

**PENAMBAHAN ONGGOK UNTUK MENINGKATKAN
PRODUKSI BIOGAS DI INDUSTRI TAPIOKA**

(Skripsi)

Oleh

Nadia Dwi Safira



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRACT

THE ADDITION OF CASSAVA WET CAKE TO INCREASE BIOGAS PRODUCTION IN THE TAPIOCA INDUSTRY

By

NADIA DWI SAFIRA

The addition of cassava wet cake to tapioca fresh wastewater without pretreatment will increase the concentration of CO₂ in biogas. Hydrolysis-acidogenesis phase was done as a pretreatment to increase the soluble organics of the mixtures. The purpose of this research was to determine the best retention time of hydrolysis-acidogenesis processes of a mixture cassava wet cake and tapioca fresh wastewater before biogas production. This research used anaerobic batch bioreactor with the volume of 1 L equipped with biogas measuring equipment, the ratio of the mixtures:sludge is 1:4, the variation of the retention time is 0, 3, 4, and 5 days. T-COD, CODs, pH, and TVA analysis were done on day 0 and day 20, while biogas volume and its composition were examined every day. The results showed a decreasing trend in the values of T-COD, CODs, and TVA, while the pH values showed an increasing trend in each test sample. Biogas production increased by 73.01%, 61.29%, 66.10%, and 46.44% in samples A, B, C, and D, while total methane increased by 67.42%, 58.73%, 68.83%, and 48.01%. Thus, 3 days of retention time in the hydrolytic-acidogenic phase for cassava wet cake and tapioca fresh wastewater was set as the best time, with the result of increasing biogas production by 61.29% and total methane gas by 59%, with an average concentration of methane gas of 55.83%.

Keywords: hydrolysis-acidogenesis, cassava wet cake, biogas production, retention time

ABSTRAK

PENAMBAHAN ONGGOK UNTUK MENINGKATKAN PRODUKSI BIOGAS DI INDUSTRI TAPIOKA

Oleh

NADIA DWI SAFIRA

Penambahan onggok sebagai campuran air limbah segar tapioka tanpa perlakuan pendahuluan dapat meningkatkan konsentrasi CO₂ pada biogas. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah menambahkan proses hidrolisis-asidogenesis kedua campuran tersebut sebelum masuk ke bioreaktor anaerobik. Tujuan dalam penelitian ini yaitu menentukan waktu tinggal pada proses hidrolisis-asidogenesis untuk campuran onggok dan air limbah segar tapioka terbaik terhadap produksi biogas. Penelitian ini menggunakan bioreaktor anaerobik sistem *batch* dengan volume 1 L yang dilengkapi dengan alat ukur biogas sederhana, perbandingan campuran air limbah segar tapioka dan onggok: *sludge* 1:4, variasi waktu tunda campuran air limbah segar tapioka dan onggok yaitu 0, 3, 4, dan 5 hari. Analisis T-COD, CODs, pH, dan TVA dilakukan pada hari ke-0 dan hari ke-20, sedangkan volume biogas dan komposisinya diamati setiap hari. Hasil penelitian menunjukkan kecenderungan penurunan nilai T-COD, CODs, dan TVA sedangkan nilai pH menunjukkan kecenderungan peningkatan pada masing-masing sampel uji. Sampel A, B, C, dan D menunjukkan peningkatan produksi biogas sebesar 73,01%; 61,29%; 66,10%; dan 46,44% dan peningkatan total metana sebesar 67,42%; 58,73%; 68,83%; dan 48,01%. Perlakuan pendahuluan waktu tunda campuran onggok dan air limbah segar tapioka terbaik yaitu selama 3 hari dengan peningkatan produksi biogas sebesar 61.29% dan peningkatan gas metana sebesar 59%, serta konsentrasi gas metana rata-rata sebesar 55.83%.

Kata kunci: hidrolisis-asidogenesis, onggok, produksi biogas, waktu tunda

**PENAMBAHAN ONGGOK UNTUK MENINGKATKAN
PRODUKSI BIOGAS DI INDUSTRI TAPIOKA**

Oleh

Nadia Dwi Safira

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNOLOGI PERTANIAN**

Pada

**Jurusan Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi : **PENAMBAHAN ONGGOK UNTUK
MENINGKATKAN PRODUKSI BIOGAS
DI INDUSTRI TAPIOKA**

Nama Mahasiswi : **Nadia Dwi Safira**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1854231005**

Program Studi : **Teknologi Industri Pertanian**

Fakultas : **Pertanian**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.
NIP. 19640106 198803 1 002



Ir. Fibra Nurainy, M.T.A.
NIP. 19680225 199603 2 001

2. Ketua Jurusan Teknologi Hasil Pertanian

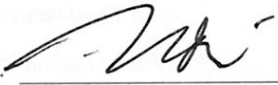


Dr. Erdi Suroso, S.T.P., M.T.A.
NIP. 19721006 199803 1 005

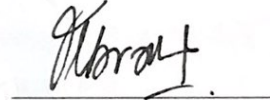
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.**



Sekretaris : **Ir. Fibra Nurainy, M.T.A.**



Pembahas : **Dr. Ir. Tanto Pratondo Utomo, M.Si**

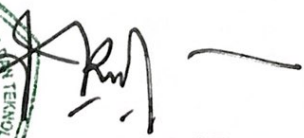


2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si

NIP. 19611020 198603 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **25 April 2022**

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya Nadia Dwi Safira NPM 1854231005

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil kerja sendiri yang berdasarkan pengetahuan dan data yang telah saya dapatkan. Karya ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil 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, 25 April 2022



Nadia Dwi Safira

NPM 1854231005

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 15 juni 2000 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Basikin dan Ibu Asnawati. Penulis mengawali Pendidikan formal di Taman Kanak-Kanak di TK Al – Kautsar, Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2006, Sekolah Dasar di SD Al – Kautsar, Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2012, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2015, Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2018.

Penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Mandiri Perguruan Tinggi Negeri – Barat (SMMPTN – Barat) pada tahun 2018. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada Februari – Maret 2021 di Kelurahan Tanjung Raya, Kecamatan Kedamaian, Kota Bandar Lampung. Penulis melaksanakan Praktik Umum (PU) di PT Mayora Indah Tbk, Factory Jatake 2, dengan judul “Mempelajari Pengendalian Mutu (*Quality Control*) *Incoming Packaging Material* di PT Mayora Indah Tbk. Jatake 2”.

Selama masa studi, penulis juga aktif dengan menjadi Asisten Praktikum pada mata kuliah Kimia Dasar di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan Asisten Praktikum pada mata kuliah Agroindustri Berbasis Hortikultura di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Ali bin Abi Thalib once said

Be like a flower that gives its fragrance even to the hand that crushes it.

Jika kamu berbuat baik (berarti) kamu berbuat baik untuk dirimu sendiri. Dan jika kamu berbuat jahat, maka (kerugian kejahatan) itu untuk dirimu sendiri,.....

[Q.S. 17:7]

SANWACANA

Puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Penambahan Onggok Untuk Meningkatkan Produksi Biogas di Industri Tapioka”. Skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) dalam memperoleh gelar Sarjana Teknologi Pertanian di Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terimakasih atas segala dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak selama proses studi dan juga selama proses penyusunan skripsi ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Erdi Suroso, S.T.P, M.T.A., selaku Ketua Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Bapak Ir. Harun Al Rasyid, M.T., selaku Ketua Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T., selaku dosen Pembimbing Utama atas kesabarannya dalam membimbing, memberi saran, arahan, motivasi, dan nasihat serta ilmu yang diberikan selama masa studi dan penyusunan skripsi.
5. Ibu Ir. Fibra Nurainy, M.T.A., selaku Pembimbing Kedua sekaligus Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, dan motivasi selama masa studi dan penyusunan skripsi.

6. Bapak Dr. Ir. Tanto Pratondo Utomo, M.Si., selaku Pembahas, yang telah, memberikan saran dan perbaikan dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak dan Ibu dosen pengajar, staf administrasi, dan laboratorium di Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
8. Keluarga tercinta Mama, Babeh, Atu, Jihan, dan keluarga besar atas semua dukungan, kasih sayang, nasihat, dan keceriaan di keluarga serta do'a tulus yang selalu tercurah tiada henti bagi penulis.
9. Keluarga besar Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri THP FP Unila; Bapak Joko, Mba Mawar, Ibu Lathifa, dan rekan-rekan seperjuangan; Siti Nurjannah dan M. Friatnanto yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian dengan memberikan dukungan, semangat, dan juga nasihat.
10. Sahabatku Zulfa Agustri Annisa dan teman-teman terdekat; Meuthiya, Hani, Karen, Nadhiya, Dinda, Adel, Nurul, Arinda, dan Mita atas dukungan, suka duka perkuliahan serta kebersamaannya.
11. Teman-teman TIP dan THP angkatan 2018. Terimakasih atas perhatian, kenangan, dukungan, bantuan, dan juga kebersamaannya.
12. Semua pihak yang terlibat dalam penulisan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 25 April 2022

Penulis,

Nadia Dwi Safira

1854231005

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Kerangka Pikir	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Limbah Industri Tapioka	7
2.1.1 Limbah Cair Tapioka.....	7
2.1.2 Limbah Padat Tapioka.....	8
2.2 Biogas	9
2.3 <i>Anaerobic Disgestion</i>	10
2.4 Kondisi Proses yang Mempengaruhi Produksi Biogas	12
2.4.1 pH	12
2.4.2 Temperatur	12
2.4.3 <i>Rasio Total Volatile Acid (TVA)/Total Alkalinitas</i>	13
2.4.4 Rasio C/N.....	14
2.4.5 Waktu Tinggal Hidraulik (WTH).....	15
2.4.6 Pengadukan	15
2.4.7 Konsentrasi Mikroba Aktif	16
III. METODOLOGI PERCOBAAN	17
3.1 Waktu dan Tempat	17
3.2 Alat dan Bahan.....	17
3.3 Metode Penelitian.....	18

3.4	Pelaksanaan Penelitian.....	19
3.4.1	Persiapan Bioreaktor dan Alat Pengukur Volume Biogas.....	19
3.4.2	Persiapan Bahan dan Pelaksanaan Penelitian	21
3.5	Pengamatan	21
3.5.1	Analisis pH.....	21
3.5.2	Analisis <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	22
3.5.3	Analisis <i>Total Volatile Acid</i> (TVA).....	23
3.5.4	Pengukuran Volume Biogas	24
3.5.5	Komposisi Gas	24
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1	Analisis Perubahan Nilai <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD).....	26
4.1.1	Rasio CODs/T-COD.....	29
4.2	Analisis Perubahan Nilai <i>Total Volatile Acid</i> (TVA).....	30
4.3	Analisis Perubahan Nilai pH.....	32
4.4	Produksi Biogas Harian dan Kumulatif.....	33
4.4.1	Rasio Substrat dan <i>Sludge</i> Terhadap Produksi Biogas.....	38
4.5	Komposisi Biogas dan Total Gas Metana.....	39
4.5.1	Produktivitas Total Metana.....	42
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1	Kesimpulan	44
5.2	Saran	44
	DAFTAR PUSTAKA	45
	LAMPIRAN.....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran Penelitian.....	6
2. Diagram Tahapan Pembentukan Biogas.....	11
3. Rangkaian Bioreaktor dan Pengukur Volume Biogas.....	20
4. Grafik Nilai T-COD <i>removal</i>	27
5. Grafik Perubahan Nilai COD <i>soluble</i>	28
6. Grafik Perubahan Rasio CODs/T- COD.....	29
7. Grafik Perubahan Nilai <i>Total Volatile Acid</i> (TVA)	31
8. Grafik Perubahan Nilai pH	32
9. Grafik Produksi Biogas Harian	34
10. Grafik Produksi Biogas Kumulatif.....	37
11. Konsentrasi Gas Metana (CH ₄) dalam Biogas	39
12. Konsentrasi Gas Karbon Dioksida (CO ₂) dalam Biogas	39
13. Grafik Total Metana Kumulatif.....	41
14. Produktivitas Metana berdasarkan T-COD <i>removed</i>	42
15. Produktivitas Metana berdasarkan CODs- <i>removed</i>	43

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Karakteristik dan regulasi baku mutu limbah cair tapioka	8
2. Perlakuan waktu tunda air limbah segar tapioka dan onggok.....	19

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Hasil Analisis Parameter Uji.....	54
2. Hasil Analisis Parameter Uji (Lanjutan).....	55
3. Analisis Komposisi Biogas	56
4. Pengukuran Volume Biogas.....	57
5. Hasil Analisis Total Metana Kumulatif.....	58
6. Gambar-gambar Penelitian	59

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Provinsi Lampung merupakan penghasil ubi kayu terbesar di Indonesia dengan angka produksi ubi kayu sebesar 5.016.790 Ton (BPS, 2019). Industri tapioka memiliki peranan yang penting dalam memenuhi kebutuhan pokok berbagai kegiatan industri. Tepung tapioka digunakan dalam industri makanan atau pakan ternak, dekstrin, dan glukosa (gula). Dekstrin digunakan dalam industri tekstil, industri farmasi, industri perekat sebagai extender kayu lapis atau industri lain. Sedangkan glukosa digunakan dalam industri makanan, dan industri kimia seperti etanol, dan senyawa organik lainnya. Menurut Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) melalui unit kerjanya di Lampung yaitu Balai Besar Teknologi Pati (B2TP), Provinsi Lampung merupakan produsen tapioka terbesar di Indonesia. Diketahui di Provinsi Lampung terdapat sekitar 74 pabrik tapioka, dengan kapasitas produksi lebih dari 2 juta ton tapioka per tahunnya (BPPT, 2019).

Proses produksi tapioka tidak semata-mata hanya menghasilkan produk utama berupa tepung tapioka, namun menghasilkan limbah, baik limbah cair maupun padat. Limbah cair yang dihasilkan industri tapioka sangat banyak yang berasal dari proses pencucian bahan baku dan pengendapan pati dari air. Limbah cair tapioka mengandung bahan organik tersuspensi yang cukup tinggi, seperti protein, karbohidrat, dan lemak yang berpotensi sebagai sumber pencemar bagi badan air apabila tidak melalui proses pengolahan sehingga mencapai batas mutu yang dikehendaki. Air limbah segar industri tapioka memiliki karakteristik, antara lain:

COD (*Chemical Oxygen Demand*) sebesar 18.000 – 25.000 mg/L (Isdiyanto dan Hasanudin, 2009); pH 3,8 – 4,5 dan TSS (*Total Suspended Solid*) sebesar 920 mg/L (Indarto, 2010).

Limbah padat yang dihasilkan oleh industri tapioka berasal dari proses pengupasan ubi kayu serta proses pemerasan dan penyaringan. Limbah tersebut dapat berupa kulit dan onggok yang biasanya dimanfaatkan oleh pihak ketiga untuk pakan ternak. Limbah padat berupa onggok pada umumnya masih mengandung karbohidrat yang cukup tinggi, yaitu sebesar 68% dan dengan menerapkan sistem pengelolaan yang tepat akan memaksimalkan potensi pemanfaatan limbah tersebut (Djuma'ali, 2013). Sampai saat ini, belum terdapat upaya pemanfaatan onggok yang signifikan untuk menghasilkan output penting seperti *energy resource* atau sumber energi.

Berdasarkan jumlah dan kandungannya (konsentrasi bahan organik) yang tinggi, limbah tapioka merupakan sumber daya yang memiliki nilai ekonomi apabila dikelola secara tepat. Proses perolehan energi terbarukan dari limbah cair tapioka melalui pencernaan anaerobik dengan prinsip mengubah bahan organik menjadi gas CO₂ (karbon dioksida) dan CH₄ (gas metana). Hampir seluruh industri tapioka yang terdapat di provinsi Lampung sudah memanfaatkan limbah cair tersebut untuk diolah secara anaerobik menghasilkan biogas (Hasanudin *et al.*, 2019). Energi biogas yang dihasilkan lalu digunakan untuk pembangkit listrik dan/atau digunakan dalam proses pengeringan tepung tapioka.

Kegiatan industri tapioka sangat dipengaruhi oleh ketersediaan bahan baku yang ada. Hal tersebut menjadi salah satu kendala karena masa panen ubi kayu tidak merata setiap tahunnya. Dengan kondisi tersebut, maka industri tapioka di Lampung sangat rentan mengalami kekurangan bahan baku yang berakibat menurunnya proses produksi tapioka dan hasil samping berupa limbah industri. Dapat diketahui bahwa setiap ton ubi kayu akan menghasilkan sekitar 24,4 m³ biogas atau 14,6 – 15,8 m³ gas metana/ton ubi kayu dengan kandungan metana sekitar 59,8% - 64,75% (Hasanudin, 2007).

Untuk memenuhi kebutuhan energi bagi industri tapioka, dibutuhkan sumber bahan baku tambahan (*feed stock*) untuk mendapatkan lebih banyak energi biogas. Jika dilihat dari konsentrasi bahan organik limbah padat tapioka, maka onggok berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku biogas dengan campuran air limbah segar tapioka. Perlu beberapa pengembangan tentang bagaimana meningkatkan bahan terlarut dari onggok yang mudah diubah menjadi biogas secara anaerobik (Wintolo dan Isdiyanto, 2011). Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini dengan melakukan pencampuran onggok dan air limbah segar tapioka dengan memvariasikan waktu tunda kedua campuran tersebut sehingga meningkatkan bahan terlarut untuk produksi biogas.

1.2 Tujuan

Tujuan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh waktu tunda campuran onggok dan air limbah segar tapioka terhadap produksi biogas.
2. Menentukan waktu tunda terbaik campuran onggok dan air limbah segar tapioka.

1.3 Kerangka Pikir

Kegiatan agroindustri tidak terlepas dari hasil samping berupa limbah yang dikeluarkan. Salah satu agroindustri yang cukup potensial di Provinsi Lampung yaitu industri tapioka, yang menghasilkan limbah cair dan padat dengan kandungan bahan organik yang tinggi (Fogaca *et al.*, 2014). Pengelolaan limbah industri tapioka sudah banyak diterapkan oleh banyak pabrik tapioka dengan menggunakan sistem lagoon untuk menghasilkan biogas. Biogas adalah gas yang diproduksi dari proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam keadaan tanpa adanya udara (*anaerobic*) (Atmodjo, 2017). Biogas digunakan oleh pabrik tapioka untuk menghasilkan panas dan/atau listrik sebagai sumber energi dalam kegiatannya. Menurut Hasanudin *et al.* (2019), pabrik tapioka skala kecil

umumnya hanya menggunakan energi biogas untuk proses pengeringan tapioka dan energi tersebut belum dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi pabriknya.

Dalam memenuhi kebutuhan energi pabrik tapioka, maka diperlukan bahan baku tambahan dalam rangka meningkatkan produksi biogas. Selain menghasilkan limbah cair, industri tapioka pula menghasilkan limbah padat berupa onggok yang masih memiliki kandungan karbohidrat sebesar 68,01% yang merupakan serat kasar yang sulit terdekomposisi (Sari, 2019). Menurut Parlina (2009), konsentrasi *volatile solid* pada onggok tinggi yaitu sebesar 92%, yang akan menambah beban penguraian oleh bakteri sehingga harus dilakukan peningkatan kadar air dari padatan sehingga menurunkan konsentrasi padatan volatil. Salah satu upaya dalam meningkatkan kadar air onggok yaitu dengan menambahkan air limbah segar tapioka.

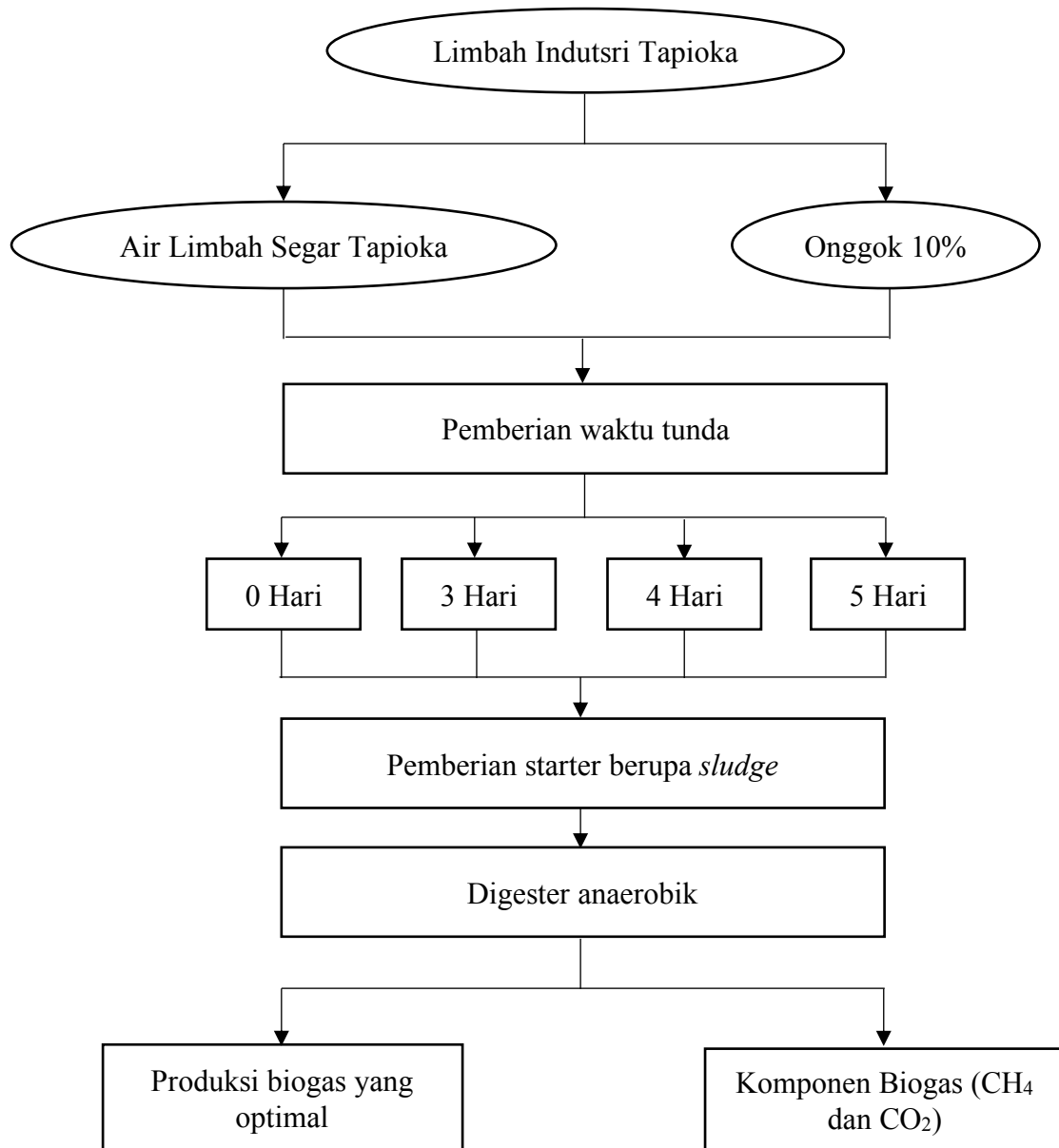
Proses pembentukan biogas meliputi reaksi hidrolisis, asidogenesis, acetogenesis, dan metanogenesis yang sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu pH, suhu, substrat, dan waktu tinggal hidrolis. Parameter ini perlu dipertimbangkan karena karakter limbah cepat berubah seiring dengan waktu tinggal limbah dalam reaktor sebab mikroorganisme yang ada didalam limbah sangat mudah bereaksi/berubah. Reaksi hidrolisis-asidogenesis merupakan kondisi limbah yang terdiri dari komponen organik (polimer) akan terurai menjadi senyawa sederhana (monomer). Kajian hidrolisis dan asidogenesis dilakukan oleh Ponsa *et al.* (2008) dengan melakukan penelitian pembuatan biogas dari limbah lumpur (*sewage sludge*), dan diperoleh biogas yang optimal adalah pada waktu tinggal hidrolis 4 hari dalam temperatur 55 °C. Waktu tinggal hidrolis menyatakan jumlah waktu yang dibutuhkan substrat untuk tinggal di dalam reaktor. Dengan adanya WTH yang sesuai, akan memungkinkan terjadinya reaksi yang lengkap dan proses produksi biogas akan optimal (Broughton, 2009).

Penelitian pendahuluan sebelumnya telah dilakukan dengan membuat campuran substrat yang terdiri dari onggok dan air limbah segar tapioka dengan

penambahan *sludge* pada perbandingan 2:3 (komposisi 400 ml substrat dari campuran onggok dan air limbah tapioca dengan 600 ml *sludge*). Campuran substrat tersebut memiliki pH sebesar 5,59 dan setelah didekomposisi selama 3 hari diperoleh biogas dengan rata-rata komposisi CH₄ sebesar 10,8%; CO₂ sebesar 19,9%; dan gas lainnya sebesar 69,3%. pH campuran substrat tersebut sangat rendah sehingga proses pembentukan biogas tidak optimal. Hal tersebut dijelaskan oleh Anggari dan Prayitno (2020), bahwa tingkat keasaman (pH) merupakan faktor yang penting dalam proses perombakan anaerob dan metanogenesis dapat berlangsung optimal pada pH 6,6 – 7,6.

Berdasarkan penelitian pendahuluan yang telah dilakukan, rasio substrat:*sludge* 2:3 tidak menunjukkan kondisi lingkungan yang dapat menunjang proses pencernaan anaerobic di dalam biodigester dengan baik. Oleh karena itu, pada penelitian ini menggunakan rasio substrat:*sludge* 1:4 dengan variasi waktu tunda proses Hidrolisis-Asidogenesis campuran substrat selama 0, 3, 4, dan 5 hari untuk mengetahui pengaruh dan waktu tunda terbaik terhadap produksi biogas yang dihasilkan. *Sludge* biasa digunakan sebagai *starter* yang diperlukan untuk mempercepat proses perombakan bahan organik menjadi biogas (metana). Kegunaan *sludge* sebagai *starter* yang baik juga disebutkan oleh Saroni dkk. (2017), bahwa *sludge* masih mengandung banyak bakteri metanogen yang berasal dari hasil pengolahan IPAL (Instansi Pengolahan Air Limbah).

Berdasarkan uraian diatas, maka kerangka pikir penelitian adalah sebagai berikut yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran Penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Industri Tapioka

Hasil pengolahan industri tapioka tidak hanya menghasilkan produk pangan berupa tepung tapioka, namun menyisihkan hasil samping yang sering disebut dengan limbah. Limbah industri tapioka digolongkan ke dalam dua kelompok, yaitu limbah cair dan limbah padat tapioka.

2.1.1 Limbah Cair Tapioka

Industri tapioka menghasilkan limbah cair dari proses pengolahan singkong menjadi tapioka. Air limbah tapioka ini kemudian dihasilkan dari proses pada pencucian ubi kayu dan ekstraksi ubi kayu. Menurut Adnan (2009), air limbah yang dihasilkan industri tapioka memiliki jumlah besar yaitu $20 \text{ m}^3/\text{ton}$ tapioka atau $\pm 5 \text{ m}^3/\text{ton}$ ubi kayu. Kandungan bahan organik pada limbah cair industri tapioka sangat tinggi dilihat dari parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) yaitu COD sebesar $7.000 - 30.000 \text{ mg/L}$ (Prayitno, 2008) dan BOD limbah cair tapioka memiliki nilai setengah dari COD nya (Kamahara dkk., 2010). Nilai COD dan BOD tinggi dapat mencemari lingkungan baik lingkungan air maupun darat, namun sangat berpotensi dimanfaatkan untuk produksi biogas sebagai sumber energi pada industri tapioka.

Air limbah segar tapioka memiliki karakteristik yang menonjol dengan pH berkisar 6 - 6,5 dan pH ini akan turun menjadi 4 setelah beberapa hari (Setyawaty *et al.*, 2011). Karakteristik limbah tapioka sebenarnya tergantung dari kualitas

bahan baku ubi kayu yang digunakan. Diperkirakan satu ton ubi kayu membutuhkan sekitar 5-11 m³ air dalam proses pengolahannya dan sekitar 40-60 m³ air berakhir sebagai air limbah segar tapioka (Akhirruliawati, 2009). Karakteristik dari parameter air limbah segar tapioka sangat erat kaitannya dengan serangkaian kebijakan lingkungan yang dirancang dengan baik dapat efektif dalam mengendalikan polusi industri di negara berkembang. Indonesia memiliki Peraturan Pemerintah yang berkaitan dengan Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Peraturan ini dikenal dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014. Karakteristik dan regulasi batas ambang baku mutu untuk limbah segar tapioka adalah sebagai berikut yang disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik dan regulasi baku mutu limbah cair tapioka

Parameter	Nilai ^{a)}	Baku Mutu ^{b)}
BOD ₅ (mg/L)	3.000 – 7.000	150
COD (mg/L)	7.000 – 30.000	300
pH	4 – 6,5	6 - 9
TSS (mg/L)	1.500 – 5000	100
Cyanide (CN), (mg/L)	1,46 ^{c)}	0,3
Debit Limbah (m ³ /Ton)	40 - 60	30

Sumber:

- a) Akhirruliawati, 2009
- b) Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014
- c) Marjuki, 2001

2.1.2 Limbah Padat Tapioka

Limbah padat yang dihasilkan oleh industri tapioka biasa berupa kulit dan ongkok yang dihasilkan dari proses pengupasan, ekstraksi, dan pemisahan pati (Santoso, 2010). Pada industri tapioka, pengolahan singkong menjadi tapioka menghasilkan 145,8 kg ongkok/ton singkong. Ongkok masih memiliki kandungan pati sebesar 65,5% (Djuma'ali, 2013). Pati ongkok terdapat didalam matriks polisakarida dan protein dengan lapisan berupa pektin (Sriroth, 2000). Pati ongkok tidak dapat

langsung digunakan oleh mikroorganisme metanogenesis untuk menghasilkan biogas. Kandungan pati pada onggok harus dipecah menjadi molekul sederhana agar dapat dimanfaatkan mikroorganisme metanogenesis untuk menghasilkan biogas. Pemanfaatan onggok sebagai biomassa limbah, akan menjadi bahan baku yang berharga untuk pengembangan energi bersih dan terbarukan untuk kawasan agroindustri dan secara bersamaan, dianggap sebagai suatu sistem untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi agroindustri. Onggok (limbah padat tapioka), yang merupakan produk sampingan dalam proses produksi tapioka, ditambahkan ke proses pada tahap awal (*pretreatment*) sebagai bio-immobilizer untuk Waktu Tinggal Hidraulik (WTH) yang lebih pendek dan aktivitas fermentasi yang stabil (Hasanudin, 2008).

2.2 Biogas

Di antara semua sumber energi berkelanjutan dan terbarukan, biogas secara signifikan mendapat perhatian sebagai bahan bakar nabati yang relevan (Qyyum *et al.*, 2020). Pemanfaatannya dalam pembangkit energi membawa beberapa keuntungan ekonomi, lingkungan, dan iklim (Gaballah *et al.*, 2020). Tergantung pada sumber bahan organik yang digunakan, biogas terutama terdiri dari metana (50 - 75%), karbon dioksida (25 - 50%), dan sisa-sisa gas lainnya, seperti amonia, hidrogen, dan hidrogen sulfida. Hal ini dapat diterapkan untuk produksi pemanas/listrik atau ditingkatkan menjadi biometana dan digunakan sebagai bahan bakar kendaraan atau dipompa ke jaringan gas alam. Hal yang menjadi tantangan dari proses produksi biogas yaitu, proses dimana harus meminimalkan konsentrasi CO₂ dalam biogas dan gas pengotor lainnya sehingga diharapkan dapat meningkatkan kandungan metana dan nilai panasnya (Gustafsson *et al.*, 2020).

Metana yang terdapat dalam biogas merupakan gas yang tidak berbau, tidak berwarna dan mudah terbakar. Gas ini biasanya digunakan terutama sebagai bahan bakar untuk membuat panas dan listrik sebagai pencahayaan. Hal ini juga digunakan untuk memproduksi bahan kimia organik. Metana dapat dibentuk oleh

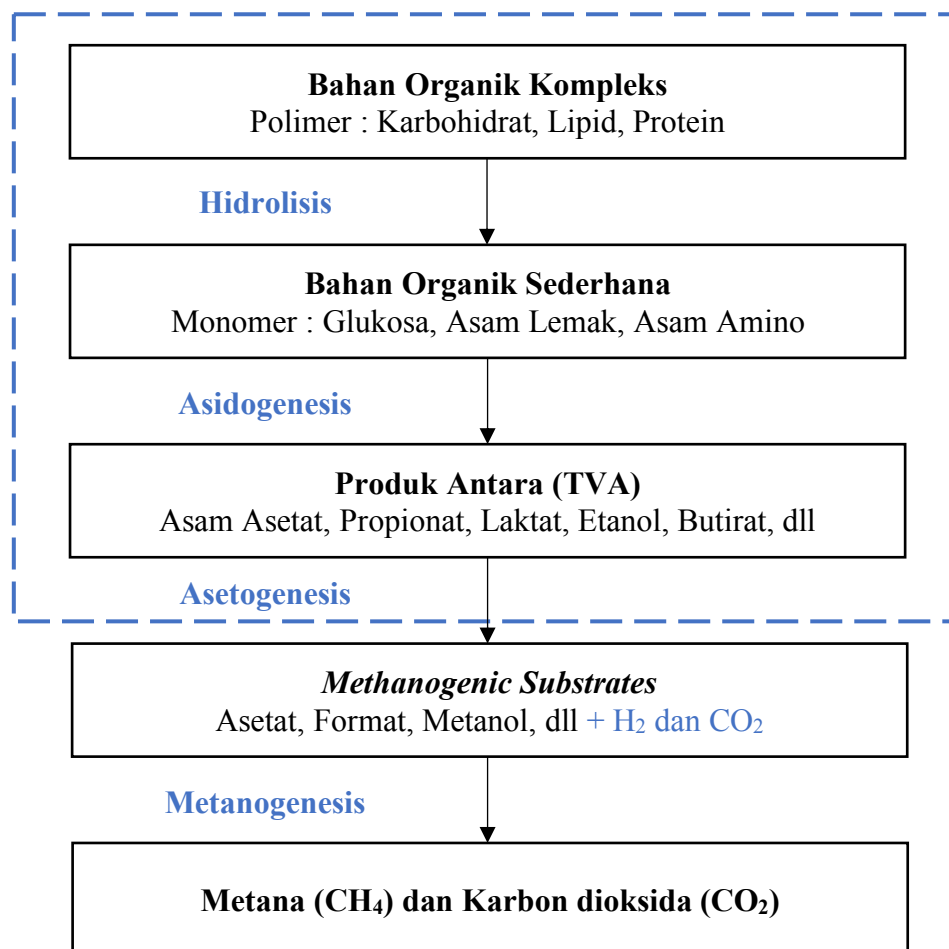
pembusukan bahan alami dan umum di tempat pembuangan sampah, rawa-rawa, sistem septik dan saluran pembuangan. Air limbah tapioka diolah melalui sejumlah *lagoon* terbuka anaerobik untuk mengurangi unsur-unsur seperti COD yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Dalam proses ini, air limbah tapioka juga menghasilkan gas metana. Gas metana kemudian dimanfaatkan ini untuk dimasukkan ke pembangkit listrik biogas baru yang menggantikan generator diesel yang sudah ada. Listrik yang dihasilkan akan digunakan kembali dalam industri tepung tapioka (Setyawaty, 2011).

2.3 Anaerobic Digestion

Pencernaan secara anaerobik adalah proses pengolahan limbah menjadi energi (*Waste-to-Energy*) yang terbukti banyak digunakan untuk mengolah limbah organik seperti limbah makanan (Panigrahi *et al.*, 2020), kotoran ternak, dan aliran air limbah di antaranya dapat berupa air limbah ubi kayu (Jiraprasertwong *et al.*, 2019). Proses ini dapat mengubah sejumlah besar COD (>50%) menjadi biogas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk efisiensi energi sendiri. *Anaerobic Digestion* dapat dianggap sebagai proses biokimia yang cukup rumit, dan dikelompokkan menjadi empat tahap kunci (hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, metanogenesis), di mana sejumlah mikroorganisme mendegradasi bahan organik, tanpa adanya oksigen, untuk memperoleh biogas yang kaya akan metana (Kapoor *et al.*, 2020).

Hidrolisis umumnya merupakan tahap dimana bahan organik kompleks akan dicerna menjadi bahan yang lebih sederhana, yang mudah larut atau *soluble monomers*. Proses hidrolisis ini di katalis oleh bakteri amilolitik atau proteolitik dengan menggunakan ekstrak enzim dari bakteri yaitu selulase, protease dan lipase. Pada tahap asidogenesis, produk yang dilepaskan diubah menjadi asam lemak rantai pendek, alkohol, dan produk samping berupa gas (H_2 , NH_3 , CO_2 , dan H_2S) oleh bakteri asidogen (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019). Dalam dua tahap pertama ini, oksigen yang tidak diinginkan dapat dikonsumsi oleh mikroba anaerob fakultatif. Senyawa yang terbentuk pada fase sebelumnya diubah oleh

bakteri asidogenik menjadi asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida (CO_2) pada tahap ketiga atau biasa disebut dengan asidifikasi (Leung *and* Wang, 2016). Akhirnya, bakterio metanogen dapat menghasilkan metana dari produk pengasaman melalui proses metanogenesis (seperti asam asetat, asam format, CO_2/H_2 , dan lain sebagainya). Tiga tahapan awal disebut sebagai fermentasi asam sedangkan tahap keempat disebut fermentasi metanogenesis. Skema tahap proses pembentukan biogas adalah sebagai berikut yang disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Tahapan Pembentukan Biogas (Broughton, 2009; dan Metcalf *and* Eddy, 2003)

2.4 Kondisi Proses yang Mempengaruhi Produksi Biogas

Selama proses pembusukan secara anaerobik, beberapa proses kimia dan biokimia berturut-turut melibatkan sejumlah mikroorganisme dan enzim. Namun, kondisi lingkungan dapat mengubah perilaku mikroorganisme dan sehingga diketahui bahwa pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan selama proses ini dapat meningkatkan efisiensinya dan memastikan pembentukan metana yang lebih stabil (Cruz *et al.*, 2021). Oleh karena itu, beberapa kondisi operasional kritis, yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi produksi biogas, dapat terus dipertahankan dalam kisaran optimal.

2.4.1 pH

Perubahan pH (derajat keasaman) dapat secara langsung mempengaruhi mikroorganisme. Namun, pengetahuan akan pH optimal harus diketahui; seperti pada proses hidrolisis dan asidogenesis, berlaku pada kisaran 5,5 - 6,0, sedangkan asidogenesis dan metanogenesis bergantung pada pH 6,5 - 7,5 (Pramanik *et al.*, 2019). Selanjutnya, stabilitas pH juga merupakan faktor penting yang mengontrol efek penghambatan *Volatile Fatty Acid* (VFA) dan NH_3 (Issah *et al.*, 2020). Kadang-kadang ketika substrat bersifat asam, seperti halnya air limbah singkong, perlu untuk mengatur pH awal sebelum memulai proses pembusukan secara anaerobik. Praktik umum lainnya untuk air limbah yang mudah terurai dengan pengasaman cepat (misalnya, air limbah singkong, *whey* keju, vinasse tebu) adalah penyesuaian alkalinitas selama proses sebagai upaya untuk mencegah efek buruk dari akumulasi VFA selama metabolisme metanogen (Palma *et al.*, 2018).

2.4.2 Temperatur

Suhu sangat mempengaruhi produksi metana setelah mempengaruhi kinerja bakteri. Proses pembusukan secara anaerobik dapat dioperasikan pada psychrophilic (10 - 20 °C), mesophilic (30 - 40 °C), atau termofilik (50 - 60 °C) (Ryue *et al.*, 2020). Dalam suhu psikrofilik (suhu rendah), pertumbuhan mikroba terbatas, dan laju reaksi sangat lambat (Tassew *et al.*, 2020). Pada suhu termofilik

memberikan beberapa keuntungan seperti laju reaksi yang dipercepat, produksi gas yang tinggi, dan penghilangan patogen yang lebih tinggi (Buffi`ere *et al.*, 2018).

Chavadej *et al.*, (2019) menyelidiki produksi H₂ dan CH₄, secara terpisah dari air limbah tapioka di bawah suhu termofilik (55 °C). Namun, digester termofilik umumnya dianggap lebih boros energi dan kurang stabil dibandingkan suhu mesofilik. Menurut Amorim *et al.*, (2019), produksi metana dan penghilangan bahan organik melalui pencernaan anaerobik air limbah ubi kayu optimum pada suhu 32 °C dan 39 °C. Setelah pemilihan rentang suhu yang digunakan, penting juga untuk memperhatikan kontrol suhu. Jika variasi suhu mengalami fluktuasi sampai 5 °C dalam waktu singkat, hal ini dapat menyebabkan penurunan yang signifikan dalam hasil total biogas (Gaballah *et al.*, 2020).

2.4.3 Rasio *Total Volatile Acid (TVA)*/Total Alkalinitas

TVA (terutama asam asetat, propionat, dan butirat) adalah produk antara dalam proses pencernaan anaerobik yang dihasilkan dari dua langkah pertama, yaitu hidrolisis dan asidogenesis. Oleh karena itu, stabilitas proses dapat diketahui dengan memantau pH, alkalinitas, dan TVA (sebagai CH₃COOH), yang merupakan indikator paling umum untuk mencerminkan kondisi proses yang sedang berlangsung. TVA khususnya, salah satu kondisi proses yang sering digunakan sebagai indikator pemantauan sebab TVA merupakan produk antara utama sebelum produksi metana, dan akumulasinya dalam reaktor menunjukkan ketidakseimbangan proses dan dapat menyebabkan penurunan pH. Dalam hal demikian, alkalinitas merupakan penyangga utama atau *buffer* untuk menjaga keseimbangan asam (Ceconet *et al.*, 2022).

Selain laju produksi biogas, indikator stabilitas proses anaerobik juga meliputi rasio TVA/alkalinitas. Rasio TVA/alkalinitas sering dianggap sebagai tanda peringatan awal yang lebih baik dari stabilitas proses anaerobik dibandingkan dengan pH. Selama kondisi mesofilik, rasio TVA/alkalinitas dalam kisaran 0,23 –

0,3 menunjukkan pencernaan yang stabil, rasio $<0,23$ merupakan indikasi digester yang stabil tetapi dalam kondisi kekurangan substrat, sedangkan nilai $>0,3$ menunjukkan proses yang berlebihan dan stabilitas yang buruk (Issah *and* Kabera, 2021). Rasio TVA/alkalinitas lebih sensitif terhadap perubahan kondisi proses pencernaan anaerobik daripada uji pH sebab nilai rasio tersebut akan menunjukkan perubahan yang terjadi dengan lebih jelas sementara tingkat pH akan tetap konstan karena pengaruh buffer dari alkalinitas harus habis sebelum akhirnya pH akan berubah.

2.4.4 Rasio C/N

Rasio C/N merupakan perbandingan antara karbon dan nitrogen yang merupakan unsur utama pembentuk bahan organik. C dan N diperlukan sebagai sumber energi bagi mikroba dalam proses perombakan. Rasio C/N yang baik yaitu pada rentang 20 – 30 dan optimal pada rentang 25 – 30 (Deublein and Steinhäuser, 2008). Rasio C/N yang terlalu tinggi akan mengakibatkan kinerja mikroba rendah sehingga produksi metana akan rendah pula. Sebaliknya, jika rasio C/N terlalu rendah, nitrogen akan dibebaskan dan berakumulasi dalam bentuk ammonia (NH_4^-) yang dapat meningkatkan pH (Zulkarnaen dkk., 2018). Hal ini juga disebutkan oleh Mujdalipah dkk. (2014) yang menyatakan bahwa rasio C/N yang terlalu rendah akan menghasilkan biogas dengan kandungan CH_4 rendah, CO_2 tinggi, H_2 rendah dan N_2 tinggi. Perbandingan C/N yang terlalu tinggi akan menghasilkan biogas dengan kandungan CH_4 rendah, CO_2 tinggi, H_2 tinggi, dan N_2 rendah. Perbandingan C/N yang seimbang akan menghasilkan biogas dengan CH_4 tinggi, CO_2 sedang, H_2 dan N_2 rendah.

Rasio C/N yang optimal diperlukan untuk proses pencernaan anaerobik yang efektif (Kothari *et al.*, 2014). Zhang dkk. (2014) melaporkan bahwa rasio C/N sangat mempengaruhi stabilitas proses pencernaan anaerobik. Ini karena rasio C/N yang optimal tidak hanya membantu menjaga lingkungan yang sesuai, tetapi juga membantu mengontrol keseimbangan nutrisi yang tepat melalui perkembangan mikroorganisme. Populasi mikroba dapat meningkat secara bertahap jika jumlah nitrogen dalam limbah rendah, dan dengan demikian, lebih banyak waktu akan

diperlukan untuk menguraikan limbah yang ada, sehingga menghasilkan CH_4 yang lebih rendah. Sebaliknya, penghambatan amonia dapat terjadi, mencegah pertumbuhan mikroba, terutama jika konsentrasi nitrogen lebih dari kebutuhan mikroba (Kothari *et al.*, 2014; Leung and Wang, 2016). Pengolahan limbah organik dengan penambahan kotoran hewan, biomassa lignoselulosa, dan lumpur limbah dapat digunakan untuk meningkatkan rasio C/N (Khalid *et al.*, 2011).

2.4.5 Waktu Tinggal Hidraulik (WTH)

Keberhasilan WTH juga tergantung pada komposisi substrat. Waktu tinggal hidraulik limbah adalah faktor penting yang sangat menentukan keberhasilan produksi biogas, karena mempengaruhi laju pembebanan, konsentrasi air limbah, dan akhirnya mempengaruhi dari pH air limbah di dalam digester anaerobik. Menurut Converti and Zilli (1999), kondisi optimum dalam pembentukan biogas dapat dicapai pada waktu tinggal hidraulik 20 – 40 hari. Waktu tinggal hidraulik menyatakan jumlah waktu yang dibutuhkan substrat untuk tinggal di dalam reaktor. Dengan adanya WTH yang sesuai, akan memungkinkan terjadinya reaksi yang lengkap dalam proses anaerobik digester dan ini sangat bergantung pada temperatur proses, jenis teknologi dan komposisi substrat (Ricci and Confalonieri, 2016).

2.4.6 Pengadukan

Pengadukan dalam pembuatan biogas perlu dilakukan, hal ini bertujuan untuk menghomogenkan bahan baku agar mempercepat kontak substrat dengan mikroorganisme pada pembuatan biogas. Pada saat pencampuran dilakukan, bahan-bahan tersebut tidak tercampur dengan baik dan merata. Pengadukan dapat dilakukan sebelum dimasukkan ke dalam digester atau ketika bahan sudah berada di dalam digester (Haryanto *et al.*, 2017). Costa (2011), menyatakan bahwa proses pengadukan dapat menggeser waktu produksi biogas menjadi satu sampai dua hari lebih awal dibanding jika reaktor tidak dilakukan pengadukan. Pengadukan menghasilkan kontak yang cukup antara substrat dengan populasi bakteri dan juga menghasilkan kondisi homogen dari limbah. Walaupun demikian, volume

akumulatif dari biogas, tidak dipengaruhi dengan pengadukan (Mohammad dkk., 2012).

2.4.7 Konsentrasi Mikroba Aktif

Gas metana (CH_4) selama proses pencernaan anaerobik terjadi pada fasa metanogenesis. Pada fasa metanogenesis bakteri metanogenik akan mengkonsumsi asam-asam lemak untuk metabolisme pembentukan metana. Bakteri metanogen tumbuh dalam kondisi tanpa adanya udara (tanpa O_2). Pengamatan terhadap mikroba anaerobik dilakukan untuk mengetahui konsentrasi mikroorganisme anaerob aktif yang terdapat pada limbah atau lumpur aktif limbah yang akan digunakan sebagai starter dalam proses pembentukan biogas. Dalam hal ini, mikroba yang mendukung pembentukan gas metana adalah mikroba metanogenik. Perhitungan jumlah bakteri anaerobik bertujuan untuk mengetahui jumlah bakteri anaerobik yang terdapat pada lumpur aktif juga memberikan perlakuan untuk mengetahui jumlah bakteri asetonotrof, metilotrof, dan hidrogenotrof yang merupakan bagian dari proses pembentukan gas metana dalam proses metanogenesis. Konsentrasi mikroorganisme metanogen aktif dipengaruhi oleh banyak faktor yaitu nilai bahan organik dan rasio C/N yang terkandung dalam suatu sampel (Putri, 2019).

III. METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari 2022, bertempat di Laboratorium Pengelolaan Limbah Agroindustri, Jurusan Teknologi Hasil Petanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian yaitu gelas ukur, gelas plastik, kotak wadah, Erlenmeyer, *hotplate and magnetic stirrer*, *magnet stirrer*, selang, *stopper silicon*, keran T (septum), statif dan klem, batang besi penyangga, sarung tangan, timbangan analitik, *beaker glass*, botol sampel, *centrifugator*, tabung centrifuge, rak tabung *centrifuge*, lemari asam, *vortex*, spektrofotometer, tabung COD, rak tabung COD, labu ukur, *ruber bulb*, spatula, pipet volume, pipet tetes, pH meter, buret dan keran, *syring sample*, botol aquades, corong, serta gaskromatografi.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah limbah segar tapioka, onggok, dan inokulum berupa *sludge* aktif limbah tapioka yang masing-masing bahan tersebut diperoleh dari pabrik tapioka yang terdapat di Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Selain itu juga dibutuhkan bahan-bahan kimia lain pendukung penelitian yaitu kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), asam sulfat (H_2SO_4), aquades, perak sulfat ($AgSO_4$), indicator PP, H_2SO_4 0,1N, dan NaOH 0,1N.

3.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif dengan menyajikan hasil pengamatan dalam bentuk tabel dan grafik (*Microsoft Excel Data Analysis*) dan kemudian dianalisis secara deskriptif. Penelitian dilakukan dengan melakukan analisa di laboratorium. Penelitian ini melibatkan empat tahapan yaitu:

pengumpulan dan persiapan bahan baku, merancang dan merakit bioreaktor skala kecil dengan dilengkapi seperangkat alat ukur biogas sederhana, analisis sampel uji, serta mengukur produksi biogas harian dan komposisi sampel biogas. Analisis yang dilakukan antara lain:

1. pH,
2. TVA (*Total Volatile Solid*),
3. COD Total, dan
4. COD *soluble*.

Selanjutnya, data hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dan dianalisis secara deskriptif berdasarkan kondisi operasi penelitian.

Limbah segar tapioka dengan penambahan onggok 10% dilakukan perlakuan terdahulu dengan memvariasikan waktu tunda yang kemudian dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 1000 mL dengan penambahan *sludge* aktif pada perbandingan air limbah terhadap *sludge* yaitu 1:4. Larutan limbah tersebut kemudian diberikan faktor atau kondisi lingkungan yang sama yaitu dilakukan pada suhu kamar, diberikan pengadukan, dan Waktu Tinggal Hidraulik (WTH) air limbah didalam bioreaktor sederhana yaitu selama 20 hari. Dilakukan empat perlakuan berbeda terhadap waktu tunda air limbah segar tapioka dengan onggok diikuti sampel kontrol sebagai pembanding. Perlakuan terhadap masing-masing sampel limbah tersebut adalah sebagai berikut yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Perlakuan waktu tunda air limbah segar tapioka dan onggok

Kode Sampel	Komposisi	Waktu Tunda (Hari)
K (Kontrol)	ALST (200 mL)	-
A	ALST (180 mL) + onggok (20 gr)	0
B	ALST (180 mL) + onggok (20 gr)	3
C	ALST (180 mL) + onggok (20 gr)	4
D	ALST (180 mL) + onggok (20 gr)	5

Keterangan:

ALST : Air Limbah Segar Tapioka

Setiap sampel dilakukan 2 kali percobaan atau dilakukan replikasi sebagai bentuk ulangan.

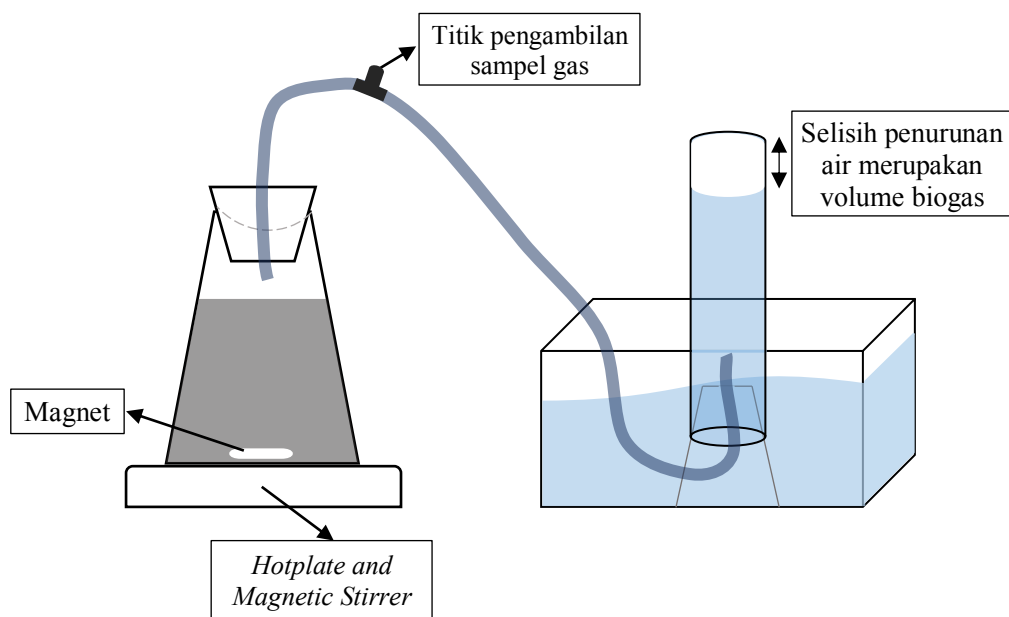
3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Persiapan Bioreaktor dan Alat Pengukur Volume Biogas

Bioreaktor yang dirancang merupakan bioreaktor sederhana menggunakan peralatan laboratorium sistem *batch* (Gambar 3). Rangkaian peralatan bioreaktor adalah Erlenmeyer dengan kapasitas 1000 mL bahan kaca, *crop silicon* yang telah diberi lubang, selang, keran T sebagai tempat pengambilan *sample gas*, dan *hotplate and magnetic stirrer*. Perangkaian bioreaktor dilakukan dengan cara menutup mulut Erlenmeyer dengan *crop silicon* dengan memasang selang pada lubang yang terdapat di *crop silicon* sebagai jalan keluar untuk gas mengalir. Kemudian, bioreaktor tersebut selanjutnya diletakkan di atas *hotplate and magnetic stirrer*.

Persiapan selanjutnya adalah perangkaian alat pengukur volume biogas (Gambar 3). Alat untuk mengukur volume biogas terdiri dari gelas ukur kapasitas 1000 mL, selang, gelas plastik yang telah diberi lubang, batang besi penyangga, klem dan statif dan bak air. Bak yang telah berisi air diletakkan pada tempat yang datar kemudian diatas bak ditaruh batang besi penyangga. Besi penyangga ini berfungsi sebagai penyangga gelas ukur dalam keadaan terbalik, diusahakan agar bibir gelas

ukur tenggelam dalam bak air. Kemudian, gelas plastik yang telah diberi lubang selanjutnya dipasangkan pada bibir gelas ukur sebagai kaki alas sehingga posisi gelas ukur tidak menyentuh alas bak air. Fungsi pemberian lubang pada gelas plastic yaitu sebagai tempat untuk memasukkan selang agar dapat masuk ke dalam gelas ukur sebagai perantara pembawa aliran gas yang menyatu dengan rangkaian bioreactor. Rangkaian bioreaktor dan alat pengukur biogas disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Bioreaktor dan Pengukur Volume Biogas

Bioreaktor dirancang untuk sesuai dalam keadaan anaerob dengan menggunakan prinsip sistem *batch*. Pada sistem *batch*, substrat dan inokulum secara bersamaan dimasukkan ke dalam bioreaktor di awal fermentasi dan produk diambil di akhir fermentasi. Pada saat proses berlangsung akan terjadi perubahan kondisi di dalam bioreaktor (Jumlah bakteri akan terus bertambah sedangkan tidak ada substrat yang ditambahkan dalam reaktor). Dalam bioreaktor ini, sistem pertumbuhan bakteri merupakan sistem pertumbuhan tersuspensi (*suspended growth-bacteria*). Mikroba yang berperan pada proses biologis, tumbuh dan berkembangbiak dalam keadaan tersuspensi (tercampur secara merata) di dalam air limbah.

3.4.2 Persiapan Bahan dan Pelaksanaan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa air limbah segar tapioka, onggok, dan *sludge*. Onggok ditimbang 10% dari total perbandingan limbah dengan *sludge* yaitu 1 : 4 dalam 1000 mL. Onggok yang telah ditimbang sebanyak 20 gram kemudian dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 1000 mL dan ditambahkan air limbah segar sebanyak 180 mL. Campuran onggok dan air limbah segar tapioca kemudian diberikan variasi waktu tunda yang telah ditetapkan. Setelah waktu tunda campuran limbah tersebut tercapai, maka dilakukan penambahan *sludge* sebanyak 800 mL. Selain itu, dilakukan persiapan berupa penambahan air ke dalam bak air dan gelas ukur sebagai wadah alat pengukur volume biogas. Batang magnet kemudian dimasukkan ke dalam Erlenmeyer (bioreaktor) sebagai alat pembantu dalam proses pengadukan dalam rangka menghomogenkan larutan limbah. Limbah tersebut kemudian difermentasi secara anaerob selama 20 hari.

3.5 Pengamatan

Pengamatan terhadap analisis sampel limbah meliputi *Total Chemical Oxygen Demand* dan *Chemical Oxygen Demand Soluble* (T-COD dan CODs), pH serta *Total Volatile Acid* (TVA). Parameter pengamatan yang dilakukan untuk produksi biogas termasuk parameter volume gas, dan komposisi biogas. Pengamatan terhadap analisis sampel limbah dilakukan pada hari ke-0 dan hari ke-20, sedangkan pengamatan terhadap parameter volume gas dilakukan setiap hari serta komposisi biogas pada hari ke-1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, dan 20.

3.5.1 Analisis pH

Analisis pH dilakukan dengan menggunakan pH meter HI 2550 pH/ORP & EC/TDS/NaCl Meter Hanna Instruments. Pengujian pH dilakukan dengan menggunakan metode APHA AWWA WEF *23rd Edition* 2017 Part 4500 – H+ B. Langkah dalam analisis pH dimulai dengan mempersiapkan peralatan instrument

pH. Pertama, elektroda pH meter dibilas menggunakan air suling sebanyak tiga kali dan dikeringkan menggunakan tisu. Kemudian elektroda pH meter direndam ke dalam sampel selama ± 1 menit kemudian dikeringkan dengan tisu. Jika sampel yang akan dianalisis lebih dari satu, maka tahapan menganalisis sampel berikutnya mengikuti tahapan sampel sebelumnya. Sampel baru disiapkan untuk dianalisis dan elektroda yang telah dibilas kemudian direndam ke dalam sampel baru sampai pH meter menunjukkan pembacaan yang tetap. Angka yang tertera pada layar pH meter merupakan nilai pH dari air limbah yang diukur. Angka hasil pengukuran tersebut kemudian dicatat pada lembar pengamatan.

3.5.2 Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD)

3.5.2.1 Persiapan Larutan Pencerna dan Reagen

Sebelum dilakukan analisis COD, terlebih dahulu dipersiapkan reagen COD dengan menyiapkan larutan pencerna dan larutan pereaksi asam sulfat (reagen COD). Larutan Pencerna (*Digestion Solution*) terdiri dari 10,216 gram $K_2Cr_2O_7$; yang telah dikeringkan pada suhu $150^\circ C$ selama 2 jam. Setelah itu ditambahkan 167 mL, H_2SO_4 pekat dan 33,3 g H_2SO_4 . Dilarutkan, dan didinginkan pada suhu ruang kemudian diencerkan sampai 1000 mL. Larutan pereaksi atau reagen asam sulfat dibuat dengan cara menambahkan 10,12 kristal $AgSO_4$ kedalam 1000 mL H_2SO_4 pekat. Dibiarkan 1 jam sampai larut diatas *magnetic stirrer*. Larutan pencerna sebanyak 1,5 mL dan 3,5 mL larutan asam sulfat dimasukkan kedalam vial atau tabung COD berkapasitas 10 mL. Homogenkan dengan cara *divortex*.

3.5.2.2 Analisis T-COD

Pengukuran Total *Chemical Oxygen Demand* (T-COD) dilakukan untuk mengetahui kebutuhan oksigen dalam mendekomposisi bahan organik yang terdapat dalam air limbah tapioka secara kimiawi. Proses pengukuran T-COD yaitu dengan mempersiapkan sampel dan dilakukan pengenceran sampel 100 kali. melakukan pengenceran sampel 100 kali. Sampel uji yang telah dihomogenkan diambil sebanyak 5 mL kemudian dimasukkan kedalam labu ukur 500 mL.

Aquades ditambahkan ke dalam labu ukur sampai dengan garis batas, lalu dihomogenkan larutan tersebut dengan menggoyangkan labu ukur. Sampel dituangkan ke dalam gelas beaker 50 mL. Sampel diaduk kembali lalu diambil sebanyak 0,2 mL atau 200 μ L menggunakan pipet volumetrik 1 mL. Sampel dimasukkan ke dalam vial atau tabung yang berisi reagen COD kemudian dipanaskan dengan unit reaktor DBR200 pada suhu 150 $^{\circ}$ C selama 2 jam. Setelah dipanaskan, vial dikeluarkan dan dibiarkan hingga dingin (sampai mencapai suhu ruang) kemudian diukur nilai COD-nya dengan menggunakan HACH Spektrofotometri DR4000 pada panjang gelombang 620 nm (APHA, 1998).

3.5.2.3 Analisis CODs

Analisis CODs dilakukan dengan mengambil sampel 45 mL ke dalam tabung *centrifuge*. Proses sentrifuge dilakukan dengan kecepatan 3000 rpm selama 10 menit. Prinsip sentrifugator yaitu memutar tabung (rotasi) dengan kecepatan tinggi sehingga terpisah antara partikel yang terkandung dari larutannya. Larutan sampel yang telah terpisah dari partikel terlarutnya (supernatant) diambil sebanyak 0,2 mL menggunakan pipa volumetrik 1 mL. Sampel dimasukkan ke dalam vial atau tabung yang berisi reagen COD kemudian dipanaskan dengan unit reaktor DBR200 pada suhu 150 $^{\circ}$ C selama 2 jam. Setelah dipanaskan, vial dikeluarkan dan dibiarkan hingga dingin (sampai mencapai suhu ruang) kemudian diukur nilai COD-nya dengan menggunakan HACH Spektrofotometri DR4000 pada panjang gelombang 620 nm (APHA, 1998).

3.5.3 Analisis Total Volatile Acid (TVA)

Analisa *total volatile acid* (TVA) dilakukan untuk mengetahui jumlah total padatan yang menguap pada bahan. Proses analisa TVA diawali dengan mempersiapkan bahan pengasam dan basa. Bahan pengasam yang digunakan yaitu H_2SO_4 0,1 N. Untuk membuat H_2SO_4 0,1 N, H_2SO_4 diambil sebanyak 2,77 mL dengan menggunakan pipet volumetrik dan dimasukkan ke dalam labu takar 1000 mL. Larutan kemudian diencerkan dengan menambahkan aquades sampai batas tanda tera. Untuk membuat NaOH 0,1 N, NaOH diambil sebanyak 40 gr

dan dimasukkan ke dalam labu takar 1000 mL. Kemudian diencerkan dengan menambahkan aquades sampai batas tera.

Proses analisa TVA sampel dilakukan dengan memasukkan 50 mL sampel ke dalam Erlenmeyer 250 mL. Selanjutnya, tetapkan pH sampel tersebut menuju pH 4 dengan menambahkan H₂SO₄ 0,1 N. Panaskan larutan sampel tersebut hingga mendidih selama ± 3 menit menggunakan *hotplate and magnetic stirrer Fisher Scientific*. Dinginkan sampel sampai suhu ruang. Tambahkan 5 tetes indikator PP 1% dan kemudian dititrasi dengan NaOH 0,1 N sampai menunjukkan perubahan warna (biasanya merah muda). Catat volume titar terpakai pada lembar pengamatan. Adapun perhitungan TVA yaitu sebagai berikut:

$$TVA \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{\Sigma \text{ titar NaOH } 0,1 \text{ N} \times 0,1 \times 60}{50} \times 1000$$

3.5.4 Pengukuran Volume Biogas

Pengukuran volume biogas dilakukan setiap hari dari hari ke satu setelah pengisian sludge ke dalam campuran onggok dan air limbah segar tapioca selama 20 hari pengamatan. Produksi gas harian diukur dengan cara mengalirkan biogas menggunakan selang yang tersambung dengan gelas ukur yang berisi air. Gas yang keluar dari reaktor akan mendorong air sehingga volume air di dalam gelas ukur akan turun. Selisih penurunan volume air merupakan volume gas. Volume biogas yang diamati yaitu volume biogas harian kumulatif.

3.5.5 Komposisi Gas

Pengukuran komposisi biogas dilakukan setelah gas diproduksi. Pengukuran dilakukan dengan alat *gas chromatography* (Shimadzu Shincarbon ST 50-80 D-375), menggunakan kolom jenis *shincarbon* dengan panjang 1 – 4 meter dan detektor *Thermal Conductivity Detector* (TCD) pada temperatur 200 °C dengan arus 80 mA. Analisis komposisi biogas dilakukan dengan mengambil sampel gas sebanyak 2,5 mL menggunakan *syringe sample* lalu disuntikan pada *injection port*.

Ketika GC bekerja, maka data akan terbaca dengan menunjukkan grafik kromatogram dan hasil perhitungan akan indikator tersebut dimonitor. Pengukuran komposisi biogas dilakukan untuk melihat besaran komposisi CH₄ (metana) dan CO₂ (karbon dioksida) pada biogas yang dihasilkan (Shimadzu Corporation, 2004).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pemberian waktu tunda selama 0, 3, 4, dan 5 hari terhadap campuran onggok dan air limbah segar tapioka meningkatkan produksi biogas masing-masing sebesar 73,01 %; 61,29 %; 66,10 %; dan 46,44 % dibandingkan dengan perlakuan kontrol (tanpa penambahan onggok).
2. Waktu tunda campuran onggok dan air limbah segar tapioka terbaik yaitu selama 3 hari yang memberikan peningkatan produksi biogas sebesar 61,29 % dengan produksi kumulatif sebesar 1927,5 mL biogas, dan peningkatan gas metana sebesar 59 % dengan total metana kumulatif sebesar 1018,3 mL gas metana, serta produktivitas metana sebesar 0,60 L/g T-COD_{removed} atau 25,5 L/gCODs-*removed* dengan konsentrasi gas metana rata-rata selama proses dekomposisi 20 hari sebesar 55,83 %.

5.2 Saran

Saran pada penelitian ini yaitu perlu melakukan kajian lanjutan berupa studi kelayakan terhadap penambahan onggok dalam rangka meningkatkan produksi biogas dalam skala komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, M. G. 2009. *Pedoman Pengolahan Limbah Industri Pengolahan Tapioka. Program Agroindustry to Zerowaste*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup. Jakarta. 16 – 31.
- Ahmad, A. 2009. *Dasar-Dasar Teknologi Pengolahan Limbah Cair*. UNRI Press. Pekanbaru.
- Ahmad, A., Setiadi, T., Ayafila, M., dan Liang, O.B. 2000. Model Kinetika Proses Biodegradasi Anaerob Minyak Dan Lemak. *Journal of Biosains*. 5(1): 28 – 37.
- Ahmad, A., Syarfi, dan Atikalidia, M. 2011. Penyisihan *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Produksi Biogas Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Dengan Bioreaktor Hibrid Anaerob Bermedia Cangkang Sawit. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”: Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Yogyakarta.
- Amorim, M. C. C. D. E., Tereza, P., Silva, D. S., Barbosa, P. S., and Montefusco, N. E. 2019. Anaerobic Biodegradation of Cassava Wastewater Under Different Temperatures and Inoculums. *Comun. Sci*. 10 (1): 65 – 76.
- Anggari, V. S., dan Prayitno. 2020. Studi Literatur Limbah Tapioka Untuk Produksi Biogas: Metode Pengolahan Dan Peranan Starter–Substrat. *Jurnal Teknologi Separasi (Distilat)*. 6 (2): 176 - 187.
- APHA. 1998. *Standard Methods For Examination of Wastewater 20th Edition*. American Public Health Association 1015. Fittencet Street, NW, Washington, DC 20005-2605. PP: 2-57-2-58.
- APHA AWWA WEF 23rd Edition 2017. 4500 – H⁺ B. *Electrometric Method*. New York.
- Appels, L., Baeyens, J., Degre’ve, J., and Dewil, R. 2008. Principles and Potential of The Anaerobik Digestion of Water-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34 (2008): 755 – 781.

- Arwindah, D., Umrah, dan Kasman. 2018. Formulasi Substrat Dasar Kotoran Kambing dan Limbah Cair Tempe Dengan Inokulum Rumén Sapi Untuk Studi Awal Produksi Biogas. *Biocelbes*. 12 (3): 41 – 53.
- Atmodjo, M. C. T. 2017. The Biogas Plant From Liquid Waste of Tapioca. *The 4th International Conference on Engineering and Technology Development*. 335 – 338. Badan Pusat Statistik. 2019. *Produksi Ubi Kayu Berdasarkan Provinsi*. Statistik Indonesia. Jakarta.
- Bougrier, C., Delgenès, J. P., and Carrère, H. 2006. Combination of Thermal Treatments and Anaerobic Digestion to Reduce Sewage Sludge Quantity and Improve Biogas Yield. *Process Safety and Environmental Protection*. 84(4): 280 – 284.
- Broughton, A. D. 2009. Hydrolysis and Acydogenesis of Farm Dairy Effluent for Biogas Production at Ambient Temperatures. *Thesis*. Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Budiyono, Widiyasa, I. N., Johari, S., dan Sunarso. 2010. The Kinetic of Biogas Production Rate from Cattle Manure in Batch Mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*. 3(1): 39 – 44.
- Buffière, P., Doms, M., Hattou, S., and Benbelkacem, H., 2018. The Hydrolytic Stage in High Solids Temperature Phased Anaerobic Digestion Improves The Downstream Methane Production Rate. *Bioresour Technol*. 259: 111 – 118.
- Ceconet, D., Callegari, A., and Capodaglio, A.G. 2022. UASB Performance and Perspectives in Urban Wastewater Treatment at Sub-Mesophilic Operating Temperature. *Water J*. 14: 115.
- Chaiprasert, P., Hudayah, N., and Auphimai, C. 2017. Efficacies of Various Anaerobic Starter Seeds for Biogas Production from Different Types of Wastewater. *Hindawi: BioMed Research International*. 2017: 13.
- Chavadej, S., Wangmor, T., Maitriwong, K., Chaichirawiwat, P., Rangsunvigit, P., and Intanoo, P. 2019. Separate Production Of Hydrogen and Methane From Cassava Wastewater With Added Cassava Residue Under A Thermophilic Temperature in Relation to Digestibility. *J. Biotechnol*. 291: 61 – 71.
- Contrera, R. C., da Cruz Silva, K. C., Ribeiro Silva, G. H., Morita, D. M., Zaiat, M., and Schalch, V. 2015. The Chemical Oxygen Demand / Total Volatile Acids Ratio As An Anaerobic Treatability Indicator For Landfill Leachates. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 32(1): 73 – 86.

- Converti, A., A. D. Borghi., and M. Zilli, S. 1999. Anaerobic Digestion of The Vegetable Fraction of Municipal Refuses: Mesophilic Versus Thermophilic Conditions. *Journal of Bioprocess Engineering*. 21: 371 – 376.
- Costa, J. 2011. *Optimasi Produksi Biogas Pada Anaerobik Digester Type Horizontal Berbahan Baku Kotoran Sapi Dengan Pengaturan Suhu dan Pengadukan*. Master Thesis of Mechanical Engineering, ITS.
- Cruz, I. A., Andrade, L. R. S., Bharagava, R. N., Nadda, A. K., Bilal, M., Figueiredo, R. T., and Ferreira, L. R. F. 2021. Valorization Of Cassava Residues For Biogas Production In Brazil Based On The Circular Economy: An Updated And Comprehensive Review. *Cleaner Engineering and Technology*. 4: 1 – 10.
- Deublein, D., and Steinhauser, A. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resource*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany. 443.
- Djuma'ali. 2013. *Biokonversi Onggok Menjadi Etanol dengan Menggunakan Multienzim*. Disertasi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 183–192.
- Farghaly, A. and Tawfik, A. 2016. Simultaneous Hydrogen and Methane Production Through Multi-Phase Anaerobic Digestion of Paperboard Mill Wastewater Under Different Operating Conditions. *Appl Biochem Biotechnol*. 181(1):142 – 156.
- Gaballah, E. S., Abdelkader, T. K., Luo, S., Yuan, Q., and Abomohra, A. E. 2020. Enhancement Of Biogas Production By Integrated Solar Heating System: A Pilot Study Using Tubular Digester. *Energy*. 193.
- Gustafsson, M., Cruz, I., Svensson, N., and Karlsson, M. 2020. Scenarios For Upgrading And Distribution Of Compressed And Liquefied Biogas – Energy, Environmental, And Economic Analysis. *J. Clean Prod*. 256.
- Haryanto, A., Cahyani, D., Triyono, S., Murdapa, F., and Haryono, D. 2017. Economic Benefit and Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of A Family-Scale Cowdung Anaerobic Biogas Digester. *International Journal of Renewable Energy Development*. 6 (1): 29 – 36.
- Haryanto, A., Hasanudin, U., Afrian, C., and Zulkarnaen, I. 2018. Biogas Production From Anaerobic Codigestion of Cowdung and Elephant Grass (*Pennisetum Purpureum*) Using Batch Digester. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 141: 1 – 10.
- Hasanuddin, U. 2008. *Handbook Wastewater of Post Harvest Technology of Agro-Industry*. Lampung University, Lampung, Indonesia.

- Hasanudin, U. 2007. *Biogas Production From Agro-Industries Wastewater*. Workshop on “Commercialization of Renewable Energy Recovery from Agroindustry Wastewater”. University of Lampung. Lampung. Indonesia.
- Hasanudin, U., Kustyawati, M. E., Iryani, D. A., Haryanto, A., and Triyono, S. 2019. *Estimation of Energy And Organik Fertilizer Generation From Small Scale Tapioca Industrial Waste*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 230.
- Indarto, K. E. 2010. *Produksi Biogas Limbah Cair Industri Tapioka melalui Peningkatan Suhu dan Penambahan Urea pada Perombakan Anaerob*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sebelas Maret.
- Iriani, P., Suprianti, Y., dan Yulistiani, F. 2017. Fermentasi Anaerobik Biogas Dua Tahap Dengan Aklimatisasi dan Pengkondisian pH Fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*. 1(1): 1 – 10.
- Isdiyanto, R. dan Hasanudin, U. 2009. Pengaruh Waktu Tinggal Hidrolik Terhadap Produksi Biogas. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*. 8(2): 82 – 90.
- Issah, A. A., Kabera, T., and Kemausuor, F. 2020. Biogas Optimisation Processes And Effluent Quality: A Review. *Biomass Bioenergy*. 133.
- Issah, A. A. and Kabera, T. 2021. Impact of Volatile Fatty Acids To Alkalinity Ratio and Volatile Solids on Biogas Production Under Thermophilic Conditions. *Waste Manag. Res*. 39: 871–878.
- Jiraprasertwong, A., Maitriwong, K., and Chavadej, S. 2019. Production Of Biogas From Cassava Wastewater Using A Three-Stage Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Renew Energy*. 130: 191 – 205.
- Kahar, A., Warmadewanthi, I., and Hermana, J. 2018. Effect Of pH On Liquid-Phase Mass Transfer And Diffusivity Coefficient At Leachate Treatment Of Municipal Waste Landfill In Anaerobic Bioreactor. *Eksergi*. 15(2): 24 – 33.
- Kamahara, H., Hasanudin, U., Atsuya, Y., Widiyanto, A., Tachibana, R., Goto, N., Daimon, H., and Fujie., K. 2010. Methane Emission from Anaerobic Pond of Tapioca Starch Extraction Wastewater in Indonesia. *Journal of Ecotechnology Research*. 15(2): 79 – 83.
- Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., Kamyab, H., Nguyen, D. D., and Kumar, A. 2020. Advances In Biogas Valorization And Utilization Systems: A Comprehensive Review. *J. Clean Prod*. 273.

- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., and Dawson, L. 2011. The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste. *Waste Manag.* 31: 1737–1744.
- Kothari, R., Pandey, A.K., Kumar, S., Tyagi, V.V., and Tyagi, S.K. 2014. Different Aspects of Dry Anaerobic Digestion for Bio-Energy: An Overview. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 39: 174–195.
- Leung, D.Y.C. and Wang, J. 2016. An Overview On Biogas Generation From Anaerobic Digestion Of Food Waste. *Int J. Green Energy.* 13(2): 119–131.
- Manurung, R. 2004. *Proses Anaerobik sebagai Alternatif untuk Mengolah Limbah Sawit*. Universitas Sumatra Utara Repository. Medan.
- Marjuki. 2001. *Effectiveness of Zeolit In Reducing Cyanide (CN) Content Of Tapioca Starch Wastewater In Ngemplak Kidul Village, Sub-District Margoyoso Regency Of Pati*. Thesis. Central Java.
- Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse: 4th Edition*. McGraw-Hill. New York.
- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M., and Aghbashlo, M. 2019. Biogas Production From Food Wastes: A Review On Recent Developments And Future Perspectives. *Bioresour. Technol Rep.* 7.
- Miron, Y., Zeeman, G., Van Lier, J.B., Lettinga, G., 2000. The Role Of Sludge Retention Time In The Hydrolysis And Acidification Of Lipids, Carbohydrates And Proteins During Digestion Of Primary Sludge In CSTR Systems. *Water Res.* 34(5): 1705 – 1713.
- Mohammad R. F., Soeroso, Pradana S., Akbar, Sudarno, dan Wardhana, I. W. 2016. Pengaruh Pengenceran Dan Pengadukan Terhadap Produksi Biogas Pada Anaerobic Digestion Dengan Menggunakan Ekstrak Rumen Sapi Sebagai Starter Dan Limbah Dapur Sebagai Substrat. *Jurnal Presipitasi.* 13 (2): 88 – 93.
- Mujdalipah, S., Dohong, S., Suryani, A., dan Fitria, A. 2014. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Produksi Biogas Menggunakan Digester Dua Tahap Pada Berbagai Konsentrasi Palm Oil-Mill Effluent Dan Lumpur Aktif. *AGRITECH.* 4(1): 56 – 64.
- Myint, M. T., and Nirmalakhandan, N. 2009. Enhancing Anaerobic Hydrolysis of Cattle Manure In Leachbed Reactors. *Bioresour. Technol.* 100(2009): 1695 – 1699.
- Myint, M., Nirmalakhandan, N., and Speece, R.E. 2007. Anaerobic Fermentation Of Cattle Manure: Modelling of Hydrolysis and Acidogenesis. *Water Research.* (41): 323 – 332.

- Nadais, M. H. G. A. G., Capela, M. I. A. P. F., Arroja, L. M. G. A., dan Hung, Y. T., 2010. *Anaerobic Treatment of Milk Processing Wastewater. Handbook of Environmental Engineering, Volume: Environmental Bioengineering*. Springer Science and Business Media. 555.
- Osuna, M. B., Zandvoort, M. H., Iza, J. M., Lettinga, G., and Lens, P. N. L. 2003. Effects Of Trace Element Addition On Volatile Fatty Acid Conversions In Anaerobic Granular Sludge Reactors. *Environmental Technology*. 24(5): 573 – 587.
- Palma, D., Fuess, L. T., Lima-Model, Ande, Zanella Da Conceição, K., Cereda, M. P., Ferreira Tavares, M. H., and Gomes, S. D. 2018. Using Dolomitic Limestone To Replace Conventional Alkalinization In The Biodigestion Of Rapid Acidification Cassava Processing Wastewater. *J. Clean Prod.* 172: 2942 – 2953.
- Panigrahi, S., Sharma, H. B., and Dubey, B. K. 2020. Anaerobic Co-Digestion Of Food Waste With Pretreated Yard Waste: A Comparative Study Of Methane Production, Kinetic Modeling And Energy Balance. *J. Clean Prod.* 243.
- Ponsa, S., Ivet, F., Felicitas, V., and Xavier, F. 2008. Optimization of The Hydrolytic-Acidogenic Anaerobic Digestion Stage (55 °C) of Sewage Sludge: Influence of pH and Solid Content. *Water Research*. 42: 3972 – 3980.
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., and Pramanik, B. K. 2019. The Anaerobic Digestion Process of Biogas Production From Food Waste: Prospects And Constraints. *Bioresourc. Technol Rep.* 8.
- Prayitno, H. T. 2008. *Pemisahan Padatan Tersuspensi Limbah Cair Tapioka dengan Teknologi Membran Sebagai Upaya Pemanfaatan dan Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. Program Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Diponegoro. Semarang. 8 – 9.
- Putri, A. 2019. *Emisi gas Metana (CH₄) Dari Sedimen dan Tanaman *Rhizopus mucronate* Pada Zona Alami dan Zona Wisata di Kawasan Mangrove Pulau Pari*. Skripsi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah. Jakarta.
- Qyyum, M. A., Haider, J., Qadeer, K., Valentina, V., Khan, A., Yasin, M., Aslam, M., Guido, G. D. E., Pellegrini, L. A., and Lee, M. 2020. Biogas To Liquefied Biomethane: Assessment Of 3P's – Production, Processing, And Prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 119, 109561.
- Rambe, S. M. 2013. *Perancangan Dan Evaluasi Kinerja Reaktor Hidrolisis-Acidogenesis Pada Pembuatan Biogas Dari Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit*. Tesis. Universitas Sumatera Utara. Medan.

- Ratnaningsih, R., Widyatmoko, H., dan Yananto, T. 2009. Potensi Pembentukan Biogas pada Proses Biodegradasi Campuran Sampah Organik Segar dan Kotoran Sapi dalam Batch Reaktor Anaerob. *Jurnal Universitas Trisakti*. 5 (1): 20 – 26.
- Ricci, Marco, Confalonieri, and Alberto, J. 2016. *Technical Guidance on The Operation of Organik Waste Treatment Plants*. International Solid Waste Association (ISWA).
- Rolfe, M. D., Rice C. J., Lucchini, S., Pin, C., Thompson, A., Cameron, A. D., Alston, M., Stringer, M. F., Betts, R. P., Baranyi, J., Peck, M. W. 2012. Lag Phase Is A Distinct Growth Phase That Prepares Bacteria For Exponential Growth And Involves Transient Metal Accumulation. *Journal of Bacteriology*. 194(3): 686 – 701.
- Rusdiyono, A. P., Kirom, M. R., dan Qurthobi, A. 2017. Perancangan Alat Ukur Konsentrasi Gas Metana dari Anaerobic Baffled Reactor (ABR) Semi-Kontinyu dengan Substrat Susu Basi. *E-Proceeding Of Engineering*. 4 (1): 580 – 588.
- Ryue, J., Lin, L., Laqa, F., Elbeshbishy, E., AL-Mamun, A., and Ranjan, B. 2020. A Critical Review of Conventional And Emerging Methods For Improving Process Stability In Thermophilic Anaerobic Digestion. *Energy Sustain & Dev*. 54: 72 – 84.
- Samudro, G., and Mangkoedihardjo, S. 2010. Review On BOD, COD And BOD/COD Ratio: A Triangle Zone For Toxic, Biodegradable And Stable Level. *Int. J. Acad. Res*. 2(2010): 235 – 239.
- Santoso, B. 2010. *Proses Pengolahan Air Buangan Industri Tapioka*. J. Ilm. Teknol. 15(3): 13 – 220.
- Saputra, T., Triatmojo, S., dan Pertiwiningrum, A. 2010. Produksi Biogas Dari Campuran Feses Sapi Dan Ampas Tebu (Bagasse) Dengan Rasio C/N Yang Berbeda. *Buletin Peternakan*. 34(2): 114 – 122.
- Sarono, Hasanudin, U., Widodo, Y. R., Sukaryana, Y., dan Supriyanto. 2017. Produksi Biogas Dari Campuran Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Dan Kotoran Sapi Menggunakan Bioreaktor CSTR. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 23(3): 2444 – 2446.
- Schink, B. 2002. Synergistic interactions in the microbial world. Antonie van Leeuwenhoek. *International Journal of General and Molecular Microbiology*. 81(1–4): 257 – 261.
- Setyawaty, R., Katayama-Hirayama, K., Kaneko, H., and Hirayama, K. 2011. Review of Current Tapioca Starch Wastewater (TSW) Management in Indonesia. *World Applied Sciences Journal*. 14(5): 658 – 665.

- Sriroth, K., Piyachomkwan, K., Wanlapatit, S., and Oates, C.G. 2000. Cassava Starch Technology: The Thai Experience. *Starch-Stärke*. 52 (12): 439 – 449.
- Suksaraj, T. T., Yaeed, S., and Suksaraj, C. 2020. The Effect Of POME Ultrasonication Pretreatment On Biogas Production And Reduction Of Greenhouse Gases Emissions From Wastewater Treatment Units Of Palm Oil Mills. *Desalination and Water Treatment*. 202 (2020): 86 – 94.
- Tassew, F. A., Bergland, W. H., Dinamarca, C., and Bakke, R. 2020. Influences of Temperature And Substrate Particle Content On Granular Sludge Bed Anaerobic Digestion. *Appl Sci*. 10: 136.
- Wati, L., Ahda, Y., dan Handayani, D. 2014. Pengaruh Volume Cairan Rumen Sapi Terhadap Berbagai Feses dalam Menghasilkan Biogas. *Sainstek*. 6 (1): 43 – 51.
- Wintolo, M. dan Isdiyanto, R. 2011. Prospek Pemanfaatan Biogas Dari Pengolahan Air Limbah Industri Tapioka. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbaru*. 10 (2): 103 – 112.
- Zulkarnaen, I. R., Tira, H. S., dan Padang, Y. A. 2018. Pengaruh Rasio Karbon dan Nitrogen (C/N Ratio) Pada Kotoran Sapi Terhadap Produksi Biogas Dari Proses Anaerob. *Dinamika Teknik Mesin*. 1 – 16.