

# Hydraulic Retention Time dan Pengaruhnya terhadap Kualitas Biogas dari Kotoran Sapi Menggunakan Digester Anaerobik Tipe Batch Skala Kecil

Nanang Apriandi<sup>1\*</sup>, Suwarti<sup>2</sup>, Wiwik Purwati Widyaningsih<sup>3</sup>, Rani Raharjanti<sup>4</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

<sup>4</sup> Jurusan Akuntansi, Politeknik Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received January 13, 2023

Revised January 19, 2023

Accepted March 20, 2023

Available online April 25, 2023

### Kata Kunci:

Biogas, Hydraulic Retention Time, Batch Digester, Kualitas, Nilai Kalor

### Keywords:

Biogas, Hydraulic Retention Time, Batch Digester, Quality, Heating Value



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

## ABSTRAK

Dalam merancang digester biogas skala besar dan beroperasi jangka panjang dengan ketersediaan bahan baku setiap hari, penting untuk mengetahui waktu retensi hidrolis (HRT) dari substrat guna mengoptimalkan proses dekomposisi dan mendapatkan kualitas biogas yang baik. Komposisi gas terutama metana (CH<sub>4</sub>) menjadi dasar penentuan kualitas biogas. Pendekatan eksperimental menggunakan digester anaerobik tipe batch berkapasitas 50 liter dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh HRT pada proses dekomposisi anaerobik terhadap kualitas biogas. Campuran kotoran sapi dan air dengan perbandingan 1:1 dan 1:2 digunakan sebagai substrat. Selanjutnya, kondisi proses dan kualitas biogas dianalisis dan dievaluasi dengan variabel HRT 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas biogas tertinggi diperoleh dari proses dekomposisi anaerobik dengan komposisi substrat 1:1 dan pada HRT 28 hari, dengan kandungan CH<sub>4</sub> sebesar 62,23 %vol dan nilai kalor sebesar 21745,71 kJ/m<sup>3</sup>. Hasil investigasi ini dapat dijadikan acuan di dalam merancang digester biogas skala besar dan beroperasi jangka panjang untuk berbagai tipe digester yang berbeda. Semakin lama HRT substrat pada proses dekomposisi anaerobik di dalam digester, semakin tinggi persentase kandungan CH<sub>4</sub> dalam biogas, dan semakin tinggi pula nilai kalornya.

## ABSTRACT

In designing large-scale biogas digesters and operating for a long time with the availability of raw materials every day, it is essential to know the substrate's hydraulic retention time (HRT) to optimize the decomposition process and obtain good-quality biogas. The composition of the gas, mainly methane (CH<sub>4</sub>), is the basis for determining the quality of biogas. An experimental approach using a batch-type anaerobic digester with a capacity of 50 liters was carried out to investigate the effect of HRT on the anaerobic decomposition process on the quality of biogas. A mixture of cow manure and water in a ratio of 1:1 and 1:2 is used as a substrate. Furthermore, the process conditions and biogas quality were analyzed and evaluated with 3, 7, 14, 21, and 28 days HRT variables. The results showed that the highest quality biogas was obtained from the anaerobic decomposition process with a substrate composition of 1:1 and at an HRT of 28 days, with a CH<sub>4</sub> content of 62.23%vol and a heating value of 21745.71 kJ/m<sup>3</sup>. The results of this investigation can be used as a reference in designing large-scale and long-term biogas digesters for different types of digesters. The longer the HRT of the substrate in the anaerobic decomposition process in the digester, the higher the percentage of CH<sub>4</sub> content in the biogas and the higher the calorific value.

## 1. PENDAHULUAN

Biogas merupakan satu dari banyak alternatif sumber energi terbarukan yang layak dikembangkan dan secara teknis masuk akal untuk direalisasikan khususnya di negara berkembang yang secara umum membangun perekonomiannya dengan mengandalkan sektor pertanian dan peternakan. Kedua sektor ini pada prosesnya akan menghasilkan limbah yang berpotensi untuk dijadikan bahan baku (substrat) pembuatan biogas. Pada dasarnya, biogas dihasilkan dari proses dekomposisi substrat secara anaerobik di dalam digester dengan melibatkan aktivitas mikrobiologi. Proses ini umumnya terbagi pada beberapa fase utama diantaranya: fase hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis, dimana, setiap fase tersebut terjadi pada rentang waktu yang berbeda dan dengan keterlibatan jenis bakteri pengurai yang berbeda pula, diantaranya bakteri *fermentatif*, *acetogenik*, dan *metanogen* (K. Ramadhani & Azis, 2020). Proses bio-kimia yang terjadi pada fase dekomposisi anaerobik merupakan proses yang kompleks. Tingkat keberhasilan dari proses ini tergantung pada banyak faktor, diantaranya: jenis atau karakteristik substrat, temperatur operasi, pH, rasio karbon-nitrogen (C/N ratio), *hydraulic retention time* (HRT), dan *organic loading rate*

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [nanang.apriandi@polines.ac.id](mailto:nanang.apriandi@polines.ac.id) (Nanang Apriandi)

(OLR) (Dębowski, Kazimierowicz, Zieliński, & Bartkowska, 2022; González, Peña, & Gómez, 2022; Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Pada proses pembuatan biogas sederhana, selain stabilitas temperatur operasi, HRT menjadi variabel penting lainnya yang harus diperhatikan. Hal ini dikarenakan HRT merupakan variabel penentu pada saat proses dekomposisi substrat secara anaerobik untuk memastikan substrat tersebut sudah terdegradasi secara sempurna yang nantinya berpengaruh terhadap proses konversi substrat yang berbentuk *slurry* ke dalam bentuk gas (Shi et al., 2017). Umumnya, perbedaan HRT di dalam proses dekomposisi anaerobik akan berpengaruh terhadap kondisi operasi digester, kuantitas biogas, serta komposisi gas yang terkandung di dalam biogas yang dihasilkan.

Studi mengenai hubungan HRT dengan beberapa parameter proses pembuatan biogas juga dilaporkan oleh peneliti lain. Yang melakukan investigasi performa *hybrid upflow anaerobic sludge blanked* (HUASB) reaktor dengan variasi HRT 24, 30, 36, 42, dan 48 jam (Musa & Idrus, 2020). Hasilnya, peningkatan HRT memberikan efek signifikan terhadap performa sistem secara keseluruhan. Pada HRT 48 jam didapatkan produksi biogas 38 L/d dengan kandungan gas metana (CH<sub>4</sub>) sebesar 85 %. Penelitian lain melakukan pengujian pada digester tipe *semi continous* dengan HRT maksimal 50 hari, dengan temperatur operasi rata-rata pada kisaran 28,7-29,1 °C (Haryanto, Triyono, & Wicaksono, 2018). Hasilnya, produksi biogas terbaik didapatkan pada HRT 50 hari dengan kandungan CH<sub>4</sub> 57,23 %, dengan stabilitas produksi biogas dimulai pada HRT 40 hari. Penelitian lain melaporkan bahwa, pengamatan yang dilakukan pada HRT 20, 40, dan 60 hari, memberikan hasil produksi biogas pada HRT 60 hari lebih baik dari HRT 40 dan 20 hari (Shi et al., 2017). Menggunakan tipe digester *semicontinuous stirred-tank reactor* (CSTR) dengan temperatur operasi 35 °C, komposisi CH<sub>4</sub> yang dihasilkan pada HRT 20 hari sebesar 14,2-28,5 %. Sementara itu, peneliti lain melakukan investigasi proses produksi biogas menggunakan digester tipe *two stage continously stirred tank reaktor* (TS-CSTR) pada HRT 20 dan 25 hari (Dareioti & Kornaros, 2014). Disimpulkan bahwa, HRT 25 hari memberikan stabilitas produksi biogas dengan kandungan CH<sub>4</sub> yang dihasilkan sebesar 0,33 l.CH<sub>4</sub>/L.R.d. Namun, masih sedikit literatur yang membahas terkait hubungan HRT dengan kualitas biogas yang dihasilkan, terlebih investigasi pada penggunaan digester tipe *batch*. Padahal, investigasi pada penggunaan digester tipe *batch* dapat dijadikan acuan di dalam perancangan digester tipe semi-kontinyu maupun digester tipe kontinyu yang efektif yang dapat mengoptimalkan proses degradasi substrat dengan melibatkan variabel HRT.

Untuk aplikasi digester skala besar, melibatkan variabel HRT dalam perancangan digester menjadi hal yang krusial guna mendapatkan hasil yang optimal. Namun faktanya, selain material digester, biaya pembuatan, dan kapasitas biogas yang ditargetkan, jumlah bahan baku yang tersedia lebih banyak digunakan sebagai parameter utama di dalam mendesain dan membangun digester biogas, seperti yang dilaporkan oleh banyak peneliti (Anaswara, 2015; Atmodjo, Rosadi, & Hardoyo., 2014; Cheng et al., n.d., 2014; Chibueze, Okorie, Oriaku, Isu, & Peters, 2017; Ejiko, Adewuyi, & Filani, 2019; Jekayinfa et al., 2014; Kocer, Yilmaz, Ünvar, Koçer, & Aygün, 2018; Maluegha, Ulaan, & Umboh, 2018; Nwankwo, Eze, & Okoyeuzu, 2017; Obileke, Onyeaka, & Nwokolo, 2021; Sunaryo., 2014; Yasar, Nazir, Rasheed, Tabinda, & Nazar, 2017). Oleh karenanya, penelitian ini penting dilakukan guna memberikan perspektif yang berbeda dalam proses merancang digester biogas dengan melibatkan variabel HRT untuk mengoptimalkan proses. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi pengaruh HRT pada proses dekomposisi anaerobik substrat berbahan dasar kotoran sapi menggunakan digester tipe *batch* terhadap kualitas biogas yang dihasilkan. Temperatur operasi, produksi biogas, dan komposisi gas yang terdapat di dalam biogas yang dihasilkan merupakan parameter yang dilibatkan untuk dievaluasi guna mendapatkan nilai kalor biogas, dimana nilai kalor biogas menjadi barometer utama dari kualitas biogas. Hasil dari penelitian ini nantinya dapat dijadikan acuan di dalam merancang digester biogas skala besar dan beroperasi jangka panjang untuk berbagai tipe digester yang berbeda.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental, dimana semua aktivitas investigasi di lakukan di laboraotorium, dengan detail rincian sebagai berikut.

### **Konfigurasi Digester**

Dua buah digester anaerobik tipe *batch* skala laboratorium diposisikan vertikal masing-masing berkapasitas 50 liter (L) dikonfigurasi dan disiapkan di dalam penelitian ini untuk memproduksi biogas. Digester tersebut dirancang dan dipabrikasi di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang (-7.053253, 110.435327), terbuat dari *drum* plastik yang dilengkapi penutup tipe ulir di bagian atas guna meminimalisir kebocoran. Penutup bagian atas selain digunakan sebagai saluran untuk memasukkan substrat yang berbentuk *slurry*, juga difungsikan untuk mempermudah pembersihan digester setelah digunakan. Selain itu, pada penutup bagian atas digester dilengkapi juga

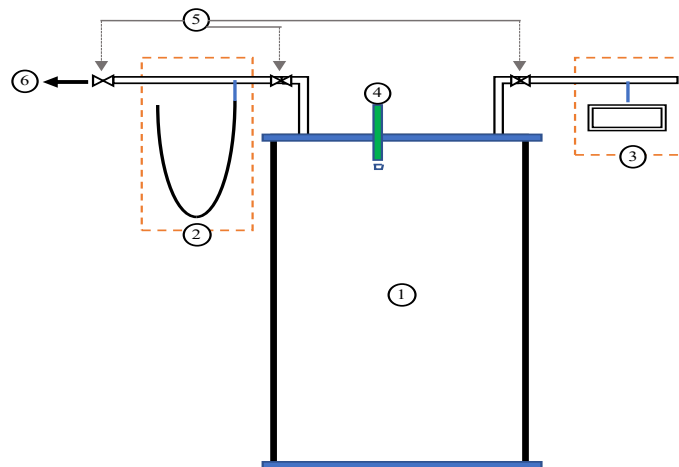
dengan beberapa *port* yang terhubung ke beberapa peralatan pendukung untuk keperluan analisa, diantaranya termometer, pengukur tekanan, dan juga sensor gas. Saluran penghubung dilengkapi dengan *valve* sebagai kontrol, dan pada salah satu ujung saluran dihubungkan dengan kantung penyimpanan biogas, yang dapat dilihat pada **Gambar 1** merepresentasikan skematik sistem dari konfigurasi digester yang digunakan di dalam penelitian ini. Volume kerja dari digester ini diatur pada 3/4 kapasitas digester keseluruhan atau sekitar 37,5 L *slurry* (Apriandi, 2021).

### Material

Material utama pembuatan substrat berbentuk *slurry* (substrat) yang digunakan pada proses produksi biogas di dalam penelitian ini adalah limbah kotoran sapi segar yang diperoleh dari salah satu peternak sapi penggemukan di daerah Dinar Mas, Kota Semarang, Jawa Tengah dan air. Kotoran sapi segar dibersihkan terlebih dahulu dari kontaminan berupa potongan-potongan rumput sisa pakan yang berpotensi tercampur pada saat proses awal pengambilan kotoran. Hal ini dimaksudkan guna meminimalisir material penyerta lain dengan kemungkinan sulit terurai guna mengoptimalkan proses dekomposisi substrat dalam pembentukan biogas.

### Treatment

Kotoran sapi segar yang sudah dibersihkan dicampur dengan air dan diaduk hingga rata untuk mendapatkan substrat dengan campuran yang homogen. Air yang digunakan sebagai bahan pencampur di dalam penelitian ini bersumber dari Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Semarang, Jawa Tengah. Sebanyak 37,5 L substrat dimasukkan ke masing-masing digester dengan memvariasikan rasio perbandingan kotoran sapi dan air (rasio *slurry*), yaitu rasio perbandingan: 1:2 (*slurry* 1:2) (Apriandi, 2021) dan 1:1 (*slurry* 1:1) (Haryanto et al., 2018). Rasio *slurry* diukur berdasarkan fraksi massa (Apriandi, 2021). Hal ini berarti bahwa, untuk *slurry* 1:1 terdefiniskan sebagai komposisi substrat yang terbuat dari campuran 1 kg kotoran sapi segar dengan 1 kg air, dan seterusnya hingga mendapatkan jumlah substrat yang dibutuhkan.



**Gambar 1.** Skematik sistem Digester Anaerobik Tipe *Batch* Kapasitas 50 L Skala Laboratorium: 1) Digester; 2) *Manometer U*; 3) Sensor Gas; 4) Termometer; 5) *Valve*; 6) Saluran ke Penampung Biogas

### Analisis dan Perhitungan

Proses dekomposisi substrat di dalam digester diuji berdasarkan HRT yang berbeda, yaitu: 3, 7, 14, 21, dan 28 hari untuk masing-masing digester dengan rasio *slurry* yang berbeda. Data temperatur, tekanan, dan volume spesifik biogas yang dihasilkan diukur dan dianalisa pada masing-masing HRT. *Thermocouple* tipe K (*temperature range* 0-400 °C; akurasi  $\pm 2,2$  °C) yang dihubungkan ke *Autonics Temperature* Indikator seri T4WM-N3NKCC digunakan untuk mengukur temperatur lingkungan dan temperatur di dalam digester (Apriandi, Sumarno, et al., 2022). Sementara itu, tekanan biogas yang dihasilkan di dalam digester diukur menggunakan pendekatan *U manometer methods* dengan fluida kerja air (H<sub>2</sub>O). Untuk mendapatkan nilai tekanan di dalam digester (tekanan biogas) mengikuti **Persamaan (1)**:

$$P_B = P_{atm} + (\rho \cdot g \cdot h) \quad (1)$$

Dimana,  $P_B$  adalah tekanan biogas di dalam digester (Pa),  $P_{atm}$  adalah tekanan atmosfer ( $\approx 101.325$  Pa),  $\rho$  adalah massa jenis air ( $\approx 997$  kg/m<sup>3</sup>),  $g$  adalah konstanta percepatan gravitasi ( $\approx 9,8$  m/s<sup>2</sup>), dan  $h$  adalah perbedaan ketinggian air yang terukur pada kolom *manometer U* (m).

Volume spesifik ( $v_s$ ) biogas yang dihasilkan untuk masing-masing HRT yang berbeda dan pada pengujian rasio *slurry* yang berbeda, dapat dihitung menggunakan [Persamaan \(2\)-\(4\)](#):

$$P_B \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (2)$$

$$\frac{V}{m} = \frac{R \cdot T}{P_B} \quad (3)$$

$$v_s = \frac{R \cdot T}{P_B} \quad (4)$$

Dengan  $V/m = v_s$ , sehingga ([Persamaan 4](#)): dimana,  $V$  adalah volume biogas yang dihasilkan (m<sup>3</sup>),  $m$  adalah massa biogas yang dihasilkan (kg),  $R$  adalah konstanta biogas yang didekati dengan nilai konstanta CH<sub>4</sub> ([Apriandi, 2021](#)), ( $\approx 519,64$  N.m/kg.K),  $T$  adalah temperatur biogas yang dihasilkan di dalam digester (°C), dan  $v_s$  adalah volume spesifik biogas yang dihasilkan (m<sup>3</sup>/kg).

Analisa komposisi kandungan biogas yang dihasilkan melibatkan pengukuran komposisi kandungan CH<sub>4</sub>, karbondioksida (CO<sub>2</sub>), dan hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S). Pengukuran komposisi kandungan biogas yang dihasilkan dengan menggunakan sensor gas berbasis arduino ([Apriandi, Widyaningsih, Margana, Surindra, Supriyo, & Luthfiana, 2022](#)). Sementara itu, nilai kalor biogas diukur menggunakan pendekatan seperti yang dilakukan oleh Ludington di dalam laporannya. Untuk menghitung nilai kalor biogas sangat tergantung pada jumlah kandungan CH<sub>4</sub> yang terdapat di dalam biogas tersebut ([Cuéllar & Webber, 2008; Pertiwinigrum, Wuri, Harto, Budiarto, & Gozan, 2019](#)) dengan mengikuti [Persamaan \(5\)](#):

$$E_{biogas} = LHV * V_{STP} / V_{biogas\ basah} \quad (5)$$

dimana,  $E_{biogas}$  adalah nilai kalor biogas (kJ/m<sup>3</sup>), LHV adalah *Low Heating Value*/nilai kalor bawah CH<sub>4</sub> (kJ/m<sup>3</sup>), dan  $V_{STP} / V_{biogas\ basah}$  adalah rasio volume biogas pada kondisi standar (tekanan 1 atmosfer, temperatur 0 °C) dengan volume biogas terukur (pada tekanan dan temperatur absolut). Detail estimasi nilai LHV untuk kandungan CH<sub>4</sub> yang berbeda, dan estimasi rasio  $V_{STP} / V_{biogas\ basah}$  untuk beberapa nilai temperatur dan tekanan absolut biogas yang berbeda, selengkapnya dapat dilihat di.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

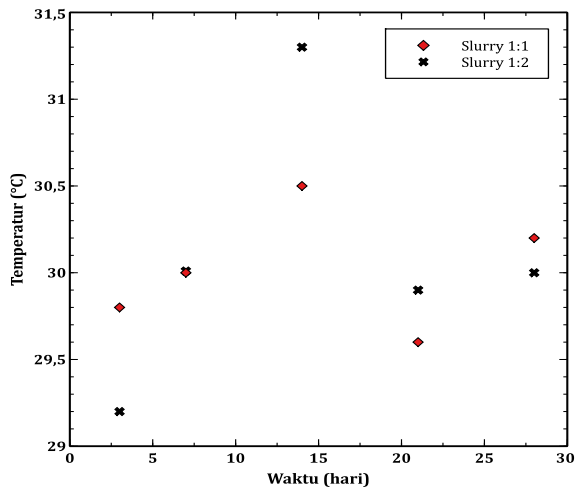
#### Hasil

Performa digester biogas secara sederhana dapat dievaluasi jika diketahui nilai dari temperatur dan tekanan biogas yang terdapat di dalam digester. Hasil pengukuran terhadap kedua variabel tersebut pada HRT yang berbeda disajikan pada [Gambar 2](#) dan [Gambar 3](#). Temperatur terukur di dalam digester nilainya berfluktuasi diantara 29,60-30,20 °C dan 29,20-31,30 °C untuk masing-masing komposisi *slurry* 1:1 dan 1:2. Sementara itu, tekanan absolut biogas yang dihasilkan di dalam digester, nilainya didekati menggunakan [Persamaan \(1\)](#), dimana, dengan HRT 3, 7, 14, 21 dan 28 hari, nilai tekanan absolut yang didapatkan berturut-turut adalah 101831,16; 102077,34; 103415,91; 104401,37; dan 104880,52 Pa untuk komposisi *slurry* 1:1. Di sisi lain, untuk *slurry* 1:2, dengan HRT yang sama, diperoleh nilai tekanan absolut berturut-turut sebesar 101556,32; 101833,07; 103015,31; 103715,30; dan 103923,31 Pa.

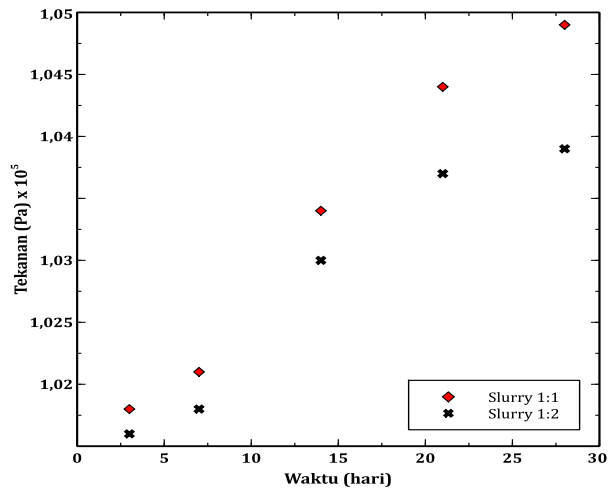
Komposisi kandungan CH<sub>4</sub> di dalam biogas yang dihasilkan disajikan pada [Gambar 4](#). Untuk komposisi *slurry* 1:1 didapatkan komposisi kandungan CH<sub>4</sub> maksimum sebesar 8600,05 ppm pada HRT 28 hari. Sementara untuk *slurry* 1:2, kandungan CH<sub>4</sub> maksimum juga diperoleh pada HRT yang sama (28 hari) sebesar 9332,67 ppm. Komposisi kandungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S di dalam biogas yang dihasilkan berturut-turut disajikan pada [Gambar 5](#) dan [Gambar 6](#). Dengan HRT 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, komposisi kandungan CO<sub>2</sub> terendah didapatkan pada HRT 28 hari yaitu masing-masing sebesar 5150,00 dan 6170,00 ppm untuk *slurry* 1:1 dan 1:2. Sedangkan komposisi kandungan H<sub>2</sub>S tertinggi untuk masing-masing *slurry* 1:1 dan 1:2 diperoleh pada HRT 21 hari yaitu berturut-turut sebesar 138,76 dan 145,41 ppm.

Persentase komposisi kandungan CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>S di dalam biogas yang dihasilkan dituangkan pada [Tabel 1](#). Dengan HRT 3, 7, 14, 21 dan 28 hari, diperoleh persentase rata-rata komposisi kandungan CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>S berturut-turut sebesar 30,4; 69,02; dan 0,49 %vol (basis volume) untuk komposisi *slurry* 1:1. Sementara itu, untuk komposisi *slurry* 1:2, besarnya persentase rata-rata komposisi kandungan CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>S berturut-turut adalah 29,89; 69,72; dan 0,39 %vol. Nilai kalor biogas yang dihasilkan dapat

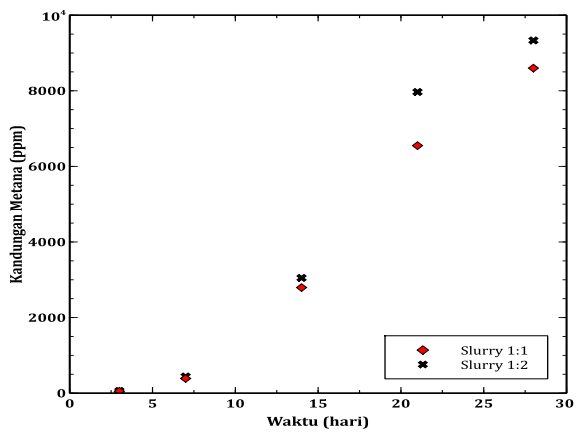
dilihat pad [Tabel 2](#). Analisis nilai kalor biogas didekati dengan menggunakan Persamaan (5) dengan mengadopsi nilai LHV dan rasio  $V_{STP}/V_{biogas}$  basah yang diajukan oleh Ludington (detail estimasi nilai LHV dan rasio  $V_{STP}/V_{biogas}$  basah dapat dilihat di.



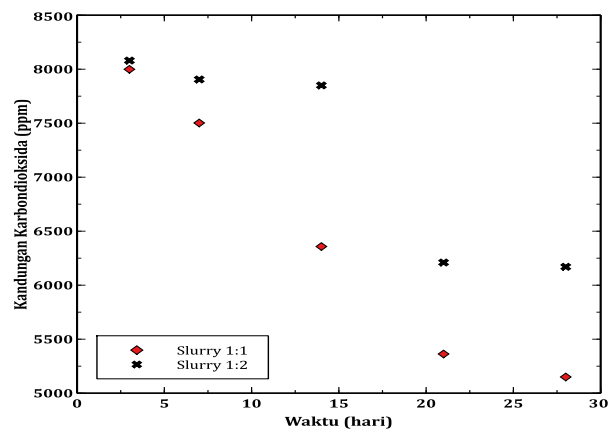
**Gambar 2.** Temperatur Operasi di Dalam Digester pada HRT yang Berbeda



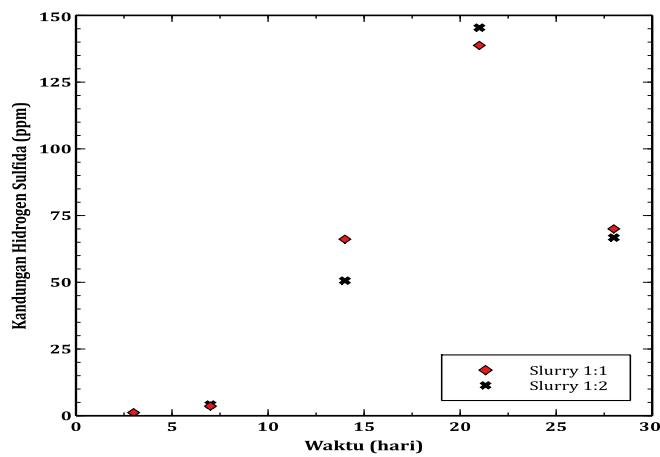
**Gambar 3.** Tekanan Biogas yang Dihasilkan pada HRT yang Berbeda



**Gambar 4.** Komposisi Kandungan CH<sub>4</sub> di dalam Biogas yang dihasilkan dengan HRT yang Berbeda



**Gambar 5.** Komposisi Kandungan CO<sub>2</sub> di dalam Biogas yang dihasilkan dengan HRT yang Berbeda



**Gambar 6.** Komposisi Kandungan H<sub>2</sub>S di dalam Biogas yang dihasilkan dengan HRT yang Berbeda

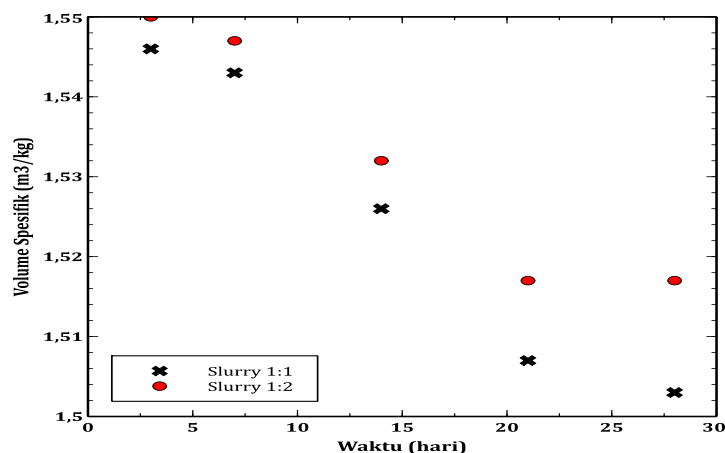
**Tabel 1.** Persentase Komposisi Kandungan CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>S di dalam Biogas yang dihasilkan dengan HRT yang Berbeda

Waktu (hari)	CH <sub>4</sub> (%vol)		CO <sub>2</sub> (%vol)		H <sub>2</sub> S (%vol)	
	Slurry 1:1	Slurry 1:2	Slurry 1:1	Slurry 1:2	Slurry 1:1	Slurry 1:2
3	0,64	0,72	99,35	99,27	0,01	0,01
7	4,93	5,30	95,02	94,66	0,05	0,05
14	30,31	27,86	68,97	71,69	0,72	0,46
21	54,35	55,63	44,50	43,35	1,15	1,02
28	62,23	59,94	37,27	39,63	0,51	0,43
<b>Rata-Rata</b>	<b>30,49</b>	<b>29,89</b>	<b>69,02</b>	<b>69,72</b>	<b>0,49</b>	<b>0,39</b>

**Tabel 2.** Nilai Kalor Biogas pada Kandungan CH<sub>4</sub> yang Berbeda

Waktu (hari)	CH <sub>4</sub> (%vol)		LHV (kJ/m <sup>3</sup> )		Nilai Kalor (kJ/m <sup>3</sup> )	
	Slurry 1:1	Slurry 1:2	Slurry 1:1	Slurry 1:2	Slurry 1:1	Slurry 1:2
3	0,64	0,72	423,92	453,00	368,39	393,66
7	4,93	5,30	1984,66	2115,89	1726,67	1836,60
14	30,31	27,86	11095,40	10368,46	9752,86	9030,93
21	54,35	55,63	20027,58	20519,22	17884,63	18180,03
28	62,23	59,94	22962,73	22093,20	21745,71	19596,67

Salah satu parameter pengujian performansi digester biogas adalah mengukur besarnya volume spesifik biogas yang dihasilkan. Secara detail, besarnya volume spesifik biogas yang dihasilkan pada HRT 3, 7, 14, 21, dan 28 hari ditampilkan pada Gambar 7, dimana besarnya nilai volume spesifik biogas yang dihasilkan tersebut didekati dengan menggunakan Persamaan (2)-(4).



**Gambar 7.** Volume Spesifik Biogas yang dihasilkan pada HRT yang Berbeda

**Pembahasan**

Tinggi-rendahnya temperatur operasi digester merupakan parameter yang memberikan pengaruh signifikan terhadap proses produksi biogas menggunakan digester anaerobik. Fluktuasi nilai temperatur operasi pada HRT 3, 7, 14, 21, dan 28 hari seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 disebabkan adanya aktivitas mikrobiologi yang menandakan terjadinya peningkatan populasi mikroorganisme pengurai yang berperan di dalam proses dekomposisi substrat yang dimasukkan ke digester. Berdasarkan hasil pengukuran, fluktuasi kenaikan temperatur tersebut, baik pada digester dengan slurry 1:1 dan 1:2, berkisar 1-3 °C terhadap suhu lingkungan (±28 °C). Temperatur rata-rata operasi digester masing-masing komposisi slurry pada penelitian ini berturut-turut sebesar 30,01 °C dan 30,08 °C (untuk slurry 1:1 dan 1:2) mengindikasikan bahwa kedua digester beroperasi pada kondisi mesophilic. Dilaporkan bahwa, kondisi operasi dekomposisi anaerobik umumnya terjadi pada tiga rentang posisi temperatur, yaitu: psychrophilic (< 25 °C), mesophilic (25–45 °C), dan thermophilic (45-70 °C) (Trisakti, Irvan, Taslim, & Turmuzi, 2017). Oleh karenanya, rentang temperatur yang terukur pada penelitian ini (30,01-30,08 °C) masih pada rentang temperatur operasi digester anaerobik yang dapat diterima. Batas minimum temperatur operasi pada

rentang *mesophilic* guna mengoptimalkan proses dekomposisi anaerobik pada proses pembuatan biogas sebesar 30 °C (Chae, Jang, Yim, & Kim, 2008).

Terdapat fenomena menarik terkait fluktuasi temperatur digester pada variasi komposisi *slurry* yang berbeda (seperti terlihat pada Gambar 2), dimana terlihat bahwa terjadi peningkatan dan/atau penurunan temperatur digester yang tidak beraturan. Pada awal proses dekomposisi anaerobik, yaitu pada proses hidrolisis, *slurry* dengan perbandingan 1:1 menghasilkan temperatur digester yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *slurry* 1:2. Tren tersebut diakibatkan karena pada *slurry* 1:1 memiliki beban hidrolisis yang lebih besar dan berdampak pada laju hidrolisis yang lebih rendah yang secara langsung meningkatkan temperatur proses (Nie et al., 2021; Tian et al., 2018). Fenomena tersebut memiliki kesamaan dengan yang dilaporkan oleh peneliti lain yang menyebutkan bahwa fluktuasi temperatur yang tidak beraturan selama proses hidrolisis disebabkan oleh aktivitas enzim ekstraseluler dan berhubungan erat dengan beban hidrolisis dan laju hidrolisis. Pada proses selanjutnya, yaitu pada kisaran tahap asidogenesis yang ditandai dengan terbentuknya H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>, temperatur digester dengan komposisi *slurry* 1:2 lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur digester dengan komposisi *slurry* 1:1. Hal tersebut dimungkinkan karena adanya peningkatan kandungan protein dan karbohidrat terlarut yang diakibatkan oleh laju hidrolisis yang lebih tinggi

Penggunaan digester yang terbuat dari *drum* plastik tanpa dilengkapi dengan isolator sangat mungkin menjadi penyebab kenaikan temperatur di dalam digester tidak signifikan, dan temperatur operasi digester pada proses pembuatan biogas cenderung stabil mendekati temperatur lingkungan. Namun, kenaikan temperatur dengan kisaran 1-3 °C masih berada pada kisaran normal dan memberikan stabilitas selama proses dengan tingkat perubahan temperatur yang tidak terlalu ekstrim. Karena idealnya, pada proses dekomposisi anaerobik dengan kondisi operasi standar, kenaikan temperatur ±2 °C (Franqueto, da Silva, & Konig, 2020). Semakin tinggi temperatur operasi pada sebuah digester anaerobik berdampak pada semakin cepat proses degradasi dari substrat yang dimasukkan ke digester. Sebagaimana yang dilaporkan banyak peneliti, meningkatnya degradasi substrat seiring meningkatnya temperatur menyebabkan proses pembuatan biogas, khususnya dari aspek waktu, menjadi lebih optimal (Deepanraj, Sivasubramanian, & Jayaraj, 2015; Franqueto et al., 2020; Ramaraj & Unpaprom, 2016). Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa, fluktuasi kenaikan dan/atau penurunan temperatur yang terlalu ekstrim dan secara tiba-tiba, sering menyebabkan kegagalan pada proses pembuatan biogas. Hal ini dikarenakan kenaikan temperatur secara tiba-tiba mengakibatkan kematian bakteri-bakteri pengurai khususnya bakteri *metanogen* yang sangat sensitif terhadap perubahan temperature (Franqueto et al., 2020).

Selain menyebabkan fluktuasi temperatur, aktivitas mikroba pada proses dekomposisi anaerobik di dalam digester juga mengakibatkan kenaikan tekanan (Gambar 3). Kenaikan tekanan ini sebagai pertanda bahwa biogas sudah mulai dihasilkan. Hal ini terlihat dari hasil pengamatan pada HRT 3, 7, 14, 21 dan 28 hari proses dekomposisi anaerobik substrat berbahan dasar kotoran sapi di dalam digester, didapatkan tren peningkatan volume biogas dengan signifikansi kenaikan yang berbeda-beda untuk masing-masing HRT (Gambar 7). Tren peningkatan volume biogas yang dihasilkan pada penelitian ini, terkonfirmasi sama dengan yang dihasilkan oleh banyak peneliti sebelumnya. Dilaporkan bahwa, peningkatan produksi kumulatif biogas yang dihasilkan di dalam proses dekomposisi anaerobik, linier dengan lamanya waktu tinggal optimum substrat (HRT) di dalam digester (Alam et al., 2022; Meyer, Okudoh, & van Rensburg, 2022; Soeprijanto, Mawaddah, Tauchid, Fatullah, & Agustina, 2019; Vanegas & Bartlett, 2013). Di sisi lain, terlihat jelas bahwa, konversi senyawa kimia yang terdapat di dalam substrat kotoran sapi melalui proses fermentasi anaerobik (baik pada *slurry* 1:1 maupun 1:2) berlangsung cepat. Terbukti pada HRT 3 hari untuk *slurry* 1:1 dan 1:2, tekanan di dalam digester terukur masing-masing sebesar 101831,16 dan 101556,32 Pa. Sejalan dengan itu, Vanegas dan Barlett di dalam laporannya (Vanegas & Bartlett, 2013) menyatakan bahwa durasi fermentasi anaerobik untuk menghasilkan biogas awal sangat tergantung pada jenis substrat yang dimasukkan ke digester. Umumnya, biogas mulai terbentuk pada hari ke tiga sejak dimulainya proses fermentasi anaerobik (Vanegas & Bartlett, 2013) dan akan stabil pada HRT 25-45 hari (Dareiotti & Kornaros, 2014; Haryanto et al., 2018).

Investigasi terkait dengan pengaruh HRT terhadap komposisi biogas di dalam penelitian ini melibatkan komposisi CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>S seperti yang ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6. Untuk HRT yang berbeda, tren peningkatan dan/atau pengurangan komposisi kandungan masing-masing gas yang terdapat di dalam biogas, secara signifikan dipengaruhi oleh aktivitas mikrobiologi yang berlangsung selama proses dekomposisi anaerobik. Proses dekomposisi anaerobik tersebut akan melalui beberapa tahapan utama pencernaan oleh bakteri pengurai, diantaranya fase hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis (Guendouz, Rezzaz-Yazid, Laib, & Sadaoui, 2022; Wiranti, Suniasih, & Darsana, 2017), dengan masing-masing tahapan diperankan oleh jenis bakteri pengurai yang berbeda. Bakteri-bakteri *fermentatif* akan berperan lebih banyak pada fase hidrolisis, sementara pada fase asidogenesis dan metanogenesis masing-masing diperankan oleh bakteri *acetogenik* dan bakteri

*metanogen* (Victor, Shajin, Roshni, & Asha, 2014). Pada HRT 3-7 hari, tren komposisi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> yang dihasilkan dari penelitian ini berbanding terbalik satu dengan lainnya, dimana, dari Tabel 1 terkonfirmasi bahwa, perbandingan persentase rata-rata komposisi kandungan gas yang dihasilkan untuk *slurry* 1:1 dan 1:2 adalah >85 %vol untuk CO<sub>2</sub> dan <6 %vol untuk CH<sub>4</sub>. Hal tersebut dikarenakan pada tahap awal proses dekomposisi anaerobik di dalam digester, bakteri *fermentatif* dan *acetogenik* secara metabolik lebih aktif bila dibandingkan dengan bakteri *metanogen*. Kondisi ini mengakibatkan komposisi kandungan CO<sub>2</sub> di dalam biogas yang dihasilkan lebih dominan daripada gas CH<sub>4</sub> maupun H<sub>2</sub>S. Tren dominasi kandungan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan di awal proses produksi biogas pada penelitian ini (Gambar 5), sama dengan tren komposisi CO<sub>2</sub> yang dilaporkan oleh Vanegas dan Barlett di dalam laporannya yaitu pada tiga hari pertama, gas CO<sub>2</sub> yang terbentuk berkisar antara 50-80% (Vanegas & Bartlett, 2013).

Fase berikutnya dari proses dekomposisi anaerobik terjadi pada HRT 7-21 hari. Hasil investigasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada fase ini terjadi peningkatan kandungan CH<sub>4</sub> yang signifikan (baik itu pada *slurry* 1:1 maupun 1:2) dengan kisaran rata-rata ±10-50 %vol CH<sub>4</sub> yang berdampak pada pengurangan kandungan CO<sub>2</sub> (Tabel 1). Fase yang disebut sebagai fase metanogenesis ini merupakan fase dimana senyawa asetat, CO<sub>2</sub> dan hidrogen (H<sub>2</sub>) yang terbentuk pada fase sebelumnya (fase asidogenesis) dikonversi oleh bakteri *metanogen* menjadi CH<sub>4</sub> (Vanegas & Bartlett, 2013). Pada penelitian ini, keberhasilan dari fase metanogenesis tidak terlepas dari temperatur operasi dekomposisi anaerobik yang cenderung konstan dengan kisaran rata-rata temperatur operasi 30,01-30,08 °C. Perlu diketahui, stabilitas temperatur operasi akan berkontribusi terhadap stabilitas sistem pencernaan dan keberlangsungan komunitas dari bakteri *metanogen*. Hal ini disebabkan karena, bakteri *metanogen* sangat sensitif terhadap fluktuasi temperatur operasi yang cenderung ekstrim (Franqueto et al., 2020; Vanegas & Bartlett, 2013). Tren peningkatan kandungan CH<sub>4</sub> dan berkurangnya kandungan CO<sub>2</sub> dimulai pada HRT 7 hari di dalam penelitian ini memiliki tren yang sama dengan yang dilaporkan oleh beberapa peneliti sebelumnya, dimana tren peningkatan kandungan CH<sub>4</sub> yang diikuti penurunan kandungan CO<sub>2</sub> dimulai pada hari ke tujuh (HRT 7 hari) dan akan stabil pada hari ke 30 (HRT 30 hari) (Chae et al., 2008; Gao, Leung, Qin, & Liao, 2011; L. I. Ramadhani, Damayanti, Sudibyo, Azis, & Budhijanto, 2020; Ramaraj & Unpaprom, 2016; Vanegas & Bartlett, 2013). Di sisi lain, komposisi H<sub>2</sub>S yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat di dalam proses dekomposisi anaerobik (Vanegas & Bartlett, 2013) akan meningkat seiring dengan waktu produksi (HRT). Kondisi ini cenderung sama dengan yang dihasilkan di dalam penelitian ini (Gambar 6), dimana akumulasi kandungan H<sub>2</sub>S (pada *slurry* 1:1 dan 1:2) semakin meningkat dengan kandungan tertinggi didapatkan pada HRT 21 hari berturut-turut sebesar 138,76 dan 145,41 ppm dengan persentase rata-rata keseluruhan pada HRT 28 hari sebesar 0,49 dan 0,39 %vol H<sub>2</sub>S. Umumnya, kandungan H<sub>2</sub>S di dalam biogas <1 %vol. Nilai ini merupakan jumlah yang kecil bila dibandingkan dengan komposisi gas lainnya secara keseluruhan. Akan tetapi, keberadaan H<sub>2</sub>S di dalam biogas, khususnya pada aplikasi biogas untuk mesin-mesin pembakaran dalam, perlu diperhatikan (Apriandi, Widyaningsih, et al., 2022). Hal ini disebabkan karena H<sub>2</sub>S merupakan gas yang bersifat korosif yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan (Nindhia, Surata, Atmika, Negara, & Artana, 2015; Nindhia, Surata, Swastika, & Widiana, 2016). Untuk pengoperasian pada mesin-mesin konvensional, kandungan H<sub>2</sub>S disarankan <700 ppm (Vanegas & Bartlett, 2013).

Komposisi kandungan gas yang terdapat di dalam biogas (khususnya CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>) akan berpengaruh secara signifikan terhadap kualitas biogas. Salah satu indikator yang umum dijadikan tolak ukur dari kualitas biogas adalah nilai kalor biogas. Nilai kalor biogas akan tergantung dari seberapa besar kandungan CH<sub>4</sub> yang terdapat di dalam biogas tersebut. Mengikuti persamaan umum reaksi pembakaran untuk CH<sub>4</sub>, dimana CH<sub>4</sub> + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O, semakin mempertegas bahwa nilai kandungan CH<sub>4</sub> di dalam biogas yang semakin besar akan berimplikasi terhadap semakin tingginya nilai kalor yang dihasilkan. Di dalam penelitian ini, nilai kalor biogas dianalisis menggunakan pendekatan yang diajukan oleh Ludington (Persamaan 5) dengan mempertimbangkan dampak dari kandungan uap air (H<sub>2</sub>O) yang terdapat di dalam biogas. Kandungan H<sub>2</sub>O ini akan berdampak pada nilai densitas ( $\rho$ ) biogas yang secara tidak langsung akan berdampak pada LHV biogas. Faktor koreksi berupa rasio perbandingan volume biogas pada kondisi standar (tekanan 1 atmosfer, temperatur 0 °C) dengan volume biogas terukur (pada tekanan dan temperatur absolut) ( $V_{STP}/V_{\text{biogas basah}}$ ) ikut dilibatkan di dalam perhitungan. Didapatkan nilai kalor biogas tertinggi untuk masing-masing digester dengan komposisi *slurry* 1:1 dan 1:2 sebesar 21745,71 dan 19596,67 kJ/m<sup>3</sup> pada HRT 28 hari dengan komposisi kandungan CH<sub>4</sub> masing-masing sebesar 62,23 dan 59,94 %vol. Dari hasil investigasi yang tergambarkan pada Tabel 2, jelas terlihat bahwa HRT yang berbeda akan memberikan komposisi kandungan CH<sub>4</sub> yang berbeda, dan memberikan kecenderungan nilai kalor biogas yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya waktu tinggal (HRT) substrat di dalam digester. Nilai HRT yang memberikan komposisi CH<sub>4</sub> dan nilai kalor biogas tertinggi dapat dijadikan acuan di dalam merancang digester biogas skala besar dan beroperasi jangka panjang untuk berbagai tipe digester yang berbeda, dengan melibatkan nilai HRT tersebut ke dalam perhitungan perancangan anaerobik digester guna mendapatkan proses dekomposisi substrat yang optimal.



#### 4. SIMPULAN

Identifikasi proses dekomposisi anaerobik pada substrat kotoran sapi segar menggunakan dua buah digester skala kecil yang terbuat dari *drum* plastik, kapasitas operasi masing-masing 37,5 L *slurry*, dengan variasi perbandingan *slurry* 1:1 dan 1:2 (untuk kotoran sapi segar dan air) sudah dilakukan. Secara keseluruhan, proses tersebut menghasilkan kondisi operasi, kuantitas dan kualitas biogas yang tidak terlalu jauh berbeda. Kondisi operasi, kuantitas, dan kualitas biogas masing-masing direpresentasikan dengan nilai temperatur terukur, tekanan dan volume spesifik, serta nilai kalor biogas. Di sisi lain, besarnya nilai kalor biogas yang dapat dihasilkan, tergantung pada seberapa besar kandungan CH<sub>4</sub> yang terdapat di dalam biogas. Hasil investigasi pada HRT 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, digester beroperasi pada temperatur *mesophilic* pada rentang rata-rata temperatur 30,01-30,08 °C, dan tekanan tertinggi 104880,52 Pa yang didapatkan pada hari ke 28 (HRT 28 hari) proses produksi biogas. Nilai kalor tertinggi dihasilkan pada komposisi CH<sub>4</sub> sebesar 62,23 %vol pada HRT 28 hari, yaitu sebesar 21745,71 kJ/m<sup>3</sup>. Rentang temperatur rata-rata 30,01-30,08 °C memberikan stabilitas proses pada sistem produksi biogas. Persentase kandungan CH<sub>4</sub> yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya waktu tinggal hidrolik (HRT) substrat baik untuk proses dekomposisi anaerobik pada *slurry* 1:1 maupun 1:2. Hal ini berarti, nilai kalor biogas juga mengalami peningkatan dengan bertambahnya HRT. Semakin tinggi kandungan CH<sub>4</sub> di dalam biogas, maka semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Hasil ini nantinya dapat dijadikan acuan di dalam merancang digester biogas yang efektif, yang beroperasi jangka panjang dan dalam skala besar serta bahan baku tersedia setiap harinya dengan mengintegrasikan nilai HRT ke dalam perhitungan perancangan.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dukungan peralatan dari Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, dan juga *Applied Thermofluids Laboratory*, Rowosari, Kota Semarang.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M., Sultan, M. B., Mehnaz, M., Fahim, C. S. U., Hossain, S., & Anik, A. H. (2022). Production of biogas from food waste in laboratory scale dry anaerobic digester under mesophilic condition. *Energy Nexus*, 7, 100126. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100126>.
- Anaswara, M. G. (2015). Design and Fabrication of Low Cost Biogas Digester Using Poultry Waste and Pig Manure. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 1923–1930. Retrieved from <https://www.irjet.net>.
- Apriandi, N. (2021). Analisa Biodigester Polyethylene Skala Rumah Tangga Dengan Memanfaatkan Limbah Organik Sebagai Sumber Penghasil Biogas. *Orbith*, 17(1), 23–29.
- Apriandi, N., Sumarno, F. G., An-Nizhami, A., Luthfiana, N. T. A., Kholifah, N. N., A'tohillah, M. K., & Prakoso, R. G. A. (2022). Karakterisasi Alat Pengering Tipe Kabinet Berbahan Bakar Liquefied Petroleum Gas (LPG) Dengan Penambahan Low Cost Material Heat Storage (LCMHS). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 17(2), 281–288. Retrieved from <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>.
- Apriandi, N., Widyaningsih, W. P., Margana, Surindra, M. D., Supriyo, & Luthfiana, N. T. A. \. (2022). Biogas Desulfurization Using Iron Gram Waste Machining Practicum Process at The Departement of Mechanical Engineering, Pliteknik Negeri Semarang. *Eksergi*, 18(3), 182–185. <https://doi.org/10.3390/catal10050521>.
- Atmodjo, M. C. T., Rosadi, D., & Hardoyo. (2014). Perancangan Tangki Biogas Portabel Sebagai Sarana Produksi Energi Alternatif di Pedesaan. *Widyariset*, 17(3), 409–416.
- Chae, K. J., Jang, A., Yim, S. K., & Kim, I. S. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 99(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>.
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H. P., Huba, E. M., Gao, R., & Wang, X. (n.d.). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.035>.
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H. P., Huba, E. M., Gao, R., & Wang, X. (2014). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.035>.
- Chibueze, U., Okorie, N., Oriaku, O., Isu, J., & Peters, E. (2017). The Production of Biogas Using Cow Dung and Food Waste. *International Journal of Materials and Chemistry*, 7(2), 21–24. <https://doi.org/10.5923/j.ijmc.20170702.01>.
- Cuéllar, A. D., & Webber, M. E. (2008). Cow Power: The Energy and Emissions Benefits of Converting Manure

- to Biogas. *Environmental Research Letters*, 3(3), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/3/034002>.
- Dareioti, M. A., & Kornaros, M. (2014). Effect of hydraulic retention time (HRT) on the anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes in a two-stage CSTR system. *Bioresource Technology*, 167, 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.045>.
- Dębowski, M., Kazmierowicz, J., Zieliński, M., & Bartkowska, I. (2022). Co-Fermentation of Microalgae Biomass and Miscanthus × giganteus Silage—Assessment of the Substrate, Biogas Production and Digestate Characteristics. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147291>.
- Deepanraj, B., Sivasubramanian, V., & Jayaraj, S. (2015). Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 121, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.051>.
- Ejiko, S. O., Adewuyi, R. A., & Filani, O. A. (2019). Development of an House Hold Biogas Digester. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering*, 5(4), 23–32. <https://doi.org/10.20431/2454-9711.0504003>.
- Franqueto, R., da Silva, J. D., & Konig, M. (2020). Effect of Temperature Variation on Codigestion of Animal Waste and Agricultural Residue for Biogas Production. *Bioenergy Research*, 13(2), 630–642. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10049-y>.
- Gao, W. J., Leung, K. T., Qin, W. S., & Liao, B. Q. (2011). Effects of temperature and temperature shock on the performance and microbial community structure of a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 102(19), 8733–8740. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.095>.
- González, R., Peña, D. C., & Gómez, X. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/app12178884>.
- Guendouz, N., Rezzaz-Yazid, H., Laib, S., & Sadaoui, Z. (2022). Evaluation of the biogas potential of a lignocellulosic residue. *Water Science and Technology*, 84(8), 1827–1838. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.350>.
- Haryanto, A., Triyono, S., & Wicaksono, N. H. (2018). Effect of hydraulic retention time on biogas production from cow dung in a semi continuous anaerobic digester. *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2), 93–100. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.2.93-100>.
- Jekayinfa, S. O., Adebayo, A. O., Ogunkunle, O., Kareem, S. A., Olaleye, C., & Okoya, J. (2014). Design and Construction of a Metallic Bio-digester for The Production of Biogas From Cow Dung. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 8(2), 182–187.
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy*, 2022, 1–43. <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>.
- Kocer, A., Yilmaz, A., Ünvar, S., Koçer, A., & Aygün, B. (2018). Factors Affecting the Production of Biogas. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9(5).
- Maluegha, B. L., Ulaan, T. V. Y., & Umboh, M. K. (2018). Perancangan Digester Untuk Menghasilkan Biogas Dari Kotoran Ternak Babi Di Desa Rumoong Bawah Kabupaten Minahasa Selatan. *Jurnal Tekno Mesin*, 4(2), 118–122.
- Meyer, G., Okudoh, V., & van Rensburg, E. (2022). A rumen based anaerobic digestion approach for lignocellulosic biomass using barley straw as feedstock. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.05.005>.
- Musa, M. A., & Idrus, S. (2020). Effect of hydraulic retention time on the treatment of real cattle slaughter house wastewater and biogas production from HUASB reactor. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020490>.
- Nie, E., He, P., Zhang, H., Hao, L., Shao, L., & Lü, F. (2021). How does temperature regulate anaerobic digestion? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111453>.
- Nindhia, T. G. T., Surata, I. W., Atmika, I. K. A., Negara, D. N. K. P., & Artana, I. P. G. (2015). Processing Carbon Rod from Waste of Zing-Carbon Battery for Biogas Desulfurizer. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(2), 119–122. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.179>.
- Nindhia, T. G. T., Surata, I. W., Swastika, I. D. G. P., & Widiana, P. (2016). Processing zinc from waste of used zinc-carbon battery with natrium chloride (NaCl) for biogas desulfurizer. *Key Engineering Materials*, 705, 368–373. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.705.368>.
- Nwankwo, C. S., Eze, J. I., & Okoyeuzu, C. (2017). Design and fabrication of 3.60 m3 household plastic bio digester loaded with kitchen waste and cow dung for biogas generation. *Scientific Research and Essays*, 12(14), 130–141. <https://doi.org/10.5897/sre2017.6516>.
- Obileke, K. C., Onyeaka, H., & Nwokolo, N. (2021). Materials for the design and construction of household

- biogas digesters for biogas production: A review. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 3761–3779. <https://doi.org/10.1002/er.6120>.
- Pertiwinigrum, A., Wuri, M. A., Harto, A. W., Budiarto, R., & Gozan, M. (2019). Heating Value Enhancement by Biogas Purification Using Natural Zeolite and Rice Straw-Based Biochar. *International Journal of GEOMATE*, 16(55), 80–85. <https://doi.org/10.21660/2019.55.4715>.
- Ramadhani, K., & Azis, Z. (2020). Efektivitas Model Pembelajaran Tipe Team Assisted Individualization (TAI) Terhadap Hasil Belajar Matematika Pada Siswa SMK PAB 2 Helvetia Medan T.P 2019/2020. *Journal Mathematics Education Sigma [JMES]*, 1(1). <https://doi.org/10.30596/jmes.v1i1.4025>.
- Ramadhani, L. I., Damayanti, S. I., Sudiby, H., Azis, M. M., & Budhijanto, W. (2020). The impact of hydraulic retention time on the biomethane production from palm oil mill effluent (POME) in twostage anaerobic fluidized bed reactor. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1), 11–16. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.20639>.
- Ramaraj, R., & Unpaprom, Y. (2016). Effect of temperature on the performance of biogas production from Duckweed Bioethanol production View project Feasibility of Biodiesel Production from Freshwater Macroalgae View project Effect of temperature on the performance of biogas production from D. *In Chemistry Research Journal*, 1(1).
- Shi, X. S., Dong, J. J., Yu, J. H., Yin, H., Hu, S. M., Huang, S. X., & Yuan, X. Z. (2017). Effect of Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Wheat Straw in the Semicontinuous Continuous Stirred-Tank Reactors. *BioMed Research International*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2457805>.
- Soeprijanto, Mawaddah, J. I., Tauchid, R. W., Fatullah, A. R., & Agustina, S. (2019). Biogas Production from Canteen Wastes Using a Vertical Anaerobic Digester. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*, (pp. 1–6).
- Sunaryo. (2014). Rancang Bangun Reaktor Biogas Untk Pemanfaatan Limbah Kotoran Ternak Sapi di Desa Limbangan Kabupaten Banjarnegara. *Jurnal PPKM UNSIQ*, 1, 21–30.
- Tian, G., Yang, B., Dong, M., Zhu, R., Yin, F., Zhao, X., ... Cui, X. (2018). The effect of temperature on the microbial communities of peak biogas production in batch biogas reactors. *Renewable Energy*, 123, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.119>.
- Trisakti, B., Irvan, M., Taslim, & Turmuzi, M. (2017). Effect of temperature on methanogenesis stage of two-stage anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) into biogas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 206(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012027>.
- Vanegas, C., & Bartlett, J. (2013). Anaerobic digestion of laminaria digitata: The effect of temperature on biogas production and composition. *Waste and Biomass Valorization*, 4(2), 509–515. <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9181-z>.
- Victor, R., Shajin, S., Roshni, R. M., & Asha, S. R. (2014). Augmentative Invention of Biogas from the Agronomic Wastes Using Facultative Anaerobic Bacterial Strain. *International Journal of Current Microbiology and Allied Sciences*, 3(4), 556–564.
- Wiranti, N. P. D., Suniasih, N. W., & Darsana, I. W. (2017). Pengaruh Model Pembelajaran Student Facilitator and Explaining Berbantuan Peta Konsep Terhadap Kompetensi Pengetahuan Ipa Siswa. *Journal of Education Technology*, 1(3), 204. <https://doi.org/10.23887/jet.v1i3.12506>.
- Yasar, A., Nazir, S., Rasheed, R., Tabinda, A. B., & Nazar, M. (2017). Economic review of different designs of biogas plants at household level in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.128>.