

**PERBEDAAN KONSENTRASI SUBSTRAT TERHADAP PRODUKSI
BIOGAS PADA *ANAEROBIC DIGESTION* AIR LIMBAH REBUSAN
CILOK**

(Skripsi)

Oleh

**MEILANI JUSTICIA PARHUSIP
NPM 2157021013**



**PROGRAM STUDI S1 BIOLOGI
JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**Perbedaan Konsentrasi Substrat terhadap Produksi Biogas pada *Anaerobic
Digestion* Air Limbah Rebusan Cilok**

**Oleh
Meilani Justicia Parhusip**

(Skripsi)

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**PROGRAM STUDI S1 BIOLOGI
JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PERBEDAAN KONSENTRASI SUBSTRAT TERHADAP PRODUKSI BIOGAS PADA *ANAEROBIC DIGESTION* AIR LIMBAH REBUSAN CILOK

Oleh

MEILANI JUSTICIA PARHUSIP

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas proses *anaerobic digestion* dalam mengolah limbah cair rebusan cilok sebagai sumber energi terbarukan, dengan fokus pada pengaruh variasi konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) awal dan penambahan urea sebagai sumber nitrogen. Parameter yang dianalisis meliputi pH, COD, Organic Total Solid (OTS), alkalinitas, Volatile Fatty Acids (VFA), serta produksi dan kualitas biogas. Hasil menunjukkan bahwa reaktor dengan konsentrasi COD awal 7.000 mg/L (reaktor B) memberikan kinerja paling optimal. Reaktor ini mencatat efisiensi penghilangan COD sebesar 94,37%, produksi gas metana tertinggi, kestabilan pH yang baik, serta akumulasi VFA yang rendah dan terkendali. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban organik yang tidak terlalu tinggi memungkinkan sistem fermentasi bekerja secara stabil dan efisien. Sebaliknya, reaktor dengan COD sangat tinggi (56.000 mg/L) mengalami akumulasi VFA berlebihan, penurunan pH, dan rendahnya produksi gas akibat tekanan substrat yang terlalu besar. Reaktor dengan COD sedang (15.000 mg/L) tanpa urea (reaktor C) juga menunjukkan hasil yang baik, meskipun tidak seoptimal reaktor B. Penambahan urea dalam dosis 1–5 gram tidak meningkatkan produksi gas, bahkan menyebabkan penurunan efisiensi akibat kemungkinan toksisitas amonia. Penelitian ini menegaskan bahwa keseimbangan antara beban organik dan nutrisi sangat penting untuk mengoptimalkan produksi biogas. Konsentrasi COD rendah hingga sedang tanpa penambahan nutrisi eksternal terbukti lebih stabil dan efisien dalam menghasilkan biogas.

Kata kunci: Biogas, *Anaerobic Digestion*, Limbah Cilok, COD, Pengenceran, Urea

ABSTRACT

THE EFFECT OF SUBSTRATE CONCENTRATION ON BIOGAS PRODUCTION DURING ANAEROBIC DIGESTION OF CILOK BOILING WASTEWATER

By

MEILANI JUSTICIA PARHUSIP

This study aims to evaluate the effectiveness of the anaerobic digestion process in treating cilok boiling wastewater as a renewable energy source, with a focus on the influence of variations in initial Chemical Oxygen Demand (COD) concentration and the addition of urea as a nitrogen source. The analyzed parameters included pH, COD, Organic Total Solids (OTS), alkalinity, Volatile Fatty Acids (VFA), as well as the production and quality of biogas. The results showed that the reactor with an initial COD concentration of 7,000 mg/L (Reactor B) achieved the most optimal performance. This reactor recorded a COD removal efficiency of 94.37%, the highest methane production, stable pH conditions, and low, well-controlled VFA accumulation. These conditions indicate that a moderate organic load allows the fermentation system to operate in a stable and efficient manner. In contrast, the reactor with a very high COD concentration (56,000 mg/L) experienced excessive VFA accumulation, a decline in pH, and reduced gas production due to excessive substrate loading. The reactor with a medium COD concentration (15,000 mg/L) without urea addition (Reactor C) also showed good results, although not as optimal as Reactor B. The addition of urea in doses of 1–5 grams did not improve gas production and even reduced efficiency, likely due to ammonia toxicity. This study highlights that the balance between organic loading and nutrient availability is crucial to optimizing biogas production. Low to moderate COD concentrations without external nutrient supplementation proved to be more stable and efficient in generating biogas.

Keywords: Biogas, Anaerobic Digestion, Cilok Wastewater, COD, Dilution,

Urea

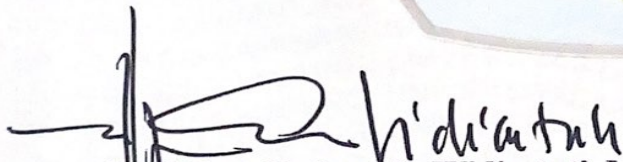
HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Perbedaan Konsentrasi Substrat Terhadap
Produksi Biogas pada *Anaerobic Digestion* Air
Limbah Rebusan Cilok
Nama Mahasiswa : **Meilani Justicia Parhusip**
NPM : 2157021013
Jurusan/Program Studi : Biologi/S1-Biologi
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

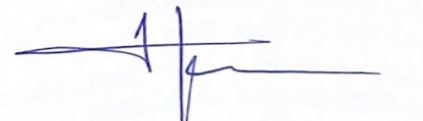
1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1



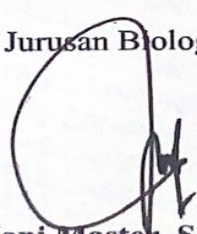
Prof. Dra. Endang L. Widiastuti, M.Sc. Ph.D.
NIP. 196106111986032001

Pembimbing 2



Dr. Arini Wresta M.Eng
NIP. 197908092005022001

2. Ketua Jurusan Biologi FMIPA UNILA

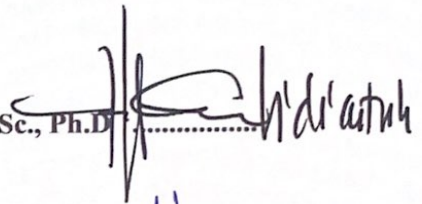


Dr. Jani Master, S.Si., M.Si.
NIP. 198301312008121001

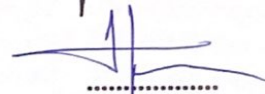
MENGESAHKAN

1. Tim Penguj

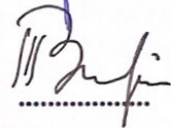
Ketua Penguji : Prof. Dra. Endang L. Widiastusti, M.Sc., Ph.D.



Anggota Penguji : Dr. Arini Wresta, M.Eng.



Penguji Utama : Prof. Dr. Bambang Irawan, M.Sc.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 26 Agustus 2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Meilani Justicia Parhusip

NPM : 2157021013

Jurusan : Biologi

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

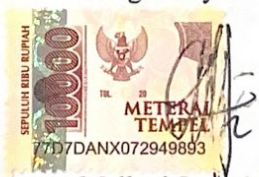
Menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul:

“Perbedaan Konsentrasi Substrat terhadap Produksi Biogas pada
Anaerobic Digestion Air Limbah Rebusan Cilok”

Baik data, hasil analisis, dan kajian ilmiah adalah benar hasil karya yang saya susun sendiri dengan berpedoman pada etika akademik dan penulisan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sadar dan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung,

Yang Menyatakan,



Meilani Justicia Parhusip

NPM. 2157021013

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Meilani Justicia Parhusip, dilahirkan di Sumberjaya pada tanggal 11 Mei 2003. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak M. Nainggolan dan Ibu Lely Sastrawati dengan 2 saudara kandung. Penulis mulai menempuh pendidikan di Taman Kanak-Kanak (TK) RA YAPSI Sukapura pada tahun 2008-2009,

dilanjutkan ke jenjang Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Sukapura pada tahun 2009-2015. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Sumberjaya pada tahun 2015-2018 dan menempuh jenjang yang lebih tinggi di Sekolah Menengah Atas (SMA) 1 Sumberjaya pada tahun 2018- 2021. Setelah lulus, pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat Indonesia (SMMPTN Barat).

Selama melanjutkan pendidikan akademik di jurusan Biologi, penulis telah melaksanakan program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) KST Samaun Samadikun Bandung pada tahun 2023-2024 di semester 5 dan melanjutkan program tersebut di semester 7 pada tahun 2024-2025. Penulis juga telah melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) KST Samaun Samadikun Bandung pada tahun 2023-2024 dengan judul

“Pengolahan Limbah Popok Bayi Sekali Pakai Melalui Proses Hidrothermal Menjadi Biogas”. Penulis juga telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di desa Sindang Anom, Kecamatan Sekampung Udik, Kabupaten Lampung Timur pada Juni-Agustus tahun 2024. Selain kegiatan akademik, penulis juga menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Biologi (HIMBIO) bidang KALOG periode 2021. Penulis menyusun skripsi pada bulan Juni 2025- Agustus 2025 dengan judul “Perbedaan Konsentrasi Substrat terhadap Produksi Biogas pada Anaerobic Digestion Air Limbah Rebusan Cilok”.

MOTTO

“Just because your journey takes longer, it doesn’t mean you have failed”

“Dan bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya”
(QS: An-Najm[53]: 39)

“And it’s fine to fake it till you make it, till you do, till it’s true”

-Taylor Swift-

*“Melamban bukanlah hal yang tabu, kadang itu yang kau butuh bersandar
hibahkan bebanmu. Tak perlu kau berhenti kurasi, ini hanya sementara bukan
ujung dari rencana”*

-Perunggu-

PERSEMBAHAN

Karya ini dipersembahkan untuk Papa dan Mama tercinta, sumber doa dan cinta tanpa tepi, yang menjadi cahaya abadi penuntun setiap langkahku. Juga untuk kedua adik perempuanku tersayang yang menjadi teman dalam riuh dan penguat dalam harapan.

Untuk Kakek Nenekku, Papaom dan Mamaom yang telah berpulang, terima kasih telah menjadi jejak doa dan cinta dalam setiap perjalanan batinku.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul **“Perbedaan Konsentrasi Substrat Terhadap Produksi Biogas pada Anaerobic Digestion Air Limbah Rebusan Cilok”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak, naskah ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Jani Master, S. Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Kusuma Handayani, M.Si. selaku Kepala Program Studi S1 Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
4. Ibu Dr. Sri Wahyuningsih S. Si., M. Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberi arahan dan masukan.

5. Ibu Prof. Dra. Endang Linirin Widiastuti M. Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang sabar memberikan arahan, bimbingan, dan nasihat kepada penulis selama menyusun dan menyelesaikan skripsi.
6. Ibu Dr. Arini Wresta, M. Eng. selaku Pembimbing II yang telah memberikan banyak ilmu, arahan dan membimbing penulis dengan penuh kesabaran dalam menyelesaikan skripsi.
7. Bapak Prof. Dr. Bambang Irawan, M.Sc. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan, kritik, serta saran yang sangat berharga demi penyempurnaan skripsi ini.
8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Mangasi Nainggolan dan Ibu Lely Sastrawati atas doa, dukungan, kasih sayang, dan pengorbanan yang telah diberikan sepanjang hidup penulis. Segala jerih payah dan cinta kasih beliau menjadi sumber kekuatan terbesar dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Kedua adikku tersayang, Azzahra Anjalika Parhusip dan Cheryl Hasiholan Parhusip yang selalu menemani, mendengarkan dan memberikan kebahagiaan serta kehangatan kepada penulis.
10. Seluruh keluarga besar yang tidak bisa disebutkan satu-persatu yang juga selalu memberikan motivasi, dukungan dan doa kepada penulis.
11. Sahabat terbaik sejak awal perkuliahan, Natasya, Shira, Alya, Malika dan Caca yang senantiasa menemani dalam suka dan duka, mendengarkan setiap keluh kesah, bersedia diajak berbagi cerita maupun sekadar berjalan-jalan melepas penat yang membuat perjalanan ini jauh lebih bermakna.
12. Sahabat-sahabat di rumah yang telah bersama sejak masa sekolah, Anti, Dinda, Eci, Egy, Wiwit, Hani atas dukungan, doa, serta persahabatan yang tulus hingga saat ini, yang telah menjadi sumber kekuatan dan semangat dalam menyelesaikan studi.
13. Teman-teman Laboratorium Kimia 2 BRIN Cisit, Kak Rizqy, Christin, Faza, Ganen, Palma, Rajen, Roy, Pak Oman dan Pak Syam yang telah banyak membantu, berbagi ilmu, serta mendukung selama proses penelitian berlangsung.

14. Bandung, kota yang selalu hangat dan penuh inspirasi yang di setiap sudutnya tersimpan kenangan indah yang akan selalu penulis ingat sepanjang perjalanan hidup.
15. Serial *Gossip Girl* dan Podcast Keluarga Artis yang selalu setia menemani saat lelah, memberikan hiburan, tawa, sekaligus pengalih penat di sela-sela proses penyusunan skripsi ini.
16. Lagu lagu-lagu yang menjadi teman setia dalam perjalanan ini: *Pulang* dari Float yang selalu menyalakan rindu akan rumah, *Standing Tall* dari Adhitia Sofyan yang menguatkan untuk tetap tegak, *Mirrorball* dan *You're On Your Own, Kid* dari Taylor Swift yang menjadi cermin perjalanan diri, *Mungkin Takut Perubahan* dari Lomba Sihir yang mengajarkan keberanian menghadapi ketidakpastian, serta *Pastikan Rih Akhiri Malammu* dari Perunggu yang selalu menghadirkan semangat di ujung hari. Dalam lantunan mereka, kutemukan jeda, ketenangan, dan keberanian untuk melangkah.
17. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar lampung, 18 Agustus 2025
Penulis

Meilani Justicia Parhusip

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Kerangka Penelitian.....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Limbah Cair Rebusan Cilok.....	10
2.2 <i>Anaerobic Digestion</i>	14
2.3 Pengenceran	17
2.4 Parameter Pembentukan Biogas	19
2.4.1 Produksi Biogas (CH ₄)	19
2.4.2 Total Solid (TS) dan Organic Total Solid (OTS)	19
2.4.3 Chemical Oxygen Demand (COD)	20
2.4.4 Volatile Fatty Acid (VFA)	20
2.4.5 pH Alkalinitas	21
III. METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	23
3.2 Alat dan Bahan	23
3.2.1 Peralatan Pembuatan Biogas	23
3.2.2 Peralatan Analisis	24

3.2.3	Bahan Baku Pembuatan Biogas	23
3.2.4	Bahan Analisis	25
3.3	Prosedur Penelitian	25
3.3.1	Penyiapan Reaktor dan Proses Produksi Biogas	27
3.3.2	Perlakuan Pengenceran Sampel Bahan Baku	27
3.3.3	Pengamatan	28
3.3.1.1	Pengukuran Produksi Biogas dan Kadar CH ₄ dari Proses <i>Anaerobic</i>	28
3.3.1.2	Analisis Total Solid (TS) dan Organic Total Solid (OTS)	29
3.3.1.3	Analisis Chemical Oxygen Demand (COD)	30
3.3.1.4	Analisis Alkalinitas dan pH	30
3.3.1.5	Analisis Volatile Fatty Acid (VFA)	31
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
2.1	Pengaruh Konsentrasi COD Awal Substrat	32
2.2	Pengaruh Penambahan Urea pada Digester COD 15000 mg/L	51
IV.	KESIMPULAN	72
2.1	Kesimpulan	72
2.2	Saran	73
	DAFTAR PUSTAKA	74
	LAMPIRAN	81

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Hasil Analisis Laboratorium Limbah Cair Rebusan Cilok PT. Karya Baru Kita Cilokku	11
Tabel 2. Komposisi Reaktor pada Berbagai Konsentrasi COD Limbah Cilok	26
Tabel 3. Perhitungan Larutan Standar	87
Tabel 4. Contoh Uji dan Larutan Perekasi untuk Berbagai macam <i>Digestion</i> <i>Vessel</i>	87
Tabel 5. Dokumentasi Kegiatan Penelitian	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema Kerangka Pikir Penelitian	9
Gambar 2. Reaktor	24
Gambar 3. Penyerapan CO ₂ di dalam biogas menggunakan larutan NaOH	28
Gambar 4. Perolehan CH ₄ mL/gr OTS Substrat	34
Gambar 5. Perolehan CH ₄ mL/gr COD Substrat	34
Gambar 6. Hasil Analisis <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD) pada <i>Anaerobic Digester</i>	39
Gambar 7. Hasil Analisis <i>Organic Total Solid</i> (OTS) pada <i>Anaerobic Digester</i>	42
Gambar 8. Hasil Analisis <i>pH</i> pada <i>Anaerobic Digester</i>	45
Gambar 9. Hasil Analisis <i>Alkalinitas</i> pada <i>Anaerobic Digester</i>	47
Gambar 10. Hasil Analisis <i>Volatile Fatty Acid</i> (VFA) pada <i>Anaerobic Digester</i>	49
Gambar 11. Perolehan CH ₄ mL/gr OTS Substrat	52
Gambar 12. Perolehan CH ₄ mL/gr COD Substrat	52
Gambar 13. Hasil Analisis <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD) pada <i>Anaerobic Digester</i>	54
Gambar 14. Hasil Analisis <i>Organic Total Solid</i> (OTS) pada <i>Anaerobic Digester</i>	56
Gambar 15. Hasil Analisis <i>pH</i> pada <i>Anaerobic Digester</i>	58
Gambar 16. Hasil Analisis <i>Alkalinitas</i> pada <i>Anaerobic Digester</i>	60
Gambar 17. Hasil Analisis <i>Volatile Fatty Acid</i> (VFA) pada <i>Anaerobic Digester</i>	62

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan mengenai limbah merupakan permasalahan global yang bisa terjadi dimana saja. Permasalahan yang sering terjadi ini disebabkan oleh berbagai faktor seperti keterbatasan lahan, volume limbah yang semakin banyak, proses pengolahan yang kurang maksimal dan manajemen pengolahan yang kurang baik. Disamping itu, kurangnya dukungan pemerintah terhadap penanganan limbah yang baik juga menyebabkan permasalahan limbah terus terjadi (Rizqi, 2017).

Salah satu permasalahan limbah yang saat ini dihadapi adalah limbah industri pembuatan makanan ringan olahan. Makanan ringan olahan saat ini kian beraneka ragam, salah satunya adalah cilok. Cilok merupakan salah satu makanan tradisional Indonesia yang disukai banyak orang. Olahan panganan ini terbuat dari campuran tepung dan daging ayam atau sapi yang sudah diolah untuk dijadikan isian cilok, kemudian direbus hingga matang (Misnati, 2021). Namun, dalam proses produksinya, terutama pada tahap perebusan, dihasilkan limbah cair yang jumlahnya cukup banyak.

Industri cilok menghasilkan limbah cair yang berasal dari sisa proses perebusan. Limbah cair sisa rebusan cilok dimungkinkan mengandung banyak senyawa organik dari pelarutan bahan selama perebusan. Beberapa komponen terlarut yang dimungkinkan terkandung di dalam air rebusan cilok yaitu karbohidrat, lemak, protein dan beberapa mineral. Mayoritas

pelaku usaha pembuatan cilok tidak memanfaatkan limbah air rebusan tersebut dan membuangnya ke lingkungan (Cahyani, 2020).

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh industri cilok, diperoleh data nilai COD mencapai 29.167 mg/L, BOD 4.646 mg/L, TDS 9.490 mg/L, TSS 3.610 mg/L dan pH 3,52. Hal ini tidak sesuai dengan standar baku mutu air limbah yang dikeluarkan oleh Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup No 5 Tahun 2014 yaitu nilai COD 100-300 mg/L, BOD 50-150 mg/L, TDS 2000-4000 mg/L, TSS 200-400 mg/L, dan pH 6,0-9,0. Berdasarkan hasil uji tersebut, nilai COD yang tinggi menunjukkan banyaknya zat organik dalam limbah yang mudah terurai. Jika dibuang ke badan air, hal ini dapat mengurangi oksigen terlarut (DO). Jika kadar oksigen terlarut (DO) dalam air berkurang dapat menciptakan zona mati, yaitu area di mana kehidupan akuatik tidak bisa bertahan. Selain itu, mikroorganisme yang tidak membutuhkan oksigen akan berkembang, diantaranya akan menghasilkan gas beracun seperti hidrogen sulfida dan metana. Limbah organik yang tinggi juga dapat memicu pertumbuhan alga berlebih, yang semakin mengurangi oksigen. Akibatnya, kualitas air memburuk dan tidak lagi baik untuk kehidupan atau penggunaan manusia. *Total Dissolved Solid* (TDS) menunjukkan adanya mineral berlebih yang dapat mengganggu kualitas air dan mengganggu kesehatan jika dikonsumsi. pH yang terlalu asam mempercepat kelarutan logam berat dan berisiko meracuni organisme akuatik (Oman, 2021).

Salah satu cara untuk mengolah limbah dengan kandungan bahan organik yang tinggi adalah dengan *anaerobic digestion* (proses anaerobik). Proses ini melibatkan dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerobik, menghasilkan biogas dan digestat. Beberapa keuntungan yang diperoleh melalui pengolahan limbah cair secara anaerobik, diantaranya adalah berkurangnya beban polutan organik dalam limbah cair, dihasilkannya biogas yang dapat digunakan sebagai bahan

bakar, dan digestat yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik (Fakhrullah, 2020).

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan biogas menggunakan substrat limbah rebusan cilok. Substrat adalah bahan baku atau sumber utama senyawa organik yang digunakan sebagai media pertumbuhan dan sumber energi bagi mikroorganisme dalam suatu proses biologis, termasuk proses *anaerobic digestion*. Dalam konteks produksi biogas, substrat berperan sebagai *feedstock* yang akan didegradasi oleh komunitas mikroba melalui serangkaian tahapan, mulai dari hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, hingga metanogenesis, untuk menghasilkan biogas yang kaya metana (CH_4). Kualitas substrat—termasuk kandungan bahan organik, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), kadar padatan, pH awal, dan kandungan nutrisi—sangat menentukan kestabilan proses fermentasi dan efisiensi konversi menjadi biogas. Pada penelitian ini, substrat yang digunakan adalah limbah cair hasil rebusan cilok yang dihasilkan dari proses perebusan pada industri cilok. Limbah ini memiliki kandungan organik tinggi, terdiri dari karbohidrat, protein, lemak, dan mineral yang larut selama perebusan. Secara fisik, limbah rebusan cilok berwarna putih kekuningan, keruh, dan berbau kurang sedap akibat adanya partikel pati dan senyawa organik terlarut. Analisis laboratorium menunjukkan bahwa limbah ini memiliki nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dan OTS (*Organic Total Solid*) yang tinggi serta pH cenderung asam, menandakan potensinya sebagai bahan baku yang baik untuk pembuatan biogas. Dalam proses ini, substrat limbah rebusan cilok menjadi sumber energi bagi mikroorganisme anaerob, sekaligus menjadi media reaksi di mana senyawa organik diubah menjadi gas metana dan karbon dioksida, serta residu padat/cair yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik (Soeroso, 2016).

Sedangkan untuk *starter* yang digunakan yaitu effluent *digester* kotoran sapi. Effluent adalah cairan sisa yang keluar dari suatu proses pengolahan,

baik dari instalasi pengolahan limbah (*wastewater treatment plant*), reaktor biogas, maupun proses industri lainnya. Dalam konteks *anaerobic digestion*, effluent merupakan hasil keluaran berupa cairan atau lumpur yang sudah mengalami proses degradasi bahan organik oleh mikroorganisme. Effluent umumnya masih mengandung padatan tersuspensi, senyawa organik dalam jumlah tertentu, nutrisi seperti nitrogen dan fosfor, serta mikroorganisme hidup yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai *inokulum* atau sumber bakteri aktif untuk proses fermentasi berikutnya. Pada penelitian ini, effluent *digester* aktif yang digunakan berasal dari instalasi biogas berbahan baku kotoran sapi. Effluent ini berfungsi sebagai *starter* atau inokulum karena mengandung komunitas mikroba anaerob lengkap, mulai dari bakteri hidrolitik, asidogenik, asetonogenik, hingga metanogenik. Mikroorganisme tersebut berperan penting dalam mempercepat proses degradasi bahan organik pada substrat limbah rebusan cilok sehingga memperpendek waktu adaptasi (*lag phase*) dan meningkatkan efisiensi pembentukan biogas. Selain sebagai sumber mikroba, effluent juga membantu menyeimbangkan parameter kimia reaktor, seperti rasio C/N, pH, dan alkalinitas, yang sangat berpengaruh terhadap kestabilan proses fermentasi (Weda, 2017).

Pada aplikasi pembuatan biogas, diperlukan konsentrasi senyawa organik di dalam substrat (konsentrasi COD) yang sesuai sehingga mikroorganisme-mikroorganisme anaerobik dapat tumbuh dengan baik. Konsentrasi substrat yang akan digunakan pada proses anaerobik perlu diperhitungkan dengan teliti. Dalam pembuatan biogas menggunakan *starter* dari effluent *digester* kotoran sapi dan substrat limbah rebusan cilok, penting untuk menjaga konsentrasi substrat pada tingkat optimal. Jika konsentrasi substrat terlalu tinggi, lapisan substrat yang padat dapat menghambat pergerakan mikroba anaerobik, sehingga menurunkan efisiensi fermentasi. Degradasi substrat yang berlebihan juga dapat menghasilkan asam dalam jumlah tinggi, menurunkan pH secara signifikan, dan mengganggu aktivitas mikroba metanogenik. Mikroba

metanogen ini tumbuh optimal pada pH netral, sehingga kondisi pH yang rendah dapat mengurangi keseimbangan mikroba di dalam reaktor, menurunkan produksi metana, dan meningkatkan CO₂ serta gas lain. Selain itu, substrat yang mengendap dapat menghambat pencampuran, mengurangi volume efektif *digester*, dan menurunkan hasil biogas. Sebaliknya, jika konsentrasi substrat terlalu rendah, konsentrasi nutrisi yang diperlukan oleh mikroba akan menurun, pH substrat dapat berubah, dan karakteristik fisiknya menjadi kurang mendukung fermentasi. Untuk substrat dengan konsentrasi COD yang terlalu tinggi, pengenceran diperlukan agar konsentrasi substrat sesuai dan proses fermentasi dapat berjalan optimal (Arief, 2019).

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengenceran dapat mempengaruhi laju produksi biogas, komposisi gas yang dihasilkan, dan efisiensi konversi bahan organik menjadi biogas. Pengenceran yang moderat cenderung meningkatkan laju reaksi biokimia, tetapi jika terlalu encer, dapat mengurangi hasil biogas karena kekurangan bahan organik yang dapat terfermentasi (Soeroso, 2016).

Dalam penelitian ini, dilakukan beberapa analisis yang dijadikan sebagai parameter proses untuk mengevaluasi kinerja pembentukan biogas. Parameter-parameter tersebut antara lain COD (*Chemical Oxygen Demand*), OTS (*Organic Total Solid*), VFA (*Volatile Fatty Acid*), alkalinitas dan pH. Dalam proses *anaerobic digestion* untuk produksi biogas, analisis analisis tersebut berfungsi untuk mengobservasi baik tidaknya kondisi di dalam *digester*. COD (*Chemical Oxygen Deman*) mengukur jumlah bahan organik yang dapat diuraikan, berperan dalam menentukan potensi produksi biogas. TS (*Total Solid*) dan OTS (*Organic Total Solid*) menunjukkan jumlah padatan total dan bahan organik yang tersedia untuk dekomposisi. VFA (*Volatile Fatty Acids*) penting untuk mengukur asam volatil yang dihasilkan. VFA dalam jumlah berlebih dapat mengganggu keseimbangan pH dan mengganggu mikroba metanogen.

Alkalinitas berfungsi sebagai penyangga untuk menjaga stabilitas pH. Nilai pH pada *digester* biogas idealnya berada pada kisaran netral agar bakteri metanogenik dapat tumbuh dengan baik.

Penelitian mengenai pengaruh perbedaan konsentrasi substrat dalam proses anaerobik perlu dilakukan untuk mendapatkan kisaran konsentrasi COD yang baik, sehingga dapat meningkatkan produksi biogas. Pengenceran merupakan salah satu strategi untuk mengetahui permasalahan pada pembuatan biogas dari air limbah rebusan cilok, tetapi pada aplikasinya perlu dipertimbangkan kelayakan ekonominya. Penelitian ini merupakan penelitian dasar sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan pencemaran yang dihasilkan dari air limbah rebusan cilok. Pengolahan limbah cair rebusan cilok melalui proses anaerobik diharapkan dapat memberikan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah limbah pada industri cilok. Dengan penerapan teknologi ini, diharapkan industri cilok dapat mengatasi permasalahan limbahnya, berkontribusi pada pelestarian lingkungan, dan sekaligus mendapatkan manfaat ekonomi dari biogas yang dihasilkan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi COD (*Chemical Oxygen Demand*) pada limbah cair rebusan cilok terhadap kinerja proses *anaerobic digestion*, dengan mempertimbangkan perubahan pH, akumulasi VFA (*Volatile Fatty Acids*), dan pengaruhnya terhadap tahap metanogenesis.
2. Menentukan konsentrasi COD yang paling optimal dalam menghasilkan produksi metana tertinggi dan paling efisien, baik berdasarkan perolehan gas per gram COD (*Chemical Oxygen Demand*) maupun per gram OTS (*Organic Total Solid*), disertai pemantauan kestabilan pH dan VFA.

3. Mengkaji pengaruh penambahan urea pada berbagai dosis terhadap proses *anaerobic digestion* pada substrat berkadar COD sedang, termasuk identifikasi potensi gangguan mikrobiologis yang ditandai oleh akumulasi amonia dan VFA.
4. Membandingkan efisiensi dan kestabilan proses produksi biogas antara substrat dengan penambahan urea dan substrat tanpa penambahan urea, untuk menilai efektivitas suplementasi nutrisi pada kondisi COD sedang.
5. Mengidentifikasi faktor-faktor teknis, seperti kemungkinan terjadinya kebocoran sistem, yang dapat memengaruhi pola produksi metana meskipun parameter proses menunjukkan kestabilan.

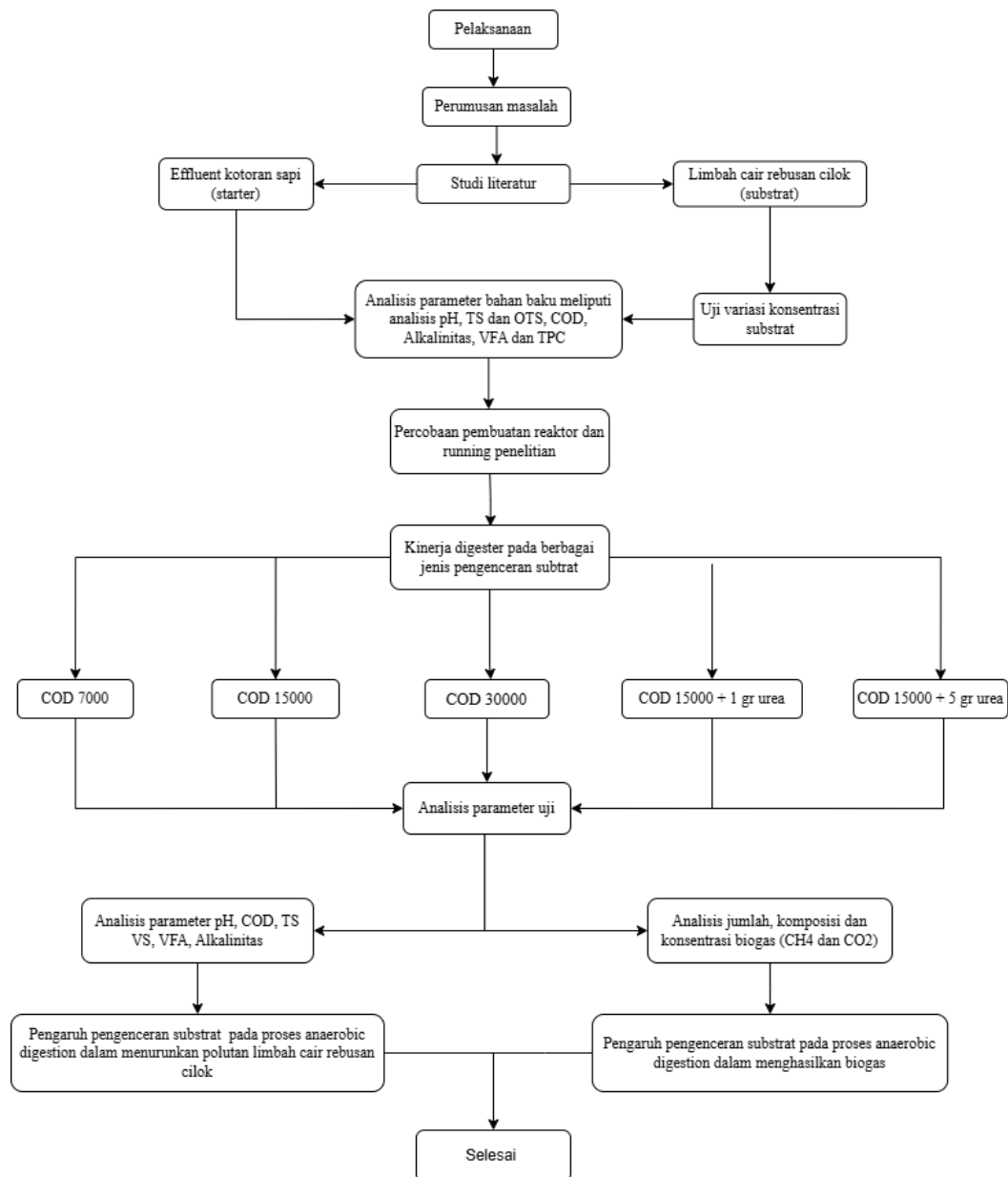
1.3 Kerangka Penelitian

Permasalahan limbah cair dari industri makanan, khususnya limbah rebusan cilok, menjadi salah satu isu lingkungan yang penting untuk diselesaikan. Limbah cair ini mengandung bahan organik tinggi seperti karbohidrat, protein, dan lemak, yang menghasilkan nilai COD, BOD, dan TSS jauh di atas baku mutu lingkungan. Jika tidak diolah dengan baik, limbah ini berpotensi mencemari perairan, menurunkan kualitas ekosistem, serta menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan sekitar. Oleh karena itu, diperlukan solusi pengolahan limbah yang efektif, efisien, dan berkelanjutan.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah teknologi *anaerobic digestion*, yaitu proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini memiliki dua keuntungan utama: menghasilkan biogas yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan, serta digestat yang bermanfaat sebagai pupuk organik. Namun, efisiensi proses *anaerobic digestion* dipengaruhi oleh berbagai parameter, salah satunya adalah konsentrasi substrat yang diukur berdasarkan nilai konsentrasi COD. Konsentrasi COD yang terlalu tinggi

dapat menyebabkan akumulasi asam dalam reaktor, menurunkan pH, dan menghambat aktivitas mikroorganisme anaerobik. Sebaliknya, konsentrasi COD yang terlalu rendah mengurangi ketersediaan bahan organik yang dapat diurai, sehingga menurunkan efisiensi produksi biogas. Untuk itu, pengenceran substrat digunakan sebagai strategi pengaturan konsentrasi COD agar sesuai dengan kebutuhan mikroorganisme. Pengenceran substrat ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi fermentasi anaerobik, menjaga keseimbangan parameter proses seperti pH, alkalinitas, dan *Volatile Fatty Acid* (VFA), serta menghasilkan produksi biogas yang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi COD limbah rebusan cilok terhadap parameter-parameter penting dalam proses produksi biogas, seperti pH, *Total solid* (TS), *Organic Total Solid* (OTS), alkalinitas, dan VFA. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan kisaran konsentrasi COD yang optimal untuk mendukung fermentasi anaerobik yang stabil. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi pengelolaan limbah cair rebusan cilok yang tidak hanya efektif dalam mengurangi dampak pencemaran lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui produksi energi terbarukan. Dengan demikian, teknologi ini dapat menjadi langkah inovatif dan berkelanjutan bagi pengelolaan limbah di industri makanan Indonesia.

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



Gambar 1. Skema kerangka pikir penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Cair Rebusan Cilok

Cilok dikenal sebagai salah satu cemilan tradisional yang populer di kalangan masyarakat Indonesia. Jenis makanan ringan ini berasal dari Bandung, Jawa Barat. Cilok terbuat dari tepung tapioka dengan tekstur yang kenyal dan rasa yang gurih. Proses pembuatan cilok diawali dengan menyiapkan bahan-bahan adonan, yang terdiri dari tepung tapioka, tepung terigu, bawang putih halus, garam, merica, kaldu bubuk, dan air panas. Untuk isian, daging cincang ditumis bersama bawang putih, garam, merica, kecap manis, dan daun bawang hingga matang dan kering, kemudian dibiarkan hingga dingin. Selanjutnya, adonan dicampur hingga mencapai tekstur yang kalis. Adonan yang telah kalis kemudian dipipihkan, diisi dengan daging cincang, dan dibentuk menjadi bulatan. Setelah seluruh cilok selesai dibentuk, cilok direbus dalam air mendidih hingga mengapung, yang menandakan bahwa cilok telah matang. Proses perebusan cilok membutuhkan waktu yang relatif lama dengan suhu yang tinggi, mengakibatkan unsur nutrisi pada cilok larut dalam air yang digunakan untuk merebus. Proses perebusan cilok menghasilkan limbah air sisa perebusan (Yuliasuti, 2021), dengan kandungan bahan organik yang tinggi.

Untuk mengetahui kualitas limbah cair rebusan cilok, dilakukan analisis laboratorium terhadap beberapa parameter fisika dan kimia limbah. Parameter fisika yang dianalisis meliputi zat padat terlarut dan tersuspensi, sedangkan parameter kimia mencakup pH, BOD, COD, dan amonia. Hasil analisis dibandingkan dengan baku mutu yang diatur dalam standar nasional

untuk limbah cair. Rincian hasil analisis tersebut disajikan pada **tabel 1** berikut.

Tabel 1. Hasil Analisis Laboratorium Limbah Cair Rebusan Cilok PT. Karya Baru Kita Cilokku

No	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu **)		Metode
				I	II	
	Fisika					
1	Zat Padat Terlarut	mg/L	9490	2000	4000	SNI 06-6989.27-2019 *)
2	Zat Padat Tersuspensi	mg/L	3610	200	400	SNI 06-6989.03-2019*)
	Kimia					
3	pH	-	3,52	6,0-9,0	6,0-9,0	SNI 06-6989.11-2019*)
4	BOD	mg/L	4636	50	150	SNI 06-6989.72-2019
5	COD	mg/L	29167	100	300	SNI 06-6989.73-2009*)
6	Amonia	mg/L	<0,07	5	10	SNI 06-6989.10-2011*)

Air limbah industri cilok masih banyak mengandung bahan organik dengan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dapat mencapai 29.167 mg/L, sedangkan kadar BOD (*Biological Oxygen Demand*) sebesar 4.636 mg/L. Bila mengacu pada Permen LH No 5 (2014) tentang baku mutu air limbah, karakteristik limbah cair cilok sudah melebihi baku mutu diperbolehkan, sehingga untuk menurunkan kadar bahan organik tersebut limbah cair cilok perlu diproses terlebih dahulu (Hariyanto, 2016).

Karakteristik limbah cair industri cilok yaitu berwarna putih kekuning-kuningan. Limbah industri cilok juga menimbulkan bau yang tidak sedap dan keruh. Kekeruhan ini terjadi karena zat organik terlarut yang sudah terpecah atau zat-zat tersuspensi dari pati, sehingga air limbah berubah menjadi emulsi keruh. Jumlah zat organik yang terlarut dalam limbah cair cilok dapat diketahui dengan melihat nilai SCOD (*Soluble Chemical Oxygen Demand*). COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang terdapat dalam limbah cair dengan

memanfaatkan oksidator kalium dikromat sebagai sumber oksigen. Angka COD merupakan ukuran bagi pencemaran air oleh zat organik yang secara alamiah dapat dioksidasi melalui proses biologis dan dapat menyebabkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air. Tingkat keasaman (pH) limbah cair cilok dipengaruhi oleh kegiatan mikroba dalam pemecahan bahan organik. Air buangan cenderung asam, dan pada keadaan asam ini terlepas zat-zat yang mudah menjadi gas (Andareswari, 2019).

Pemanfaatan limbah cair dari industri cilok menjadi biogas akan mengurangi pencemaran lingkungan, terutama pada air dan tanah. Limbah cair dengan kandungan bahan organik tinggi yang tidak dikelola dengan baik berpotensi mencemari sumber air, menyebabkan bau tak sedap, dan merusak ekosistem sekitarnya. Dengan mengolahnya menjadi biogas, limbah ini dimanfaatkan untuk menghasilkan energi alternatif yang ramah lingkungan. Hal ini juga akan mengurangi emisi gas metana ke atmosfer, yang merupakan salah satu gas rumah kaca, sehingga berkontribusi dalam mengurangi pemanasan global (Wintolo, 2015).

Pemilihan bahan biogas dapat ditentukan dari perbandingan kadar C (karbon) dan N (nitrogen) dalam bahan tersebut. Rasio antara jumlah karbon (C) dan nitrogen (N) dalam suatu zat dinyatakan sebagai karbon nitrogen (C/N). Hubungan yang seimbang antara makronutrien dan mikronutrien sangat penting untuk menjaga pengendalian proses. Karbon dan nitrogen merupakan nutrisi yang paling dibutuhkan dan dibutuhkan untuk membuat enzim yang melakukan metabolisme. Oleh karena itu, rasio C/N substrat sangat penting. Jika rasio C/N terlalu tinggi (terlalu banyak C dan terlalu banyak N), maka pencernaan tidak akan mencukupi, artinya sebagian karbon dalam substrat tidak terkonversi secara sempurna sehingga hasil metana tidak tercapai. Namun, kelebihan nitrogen menyebabkan pembentukan amonia (NH_3) dalam jumlah besar, bahkan pada konsentrasi rendah yang menghambat pertumbuhan bakteri dan, dalam kasus terburuk, menyebabkan kerusakan seluruh populasi

mikroorganisme. Oleh karena itu, agar proses dapat berjalan tanpa gangguan, rasio C/N harus diatur pada kisaran 10-30:1 (Ridlo, 2017).

Bahan organik yang sesuai untuk menjadi bahan baku produksi biogas adalah bahan organik dengan C/N rasio 8-25, sehingga limbah peternakan sapi berpotensi untuk dikomposkan secara anaerob untuk menghasilkan gas metan (Pedrawati, 2010). Perbandingan C dan N dalam bahan biogas merupakan faktor penting untuk berkembangnya bakteri yang akan menguraikan bahan organik tersebut. Pada perbandingan C/N kurang dari 8, dapat menghalangi aktivitas bakteri akibat kadar amonia yang berlebihan (Werner, 1989). Pada perbandingan C/N lebih dari 43 mengakibatkan kerja bakteri juga terhambat (Dennis, 2001). Untuk mendapatkan produksi biogas yang tinggi, maka penambahan bahan yang mengandung N (misalnya urea) perlu dilakukan untuk mencapai rasio C/N 20-30 optimum pada proses anaerob (Demuynck *et al.*, 1984). Dengan penambahan kandungan nitrogen maka dapat mengefisiensikan waktu produksi biogas. Penambahan urea juga mampu mempermudah dalam peruraian karena sifatnya yang mudah larut dalam air dan bersifat higroskopis (Yanuartono, *et al.*, 2018). Pupuk urea memiliki kandungan nitrogen sebesar 45-56%. (Fajrin, 2016). Fungsi urea pada proses pembuatan fermentasi adalah sebagai pensuplai NH_3 , ini digunakan sebagai sumber nitrogen bagi mikrobia dalam proses fermentasi. Penambahan urea pada bahan baku pembuatan biogas dari limbah rebusan cilok ini dilakukan karena pada limbah air rebusan cilok nitrogen yang tersedia hanya dalam jumlah sedikit dikarenakan protein yang terdapat didalam bahan isian cilok tidak dalam jumlah banyak tidak seperti tepung tapioka sebagai bahan baku utama pembuatan cilok itu sendiri. Oleh karena itu diperlukan urea sebagai penambah nutrisi dalam proses fermentasi.

2.2 *Anaerobic Digestion*

Sebagian besar masyarakat di Indonesia masih menggunakan energi tidak terbarukan sebagai sumber energi untuk kebutuhan sehari-hari.

Pemanfaatan sumber energi ini memiliki dampak terhadap perubahan iklim, kerusakan lingkungan dan polusi udara (Yasmin, 2019).

Penggunaan energi fosil atau tidak terbarukan ini meningkatkan emisi gas rumah kaca di atmosfer.

Energi fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam, menyebabkan efek rumah kaca karena proses pembakarannya menghasilkan gas-gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan nitrogen oksida (N_2O). Gas-gas ini kemudian terlepas ke atmosfer dan membentuk lapisan yang menahan panas dari sinar matahari. Akibatnya, suhu rata-rata bumi meningkat, yang dikenal sebagai pemanasan global. Sebaliknya, energi terbarukan, seperti energi matahari, angin, air, dan biomassa, tidak menghasilkan atau hanya sedikit menghasilkan gas rumah kaca dalam proses produksinya. Misalnya energi matahari dan angin menghasilkan listrik tanpa pembakaran, sehingga tidak ada emisi CO_2 atau gas rumah kaca lain selama operasinya, hidroelektrik menghasilkan energi melalui aliran air, tanpa pembakaran bahan bakar fosil meskipun mengeluarkan CO_2 , CO_2 ini berasal dari tumbuhan yang sebelumnya telah menyerap CO_2 dari atmosfer selama proses fotosintesis, sehingga netral karbon atau bahkan dapat mengurangi gas rumah kaca jika dikelola dengan benar.

Biogas dapat menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dengan menangkap metana yang dihasilkan dari limbah organik sebelum dilepaskan ke atmosfer. Efek pemanasan yang kuat dari metana mempercepat laju perubahan iklim, menyebabkan berbagai dampak negatif seperti peningkatan suhu global yang lebih cepat, perubahan pola cuaca yang ekstrem, naiknya permukaan air laut akibat mencairnya es kutub, gangguan terhadap ekosistem dan keanekaragaman hayati. Selain itu, metana juga berperan dalam pembentukan ozon troposfer, yang

merupakan polutan udara berbahaya bagi kesehatan manusia dan tanaman. Oleh karena itu, mengurangi emisi metana tidak hanya penting untuk mitigasi perubahan iklim, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas udara dan melindungi kesehatan publik.

Pengelolaan limbah yang efisien melalui produksi biogas juga menekan emisi GRK dari tempat pembuangan sampah. Sisa proses biogas, yaitu digestate, dapat digunakan sebagai pupuk organik, mengurangi kebutuhan pupuk kimia yang memicu emisi tinggi. Penggunaan biogas untuk memasak juga menekan emisi hitam karbon dari bahan bakar tradisional. Dengan berbagai mekanisme ini, biogas menjadi solusi energi ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan demikian, energi terbarukan cenderung tidak menambah gas rumah kaca ke atmosfer, sehingga tidak menyebabkan atau memperburuk efek rumah kaca (Conibear, 2020).

Teknologi *anaerobic digestion* (proses anaerobik) merupakan cara untuk menghasilkan biogas yang diharapkan dapat menggantikan penggunaan energi fosil. *anaerobic digestion* merupakan proses degradasi biomassa organik pada kondisi tanpa oksigen. Semua limbah organik berpotensi untuk diolah menjadi biogas karena mengandung substrat yang mudah didegradasi oleh mikroorganisme anaerobik. Pengolahan sampah organik menggunakan *anaerobic digestion* merupakan proses berkelanjutan dan berpotensi memberikan keuntungan ekonomi karena selain mereduksi sampah organik, dalam proses ini dihasilkan biogas yang memiliki nilai kalor yang tinggi dan *digestate* yang dapat digunakan sebagai zat aditif bagi tanah (Chaerul, 2019).

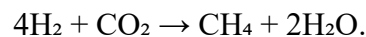
Aplikasi *anaerobic digestion* pada pembuatan biogas relatif mudah dan sederhana. Prinsip utama proses pembentukan biogas adalah pengumpulan campuran limbah organik dan mikroorganisme-mikroorganisme anaerobik (misalnya kotoran sapi) ke dalam tangki kedap udara yang disebut dengan tangki *digester*. Di dalam *digester* senyawa organik tersebut akan dicerna

dan difermentasi oleh bakteri. Gas yang dihasilkan akan tertampung pada bagian atas *digester*. Terjadinya penumpukan produksi gas akan menimbulkan tekanan sehingga dari tekanan tersebut gas dapat disalurkan melalui pipa yang dipergunakan untuk keperluan bahan bakar atau pembangkit listrik (Sinaga, 2021). Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk keperluan rumah tangga, seperti memasak dengan menggunakan kompor khusus biogas (Yasmin, 2019).

Terdapat empat tahapan pada pengolahan anerobik untuk menghasilkan biogas, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis dan metanogenesis (Kurniati, 2021). Masing-masing tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Proses hidrolisis adalah tahap awal dekomposisi polimer organik kompleks, seperti protein, karbohidrat, dan lemak, menjadi bentuk monomer yang mudah larut seperti glukosa, asam lemak, dan asam amino. Proses ini dilakukan oleh bakteri fakultatif, termasuk bakteri lipolitik (pemecah lemak), selulolitik (pemecah selulosa), dan proteolitik (pemecah protein).
2. Proses asidogenesis adalah tahapan di mana monomer organik yang dihasilkan dari hidrolisis diuraikan lebih lanjut oleh bakteri asidogenik menjadi asam-asam organik dan alkohol. Produk utama dari tahapan ini meliputi asam format, asetat, butirrat, propionat, dan laktat, serta dihasilkan pula ammonia, CO₂, H₂, dan etanol.
3. Proses asetogenesis melibatkan konversi asam-asam organik dan alkohol yang dihasilkan sebelumnya menjadi asam asetat. Pada tahap ini, bakteri asetogenik menguraikan senyawa organik dan etanol menjadi asam format, asetat, CO₂, dan H₂.
4. Proses metanogenesis adalah tahap akhir di mana asam asetat diubah menjadi metana (CH₄), yang menjadi produk akhir dari degradasi anaerob. Metana dapat dihasilkan dengan dua cara. Cara pertama adalah fermentasi asam asetat menjadi CH₄ dan CO₂ dengan reaksi: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$. Cara kedua adalah reduksi CO₂

menggunakan H_2 , yang menghasilkan metana dan air dengan reaksi:



Masing-masing tahapan dilakukan oleh kelompok mikroba yang berbeda-beda. Secara umum, keempat tahapan proses *anaerobik* tersebut dapat dipisahkan menjadi dua fasa (stage) utama yaitu fasa hidrolisis dan asidogenesis; dan fasa metanogenesis. Bakteri hidrolitik dan asidogenik dapat tumbuh pada kondisi lingkungan yang lebih beragam pada rentang pH rendah diantara 4.7 – 6 sedangkan mikroorganisme metanogenik hanya dapat tumbuh pada rentang pH yang tinggi (6,5–8,5), dalam lingkungan yang benar-benar tidak ada oksigen dan kondisi suhu lingkungan yang relatif stabil (Blonskaja, 2018).

2.3 Pengenceran

Pengenceran adalah prosedur pembuatan larutan yang lebih encer dari larutan yang lebih pekat melalui penambahan sejumlah pelarut pada larutan dengan volume dan konsentrasi tertentu. Pengenceran substrat berpengaruh terhadap produksi dan kualitas biogas. Perbedaan penurunan kandungan bahan organik pada setiap perlakuan dipengaruhi oleh kondisi pengenceran (Soeroso, 2016).

Pengenceran merupakan proses penambahan air ke dalam substrat untuk mengurangi konsentrasi senyawa tertentu, sedangkan rasio pengenceran adalah perbandingan antara volume air yang ditambahkan dengan volume substrat asli. Perbedaan tingkat pengenceran memengaruhi konsentrasi perombakan *Chemical Oxygen Demand* (COD), yang berperan dalam mengukur tingkat pencemaran organik dalam suatu larutan. Rasio pengenceran juga berpengaruh terhadap produksi biogas. Jika terlalu banyak air dalam substrat, perkembangan mikroba menjadi kurang optimal karena konsentrasi nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhannya berkurang. Sebaliknya, pada rasio pengenceran yang lebih pekat, produksi

biogas cenderung lebih tinggi karena kandungan bahan padatan yang berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi mikroba lebih banyak. Hal ini mendukung pertumbuhan mikroba dengan lebih baik dan meningkatkan proses fermentasi dalam produksi biogas (Weda *et al.* 2017).

Aktivitas normal dari mikroba methan membutuhkan sekitar 90% air dan 7-10% bahan kering dari bahan masukan untuk fermentasi. Dengan demikian isian yang paling banyak menghasilkan gas bio adalah yang mengandung 7-9% bahan kering. Untuk mendapatkan kandungan kering sejumlah tersebut maka bahan baku isian biasanya ditambah dengan air dengan perbandingan tertentu. Begitu pula dengan percobaan terdahulu yang menyimpulkan bahwa variasi dengan kombinasi *feeding biostarter* dan *feeding air* mampu menghasilkan volume biogas kumulatif dan konsentrasi gas metana yang lebih besar dibandingkan dengan variasi blanko (tanpa adanya kombinasi *feeding biostarter* dan *feeding air*). Kombinasi *feeding biostarter* dan air meningkatkan produksi biogas karena menciptakan kondisi ideal bagi mikroorganisme. *Biostarter* menambah mikroba aktif dan enzim, mempercepat pemecahan bahan organik, sementara air menyebarkan nutrisi dan menjaga kelembaban. Kombinasi ini juga menstabilkan pH, mendukung proses penguraian yang efisien, sehingga volume biogas dan konsentrasi metana meningkat. (Kurniawan, 2016).

Substrat yang terlalu encer dalam proses pembuatan biogas dapat menurunkan efisiensi fermentasi karena rendahnya konsentrasi bahan organik dan nutrisi bagi mikroorganisme. Hal ini juga meningkatkan kebutuhan volume reaktor, memperlambat waktu retensi, serta mengurangi produksi biogas. Selain itu, substrat encer sulit dipanaskan secara merata, mengganggu aktivitas mikroorganisme, dan menghasilkan limbah cair lebih banyak yang berisiko mencemari lingkungan. Untuk menghindari masalah ini, penting menjaga konsistensi substrat dengan kandungan padatan total (TS) dan mengatur rasio pengenceran secara optimal.

2.4 Parameter Pembentukan Biogas

2.4.1 Produksi Biogas (CH₄)

Kandungan biogas dalam persen volume sekitar 50–70% CH₄ 25–50%, CO₂ 0,3–3%, N₂ 1–5%, H₂ dan H₂S yang sangat rendah (Karagöz *et al.*, 2018). Berdasarkan gambaran persentase kandungan biogas tersebut, metana (CH₄) merupakan hidrokarbon ringan yang memberikan kontribusi positif terhadap nilai kalor biogas. Karaman (2022) menyebutkan bahwa biogas mulai terbentuk pada saat 4-5 hari sesudah bahan dimasukkan ke dalam *biodigester* dan akan mencapai puncak pada saat hari ke 20-25.

2.4.2 *Total Solid (TS) dan Organic Total Solid (OTS)*

Total Solid merupakan jumlah bahan organik dan anorganik dalam sebuah bahan. Kadar *Total Solid* dapat menunjukkan proses degradasi suatu bahan organik. Bila proses degradasi berlangsung dengan baik, waktu proses akan berpengaruh terhadap perubahan nilai kadar *Total Solid* (Dwityaningsih, 2024). *Total Solid* juga merupakan jumlah persen nilai kering dari bahan baku yang digunakan sebagai bahan baku penghasil biogas (Baskara, 2020).

Organic Total Solid adalah jumlah zat padat dalam sebuah material yang menguap pada suhu 550°C dan disebut sebagai padatan organik total (Ritonga, 2021). Kandungan *Organic Total Solid* menunjukkan banyaknya senyawa organik seperti protein, karbohidrat dan lemak (Yulistiani, 2017). Parameter *Organic Total Solid* merupakan salah satu indikasi terjadinya perubahan jumlah bahan organik akibat degradasi mikroba selama proses pembentukan biogas. Waktu proses terjadinya biogas berpengaruh terhadap nilai kadar *Organic Total Solid* (Widarti, 2019).

2.4.3 *Chemical Oxygen Demand (COD)*

COD (*Chemical Oxygen Demand*) adalah jumlah oksigen yang digunakan untuk mendegradasi bahan organik dan anorganik yang terkandung di dalam air melalui proses kimiawi (Suhari, 2020). Nilai COD yang tinggi menunjukkan bahwa keberadaan zat organik dan anorganik di air berada dalam jumlah yang besar. Di perairan, senyawa organik dioksidasi oleh mikroba menjadi karbondioksida dan air sehingga perairan akan mengalami kekurangan oksigen. Peningkatan nilai COD menunjukkan tingginya kebutuhan oksigen untuk mengoksidasi senyawa-senyawa di dalam perairan sehingga mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut (DO) di dalam air (Saputri, 2023).

Kadar oksigen terlarut yang terlalu rendah dalam perairan dapat menyebabkan kematian biota air seperti ikan dan invertebrata yang bergantung pada oksigen untuk bertahan hidup. Kondisi ini juga mengganggu keseimbangan ekosistem, karena spesies tertentu yang tahan hipoksia dapat mendominasi, mengubah struktur komunitas biota. Selain itu, proses pembusukan oleh bakteri anaerobik menghasilkan bau tak sedap dan senyawa berbahaya, seperti hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), metana (CH_4), asam organik, putresin dan kadaverin serta menurunkan kualitas air yang menjadi lebih keruh dan mengandung toksin. Kekurangan oksigen ini juga sering memicu eutrofikasi, di mana peningkatan alga memperburuk hipoksia dan menciptakan zona mati di perairan. (Madyawan, 2020).

2.4.4 *Volatile Fatty Acid (VFA)*

Volatile Fatty Acids (VFA) atau asam lemak volatil merupakan hasil biokonversi senyawa organik terlarut hasil hidrolisis pada proses asidogenesis. Asam lemak volatil adalah senyawa penting dalam proses pembentukan gas metana dan menyebabkan hambatan mikroba metanogen dalam konsentrasi yang tinggi. Konsentrasi VFA berbanding terbalik dengan pH (Zhang, 2015). Peningkatan konsentrasi VFA dapat menurunkan nilai pH sehingga mengganggu mikroba metanogen dan menyebabkan produksi biogas menurun (Zulfikar, 2016). Oleh karena itu pemantauan VFA penting untuk mengetahui kinerja proses degradasi anaerobik (Wijekoon dkk, 2016).

2.4.5 pH dan Alkalinitas

Alkalinitas merupakan penyangga (buffer) perubahan pH air yang diukur dengan kandungan karbonat. Alkalinitas adalah kapasitas air untuk menetralkan tambahan asam tanpa penurunan nilai pH larutan. Alkalinitas mampu menetralkan keasaman didalam air, secara khusus alkalinitas disebut sebagai besaran yang menunjukkan kapasitas pembufferan dari ion bikarbonat, dan tahap tertentu ion karbonat dan hidroksida dalam air. Ketiga ion tersebut dalam air akan bereaksi dengan ion hidrogen sehingga menurunkan keasaman dan menaikkan pH. Air yang alkali mempunyai pH tinggi dan umumnya mengandung padatan terlarut yang tinggi. Alkalinitas merupakan faktor kapasitas untuk menetralkan asam. Oleh karena itu, kadang-kadang penambahan alkalinitas lebih banyak dibutuhkan untuk mencegah supaya air tersebut tidak menjadi asam. Alkalinitas limbah cair membantu mempertahankan pH agar tidak mudah berubah yang disebabkan oleh penambahan asam. Selain itu, alkalinitas juga mempengaruhi pengolahan zat-zat kimia dan biologi serta dibutuhkan sebagai nutrisi bagi mikroba (Gita, 2015).

Alkalinitas merupakan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan aktivitas bakteri. Kedua faktor tersebut membuktikan kestabilan dalam proses digestasi (Dobre, 2014). Peran alkalinitas adalah sebagai buffer yang mencegah penurunan pH (Wambugu, 2019). Jika alkalinitas rendah, kondisi pH menjadi terlalu asam, menghambat aktivitas mikroorganisme dan menurunkan produksi biogas. Dengan demikian, alkalinitas diperlukan untuk memastikan proses fermentasi anaerobik berjalan optimal. Batasan alkalinitas yang wajar adalah 2.500-5.000 mg/L (Tchobanoglous, 2014).

III. METODE PENELITIAN

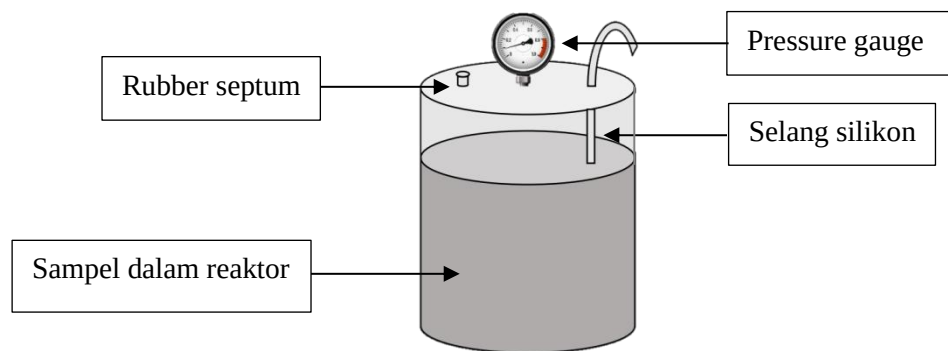
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Adapun penelitian ini dimulai pada 16 Desember 2024 sampai dengan 24 Februari 2025. Perlakuan analisis sampel dilakukan di Laboratorium Kimia 2 dan Workshop Basement KST Samaun Samadikun BRIN Cisit, Bandung, Jawa Barat.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan Pembuatan Biogas

Adapun peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini berupa reaktor biogas berbentuk silinder dengan volume total 2,03 L dan volume kerja 1,2 L. Reaktor ini dilengkapi dengan pressure gauge yang berfungsi untuk mengetahui tekanan di dalam ruang gas, pipa sampling cair dan pipa sampling gas. Pipa sampling gas ini dilengkapi dengan rubber septum untuk mencegah kebocoran saat pengambilan biogas dari reaktor. Rangkaian reaktor yang digunakan di dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Reaktor

3.2.2 Peralatan Analisis

Pada percobaan ini dilakukan analisis-*analisis* parameter proses berupa konsentrasi COD, TS, OTS, VFA, pH, Alkalinity, volume biogas dan kadar CH₄ didalam biogas. Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain: oven, furnace, cawan pijar, neraca analitik, COD thermoblock, spektrofotometri, tabung reaksi, mikro pipet, pipet volume, magnetic stirrer, lemari asam dan lemari pendingin, HPLC UFLC, vial, magnetic stirrer, hot plate dan kertas pH dan pipet saring.

3.2.3 Bahan Baku Pembuatan Biogas

Bahan baku utama di dalam penelitian ini digunakan untuk pembentukan biogas. Adapun bahan baku yang digunakan untuk pembentukan biogas adalah air limbah rebusan cilok dan effluent *digester* aktif. Air limbah rebusan cilok digunakan sebagai substrat dan effluent *digester* aktif digunakan sebagai sumber mikroba (inokulum).

Air limbah rebusan cilok, merupakan limbah cair yang dihasilkan dari sisa perebusan cilok. Air limbah ini diperoleh dari PT. Karya

Baru Kita Cilokku yang beralamat di Kelurahan Sukahati, Kecamatan Cibinong, Kabupaten Bogor. Karakteristik dari air limbah rebusan cilok ini adalah dengan pH 3,5, konsentrasi COD 56033,93 mg/L, OTS 43.750 mg/L, VFA x mg/L dan alkalinitas 0 ppm.

Effluent ***digester aktif***, diperoleh dari instalasi *digester* biogas berbahan baku kotoran sapi di Kelurahan Cikapundung, Desa Suntenjaya, Kecamatan Cikidang, Kabupaten Bandung Barat. Karakteristik effluent *digester* aktif yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan pH 7, konsentrasi COD 25334,62 mg/L, OTS 43500 mg/L, VFA x mg/L dan alkalinitas 5000 ppm.

3.2.4 Bahan Analisis

Adapun bahan-bahan yang digunakan untuk analisis COD, VFA, dan alkalinitas meliputi H_2SO_4 , $K_2Cr_2O_7$, KHP, $AgSO_4$, $HgSO_4$, dan H_2O , larutan standar asam format, asetat, propionat, butirat dan isovalerat; alkalinity tes kit.

3.3 Prosedur Penelitian

Parameter analisis yang dilakukan antara lain:

1. pH
2. *Chemical Oxygen Demand* (COD)
3. *Total Solid* (TS)
4. *Organic Total Solid* (OTS)
5. *Alkalinity*
6. *Volatile Fatty Acid* (VFA)
7. Produksi dan Komposisi Biogas

Variasi konsentrasi COD diperoleh melalui pengenceran. Pengenceran dilakukan berdasarkan nilai COD pada bahan baku asli, dengan target nilai

COD lain yang dipilih adalah 7000, 15000, dan 30000 mg/L. Kemudian dibuat juga 2 reaktor dengan target COD 15000 mg/L dengan penambahan urea sebanyak 1 gram dan 5 gram. Banyaknya inokulum (effluent *digester* kotoran sapi aktif) dan limbah cilok yang dimasukkan di dalam *digester* dirancang sehingga diperoleh perbandingan inokulum dan substrat pada masing-masing *digester* adalah 2. Komposisi reaktor pada berbagai konsentrasi COD yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **tabel 2**.

Tabel 2. Komposisi Reaktor pada Berbagai Konsentrasi COD Limbah Cilok

Kode	Target COD	Komposisi Pengenceran Cilok (Substrat)		Volume Limbah Cilok Hasil pengenceran (masuk reaktor)	Volume Effluent
		Volume Substrat (L)	Volume Aquades (L)		
A (duplo)	Asli (56033,93)	1	0	0,8666	0,4225
B (duplo)	7000	0,124924309	0,875075691	0,26	1,0291
C (duplo)	15.000	0,267694948	0,732305052	0,455	0,8341
D (duplo)	30.000	0,535389897	0,464610103	0,6716	0,6175
E (kontrol)	15.000 (+urea 1 gram)	0,267694948	0,732305052	0,455	0,8341
F (kontrol)	15.000 (+urea 5 gram)	0,267694948	0,732305052	0,455	0,8341

3.3.1 Penyiapan Reaktor dan Proses Produksi Biogas

Penyiapan reaktor dilakukan dengan beberapa langkah. Pertama disiapkan 10 reaktor berukuran 2,03 liter, masing-masing dilengkapi lubang untuk pressure gauge, selang gas, dan selang pengambilan sampel cair seperti pada **Gambar 2**. Reaktor diberi label sesuai perlakuan dan dibuat duplo untuk tiap perlakuan. Inokulum effluent *digester* kotoran sapi dimasukkan dengan volume yang sudah

ditentukan, lalu ditambahkan substrat berupa limbah cair rebusan cilok sesuai tingkat pengenceran yang diinginkan dengan volume yang sudah ditentukan (**Tabel 2**). Tutup reaktor dilem dan ditutup rapat untuk mencegah kebocoran udara. Selang sampel cair dijepit dengan paper clip agar reaktor tetap kedap udara sepanjang penelitian.

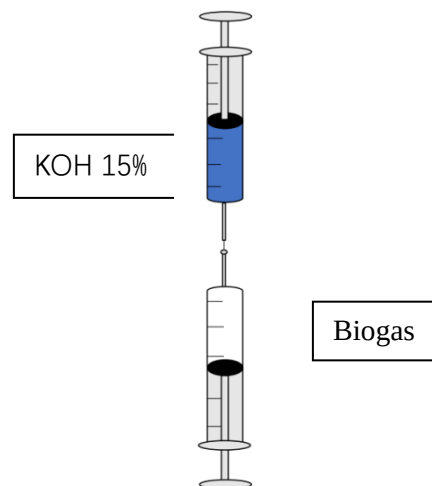
3.3.2 Perlakuan Pengenceran Sampel Bahan Baku

Pengenceran substrat dilakukan berdasarkan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dari sampel limbah cair rebusan cilok dengan target COD 7000 mg/L, 15000 mg/L, 30000 mg/L, dan COD asli 56033,926 mg/L. Setiap konsentrasi dibuat replikasinya dalam reaktor duplikat untuk akurasi hasil. Khusus untuk COD 15000 mg/L, dibuat empat reaktor: dua tanpa urea, dan dua dengan tambahan urea sebanyak 1 gram dan 5 gram, untuk mengamati pengaruh urea pada fermentasi anaerobik. Produksi gas pada reaktor diamati setiap hari, dengan analisis gas tiga kali seminggu atau segera jika tekanan gas melebihi 10 kPa.

3.3.3 Pengamatan

3.3.3.1 Pengukuran Produksi Biogas dan Kadar CH₄ dari Proses *Anaerobic*

Volume biogas dihitung berdasarkan kenaikan tekanan pada alat pengukur. Pengambilan gas dilakukan dengan syringe siring 60 mL sampai jarum pada pressure gauge menunjukkan angka 0. Kadar CO₂ dihitung dengan menyerap CO₂ dalam biogas menggunakan larutan NaOH. Siring yang berisi biogas sebanyak 60 mL dihubungkan ke syringe berisi 10 mL larutan NaOH untuk menyerap CO₂. Proses penyerapan CO₂ dalam biogas diilustrasikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Penyerapan CO₂ di dalam biogas menggunakan larutan NaOH

Gas yang terserap oleh larutan NaOH adalah CO₂. Setelah proses penyerapan ini, gas yang tersisa terdiri dari metana (CH₄) dan nitrogen (N₂). Kadar CH₄ dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar CH}_4 \text{ dalam biogas} = 100 - \text{Kadar CO}_2 - \text{Kadar N}_2$$

$$\text{dengan Kadar CO}_2 = \frac{\text{banyaknya gas yang terserap}}{\text{banyaknya gas awal}} \times 100\% \text{ dan}$$

$$\text{Kadar N}_2 = \frac{\text{banyaknya N}_2 \text{ yang tertinggal di ruang gas}}{\text{Total gas di digester dan siring}} \times 100\%$$

$$\text{Kadar N}_2 = \frac{\text{banyaknya N}_2 \text{ yang tertinggal di ruang gas}}{\text{Total gas di digester dan siring}} \times 100\%$$

3.3.4 Analisis Total Solid (TS) dan Organic Total Solid (OTS)

Analisis Total Solid (TS) dan Organic Total Solid (OTS) dilakukan mengikuti SNI 6989.26:2019 dengan metode gravimetri. Cawan krus dipanaskan dalam furnace pada 550°C selama 6 jam, kemudian didinginkan di desikator hingga mencapai berat konstan. Sampel dimasukkan ke dalam cawan dan dipanaskan dalam oven pada 105°C

selama 6 jam hingga berat konstan. Setelah didinginkan, sampel ditimbang untuk menghitung TS menggunakan rumus sebagai berikut.

$$TS \text{ (mg/l)} = \frac{(W_1 - W_0) \times 1.000}{V}$$

Keterangan:

W_1 = Berat cawan krus setelah sampel dipanaskan (mg)

W_0 = Berat awal cawan krus kosong (mg)

V = Volume contoh uji (ml)

Untuk analisis OTS, sampel hasil uji TS dipanaskan kembali dalam furnace pada 550°C hingga berat konstan, kemudian ditimbang dan dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$OTS \text{ (mg/l)} = \frac{(W_0 - W_1) \times 1.000}{V}$$

Keterangan:

W_1 = Berat cawan krus setelah sampel dipanaskan dalam *furnace*, 550°C(mg)

W_0 = Berat cawan krus setelah pemanasan di dalam oven, 105 °C (mg)

V = Volume contoh uji (ml)

3.3.5 Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Analisis COD dilakukan mengikuti SNI 6989.20:2019 dengan metode refluks tertutup secara spektrofotometri. Sampel larutan kerja atau contoh uji dipipet dan ditambahkan dengan digestion solution serta larutan pereaksi asam sulfat ke dalam tabung reaksi, kemudian dihomogenkan dengan vortex. Tabung diletakkan pada heating block yang telah dipanaskan dan dijaga pada suhu 150°C selama 2 jam, lalu didinginkan hingga suhu ruang. Spektrofotometer diatur untuk

pengukuran absorbansi pada panjang gelombang 600 nm. Hasil pengukuran absorbansi dan transmittansi dicatat, kemudian dibandingkan dengan nilai absorbansi kurva kalibrasi yang diregresikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C = ax + b$$

$$\text{Kadar COD Sebenarnya (mg O}_2\text{/l)} = C \times f$$

Keterangan:

- a = Koefisien regresi
- x = Nilai absorbansi COD contoh uji
- b = Intersep
- C = Kadar COD (mg O₂/l)
- f = Faktor pengenceran

3.3.6 Analisis pH dan Alkalinitas

Pengukuran pH dengan menggunakan kertas pH universal dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, sampel cairan disiapkan dalam wadah bersih dan disaring jika terdapat partikel padat untuk memastikan homogenitas. Selanjutnya, kertas pH universal dicelupkan ke dalam sampel selama 1–2 detik hingga cairan terserap dengan baik. Setelah itu, kertas diangkat dan dibiarkan beberapa detik untuk menunggu perubahan warna. Warna yang muncul pada kertas pH kemudian dicocokkan dengan skala warna standar yang tersedia pada kemasan kertas pH universal untuk menentukan nilai pH sampel. Hasil pengukuran dicatat dengan cermat, dan pengujian diulang jika diperlukan untuk memastikan keakuratan hasil.

Analisis alkalinitas dilakukan menggunakan test kit alkalinity. Sebanyak 10 ml sampel disiapkan (dengan pengenceran jika diperlukan), kemudian ditambahkan 3 tetes reagen mAlkalinity. Selanjutnya, ditambahkan reagen alkalinity hingga warna sampel

berubah menjadi orange atau jingga. Jumlah tetesan reagen alkalinity yang digunakan dihitung untuk menentukan kadar alkalinitas.

3.3.7 Analisis *Volatile Fatty Acid*

Analisis *Volatile Fatty Acids* (VFA) dilakukan di Laboratorium Genomik, BRIN Cibinong KST Soekarno menggunakan High Performance Liquid Chromatography (HPLC) dengan detektor Refractive Index (RID-20A). Larutan standar disiapkan menggunakan beberapa jenis asam, seperti asam format (99%), asam propionat (99%), asam asetat (100%), asam butirat (99%), dan asam isovalerat (98%). Sampel kemudian disentrifugasi pada kecepatan 10.000 rpm selama 10 menit untuk memisahkan padatan dari slurry. Filtrat hasil sentrifugasi ini kemudian disaring melalui microfilter untuk menghilangkan partikel kecil yang tersisa sebelum dimasukkan ke dalam HPLC. Luas area puncak pada waktu retensi yang sesuai kemudian dibandingkan dengan area larutan standar untuk menentukan konsentrasi masing-masing asam yang dianalisis.

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Konsentrasi COD limbah awal berpengaruh signifikan terhadap jalannya proses *anaerobic digestion*. Reaktor dengan COD terlalu tinggi (56.000 mg/L) menghasilkan akumulasi VFA yang berlebihan dan mengakibatkan perubahan pH, yang menghambat proses metanogenesis.
2. Konsentrasi COD 7.000 mg/L (reaktor B) terbukti sebagai kondisi paling optimal, menghasilkan perolehan metana tertinggi dan paling efisien baik berdasarkan perolehan gas per gram COD maupun OTS, serta menunjukkan kestabilan pH dan VFA selama proses berlangsung.
3. Kisaran COD sedang (15.000 mg/L) dapat tetap menghasilkan gas secara efisien jika tidak ditambah urea (reaktor C). Penambahan urea pada dosis rendah hingga tinggi (Reaktor E (15.000 mg/ + 1 g urea) dan F (15.000 mg/L + 5 g urea)) justru tidak meningkatkan perolehan gas dan menyebabkan gangguan mikrobiologis, seperti akumulasi amonia dan VFA.
4. Perbandingan antara variasi substrat menunjukkan bahwa penambahan nutrisi (urea) tidak selalu diperlukan, terutama jika substrat sudah mengandung COD dalam jumlah sedang. Stabilitas proses dan efisiensi metanogenesis lebih bergantung pada keseimbangan pH, ketersediaan nutrisi alami, dan tidak adanya akumulasi senyawa penghambat.

5. Kemungkinan adanya kebocoran sistem terindikasi pada beberapa reaktor yang menunjukkan pola grafik produksi metana yang tiba-tiba mendatar di pertengahan waktu fermentasi. Fenomena ini terutama terlihat pada reaktor C (15000 mg/L), yang meskipun menunjukkan kestabilan parameter pH dan tren penurunan VFA yang baik, mengalami anomali dalam jumlah gas metana yang dihasilkan.

5.2 Saran

Melalui hasil penelitian ini, terbuka peluang untuk pengembangan reaktor biogas skala kecil yang murah dan dapat diterapkan di lingkungan padat penduduk atau usaha makanan berbasis rumahan. Namun, untuk mendukung implementasi nyata, dibutuhkan penelitian lanjutan dengan skala yang lebih besar dan realistis agar sistem dapat beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang dinamis. Disarankan pula untuk melakukan analisis komunitas mikroorganisme guna memahami lebih dalam dinamika biologis di dalam reaktor, serta analisis komposisi biogas menggunakan peralatan elektronik seperti gas analyser agar nilai kalor dan kualitas gas yang dihasilkan dapat diketahui secara pasti. Selain itu, eksplorasi terhadap jenis nutrisi lain seperti fosfat, magnesium, atau mikronutrien logam penting dilakukan untuk mengoptimalkan metabolisme mikroba. Kombinasi substrat atau co-digestion dengan limbah organik lainnya juga direkomendasikan agar rasio C/N dan kelengkapan nutrisi dapat lebih seimbang.

DAFTAR PUSTAKA

- Andareswari, N., Hariyadi, S., Yulianto, G. 2019. Karakteristik dan Strategi Pengelolaan Limbah Cair Usaha Tapioka di Bogor Utara. *Jurnal ECOLAB*. 13(2): 85–96.
- Arief, B. M. 2019. Kombinasi Feeding Biostarter dan Air dalam Anaerobik Digester. *Jurnal Presipitasi*. 6(2): 27-34.
- Baskara, M. F., Nym, S., Tenaya, I. G. N. P. 2020. Pengaruh *Total Solid* Terhadap Akumulasi Tekanan Biogas Termofilik. *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*. 9(1): 816-819.
- Beschkov, V. N., Angelov, I. K. 2025. *Volatile Fatty Acid* Production vs. Methane and Hydrogen in *Anaerobic digestion*. *Fermentation*, 11(4): 172.
- Blonskaja, A. Menert., Vilu, R. 2018. Use of Two-Stage *Anaerobic* Treatment for Distillery Waste. *Advances in Enviromental Research*. 7(2): 671–678.
- Budiyono, S., Syaichurrozi, I., Sumardiono, S. 2020. Biogas Production from Bioethanol Waste: the Effect of pH and Urea Addition to Biogas Production Rate. *Waste Technology*, 1(1): 1–5.
- Chaerul, M., dan Yahdini, Q. M. 2019. *Anaerobic digestion* untuk Pengolahan Sampah Organik: Analisis Multikriteria Menggunakan Metode *Analytic Network Process*. *Serambi Engineering*. 4(2): 488-497.

- Chaudhari, V. J., Patel, N. K., Tandel, B. M., Vibhuti, C. 2017. Effect of Foliar Spray Of Micronutrients on Yield Of Cauliflower (*Brassica oleracea* L. Var. Botrytis). *International Journal of Chemical Studies*. 5(4): 2110–2112.
- Conibear, L., Butt, E. W., Knot, C., Lam, N. L., Arnold, S. R., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Spracklen, D. V., Bond, T. C. 2020. A Complete Transition to Clean Household Energy Can Save One-Quarter of The Healthy Life Lost to Particulate Matter Pollution Exposure in India. *Environmental Research Letters*. 15(9): 1-10.
- Demucyk, M., Nyns, E. J., Naveau, H. P., 1984. *A Review of The Effects of Anaerobic digestion on Odor and on Disease Survival*. In: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. In: Gasser JKR (ed) Elsevier Applied Science Publisher. London.
- Dennis A., Burke, P. E. 2001 *Dairy Waste Anaerobic digestion Handbook*. Environmental Energy Company. Olympia.
- Denny., Widhiyanuriyawan. 2020. *Variasi Temperatur Pemanasan Zeolite alam-NaOH Untuk Pemurnian Biogas*. Fakultas Teknik. Universitas Brawijaya. Malang.
- Dobre, F., Nicolae., Matei, F. 2014. Main Factors Affecting Biogas Production-An Overview. *Biotechnol*. 19(3): 9283–9296.
- Dwityaningsih, R., Theresia, E. P. S R., Murni, H., Mardiyana. 2024. Analisis Proses Pembentukan Biogas dari Campuran Limbah Ikan, Kotoran Sapi dan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*). *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan Papua*. 7(1): 44-51.

- Fakhrullah, A. 2020. Studi Literatur Produksi Biogas Dari Minyak Dan Lemak Limbah Industri Rumah Makan. *Skripsi*.
- Fadli, D. 2018. *Kaji Eksperimental Sistem Penyimpanan Biogas Dengan Metode Pengkompresian Dan Pendinginan Pada Tabung Gas Sebagai Bahan Bakar Pengganti Gas LPG*. Fakultas Teknik. Universitas Lampung.
- Fazliyana, A., Hamzah, A., Hamzah, M. H., Najmi, F., Mazlan, A., Man, H. C., Jamali, N. S., Siajam, S. I. 2020. Anaerobic Co-Digestion of Pineapple Wastes with Cow Dung: Effect of Different *Total Solid* Content on Biomethane Yield. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*. 1(1): 1–12.
- Fry, L. J. 2018. *Practical Building of Methane Power Plants for Rural Energy Independence*. Standard Printing Santa Barbara.
- Gita, A. S., Adrianto, A., Sri. R. M. 2015. Pengaruh Laju Alir Umpan Terhadap pH, Alkalinitas dan Asam Volatil pada Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Bioreaktor Hibrid Anaerob Dua Tahap. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 2(1): 1-9.
- Hariyanto, B., Larasati, D. A. 2016. Dampak Pembuangan Limbah Tapioka Terhadap Kualitas Air Tambak di Kecamatan Margoyoso Kabupaten Pati. *Prosiding Seminar Nasional Geografi UMS 2016 Upaya Pengurangan Risiko Bencana Terkait Perubahan Iklim*. 357–369.
- Khaliq, A. 2015. Analisis Sistem Pengolahan Air Limbah Pada Kelurahan Kelayan Luar Kawasan IPAL Pekapuran Raya PD PAL Kota Banjarmasin. *Jurnal Poros Teknik*. 1(7): 1-53.

- Kurniati, Y., Anni, R., Bilal, I. V., Dita, N., Wiwit, S. W. P. 2021. Review Analisa Kondisi Optimum Dalam Proses Pembuatan Biogas. *Journal Of Science and Technology: Rekayasa*. 14(2): 272-281.
- Madyawan, D., I, G. H., Yulianto, S. 2020. Pemodelan Oksigen Terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) di Perairan Teluk Benoa. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*. 6(2): 270-280.
- Misnati., Anna, Y., Pomalingo. 2021. Analisis Kandungan Gizi dan Daya Terima Cilok dengan Penambahan Ikan Tuna (*Thunnini*) Dan Wortel (*Daucus carota*). *Journal health and Science: Gorontalo journal health & Science Community*. 5(1): 122-132.
- Omid, B. H., Delpasand, M., Hugo, A. L. 2021. *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources: Water Quality, Hygiene, And Health*.
- Pedrawati. A. A. I. R. 2010. Kajian Ratio Kotoran Sapi dengan Air Pada Bioreaktor Tipe “UAS (Up Flow *Anaerobic Sludge*)” Dalam Memproduksi Biogas. Universitas Udayana. *Skripsi*. Jurusan Teknik Pertanian. Progam Studi Teknologi Pertanian. Universitas Udayana. Denpasar.
- Prahutama, A. 2018. Estimasi Kandungan DO (Dissolved Oxygen) di Kali Surabaya dengan Metode Kringing. *Statistika*. 1(2) : 9-14.
- Pranshanth, P., Kumar., Mehrotra. 2020. Anaerobic Degadability: Effect of Particulate COD. *Journal of Enviromental Engineering*. 132(1): 488–496.
- Ritonga., Abdul, M., Masrukhi., Azis, I. S. 2021. Karakterisasi Biogas Hasil Pemurnian Dengan Down-Up Purifier Termodifikasi. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 12(1):171-179.
- Rizqi, P. M. 2017. Karakterisasi Biogas Hasil Pemurnian Dengan Down-Up Purifier Termodifikasi. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*. 3(1): 66-74.

- Safrida, Y. D., Raihanaton., Ananda. 2019. Uji Cemar Mikroba Dalam Sari Kedelai Tanpa Merk Di Kecamatan Jaya Baru Kota Banda Aceh Secara Totalnya Plate Count (TPC). *Jurnal Serambi Engineering*. 4 (1): 364-371.
- Saputri, I., Fatimatuzzahra., Yetty, L. 2023. Analisa Kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*) pada Limbah Cair Disekitar Kawasan Penambangan Batubara Kabupaten Bengkulu Utara. *Organism*. 3(2): 63-69.
- Sinaga, P. 2021. Analisis Produksi Biogas Sebagai Energi Alternatif pada Kompor Biogas Menggunakan Campuran Kotoran Sapi dan Ampas Tahu. *Doctoral Dissertation*. Institut Teknologi Kalimantan.
- Soeroso, M. R. F., Pradana S. A., Sudarno, Irawan, W. 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.
- Supriyatno, B. 2020. Pengelolaan Air Limbah yang Berwawasan Lingkungan Suatu Strategi Dan Langkah Penanganannya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 1(1): 17-26.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D. 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse 4th Edition No 7. Hongkong: McGraw-Hill Companies.
- Wambugu, C. W., Rene E.R., Vossenbergh, J. V. D., Dupont, C., Hullebusch, E. D. V. 2019. Role Of Biochar In *Anaerobic digestion* Based Biorefinery For Food Waste. *Front Energy*. 7(1): 1–13.

- Wati, R. Y. 2018. Pengaruh Pemanasan Media Plate Count Agar (PCA) Berulang Terhadap Uji *Total Plate Count*(IPC) di Laboratorium Mikrobiologi Teknologi Hasil Pertanian Unand. *Jurnal Tampela*. 1(2): 2621- 0878.
- Weda S, Mahajoeno E, Sutarno. 2017. Produksi Biogas dari Biomassa Kotoran Sapi dalam *Biodigester* Fix Dome Dengan Pengenceran dan Penambahan Agitasi. *Thesis*. Universitas Sebelas Maret: Surakarta.
- Widarti, B. N., Siti, S., Panut, M. 2019. Degradasi Substrat *Organic Total Solid* pada Produksi Biogas dari Limbah Pembuatan Tahu dan Kotoran Sapi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 6(1): 14-19.
- Wijekoon, K, C., Visvanathan, C., dan Abeynayaka, A. 2016. Effect Of Organic Loading Rate On VFA Production, Organic Matter Removal And Microbial Activity Of A Two-Stage Thermophilic *Anaerobic* Membrane Bioreactor. *Journal Bioresource Technology*. 102(9): 5353-5360.
- Wintolo, M., Marsudi., Budi, M. 2015. Keekonomian Pemanfaatan Biogas Air Limbah Industri Tapioka. *Jurnal Bina Widya*. 24(4): 179-184.
- Wiratmana, I. P. A., Sukadana, I. G.K., Tenaya, I. G. N. P. 2016. Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Bahan Kering Terhadap Produksi dan Nilai Kalor Biogas Kotoran Sapi. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*. 5(1): 22-32.
- Wiyantoko, N., Rahmadani, P., Kurniawati., Purbaningtias. 2020. Verifikasi Metode *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan Analisis Suspended Solid (TSS) dari Sungai Mentaya. *Jurnal Prosiding Konferensi AIP*. 11(2): 22-38.
- Yanuartono, Y., Nururrozi, A., Indarjulianto, S., Purnamaningsih, H., Raharjo, S. 2018. Urea: Manfaat Pada Ruminansia. *Jurnal Ilmu-Ilmu Peternakan*. 28(1): 10-34.

- Yasmin, N., Gundmann, P. 2019. Adoption and Diffusion of Renewable Energy—the Case of Biogas As Alternative Fuel for Cooking in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 101, 255– 264.
- Yulistiani, F., Ayu, R. P., Iwan, R., Aas, N., Sofia, W. 2017. Analisis Pengaruh Pre-Treatment Eceng Gondok Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biogas. *8th Industrial Research Workshop and National Seminar*. 35–41.
- Yulastuti, E., Nanik, S., Akhmad, M., Desy, L., Nanda, P. 2021. Kajian Cemarkan Mikrobiologis Cilok dan Saus Kacang Di Kota Surakarta. *Agointek*. 15(2): 633-638.
- Zhang, C., Su, H., Wang, Z., Tan, T., Qin, P. 2015. Biogas By Semicontinuous *Anaerobic digestion* Of Food Waste. *Journal Applbiochem Biotechnol*. 175(8): 3901-14.
- Zulfikar, A. P. 2016. Pengaruh *Organic Loading Rate* Terhadap Penyisihan Bahan Organik dengan Media Arang Tempurung Kelapa (*Cocos nucifera*) pada Reaktor Anaerobik Kontinyu. *Skripsi*. Universitas Airlangga: Surabaya.