



Terbit online pada laman web jurnal :<http://jurnaldampak.ft.unand.ac.id/>

Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas

| ISSN (Print) 1829-6084 | ISSN (Online) 2597-5129 |



Artikel Penelitian

Pemanfaatan Proses Anaerobik untuk Pengolahan Air Limbah Industri Gula: Studi Variasi Inokulum dan pH

Zadariana Jamil Osman¹⁾, Budhi Primasari^{2*)}, Zulkifli Ahmad³⁾

1) School of Civil Engineering, College of Engineering, Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Malaysia

2) Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

3) Faculty of Engineering, University of Malaya, Malaysia

*Koresponden: budhiprimasari@eng.unand.ac.id

Diterima: 31 Oktober 2024

Diperbaiki: 29 November 2024

Disetujui: 7 Januari 2025

ABSTRACT

Sugar processing wastewater collected from the X factory, Selangor, was treated using an anaerobic microbial process. The microbial inoculum was derived from the microflora present in the sludge obtained from the clarifier unit of the treatment plant. The treatment was conducted under dark conditions, with key operational parameters including pH, inoculum size, temperature, and rotation speed. Monitored parameters included chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), pH, and biogas production. The inoculum was pre-incubated for two days using sugar processing wastewater as the substrate, with the pH adjusted to 5.0 to inhibit methanogenic bacterial activity. The treatment was performed in sealed vials with a working volume of 10 mL. A preliminary study identified the optimal treatment duration to be 60 hours, based on maximum COD reduction and biogas yield. In the main experiments, inoculum size (10%, 20%, 30%) and temperature (30°C, 35°C, 40°C) were systematically varied. The process achieved a COD reduction of up to 82%, and the microflora demonstrated the ability to produce biogas volumes of up to 1.6 mL per 10 mL of wastewater. A decrease in pH was observed during treatment due to the activity of acidogenic bacteria. Additionally, a substantial increase in TSS was recorded, with a maximum increment of 460%, indicating microbial growth and biomass accumulation.

Keyword: anaerobic treatment, COD removal, inoculum size, microflora, sugar wastewater

ABSTRAK

Air limbah proses pengolahan gula yang dikumpulkan berasal dari pabrik gula X dari di Selangor. Inokulum mikroba diperoleh dari mikroflora yang terdapat dalam lumpur sedimentasi pada instalasi pengolahan air limbah. Proses pengolahan dilakukan dalam kondisi gelap, dengan parameter operasi utama meliputi pH, ukuran inokulum, dan suhu temperatur. Parameter yang diamati mencakup kebutuhan oksigen kimiawi (COD), total padatan tersuspensi (TSS), pH, dan produksi biogas. Inokulum diinkubasi selama dua hari menggunakan substrat berupa air limbah pengolahan gula, dengan pH disesuaikan menjadi 5,0 untuk menghambat aktivitas bakteri metanogenik. Pengolahan dilakukan dalam vial tertutup dengan volume kerja sebesar 10 mL. Studi pendahuluan menunjukkan bahwa waktu optimum pengolahan adalah 60 jam, berdasarkan efisiensi penurunan COD dan volume biogas yang dihasilkan. Dalam eksperimen utama, parameter operasi divariasikan, yaitu ukuran inokulum (10%, 20%, 30%) dan temperatur (30°C, 35°C, 40°C). Proses ini mampu menurunkan COD hingga 82%, serta mikroflora yang digunakan menunjukkan kemampuan menghasilkan biogas hingga 1,6 mL per 10 mL limbah. Penurunan pH selama proses pengolahan diamati sebagai akibat aktivitas bakteri penghasil asam (asidogenik). Selain itu, terjadi peningkatan signifikan pada TSS, dengan kenaikan maksimum mencapai 460%, yang mengindikasikan pertumbuhan mikroba dan akumulasi biomassa.

Kata Kunci: air limbah pabrik gula, mikroflora, pengolahan anaerobik, penyisihan COD, ukuran inokulum,

1. PENDAHULUAN

Industri gula memiliki peranan penting dalam mendukung ketahanan pangan dan perekonomian nasional. Di Malaysia, industri ini berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan gula domestik dan menjadi bagian penting dalam sektor agroindustri. Dalam proses produksinya, industri gula menghasilkan air limbah dalam jumlah besar yang berasal dari berbagai tahap produksi, termasuk ekstraksi tebu, klarifikasi, kristalisasi, dan pencucian.

Air limbah pabrik gula umumnya memiliki karakteristik pencemar yang tinggi, baik dari segi kandungan bahan organik maupun anorganik, yang bervariasi tergantung pada proses produksi dan bahan baku yang digunakan. Podder dan Poddar (2015) mencatat bahwa konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) awal pada air limbah industri gula dapat mencapai 3.682 mg/L dan berhasil diturunkan hingga 300 mg/L setelah pengolahan fisikokimia, dengan kandungan sulfat sebesar 419 mg/L serta minyak dan lemak sebesar 12 mg/L pada limbah mentah. Studi lain oleh Costa Cabral et al. (2022) menyebutkan bahwa air limbah dari industri gula-etanol memiliki kadar COD antara 1.000–7.000 mg/L, Biochemical Oxygen Demand (BOD) berkisar 800–2.500 mg/L, Total Suspended Solid (TSS) antara 500–3.000 mg/L, dan pH dalam rentang 5–9, yang menunjukkan tingginya variasi komposisi limbah berdasarkan operasional masing-masing pabrik. Sementara itu, More, Chavan, Sharma, dan Lali (2021) menemukan bahwa air limbah dari proses pengolahan gula memiliki rasio BOD/COD yang tinggi serta kadar COD awal yang besar, sehingga menunjukkan potensi tinggi untuk pengolahan secara biologis, khususnya dalam produksi senyawa bernilai tambah seperti volatile fatty acids melalui fermentasi asidogenik. mAir limbah pabrik gula ini apabila dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, dapat menyebabkan eutrofikasi pada badan air, menurunkan kadar oksigen terlarut, dan membahayakan ekosistem akuatik.

Salah satu pendekatan pengolahan limbah yang semakin banyak dikembangkan adalah sistem pengolahan secara biologis, baik secara aerobik maupun anaerobik. Pengolahan aerobik memerlukan suplai oksigen yang terus-menerus dan umumnya menghasilkan lumpur aktif dalam jumlah besar. Pengolahan limbah secara anaerobik memiliki keunggulan signifikan dalam hal efisiensi energi dan pemanfaatan limbah sebagai sumber energi terbarukan. Proses ini tidak memerlukan aerasi seperti pada sistem aerobik, sehingga konsumsi energi jauh lebih rendah. Selain itu, penguraian bahan organik oleh mikroorganisme anaerob menghasilkan biogas yang terdiri dari metana, yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik dan panas, bahkan memungkinkan instalasi pengolahan air limbah menjadi produsen energi bersih (Musa, Idrus, Che Man, & Nik Daud, 2018). Sejalan dengan itu, Vutai, Ma, dan Lu (2016) menyatakan bahwa teknologi anaerobik berperan penting dalam pengelolaan air limbah, tidak hanya untuk menurunkan beban pencemar, tetapi juga untuk mendukung keberlanjutan melalui pemanfaatan energi dari biogas yang dihasilkan. Dengan demikian, sistem anaerobik tidak hanya menawarkan efisiensi proses, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan pencapaian tujuan energi terbarukan.

Namun, keberhasilan proses anaerobik sangat tergantung pada berbagai faktor, seperti jenis dan konsentrasi substrat, pH, suhu, waktu retensi, dan jenis inokulum yang digunakan. Mikroorganisme yang terlibat dalam proses ini juga memerlukan kondisi lingkungan yang sesuai untuk tumbuh dan berfungsi secara optimal. Salah satu strategi yang umum digunakan untuk meningkatkan efisiensi proses adalah dengan menggunakan inokulum dari sistem pengolahan yang sudah mapan atau dari sumber yang mengandung mikroflora yang telah beradaptasi dengan lingkungan yang serupa. Dalam konteks ini, lumpur klarifikasi dari instalasi pengolahan limbah menjadi salah satu sumber inokulum potensial yang mengandung komunitas mikroba beragam dan aktif.

Karakteristik dan komposisi komunitas mikroba sangat dipengaruhi oleh jenis dan sumber inokulum; misalnya, inokulum dari lumpur aktif dan limbah ternak memiliki pengaruh besar terhadap kestabilan proses metanogenesis, yang merupakan tahap kritis dalam pembentukan biogas (Shah et al., 2014; Liaquat et al., 2017). Hasil analisis metagenomik juga menunjukkan bahwa suhu mesofilik (sekitar 35 °C) mendukung pertumbuhan komunitas bakteri dan arkea yang lebih beragam dan stabil, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi pengurangan COD dan produksi biogas dalam sistem pengolahan anaerobik (Piercy et al., 2025).

Secara umum, studi-studi sebelumnya telah menunjukkan keberhasilan pengolahan air limbah pabrik gula secara anaerobik dalam skala laboratorium maupun pilot. Sebuah studi oleh Liew et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan sistem reaktor batch anaerobik dengan mikroflora lumpur aktif secara efektif mampu menurunkan kadar COD dari 80.000 mg/L menjadi 550 mg/L dalam waktu retensi 13 hari. Efisiensi penghilangan COD yang

dicapai dalam penelitian ini mencapai 99,31%, menunjukkan kinerja dekomposisi bahan organik yang sangat tinggi oleh mikroorganisme anaerob. Hasil ini membuktikan bahwa lumpur aktif memiliki potensi besar dalam pengolahan air limbah industri dengan beban organik tinggi, khususnya pada sistem batch anaerobik.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas proses pengolahan air limbah industri gula melalui fermentasi anaerobik dalam keadaan gelap menggunakan mikroflora dari lumpur klarifikasi. Analisis dilakukan terhadap penurunan kadar COD, pH dan pembentukan partikulat. Dalam penelitian ini memanfaatkan lumpur dari sistem klarifikasi sebagai sumber mikroflora untuk proses pengolahan anaerobik air limbah pabrik gula. Inokulum tersebut diinkubasi dengan substrat air limbah dalam kondisi anaerobik untuk mengaktifkan komunitas mikroorganisme. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah menekan aktivitas bakteri metanogenik pada tahap awal dengan mengatur pH menjadi lebih rendah (sekitar pH 5). Hal ini dimaksudkan untuk memfokuskan proses pada tahap asidogenesis, yaitu konversi senyawa organik kompleks menjadi asam-asam volatil, yang berkontribusi terhadap produksi biogas awal. Peneliti juga bertujuan untuk menentukan pH dan ukuran inokulum optimum.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pengolahan air limbah industri gula yang lebih efektif dan efisien, serta mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya dalam bidang pengelolaan air limbah dan perlindungan lingkungan.

2. METODOLOGI

2.1 Variasi Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada pengujian efektivitas proses pengolahan air limbah pabrik gula secara anaerobik menggunakan mikroflora alami dari lumpur klarifikasi sebagai inokulum. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi pengolahan dan produksi biogas, meliputi:

1. Ukuran inokulum: persentase volume inokulum yang digunakan terhadap volume total reaktor (10%, 20%, 30%).
2. pH (4,5 dan 6)
3. Kecepatan rotasi proses pengadukan 200 rpm, serta temperatur 30°C

2.2 Air Limbah

Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini diambil langsung dari industri gula X di Shah Alam, yang merupakan representasi limbah nyata dari industri pengolahan gula. Proses inkubasi dilakukan dalam vial tertutup dengan volume kerja 10 mL dalam kondisi gelap dan tanpa suplai oksigen. Parameter yang diamati selama dan setelah proses meliputi penurunan kebutuhan oksigen kimiawi (COD); perubahan pH; peningkatan total padatan tersuspensi (TSS) dan volume biogas yang dihasilkan

Sampel air limbah diperoleh dari Pabrik Gula X, Selangor, pada saluran keluar pabrik menuju instalasi pengolahan air limbah. Pengambilan dilakukan antara pukul 10.00 hingga 11.00 pagi menggunakan wadah berkapasitas 2 liter. Limbah dimasukkan hingga berlimpah untuk menghindari adanya ruang udara yang memungkinkan terjadinya pertukaran oksigen.

Lumpur aktif sebagai sumber mikroflora diambil dari klarifier instalasi pengolahan limbah di lokasi yang sama. Setelah pengambilan, sampel diuji kandungan COD, pH, dan TSS pada hari yang sama, sementara sisanya disimpan pada suhu 4°C hingga digunakan lebih lanjut.

2.3 Inokulasi Mikroflora

Inokulasi dilakukan untuk menumbuhkan mikroflora dari lumpur menjadi populasi bakteri yang cukup untuk proses fermentasi. Proses dilakukan dalam dua fase. Fase pertama adalah 200 mL lumpur dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL, dan pH disesuaikan ke pH 5 menggunakan H₂SO₄ 0,01 N. Erlenmeyer ditutup parafilm untuk mencegah kebocoran gas dan diaduk di atas orbital shaker (200 rpm) selama 48 jam. Sedangkan fase kedua adalah penampuran, di mana 10% hasil inokulasi fase 1 dan 90% lumpur baru dimasukkan ke dalam Erlenmeyer, dan pH

diatur kembali ke pH 5. Erlenmeyer diguncang kembali selama 48 jam di atas orbital shaker. Proses ini diulang sesuai kebutuhan jumlah inokulum.

2.4 Pengolahan Anaerobik Menggunakan Mikroflora

Percobaan pendahuluan dilakukan, dengan tujuan untuk menentukan waktu optimal pengolahan berdasarkan efisiensi pengurangan COD dan volume biogas yang dihasilkan. Dua jenis inokulum digunakan: 100% lumpur hasil inokulasi dan campuran 10% inokulum dengan 90% air limbah. Percobaan dilakukan dalam vial 22 mL (volume kerja 10 mL) tertutup rapat. Pada percobaan pendahuluan parameter operasi adalah temperature 30°C, pH 5, kecepatan rotasi 200 rpm dan waktu running percobaan selama 5 hari. Parameter yang divariasikan adalah ukuran inokulum, yaitu 10%, 20%, dan 30%. Parameter yang diamati setiap hari adalah COD, TSS, pH, dan volume biogas. Percobaan dilakukan dalam kondisi gelap. Pengaturan pH ke pH 5 dilakukan dengan penambahan H_2SO_4 0,01 N. Kondisi anaerobic diciptakan dengan sparging gas nitrogen selama 2 menit.

Percobaan utama menggunakan variasi parameter yang: pH (4, 5, 6), ukuran inokulum (10%, 20%, 30%), kecepatan rotasi 200 rpm, dan suhu 30°C. Durasi proses adalah 60 jam. Setelah proses selesai, sampel diuji untuk COD, TSS, pH, dan volume biogas. Setiap percobaan dilakukan dua kali untuk validitas hasil.

2.5 Analisis Parameter

Analisis parameter yang diamati dilakukan sesuai dengan prosedur standar analisis sebagai berikut:

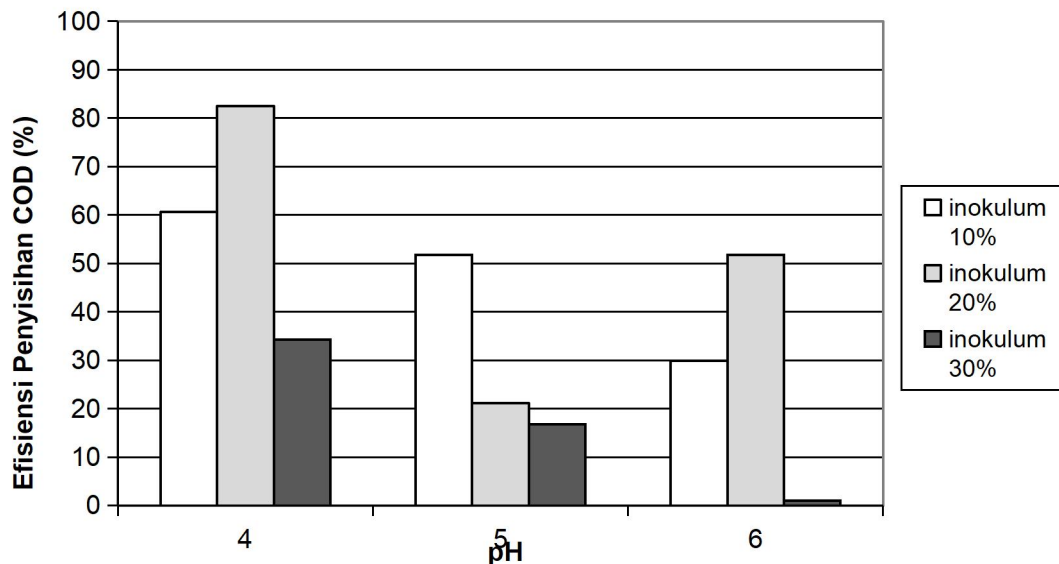
1. COD dilakukan dengan metode open reflux menggunakan kalium dikromat dalam kondisi asam mengikuti APHA 5220 B (APHA, 1995).
2. TSS dengan metoda gravimetri berdasarkan residu yang tertinggal pada kertas saring setelah penguapan dan pengeringan pada suhu 103–105°C, mengacu pada APHA 2540 D (APHA, 1995).
3. Pengukuran pH dilakukan menggunakan pH meter
4. Volume biogas diukur menggunakan jarum suntik 10 mL yang ditembuskan ke stopper vial. Karena tekanan internal lebih tinggi, gas terdorong masuk ke dalam suntikan dan volumenya dibaca secara langsung.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Penyisihan COD

Penyisihan COD pada variasi pH dan ukuran inoculum dapat dilihat pada Gambar 1. Dari data yang diperoleh, efisiensi penyisihan COD sangat dipengaruhi oleh variasi pH. Pada pH 4, efisiensi tertinggi dicapai dengan inokulum 20%, yakni sekitar 82,48%, diikuti oleh inokulum 10% dengan efisiensi 60,58%. Inokulum 30% menunjukkan efisiensi terendah, yaitu 34,30%. Hal ini menunjukkan bahwa pH asam dapat meningkatkan aktivitas mikroba, terutama pada konsentrasi inokulum yang lebih rendah. Penelitian oleh Dadrassia et al. (2020) menunjukkan bahwa pH yang optimal sangat penting dalam memaksimalkan penyisihan COD dalam limbah cair. Penurunan efisiensi pada pH 5 terlihat jelas, di mana inokulum 10% hanya mampu menciptakan efisiensi 51,82%, sementara inokulum 20% dan 30% menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah, yaitu 21,16% dan 16,78%, masing-masing. Ini mengindikasikan bahwa pH yang lebih netral mungkin tidak mendukung aktivitas mikroba secara efektif (Huang et al., 2022).

Pada pH 6, efisiensi penyisihan COD kembali menurun untuk semua ukuran inokulum. Inokulum 10% menunjukkan efisiensi terendah di angka 29,92%, sementara inokulum 20% sedikit lebih baik dengan 51,82%. Inokulum 30% sangat rendah, hanya 1%. Hal ini menunjukkan bahwa pH yang terlalu netral mungkin tidak optimal untuk proses biodegradasi. Secara keseluruhan, pH 4 tampaknya menjadi kondisi terbaik untuk penyisihan COD dalam konteks ini. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Mohsenpour et al. (2021), yang mencatat bahwa pH yang lebih asam meningkatkan aktivitas mikroba dalam pengolahan limbah organik.



Gambar 1. Penyisihan COD pada Variasi pH dan Ukuran Inokulum

Ukuran inokulum juga memengaruhi efisiensi penyisihan COD. Inokulum 20% menunjukkan kinerja terbaik pada pH 4, dengan efisiensi 82,48%, yang menunjukkan bahwa konsentrasi sedang dapat memaksimalkan aktivitas mikroba dalam kondisi pH asam. Sementara itu, inokulum 10% juga menunjukkan kinerja yang baik, tetapi tidak seefisien inokulum 20%. Namun, pada pH 5 dan 6, efisiensi penyisihan COD untuk inokulum 20% dan 30% turun drastis. Pada pH 5, efisiensi inokulum 20% hanya 21,16%, dan inokulum 30% bahkan lebih rendah di 16,78%. Pada pH 6, efisiensi inokulum 30% hampir tidak ada, hanya 1%.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan inokulum yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan efisiensi yang lebih baik. Konsentrasi inokulum yang lebih tinggi dapat menyebabkan kompetisi antar mikroba, yang mengakibatkan penurunan efisiensi penyisihan COD (Zhang et al., 2020). Penelitian oleh Patel et al. (2019) juga menemukan bahwa ukuran inokulum yang lebih rendah dapat meningkatkan aktivitas mikroba dan efisiensi penyisihan COD. Oleh karena itu, pemilihan ukuran inokulum yang tepat sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal dalam proses pengolahan limbah organik. Hanafi et al. (2015) meneliti pengaruh ukuran inokulum terhadap pengurangan COD dan menemukan bahwa ukuran inokulum yang optimal sangat penting untuk efisiensi (Hanafi et al., 2015).

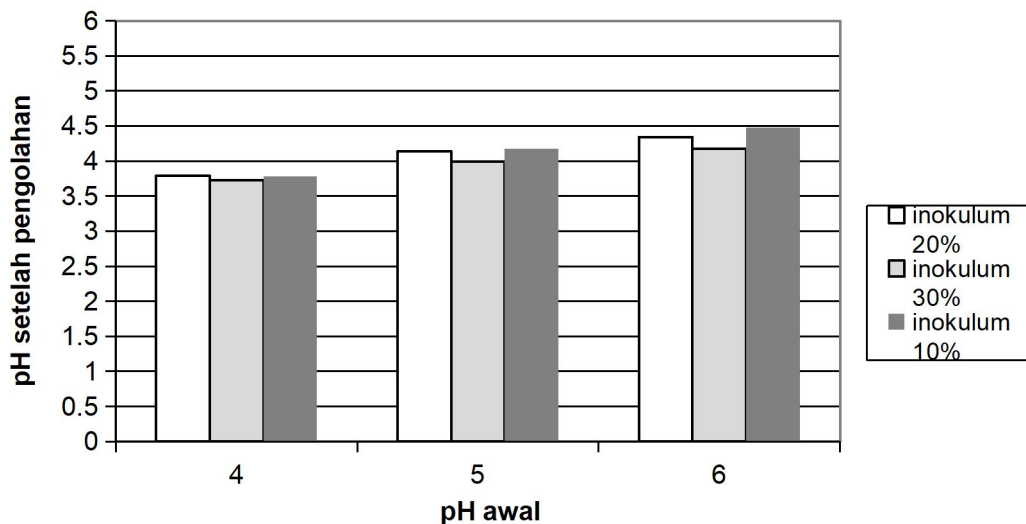
Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa pH 4 dengan inokulum 20% memberikan hasil penyisihan COD terbaik. Selain itu, ukuran inokulum yang lebih rendah cenderung lebih efisien dalam kondisi tertentu, terutama pada pH asam. Pengaturan pH dan ukuran inokulum yang tepat sangat penting untuk meningkatkan kinerja penyisihan COD dalam pengolahan limbah. Penelitian oleh Li et al. (2021) menekankan pentingnya optimasi ukuran inokulum untuk meningkatkan kinerja pencernaan anaerobik.

3.2 Perubahan pH

Setelah proses pengolahan terjadi perubahan pH, yang dapat dilihat pada Gambar 2. Pada inokulum 10%, terdapat pengurangan pH yang signifikan pada pH 4, dengan nilai 0,121, yang menunjukkan bahwa pada kondisi pH asam, mikroba mampu beradaptasi dan melakukan metabolisme dengan baik. Namun, pada pH 5 dan 6, tidak ada pengurangan pH yang terukur, yang mungkin menunjukkan bahwa mikroba dalam inokulum 10% tidak dapat bertahan dalam kondisi yang lebih netral atau basa. Penelitian oleh Zhang et al. (2020) menekankan bahwa pH yang optimal untuk pertumbuhan mikroba sangat tergantung pada jenis mikroorganisme yang digunakan, dan beberapa mikroba mungkin tidak efektif dalam kondisi pH netral.

Pada inokulum 20%, tidak ada pengurangan pH yang terdeteksi pada semua kondisi, yang menunjukkan bahwa konsentrasi ini mungkin terlalu tinggi untuk mendukung aktivitas mikroba dalam pengolahan pH. Ini sejalan dengan penelitian oleh Patel et al. (2019), yang menunjukkan bahwa ukuran inokulum yang lebih tinggi tidak

selalu meningkatkan efisiensi dalam pengolahan limbah, dan bahkan dapat menghambat proses jika terjadi kompetisi antar mikroba.



Gambar 2. Perubahan pH setelah Pengolahan pada Variasi pH dan Ukuran Inokulum

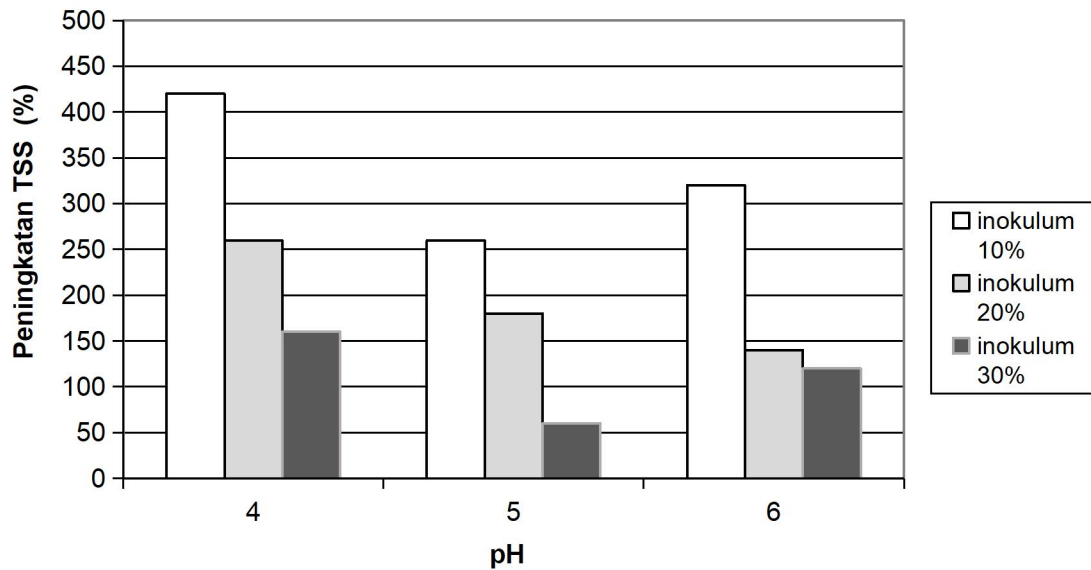
Inokulum 30% menunjukkan perubahan yang lebih signifikan, dengan pengurangan pH pada pH 6 sebesar 0,432. Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi inokulum yang lebih tinggi, mikroba dapat beradaptasi dan melakukan metabolisme lebih efektif pada pH netral, meskipun pengurangan pH pada pH 5 hanya 0,093, yang masih sangat rendah. Hal ini menunjukkan adanya potensi untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah dengan ukuran inokulum yang lebih tinggi, tetapi hasil ini bervariasi tergantung pada pH (Hanafi et al., 2015).

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa inokulum 10% paling efektif pada pH asam, sementara inokulum 30% dapat beradaptasi lebih baik dalam kondisi pH netral. Pengaturan pH dan ukuran inokulum yang tepat sangat penting untuk meningkatkan kinerja penyisihan pH dalam pengolahan limbah. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami interaksi antara pH, ukuran inokulum, dan jenis mikroba dalam konteks pengolahan limbah organik.

3.3 Peningkatan TSS

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran peningkatan konsentrasi TSS setelah proses pengolahan. Peningkatan TSS terjadi karena setelah proses pengolahan terbentuk mikroorganisme baru, yang berarti akan meningkatkan jumlah Volatile Suspended Solid (VSS) dan sebagai konsekuensinya, konsentrasi TSS juga meningkat. Peningkatan TSS dapat diamati pada Gambar 3. Terdapat peningkatan TSS sebesar 410 %, yang mencerminkan akumulasi biomassa dan partikel terlarut—serupa dengan Menzel et al. (2020) yang melaporkan peningkatan TSS signifikan seiring naiknya populasi mikroba selama tahap hidrolisis, dan Presti et al. (2021) yang menunjukkan peningkatan VS/TSS sebagai indikator aktivitas mikroba dan produksi VFA dalam fermentasi batch pada pH optimal.

Peningkatan 410 % pada TSS menjadi indikator peningkatan biomassa mikroba, biofilm, dan partikel tidak larut selama fermentasi. Menzel et al. (2020) melaporkan TSS meningkat 350–500 % seiring pertumbuhan populasi mikroba selama tahap hidrolitik dan acidogenik, yang konsisten dengan temuan Anda. Presti et al. (2021) juga menemukan bahwa peningkatan volatile solids (VS)/TSS hingga >300 % merefleksikan aktivitas tinggi produksi VFA serta akumulasi biomassa dalam fermentasi sludge pabrik limbah arxiv.org. Data ini menunjukkan bahwa peningkatan TSS adalah efek alami proses fermentasi, dan bukan masalah operasional, serta mendukung keefektifitasan proses dalam membangun komunitas mikroba produktif.



Gambar 3. Peningkatan TSS Setelah Pengolahan pada Variasi pH dan Ukuran Inokulum

3.4 Volume Biogas

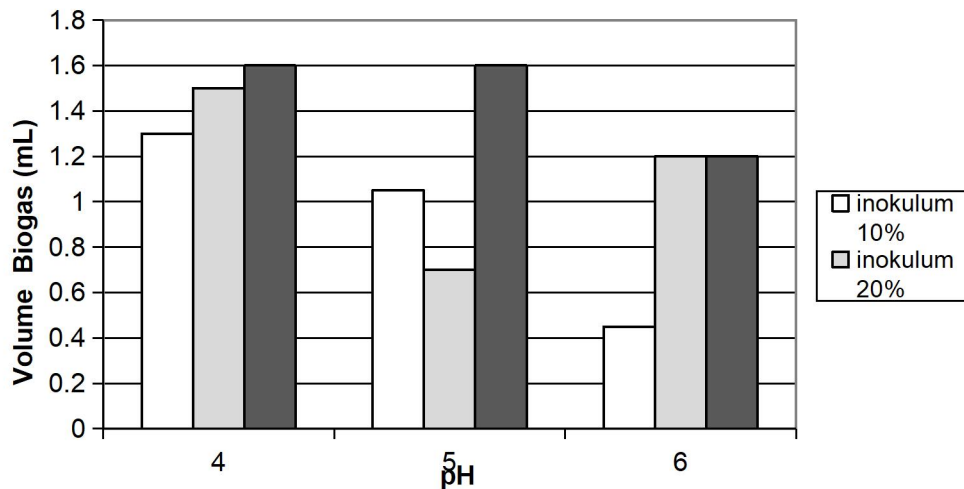
Jumlah biogas yang dihasilkan setelah proses pengolahan bervariasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Interaksi antara pH dan ukuran inokulum memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi produksi biogas. Pada pH 4, dengan inokulum 30%, produksi biogas mencapai 1,6 mL, menjadi yang tertinggi di antara semua kondisi yang diuji. Namun, pola yang menarik muncul ketika mempertimbangkan kombinasi lain dari pH dan ukuran inokulum.

Pada inokulum 10%, produksi biogas tertinggi tercatat pada pH 4 (1,3 mL), diikuti oleh penurunan pada pH 5 (1,05 mL) dan penurunan lebih lanjut pada pH 6 (0,45 mL). Tren ini menunjukkan bahwa kondisi asam lebih disukai oleh mikroorganisme yang ada dalam inokulum 10%. Sebaliknya, inokulum 20% menunjukkan produksi biogas tertinggi pada pH 4 (1,5 mL), tetapi mengalami penurunan yang signifikan pada pH 5 (0,7 mL) sebelum pulih sebagian pada pH 6 (1,2 mL). Perilaku ini menunjukkan bahwa inokulum 20% mungkin lebih sensitif terhadap perubahan pH dibandingkan dengan inokulum 10%. Menariknya, inokulum 30% menunjukkan produksi biogas yang relatif stabil pada pH 4 dan 5 (1,6 mL), tetapi mengalami penurunan pada pH 6 (1,2 mL). Stabilitas ini mungkin disebabkan oleh konsentrasi mikroorganisme yang lebih tinggi dalam inokulum 30%, yang memungkinkan mereka untuk mempertahankan aktivitas metabolisme yang lebih konsisten di bawah kondisi pH yang berbeda.

Temuan ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan interaksi antara pH dan ukuran inokulum ketika mengoptimalkan produksi biogas dari pengolahan air limbah. Beberapa penelitian juga mendukung bahwa pH optimal untuk produksi biogas bervariasi tergantung pada jenis substrat dan mikroorganisme yang digunakan. Jayaraj et al. (2014) menemukan bahwa "biogas yield and degradation efficiency were substantially higher for the substrate of pH 7 compared to other pH values." Anugrah et al. (2017) menemukan bahwa pH 7,0 merupakan pH optimal untuk produksi biogas dari limbah kecambah kacang hijau. Namun, penelitian lain menunjukkan bahwa kondisi asam dapat mendukung pertumbuhan bakteri asidogenik yang penting dalam tahap awal fermentasi (Wardani, 2021). Dalam konteks ini, Liu et al. (2011) menyoroti bahwa "Appropriate inoculum (F/M = 0.36) can improve the digestion efficiency and biogas production." Penelitian oleh Odirile et al. (2021) juga menekankan pentingnya pemantauan pH awal untuk memastikan bahwa berada dalam rentang yang diinginkan untuk mempertahankan anaerobic digestion (AD). Optimasi rasio Inokulum-Substrat (I/S) juga signifikan, di mana peningkatan rasio I/S memiliki efek positif pada produksi biogas spesifik maksimum (R_m) dan potensi produksi biogas maksimum (A) (Nath et al., 2019).

Produksi biogas tertinggi dalam penelitian ini dicapai pada pH 4 dengan inokulum 30%, menunjukkan bahwa kondisi asam dan konsentrasi mikroorganisme yang tinggi dapat meningkatkan produksi biogas dalam sistem

batch aerobik. Namun, penting untuk dicatat bahwa kondisi optimal dapat bervariasi tergantung pada karakteristik spesifik air limbah dan komposisi mikroba inokulum.



Gambar 4. Volume Biogas yang Dihasilkan pada Variasi pH dan Ukuran Inokulum

3.5 Rekapitulasi Hasil Penelitian

Ukuran inokulum sebesar 30% (v/v) terbukti paling efektif dalam mencapai kinerja proses. Konsentrasi inokulum ini juga sering direkomendasikan dalam literatur fermentasi karena cukup kaya mikroba hidrolitik dan acidogenik, serta memberikan kemungkinan interaksi mikroba yang sinergis. Pada kondisi optimum (pH 4, inokulum 30%, 30 °C), efisiensi penghilangan COD mencapai 82% dari nilai 670 mg/L (menurunnya hingga sekitar 120 mg/L). Hasil ini sepadan dengan beberapa penelitian sebelumnya dalam lingkup fermentasi gelap pada limbah industri dengan COD tinggi.

Selama proses, terjadi peningkatan konsentrasi TSS sebesar 410%, yang mencerminkan akumulasi biomassa mikroba, VFA, dan padatan lain yang tidak terlarut. Hal ini umum terjadi dalam reaktor batch dan menjadi indikator aktifitas mikroba serta potensi pembentukan flok/biofilm. Meski tidak secara kuantitatif diteliti dalam detail, proses ini diprediksi menghasilkan biogas—terutama hidrogen (H₂)—sesuai karakteristik fermentasi gelap dan literatur terkait yang melaporkan efisiensi H₂ yang tinggi pada kondisi serupa.

4. KESIMPULAN

Proses biologis anaerobik terbukti mampu mengolah air limbah secara efektif, yang ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi COD dari limbah mentah, meskipun awalnya tidak memenuhi baku mutu lingkungan. Efektivitas proses ini juga tercermin dari produksi biogas yang cukup signifikan selama periode pengolahan. Hal ini menunjukkan bahwa mikroflora anaerob alami yang digunakan dalam sistem reaktor mampu mendegradasi bahan organik kompleks sekaligus menghasilkan gas metana sebagai produk samping. Oleh karena itu, proses ini tidak hanya berfungsi sebagai metode pengolahan limbah, tetapi juga berkontribusi dalam pemanfaatan energi terbarukan melalui biogas. Berdasarkan analisis data percobaan, parameter operasi optimum untuk pengolahan air limbah industri gula secara anaerobik sekaligus untuk memaksimalkan produksi biogas adalah pada pH: 4, ukuran inokulum 30%, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan suhu operasi: 35°C. Dengan kombinasi parameter tersebut, sistem menunjukkan kinerja terbaik dalam menurunkan beban pencemar dan menghasilkan biogas. Oleh karena itu, pendekatan ini berpotensi diterapkan secara lebih luas pada skala industri sebagai solusi pengolahan air limbah yang ramah lingkungan dan efisien secara energi.

DAFTAR PUSTAKA

Anugrah, E. T., Nurhasanah, & Nurhanisa, M. (2017). Pengaruh pH dalam Produksi Biogas dari Limbah Kecambah Kacang Hijau. *Jurnal Prisma Fisika*, 5(2), 72-76.

- Anugrah, E. T., Nurhasanah, & Nurhanisa, M. (2017). Pengaruh pH dalam Produksi Biogas dari Limbah Kecambah Kacang Hijau. *Jurnal Prisma Fisika*, 5(2), 72-76.
- Costa Cabral, A., Souza, T. S. D., Santos, M. D. C. P., Da Silva, J. C. G., De Souza, L. C. L., & Dos Santos, A. B. (2022). Evaluation of sugarcane vinasse anaerobic treatment at different OLRs: Organic matter removal and methane production performance. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102960. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102960>
- Cruz-López, A., Cruz-Méndez, A., Suárez-Vázquez, S. I., Reyna-Gómez, L. M., Pecina-Chacón, D. E., & de León Gómez, H. (2020). Biohydrogen production in cassava processing wastewater using microbial consortia: process optimization and kinetic analysis. *Bioresource Technology*, 309, 123331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123331>
- Dadrasnia, A., Shokrollahi, A., & Khosravi, R. (2020). Influence of inoculum size, pH, and temperature on NH₃-N, BOD, and COD removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 19040-19050.
- Domíńska, M., Paździor, K., Slezak, R., & Ledakowicz, S. (2024). The influence of inoculum source and pretreatment on the biohydrogen production in the dark fermentation process. *Chemical and Process Engineering*. <https://doi.org/10.24425/cpe.2024.149458>
- Fernandes, R. F. J., Leite, D. D. A., & Fuentes, G. G. (2024). Wastewater treatment and energy generation for dark fermentation bioreactor: preliminary results. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06260-w>
- Garduño, F. C., et al. (2023). Valorization of brewery waste slurry with glycerol as co-substrate for hydrogen and butyrate production using dark fermentation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.1002/jctb.7416>
- Ghimire, A., Frunzo, L., Pirozzi, F., Trably, E., Escudie, R., Lens, P. N. L., & Esposito, G. (2018). Effect of total solids content on biohydrogen production and lactic acid accumulation during dark fermentation of organic waste biomass. *Bioresource Technology*, 248(Pt A), 180-186.
- Hanafi, F., Belaoufi, A., Mountadar, M., & Assobhei, O. (2015). Effect of inoculum size on reduction of COD, phenolics and color during *A. niger* growth on OMW. *Waste Management & Research*, 33(12), 1035-1041.
- Huang, Y., Liu, H., & Zhang, J. (2022). Optimal pH for microbial degradation of organic matter in wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 300, 113698.
- Jayaraj, S., Deepanraj, B., & Sivasubramanian, V. (2014). Study on the effect of pH on biogas production from food waste by anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(2), 279-284. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0458-1>
- Li, X., Wang, M., & Zhou, Y. (2021). Effects of inoculum size on the performance of anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110123.
- Liew, K. J., Othman, N., Rosli, N. S., & Manaf, L. A. (2021). A study on the reaction kinetics of anaerobic microbes using batch anaerobic sludge technique for beverage industrial wastewater. *Processes*, 9(6), 964. <https://doi.org/10.3390/pr9060964>
- Liu, Y., Wang, J., & Li, Z. (2011). Influence of pH adjustment and inoculum on anaerobic digestion of kitchen waste for biogas producing. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 5(2), 145-150. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2011.1127>
- Mohsenpour, A., Rahimi, S., & Dastan, S. (2021). The role of pH in the treatment of wastewater by aerobic biological processes. *Water Science and Technology*, 83(1), 226-237.

- More, R. P., Chavan, P. S., Sharma, Y. C., & Lali, A. M. (2021). Valorization of sugar industry wastewater to volatile fatty acids via acidogenic fermentation: Process optimization and kinetic modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105785. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105785>
- Musa, M. A., Idrus, S., Che Man, H., & Nik Daud, N. N. (2018). Wastewater treatment and biogas recovery using anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs): Strategies and achievements. *Energies*, 11(7), 1675. <https://doi.org/10.3390/en11071675>
- Nath, S., Saha, S., & Bhowmik, A. (2019). Optimization of biogas production through selection of appropriate inoculum-to-substrate (I/S) ratio. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 41(3), 633-640.
- Odirile, P. T., Marumoloa, P. M., Manali, A., & Gikas, P. (2021). Anaerobic digestion for biogas production from municipal sewage sludge: A comparative study between fine mesh sieved primary sludge and sedimented primary sludge. *Water*, 13(24), 3532. <https://doi.org/10.3390/w13243532>
- Patel, A. K., Singh, P., & Lakhmapurkar, S. (2019). Impact of inoculum size on the efficiency of anaerobic digestion of organic waste. *Waste Management*, 87, 252-261.
- Pena-Garduño, L. M., Cruz-López, A., et al. (2023). Effect of inoculum thermal pretreatment time on hydrogen production in dark fermentation. *Energies*, 17(4), 974. <https://doi.org/10.3390/en17040974>
- Piercy, E., Sun, X., Ellis, P. R., Taylor, M., & Guo, M. (2025). Temporal dynamics of microbial communities in anaerobic digestion: Influence of temperature and feedstock composition on reactor performance and stability. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2501.06800>
- Podder, M. S., & Poddar, P. K. (2015). Characterization and treatment of sugar industry wastewater by using physicochemical method. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 9(10), 2319–2402. <https://doi.org/10.9790/2402-0910129397>
- Presti, D., Cosenza, A., Capri, F. C., Gallo, G., Alduina, R., & Mannina, G. (2021). Influence of volatile solids and pH for the production of volatile fatty acids: batch fermentation tests using sewage sludge. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2108.04681>
- Rocha, A. V., Silva, M. J., & Ribeiro, A. R. (2024). Analysis of biogas production from sewage sludge combining BMP experimental assays and the ADM1 model. *PeerJ*, 12, e12123. <https://doi.org/10.7717/peerj.12123>
- Shah, F. A., Mahmood, Q., Rashid, N., Pervez, A., Ahmad, T., & Nawaz, M. (2014). Microbial ecology of anaerobic digesters: The key players of anaerobiosis. *The Scientific World Journal*, 2014, 183752. <https://doi.org/10.1155/2014/183752>
- Suárez-Vázquez, S. I., Alfaro-Barbosa, J. M., et al. (2020). Acidogenic fermentation of cassava wastewater: effect of pH, temperature and inoculum. *Water*, 16(11), 1514. <https://doi.org/10.3390/w16111514>
- Vutai, V., Ma, X. C., & Lu, M. (2016). The role of anaerobic digestion in wastewater management. *EM (Pittsburgh, Pa.)*, 0(September), 12–16. PMID: PMC5884444
- Wardani, (2021). Review Pengaruh pH Terhadap Volume Biogas Yang Dihasilkan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(1), 45-52.
- Water Practice & Technology. (2023). Recent advancements in the anaerobic treatment of molasses wastewater. *Water Practice & Technology*, 20(2), 340–350. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.340>
- Zhang, Y., Zhao, J., & Wang, H. (2020). Influence of inoculum concentration on the performance of anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology Reports*, 10, 100396.
- Zhang, Y., Zhao, J., & Wang, H. (2020). Influence of inoculum concentration on the performance of anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology Reports*, 10, 100396