



STRATEGI OPERASI BIODIGESTER DENGAN SUBSTRAT INHIBITOR LIMONEN DAN TANIN DARI SAMPAH BUAH

Anugrah Perdana Rahmanta

Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Politeknik LPP, Yogyakarta, Indonesia

Email: apr@poltekipp.ac.id

Abstract

The amount of domestic waste generation is an urgent problem in many places in Indonesia. Managing fruit waste into biogas is one solution to the waste problem and also contributes to reducing the energy crisis. Some fruits contain inhibitors of methanogenic performance. Oranges contain limonene in addition to their acidity properties. Tannins in apples are also inhibitors of methanogens. Another group of microbes, namely acidogens and acetogens in the digester, are less sensitive to acid conditions and inhibitors. Special treatment is needed considering the sensitivity of methanogens to inhibitors originating from fruit waste. The strategy offered is to carry out the initial process of biodigester operation with the aim of maintaining the stability of growth and population of various microbial groups as reflected in the pH of the effluent, biogas volume and content of methane, TS and VS of both feed and biodigester effluent. The biodigester was designed semi-continuously on a pilot scale with an effective slurry volume of 16 liters with a loading rate of 40 kg/(m³.day). The feed was given at 6%TS. The composition of the substrate consists of a mixture of citrus fruits, apples and melons and mixed with cow dung in a certain ratio. The percentage of fruit substrate is increased gradually to give time for the microbial group in the biodigester to adapt to changes in inhibitor levels from fruit waste. Monitoring was conducted on pH, daily volume of biogas and methane levels, TS and VS of feed and effluent reflecting the performance of acidogen, acetogen and methanogen microbes. The average methane level was 62.15% and the highest was 75.63% in the S1 feed composition. The acclimatization time for each feed composition period varied between 14 to 65 days. Up to the composition of the fruit mixture of 35% (S5) or equivalent to a limonene content of 44.44 ppm, the pH stability parameter was depressed at a low value of 6.7.

Keywords: Biogas, Fruit, Inhibitor, Limonene, Methanogen, Tannin, Waste

Abstrak

Jumlah timbunan sampah domestik menjadi masalah yang mendesak di banyak tempat di Indonesia. Pengelolaan sampah buah menjadi biogas merupakan salah satu solusi masalah sampah dan sekaligus memberi andil mengurangi krisis energi. Beberapa buah mengandung inhibitor terhadap kinerja metanogen, misalnya jeruk yang mengandung limonen selain sifat keasamannya. Apel diketahui mengandung tanin yang juga merupakan inhibitor terhadap metanogen. Kelompok mikrobia lain yaitu acidogen dan acetogen pada digester kurang sensitif terhadap kondisi asam dan inhibitor. Pengelolaan sampah buah sebagai substrat biodigester memerlukan perlakuan khusus mengingat sensitifnya metanogen terhadap inhibitor. Strategi yang ditawarkan adalah melakukan proses awal operasi biodigester dengan tujuan untuk menjaga kestabilan pertumbuhan dan populasi berbagai kelompok mikrobia yang tercermin dari pH effluen, volume dan kadar metana

biogas, TS dan VS umpan dan effluen biodigester. Biodigester dirancang semi kontinyu pada skala pilot bervolume efektif slurry 16 liter dengan loading rate sebesar 40 kg/(m³.hari). Umpan diberikan pada 6%TS. Komposisi substrat terdiri dari campuran buah jeruk, apel dan melon dan dicampur dengan kotoran sapi dengan perbandingan tertentu. Prosentase substrat buah ditingkatkan secara bertahap untuk memberi waktu kelompok mikrobia pada biodigester untuk beradaptasi terhadap perubahan kadar inhibitor dari sampah buah. Pemantauan dilakukan pada pH, volume harian biogas dan kadar metana, TS dan VS umpan dan effluen yang mencerminkan kinerja mikrobia acidogen, acetogen dan metanogen. Kadar metana rata rata adalah 62,15% dan tertinggi 75,63% pada komposisi umpan S1. Waktu aklimatisasi setiap periode komposisi umpan bervariasi antara 14 hingga 65 hari. Sampai dengan komposisi campuran buah 35% (S5) atau ekuivalen kadar limonen 44,44 ppm parameter kestabilan pH tertekan pada nilai rendah 6,7.

Kata kunci: Biogas, Buah, Inhibitor, Limonene, Metanogen, Tannin, Sampah

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi nasional terutama pada bidang industri, transportasi, dan perumahan diprediksi kian meningkat dengan kenaikan 4,2% tiap tahunnya menjadi 2,889 SBM pada tahun 2050 (Yudiartono et al., 2022). Cadangan energi fosil mengalami penyusutan, oleh karena itu perlu alternatif penyediaan energi (Kurniawati, 2017).

Sebagai negara agraris, Indonesia memiliki banyak komoditi peternakan, pertanian dan perkebunan yang menghasilkan biomassa. Dalam bentuk yang tak termanfaatkan, biomassa tersebut berpotensi menjadi sampah. Pada tahun 2023 timbunan sampah domestik dari berbagai daerah di Indonesia mencapai 41,34 juta ton. Komposisi sampah terbesar hingga 39,69% adalah sisa makanan (Irfandha & Yunarsih, 2023). Timbunan sampah merupakan masalah yang semakin hari semakin membutuhkan solusi secara terpadu. Tempat pembuangan akhir memiliki kapasitas terbatas. TPST Piyungan Bantul sudah ditutup karena sudah tidak mampu lagi menerima sampah (Novitasari & Utami, 2024). Bahan yang sukar terurai semisal plastik, logam, kaca, dan kertas dapat dimanfaatkan kembali. Bahan organik, termasuk sisa makanan dapat terurai. Penguraian bahan organik di tempat pembuangan sampah menghasilkan cemaran berupa lindi yang berbau busuk dan mengandung patogen pencemar air tanah.

Pengamatan beberapa parameter kualitas air tanah di daerah kota Palangka Raya tahun 2016 menunjukkan kualitas sampel air tanah pada area sekitar tempat pembuangan sampah kelurahan Pahandut mengandung cemaran zat organik dan kondisi keasaman yang tidak memenuhi standar kualitas air tanah (Apriyani & Lesmana, 2020). Logam berat Zn, Cu dan Mn hingga kadar berturut turut 0,265 mg/L, 0,043 mg/L dan 0,559 mg/L merupakan logam berat yang ditemukan pada pengamatan lubang bor tempat pembuangan sampah di TPS Nonthaburi Thailand (Prechthai et al., 2008). Selain bahan organik dan logam berat, gen virus dan bakteri yang tahan antibiotik (ARGs) tumbuh subur (Liu et al., 2018). Antibiotik yang diujikan termasuk jenis sulfamethoxazole, tetracycline dan oxytetracycline (Song et al., 2016).

Salah satu cara pengelolaan sampah bahan organik yang efektif adalah memanfaatkannya menjadi bahan baku pembuatan biogas melalui proses anaerob (Rahmat,

2023). Sampah sisa makanan merupakan bahan baku potensial untuk membuat energi dengan cara merubahnya menjadi biogas. Jenis sampah sisa makanan yang mendominasi adalah sampah buah sebanyak 77,987% selain sayur-sayuran sebesar 57,801% (Al-Hanniya et al., 2022). Sampah buah mengandung banyak senyawa organik terutama polimer karbohidrat, sehingga berpotensi sebagai bahan baku pembuatan biogas melalui proses anaerob, oleh karena itu sampah buah ini menjadi salah satu sumber potensial energi baru terbarukan. Meskipun demikian beberapa buah memiliki senyawa yang bersifat menghambat pertumbuhan mikrobial metanogen, antara lain senyawa monoterpen limonen pada buah jeruk yang bersifat antimikrobial, disamping karakteristik jeruk yang mempunyai pH rendah (Özmen & Aslanzadeh, 2009). Senyawa limonen bersifat inhibitor terhadap metanogen pada konsentrasi mulai 10 g/L (Wikandari et al., 2014). Pada sebuah digester kontinu mesofilik, limonen akan mulai bersifat toksik pada kadar 65 $\mu\text{L/L.d}$ (Mizuki et al., 1990). Struktur kimia Limonen terdapat dalam bentuk D dan L-Limonene (Duetz et al., 2003). Tannin pada buah apel pada kandungan 0,3% DM menurunkan yield biogas dari 238,13 NL kg^{-1} VS menjadi 179,45 NL kg^{-1} VS (Pham et al., 2017). Beberapa penelitian terdahulu terkait produksi biogas dari sampah buah antara lain menggunakan jeruk, apel, pepaya dan tomat secara batch dengan variasi penambahan kotoran sapi dan buffer pengatur pH (Budiyono et al., 2018). Konsentrasi limonen pada percobaan batch dengan substrat kulit jeruk busuk dan kobis berkorelasi terhadap akumulasi asam asetat yang menyebabkan terhambatnya pertumbuhan metanogen (Rukmini, 2018). Metode distilasi substrat yang mengandung Limonen dapat juga meningkatkan kinerja biodigester mengurai limonen (Khaerunnisa et al., 2018). Pada penelitian ini ingin diketahui pengaruh substrat inhibitor limonen tanpa perlakuan awal pada biodigester mesofilik anaerob. Kadar inhibitor limonen dan tannin ditingkatkan secara bertahap untuk menghindari shock loading dan toxic loading. Strategi pengoperasian biodigester untuk substrat ini dimaksudkan untuk mendapatkan data komposisi substrat limonen pada umpan yang masih ditoleransi mikrobial metanogen,

2. Bahan dan Metode

Start up strategi dilakukan dengan pendekatan adaptasi dan uji ketahanan sistem terhadap dosis maksimal yang bisa ditangani sistem mikrobial pada biodigester.

Tabel 1. Strategi start up yang digunakan

Faktor keberhasilan	Kondisi optimum	Strategi
C/N ratio substrat	20-30	Perbandingan massa substrat melon:jeruk:apel = 50:40:10, dengan C/N ratio campuran 29,9
Keseimbangan mikrobial metanogen dan non-metanogen pada starter	Komposisi mikrobial dalam keadaan seimbang	• Menggunakan kotoran sapi sebagai slurry digester • Menambahkan inokulum pada slurry untuk starter • Memberi waktu adaptasi awal yang cukup bagi mikrobial untuk berkembang mencapai keseimbangan komposisi populasi
Kondisi operasi	TS slurry digester optimum pada 5-10% Pengumpanan dengan Organik Loading Rate optimum	Membuat %TS feed digester di set sekitar 6% Membuat feed dengan basis perhitungan HRT 25 hari

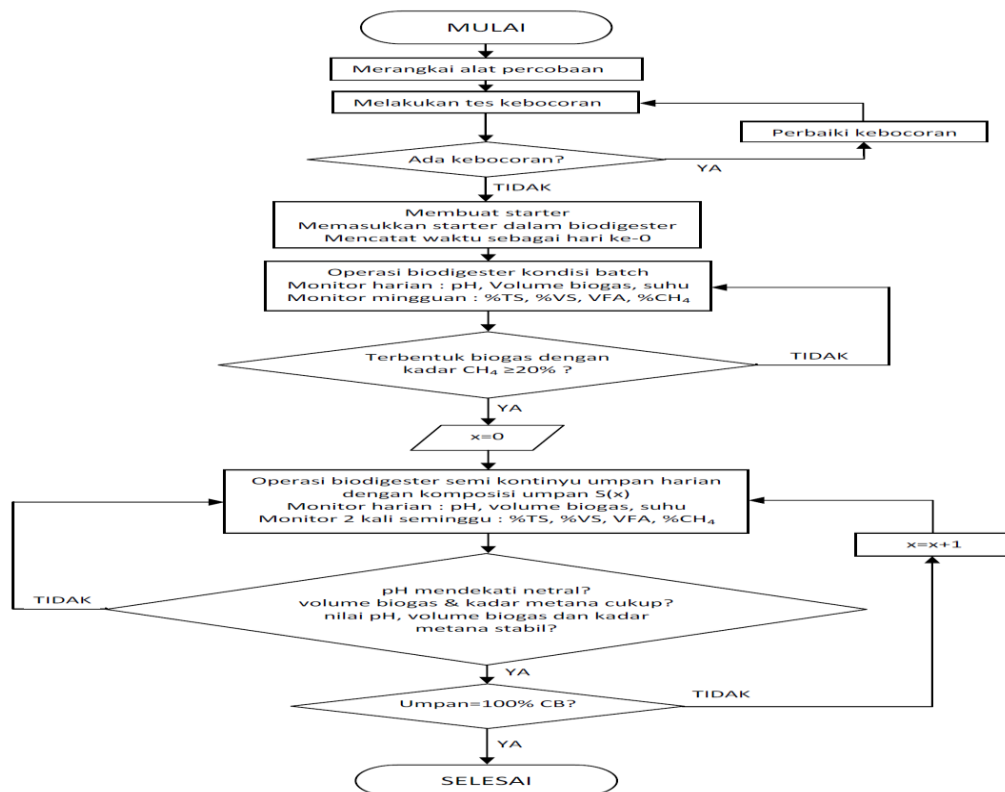
Faktor keberhasilan	Kondisi optimum	Strategi
	Terhindarnya efek inhibitor dari substrat	• Pengaturan perubahan komposisi substrat secara bertahap • Memberi waktu adaptasi yang cukup bagi mikrobia setelah terjadi perubahan komposisi substrat
	Tersedianya mikro dan makro nutrient yang cukup bagi mikrobia	Co-digestion substrat campuran kotoran sapi dengan sampah buah-buahan

Komposisi campuran buah dipilih berimbang antara buah yang mengandung inhibitor misalnya jeruk dan apel, dan yang tidak mengandung inhibitor misalnya melon, mewakili populasi buah yang umum terdapat pada berbagai pasar buah di Indonesia. Perbandingan yang dipakai adalah 50:40:10 massa melon, jeruk dan apel. Sampah buah terlebih dahulu dihaluskan dengan blender sebelum dicampur dengan kotoran sapi sebagai co-substrat.

Pada saat awal, digester dioperasikan dengan sistem batch tanpa umpan untuk proses stabilisasi, yaitu menumbuhkan berbagai kelompok mikrobia metanogen dan non metanogen hingga mencapai populasi yang setimbang, ditandai dengan mulai timbulnya gas metana yang konsentrasinya semakin meningkat. Setelah digester stabil, maka feed dapat diberikan secara kontinyu tiap hari. Untuk menghindari shock loading dan toxic loading, maka feed campuran buah diberikan dalam campuran dengan kotoran sapi, dimulai dengan perbandingan 0% (S0), 5% (S1), 10% (S2) berat kering dan seterusnya. Variasi komposisi ini bertujuan untuk memberikan waktu yang cukup bagi mikrobia metanogen untuk beradaptasi mengolah VFA sehingga tidak menumpuk. Pada percobaan ini performa populasi acidogen didekati dengan pengamatan pH, sedangkan performa populasi metanogen diwakili dari volume biogas harian digester. Setiap perlakuan dengan komposisi tertentu dimonitor pH menggunakan pH meter portabel dan dibandingkan dengan pH meter lakmus, VFA dianalisis di laboratorium dengan metode GC, suhu slurry dalam digester diamati dengan thermometer digital yang telah dikalibrasi dan dibandingkan dengan thermometer raksa, volume produksi harian biogas yang tertampung pada wadah vynil diukur tiap hari. Analisis kadar metana dalam biogas dilakukan dengan metode GC. Pergantian antar komposisi umpan mempertimbangkan kestabilan digester yang tercermin dari stabilnya produksi biogas, kadar metana biogas, pH dan VFA slurry. Percobaan pilot scale dilakukan menggunakan digester polypropilene berkapasitas efektif slurry 16 liter.

Pengamatan dilakukan terhadap pH effluen biodigester. Indikasi kesetimbangan populasi antara mikrobia acidogen-acetogen dan mikrobia metanogen dicerminkan dari stabilnya pH di antara 6-7. Mikrobia acidogen dan acetogen mengurai substrat menghasilkan Volatile Fatty Acid yang merupakan substrat bagi bakteri metanogen menghasilkan metana. Mikrobia ini hidup di rentang pH antara Dalam kadar yang berlebih karena jumlah mikrobia Acidogen-acetogen jauh mengungguli jumlah mikrobia metanogen akan yang terjadi adalah penumpukan asam yang menyebabkan tereliminasi mikrobia metanogen yang sensitif terhadap asam. Pada kondisi ini indikator yang bisa kita ukur adalah pH dibawah 5 dan volume biogas harian yang menurun drastis.

Pendekatan alur proses yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Alur proses penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

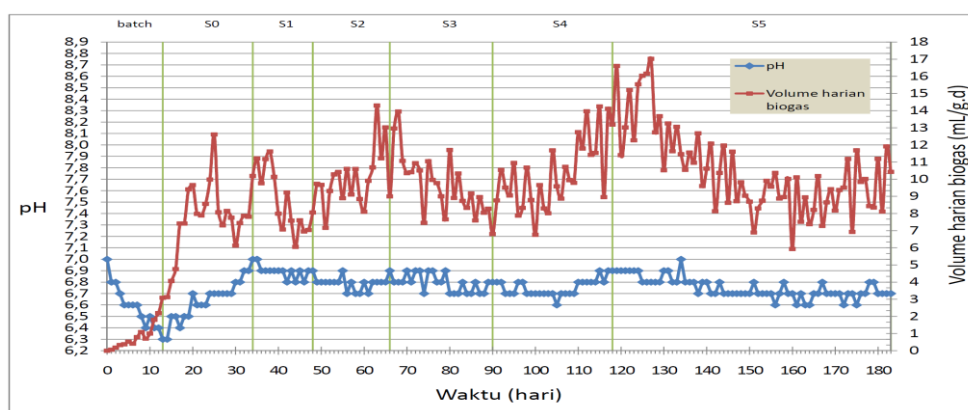
Keberhasilan proses start up produksi biogas dalam digester amat tergantung dari berhasilnya kelompok mikrobia dalam digester mendegradasi material organik secara terpadu dalam sebuah proses yang kompleks sehingga menjadi produk berupa biogas. Perubahan komposisi umpan akan memberi efek yang berbeda terhadap kinerja keseluruhan sebuah digester. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh variasi perubahan komposisi campuran buah dan KS dalam substrat feed pada digester dan variasi lama masa aklimatisasi pada masing masing tahapan terhadap kinerja digester. Biodigester dibiarkan tanpa feed pada tahap aklimatisasi, setelah itu diberi umpan harian 100% KS. Setelah masa stabilisasi barulah diberikan campuran antara sampah buah (CB) dengan kotoran sapi (KS), dengan komposisi bervariasi dari kandungan CB terendah dengan kode umpan S0, kemudian S1, S2, S3 dan seterusnya seiring meningkatnya kandungan CB dalam umpan.

Tabel 2. Variasi komposisi umpan

Kode	S0		S1		S2		S3		S4		S5	
persentase	%KS	%CB	%KS	%CB	%KS	%CB	%KS	%CB	%KS	%CB	%KS	%CB
	100	0	95	5	90	10	85	15	75	25	65	35

Seperti terlihat pada gambar 2, kondisi biodigester pada saat awal proses batch (day-0) pH-nya 7,0. Setelah itu pH drop hingga nilai 6,3 pada hari ke-13, lalu berangsur naik hingga kembali pada pH 7,0 sampai hari ke 34. Pergantian komposisi umpan dari

batch ke S0 dilakukan pada hari ke-13 karena mempertimbangkan mulai pesatnya produksi biogas, walaupun pH biodigester drop ke 6,3. Turunnya pH digester pada hari ke-13 dalam hal ini bukanlah karena terdesaknya populasi metanogen, karena terbukti dari volume biogas yang meningkat, tetapi lebih karena menumpuknya hasil metabolisme kelompok mikrobial penghasil asam yang belum sempat diolah metanogen sebagai substrat dalam produksi biogas mengingat pertumbuhan mikrobial metanogen yang lebih lambat daripada mikrobial penghasil asam.



Gambar 2. Hubungan pH dan volume biogas harian vs waktu

Volume biogas pada hari ke-13 mencapai 1975 mL, dan volume hariannya terlihat mulai menunjukkan peningkatan dari sebelumnya dibawah 1000 mL mulai hari ke 11. Produksi biogas mulai bertambah dengan cukup pesat pada hari ke-10 hingga 12, berturut-turut 640, 1153 dan 1400 mL. Hal ini menunjukkan bahwa kelompok bakteri penghasil metana populasinya mulai bertambah secara cepat dan menuju ke arah kesetimbangan. Cepatnya pertumbuhan bakteri metanogen ini ditunjang oleh tersedianya substrat asam yang cukup dari metabolisme bakteri penghasil asam. Kadar metana pada biogas tercatat naik dari 18,15% pada hari ke-6 menjadi 46,48% pada hari ke-13, hal inilah yang menjadi pertimbangan untuk mengubah komposisi umpan menjadi S0 pada hari ke 13, karena pada hari ke-6 populasi metanogen belum begitu berkembang seperti yang tercermin dari kadar metananya yang masih dibawah 20%. Pada hari ke-25 tercatat produksi biogas mencapai 8070 mL, sesudah itu tren kenaikan produksi biogas untuk sementara terhenti.

Hari ke-33 pH berangsur naik ke 6,9 dan volume biogas stabil di kisaran 5000 mL, sedangkan kadar metana mendekati hari ke-33 selalu berada diatas 59%, yaitu 59,99% pada hari ke-24, 63,74% pada hari ke-27 dan naik terus ke 75,63% pada hari ke-31. Faktor dari pH yang mendekati nilai netral, volume biogas dan kadar metana yang relatif tinggi dan stabil menjadi pertimbangan untuk merubah komposisi umpan menjadi S1 pada hari ke-34. Pada hari ke-34 bahkan tercatat komposisi metana yang tertinggi selama penelitian ini yaitu 75,63%.

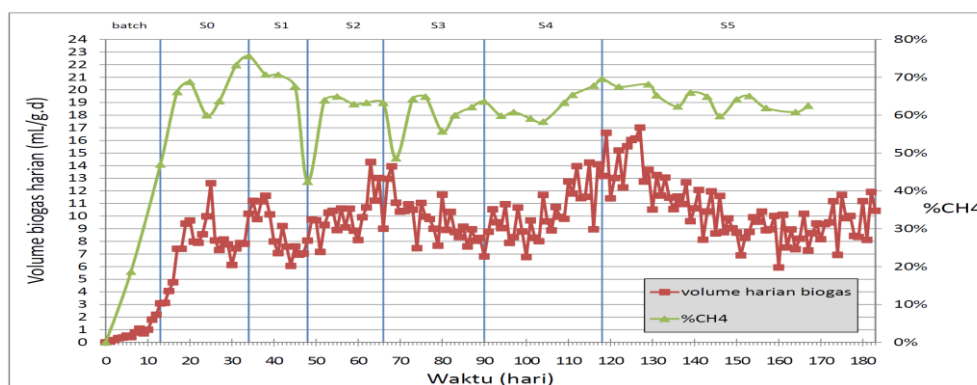
Pergantian komposisi umpan dari S0 ke S1, S2, S3 dan seterusnya dilakukan dengan pertimbangan serupa, yaitu kestabilan nilai pH mendekati netral dan produksi volume biogas dan kadar metana yang relatif tinggi dan stabil. Mulai periode komposisi umpan S0 dan seterusnya dimonitor kesetimbangan populasi mikrobial penghasil asam dan

mikrobia pembentuk biogas seperti yang tercermin dari nilai pH dan volume biogas serta kadar metananya.

Pada akhir periode komposisi umpan S1 pH dapat bertahan pada kisaran nilai 6,9 dengan volume biogas berkisar 4500 mL, dengan masa adaptasi 14 hari sebelum komposisi umpan diubah menjadi S2 pada hari ke-48.

Pada setiap masa awal adaptasi dengan komposisi umpan yang berbeda, terjadi kecenderungan penurunan pH, sebelum akhirnya pH dapat kembali mendekati nilai netral. Masa adaptasi untuk tiap komposisi umpan juga terlihat semakin panjang. Tercatat untuk S1, S2 dan seterusnya hingga S5 berturut-turut 14, 18, 24, 28 dan 65 hari. Pada komposisi umpan S5 tercatat pH pada akhir masa pengamatan hanya berhasil naik hingga 6,7; relatif asam dibandingkan dengan pH akhir masa adaptasi S1, S2 dan seterusnya hingga S4 berturut-turut 6,9; 6,9; 6,8 dan 6,9. Ini berarti kesetimbangan mikrobial metanogen dan non metanogen mulai terganggu pada komposisi S5 dicirikan dengan tidak beranjaknya pH diatas 6,7 walau hingga 65 hari pengamatan.

Hubungan antara volume harian biogas dan kadar metana dalam biogas vs waktu dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini.

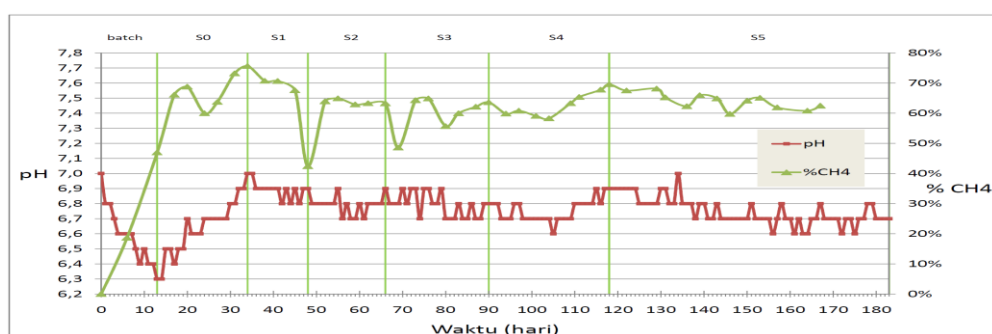


Gambar 3. Hubungan kadar metana dan volume biogas harian vs waktu

Volume biogas biodigester terlihat relatif stabil pada tiap periode perubahan komposisi umpan. Rata-rata volume harian biogas sepanjang penelitian ini adalah 5861 mL, dengan memperhatikan banyaknya umpan yang masuk tiap hari maka produksi biogas rata-rata adalah 9,158 mL/g.hari. Volume biogas terbanyak tercatat pada hari ke-127 yaitu 10891 mL saat komposisi umpan yang diberikan adalah S5.

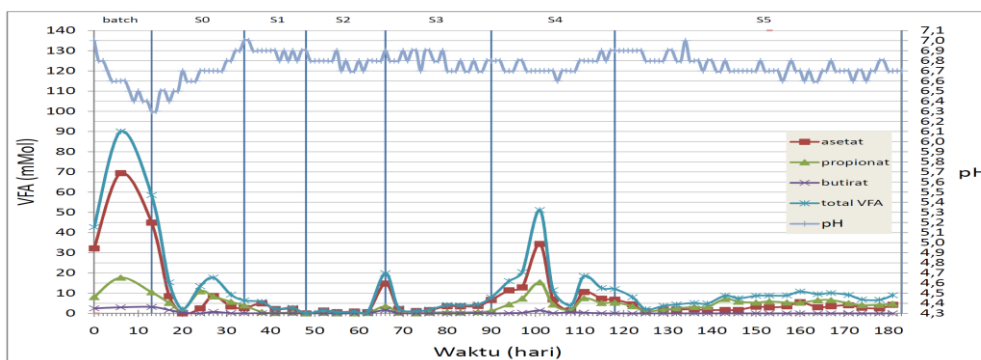
Kadar metana biodigester teramati pada kisaran 18,65% hingga 75,63% dengan nilai rata-rata 62,15%. Dengan variasi perubahan komposisi umpan untuk biodigester seperti pada Tabel 3, maka dapat diamati bahwa kadar metana dan volume harian biogas terlihat cenderung stabil pada tiap periode komposisi umpan S0 hingga S5. Untuk nilai pH pada komposisi umpan S0 hingga S4 kecuali S5, memiliki kecenderungan untuk dapat kembali mendekati ke nilai netral. Dari Gambar 14 dapat pula disimpulkan bahwa kadar metana lainnya hampir selalu sebanding dengan besarnya volume harian biogas. Hal tersebut terlihat pada periode batch hingga akhir akhir periode S1, dan selama periode S4 serta S5.

Hal yang kurang lebih sama terlihat dari hubungan antara pH dan kadar metana seperti terlihat pada gambar 4. Pada Gambar 3 terlihat bahwa selama proses batch, nilai pH turun drastis sedangkan kadar metana naik dengan pesat. Sesudah periode batch, maka kadar metana cenderung sebanding dengan nilai pH. Hal tersebut terlihat misalnya saat hari ke-34 atau hari ke-118, kurva pH dan persen metana berada pada suatu titik puncak. Pada hari ke-104 dan 105, kadar metana (58,28%) dan nilai pH (6,6) sama-sama berada pada sebuah lembah pada grafik. Pada akhir periode S4 menuju hari ke-118 grafik kadar metana dan pH sama-sama bergerak naik.



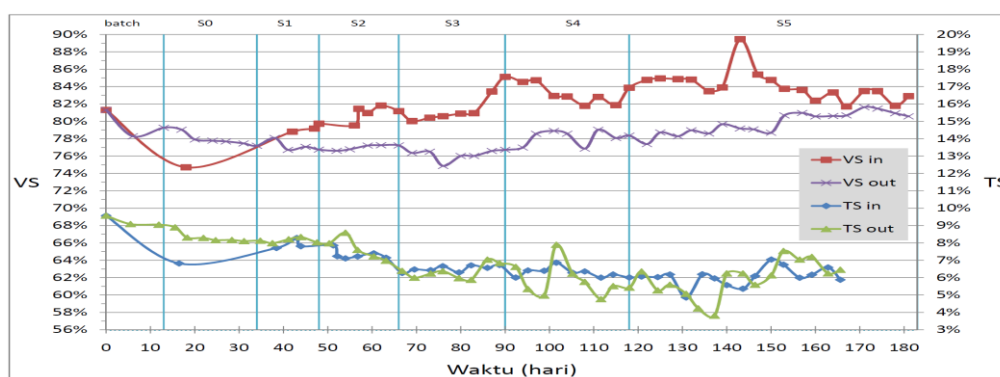
Gambar 4. Hubungan antara pH dan kadar metana dalam biogas vs waktu

Mikrobia penghasil asam memproduksi asam lemak volatil rantai pendek (SCVFA) diantaranya asam asetat, asam propionat dan asam butirat. Asam asetat merupakan substrat utama bagi mikrobia metanogen. Hubungan antara konsentrasi VFA dan pH vs waktu pada biodigester dapat dilihat pada Gambar 5. Pada periode batch mulai hari ke-0 hingga hari ke-13, kadar VFA cenderung tinggi, pada periode ini mikrobia penghasil asam berkembang dengan pesat karena inokulum yang diberikan ke dalam biodigester menemukan substrat berlimpah. Tingginya konsentrasi VFA juga menyebabkan pH turun sampai 6,3 pada hari ke-13. Kadar total VFA tercatat paling tinggi pada hari ke-6 dengan konsentrasi 90,04 mMol/L. Pada tiap pergantian komposisi umpan terlihat kecenderungan naiknya kadar VFA setelah beberapa hari terjadi pergantian komposisi umpan, dan menurun setelah mencapai puncaknya. Hal ini terlihat pada hari ke-27 dan hari ke-101. Dalam hal ini pH menunjukkan hubungan yang berkebalikan dengan kadar VFA.



Gambar 5. Hubungan antara pH dan VFA vs waktu

Laju pengumpanan biodigester diberikan semi kontinyu harian dengan basis HRT 25 hari. Dari analisa %TS dan %VS baik pada umpan dan effluen outlet dari biodigester didapat hubungan seperti yang digambarkan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Hubungan antara TS dan VS pada umpan dan effluen biodigester vs waktu

Karakteristik substrat akan sangat mempengaruhi kinerja dari biodigester. Untuk limbah pertanian dan peternakan biodigester mampu mengolah substrat Total Solid 2% hingga 12% (Wellinger, 1999). Dari hasil analisa sampel pada biodigester tercatat %TS umpan berkisar diantara 4,86% hingga 9,57%, sedangkan %VS umpan berkisar antara 74,71-89,46%. Kenaikan komposisi buah pada umpan menyebabkan naiknya %VS dan turunnya %TS. %TS effluen dari outlet biodigester terlihat fluktuatif dibanding dengan %TS umpan, namun dapat disimpulkan bahwa %TS outlet rata-rata dibawah %TS umpan. Hal ini menunjukkan bahwa pada biodigester terjadi degradasi materi organik (Dry Matter) oleh mikrobial pengurai meskipun lajunya kecil. Penurunan %VS terlihat lebih nyata, yang menunjukkan bahwa materi organik yang dapat diubah menjadi biogas tersebut menjadi substrat bagi mikrobial penghasil asam dan metanogen, dengan laju reaksi yang lebih besar daripada proses peruraian oleh mikrobial pengurai. Lama waktu aklimatisasi untuk tiap komposisi umpan terlihat pada tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Waktu aklimatisasi tiap periode batch

Periode	Lama Waktu aklimatisasi (hari)
Batch	13
S0	21
S1	14
S2	18
S3	24
S4	28
S5	65

Yield yang didapatkan pada komposisi umpan S0, S1, S2, S3, S4 dan S5 berturut-turut adalah 50,79; 241,54; 329,61; 308,83; 214,15; 210,18; dan 352,95 mL/g.VS, menunjukkan bahwa co digestion meningkatkan yield biogas, tetapi yield tidak meningkat secara linear dengan peningkatan komposisi substrat buah.

4. Simpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini karena kecilnya perubahan kenaikan komposisi umpan dan waktu aklimisasinya cukup, maka biodigester mampu bertahan

terhadap efek inhibitor yang mempengaruhi kesetimbangan populasi metanogen dan non metanogen. Hingga hari ke-183 dan komposisi campuran buah hingga 35% pH biodigester masih berkisar pada nilai 6,7; dengan produksi biogas harian rata-rata 5879,57 mL, setara dengan 9,158 mL/g.d, dan rata-rata kadar metana dalam biogas adalah 62,15%.

Waktu aklimatisasi biodigester mencukupi bagi terciptanya sesetimbangan populasi mikrobial metanogen dan non metanogen. Waktu aklimatisasi dari komposisi umpan S1 hingga S5 berturut-turut 14,18, 24, 28 dan 65 hari seperti terlihat pada Tabel 4. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar inhibitor yang berasal dari campuran buah pada umpan maka waktu aklimatisasi bagi biodigester untuk dapat memulihkan pH mendekati nilai netral dan menyeimbangkan populasi mikrobial akan semakin panjang. Meskipun waktu aklimatisasi relatif panjang dibanding pada proses yang didahului perlakuan awal pada substrat atau pada proses yang lebih kompleks, proses pengolahan ini memiliki kelebihan pada kesederhanaan proses dan perlakuan awal yang minimal terhadap substrat yang mengandung inhibitor, dibanding misalnya reaktor bio membran (Wikandari et al., 2014), atau proses distilasi (Khaerunnisa et al., 2018).

Pada penelitian ini sampai dengan komposisi umpan S5 dengan waktu pengamatan 65 hari, didapatkan bahwa pH tidak juga beranjak mendekati normal, meskipun produksi harian biogas relatif stabil. Hal ini menunjukkan batas komposisi umpan yang dapat ditoleransi adalah S5. Penelitian yang berjangka waktu lebih panjang perlu dilakukan untuk melihat efek kenaikan komposisi substrat yang lebih banyak mengandung inhibitor terhadap kinerja biodigester.

5. Referensi

- Al-Hanniya, U. H., Purnomo, Y. S., & Farahdiba, A. U. (2022). Kuantifikasi dan Karakterisasi Timbulan Sampah Makanan (Food Waste) di Pasar Tradisional Kota Surabaya Timur. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 1(6), 880–888. <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i6.1279>
- Apriyani, N., & Lesmana, R. Y. (2020). Pengaruh Air Lindi pada Terhadap pH dan Zat Organik pada Air Tanah di Tempat Penampungan Sementara Kelurahan Pahandut Kota Palangkaraya (Effect of Leachate to pH and Organic Substances of Ground Water in The Waste Transfer Station in Kelurahan Pahandut Ko. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 25(2), 60. <https://doi.org/10.22146/jml.39489>
- Budiyo, Manthia, F., Amalin, N., Hawali Abdul Matin, H., & Sumardiono, S. (2018). Production of Biogas from Organic Fruit Waste in Anaerobic Digester using Ruminant as the Inoculum. *MATEC Web of Conferences*, 156, 1–5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815603053>
- Duetz, W. A., Bouwmeester, H., Van Beilen, J. B., & Witholt, B. (2003). Biotransformation of limonene by bacteria, fungi, yeasts, and plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 61(4), 269–277. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1221-y>
- Irfandha, N. M., & Yunarsi. (2023). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2023 Environment Statistics of Indonesia 2023 Volume 42, 2023. *Badan Pusat Statistik RI/BPS-Statistics Indonesia*, 4(1), 9–15.
- Khaerunnisa, G., Sarto, S., Sutijan, S., & Syamsiah, S. (2018). Pengaruh Steam Pretreatment terhadap Degradasi Selulosa dan Limonen pada Limbah Jeruk dalam Produksi Biohidrogen. *Jurnal Rekayasa Proses*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.31163>
- Kurniawati, L. (2017). Kebijakan Dana Ketahanan Energi Sebagai Upaya Mewujudkan Ketahanan Energi Nasional: Konsep Dan Tantangannya. *Jurnal Manajemen Keuangan Publik*, 1(1), 29–41. <https://doi.org/10.31092/jmkp.v1i1.86>
- Liu, X., Yang, S., Wang, Y., Zhao, H. P., & Song, L. (2018). Metagenomic analysis of antibiotic resistance genes (ARGs) during refuse decomposition. *Science of the Total Environment*, 634(266), 1231–1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.048>
- Mizuki, E., Akao, T., & Saruwatari, T. (1990). Inhibitory effect of Citrus unshu peel on anaerobic digestion.

- Biological Wastes*, 33(3), 161–168. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(90\)90002-A](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90002-A)
- Novitasari, N., & Utami, K. S. (2024). Analisis Pengaruh Ditutupnya Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan Terhadap Keputusan Manajemen Keuangan UMKM. *Populer: Jurnal Penelitian Mahasiswa*, 3(2), 160–169. <https://doi.org/10.58192/populer.v3i2.2306>
- Özmen, P., & Aslanzadeh, S. (2009). *Biogas production from municipal waste mixed with different portions of orange peel*. 5, 1–39. [http://bada.hb.se/bitstream/2320/5402/1/Aslanzadeh, Özmen.pdf](http://bada.hb.se/bitstream/2320/5402/1/Aslanzadeh,%20Özmen.pdf)
- Pham, C. H., Saggar, S., Vu, C. C., Tate, K. R., Tran, T. T. T., Luu, T. T., Ha, H. T., Nguyen, H. L. T., & Sommer, S. G. (2017). Biogas production from steer manures in Vietnam : Effects of feed supplements and tannin contents. *Waste Management*, 69, 492–497. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.002>
- Prechthai, T., Parkpian, P., & Visvanathan, C. (2008). Assessment of heavy metal contamination and its mobilization from municipal solid waste open dumping site. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1–3), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.119>
- Rahmat, F. N. (2023). Analisis Pemanfaatan Sampah Organik Menjadi Energi Alternatif Biogas. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(2), 118–122. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.16497>
- Rukmini, P. (2018). Produksi Biogas Dari Sampah Buah Dan Sayur : Pengaruh Volatile Solid Dan Limonen. *Konversi*, 5(2), 26. <https://doi.org/10.20527/k.v5i2.4769>
- Song, L., Li, L., Yang, S., Lan, J., He, H., McElmurry, S. P., & Zhao, Y. (2016). Sulfamethoxazole, tetracycline and oxytetracycline and related antibiotic resistance genes in a large-scale landfill, China. *Science of the Total Environment*, 551–552(266), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.007>
- Wikandari, R., Youngsukkasem, S., Millati, R., & Taherzadeh, M. J. (2014). Bioresource Technology Performance of semi-continuous membrane bioreactor in biogas production from toxic feedstock containing D -Limonene. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 170, 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.102>
- Yudiartono, Y., Windarta, J., & Adiarso, A. (2022). Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(3), 201–217. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.14264>