

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini menghasilkan data berupa kadar metana, volume biogas, rasio C/N sebelum dan setelah fermentasi, pH dan suhu sebelum serta setelah fermentasi. Selain itu, penghitungan jumlah bakteri pada bahan baku kompos dan kotoran sapi juga dilakukan. Penghitungan tersebut dilakukan untuk mengetahui jumlah bakteri awal yang terkandung dalam substrat sebelum ditambahkan dengan konsorsium bakteri hidrolitik. Bahan baku kompos yang digunakan dalam penelitian ini mengandung bakteri aerob dengan jumlah $3,8 \times 10^{10}$ CFU/mL dan bakteri anaerob dengan jumlah $3,3 \times 10^4$ CFU/mL, sedangkan kotoran sapi mengandung bakteri aerob dengan jumlah $2,6 \times 10^7$ CFU/mL, serta bakteri anaerob dengan jumlah $1,1 \times 10^6$ CFU/mL. Kemudian pengukuran OD dan jumlah bakteri pada konsorsium bakteri hidrolitik yang ditambahkan pada substrat juga dilakukan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui jumlah bakteri-bakteri tersebut pada OD yang sama yaitu sekitar 0,2. Jumlah masing-masing bakteri pada setiap 1 mL kultur cair ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai OD dan jumlah bakteri (CFU/mL) *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas* sp., *Lactobacillus plantarum*, *Cellulomonas* sp., *Cellvibrio* sp., *Cytophaga* sp. dan *Acetobacter aceti* dalam kultur cair

Jenis Bakteri	Nilai OD	Jumlah Bakteri (CFU/mL)
<i>Bacillus subtilis</i>	0,24	$3,5 \times 10^{10}$
<i>Bacillus licheniformis</i>	0,21	$8,8 \times 10^{11}$
<i>Pseudomonas</i> sp.	0,20	$3,8 \times 10^{17}$
<i>Lactobacillus plantarum</i>	0,20	$5,9 \times 10^{10}$
<i>Cellulomonas</i> sp.	0,21	$2,6 \times 10^{10}$
<i>Cellvibrio</i> sp.	0,20	$6,4 \times 10^{10}$
<i>Cytophaga</i> sp.	0,20	$4,6 \times 10^9$
<i>Acetobacter aceti</i>	0,20	$8,3 \times 10^{10}$

Perbedaan jumlah bakteri pada OD sekitar 0,2 dikarenakan adanya perbedaan pada bentuk dan ukuran bakteri. Hasil produksi biogas dengan penambahan konsorsium bakteri hidrolitik 10 % dari perlakuan variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi dan kombinasi keduanya diuraikan masing-masing sebagai berikut.

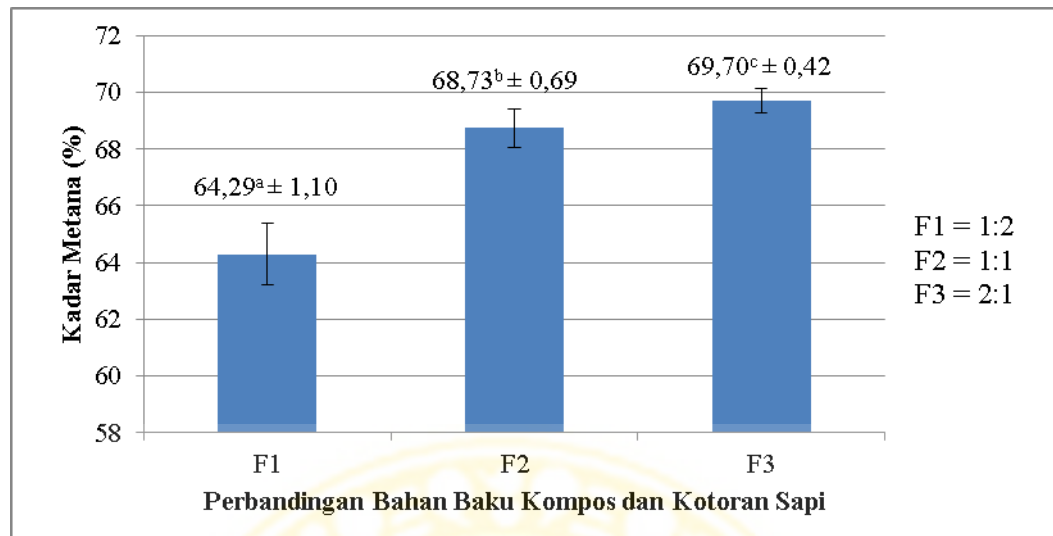
4.1.1 Variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi pada produksi biogas

Produksi biogas dalam penelitian ini ditinjau dari kualitas (kadar metana dalam biogas) dan kuantitas (volume biogas). Rata-rata kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rata-rata kadar metana (%) dan volume biogas (mL) pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

Perbandingan Bahan Baku Kompos dan Kotoran Sapi (F)	Rata-Rata Kadar Metana (%)	Rata-Rata Volume Biogas (mL)
F ₁ (1:2)	64,29 ^a ± 1,10	885,89 ± 263,05
F ₂ (1:1)	68,73 ^b ± 0,69	947,78 ± 163,67
F ₃ (2:1)	69,70 ^c ± 0,42	899,82 ± 182,83

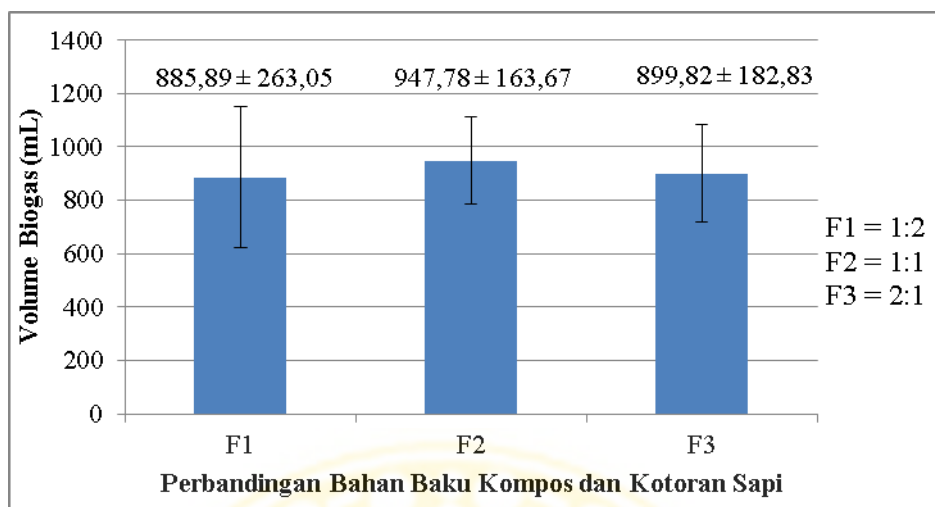
Data kadar metana dan volume biogas dalam biogas yang dihasilkan pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi secara lengkap disajikan pada lampiran 1 dan 2. Data tersebut diuji normalitasnya menggunakan *One Sample Kolmogorov-Smirnov* dan diuji homogenitasnya menggunakan *Levene Test*. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa data kadar metana berdistribusi normal dan homogen (Lampiran 5) sedangkan volume biogas berdistribusi normal dan tidak homogen (Lampiran 5). Berdasarkan hasil tersebut, data dapat dilanjutkan dengan uji Analisis Varians (ANAVA) Dua Arah dengan derajat signifikansi 5 %. Hasil uji tersebut menunjukkan signifikansi 0,000 (lebih kecil dari 0,05) untuk kadar metana dan 0,777 untuk volume biogas. Hal ini menunjukkan bahwa variasi perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi memberikan hasil yang berbeda pada kadar metana dalam biogas, tetapi tidak memberikan hasil berbeda pada volume biogas. Untuk mengetahui adanya signifikansi antar perlakuan terhadap kadar metana, maka dilanjutkan dengan uji *Duncan*. Dari uji tersebut dapat diketahui adanya beda signifikan kadar metana pada semua perlakuan F₁, F₂, dan F₃ (Lampiran 5). Hasil tersebut ditampilkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kadar metana pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi. Huruf yang berbeda di belakang nilai menunjukkan beda signifikan ($p < 0,05$) dari hasil uji *Duncan* dengan derajat signifikansi 5 %

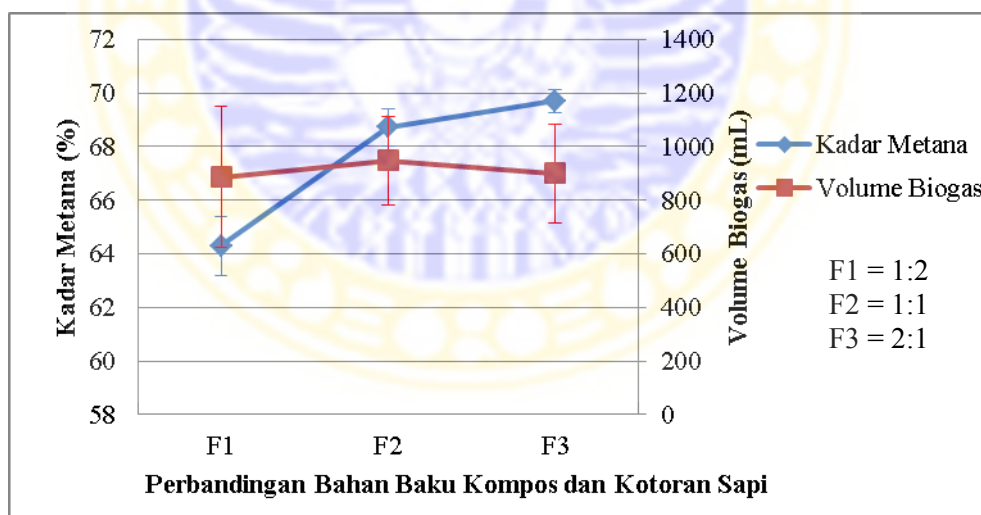
Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan rata-rata kadar metana pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi dari F₁, F₂, dan F₃. Perlakuan F₃ memberikan rata-rata kadar metana yang tertinggi sebesar 69,70 %.

Selain itu, volume biogas pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi dapat dilihat pada Gambar 4.2.



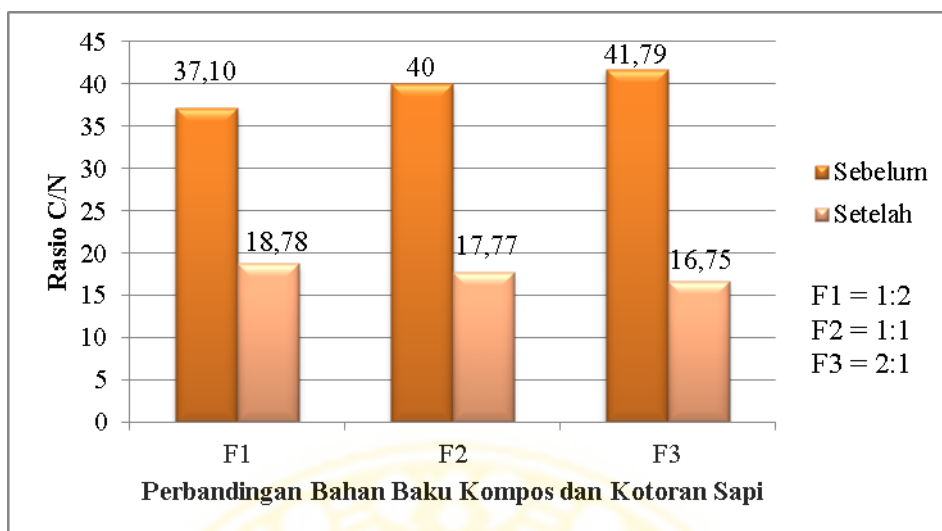
Gambar 4.2 Volume biogas pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

Volume biogas tertinggi dihasilkan oleh perlakuan F_2 yaitu sebanyak 947,78 mL. Jika dihubungkan antara kadar metana dengan volume biogas, maka didapatkan grafik sebagai berikut.



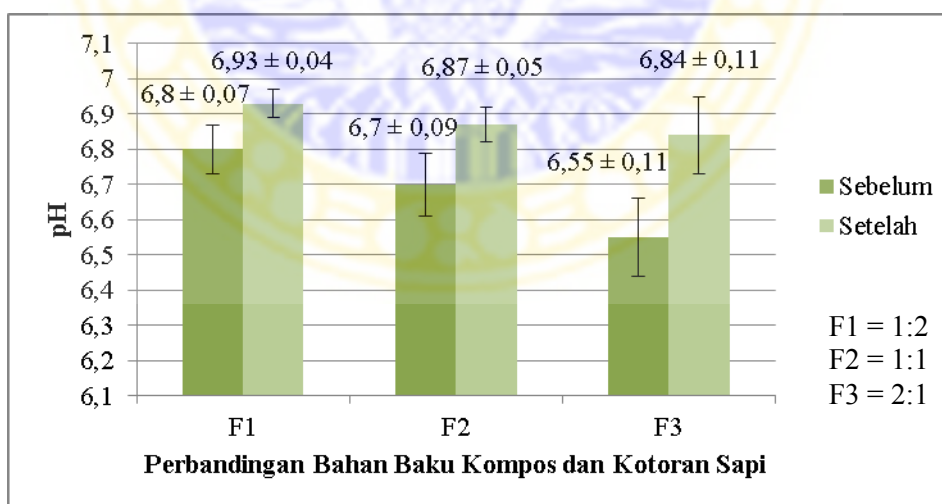
Gambar 4.3 Hubungan kadar metana dan volume biogas pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

Produksi biogas juga dapat dikaitkan dengan rasio C/N. Rasio C/N sebelum dan setelah fermentasi pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi ditampilkan pada Gambar 4.4.

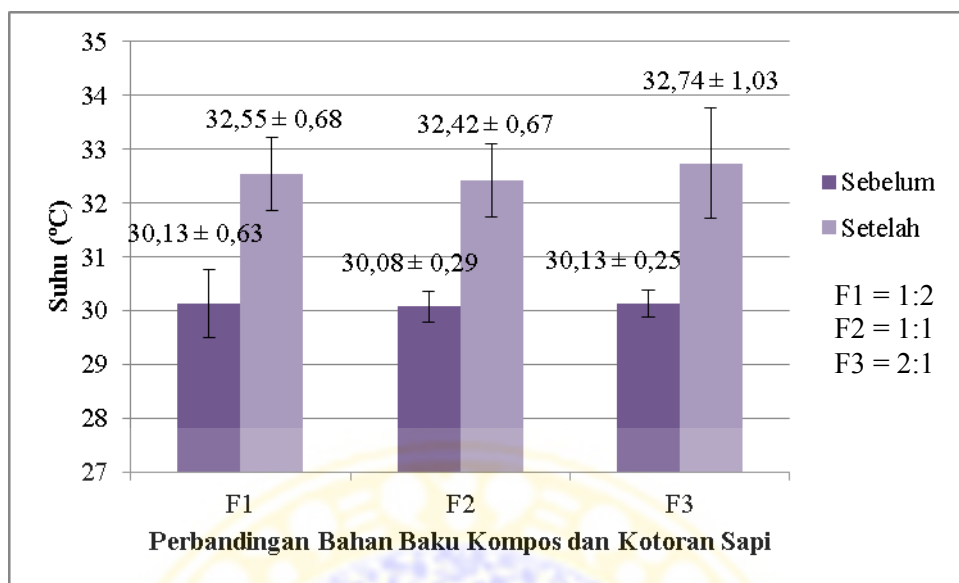


Gambar 4.4 Rasio C/N sebelum dan setelah fermentasi pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

Rasio C/N mengalami penurunan setelah fermentasi. Rasio C/N dari perlakuan F₁ menurun sebesar 49,4 %, F₂ sebesar 55,6 %, dan F₃ sebesar 59,9 %. Selain itu, pH dan suhu sebelum dan setelah fermentasi mengalami perubahan. Perubahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 pH sebelum dan setelah fermentasi pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi



Gambar 4.6 Suhu sebelum dan setelah fermentasi pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

pH dan suhu meningkat pada akhir fermentasi. pH awal yang berkisar 6,55 - 6,8 meningkat menjadi 6,84 - 6,93 pada akhir fermentasi. Sedangkan suhu awal yang berkisar 30,08 - 30,13° C meningkat menjadi 32,42 - 32,74° C pada akhir fermentasi.

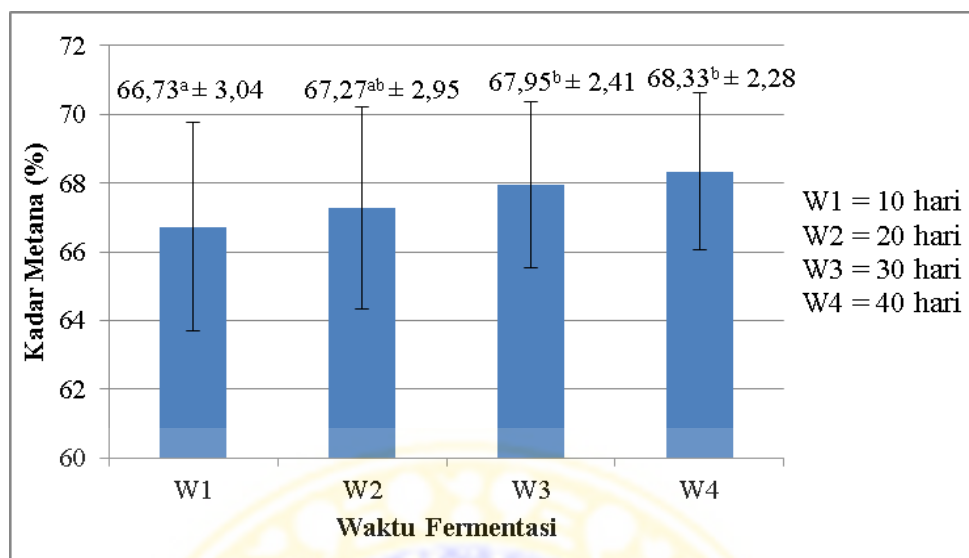
4.1.2 Variasi waktu fermentasi pada produksi biogas

Rata-rata kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan pada tiap waktu fermentasi ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Rata-rata kadar metana (%) dan volume biogas (mL) pada tiap waktu fermentasi

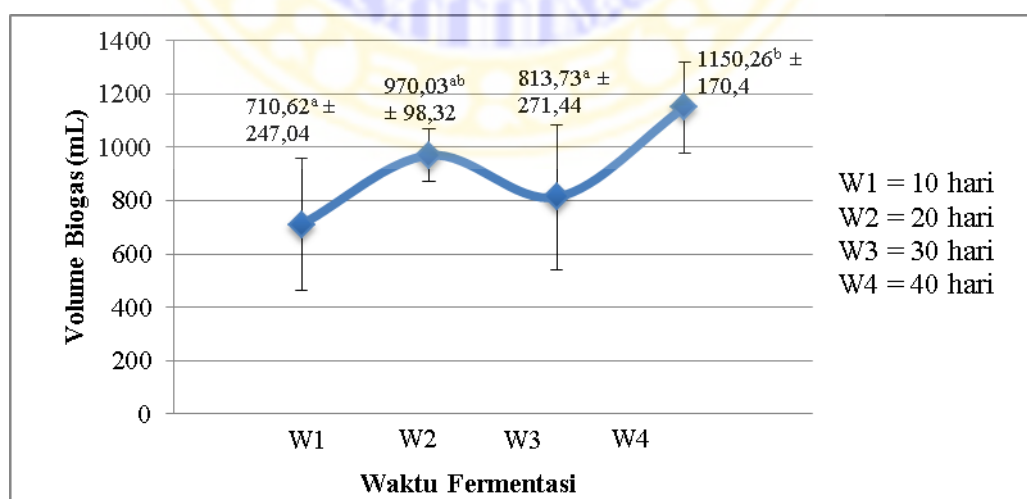
Waktu Fermentasi	Rata-Rata Kadar Metana (%)	Rata-Rata Volume Biogas (mL)
W ₁ (10 hari)	66,73 ^a ± 3,04	710,62 ^a ± 247,04
W ₂ (20 hari)	67,27 ^{ab} ± 2,95	970,03 ^{ab} ± 98,32
W ₃ (30 hari)	67,95 ^b ± 2,41	813,73 ^a ± 271,44
W ₄ (40 hari)	68,33 ^b ± 2,28	1.150,26 ^b ± 170,40

Data kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi secara lengkap disajikan pada lampiran 1 dan 2. Data tersebut diuji normalitas dan homogenitasnya. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa data kadar metana berdistribusi normal dan homogen (Lampiran 5), sedangkan volume biogas berdistribusi normal dan tidak homogen. Berdasarkan hasil tersebut, data kadar metana dilanjutkan dengan uji Analisis Varians (ANOVA) Dua Arah dengan derajat signifikansi 5 %. Hasil uji ANOVA Dua Arah menunjukkan signifikansi 0,023 untuk kadar metana dan 0,002 untuk volume biogas, sehingga keputusan yang diambil adalah tolak H_0 . Artinya variasi waktu fermentasi dengan penambahan konsorsium bakteri hidrolitik 10 % memberikan hasil yang berbeda dalam produksi biogas. Selanjutnya data kadar metana dilanjutkan dengan uji *Duncan* untuk mengetahui signifikansi antar perlakuan. Dari hasil tersebut diketahui bahwa terdapat beda signifikan kadar metana antara W_1 dengan W_3 dan W_1 dengan W_4 , sedangkan W_2 tidak berbeda signifikan dengan W_1 , W_3 , dan W_4 (Lampiran 5). Kadar metana tertinggi dihasilkan pada waktu fermentasi 40 hari yaitu sebesar 68,33 %, tetapi karena nilai tersebut tidak berbeda signifikan dengan W_2 , maka biogas dapat diproduksi dengan waktu fermentasi 20 hari. Hasilnya disajikan pada Gambar 4.7.



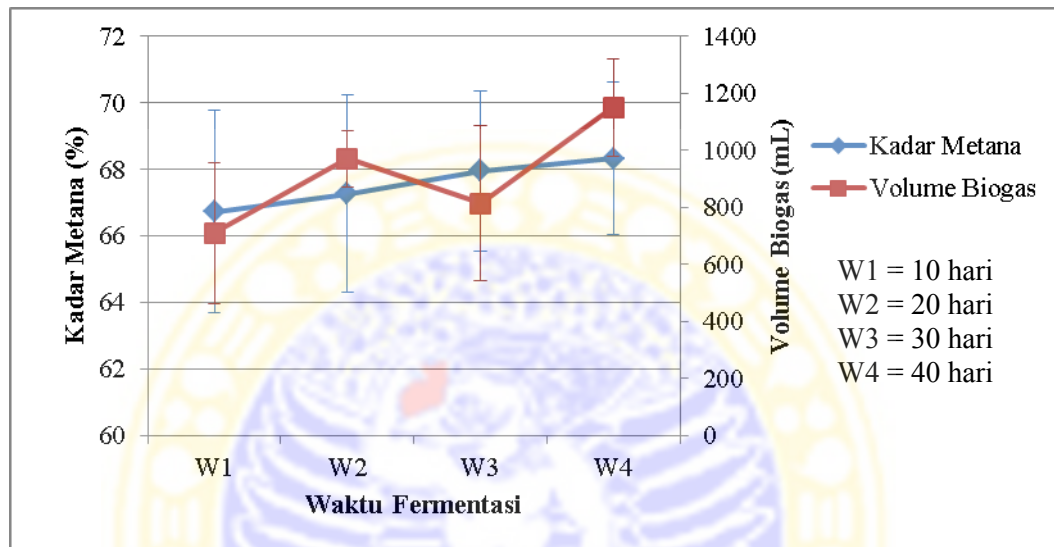
Gambar 4.7 Kadar metana pada tiap waktu fermentasi. Huruf yang berbeda di belakang nilai menunjukkan beda signifikan ($p < 0,05$) dari hasil uji *Duncan* dengan derajat signifikansi 5 %

Kadar metana mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan waktu fermentasi. Sedangkan data volume biogas dilanjutkan dengan uji *Games-Howell* dan dapat diketahui bahwa tidak ada beda signifikan antara W_1 , W_2 , dan W_3 . Terdapat beda signifikan antara W_4 dengan W_1 dan W_3 . Volume biogas pada tiap waktu fermentasi dapat dilihat pada Gambar 4.8.



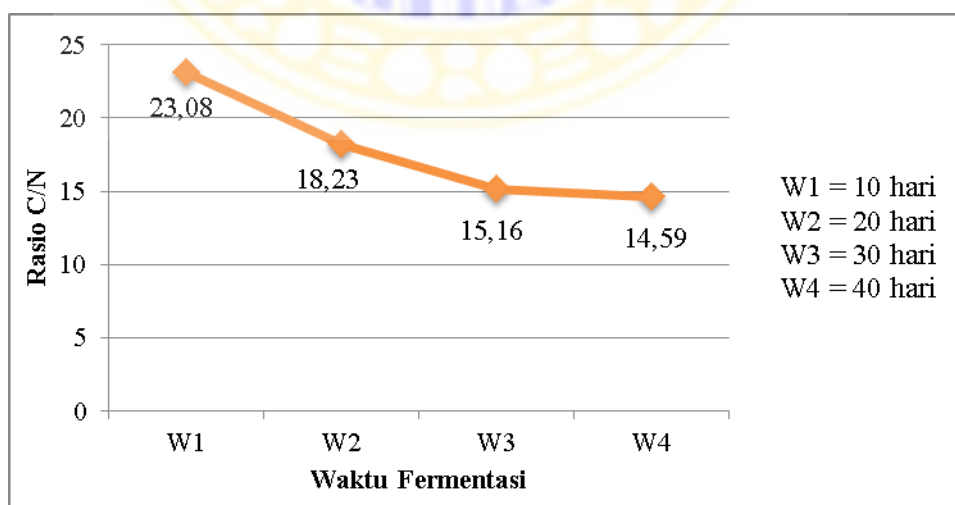
Gambar 4.8 Volume biogas pada tiap waktu fermentasi. Huruf yang berbeda di belakang nilai menunjukkan beda signifikan ($p < 0,05$) dari hasil uji *Games-Howell* dengan derajat signifikansi 5 %

Volume biogas cenderung mengalami peningkatan. Volume biogas tertinggi dihasilkan pada waktu fermentasi 40 hari yaitu sebesar 1.150,26 mL. Jika dihubungkan antara kadar metana dan volume biogas pada tiap waktu fermentasi, maka didapatkan grafik sebagai berikut.



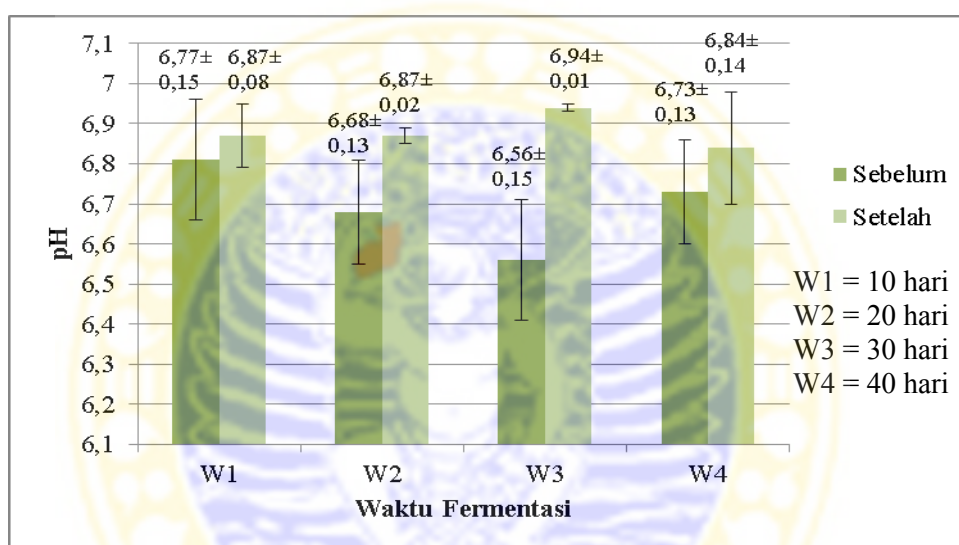
Gambar 4.9 Hubungan kadar metana dan volume biogas pada tiap waktu fermentasi

Produksi biogas juga dapat dikaitkan dengan rasio C/N. Rasio C/N akhir pada tiap waktu fermentasi ditampilkan pada Gambar 4.10.

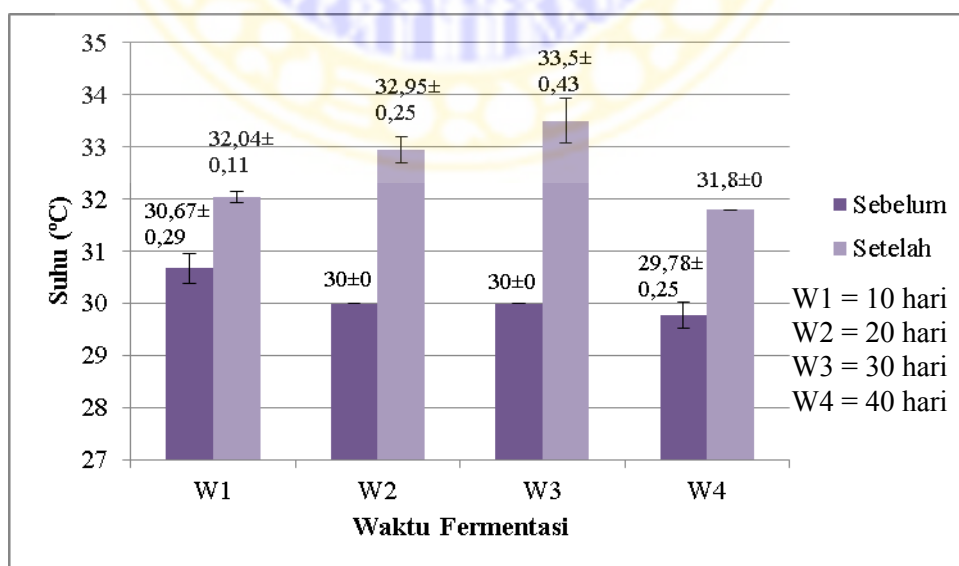


Gambar 4.10 Rasio C/N akhir pada tiap waktu fermentasi

Rasio C/N semakin kecil seiring dengan pertambahan waktu. Substrat memiliki rasio C/N awal sebesar 39,63 %. Dalam waktu 10 hari menurun menjadi 23,08; 20 hari menurun menjadi 18,23; 30 hari menjadi 15,16 dan 40 hari menjadi 14,59. Nilai pH dan suhu sebelum serta setelah fermentasi juga diukur. Nilai pH dan suhu mengalami peningkatan pada akhir fermentasi. Perubahan nilai pH dan suhu tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.11 pH sebelum dan setelah fermentasi pada tiap waktu fermentasi



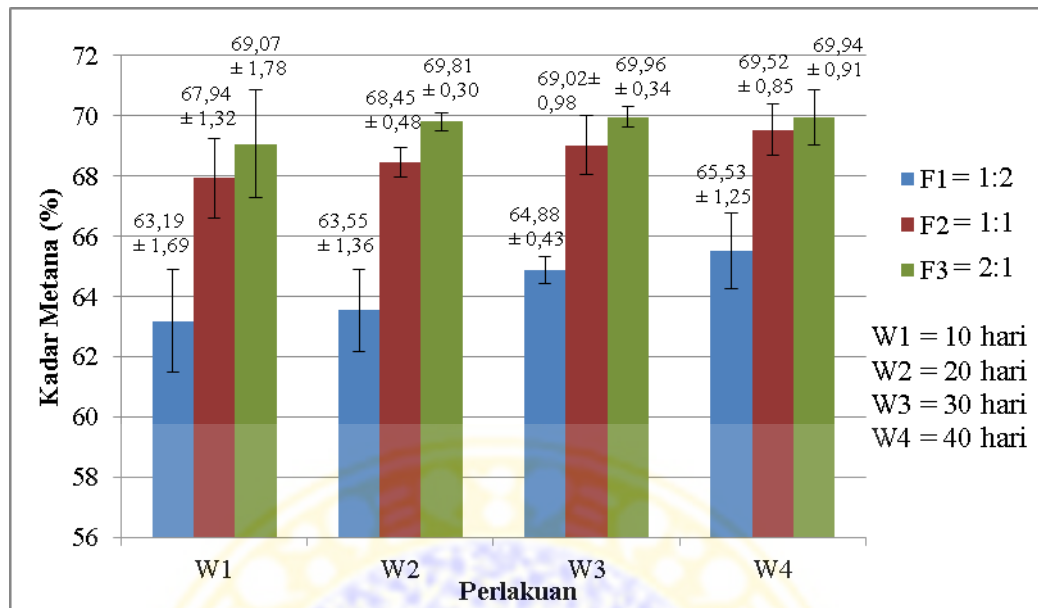
Gambar 4.12 Suhu sebelum dan setelah fermentasi pada tiap waktu fermentasi

4.1.3 Variasi kombinasi antara perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi pada produksi biogas

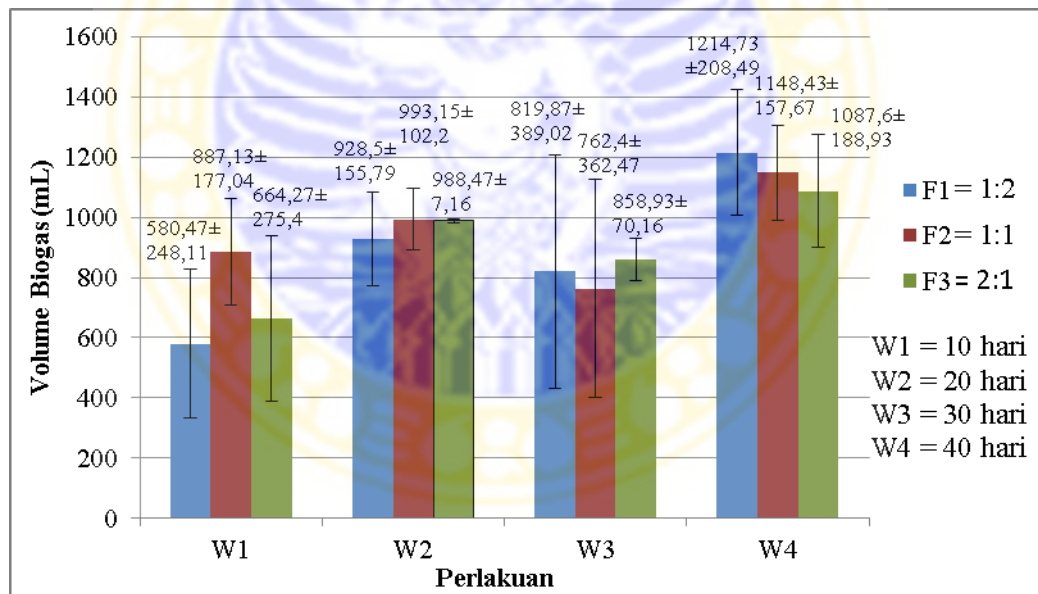
Kualitas biogas dapat diketahui melalui kadar metana yang terkandung di dalamnya sedangkan kuantitasnya dapat diketahui dengan volume biogas yang dihasilkan. Kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan dari variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi secara keseluruhan ditampilkan pada Lampiran 1 dan 2.

Data kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan dari variasi kombinasi antara perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi dan waktu fermentasi diuji normalitas dan homogenitasnya. Hasil uji normalitas dan homogenitas kadar metana dan volume biogas ditampilkan pada Lampiran 5. Hasil kedua uji tersebut menunjukkan bahwa kadar metana berdistribusi normal dan homogen sedangkan volume biogas berdistribusi normal tetapi tidak homogen. Kedua data tersebut dilanjutkan dengan uji ANAVA Dua Arah dengan derajat signifikansi 5 %. Karena pada uji tersebut kadar metana dan volume biogas berturut-turut menghasilkan signifikansi 0,845 dan 0,745, maka keputusan yang diambil adalah terima H_0 . Artinya variasi kombinasi antara perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi dengan penambahan konsorsium bakteri hidrolitik 10 % tidak memberikan hasil yang berbeda dalam produksi biogas.

Kadar metana dan volume biogas pada tiap kombinasi bahan baku kompos dengan kotoran sapi dan waktu fermentasi dapat dilihat pada gambar berikut.

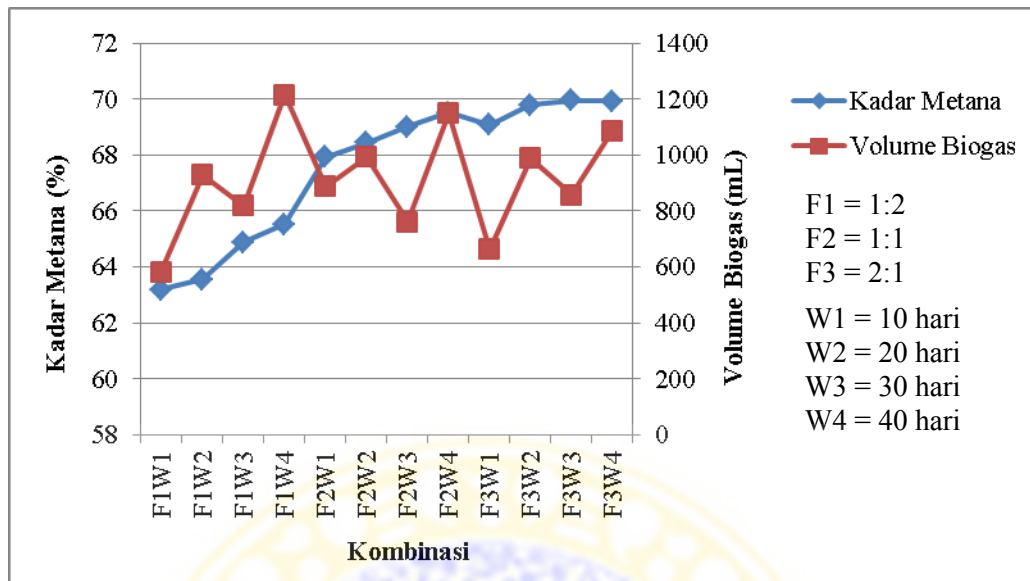


Gambar 4.13 Kadar metana pada tiap kombinasi perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi dan waktu fermentasi



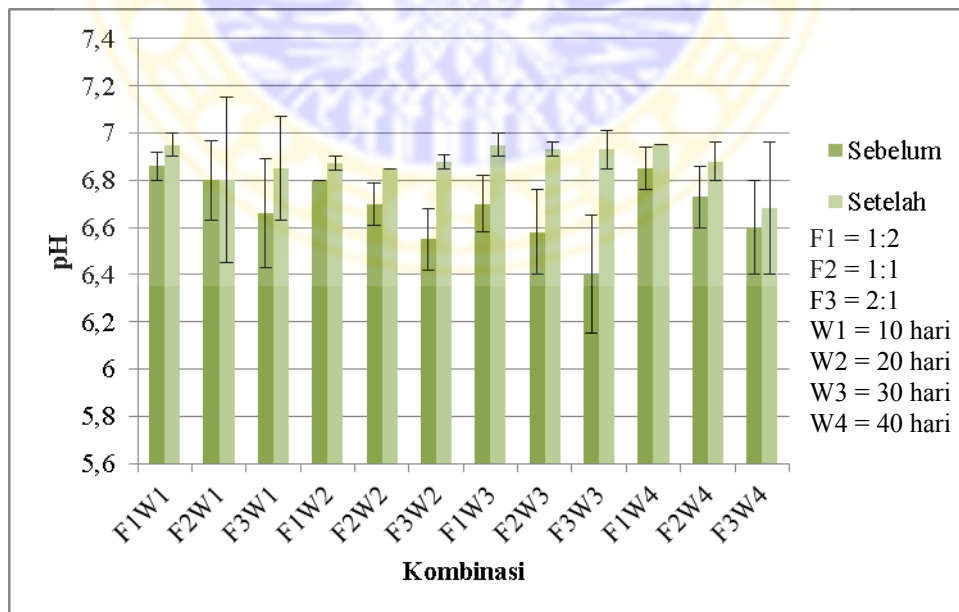
Gambar 4.14 Volume biogas pada tiap kombinasi perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi dan waktu fermentasi

Jika hasil kadar metana dan volume biogas digabungkan, maka hasil dapat dilihat pada grafik berikut.

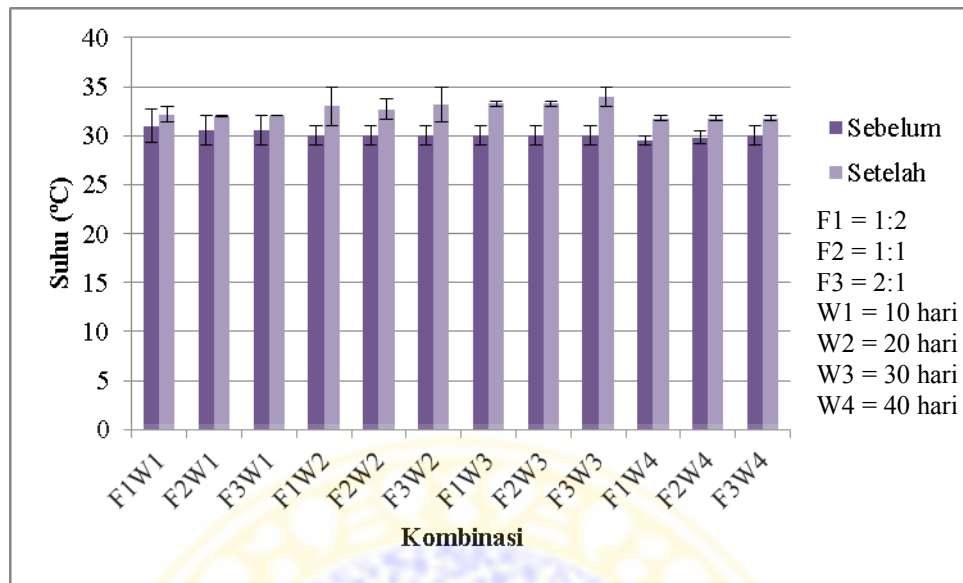


Gambar 4.15 Hubungan kadar metana dan volume biogas pada tiap kombinasi perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi dan waktu fermentasi

Nilai pH dan suhu cenderung mengalami kenaikan setelah fermentasi. Nilai pH dan suhu masing-masing perbandingan substrat sebelum dan setelah fermentasi disajikan pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



Gambar 4.16 pH sebelum dan setelah fermentasi



Gambar 4.17 Suhu sebelum dan setelah fermentasi

Nilai pH dan suhu mengalami peningkatan pada akhir fermentasi. pH awal berkisar antara 6,4 - 6,86 meningkat menjadi 6,68 - 6,95. Suhu awal yang berkisar 30 - 31° C menjadi 31,96 - 34° C pada akhir fermentasi.

4.2 Pembahasan

Dalam proses produksi biogas, bakteri memiliki peranan yang sangat penting. Keseluruhan reaksi yang terjadi pada proses tersebut melibatkan sejumlah bakteri. Dalam penelitian ini, penambahan air digunakan untuk membuat kondisi substrat cukup kelembapannya sehingga terbentuk suasana yang kondusif bagi bakteri. Dengan kondisi tersebut bakteri dapat bekerja dengan optimal sehingga terbentuk volume biogas yang tinggi dengan kadar metana yang baik. Selain itu, menurut Sadaka dan Eangler (2003) dalam Budiyo *et al.* (2010), air berperan penting dalam pergerakan dan pertumbuhan bakteri, transport nutrisi, dan meningkatkan perpindahan massa partikel-partikel substrat.

Bahan baku kompos yang digunakan dalam penelitian ini mengandung bakteri aerob dengan jumlah $3,8 \times 10^{10}$ CFU/mL dan bakteri anaerob dengan jumlah $3,3 \times 10^4$ CFU/mL, sedangkan kotoran sapi mengandung bakteri aerob dengan jumlah $2,6 \times 10^7$ CFU/mL, serta bakteri anaerob dengan jumlah $1,1 \times 10^6$ CFU/mL. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa bakteri anaerob yang ada pada kotoran sapi memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan bahan baku kompos. Selain itu, pada penelitian ini juga ditambahkan konsorsium bakteri hidrolitik. Penambahan konsorsium bakteri hidrolitik ini berguna untuk memaksimalkan kinerja bakteri dalam proses hidrolisis. Jika proses hidrolisis berjalan baik dan berlangsung cepat, maka juga akan mempercepat terbentuknya biogas. Jumlah masing-masing bakteri pada setiap 1 mL kultur cair berbeda-beda. Hal ini dikarenakan ukuran dan bentuk dari masing-masing bakteri berbeda. Bakteri-bakteri tersebut umumnya berbentuk batang, tetapi ada yang berukuran panjang dan pendek. Misalnya bakteri *Lactobacillus* sp. memiliki bentuk batang dengan ukuran $0,9 - 1,2 \times 3 - 8 \mu\text{m}$, *Cellvibrio* sp. berbentuk batang melengkung, *Acetobacter aceti* berbentuk batang sangat pendek dengan ukuran $0,6 - 0,8 \times 1 - 3 \mu\text{m}$, *Pseudomonas* sp. berbentuk batang pendek dan *Cytophaga* sp. berukuran paling besar yaitu $0,2 - 0,5 \times 1,5 - 15 \mu\text{m}$. Berdasarkan ukuran tersebut, pada OD yang sama bakteri *Cytophaga* sp. yang berukuran paling besar diantara bakteri lainnya memiliki jumlah yang lebih sedikit pada 1 mL kultur cair. Dalam OD yang sama, semakin besar ukuran bakteri maka semakin sedikit jumlahnya, begitu pula sebaliknya.

4.2.1 Produksi biogas dengan variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi

Pada umumnya proses pembentukan biogas adalah menggunakan kotoran sapi. Tetapi, dalam penelitian ini digunakan campuran bahan baku kompos dengan kotoran sapi. Sampah yang berupa dedaunan dan sampah organik lainnya berpotensi untuk menghasilkan biogas yang tinggi. Menurut Hammad (1996), sampah organik seperti sayuran dan buah-buahan adalah substrat terbaik untuk menghasilkan biogas. Didukung oleh pernyataan Haryati (2006) yang menyatakan bahwa sampah sayuran dapat menghasilkan biogas 8 kali lebih banyak dibandingkan limbah kotoran ternak. Perbedaan substrat mengindikasikan perbedaan kandungan organik yang terdapat dalam sistem. Kandungan organik yang berbeda dapat mempengaruhi pembentukan biogas beserta gas metana yang terkandung di dalamnya.

Pada penelitian ini, perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi terbukti berpengaruh terhadap kadar metana dalam biogas. Menurut Bahrin *et al.* (2011), kandungan metana dalam biogas yang diproduksi pada reaktor tergantung pada jenis *feed*, komposisi masukan, dan waktu fermentasi serta kapasitas reaktor. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan rata-rata kadar metana pada tiap perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi dari perbandingan 1:2, 1:1 dan 2:1. Perbandingan 2:1 memberikan rata-rata kadar metana tertinggi yaitu sebesar 69,70 % dan berbeda signifikan dengan perlakuan lainnya. Kadar metana yang dapat dihasilkan dengan perlakuan F_3 (perbandingan 2:1) memiliki nilai 8,4 % lebih tinggi dari perlakuan F_1 dan 1,4 % lebih tinggi dari perlakuan F_2 . Hal ini

dikarenakan bahan baku kompos merupakan bahan organik murni yang sebagian besar komponennya belum terdegradasi oleh bakteri, sedangkan kotoran sapi sebagai sumber bakteri metanogen memiliki kandungan organik yang sebagian besar telah didegradasi oleh bakteri tersebut. Kandungan organik tersebut merupakan sumber nutrisi bagi bakteri untuk menghasilkan biogas, termasuk metana di dalamnya. Saputro (2004) menyatakan bahwa jika di dalam *digester starter* lebih banyak, maka metana yang dihasilkan akan sedikit. Hal ini dikarenakan campuran bahan baku tersebut mengandung sumber bakteri saja tanpa adanya substrat, sehingga bakteri akan kekurangan nutrisi dan menjadi tidak produktif. Maka dari itu, perlakuan dengan jumlah bahan baku kompos dua kali lipat lebih banyak daripada kotoran sapi menghasilkan kadar metana paling tinggi. Hal ini juga dikarenakan karbon dan nitrogen pada perlakuan tersebut memiliki nilai tertinggi daripada perlakuan lainnya. Pernyataan tersebut didukung oleh Wahyuni (2013) yang menyatakan bahwa bahan hijauan memiliki nilai karbon dan nitrogen yang tinggi, sehingga baik untuk produksi biogas. Campuran bahan baku kompos dan kotoran sapi dengan perbandingan 2:1 sangat baik untuk produksi biogas karena menghasilkan kadar metana sebesar 69,70 %. Kadar metana ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil penelitian Yenni *et al.* (2012) yang menghasilkan kadar metana sebesar 33,23 %. Perbedaan hasil ini dikarenakan pada penelitian tersebut tidak ditambahkan konsorsium bakteri hidrolitik, sehingga kadar metana yang dihasilkan lebih rendah. Selain itu, penelitian tersebut tidak menggunakan kotoran sapi tetapi menggunakan isi rumen sapi, meskipun kandungan antara kotoran sapi dan isi rumen sapi hampir sama.

Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa volume biogas tidak dipengaruhi oleh variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi. Sehingga, volume yang dihasilkan memiliki nilai yang hampir sama yaitu pada kisaran 850 - 950 mL, tetapi kadar metananya semakin meningkat. Volume biogas tertinggi didapatkan pada perlakuan F_2 yaitu perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi 1:1. Meskipun analisis statistik menunjukkan bahwa perbandingan bahan baku kompos tidak berpengaruh terhadap volume biogas, tetapi lebih menguntungkan jika menggunakan perbandingan 1:1 karena dapat menghasilkan 947,78 mL biogas atau 7 % lebih tinggi dibandingkan volume pada F_1 (perbandingan 1:2) dan 5,3 % lebih tinggi dibandingkan volume pada F_3 (perbandingan 2:1).

Jika dihubungkan antara kadar metana dengan volume biogas, tidak terdapat hubungan antara keduanya. Hal ini dikarenakan pada volume biogas yang semakin meningkat tidak membuktikan bahwa kadar metana meningkat pula. Pernyataan tersebut dapat dibuktikan pada Gambar 4.3, pada perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi 2:1 menghasilkan kadar metana tertinggi, tetapi volume biogas lebih rendah daripada perbandingan 1:1. Sebaliknya pada perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi 1:1 menghasilkan volume biogas tertinggi tetapi kadar metana lebih rendah daripada perbandingan 2:1. Hasil tersebut juga dipengaruhi oleh komposisi substrat yang ada pada *digester*. Seperti yang dijelaskan oleh Calzada *et al.* (1984) dan Kalia *et al.* (2000) bahwa komposisi dan volume biogas tergantung pada substrat karena perbedaan karakteristik substrat. Pada volume biogas yang tinggi tidak selalu

mengindikasikan kadar metana juga tinggi. Fry (1974) juga menyatakan bahwa perbandingan C/N pada substrat yang terlalu rendah akan menghasilkan biogas dengan kandungan CH₄ rendah, CO₂ tinggi, H₂ rendah dan N₂ tinggi. Perbandingan C/N yang terlalu tinggi akan menghasilkan biogas dengan kandungan CH₄ rendah, CO₂ tinggi, H₂ tinggi dan N₂ rendah. Perbandingan C/N yang seimbang akan menghasilkan biogas dengan CH₄ tinggi, CO₂ sedang, H₂ dan N₂ rendah. Selain itu, Indarto (2010) menyatakan bahwa banyak sedikitnya kuantitas (volume) biogas yang dihasilkan tidak dapat menentukan kualitas biogas (kadar metana). Hasil penelitian Indarto (2010) menunjukkan bahwa beberapa perlakuan yang menghasilkan volume biogas cukup banyak tidak dapat menghasilkan nyala api. Hal ini dikarenakan kandungan gas metana pada biogas hanya sedikit. Hasil tersebut membuktikan bahwa kuantitas biogas tidak selalu berhubungan dengan kualitas biogas.

Dioha *et al.* (2013) menyatakan bahwa variasi nilai C/N dapat mempengaruhi pH pada *digester*. Peningkatan kadar karbon akan menimbulkan lebih banyak formasi karbondioksida dan nilai pH rendah, sedangkan apabila nilai nitrogen tinggi akan meningkatkan produksi gas amonia yang dapat meningkatkan pH sehingga merugikan bakteri. Menurut Wahyuni (2013), bahan yang memiliki rasio C/N yang tinggi adalah bahan hijau seperti daun-daunan dan sisa sayuran. Sementara bahan yang memiliki rasio C/N yang rendah seperti kotoran ternak lebih baik dicampurkan dengan bahan hijau untuk meningkatkan rasio C/N dari bahan tersebut. Berdasarkan hasil analisis, ketiga perlakuan perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi tersebut memiliki rasio C/N yang cocok untuk

pembentukan biogas yaitu 37,10; 40 dan 41,79. Perbandingan 2:1 dengan bahan baku kompos yang lebih banyak memiliki rasio C/N yang tinggi karena bahan baku kompos tersebut berupa sampah sayuran (bahan hijauan). Dengan adanya proses fermentasi, rasio C/N dari substrat mengalami penurunan. Pada variasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi, perlakuan F₃ (perbandingan 2:1) mengalami penurunan C/N paling tinggi. Penurunan nilai C/N pada perlakuan F₁ (perbandingan 1:2) adalah sebesar 49,4 %, pada F₂ (perbandingan 1:1) sebesar 55,6 % dan pada perlakuan F₃ (perbandingan 2:1) sebesar 59,9 %. Hal ini dikarenakan substrat tersebut didegradasi selama proses fermentasi. Proses tersebut melalui 4 tahapan hingga terbentuknya gas. Proses degradasi substrat tersebut dibantu oleh konsorsium bakteri yang ditambahkan, sehingga proses tersebut dapat lebih maksimal. Dari kondisi tersebut, dapat diketahui bahwa campuran bahan baku kompos dengan jumlah dua kali lebih banyak daripada kotoran sapi sangat cocok untuk pembentukan metana dalam biogas. Selain perubahan pada nilai C/N, produksi biogas dengan perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi juga menunjukkan perubahan nilai pH dan suhu. Nilai pH dan suhu cenderung mengalami peningkatan di akhir fermentasi.

Aplikasi yang dapat diterapkan untuk produksi biogas agar lebih efisien di masyarakat adalah dengan menggunakan bahan baku kompos dan kotoran sapi dengan perbandingan 2:1, karena perbandingan tersebut menghasilkan kadar metana dan volume biogas yang tinggi. Hal ini juga berkaitan dengan harga dari bahan tersebut yaitu Rp 50,00 per Kg bahan baku kompos dan Rp 75,00 per Kg kotoran sapi. Selain itu, pemilihan perbandingan tersebut juga dikaitkan dengan

keberadaan bahan baku kompos yang jumlahnya lebih banyak daripada kotoran sapi dan akan tersedia terus-menerus.

4.2.2 Produksi biogas dengan variasi waktu fermentasi

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kadar metana yang dihasilkan dengan berbagai variasi waktu fermentasi. Setelah dilakukan uji statistik diketahui bahwa terdapat perbedaan yang signifikan kadar metana dengan waktu fermentasi 10 hari dengan waktu fermentasi 30 dan 40 hari. Tetapi, waktu fermentasi 20 hari tidak berbeda signifikan dengan ketiga waktu fermentasi tersebut. Perbedaan kadar metana pada variasi waktu fermentasi tersebut dikarenakan proses produksi biogas ini merupakan proses yang bertahap. Bakteri-bakteri pada reaktor membutuhkan waktu tertentu untuk mendegradasi substrat sampai menghasilkan biogas. Pada awal fermentasi kadar metana yang dihasilkan sangat rendah. Menurut Lalitha *et al.* (1994), Bal dan Dhaghat (2001), bakteri metanogen inaktif pada awal fermentasi. Cuzin *et al.* (1992) menyatakan bahwa pada tahap awal dari keseluruhan proses produksi biogas, bakteri pembentuk asam menghasilkan *Volatile Fatty Acids* (VFA) seperti asam propionat dan isobutirat, sehingga pH menurun dan mengurangi pertumbuhan bakteri metanogen. Selanjutnya asam-asam tersebut akan diubah menjadi asam asetat yang merupakan prekursor metana dan bakteri metanogen akan aktif serta menggunakan prekursor tersebut untuk menghasilkan metana.

Perlakuan waktu fermentasi 10 hari menghasilkan kadar metana terendah karena dalam waktu singkat tersebut belum cukup bagi bakteri untuk

mendegradasi bahan organik kompleks yang terdapat pada substrat. Pada awal waktu fermentasi, bakteri berada dalam fase adaptasi maka tidak ada penambahan populasi bakteri dan aktivitas degradasi. Selain itu, gas pertama yang dihasilkan pada hari ke-1 sampai ke-8 adalah gas CO₂. Sedangkan pada hari ke-9 sampai hari ke-14 baru terbentuk gas metana (CH₄) dan CO₂ mulai menurun. Hal ini didukung oleh pernyataan Saev *et al.* (2009) bahwa proses asidogenesis terjadi pada waktu fermentasi 4 - 8 hari, sedangkan proses metanogenesis terjadi pada waktu berikutnya. Bahrin *et al.* (2011) juga menyatakan bahwa pada hari ke-21 pertumbuhan bakteri mengalami penambahan jumlah atau total massa sel yang melebihi inokulum asalnya sebagai hasil penambahan jumlah sel sehingga terjadi peningkatan jumlah populasi bakteri. Ketika jumlah populasi bakteri meningkat, aktivitas bakteri menghasilkan gas metana juga meningkat sehingga kadar metana yang terdapat dalam biogas lebih besar. Perlakuan waktu fermentasi 20 hari menghasilkan kadar metana sebesar 67,27 %. Hasil tersebut tidak berbeda nyata dengan waktu fermentasi lainnya. Tidak adanya beda nyata antara waktu 20, 30, dan 40 hari dikarenakan pada lama waktu 30 hari bahan organik dalam substrat menjadi semakin sedikit setelah terjadi perombakan pada waktu sebelumnya, sehingga semakin sedikit pula metana yang dihasilkan. Akibatnya, total kadar metana tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Gas metana yang dihasilkan pada waktu fermentasi 30 dan 40 hari konstan dan tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Kadar metana yang dihasilkan pada waktu 10 hari adalah 66,73 %, kemudian dengan penambahan hingga 20 hari meningkat sebesar 0,8 %, kemudian jika ditambah hingga 30 hari meningkat sebesar 1,8 % dan jika

dilanjutkan hingga 40 hari meningkat sebesar 2,3 %. Dari hasil tersebut juga dapat diketahui bahwa kenaikan kadar metana dari waktu 30 hari ke waktu 40 hari menurun. Hal ini juga dikarenakan gas metana yang terbentuk pada waktu yang panjang juga semakin sedikit. Pernyataan tersebut sesuai dengan penelitian Suryani (2013) yang menyatakan bahwa pada waktu fermentasi yang panjang akan semakin sedikit gas metana yang diproduksi akibat berkurangnya substrat yang merupakan nutrisi bagi bakteri. Gashaw dan Abile (2014) juga mengemukakan bahwa semakin lama waktu fermentasi, semakin banyak substrat yang terdegradasi. Tetapi, laju reaksi akan menurun dengan meningkatnya waktu fermentasi tersebut. Dari hasil ini dapat diproduksi biogas dengan waktu 20 hari, sedangkan jika menginginkan hasil yang lebih banyak sehingga berbeda signifikan dengan waktu 10 hari, waktu fermentasi dapat ditambah hingga 30 atau 40 hari.

Volume biogas yang turut diukur dalam penelitian ini juga dipengaruhi oleh waktu fermentasi. Volume biogas cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya waktu fermentasi. Hal ini juga didukung oleh Suryani (2013) yang menyatakan bahwa semakin panjang waktu fermentasi maka semakin meningkat aktivitas bakteri untuk menggunakan substrat sehingga akan mempengaruhi produk yang dihasilkan. Indarto (2010) juga menyatakan bahwa semakin lama waktu fermentasi maka akan meningkatkan efektivitas perombakan bahan organik yang terjadi. Semakin lama waktu kontak antara substrat dengan bakteri maka proses degradasi substrat dapat berlangsung lebih lama sehingga menghasilkan volume yang lebih banyak. Menurut Budihardjo (2009), jika

volume biogas yang dihasilkan semakin banyak merupakan suatu indikasi bahwa sistem telah berjalan dengan baik dan stabil. Pada perlakuan waktu fermentasi ini menunjukkan tidak adanya beda nyata volume biogas antara waktu fermentasi 10 hari dengan 20 dan 30 hari, tetapi waktu fermentasi 10 hari berbeda nyata dengan waktu 40 hari. Sedangkan waktu fermentasi 20 hari tidak berbeda nyata dengan waktu fermentasi 40 hari. Pada waktu fermentasi 20 hari volume biogas mencapai 970,03 mL. Jika waktu fermentasi dilanjutkan hingga 40 hari maka peningkatan volume biogas yang dihasilkan adalah sebesar 18,6 %. Produksi biogas pada penelitian ini sangat baik karena dengan waktu 20 hari telah dapat menghasilkan biogas dengan volume sebesar 970,03 mL per 500 g substrat atau setara dengan 1,93 L/Kg substrat. Hasil ini lebih tinggi dari penelitian yang dilakukan oleh Yenni *et al.* (2012) yang menghasilkan biogas dengan volume 1,73 L/Kg substrat dalam waktu 30 hari.

Jika dikaitkan antara kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan, tidak terdapat hubungan antara keduanya. Meskipun pada Gambar 4.9 kadar metana dan volume biogas cenderung meningkat dengan bertambahnya waktu fermentasi, tetapi hal tersebut belum tentu selalu terjadi. Dengan volume yang tinggi, kadar metana belum tentu tinggi. Volume biogas yang tinggi juga bisa dikarenakan adanya gas-gas lain dalam biogas tersebut. Hal ini juga didukung oleh penelitian Indarto (2010) yang menunjukkan bahwa beberapa perlakuan yang menghasilkan volume biogas cukup banyak tidak dapat menghasilkan nyala api. Hal ini dikarenakan kandungan gas metana pada biogas

hanya sedikit. Hasil tersebut membuktikan bahwa tidak ada hubungan spesifik antara volume biogas yang dihasilkan dengan kadar metana pada biogas.

Selain itu, produksi biogas juga dikaitkan dengan perubahan rasio C/N. Pada perlakuan waktu fermentasi 40 hari, nilai C/N paling rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Penurunan konsentrasi C/N menunjukkan bahwa nutrisi telah dimanfaatkan dengan baik. Dengan demikian, dapat ditarik kesimpulan bahwa konsentrasi C/N menurun seiring dengan penambahan waktu fermentasi. Semakin lama waktu fermentasi maka semakin rendah pula nilai karbon dan nitrogen yang terdapat pada *digester*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.10, substrat yang memiliki nilai C/N awal sebesar 39,63 dalam waktu 10 hari nilai C/N menurun sebesar 41,8 % menjadi 23,08, dalam waktu 20 hari nilai C/N menurun sebesar 54 % menjadi 18,23, sedangkan dengan waktu fermentasi 30 hari nilai C/N menurun sebesar 61,7 % menjadi 15,16 dan jika dilanjutkan sampai waktu fermentasi 40 hari maka nilai C/N menurun hingga 63,2 % dengan nilai C/N akhir sebesar 14,59. Penurunan konsentrasi karbon dan nitrogen tersebut terjadi akibat adanya proses biodegradasi bahan organik oleh bakteri, baik yang berasal dari bahan baku kompos, kotoran sapi maupun konsorsium bakteri yang ditambahkan. Bakteri-bakteri tersebut mampu menguraikan dengan baik bahan organik kompleks menjadi senyawa organik yang lebih sederhana. Menurunnya konsentrasi C dan N dikarenakan semakin berkurangnya bahan organik yang terdapat dalam substrat karena digunakan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan bakteri dan pembentukan biogas. Penurunan nilai rasio C/N dapat menyebabkan produksi biogas berhenti karena nilai rasio C/N tersebut tidak lagi dapat membantu bakteri

untuk memproduksi biogas (Siallagan, 2010). Rasio C/N yang sangat rendah sudah tidak dapat menghasilkan biogas lagi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pupuk. Rasio C/N yang diizinkan untuk suatu bahan agar bisa menjadi pupuk padat berkisar 12 - 25 (Suriadikarta, 2004). Selain itu, perlakuan waktu fermentasi ini juga berpengaruh terhadap nilai pH dan suhu. pH dan suhu pada akhir fermentasi cenderung mengalami peningkatan.

Aplikasi yang dapat diterapkan untuk produksi biogas agar lebih efisien di masyarakat adalah dengan menggunakan waktu fermentasi 20 hari, karena dengan lama waktu fermentasi tersebut dapat menghasilkan kadar metana yang tinggi yaitu 67,27 % dan volume biogas sebesar 970,03 mL.

4.2.3 Produksi biogas dengan variasi kombinasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi

Kadar metana dalam biogas yang dihasilkan dari berbagai macam kombinasi pada penelitian ini berada dalam kisaran 63,19 - 69,96 %, sedangkan volume yang dihasilkan berada dalam kisaran 580 – 1.214 mL. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya variasi tersebut telah dapat menghasilkan volume biogas yang tinggi dan kadar metana yang baik. Tetapi berdasarkan analisis statistik, kombinasi perlakuan perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi tidak berpengaruh terhadap produksi biogas, dalam hal ini adalah kadar metana dan volume biogas. Hasil ini ditampilkan pada Lampiran 5. Hal ini disebabkan karena perlakuan kombinasi perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi yang maksimal serta waktu fermentasi yang

meningkat, tidak selalu menyebabkan kadar metana dan volume biogas meningkat pula. Alasan ini dapat dilihat pada kombinasi perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi 2:1 dengan waktu fermentasi 30 hari dan perbandingan 2:1 dengan waktu fermentasi 40 hari. Kombinasi perbandingan 2:1 dengan waktu fermentasi 30 hari menghasilkan kadar metana lebih tinggi daripada kombinasi perbandingan 2:1 dengan waktu fermentasi 40 hari, meskipun waktu fermentasi 40 hari lebih panjang. Selain itu, perlakuan yang menghasilkan volume biogas tertinggi adalah kombinasi perbandingan 1:2 dengan waktu fermentasi 40 hari yaitu bernilai 1214,73 mL. Sedangkan perlakuan kombinasi perbandingan 1:1 dengan waktu fermentasi 40 hari dan kombinasi perbandingan 2:1 dengan waktu fermentasi 40 hari berturut-turut menghasilkan volume 1.148,43 dan 1.087,60 mL, meskipun perlakuan perbandingan 2:1 merupakan perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi yang paling baik untuk produksi biogas. Meskipun analisis statistik menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh kombinasi antara perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi dengan waktu fermentasi terhadap produksi biogas, tetapi kombinasi yang menghasilkan kadar metana dan volume biogas yang tinggi adalah kombinasi F_2W_4 (perbandingan 1:1 dan waktu fermentasi 40 hari) yaitu menghasilkan kadar metana sebesar 68,73 % dan volume biogas sebesar 1.148,43 mL. Tetapi, kombinasi tersebut membutuhkan biaya yang lebih mahal dan waktu yang lebih lama, sehingga untuk lebih efisien dapat diproduksi biogas dengan kombinasi F_3W_2 (perbandingan 2:1 dan waktu fermentasi 20 hari) karena kadar metana dan volume biogas yang dihasilkan hampir sama.

Pada penelitian ini, selain terdapat perubahan pada nilai C/N, perubahan lainnya yang terjadi adalah perubahan pH dan suhu. Pada perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi serta waktu fermentasi tersebut terjadi peningkatan nilai pH pada akhir fermentasi. Perubahan pH yang terjadi sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Budihardjo (2009) yang menyimpulkan bahwa secara umum pH semakin tinggi setelah proses fermentasi. Pada perlakuan kombinasi dalam penelitian ini dapat dilihat bahwa semua perbandingan bahan baku kompos dengan kotoran sapi pada waktu fermentasi 20 dan 30 hari mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan karena adanya proses penggunaan asam yang dihasilkan pada awal fermentasi dan diubah menjadi amonia dan senyawa alkali lainnya sehingga dapat meningkatkan pH. Selanjutnya pH kembali turun dan mulai stabil pada akhir fermentasi. Menurut Gerardi (2003), perubahan pH yang signifikan dikarenakan adanya produksi senyawa asam dan alkali, seperti asam organik dan ion amonium selama degradasi senyawa organik dalam *digester*. Hal ini terjadi karena pada periode awal fermentasi, sejumlah besar asam organik diproduksi oleh bakteri membentuk asam, sehingga pH dalam reaktor menjadi rendah. Selanjutnya proses berlanjut sampai konsentrasi amonia meningkat yang dapat meningkatkan nilai pH. Fulford (1988) juga menyatakan bahwa pada awal reaksi pembentukan biogas, bakteri penghasil asam akan aktif lebih dulu sehingga pH pada *digester* menjadi rendah, kemudian bakteri asetogenik dan metanogen menggunakan asam tersebut sebagai substrat sehingga menaikkan nilai pH. Hal ini menandakan bahwa dalam proses produksi biogas terjadi pengaturan pH secara alami. Kisaran pH yang terjadi pada *digester* setelah

proses fermentasi berkisar 6,8 - 6,95. Hal ini disebabkan adanya proses untuk menjaga kestabilan pH karena bakteri metanogen sangat sensitif pada pH dan hanya dapat bekerja pada kisaran pH 6,6 - 7. Bakteri metanogen tidak akan bekerja bahkan mati ketika pH di bawah 6,2 (Amankwah dan Hamidatu, 2012). Ketika tingkat produksi metana stabil, kisaran pH yang terjadi adalah kisaran antara 7 - 7,2 (Karki dan Dixit, 1984). Selain itu, suhu juga diukur pada penelitian ini. Pengaturan suhu *digester* relatif sulit dilaksanakan (Damanhuri, 2008). Oleh karena itu, penggunaan suhu lokal dinilai sudah relatif baik untuk menghasilkan biogas. Menurut Darmanto *et al.* (2012), suhu berpengaruh terhadap aktivitas bakteri di dalam substrat, semakin tinggi suhunya (suhu optimum hidup bakteri) maka aktivitas bakteri juga semakin meningkat. Suhu awal pada substrat yaitu sekitar 30 - 31° C. Pada penelitian ini suhu juga mengalami kenaikan pada akhir fermentasi. Kenaikan tersebut disebabkan adanya reaksi kimia dalam fermentasi biogas. Enzim pada bakteri akan mengubah substrat menjadi produk dan menghasilkan kalor. Pelepasan kalor tersebut melibatkan reaksi eksotermis dekomposisi bahan organik pada proses pembentukan biogas tahap pengasaman. Penguraian bahan tersebut akan menghasilkan etanol, gas karbondioksida, dan kalor. Dalam proses dekomposisi bahan organik pada kondisi anaerob, sistem menghasilkan energi yang berupa panas sehingga suhu dalam reaktor meningkat. Jika diukur setiap saat, pada akhir proses fermentasi, suhu relatif konstan karena tidak ada lagi aktivitas bakteri dalam mendekomposisi bahan organik. Tetapi kenaikan suhu akibat pelepasan kalor tersebut tidak bersifat dominan. Menurut Gerardi (2003), pada proses fermentasi anaerob, reaksi yang terjadi selama

degradasi bahan organik tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap peningkatan suhu *digester*, karena energi yang dihasilkan oleh fermentasi anaerob sangat kecil. Oleh karena itu, perubahan suhu lebih dominan dipengaruhi oleh perubahan suhu lingkungan.

Dari hasil yang didapatkan, produksi biogas yang efisien dapat dilakukan dengan menggunakan perbandingan bahan baku kompos dan kotoran sapi 2:1 serta waktu fermentasi 20 hari. Biogas yang dihasilkan sudah dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk keperluan sehari-hari. Selain itu, produksi biogas ini juga dapat diterapkan pada skala industri.

