

Riwayat Artikel:

Masuk: 31-12-2024

Diterima: 12-08-2025

Dipublikasi: 15-09-2025

Cara Mengutip

Rahmanta, Anugrah Perdana. 2025. "Strategi Start-Up Produksi Biogas Dari Vinasse: Transisi Operasi dari Kotoran Sapi Ke Vinasse". Jurnal Ekologi, Masyarakat Dan Sains 6 (2): 163-70.
<https://doi.org/10.55448/m0pr9534>.

Lisensi:

Hak Cipta (c) 2025 Jurnal Ekologi, Masyarakat dan Sains



Artikel ini berlisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Artikel

Strategi Start-Up Produksi Biogas Dari Vinasse: Transisi Operasi dari Kotoran Sapi ke Vinasse

Anugrah Perdana Rahmanta¹  Daniyanto²

^{1,2}Prodi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Politeknik LPP Yogyakarta, Jl LPP No 1A, Balapan, Yogyakarta 55222

 Penulis koresponden: apr@politeklpp.ac.id

Abstrak: Pemanfaatan vinasse sebagai substrat penghasil biogas memerlukan penanganan khusus karena keasamannya bersifat inhibitor terhadap metanogen. Pada start-up biodigester diupayakan adanya keseimbangan mikrobial metanogen dan non metanogen dengan pemberian penambahan komposisi substrat yang mengandung inhibitor secara bertahap. Start-up dilakukan dengan proses semi kontinyu menggunakan campuran komposisi basis berat kering vinasse 0% (S0), 50% (S1), 75% (S2), 90% (S3) hingga 100% (S4). Loading rate biodigester 40 kg/(m³/hari) dengan volume efektif slurry 8 liter. Umpan diberikan pada 6,5% TS. Pada komposisi umpan S2 didapatkan kestabilan pH terbaik selama 11 hari sebesar 6,3 yang mencerminkan keseimbangan mikrobial metanogen dan non metanogen. Produksi rerata harian biogas tertinggi tercapai pada komposisi umpan S3 sebesar 3780mL meskipun rerata pH cenderung turun menjadi 6,18. Pada komposisi umpan S4, rerata pH turun lebih jauh lagi menjadi 5,9 dan produksi rerata harian biogas menurun hingga 1932mL.

Kata Kunci: aklimatisasi, biogas, vinasse, metanogen, start-up

Abstract: Vinasse utilization as biogas forming substrate requires special handling because of its acidic state which is inhibitor to methanogens. At start-up, the performance of microbial group should be in state of equilibrium between methanogens and non-methanogens. This is attempted by adding inhibitor substrates incrementally. Start-up conduct in semi continue process with vinasse dry base composition 0% (S0), 50% (S1), 75% (S2), 90% (S3) up to 100% (S4). Biodigester loading rate is 40 kg/(m³/hari) with 8 litre effective slurry volume. Substrat is fed at 6,5% TS. The best pH stability obtained on S2 feed composition which is 6.3 for eleven consecutive days. This reflects the balance of methanogen and non-methanogenic microbes' performance. The highest average daily biogas production was achieved at feed composition S3 of 3780mL even though the average pH tended to decrease to 6.18. At S4, pH and average biogas volume is decreased significantly to 5.9 and 1932mL

Keywords: acclimatization, biogas, vinasse, methanogens, start-up

1 PENDAHULUAN

Salah satu sumber biomassa terbarukan yang potensial di Indonesia adalah vinasse yang merupakan hasil samping industri etanol dari tetes tebu. Dari proses pengolahan tebu, hanya 13% menghasilkan gula pasir, 87% sisanya meliputi molase (3%), filter cake (4%), bagasse (28%) dan limbah cair (52%) (Setiaji, Santoso, and Wibisono 2023). Vinasse merupakan produk samping proses produksi etanol yang berupa cairan sisa hasil

destilasi. Satu liter produk etanol akan menghasilkan vinasse sebanyak 13 liter (1:13) (Carrilho, Labuto, and Kamogawa 2016).

Vinasse mempunyai nilai COD sekitar 80.000 mg/l hingga 120.000 mg/l. dan BOD sekitar 45.000 mg/l hingga 60.000 mg/l (Soto et al. 2021)

Vinasse berupa cairan berwarna coklat gelap karena senyawa melanoid (Chandra, Bharagava, and Rai 2008), karamel dan fenol, terdiri dari 93% air dan sisanya adalah padatan

organik dan mineral. Vinasse dari industri etanol yang menggunakan tetes tebu mengandung lebih banyak mengandung unsur karbon, kalium, fosfat, sulfat, kalsium, besi, natrium dan unsur mikronutrien lainnya, daripada vinasse yang dihasilkan dari bahan baku lainnya. Komponen organik lainnya adalah gliserol, asam laktat dan asam asetat. Karakteristik vinasse adalah pH yang rendah (4,5 sampai 5,5), kandungan garam yang tinggi (30,5 – 45,2 dSm-1) (Rajagopal et al. 2014).

Karena banyak mengandung mikronutrien, dengan pengaturan jumlah dan jangka waktu pemakaian, vinasse banyak diaplikasikan ke lahan sebagai pupuk (Jiang et al. 2012) (Hassan et al. 2021) (Moran-Salazar et al. 2016), Hal yang perlu diperhatikan adalah efek yang ditimbulkan jika terlalu banyak zat organik dan nutrien yang masuk kedalam tanah dalam jangka panjang akan menyebabkan antara lain meningkatnya salinitas, menurunnya kadar oksigen terlarut, eutrofikasi badan air, kontaminasi logam berat, meningkatnya keasaman tanah, gangguan fotosintesis dari tumbuhan air dan penurunan hasil panen (Fuess and Garcia 2014) (Mikucka and Zielińska 2020) (Hassan et al. 2021).

Metode penguraian biologis dengan bantuan mikrobia anaerobik banyak diaplikasikan untuk menguraikan kadar pencemar dalam limbah cair. Sekelompok mikrobia anaerobik secara bersama-sama menguraikan substrat vinasse menjadi komponen yang lebih mudah terurai dan juga berpotensi menghasilkan gas hasil metabolisme berupa biogas.

Dekomposisi bahan organik menjadi biogas dalam keadaan anaerob adalah suatu proses kompleks dan merupakan interaksi diantara beberapa jenis kelompok bakteri yang masing-masing mempunyai peran tersendiri. Apa yang bagi satu kelompok bakteri merupakan hasil metabolisme, bisa jadi merupakan makanan atau substrat bagi kelompok bakteri yang lain. Proses pembentukan biogas dibagi menjadi tiga langkah yaitu hidrolisis, asidogenesis, acetogenesis dan metanogenesis. Mikrobia yang berperan dalam proses hidrolisis dan asidogenesis bersifat anaerob fakultatif, sedangkan mikrobia yang berperan dalam proses metanogenesis bersifat strict anaerob (Li, Chen, and Wu 2019). Mikrobia yang berperan dalam proses hidrolisis antara lain *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Ruminococcus* dan sebagainya (Parsaee, Kiani Deh Kiani, and Karimi 2019). Mikrobia acidogenic misalnya genus *Anaerobaculum*, *Blautia*, *Desemzia* dan lain-lain. Contoh mikrobia acetogenic antara lain dari genus *Gelria*, *Syntrophaceficus* dan *Trichococcus*. Mikrobia

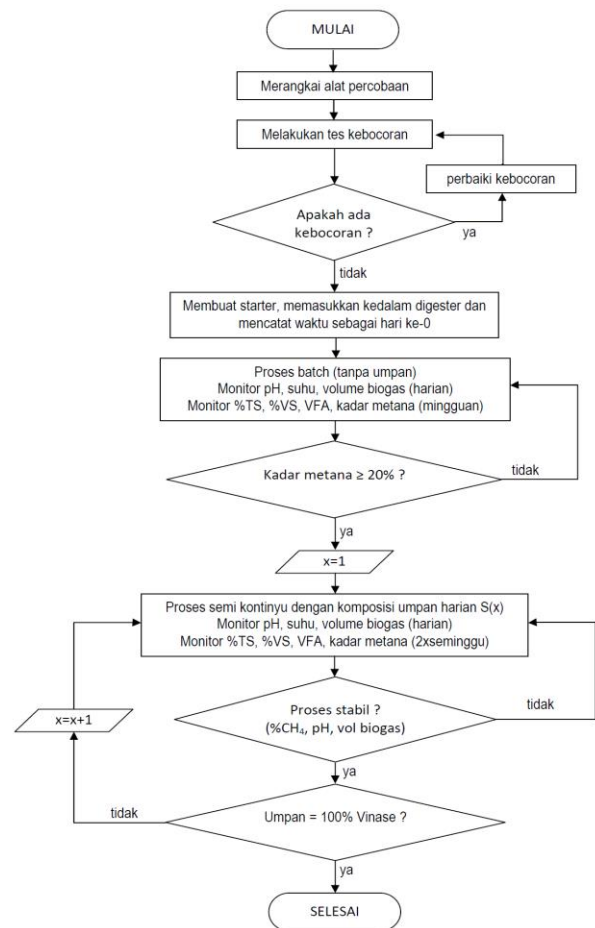
methanogen antara lain *Methanobacterium*, *Methanospirillum* dan *Methanosarcina* (Nunes Ferraz Junior et al. 2022).

Warna gelap pada vinasse disebabkan oleh karamel, melanoidin dan turunannya seperti hidroksil metil furfuran dan materi koloid karamel yang sukar terdekomposisi dan bersifat toksik bagi mikroflora anaerobik (España-Gamboa et al. 2017). Kandungan Sulfur yang kadang hingga 4 sampai 10 kali lipat kadar optimum bagi proses dekomposisi anaerobik (Parsaee, Kiani Deh Kiani, and Karimi 2019). Karena sifat asam dan adanya inhibitor toksik bagi mikroba ini, maka tidak jarang pengolahan limbah vinasse tanpa substrat lain pada digester akan menemui hambatan. Vinasse memerlukan co-substrat supaya proses dekomposisi anaerobnya dapat berjalan (Moraes et al. 2015). Co-substrat yang dipakai biasanya adalah kotoran sapi yang mengandung banyak mikrobia indigeneous yang baik sebagai umpan (starter) untuk menumbuhkan sistem/koloni kelompok mikrobia yang bekerja bersama-sama untuk mendekomposisi vinasse. Co-substrat perlu ditambahkan untuk menjaga jumlah mikrobia yang tidak tahan terhadap sifat inhibitor substrat (misalnya asam dan toksin), namun seiring dengan adaptasi mikrobia terhadap kondisi ekstrim tersebut, maka dapat diharapkan pemberian co-substrat dapat dikurangi ataupun diharapkan dihilangkan sama sekali. Pengkondisian sebuah sistem mikrobia terhadap inhibitor atau proses start-up pada sebuah sistem biodigester merupakan langkah awal yang penting untuk membuat proses dekomposisi anaerobik dapat dimulai. Banyak kasus biodigester yang gagal dan harus diulangi karena sistem mikrobianya tidak berkembang secara baik walaupun tersedia substrat yang bahkan tidak memiliki sifat inhibitor sekalipun. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan pada proses start-up menggunakan co-substrat kotoran sapi sehingga proses dekomposisi anaerobik pada digester dapat berlangsung baik, mengingat sifat inhibitor dari vinasse yang asam dan mengandung unsur toksik. Proses start-up dilakukan hingga biodigester berjalan baik dengan indikator timbulnya gas metana dengan kadar yang cukup sebagai ciri hidupnya mikrobia metanogen, pH yang relatif stabil pada kisaran pH yang optimum untuk terjaganya kelangsungan hidup sistem mikrobia pada biodigester, baik mikrobia hidrolisis, asidogen maupun metanogen. Asidogen mempunyai rentang pH optimum dari 5,5 hingga 6,5 (Mikucka and Zielińska 2020). Pada sebuah sistem dekomposisi anaerobik, metanogenlah yang paling sulit melakukan adaptasi terhadap penurunan pH. Metanogen akan optimum

beraktivitas pada kisaran pH 6,5 hingga 7,5 (Li, Chen, and Wu 2019). Pemakaian co-susbrat diusahakan dikurangi secara bertahap sehingga memberikan waktu bagi konsorsium mikrobial anaerobik untuk melakukan penyesuaian melalui mekanisme adaptasi ataupun eliminasi mikrobial dengan memperhatikan kinerja biodigester.

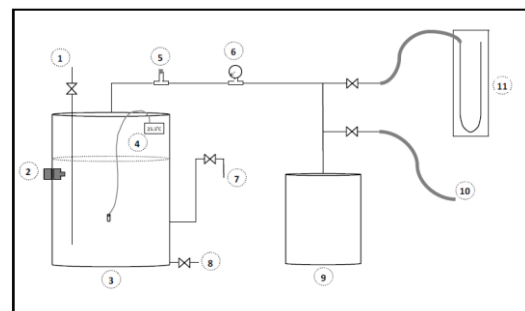
2 METODE PENELITIAN

Seperti terlihat pada gambar 1 berikut ini, pelaksanaan penelitian terdiri dari persiapan pembuatan alat dan pengetesan kebocoran, dilanjutkan dengan pengoperasian digester secara batch tanpa umpan untuk menumbuhkan kelompok mikrobial pengurai hidrolisis, asidogenesis dan metanogenesis, ditandai dengan munculnya metana dengan kadar diatas 20%. Proses dilanjutkan dengan umpan semi kontinyu harian dengan komposisi umpan S0 dengan perbandingan berat kering vinasse dan kotoran sapi 0:100. Pengamatan dilakukan sampai digester stabil dengan indikator suhu, pH, volume biogas dan kadar metananya menunjukkan fluktuasi minimum. Langkah diulangi untuk komposisi umpan S1, S2, S3 dan S4 yaitu dengan perbandingan antara vinasse: kotoran sapi berturut-turut 50:50, 75:25, 90:10 dan 100:0. Pergantian komposisi umpan memperhatikan kesetimbangan kinerja kelompok mikrobial dalam digester yang tercermin dari pH, kadar metana dan volume total biogas yang stabil. Tujuan penelitian ini adalah mencari komposisi vinasse maksimum yang bisa ditoleransi methanogen tanpa menyebabkan penurunan kinerja keseluruhan konsorsium mikrobial yang terlibat dalam produksi biogas pada biodigester mesofilik tanpa pengaturan pH dan pre-treatment pada substrat vinasse.



Gambar 1. Diagram alir pelaksanaan penelitian

Biodigester mesofilik skala mini pilot ini terdiri dari dua bagian utama yaitu tangki biodigester dan tangki gas holder. Loading rate biodigester dirancang 40 kg/ (m³. hari) dengan volume efektif slurry 8-liter dilengkapi saluran masuk umpan, saluran effluen, pengaduk magnetik dan gas holder bervolume 20 liter. Rangkaian alat selengkapannya terlihat pada gambar 2



Gambar 2. Rangkaian alat percobaan

Keterangan:

1. Saluran masuk umpan
2. Pengaduk magnet
3. Biodigester
4. Termometer digital
5. Silicone rubber plug
6. Manometer

7. Saluran keluar slurry
8. Saluran pengurasan
9. Gas holder
10. Saluran pengeluaran biogas
11. Manometer pipa "U"

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Substrat yang digunakan adalah campuran dari kotoran sapi, inokulum dan air. Inokulum berfungsi sebagai starter untuk membiakkan kelompok mikrobia yang diperlukan untuk biodigester. Inokulum diambil dari effluen sludge biodigester aktif, sehingga dipastikan terdapat kelompok bakteri baik metanogen maupun non metanogen yang terbukti sudah menghasilkan biogas. Substrat kotoran sapi berfungsi sebagai penyedia nutrisi bagi mikrobia, sedangkan air digunakan untuk menurunkan kadar total solid memenuhi syarat berjalannya proses dalam biodigester dengan lancar. Inokulum diambil dari Pusat Inovasi Agroindustri UGM di Kecamatan Berbah, Kab. Sleman, DIY. Substrat Kotoran sapi diambil dari Fakultas Peternakan UGM, sedangkan Vinasse diambil dari PT Madubaru di Desa Padokan, Tirtonirmolo, Kecamatan Kasihan, Kab. Bantul, DIY, yang merupakan limbah dari Unit Pabrik Spiritus/Alkohol.



Gambar 3. Lokasi pengambilan inokulum



Gambar 4. Lokasi pengambilan substrat kotoran sapi



Gambar 5. Lokasi pengambilan vinasse

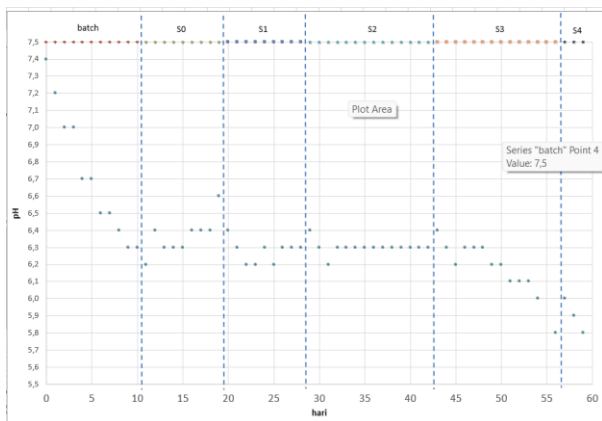
Mikroorganisme pengurai membutuhkan kondisi yang optimum untuk dapat bersinergi menghasilkan biogas. Total solid yang optimum untuk substrat adalah sekitar 6-7% (E 2001). Pada pengamatan awal dianalisis %TS untuk kotoran sapi, vinasse dan inokulum. Dari hasil perhitungan program spreadsheet didapatkan komposisi masing-masing komponen untuk bahan substrat tersebut, seperti pada tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Komposisi Substrat Starter

Substrat	% TS	% kadar abu	pH
Vinasse	8,625	1,79	4,0
Inokulum	6,100	1,215	7,0
Kotoran Sapi	17,610	2,554	-

Faktor penting yang lain adalah pH, dari hasil

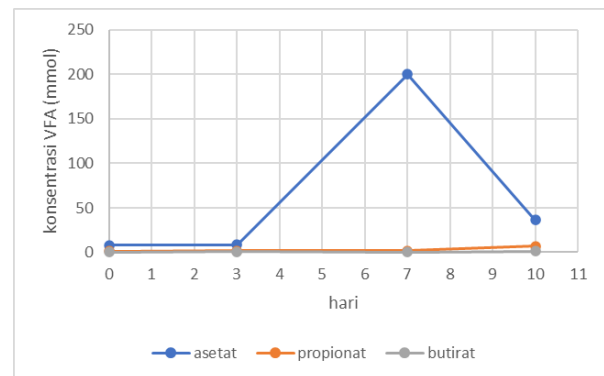
analisis diketahui pH untuk inokulum adalah 7,0, sedangkan pH Vinasse adalah 4,0. pH optimum pada biodigester adalah 6,8 hingga 7,2. pH yang rendah dari vinasse ini merupakan inhibitor bagi mikroorganisme dalam biodigester. Untuk menghindari pH shock loading terhadap mikrobial metanogen dan non metanogen maka komposisi umpan akan dinaikkan secara bertahap dari S0, S1, S2, S3, S4 dan S5, dengan perbandingan kotoran sapi: vinasse berbasis berat kering berturut-turut 100:0, 50:50; 25:75; 10:90; dan 0:100. Bahan yang digunakan untuk media starter dibuat dari campuran air, inokulum dan kotoran sapi dengan perbandingan berat 40:10:50. Campuran diperhitungkan untuk mendapatkan nilai %TS antara 6 hingga 8%. Dari hasil analisa untuk media ini didapatkan %TS dan %VS sebesar 6,445% dan 72,532%, Sedangkan nilai pHnya 7,4.



Gambar 6. Hubungan pH harian vs waktu

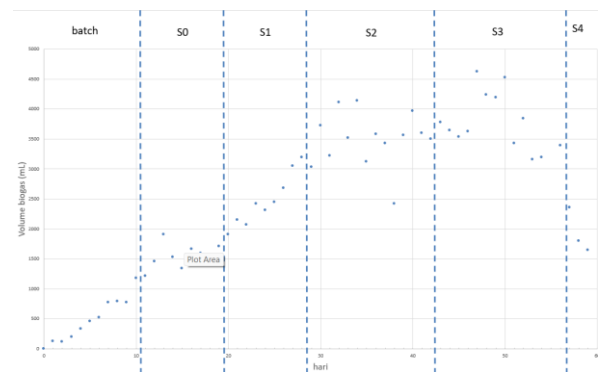
Seperti terlihat pada gambar 6, setelah dilakukan inisiasi biodigester, pada awal proses batch (tanpa umpan) dari hari ke-0 hingga hari ke-10 mengalami penurunan pH. Hal ini disebabkan oleh kinerja kelompok bakteri acidogen mengurai substrat menjadi komponen VFA antara lain asam asetat, asam propionat dan asam butirat. Kelompok mikrobial ini berkembang lebih cepat daripada kelompok mikrobial metanogen, sehingga pada substrat akan terjadi penumpukan materi VFA yang mengakibatkan penurunan pH. Kondisi ini perlu diwaspadai mengingat kelompok bakteri metanogen rentan kondisinya pada pH yang lebih rendah. Dari pengamatan pH terendah pada kondisi batch ini adalah 6,3 yang masih memungkinkan kelompok mikrobial metanogen berkembang. Jika pH dibawah 5 perlu dilakukan pengkondisian pH biodigester baik dengan substrat maupun bahan pengatur pH lainnya misalnya kapur atau soda abu. Analisa VFA yang dilakukan menunjukkan bahwa terjadi peningkatan konsentrasi asetat, propionat dan

butirat pada awal proses batch, seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik konsentrasi VFA

Dari gambar 7 terlihat bahwa pada hari ke-7 konsentrasi asam asetat naik hingga 200 mmol dan menurun setelahnya. Sedangkan kenaikan konsentrasi asam propionat dan butirat tidak begitu signifikan selama 10 hari pertama. Hal ini menunjukkan bahwa koloni mikrobial acidogen berkembang dengan cepat hingga hari ke-7 tercirikan dari tingginya konsentrasi asam asetat. Kelompok mikrobial metanogen terbentuk lebih lambat daripada kelompok mikrobial acidogen. Kinerja kelompok mikrobial metanogen tercermin dari banyaknya produksi biogas yang terbentuk. Dari penelitian ini didapatkan volume harian biogas seperti yang terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Grafik produksi volume biogas harian

Dari gambar 7 dan 8 terlihat bahwa setelah hari ke-7 konsentrasi VFA cenderung turun serta volume biogas mulai menunjukkan jumlah yang cukup hingga 800 mL. Ini menunjukkan bahwa kelompok mikrobial metanogen mulai berkembang meskipun lebih lambat laju dan waktu mulainya dibandingkan dengan kelompok mikrobial acidogen, yaitu mulai hari ke-7. Dari pengamatan pH, volume dan kadar biogas, maka terlihat bahwa pH biodigester dan volume biogas yang dihasilkannya hingga hari ke-10 sudah relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa kelompok

mikrobia asidogen dan metanogen relatif dalam kondisi setimbang baik dalam jumlah dan kinerjanya. Dari strategi yang diajukan pada gambar 2 berdasar kondisi bahwa metabolisme konsorsium mikrobia sudah relatif stabil maka pada hari ke-10 dimulai pengumpanan semi kontinyu. Dari fase batch ini didapat rata-rata produksi biogas sebanyak 480 mL/hari.

Pengumpanan semi kontinyu dengan komposisi umpan 100% KS (S0) dilakukan mulai hari ke-10. Pengumpanan substrat ini memulai kenaikan laju produksi biogas disebabkan kelompok mikrobia yang setimbang antara asidogen dan metanogen pada digester bekerja secara responsif untuk mengurai substrat. Rata-rata produksi biogas harian pada fase S0 ini adalah 1554 mL/hari. pH terendah yang tercatat adalah 6,2 pada hari ke-11, dan cenderung mengalami kenaikan hingga paling tinggi 6,6 pada hari ke-19. Pada fase ini kelompok mikrobia metanogen mampu mengimbangi aktifitas produksi VFA dari kelompok mikrobia asidogen, sehingga pH tidak menurun dan produksi biogas naik dibanding pada fase batch. pH yang cenderung naik selain karena aktifitas mikrobia metanogen juga didukung oleh umpan dengan komposisi 100% KS yang mempunyai nilai pH netral mendekati 7. Dengan mengamati kinerja kedua kelompok mikrobia ini yang ditunjukkan dengan kenaikan produksi biogas dan kenaikan pH, maka sesuai rencana pada gambar 3 dilakukan penggantian komposisi umpan menjadi 50% KS dan 50% vinasse (komposisi S1) mulai hari ke-19.

Pada pengamatan kinerja biodigester untuk komposisi umpan S1 dapat dilihat bahwa pH mulai hari ke 19 cenderung turun, hal ini dapat disebabkan oleh pengaruh vinasse dalam umpan yang menyebabkan pH umpan rendah. Dari pengukuran awal diketahui pH vinasse mempunyai nilai 4,0. Meski demikian karena pada komposisi S1 ini masih terdapat 50% substrat kotoran sapi maka penurunan pH yang terjadi tidak lebih rendah daripada 6,2. Hal lain yang menjaga pH tidak turun lebih jauh adalah kenaikan kinerja metanogen yang dapat dilihat dari produksi rata-rata biogas sebanyak 2470 mL/hari pada fase pengumpanan S1 ini, yang mengakibatkan terhindarnya penumpukan konsentrasi VFA pada biodigester. Kondisi stabil hingga hari ke 28 yang ditandai antara lain dengan nilai pH 6,3 dan volume biogas 3190 mL memantapkan langkah kerja untuk meningkatkan komposisi umpan S2 (25% KS dan 75% vinasse) mulai hari ke 29. Dari pengamatan kinerja biodigester untuk komposisi umpan S2 ini didapat rata-rata produksi biogas 3495 mL dengan pH

berkisar 6,3 hingga hari ke 42. Berdasarkan kestabilan produksi biogas dan indikasi stabilnya pH yang menandakan lancarnya kinerja metanogen, maka mulai hari ke 43 komposisi umpan ditingkatkan kandungan vinassenya dengan perbandingan 10% KS dan 90% vinasse (S3). Pada komposisi S3 ini meski produksi biogas rata-rata harian masih stabil sebanyak 3780 mL, tetapi mulai terlihat indikasi turunnya nilai pH menjadi 5,8 hingga hari ke 55. Pada keseluruhan penelitian ini puncak produksi biogas terjadi pada hari ke 47, atau 5 hari setelah diberlakukannya komposisi umpan S3. Setelah itu produksi biogas menurun. Kondisi metanogen yang tidak konsisten untuk komposisi umpan S3 ini menunjukkan bahwa komposisi S3 yang pada awalnya meningkatkan kinerja metanogen hingga hari ke 47, tetapi dengan besarnya komposisi vinasse pada umpan (hingga 90%) menyebabkan gangguan terhadap kesetimbangan pH pada biodigester. Ketika komposisi umpan dirubah menjadi 100% vinasse (S4) mulai hari ke 57 maka tren penurunan produksi biogas berlanjut hingga hari ke 59 teramati hanya menghasilkan 1642 mL.

4 PENUTUP

Sistem biodigester disimpulkan dapat beraklimatisasi terhadap perubahan komposisi substrat S0 dan S1 dengan sangat baik. Kesetimbangan populasi metanogen dan non metanogen hingga komposisi substrat S1 terjaga baik dicirikan dengan stabilnya pH pada rentang 6,2-6,4 hingga akhir hari ke 28. Waktu aklimatisasi bagi mikrobia hingga mencapai kesetimbangan untuk komposisi substrat S0 dan S1 adalah masing-masing 9 hari. Hingga akhir periode komposisi umpan S0 dan S1, produksi biogas meningkat dengan hasil produksi rata-rata 1554 dan 2470 mL/hr. Pada komposisi substrat S2 pH biodigester berkisar 6,2-6,4 dan cenderung stabil pada nilai 6,3, pH minimum sebesar 6,2 ini serupa dengan range pH minimum kondisi operasi biodigester pada keadaan stabil pada percobaan yang dilakukan pada biodigester anaerob dengan substrat limbah organik (Granzotto et al. 2021).

Pada 11 hari terakhir periode S2 produksi biogas harian meningkat menjadi 3495 mL/hr meski terlihat berfluktuatif dan menunjukkan tren datar. Hal ini menunjukkan bahwa kesetimbangan mikrobia metanogen masih terjaga meski pada hari ke 38 mencapai produksi biogas terendah pada hari ke 38, tetapi kembali stabil hingga akhir periode komposisi umpan S2. Dengan stabilnya pH hingga hari ke 28 maka komposisi substrat kembali ditingkatkan menjadi S3 mulai hari ke 29. Pada 6 hari pertama periode S3, pH stabil

berkisar antara 6,2-6,4, mulai hari ke 7 pH cenderung menurun hingga 5,8. Produksi biogas pada komposisi substrat S3 ini lebih tinggi dari periode sebelumnya yaitu mencapai 3780 mL/hr. Meski produksi biogas meningkat, kesetimbangan mikrobial anaerobik mulai terganggu secara signifikan. pH yang semakin turun hingga 5,8 akibat menumpuknya hasil metabolisme asidogen dan acetogen ini mulai merubah kesetimbangan populasi mikrobial. Waktu aklimatisasi hingga 14 hari tidak cukup untuk mikrobial metanogen untuk melakukan adaptasi terhadap komposisi S3. Komposisi umpan ditingkatkan ke S4 mulai hari ke 56 dengan pertimbangan bahwa produksi biogas masih terjaga di komposisi S3. Komposisi S4 ini ternyata tidak dapat diatasi oleh biodigester, hingga hari ke 58, pH tidak kembali naik diatas 5,8, dan produksi biogas melambat menjadi 1932 mL/hr. Dari hasil ini disimpulkan bahwa strategi perlu disempurnakan lagi untuk memberikan waktu aklimatisasi yang cukup terhadap kenaikan komposisi vinasse pada substrat. Sampai dengan komposisi substrat S2, biodigester dapat melakukan aklimatisasi secara baik, tetapi peningkatan komposisi vinasse hingga 90% pada fase S3 memicu ketidak setimbangan mikrobial biodigester. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan memperkecil kenaikan perbandingan vinasse setelah komposisi S2. Perlakuan pre treatment (co) substrat tentu saja dapat meningkatkan yield dan keseimbangan kondisi biodigester (Elihimas et al. 2025) meski demikian dalam penelitian ini dapat disimpulkan bawa komposisi yang disarankan untuk mengelola vinasse sebagai co substrat dalam produksi biogas tanpa pre treatment substrat dan pH adjustment proses adalah tidak lebih dari komposisi S2.

DAFTAR PUSTAKA

Carrilho, E. N.V.M., G. Labuto, and M. Y. Kamogawa. 2016. Destination of Vinasse, a Residue From Alcohol Industry: Resource Recovery and Prevention of Pollution. *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00002-0>.

Chandra, Ram, Ram Naresh Bharagava, and Vibhuti Rai. 2008. "Melanoidins as Major Colourant in Sugarcane Molasses Based Distillery Effluent and Its Degradation." *Bioresource Technology* 99 (11): 4648–60.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.057>.

E, Dennis a Burke P. 2001. "Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook." *Time* 20 (3): 156–61. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WYV-4HJ3VM2-2/2/ddf81cc8e21efc39b285d358a28bcea2>.

Elihimas, Diego Rafael Mágero, Graciano Fernandes de Mendonça, Cláudia Jéssica da Silva Cavalcanti, Mauro Antonio da Silva Sa Ravagnani, Caliane Bastos Borba Costa, Diogo Ardaillon Simões, Sávia Gavazza, and Bruna Soares Fernandes. 2025. "Towards Biogas Production from Vinasse and Pentose Liquor from Sugarcane Biorefineries." *Energy Conversion and Management: X* 26 (December 2024): 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100925>.

España-Gamboa, Elda, Teresa Vicent, Xavier Font, Jorge Dominguez-Maldonado, Blondy Canto-Canché, and Liliana Alzate-Gaviria. 2017. "Pretreatment of Vinasse from the Sugar Refinery Industry under Non-Sterile Conditions by *Trametes Versicolor* in a Fluidized Bed Bioreactor and Its Effect When Coupled to an UASB Reactor." *Journal of Biological Engineering* 11 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13036-016-0042-3>.

Fuess, Lucas Tadeu, and Marcelo Loureiro Garcia. 2014. "Implications of Stillage Land Disposal: A Critical Review on the Impacts of Fertigation." *Journal of Environmental Management* 145: 210–29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.003>.

Granzotto, F., C. Aita, D. D. Silveira, F. D. Mayer, S. B. Pujol, J. A.V. Piñas, and R. Hoffmann. 2021. "Use of Anaerobic Biodigester in the Treatment of Organic Waste from a University Restaurant." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105795>.

- Hassan, Muhammad Umair, Muhammad Aamer, Muhammad Umer Chattha, Tang Haiying, Imran Khan, Mahmoud F. Seleiman, Adnan Rasheed, et al. 2021. "Sugarcane Distillery Spent Wash (Dsw) as a Bio-Nutrient Supplement: A Win-Win Option for Sustainable Crop Production." *Agronomy* 11 (1). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11010183>.
- Jiang, Ze Pu, Yang Rui Li, Guang Po Wei, Qing Liao, Tian Ming Su, Yan Cheng Meng, Hai Ying Zhang, and Chang Yan Lu. 2012. "Effect of Long-Term Vinasse Application on Physico-Chemical Properties of Sugarcane Field Soils." *Sugar Tech* 14 (4): 412–17. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0174-9>.
- Li, Yue, Yinguang Chen, and Jiang Wu. 2019. "Enhancement of Methane Production in Anaerobic Digestion Process: A Review." *Applied Energy* 240 (February): 120–37. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>.
- Mikucka, Wioleta, and Magdalena Zielińska. 2020. "Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization." *Applied Biochemistry and Biotechnology* 192 (3): 770–93. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>.
- Moraes, B. S., J. M. Triolo, V. P. Lecona, M. Zaiat, and S. G. Sommer. 2015. "Biogas Production within the Bioethanol Production Chain: Use of Co-Substrates for Anaerobic Digestion of Sugar Beet Vinasse." *Bioresource Technology* 190: 227–34. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.089>.
- Moran-Salazar, R. G., A. L. Sanchez-Lizarraga, J. Rodriguez-Campos, G. Davila-Vazquez, E. N. Marino-Marmolejo, L. Dendooven, and S. M. Contreras-Ramos. 2016. "Utilization of Vinasess as Soil Amendment: Consequences and Perspectives." *SpringerPlus* 5 (1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>.
- Nunes Ferraz Junior, Antônio Djalma, Claudia Etchebehere, Danilo Perecin, Suani Teixeira, and Jeremy Woods. 2022. "Advancing Anaerobic Digestion of Sugarcane Vinasse: Current Development, Struggles and Future Trends on Production and End-Uses of Biogas in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157 (December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>.
- Parsaee, Mostafa, Mostafa Kiani Deh Kiani, and Keikhosro Karimi. 2019. "A Review of Biogas Production from Sugarcane Vinasse." *Biomass and Bioenergy* 122 (December 2018): 117–25. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>.
- Rajagopal, Vadivel, Singh Minhas Paramjit, Kumar P Suresh, Singh Yogeswar, Rao D.V.K. Nageshwar, and Nirmale Avinash. 2014. "Significance of Vinasess Waste Management in Agriculture and Environmental Quality-Review." *African Journal of Agricultural Research* 9 (38): 2862–73. <https://doi.org/10.5897/ajar2014.8819>.
- Setiaji, Arkan, Budi Santoso, and Hendrawan Wibisono. 2023. "Effect of Sugarcane Filter Cake-Based Organomineral Fertilizers on Sweet Maize Growth." *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 12 (Special Issue): 159–77. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2023.1973162.1559>.
- Soto, María Fernanda, Carlos Andrés Diaz, Ana María Zapata, and Juan Carlos Higueta. 2021. "BOD and COD Removal in Vinasess from Sugarcane Alcoholic Distillation by *Chlorella Vulgaris*: Environmental Evaluation." *Biochemical Engineering Journal* 176 (September): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108191>.