91	0,069	0,346
	Total	114,41	100	1	5

Sumber: Draft Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca di Sektor Industri

Setiap proses pembangunan tidak terlepas dari proses industri sebagai penyedia material. Material pabrikan memiliki banyak kelebihan dari kekuatan, fleksibel, hingga ketersediaan di pasaran sehingga menjadi pilihan yang tepat namun hal ini juga berbanding lurus dengan emisi yang dihasilkannya. Selain emisi yang dihasilkan dari proses pengolahan atau produksi, emisi yang besar juga dihasilkan dari proses eksploitasi bahan baku, pengangkutan dari lokasi pengambilan ke tempat pengolahan serta proses distribusi dari tempat pengolahan hingga lokasi

pembangunan. Sektor industri juga mencatat bahwa penggunaan energi juga terdapat pada proses pengolahan limbah namun inventarisasi emisinya biasanya dilakukan terpisah.

Berdasarkan Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional (Pepres no. 71 Tahun 2011) tentang kegiatan penggunaan energi meliputi 2 hal, yaitu:

1. Penggunaan bahan bakar pada peralatan-peralatan stasioner (di industri, komersial, dan rumah tangga).
2. Peralatan-peralatan yang bergerak (transportasi).

Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung emisi GRK dari pembakaran bahan bakar adalah:

$$\text{Emisi GRK (kg/thn)} = \text{Konsumsi energi (TJ/thn)} \times \text{Faktor Emisi (kg/TJ)}$$

$$\text{Konsumsi energi (TJ)} = \text{Konsumsi energi (sat.fisik)} \times \text{Nilai kalor (TJ/sat.fisik)}$$

Keterangan :

TJ = Terra Joule

2.9.3. Pertanian

Emisi karbon dari sektor pertanian ini terutama dari penambahan kapur pertanian dengan maksud untuk mengurangi kemasaman tanah dan meningkatkan pertumbuhan tanaman, khususnya pada lahan pertanian serta penggunaan pupuk urea pada budidaya pertanian menyebabkan lepasnya CO₂ yang diikat selama proses pembuatan pupuk (Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II-volume 3, 2012). Dalam proses pengapuran (CaCO₃) dan pembuatan urea (CO(NH₂)₂) melepaskan bikarbonat (2HCO₃⁻)

yang selanjutnya terbentuk menjadi CO₂ dan air (H₂O). Karbon yang ada ini dilepaskan ke atmosfer dan menjadi Gas Rumah Kaca.

2.9.4. Tataguna Lahan dan Kehutanan

Emisi GRK juga bersumber dari pembakaran biomassa, tanah, fermentasi enterik ternak dan pengolahan kotoran ternak (Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II -volume 3, 2012). Penebangan liar atau pembakaran hutan untuk berbagai kepentingan menyebabkan pelepasan karbon yang lebih besar ke atmosfer dan fungsi penyerapan karbon menjadi semakin menurun. Hubungan antara sektor tataguna lahan dan kehutanan dengan bangunan adalah dalam hal eksploitasi material bangunan. Eksploitasi material berhubungan langsung dengan lingkungan karena ketersediaannya pada alam dalam satu area atau lahan tertentu. Material yang diambil bisa saja terdapat pada permukaan tanah atau dalam lapisan tanah yang proses eksploitasinya (melalui penambangan) akan mengubah tata guna lahan serta mempengaruhi ekosistem yang ada disekitarnya.

2.9.5. Limbah

Dalam inventarisasi GRK pada sektor limbah menyumbang emisi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan nitro oksida (N₂O). Metana merupakan gas yang paling banyak terbentuk dan dilepaskan ke udara. Potensi pembentukan gas rumah kaca dari limbah dipicu oleh muatan organik dari cairan limbah dan volume limbah tersebut (IPCC, 2006).

2.10 Life Cycle Assessment (LCA)

LCA adalah alat untuk menilai potensi dampak lingkungan dari sistem produk atau jasa pada semua tahap dalam siklus hidup mereka – dari ekstraksi sumber daya, melalui produksi dan penggunaan produk menggunakan kembali, daur ulang atau pembuangan akhir. LCA adalah suatu alat yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari suatu produk, proses atau aktivitas selama seluruh siklus hidup dengan mengukur penggunaan sumber daya (“input” seperti energi, bahan baku, air) dan emisi lingkungan (“output” untuk udara, air dan tanah) yang berkaitan dengan sistem yang sedang dievaluasi.

LCA dapat diterapkan dalam pengembangan strategis, pengembangan dan pemasaran produk. Metodologi LCA telah dikembangkan secara ekstensif selama dekade terakhir ini. Selain itu, sejumlah standar yang terkait LCA (ISO 14.040-14.043) dan laporan teknis telah diterbitkan dalam Organisasi Internasional untuk Standarisasi (ISO) untuk merampingkan metodologi.

Penggunaan energi dan emisi lingkungan seperti udara, air dan limbah padat berkurang secara signifikan. Dampak kategori termasuk peningkatan keasaman, keracunan air, efek rumah kaca, *eutrofikasi*, toksisitas manusia, penipisan ozon dan kabut juga berkurang sebagai akibat langsung dari penggunaan kimia yang lebih efisien menghasilkan direkomendasikan dosis yang lebih rendah dan performa yang lebih baik untuk mencuci super compacts.

Beberapa tahapan dari *life cycle assessment* adalah sebagai berikut :

a. *Geografis*

proses produksi yang dilakukan pada tempat yang berbeda akan menghasilkan dampak lingkungan yang berbeda pula. Emisi yang dihasilkan juga akan memiliki pengaruh yang berbeda pula tergantung pada populasi, kondisi meteorologis, habitat dan faktor-faktor lain. Efek dari pelaksanaan aktivitas-aktivitas dapat berpengaruh secara lokal, regional maupun global.

b. *Raw material extraction*

Perpindahan raw material merupakan awal dari siklus hidup produk. Pada stage ini juga meliputi transportasi material-material mulai dari pengambilan ke proses pengolahannya.

c. *Material processing manufaktur*

pada tahap ini dilakukan proses manufaktur dimana raw material dilakukan transformasi menjadi produk hingga sampai ke tangan konsumen. Proses manufaktur pada tahap ini terdiri dari tiga bagian yang meliputi material manufacture, product fabrication dan filling packaging.

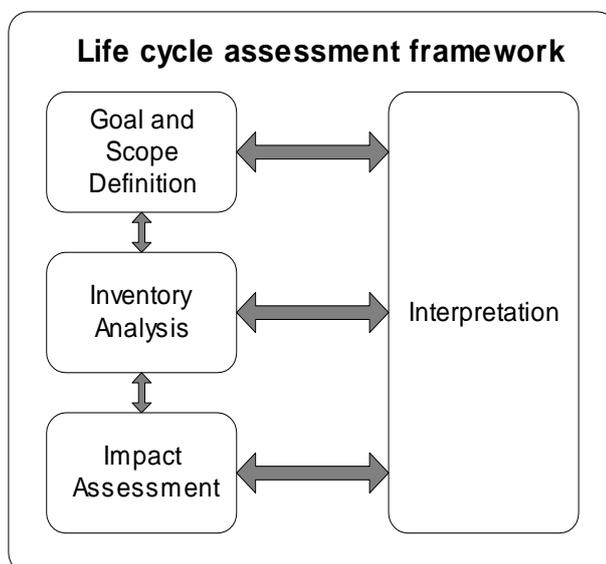
d. *Use reuse maintenance*

pada tahap ini melibatkan penggunaan, reuse dan maintenance aktual konsumen atas produk. Produk atau material mungkin memerlukan recondition, perbaikan atau servis sehingga dapat mempertahankan performansinya. Saat konsumen sudah tidak memerlukan produk, produk akan dilakukan recycle.

e. *Recycle waste management*

tahapan ini turut memperhitungkan kebutuhan energi dan buangan lingkungan sehubungan dengan disposisi produk dan material.

Adanya dampak lingkungan dari biogas skala rumah tangga dapat dinilai menggunakan metode LCA. Metode ini dilakukan dengan memperhitungkan semua aliran *input-output (exchange flow)* dari sistem kelingkungan di dalam tahapan daur hidup produk yang telah ditetapkan batasannya. Pelaksanaan metode LCA ini mengacu pada pedoman pelaksanaan LCA menurut Framework ISO 14040 (2006) yang terdiri atas 4 tahapan yaitu penentuan *goal dan scope*, *inventory analysis*, *impact assessment*, dan *interpretation with improvement*.



Gambar 6. Kerangka tahapan dalam LCA

2.10.1 Goal and Scoping

Tujuan dan ruang lingkup LCA harus didefinisikan dengan jelas dan konsisten dengan sistem yang akan di analisis. Dalam menentukan tujuan LCA, hal-hal yang harus dinyatakan adalah sebagai berikut :

- a. Sistem yang akan di analisis
- b. Alasan melakukan penelitian
- c. Siapa yang dituju, yaitu kepada siapa hasil penelitian ditunjukkan

d. Apakah hasilnya ditunjukkan untuk digunakan dalam pernyataan komparatif yang akan dipublikasikan kepada publik.

Dalam mendefinisikan ruang lingkup LCA, hal-hal yang harus dipertimbangkan dan dijelaskan adalah sebagai berikut:

- a. Sistem produk yang akan dianalisis
- b. Fungsi sistem produk atau dalam studi banding sistem
- c. Unit fungsional
- d. Batas sistem
- e. Prosedur alokasi
- f. Metodologi LCIA dan jenis dampak
- g. Interpretasi untuk digunakan
- h. Persyaratan data
- i. Asumsi
- j. Pilihan nilai dan elemen opsional
- k. Pembatasan
- l. Persyaratan kualitas data
- n. Jenis ulasan kritis, jika ada
- m. Jenis dan format laporan yang diperlukan untuk penelitian ini.

Batas sistem menentukan proses unit mana yang harus dimasukkan dalam LCA.

Untuk penggunaan batas sistem harus konsisten dengan tujuan penelitian. Kriteria yang digunakan dalam penetapan batas sistem harus diidentifikasi dan dijelaskan.

Menentukan batas sistem harus dibuat mengenai unit mana yang harus dimasukkan dalam analisis dan perinciannya harus dipelajari. Akan sangat membantu untuk menggambarkan sistem menggunakan diagram alur proses yang

menunjukkan proses dan hubungan antar proses. Setiap proses unit pada awalnya harus dijelaskan untuk didefinisikan:

- a. Di mana proses unit dimulai, dalam hal penerimaan bahan baku atau produk setengah jadi,
- b. Sifat transformasi dan operasi yang terjadi sebagai bagian dari proses unit, dan
- c. Di mana proses unit berakhir, dalam hal ini tujuan produk akhir.

Idealnya, sistem produk harus dimodelkan sedemikian rupa sehingga input dan output pada batas sistem dari aliran awal hingga akhir (produk). Ini adalah proses berulang untuk mengidentifikasi input dan output yang harus dinilai ke lingkungan, yaitu untuk mengidentifikasi unit mana yang memproduksi input (atau unit mana yang memproses menerima output) harus dimasukkan dalam sistem produk yang diteliti. Identifikasi awal dibuat menggunakan data yang tersedia. Input dan output harus lebih teridentifikasi sepenuhnya setelah data tambahan dikumpulkan.

2.10.1.1 Data Quality Requirements

Persyaratan kualitas data harus ditentukan untuk memungkinkan tujuan dan ruang lingkup LCA dipenuhi. Persyaratan kualitas data harus membahas hal-hal berikut:

- a) cakupan terkait waktu: usia data dan lama waktu minimum untuk pengumpulan data
- b) cakupan geografis: area geografis dari mana data untuk proses unit harus dikumpulkan memenuhi tujuan penelitian
- c) cakupan teknologi: teknologi spesifik atau campuran teknologi
- d) presisi: ukuran variabilitas nilai data untuk setiap data yang diungkapkan

- e) kelengkapan: persentase aliran yang diukur atau diperkirakan
- f) keterwakilan: penilaian kualitatif sejauh mana kumpulan data mencerminkan kebenaran populasi yang diminati (yaitu cakupan geografis, periode waktu dan cakupan teknologi)
- g) konsistensi: penilaian kualitatif tentang apakah metodologi penelitian diterapkan secara seragam pada beragam komponen analisis
- h) reproduktifitas: penilaian kualitatif sejauh mana informasi tentang metodologi dan data nilai akan memungkinkan praktisi independen untuk mereproduksi hasil yang dilaporkan dalam penelitian ini
- i) sumber data
- j) ketidakpastian informasi (data, model, dan asumsi).

2.10.2 *Life cycle inventory analysis (LCI)*

Pengertian tujuan dan ruang lingkup studi menyediakan rencana awal untuk melakukan inventaris siklus hidup tahap LCA. Ketika menjalankan rencana untuk analisis inventaris siklus hidup memerlukan langkah-langkah operasional. Data kualitatif dan kuantitatif untuk dimasukkan dalam inventaris harus dikumpulkan untuk setiap unit proses yang termasuk dalam batas sistem. Data yang dikumpulkan, apakah diukur, dihitung atau diperkirakan, digunakan untuk mengukur input dan output dari suatu unit proses.

Ketika data telah dikumpulkan dari sumber publik, sumber tersebut akan disetarakan. Untuk data yang akan dijadikan kesimpulan penelitian, rincian tentang proses pengumpulan data yang relevan, waktu ketika data telah dikumpulkan, dan informasi lebih lanjut tentang indikator kualitas data harus

disetarakan. Jika data tersebut tidak memenuhi persyaratan kualitas data, ini harus dinyatakan. Untuk mengurangi risiko kesalahpahaman (menghasilkan penghitungan ganda saat memvalidasi atau menggunakan kembali data dikumpulkan), deskripsi dari setiap proses unit harus direkam. Karena pengumpulan data dapat menjangkau beberapa lokasi pelaporan dan referensi yang diterbitkan, langkah-langkah harus diambil untuk mencapai pemahaman yang seragam dan konsisten tentang sistem produk yang akan dianalisis.

Langkah-langkah inventaris harus mencakup hal berikut ini:

- a. Menggambar diagram alir proses yang menguraikan semua proses unit yang akan dianalisis, termasuk hubungan timbal balik sistem
- b. Menjelaskan setiap proses unit secara terperinci sehubungan dengan faktor-faktor yang memengaruhi input dan output
- c. Daftar aliran proses dan data yang relevan untuk kondisi operasi yang terkait dengan setiap proses unit
- d. Mengembangkan daftar yang menentukan unit yang digunakan
- e. Menguraikan teknik pengumpulan dan penghitungan data yang diperlukan untuk semua data
- f. Memberikan instruksi untuk mendokumentasikan dengan jelas setiap kegiatan, penyimpangan atau hal-hal lain yang terkait data yang disediakan.

Semua prosedur perhitungan harus didokumentasikan secara eksplisit dan asumsi yang dibuat harus dinyatakan dengan jelas dan dijelaskan. Prosedur perhitungan yang sama harus diterapkan secara konsisten selama penelitian. Ketika menentukan aliran elementer yang terkait dengan produksi, campuran produksi

yang sebenarnya harus digunakan, untuk mencerminkan berbagai jenis sumber daya yang dikonsumsi.

Sebagai contoh, untuk produksi dan penggunaan listrik, diperhitungkan dari energi listrik, efisiensi bahan bakar kerugian pembakaran, konversi, transmisi dan distribusi. Input dan output yang terkait dengan bahan yang mudah terbakar (Minyak, gas, atau batubara) dapat diubah menjadi energi input atau output dengan mengalikannya dengan panas pembakaran yang relevan. Dalam hal ini, harus dilaporkan apakah nilai pemanasan yang lebih tinggi atau nilai pemanasan yang lebih rendah digunakan.

Input dan output harus dialokasikan untuk produk yang berbeda sesuai dengan prosedur yang dinyatakan dengan jelas yang harus didokumentasikan dan dijelaskan bersama dengan prosedur alokasi. Jumlah input dan output yang dialokasikan dari proses unit harus sama dengan input dan output dari proses unit sebelum alokasi.

2.10.3 *Life cycle impact assessment (LCIA)*

LCIA berbeda dari analisis lain, seperti evaluasi kinerja lingkungan, dampak lingkungan penilaian dan penilaian risiko, karena LCIA merupakan pendekatan relatif berdasarkan unit fungsional. LCIA dapat digunakan dari informasi yang dikumpulkan oleh analisis sebelumnya. Tahap LCIA harus direncanakan dengan teliti untuk mencapai tujuan dan ruang lingkup studi LCA. Tahap LCIA harus dikoordinasikan dengan tahap LCA lainnya untuk memperhitungkan kemungkinan kelalaian dan sumber ketidakpastian:

a) apakah kualitas data LCI dan hasilnya cukup untuk melakukan LCIA sesuai

dengan tujuan studi dan definisi ruang lingkup

b) apakah batas sistem dan keputusan *cut-off* data telah cukup ditinjau untuk memastikan ketersediaan hasil LCI yang diperlukan untuk menghitung hasil indikator untuk LCIA

c) apakah relevansi lingkungan dari hasil LCIA berkurang karena unit fungsional perhitungan LCI, rata-rata lebar sistem, agregasi dan alokasi.

Tahap LCIA mencakup pengumpulan hasil indikator untuk berbagai kategori dampak, yang secara bersama-sama mewakili profil LCIA untuk sistem produk.

LCIA terdiri dari bagian konstruksi dan operasional.

Tahap LCIA harus mencakup unsur-unsur sebagai berikut:

- a. Pemilihan kategori dampak, indikator kategori dan karakteristik sistem
- b. Penilaian hasil LCI ke kategori dampak yang dipilih (klasifikasi)
- c. Perhitungan hasil indikator kategori (karakteristik)

Dari LCIA ada bagian-bagian operasional dan informasi yang dapat digunakan tergantung pada tujuan dan ruang lingkup LCA yaitu:

- a) normalisasi: menghitung besarnya hasil indikator kategori relatif terhadap informasi referensi
- b) pengelompokan: pengurutan dan hasil dari kategori dampak
- c) pembobotan: mengonversi dan mengumpulkan hasil indikator di seluruh kategori dampak menggunakan faktor numerik berdasarkan nilai, data sebelum pembobotan harus tetap tersedia
- d) analisis kualitas data: pemahaman yang lebih baik tentang ketelitian pengumpulan hasil indikator LCIA

Bagian LCIA operasional dapat menggunakan informasi dari luar kerangka LCIA.

Penggunaan seperti itu informasi harus dijelaskan dan penjelasannya harus dilaporkan. Penerapan dan penggunaan metode normalisasi, pengelompokan, dan pembobotan harus konsisten dengan tujuan dan ruang lingkup LCA dan harus sepenuhnya transparan. Semua metode dan perhitungan yang digunakan harus didokumentasikan untuk memberikan transparansi.

LCIA yang dimaksudkan untuk digunakan dalam pernyataan komparatif yang akan disampaikan kepada publik harus menggunakan seperangkat indikator kategori yang cukup komprehensif. LCIA tidak akan memberikan dasar tunggal pernyataan komparatif yang dimaksudkan untuk dipublikasikan kepada publik kesetaraan lingkungan secara keseluruhan, karena informasi tambahan akan perlu diatasi beberapa keterbatasan yang melekat dalam LCIA. Hasil LCIA tidak memprediksi dampak pada titik akhir kategori, melebihi ambang batas, margin atau risiko keselamatan.

2.10.4 Life cycle interpretation

Tahap interpretasi siklus hidup atau analisis LCI terdiri dari beberapa bagian sebagai berikut:

- a. Identifikasi masalah signifikan berdasarkan hasil LCI dan LCIA pada analisis LCA
- b. Evaluasi yang mempertimbangkan kelengkapan, sensitivitas dan pemeriksaan konsistensi
- c. Kesimpulan, batasan, dan rekomendasi.

Hubungan antara tahap interpretasi dengan analisis LCA lainnya ditunjukkan dari

tujuan dan ruang lingkup, penilaian siklus hidup, sedangkan tahap lain dari LCA (LCI dan LCIA) menghasilkan informasi tentang sistem produk.

Interpretasi juga harus mempertimbangkan hal berikut sehubungan dengan tujuan penelitian:

- a. Kesesuaian definisi fungsi sistem, unit fungsional dan batas sistem
- b. Keterbatasan yang diidentifikasi oleh penilaian kualitas data dan analisis LCA.

Dokumentasi penilaian kualitas data, analisis LCA, kesimpulan dan apa pun rekomendasi dari hasil LCI dan LCIA harus diperiksa. Hasil LCI harus ditafsirkan dengan teliti karena merujuk pada input dan output data dan bukan dampak lingkungan. Tujuan dari tahap ini adalah untuk membangun dan meningkatkan, hasil LCA atau studi LCI, termasuk masalah yang diidentifikasi dalam tahap pertama interpretasi. Hasil evaluasi harus disajikan dengan cara yang baik supaya orang yang mendapatkan informasi memiliki pandangan yang jelas dan dapat dimengerti tentang hasil penelitian (ISO 14044, 2006).

2.10.5 Prinsip-Prinsip LCA

Prinsip-prinsip ini sebagai dasar dan harus digunakan sebagai pedoman untuk keputusan yang berkaitan dengan perencanaan dan pelaksanaan LCA. Prinsip-prinsip itu sebagai berikut:

- a. Perspektif siklus hidup

LCA mempertimbangkan seluruh siklus hidup suatu produk, dari ekstraksi, akuisisi bahan baku, hingga energi, produksi, dan pembuatan bahan untuk perawatan seumur hidup dan pembuangan akhir. Melalui tinjauan dan perspektif yang sistematis seperti itu, pergeseran potensi beban lingkungan antara tahapan

siklus hidup atau proses individu dapat diidentifikasi dan mungkin dihindari.

b. Fokus lingkungan

LCA menangani aspek lingkungan dan dampak sistem produk. Dampak aspek ekonomi dan sosial biasanya berada di luar ruang lingkup LCA. Alat lain dapat digabungkan dengan LCA untuk lebih penilaian ekstensif.

c. Pendekatan relatif dan unit fungsional

LCA adalah pendekatan relatif, yang disusun di sekitar unit fungsional. Unit fungsional ini mendefinisikan apa yang sedang dipelajari. Semua analisis kemudian akan relatif terhadap unit fungsional itu, karena semua input dan output dalam LCI, LCIA terkait dengan unit fungsional.

d. Pendekatan berulang

LCA adalah teknik berulang. Tahap individu dari LCA menggunakan hasil dari tahap lainnya. Berulang-ulang pendekatan di dalam dan di antara tahapan berkontribusi pada kelengkapan dan konsistensi penelitian dan hasil yang dilaporkan.

e. Transparansi

Karena kompleksitas yang melekat dalam LCA, transparansi adalah prinsip panduan penting dalam melaksanakan LCA, untuk memastikan interpretasi hasil yang tepat.

f. Kelengkapan

LCA mempertimbangkan semua aspek lingkungan alam, kesehatan manusia, dan sumber daya. Dengan mempertimbangkan semua aspek dalam satu studi dalam perspektif media, identifikasi potensi pertukaran dan penilaian.

g. Prioritas pendekatan ilmiah

Keputusan dalam LCA lebih didasarkan pada ilmu pengetahuan alam. Jika ini tidak memungkinkan, maka pendekatan ilmiah lainnya (dari ilmu sosial dan ekonomi) dapat digunakan atau konvensi internasional. Jika tidak ada dasar ilmiah atau pembenaran berdasarkan pendekatan ilmiah lainnya atau konvensi internasional maka, jika sesuai dengan keputusan yang didasarkan pada pilihan nilai (ISO 14040, 2006).

III. METODELOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret 2019 – Mei 2019, di Laboratorium Rekayasa Sumber Daya Air dan Lahan (L. RSDAL), Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan di Desa Rejomulyo Kecamatan Jati Agung Kabupaten Lampung Selatan.

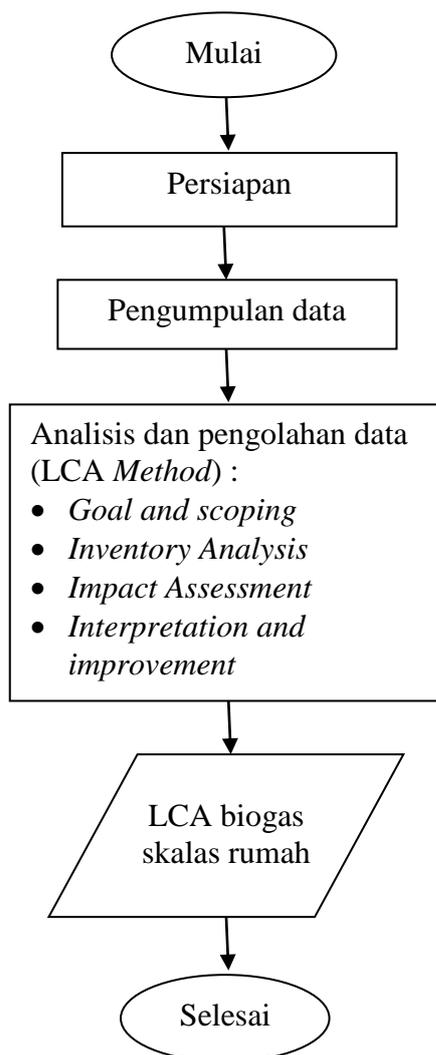
3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah timbangan, gergaji besi, tangki air 2000 L, pisau, meteran, pipa PVC 3 inchi, L pipa PVC, dop pipa PVC, keran PVC, selang, dan korek api. Peangkat lain yang digunakan dalam penelitian ini antara lain ember atau bak, karung, semen, pasir, cangkul, oven, timbangan analitik, hummer mill, pengaduk, *flow meter*, pH meter, thermocouple.

Sedangkan Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kotoran sapi dan air.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian

3.4 Tahapan Persiapan

Pada tahap ini merupakan tahap awal penelitian dengan membuat digester biogas tipe *floating drum*. Pada tahap ini juga diperlukan studi literatur yang berguna untuk merumuskan permasalahan penelitian yang akan diselesaikan dengan pencapaian tujuan penelitian ini. Studi literatur ini juga diperlukan dalam mengidentifikasi dampak lingkungan dari kegiatan daur hidup biogas sehingga diketahui data-data apa saja yang diperlukan dalam penilaian ini, diantaranya

meliputi tahapan proses produksi, bahan-bahan, dan jenis *material handling* yang digunakan.

3. 5 Metode Pengumpulan Data

3.5.1 Studi Pustaka

Studi pustaka berguna sebagai acuan dalam proses pengambilan data dan menganalisis data sekunder yang telah diperoleh dari berbagai pihak terkait, buku panduan, jurnal dan literatur lainnya. Studi pustaka pada penelitian ini dilakukan guna mengetahui model perhitungan konsumsi energi dan emisi GRK serta mencari skenario perbaikan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mereduksi emisi dari daur hidup biogas skala rumah tangga.

3.5.2 Observasi dan Pengukuran Lapangan

Observasi lapangan dilakukan guna mengidentifikasi penggunaan energi dan emisi dari daur hidup biogas. Observasi ini untuk memperoleh data primer apabila penggunaan setiap input daur hidup biogas tidak terdapat pada data sekunder hasil studi pustaka. Observasi dapat berupa pengamatan dan pengukuran langsung pada saat di lapangan.

Pengukuran kandungan metana, Total Solid (TS), dan Volatile Solid (VS), pengukuran TS bertujuan untuk mengetahui komponen kering pada bahan, sedangkan VS dilakukan untuk mengetahui jumlah komponen organik dalam bahan. Pengukuran ini dilakukan pada substrat awal digester dan substrat keluaran.

Pengukuran dilakukan di Laboratorium Rekayasa Sumber Daya Air dan Lahan (L. RSDAL) Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Kadar Air (KA)} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

$$\text{Total Solid (TS) sampel (gr)} = 100\% - \text{KA}$$

$$\text{Volatile Solid (VS) sampel (gr)} = \frac{TS - W_3}{TS} \times 100$$

dimana :

W1 = Berat basah (gr)

W2 = berat kering oven (gr)

W3 = Berat abu (gr)

3.5.3 Wawancara

Kegiatan Wawancara diperlukan guna memperoleh data ataupun informasi tambahan terkait material yang digunakan untuk pembuatan biogas. Wawancara dilakukan kepada pengurus kelompok tani desa Rejomulyo, Kec. Jati Agung Kab. Lampung Selatan.

3.6 Metode Analisis dan Pengolahan Data

Pelaksanaan metode LCA ini mengacu pada pedoman pelaksanaan LCA menurut (Framework ISO 14040, 2006) yang terdiri atas 4 tahapan yaitu penentuan *goal dan scope*, *inventory analysis*, *impact assessment*, dan *interpretation with improvement*.

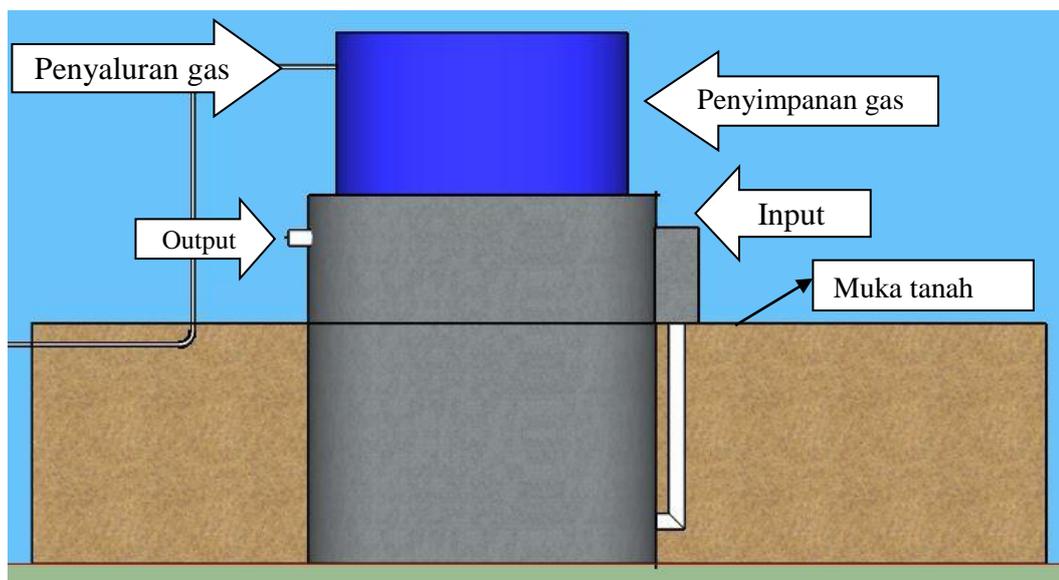
3.6.1 Penentuan *Goal and Scope* (Tujuan dan cakupan)

Penentuan *goal* dan *scope* menjadi langkah awal dalam sebuah metode LCA yang harus ditetapkan sebagai acuan dan batasan yang jelas dalam pelaksanaannya sehingga dapat menjawab permasalahan yang akan diselesaikan. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi dampak lingkungan dalam hal emisi gas rumah kaca dari biogas skala rumah tangga. Untuk mengidentifikasi faktor-faktor terpenting yang mempengaruhi beban lingkungan dari digester biogas rumah tangga. Dari faktor-faktor ini, emisi GRK yang disebabkan oleh proses dianalisis, termasuk emisi gas rumah kaca yang dihindari dari perpindahan bahan bakar fosil (LPG dalam kasus ini). Dengan menentukan beban lingkungan produksi biogas yang merupakan penilaian dampak lingkungan, kondisi sosial dan ekonomi yang bertujuan untuk mengidentifikasi apakah proses tersebut memiliki efek menguntungkan atau merugikan.

3.6.2 *Inventory Analysis*(Analisis Inventori)

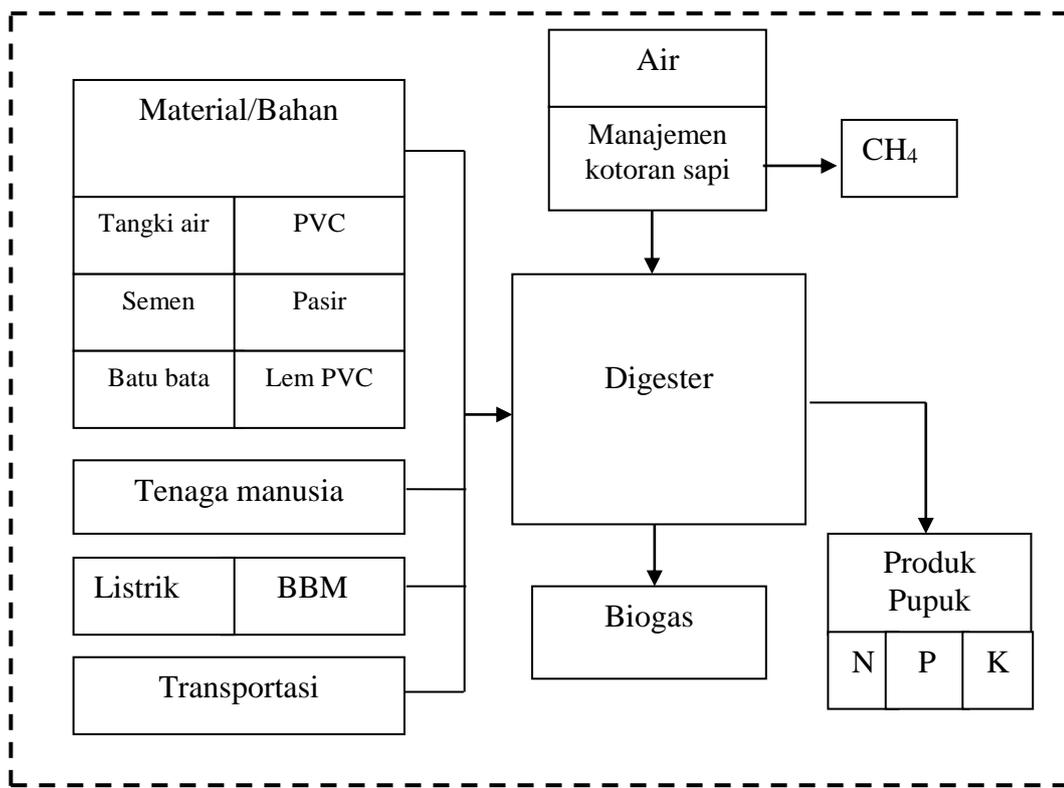
Inventory analysis dilakukan dengan cara inventarisasi semua aliran input dan output yang terlibat dalam satuan massa dan energi. GRK dari ruang lingkup yang ditentukan sebelumnya. Data inventori yang digunakan meliputi data sekunder yang diperoleh dari perusahaan, dan berbagai publikasi hasil penelitian sebelumnya. Sebagian data lainnya merupakan data primer dan data dari hasil perhitungan sendiri dengan menggunakan beberapa asumsi.

Sebuah digester biogas rumah tangga dibangun untuk pemanfaatan kotoran sapi yang bisa digunakan untuk bahan bakar. Pemanfaatan ini umum dan mudah ditemukan di banyak desa di Lampung. Ukuran digester sesuai kondisi ini adalah dengan diameter 1,39 m dan kedalaman 1,73 m. Satu tangki air 2000 L dan satu lubang digunakan untuk membangun digester ini: Satu tangki air 2000 L untuk menyimpan biogas dan satu lubang digunakan untuk digester. Untuk membangun digester ini kami menggunakan pipa PVC 3" di kedua saluran masuk dan keluar) dan PVC 1/2" digunakan untuk menyalurkan biogas ke kompor. Digester secara skematis digambarkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Digester Biogas Tipe *Floating Drum*

Ruang lingkup penelitian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram ruang lingkup LCA

Pada Gambar 9 merupakan ruang lingkup LCA yang ditunjukkan oleh garis putus-putus yakni batasan dari penelitian ini. Ruang lingkup ini dimulai dari semua bahan, tenaga manusia, bahan bakar untuk transportasi, manajemen kotoran sapi, biogas, hingga produk pupuk (input) yang dihasilkan. Kemudian akan diolah menjadi data penilai dampak (*Impact Assessment*).

3.6.3 *Impact Assessment* (Penilaian Dampak)

Impact assessment atau penilaian dampak merupakan tahap penilaian dari hasil inventori yang telah dilakukan sebelumnya. Penilaian dampak dari semua *resources* pada inventori yang menghasilkan kategori dampak lingkungan setiap pembuatan digester biogas.

Kategori dampak lingkungan yang digunakan adalah jumlah emisi

GRK dan efisiensi energi dari pemanfaatan kotoran sapi. Output emisi CO₂ yang dihasilkan akan direpresentasikan dalam bentuk Global Warming Potential (GWP 100), yaitu ukuran relatif jumlah kalor yang terjebak dalam gas rumah kaca. Jumlah kalor yang terjebak pada gas tertentu dibandingkan terhadap gas CO₂ dengan massa yang sama dalam jangka waktu 100 tahun (Chaerul et. Al, 2016).

Tabel 5. Faktor emisi gas rumah kaca dari input dan output bahan

No	Sumber Emisi	Unit	Faktor Emisi (kg CO ₂ equivalent/unit)	Referensi
1	Tenaga listrik	kWh	0,832	DGE, 2016
2	Batu bata tanah liat (185 mm × 90 mm × 43 mm)	1000 pcs	146,0	Maheshwari, Jain, 2017
3	Transportasi (truk tugas ringan)	km	0,307	ISRTEF 2015, 2017
4	Karbon polivinil (PVC)	kg	2,22	WSTP, 2011
5	Plastik polipropilen (PP r)	kg	1,5	Posen I D dkk,2017
6	Plastik polyurethane (PU)	kg	4,99	WSTP, 2011
7	Karet	kg	3,18	WSTP, 2011
8	Semen	Kg	0,89	WSTP, 2011
9	Pasir	Kg	0,01	WSTP, 2011
10	Plastik polyethilene (PET)	Kg	5,44	WSTP, 2011

11	Plastik polietilen densitas rendah (LDPE)	Kg	2,06	WSTP, 2011
12	Ferrokromium	Kg	1,3	IPCC 2008, 2006
13	Timah (untuk kompor dapur)	Kg	1,6	IPCC 2008, 2006
14	LPG	Kg	3,00	Suhedi, 2006
15	Produksi pupuk nitrogen	Kg	1,3	Pathak dkk, 2009
16	Produksi pupuk fosfor	Kg	0,2	Pathak dkk, 2009
17	Produksi pupuk kalium	Kg	0,2	Pathak dkk, 2009
18	Faktor N ₂ O dari aplikasi pupuk N	Kg	0,0075	IPCC, 2006
19	Beton	M ³	263	WSTP, 2011
20	Tenaga manusia	-	-	-
21	Troli bangunan	-	-	-
22	GWP of CH ₄	Kg	21	Pathak dkk, 2009

3.6.4 Interpretation and Improvement

Hasil analisa dampak yang telah dilakukan perlu divalidasi dan diinterpretasikan sehingga dapat dilakukan proses perbaikan dari beberapa alternatif untuk dibuat daur hidup produk biogas yang lebih baik dari segi lingkungan. Perbaikan daur hidup produk

tentunya harus menghasilkan daur hidup produk yang bertambah positif dari efisiensi energi dan dapat mereduksi GRK yang dihasilkan.

Emisi metana dari tumpukan (manajemen) kotoran sapi dengan rumus :

$$CH_4 = Bo \times MCF \times VS \dots\dots\dots(2)$$

dengan = Bo : 0,1 m³
MCF : 80%

Pemanfaatan biogas dari digester dievaluasi menggunakan total potensi pengurangan emisi GRK (GWP_{TOT}) :

$$GWP_{TOT}(\text{ kg CO}_2) = GWP_{CH_4} + GWP_{LPG} + GWP_{Pupuk} \dots\dots\dots(3)$$

Untuk Persamaan 3 setara dengan kg CO₂ (kg CO₂ eq). GWP_{CH₄} dihitung dengan mengalikan jumlah metana yang diperkirakan dari tumpukan kotoran sapi (Persamaan 2) dan potensi pemanasan global metana (GWP_{CH₄}) :

$$GWP_{CH_4} = CH_4 \times GWP_{CH_4} \dots\dots\dots(4)$$

GWP_{LPG} dihitung dengan mengalikan jumlah penghematan LPG (kg) karena pemanfaatan biogas untuk memasak dan potensi pemanasan global dari pembakaran LPG :

$$GWP_{LPG} = LPG \times GWP_{LPG} \dots\dots\dots(5)$$

Potensi pemanasan global dari produksi pupuk dihitung dari jumlah yang setara (dalam kg) pupuk N, P, dan K dalam kompos dari ampas (*slurry*) yang dicerna. Selain itu, potensi pemanasan global dari aplikasi pupuk nitrogen dalam bentuk N₂O juga dipertimbangkan.:

$$GWP_{Pupuk} = (N \times GWP_N) + (N \times N_2O-N \times GWP_{N_2O}) + (P + K \times 0,2) \dots\dots\dots(6)$$

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Biogas sebesar 1,3 m³ dihasilkan per hari, dengan kandungan metana, karbondioksida dan nitrogen sebesar 50,278%, 38,846 % dan 10,512 %.
2. Ampas (slurry) sebanyak 1.578,96 kg/tahun bahan kering pertahun berpotensi digunakan sebagai pupuk organik setara dengan kandungan 71,84 kg N, 41,21 kg P, dan 61,42 kg K.
3. Sistem biogas tipe *floating drum* skala rumah keluarga dengan 4 ekor sapi dan 5 tahun masa layanan hidup berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 5.259,46 kg CO₂ eq /tahun.
4. Durasi umur layanan digester berkontribusi terhadap total potensi pengurangan emisi GRK. Oleh karena itu, perawatan yang baik harus diamanatkan kepada pemilik atau operator digester.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah reaktor biogas skala rumah tangga memiliki potensi besar dalam upaya penurunan GRK nasional dan penghematan bahan bakar fosil untuk kesejahteraan masyarakat. Namun beberapa kendala di lapangan seperti masalah pengelolaan dan perawatan reaktor perlu adanya

kedisiplinan. Pada digester tipe *floating drum* perlu ada perbaikan pada reaktornya, supaya mempermudah dalam pembersihan endapan yang terjadi pada sisi-sisi digester. Dibutuhkan rekayasa sosial untuk meningkatkan kembali pamor biogas di mata masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaru, K. 2004. *Rancang Bangun dan Uji Kinerja Biodigester Plastik Polyethilene Skala Kecil (studi kasus ds. Cidatar kec. Cisarupan kab. Garut)*. Skripsi. Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Bandung.
- Bond, T. and Templeton, M.R. 2011. *History and Future of Domestic Biogas Plants in the Developing World. Energy for Sustainable Development*, 15 : 347-354
- Budiyono. I., N. Widiassa, S. Johari, dan Sunarso. 2009. *Influence of Inoculum Content on Performance of Anaerobic Reactors for Treating Cattle Manure using Rumen Fluid Inoculum. International Journal of Engineering and Technology*, 1(3): 109–116
- Directorate General of Electricity 2016 *Faktor Emisi GRK Sistem Interkoneksi Tenaga Listrik Tahun 2016*. Ministry of Energy and Mineral Resources, Indonesia.
- Dungait. 2010. *Modern Isotopic Methods to Investigate The Fate and Provenance of C Sequestered Into Soils From Livestock Derived Organic Matter*. Dipresentasikan pada *world congress of soil science, soil solutions for a changing world 1 – 6 August 2010*, Brisbane, Australia.
<http://www.iuss.org/>.
- FAO. 2017. *Global database of GHG emissions related to feed crops: Methodology*. Version 1. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership. FAO, Rome, Italy.
- Firdaus I. U., 2009. *Energi Alternatif Biogas*. <http://www.migas Indonesia.com/index.php>. [Diunduh 7 Oktober 2018].
- Food and Agricultural Organization (FAO). 1996. *Biogas Technology*. Nepal. A Training Manual For Extension.
- Gerrardi. M.H. 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digestion*. USA. John Wiley dan Sons, Inc 177 hlm

- Harsono, 2013. *Aplikasi Biogas Sistem Jaringan Dari Kotoran Sapi Di Desa Bumijaya Kec, Anak Tuha Lampung Tengah Sebagai Energi Alternatif Yang Efektif*. Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- Haryanto, A., Cahyani, D., 2019. *Greenhouse gas emission of household plastic biogas digester using life cycle assessment approach*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 258, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012015>
- Haryanto, A., Cahyani, D., Triyono, S., Murdapa, F., Haryono, D., 2017. *Economic Benefit and Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of A Family-Scale Cowdung Anaerobic Biogas Digester*. IJRED 6, 29. <https://doi.org/10.14710/ijred.6.1.29-36>
- Ifdholy, M., n.d. *Life Cycle Assessment (Lca) Produk Tempe (Studi Kasus: Rumah Tempe Indonesia)*. Bogor, Jawa Barat) 52.
- ISRTEF 2015. 2017. <http://indiaghgp.org/transport-emission-factors>. [Diunduh 24 Desember 2018].
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 2008, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer*. Eggleston H S, Miwa K, Srivastava N and Tanabe K (eds). IGES, Japan
- ISO 14040, 2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Switzerland.
- ISO 14044, 2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Switzerland.
- Made. M. 2012. Analisis Penyerapan Gas Karbondioksida (CO₂) dengan Larutan NaOH Terhadap Kualitas Biogas Kotoran Sapi. *Jurnal Teknik Mesin*, 2:38–46
- Maheshwari H, Jain K 2017 Carbon footprint of bricks production in fixed chimney bull's trench kilns in India. *Indian Journal of Science and Technology* 10(16)1-12
- Pathak, H., Jain, N., Bhatia, A., Mohanty, S., Gupta, N., 2009. *Global warming mitigation potential of biogas plants in India*. Environ Monit Assess 157, 407–418. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0545-6>
- Posen I D, Jaramillo P, Landis A E and Griffin W M 2017 Greenhouse gas mitigation for U.S. plastics production: energy first, feedstocks later. *Environ. Res. Lett.* 12 034024
- Rahmawati. 2013. Gas Rumah Kaca, *Dampak dan sumbernya. Pencemaran Udara teknik lingkungan*. Bandung. ITB.

- Ratnaningsih., H. Widyatmoko, dan Y. Trieko. 2009. Potensi Pembentukan Biogas pada Proses Biodegradasi Campuran Sampah Organik Segar dan Kotoran Sapi Dalam Batch Digester Anaerob. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5: 19–26
- Rusbiantoro. 2008. *Global Warning For Beginners : Pengantar Konprehensif Tentang Pemanasan Global*. Yogyakarta. Niagaya Swadaya.
- Suhedi F 2006 Keterkaitan aktivitas domestik dengan emisi CO₂ (Relationship between domestic activities to CO₂ emission). Presentation at Workshop “*Alternatif Rancangan Permukiman Perkotaan Berdasarkan Emisi CO₂*” (*Urban Planning Alternative Based on CO₂ Emission*). Bandung, March 21, 2006. In Bahasa Indonesia.
- Tuti. H. 2006. *Biogas Limbah Peternakan yang Menjadi Sumber Energi Alternatif*. Balai Penelitian Ternak Bogor, *Wartazoa* 1(6): 160–169
- Wahyono, E. H., dan N, Sudarno. 2012. *Biogas : Energi Ramah Lingkungan*. Bogor. Yapeka.
- Wahyudi, J., 2017. *Potensi Produksi Biogas Dan Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca Di Industri Tahu* 6.
- Wahyuni, S. 2011. *Menghasilkan Biogas dari Aneka Limbah*. Jakarta. Edisi Pertama. PT Agro Media Pustaka.
- Wahyuni, S. 2015. *Panduan Praktis Biogas*. Jakarta Timur. Penebar Swadaya.
- WSTP. 2011 SEWPCC Process Selection Report. Appendix 7. <https://www.winnipeg.ca/...Appendix.../Appendix%207.pdf>. [Diunduh 24 Desember 2018].
- Yu, L. Yaoqiu, K. Ningsheng, H. Zhifeng, W. and Lianzhong, X. 2008. Popularizing household-scale biogas digesters for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation. *Renewable Energy*, 33: 2027–2035.
- Zgola M, Reinhard J, Liao X, Simonnin G, Gmuender S, Dettling J, Norris CB, Parent J, Couture J. 2016. *Update of Soybean Life Cycle Analysis Final Report. Quantis, New Earth, and AGÉCO*. www.quantis-intl.com. [Diunduh 26 Desember 2018].