

PRETREATMENT LIMBAH PENGOLAHAN KOPI UNTUK MENGHASILKAN BIOGAS PADA PROSES ANAEROBIK

Satriananda^{1*}, Khairul Nasrizal¹, Suryani Salim¹

¹Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jl. Banda Aceh-Medan Km. 280,3,
Buketrata, Mesjid Punteut, Blang Mangat, Kota Lhokseumawe, Aceh 24301, Indonesia

* Email: satria_pnl@gmail.com

ABSTRAK

Pada penelitian ini mempelajari proses *pretreatment* limbah pengolahan kopi untuk menghasilkan biogas pada proses anaerobik. Limbah cair pengolahan kopi merupakan limbah cair yang berasal dari air buangan pada proses pencucian (*washing*) dan pengupasan (*pulping*) kopi. Limbah cair pengolahan kopi sendiri memiliki kandungan senyawa organik yang tinggi sehingga cocok untuk dikonversi menjadi biogas. Konversi limbah cair kopi menjadi biogas dilakukan dengan menambahkan kotoran sapi dan kulit kopi sebagai substrat dengan variasi berat bioarang kulit tanduk terdiri dari: 0; 5; 10; 15; 20 gram. Lama fermentasi untuk setiap perlakuan adalah 30 hari. Sebelum dilakukan fermentasi, kulit kopi terlebih dahulu dilakukan *pretreatment* menggunakan NaOH 8% dan aquades untuk menghilangkan lignin pada kulit kopi yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri pada proses anaerobik. Variabel yang diukur meliputi *Chemical Oxygen Demand (COD)*, *Total Solids (TS)*, Volume Biogas, dan pH. Dari hasil penelitian diperoleh nilai terbaik pada *digester* dengan *pretreatment* NaOH 8% menggunakan bioarang kulit tanduk kopi sebanyak 15 gram. Nilai COD awal dan akhir yaitu sebesar 7.200 mg/L O₂ dan 1.800 mg/L O₂ dengan persentase penyisihan senyawa organik sebesar 75%, *Total Solid* awal dan akhir sebesar 10.940 mg/L dan 14.540 mg/L, Volume biogas 5.200 mL, derajat keasaman (pH) awal dan akhir sebesar 7,4 dan 5,7. Perlakuan awal dengan *pretreatment* dan penambahan bioarang mempengaruhi volume biogas yang dihasilkan.

Kata kunci : *Aquades, Bioarang, Biogas, NaOH, Pretreatment*

ABSTRACT

In this research, we study the pretreatment process of coffee processing waste to produce biogas in an anaerobic process. Coffee processing liquid waste is liquid waste that comes from waste water in the washing and pulping process of coffee. Coffee processing liquid waste itself has a high content of organic compounds, making it suitable for conversion into biogas. The conversion of coffee liquid waste into biogas is carried out by adding cow dung and coffee skin as a substrate with variations in the weight of horn husk biochar consisting of: 0; 5; 10; 15; 20 grams. The fermentation time for each treatment was 30 days. Prior to fermentation, coffee husks were pretreated using 8% NaOH and aquades to remove lignin from coffee husks that could inhibit bacterial growth in the anaerobic process. The variables measured included Chemical Oxygen Demand (COD), Total Solids (TS), Biogas Volume, and pH. From the results of the study, the best value was obtained in the digester with 8% NaOH pretreatment using coffee horn skin biochar as much as 15 grams. The initial and final COD values are 7,200 mg/L O₂ and 1,800 mg/L O₂ with a percentage of organic compound removal of 75%, the initial and final Total Solids are 10,940 mg/L and 14,540 mg/L, biogas volume 5,200 mL, acidity degree (pH) initial and final were 7.4 and 5.7, respectively. Pretreatment with pretreatment and addition of charcoal affects the volume of biogas produced.

Keywords: *Aquades, Biochar, Biogas, NaOH, Pretreatment*

PENDAHULUAN

Ketahanan energi merupakan persoalan krusial yang sedang dihadapi dunia saat ini, termasuk di Indonesia yang sekarang dihadapkan dengan tantangan semakin menurunnya cadangan energi fosil namun belum dapat diimbangi dengan penemuan cadangan energi baru, sementara kebutuhan energi fosil seperti minyak dan gas dari tahun ke tahun semakin meningkat. Padahal, peningkatan ketergantungan terhadap sumber energi fosil dapat menjadi masalah besar karena ketersediannya terus berkurang dan sifatnya tidak dapat diperbaharui (Elsayed dkk, 2020).

Indonesia memiliki potensi sumber energi alternatif yang melimpah, terutama untuk bahan baku biogas seperti kotoran dari peternakan, sampah organik dari pasar dan industri makanan serta dari limbah perkebunan (Sepehri dkk, 2019).

Salah satu limbah pertanian yang berpotensi menghasilkan energi adalah limbah kulit kopi. Limbah kulit kopi banyak terdapat di Kabupaten Aceh Tengah. Pada tahun 2019, produksi kopi di Aceh Tengah mencapai 34.608 ton (BPS Aceh Tengah, 2020). Tingginya produksi kopi berdampak pada banyaknya limbah kulit kopi yang dihasilkan. Secara umum limbah kulit kopi hanya dibenamkan dalam tanah untuk menjadi kompos dan di sebagian daerah limbah kulit kopi dibiarkan sehingga dapat menjadi sumber penyebaran hama dan penyakit tanaman (Lima dkk, 2018).

Limbah kulit kopi termasuk limbah biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Limbah kulit kopi mengandung selulosa 63%, hemiselulosa 2,3%, lignin 17%, protein 11,5%, tanin 1,8 - 8,56% dan pektin 6,5% (Saini dkk, 2015). Namun, keberadaan kandungan zat kimia beracun seperti tanin, kafein, dan polifenol menjadikan permasalahan yang dapat menghambat produksi biogas yang diinginkan (Karimi dan Taherzadeh, 2016).

Untuk menghilangkan zat kimia beracun tersebut, dapat dilakukan dengan beberapa

pretreatment, baik secara fisika, kimia, kombinasi fisika-kimia dan secara biologi (Abraham dkk, 2020). Yanwen Xue dkk (2019), telah melakukan penelitian pembuatan biogas dari miskantus dengan melakukan pretreatment secara kimia menggunakan NaOH untuk menghilangkan kadar lignin. Selain itu, Dahansi dkk (2019), melakukan pretreatment secara mekanik (size reduction) terhadap rumput gajah, bunga matahari meksiko dan rumput siam untuk meningkatkan produksi metana. Zhang dkk (2020), melakukan pretreatment dengan penambahan bioarang untuk meningkatkan stabilitas proses anaerobik dan produksi gas metana.

Kulit kopi mengandung beberapa komponen, antara lain selulosa (63%), lignin (17%), protein (11.5%), hemiselulosa (2.3%), tannin (1.8-8.56%), kafein (1.6%) dan komponen organik lainnya. Jika dilihat komposisi kulit kopi, maka sangat memungkinkan untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biogas. Tetapi, ada beberapa zat inhibitor yang dapat menghambat produksi biogas, seperti kafein, tannin dan polifenol (Mustafa dkk, 2016). Sehingga, perlu dilakukan pretreatment pada kulit kopi agar tidak mengganggu saat produksi biogas.

Pada penelitian ini dilakukan pengolahan limbah kulit kopi yang dicampur dengan limbah cair pengolahan kopi sebagai substrat dengan menambahkan kotoran sapi sebagai inokulan serta penambahan bioarang berbahan dasar bioarang kulit tanduk kopi yang berguna untuk meningkatkan produksi biometana. Proses pretreatment dilakukan menggunakan NaOH 8% dan aquades untuk mengurangi kandungan zat-zat kimia yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri di dalam reaktor.

METODE PENELITIAN

A. Alat yang digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu digester anaerobik, pipet volume, pipet ukur, cawan porselin, ball pipet, labu ukur, oven, neraca analitik, desikator, furnace, pH meter, buret, tabung COD, dan COD reaktor.

B. Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kulit kopi, kulit tanduk, limbah cair kopi, kotoran sapi, larutan H₂SO₄, larutan FAS, NaOH 8%, aquades, kristal Ag₂SO₄, kristal Hg₂SO₄, indikator feroin, dan kristal K₂Cr₂O₇.

METODE PENELITIAN PROSEDUR PERCOBAAN

A. Persiapan bahan baku

Pada penelitian ini menggunakan bahan baku dari kulit kopi, kulit tanduk, dan limbah cair kopi yang diambil dari limbah industri CV. Nutrisi Aceh, Kabupaten Aceh Tengah dan untuk inokulan kotoran sapi didapatkan dari peternakan sekitar Kota Lhokseumawe.

B. Pembuatan Biogas

Persiapan substrat

Persiapan substrat dimulai dari proses pengecilan dan penyeragaman ukuran kulit kopi. Sedangkan untuk pretreatment pada kulit kopi dilakukan menggunakan NaOH 8% dan aquades.

Pengecilan ukuran

Pengecilan ukuran kulit kopi yang sudah di treatment menggunakan crusher dan disaring menggunakan ayakan ukuran 35 mesh.

Pretreatment limbah kulit kopi dilakukan dengan dua variasi:

- Pretreatment kulit kopi menggunakan proses kimia dengan bantuan NaOH 8%. Pretreatmentnya dilakukan dengan cara perendaman kulit kopi dengan larutan NaOH 8% dalam wadah tertutup.
- Pretreatment kulit kopi menggunakan proses fisika dengan bantuan aquades. Pretreatmentnya dilakukan dengan cara perendaman kulit kopi dengan aquades panas dalam wadah.

Persiapan bioarang

Bioarang yang digunakan yaitu kulit tanduk dari buah kopi yang diarang dengan furnace selama 1 jam pada suhu 350 °C

Pencampuran bahan didalam digester

Kulit kopi (KK), limbah cair kopi (LC), Kotoran Sapi (KS), dan juga bioarang kulit tanduk (BKT) dicampurkan dalam digester sesuai variabel yang ditentukan.

Melakukan proses fermentasi selama 30 hari.

Melakukan pengecekan TS, COD, dan pH awal dan akhir.

PROSEDUR PENGUJIAN

Total Solid (Standar Methods 2540 B)

Persiapan cawan evaporasi – diamkan pada suhu 103°C hingga 105°C selama 1 jam dalam oven. Dinginkan dan simpan peralatan yang sudah kering dalam desikator. Timbang setiap piring dan kaca arloji sebelum digunakan (catat berat gabungan sebagai " berat W_cawan").

Persiapan sampel Jika sampel mengandung cukup uap air untuk mengalir dengan mudah, aduk untuk menghomogenkan, tempatkan 25 sampai 50 g sampel alikuot pada piring penguapan. Jika sampel akan dianalisis dalam rangkap dua, massa kedua alikuot tidak boleh berbeda lebih dari 10%. Tutupi setiap sampel dengan kaca arloji, dan timbang hingga 0,01 g terdekat (catat berat sebagai " W_sampel"). Sebarkan setiap sampel sehingga merata di atas piring penguapan. Uapkan sampel hingga kering pada penangas uap.

Keringkan sampel pada 103°C hingga 105°C selama 12 jam, minimum, dinginkan untuk menyeimbangkan suhu dalam desikator individu yang berisi desikator segar, dan timbang.

Panaskan residu selama 1 jam, dinginkan hingga suhu seimbang dalam desikator, dan timbang. Ulangi prosedur pemanasan, pendinginan, pengeringan, dan penimbangan ini hingga beratnya berubah kurang dari 4% atau 50 mg, mana yang lebih kecil. Catat berat akhir sebagai "W total".

Melakukan perhitungan Total Solids (TS) dengan rumus :

$$TS = \frac{(W_{total} - W_{cawan})}{V_{sampel}} \times 1000$$

Di mana:

W_{cawan} = Berat cawan (mg)

V_{sampel} = Volume sampel (ml)

W_{total} = Berat residu kering dan cawan (mg)

Chemical Oxygen Demand (COD) (Standar Methods 5220 C)

- Siapkan sampel dan diencerkan jika sampel pekat.
- Pipet sampel sebanyak 2,5 ml kedalam tabung Chemical Oxygen Demand (COD)
- Tambahkan larutan dikromat sebanyak 1,5 ml kedalam sampel tabung COD
- Tambahkan larutan digesti sebanyak 3,5 ml kedalam tabung COD, tutup kemudian homogenkan.
- Setelah homogen, Panaskan tabung COD berisi sampel dengan menggunakan alat COD reaktor dengan suhu 150°C selama 2 jam
- Dinginkan, kemudian titrasi dengan larutan FAS (Fero Amonium Sulfat) 0,05 M ditambah indikator Feroin sebanyak 2 tetes, sampai terjadi perubahan warna dari hijau – biru menjadi coklat – kemerahan
- Catat volume FAS yang terpakai.

Derajat keasaman (pH) (SNI 06-6989.11-2019)

- Lakukan Kalibrasi alat pH sebelum menganalisa sampel dengan menggunakan larutan standar penyangga pH
- Untuk sampel yang bersuhu tinggi, sesuaikan hingga sampai suhu kamar
- Keringkan dan bilas elektroda alat pH meter dengan air suling
- Bilas elektroda dengan sampel yang ingin di analisa
- Celupkan elektroda kedalam sampel, sampai pH meter menunjukkan pembacaan yang tetap (konstan).

Pengukuran Biogas

Pengukuran dilakukan dengan cara volume gas yang terbentuk tiap harinya akan diukur dengan menghitung volume gas yang ditampung pada gelas tersebut dimasukkan ke dalam bak penuh air dengan posisi terbalik.

Jumlah air yang keluar dari gelas ukur tersebut diukur volumenya dengan asumsi bahwa volume air yang keluar sama dengan volume gas yang ada pada gelas ukur tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilaksanakan selama 4 bulan di Laboratorium Pengolahan Minyak dan Gas serta Laboratorium Pengolahan Air dan Limbah Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Lhokseumawe.

Proses produksi biogas dilakukan secara anaerobik menggunakan substrat kulit kopi (KK), Limbah cair kopi (LK), bioarang kulit tanduk kopi (BKT) dengan mikroorganisme berasal dari kotoran sapi.

Pada penelitian ini dilakukan dua perlakuan awal terhadap kulit kopi yaitu pretreatment NaOH 8% dan pretreatment aquades. Proses pembuatan bioarang kulit tanduk kopi melalui furnace pada suhu 350°C selama 1 jam pembakaran dengan ukuran bioarang $\pm 0,01$ cm. Perlakuan awal pada kulit kopi adalah pengecilan ukuran substrat dengan tujuan bakteri metagenosis dapat lebih mudah dalam mendegradasi kulit kopi yang menjadi sumber nutrisi makanan.

Penelitian ini dilakukan selama 30 hari dengan perlakuan digester sistem batch pada temperatur mesofilik yang masing-masing berisi substrat kulit kopi yang telah di lakukan pretreatment dengan NaOH 8% dan campuran limbah cair kopi, variasi bioarang kulit tanduk kopi serta kotoran sapi (V1) yang kemudian akan dibandingkan dengan kulit kopi yang telah di pretreatment aquades dengan campuran limbah cair kopi, variasi bioarang kulit tanduk kopi dan kotoran sapi (V2). Adapun parameter yang diukur dalam penelitian ini adalah derajat keasaman (pH), Total Solid (TS), Chemical Oxygen Demand (COD), dan pengukuran volume biogas.

Data Hasil Penelitian

Dari penelitian ini diperoleh hasil berupa data pengamatan, analisa dan pengolahan data. Data-data hasil penelitian dan perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, sedangkan data hasil pengukuran langsung di laboratorium ditampilkan pada Lampiran II.

Tabel 1 Data hasil penelitian pada *Digester* (limbah cair perendaman kopi + bioarang kulit tanduk kopi + kotoran sapi + kulit kopi) dengan perlakuan awal (*Pretreatment Aquades*)

Konsentrasi Bioarang kulit kopi (g)	Konsentrasi COD (mg/L O ₂)		pH		Total Solids (mg/L)		Produksi Biogas (mL)
	Awal	Akhir	awal	akhir	awal	akhir	
0	7.600	6.400	7	5,5	6.960	7.560	3.200
5	7.400	5.200	7	5,5	7.140	9.540	3.300
10	7.600	4.800	7	5,4	7.590	10.290	3.670
15	7.400	4.200	7	5,5	7.830	11.030	3.700
20	7.200	4.200	7,1	5,5	8.180	11.480	3.640

Tabel 1 Data hasil penelitian pada *Digester* (limbah cair perendaman kopi + bioarang kulit tanduk kopi + kotoran sapi + kulit kopi) dengan perlakuan awal (*Pretreatment NaOH 8%*)

Konsentrasi Bioarang kulit kopi (g)	Konsentrasi COD (mg/L O ₂)		pH		Total Solids (mg/L)		Produksi Biogas (mL)
	Awal	Akhir	awal	akhir	awal	akhir	
0	7400	4.200	7,3	5,5	9.050	10.250	4.400
5	7200	3.600	7,2	5,5	9.530	12.730	4.800
10	7400	3.000	7,4	5,6	10.080	13.580	4.960
15	7200	1.800	7,4	5,7	10.940	14.540	5.200
20	7200	2.200	7,4	5,7	11.760	15.160	4.950

PEMBAHASAN

Limbah cair pengolahan kopi bersifat asam dan memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, sehingga dapat mengganggu kehidupan organisme air jika dibuang langsung ke badan air. Limbah cair pengolahan kopi memiliki nilai kandungan bahan organik COD sebesar 5.000-35.000 mg/L. Tingginya kandungan bahan organik pada limbah cair pengolahan kopi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan biogas melalui proses anaerobik. Proses anaerobik akan memecah bahan organik menjadi senyawa yang relatif lebih aman bagi lingkungan dengan penurunan nilai COD, BOD, TSS dan TDS serta menghasilkan gas metan yang dapat digunakan sebagai sumber energi (Novita, 2018).

Pengaruh Variasi Berat Bioarang Terhadap Penyisihan Senyawa Organik pada Proses Anaerobik dengan Pretreatment Aquades dan NaOH 8%

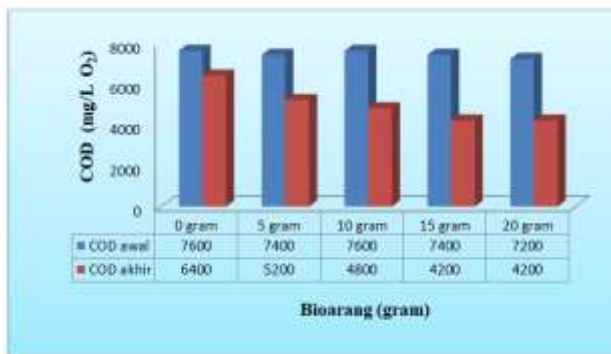
Tingginya kandungan senyawa organik didalam limbah dapat diukur menggunakan parameter Chemical Oxygen Demand (COD), dimana parameter ini menunjukkan jumlah oksigen yang diperlukan agar kandungan bahan organik dalam limbah cair dapat teroksidasi secara kimia. Penurunan COD terjadi karena dekomposisi senyawa organik terjadi secara alamiah dalam limbah, sehingga nilai COD mengalami penurunan selama berlangsungnya proses pengolahan.

Proses dekomposisi bahan organik merupakan proses perombakan material organik dari senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana yang dilakukan oleh sejumlah mikroorganisme. Proses perombakan bahan organik juga menyebabkan penyusutan volume bahan organik. Perombakan senyawa organik melalui tahapan hidrolisis, asidifikasi (pengasaman), dan pembentukan metana.

Pada tahapan hidrolisis, kelompok bakteri hidrolitik mendegradasi senyawa organik kompleks yang berupa polimer menjadi monomernya yang berupa senyawa yang tidak larut dengan berat molekul yang lebih ringan. Pada tahap asidifikasi, bakteri penghasil asam mengubah senyawa rantai pendek hasil proses pada tahap hidrolisis menjadi asam asetat, hidrogen (H₂) dan karbondioksida. Bakteri tersebut merupakan bakteri anaerobik yang dapat tumbuh dan berkembang pada keadaan asam.

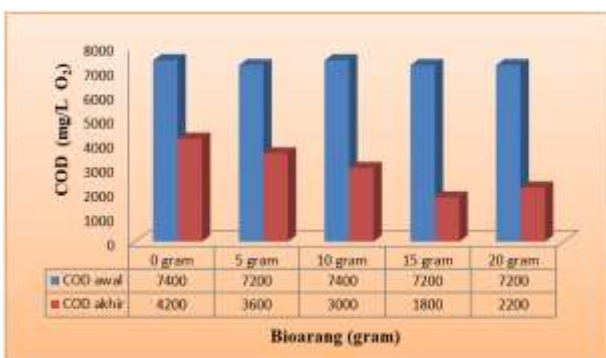
Menurut (Deng dkk, 2020), pada tahap ini bakteri metanogenik mendekomposisikan senyawa organik dengan berat molekul tinggi menjadi senyawa dengan berat molekul rendah. Bakteri ini menggunakan hidrogen, CO₂ dan asam asetat membentuk metana dan CO₂. Namun, implementasinya relatif tidak memuaskan karena tingkat hidrolisis bahan organik yang rendah, penghambatan oleh zat beracun (misalnya NH₃ dan H₂S) untuk metanogenesis, bersama dengan akumulasi produk antara (misalnya asam lemak volatil) (Zhou dkk., 2019).

Pada penelitian ini, dilakukan variasi berat bioarang dan perbedaan proses melalui perlakuan awal pretreatment aquades dan pretreatment NaOH 8% terhadap kulit kopi. Pengaruh variasi berat bioarang terhadap penyisihan senyawa organik pada proses anaerobik dengan pretreatment aquades ditampilkan pada Gambar 4.1, Sedangkan perlakuan dengan pretreatment NaOH 8% ditampilkan pada Gambar 4.2



Gambar 1 Penyisihan senyawa organik (COD) pada *digester* dengan *pretreatment* aquades

Pretreatment awal bahan baku digunakan untuk meningkatkan degradabilitas berbagai substrat menggunakan aditif anorganik dan biologis untuk mendukung imobilisasi biomassa, nutrisi, pengurangan inhibitor, dan peningkatan stabilitas proses (Indren dkk., 2020). Oleh karena itu, berbagai metode pra-perlakuan anaerobic digestion, seperti aditif, biologis, termal, kimia dan kombinasi dari metode-metode ini, telah dikhususkan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas proses anaerobik (Xiao dkk., 2020).



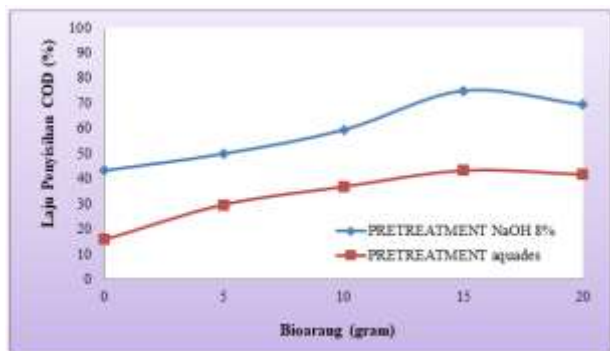
Gambar 2 Penyisihan senyawa organik (COD) pada *digester* dengan pretreatment NaOH 8%

Pada gambar 1 dan gambar 2 dapat dilihat bahwa pada berbagai variasi bioarang dengan pretreatment aquades dan NaOH 8%, terjadi penurunan nilai COD. Penurunan nilai COD tertinggi pada perlakuan pretreatment aquades diperoleh pada variasi berat bioarang 15 gram yaitu dari 7.400 mg/L O₂ menjadi 4.200 mg/L O₂ dengan penurunan nilai COD sebesar 3.200 mg/L O₂. Sedangkan pada perlakuan pretreatment NaOH 8% diperoleh pada variasi berat bioarang 15 gram yaitu dari 7.200 mg/L O₂ menjadi 1.800 mg/L O₂ dengan kadar penurunan COD sebesar 5.400 mg/L O₂.

Pada kedua grafik dapat dilihat bahwa pada perlakuan pretreatment NaOH 8% lebih baik dari pada perlakuan pretreatment menggunakan aquades. Hal ini disebabkan oleh terjadinya proses delignifikasi pada kulit kopi yang menjadi substrat bagi mikroba.

Proses delignifikasi merupakan tahap awal yang bertujuan untuk mengurangi kadar lignin di dalam bahan berlignoselulosa. Proses delignifikasi akan melarutkan kandungan lignin di dalam bahan sehingga mempermudah proses pemisahan lignin dengan serat selulosa. Delignifikasi akan membuka struktur lignoselulosa agar selulosa menjadi lebih mudah diakses oleh mikroba. Sehingga, proses pendegradasian senyawa organik lebih mudah dilakukan oleh mikroorganisme (Yanwen Xue dkk., 2019). Selain itu, disebabkan juga oleh variasi berat bioarang. Semakin berat variasi bioarang yang digunakan maka penurunan COD lebih baik. Hal ini dikarenakan bioarang menjadi agen penstabil dalam proses penguraian senyawa organik secara anaerobik yang dapat meningkatkan kapasitas buffering, menyerap inhibitor yang dikandung oleh substrat, dan meningkatkan kinerja operasi proses anaerobik (Fagbohunge dkk., 2017).

Pada konsentrasi bioarang 20 gram terjadi peningkatan nilai COD kembali untuk kedua perlakuan pretreatment baik itu NaOH 8% maupun aquades. kemungkinan hal ini disebabkan oleh bakteri yang mati mengalami peristiwa lisis yaitu peristiwa dimana pecahnya sel dan keluarnya cairan sel yang akan mempengaruhi kandungan senyawa organik dalam substrat dan kemudian terukur sebagai COD sehingga nilai COD dalam substrat menjadi naik (Qunpeng Cheng dkk., 2020).



Gambar 3 Pengaruh variasi bioarang terhadap penyisihan senyawa organik (COD) pada digester dengan pretreatment NaOH 8% dan pretreatment aquades.

Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin besar variasi berat bioarang, maka semakin menurun nilai COD. Hal ini menunjukkan bahwa dengan peningkatan berat bioarang dapat membantu lebih banyak penyerapan zat-zat yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri, sehingga senyawa organik yang disisihkan menjadi semakin banyak pula. Peningkatan penguraian senyawa organik ditunjukkan dengan semakin besar efisiensi penyisihan COD di dalam reaktor.

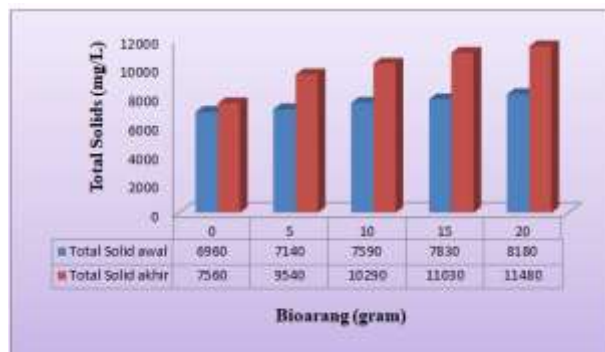
Efisiensi penyisihan COD optimum dicapai pada variasi berat bioarang 15 gram, dimana pada perlakuan pretreatment dengan NaOH 8% efisiensi penyisihannya 75%, sedangkan pada pretreatment dengan aquades efisiensi penyisihan COD hanya mencapai 43,24%. Penambahan berat bioarang menjadi 20 gram terlihat tidak lagi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi penyisihan COD.

Nilai efisiensi penyisihan COD merupakan kemampuan bioreaktor dalam menurunkan nilai COD pada setiap waktu proses. Dimana terjadinya proses pendegradasian substrat oleh mikroba dan sumber protein dihidrolisis menjadi asam-asam amino, karbohidrat dihidrolisis menjadi gula-gula sederhana, dan lemak dihidrolisis menjadi asam-asam berantai pendek. Pada perlakuan pretreatment dengan NaOH 8%, persentase penyisihan COD lebih tinggi dibandingkan dengan persentase penyisihan COD pretreatment aquades. Hal ini disebabkan karena pada perlakuan pretreatment NaOH terjadinya proses delignifikasi bahan

berlignoselulosa yang tinggi terhadap kulit kopi yang berguna sebagai substrat (nutrisi) bagi mikroba dalam memproduksi biogas (Amith Abraham, 2020).

Pengaruh Variasi Berat Bioarang Terhadap Total Solid (TS) pada Proses Anaerobik dengan Pretreatment Aquades dan NaOH 8%

Total solid merupakan jumlah materi padatan yang terdapat dalam limbah. Total solid dapat digunakan sebagai salah satu parameter yang menunjukkan telah terjadi proses dekomposisi senyawa organik pada proses anaerobik untuk membentuk bakteri-bakteri baru dalam bentuk lumpur bakteri. Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment aquades ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment aquades

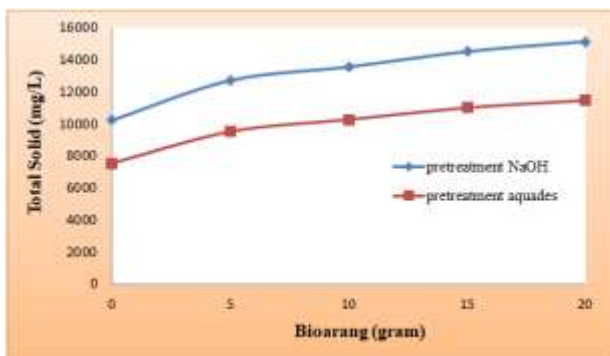
Gambar 4 memperlihatkan bahwa terjadi peningkatan Total Solid di dalam reaktor. Peningkatan Total Solid ini disebabkan perombakan senyawa organik oleh mikroorganisme, dimana kandungan senyawa organik pada lumpur kotoran sapi dan substrat kulit kopi sangat tinggi dan mengandung unsur protein, lemak, dan karbohidrat rantai panjang, karakteristik yang demikian membuat senyawa tersebut mudah dicerna oleh mikroorganisme untuk membentuk sel-sel bakteri baru dalam bentuk lumpur, sehingga mengakibatkan kenaikan nilai Total Solids di dalam reaktor.



Gambar 5 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment NaOH 8%

Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment NaOH 8% ditampilkan pada Gambar 5. Secara umum, pada perlakuan dengan pretreatment NaOH 8%, juga terjadi peningkatan jumlah Total Solid seperti halnya pada perlakuan dengan aquades. Namun, jika dibandingkan nilai Total Solids pada kedua perlakuan tersebut, dapat dilihat bahwa peningkatan nilai Total Solids Pretreatment dengan NaOH 8% mengalami peningkatan nilai Total Solids yang lebih besar.

Nilai Total Solids tertinggi pada perlakuan pretreatment aquades mencapai 11.480 mg/L, sedangkan pada perlakuan pretreatment NaOH 8% nilai Total Solids mencapai 15.160 mg/L. Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment NaOH 8% dan pretreatment aquades dapat dilihat pada Gambar 6.

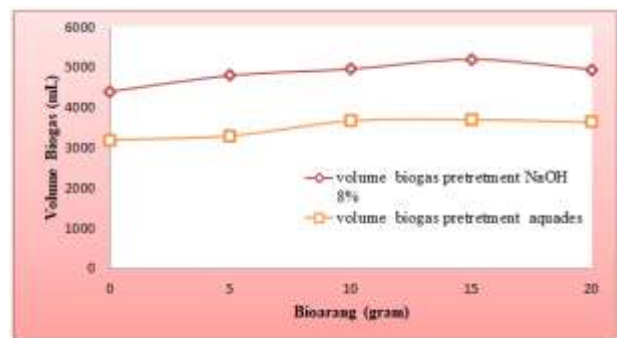


Gambar 6 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap Total Solid (TS) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment NaOH 8% dan pretreatment aquades

Dari gambar 6 dimana dapat dilihat bahwa pada digester dengan pretreatment NaOH 8% menunjukkan nilai total solid yang lebih tinggi dibandingkan digester dengan pretreatment aquades. Tingginya kadar total solids pada digester dengan pretreatment NaOH 8% terjadi karena selama proses perendaman dengan NaOH membantu menghilangkan lignin pada kulit kopi yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri pada proses produksi biogas. Tingginya nilai total solid disebabkan oleh terjadinya degradasi selama waktu fermentasi yang menyebabkan terbentuknya bakteri baru sehingga kadar total solid pada digester semakin meningkat.

Pengaruh Variasi Berat Bioarang Terhadap Pembentukan Biogas pada Proses Anaerobik dengan Perlakuan Pretreatment Aquades dan NaOH 8%

Hasil analisis produksi biogas dilakukan dalam bentuk pengukuran volume biogas yang diamati selama 30 hari ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 7 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap pembentukan biogas selama 30 hari pada proses anaerobik dengan pretreatment aquades dan NaOH 8%

Berdasarkan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa semakin besar penambahan berat bioarang, maka semakin tinggi pula produksi biogas yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan, bioarang dapat memfasilitasi kelimpahan komunitas mikroba dan mendegradasi biomassa lignoselulosa dalam proses anaerobik (Zhang dkk., 2020).

Waktu terbentuk biogas untuk variasi berat bioarang dengan pretreatment NaOH 8% lebih cepat dibandingkan dengan perlakuan pretreatment aquades. Untuk variasi berat

bioarang dengan konsentrasi pretreatment NaOH 8% biogas pertama kali terbentuk pada hari ke-3, sedangkan untuk perlakuan pretreatment aquades biogas terbentuk pada hari ke-6. Hal tersebut membuktikan bahwa lignoselulosa dalam kulit kopi yang sudah diberi perlakuan awal (pretreatment) oleh NaOH 8%, terpecah menjadi selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga lebih mudah dikonversi menjadi biogas oleh mikroba sehingga waktu pembentukannya lebih cepat (Yanwen Xue dkk., 2019).

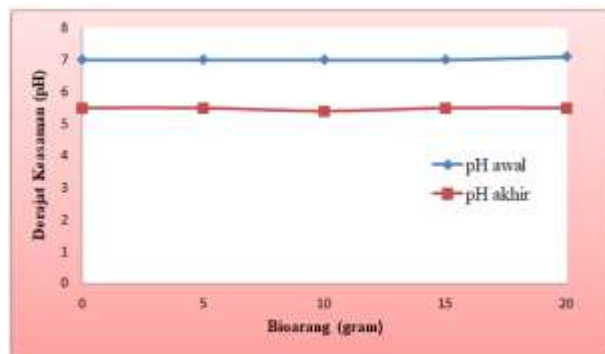
Pemecahan lignoselulosa memiliki potensi untuk meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme sehingga dapat menghasilkan biogas lebih baik, namun bahan baku dan kondisi operasi pretreatment memiliki kombinasi tersendiri terhadap jumlah bahan pretreatment yang digunakan. Selulosa yang dipisahkan dari lignoselulosa dapat dihasilkan lebih banyak, namun produk samping garam natrium dari pretreatment lignoselulosa dengan bahan NaOH yang berlebih akan menjadi inhibitor pada proses anaerobik sehingga produksi gas menjadi rendah (Liu S dkk, 2018).

Pengaruh Variasi Berat Bioarang Terhadap Derajat Keasaman (pH) pada Proses Anaerobik dengan Perlakuan Pretreatment Aquades dan NaOH 8%

Dalam penelitian ini, derajat keasaman (pH) menjadi variabel kontrol terjadinya proses fermentasi bahan organik yang dikonversi menjadi biogas dalam sistem proses anaerobik. Derajat keasaman ini menjadi salah satu faktor penentu keberhasilan pembentukan biogas. Derajat keasaman ini dimonitor setiap pengambilan sampel untuk mengetahui kondisi substrat dalam digester.

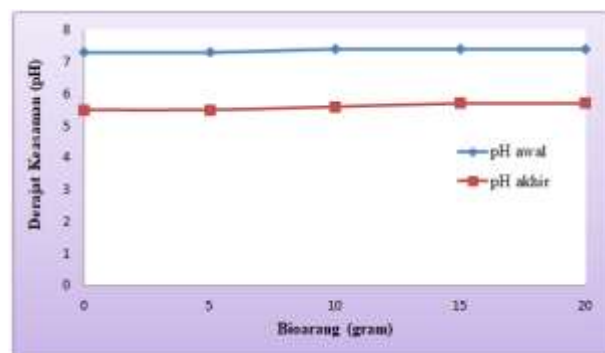
Faktor pH sangat berperan pada dekomposisi anaerob karena pada rentang pH yang tidak sesuai, mikroba tidak dapat tumbuh dengan maksimum dan bahkan dapat menyebabkan kematian. Oleh karena itu, pengaturan pH perlu dilakukan selama proses pembentukan biogas agar kesetimbangan reaksi antara tahap asidogenik dan metanogenik terjaga dengan baik.

Derajat keasaman (pH) harus dijaga pada kondisi optimum yaitu antara 6,8-7,2. Apabila pH substrat turun maka akan menyebabkan proses pengubah substrat menjadi biogas terhambat sehingga mengakibatkan penurunan kuantitas biogas. Nilai pH yang terlalu tinggi juga harus dihindari, karena akan menyebabkan produk akhir yang dihasilkan adalah CO₂ sebagai produk utama (Rusdiyono dkk, 2017).



Gambar 8 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap derajat keasaman (pH) pada proses anaerobik dengan perlakuan pretreatment aquades

Pada gambar 8 dapat dilihat bahwa pH awal *digester* dengan perlakuan *pretreatment* aquades dengan konsentrasi bioarang 0, 5, 10, 15, dan 20 berada pada rentang 7,0 – 7,1, namun setelah berjalannya proses dekomposisi anaerobik, maka penurunan pH menjadi sekitar 5,5.



Gambar 9 Pengaruh variasi berat bioarang terhadap derajat keasaman (pH) pada proses anaerobik dengan pretreatment NaOH 8%

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa pada perlakuan dengan pretreatment NaOH 8%, pH awal digester berada pada rentang 7,2 – 7,4. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan pada perlakuan dengan aquades. Hal ini memperlihatkan pengaruh NaOH yang bersifat basa mampu untuk menaikkan pH sistem. Meskipun demikian, seiring dengan meningkatnya waktu, maka terjadi juga penurunan pH di dalam sistem. Kondisi ini mengindikasikan bahwa dalam digester tersebut juga terjadi proses asidifikasi. Menurut Ni'mah, dkk (2014), pH substrat awal dengan rentang netral yaitu antara 6,6-7,6 akan memberikan peningkatan laju produksi biogas lebih baik dibandingkan dengan perlakuan pH lain.

Penurunan derajat keasaman pada penelitian ini, kemungkinan disebabkan karena tidak adanya pengadukan yang memadai di dalam reaktor, sehingga bakteri-bakteri cenderung menumpuk di bagian bawah reaktor. Bakteri-bakteri yang ada di bagian bawah reaktor bukan hanya dari kelompok metanogenik saja, tetapi juga kelompok bakteri hidrolisis, asidogenesis dan asetogenesis. Kelompok-kelompok bakteri tersebut mengkonsumsi senyawa organik dan menghasilkan produk-produk berupa asam-asam organik yang dapat menurunkan pH sistem.

Menurut Ramdiana (2017) pada rentang pH 6-6,7 bakteri metanogen yang mampu bertahan untuk menghasilkan gas sangat sedikit karena kondisi keasaman substrat dapat membunuh bakteri, sehingga gas metana yang dihasilkan dalam jumlah sedikit. Mikroorganisme yang bekerja pada tahap awal adalah mikroorganisme pada proses hidrolisis-asidogenesis yang menghasilkan asam volatil sehingga nilai pH menjadi turun (Ni'mah dkk, 2014).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Perlakuan awal limbah kulit kopi dengan pretreatment NaOH 8% memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan pretreatment menggunakan aquades. Hal ini dapat dilihat dengan penyisihan senyawa organik yang lebih baik, pH relatif lebih tinggi,

Total Solids yang lebih besar dan produksi gas yang lebih banyak.

Semakin banyak jumlah biorang maka semakin banyak senyawa organik yang disisihkan, Total Solids yang lebih besar, pH yang relatif tinggi dan produksi biogas yang lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. (2014). *Standar Mutu Biogas Bertekanan Tinggi* (Patent No. SNI 8019-2014).
- Abraham, A., Mathew, A. K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., ... & Sang, B. I. (2020). *Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass*. *Bioresour. Technol.*, 301, 122725.
- Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H., Rahman, S.U., Zhang, R.H., Liu, G.Q., Chen, C., 2017. *Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion*. *Amb. Express* 7, 72.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Aceh Tengah. (2016-2020). *Aceh Tengah Dalam Angka 2016-2020*, Aceh
- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 10). E. W. Rice (Ed.). Washington, DC: American public health association.
- Beggio, G., Schievano, A., Bonato, T., Hennebert, P., Pivato, A., 2019. *Statistical analysis for the quality assessment of digestates from separately collected organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and agro-industrial feedstock. Should input feedstock to anaerobic digestion determine the legal status of digestate?* *Waste Manag.* 87, 546-558.
- Cao, L., Zhang, C., Chen, H., Tsang, D.C.W., Luo, G., Zhang, S., Chen, J., 2017. *Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects*. *Bioresour. Technol.*

245,1184e1193.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.196>.

Çelebi, E. B., Aksoy, A., & Sanin, F. D. (2020). Effects of anaerobic digestion enhanced by ultrasound *Pretreatment* on the fuel properties of municipal sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), 17350-17358.

Cheng, Q., Xu, C., Huang, W., Jiang, M., Yan, J., Fan, G., ... & Song, G. (2020). Improving anaerobic digestion of piggery wastewater by alleviating stress of ammonia using biochar derived from rice straw. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100948.

Chiappero, M., Norouzi, O., Hu, M., Demichelis, F., Berruti, F., Di Maria, F., Mašek, O., & Fiore, S. (2020). Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(June). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110037>

Cimon, C., Kadota, P., Eskicioglu, C., 2019. Effect of biochar and wood ash amendment on biochemical methane production of wastewater sludge from a temperature phase anaerobic digestion process. *Bioresour. Technol.*, 122440 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122440>.

Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F., & Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. *Energy Conversion and Management*, 74, 471-481.

Dahadha, S., Amin, Z., Lakeh, A.A.B., Elbeshbishy, E., 2017. Evaluation of different *Pretreatment* processes of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production. *Energy Fuels* 31, 10335–10347.

Dahunsi, S.O., 2019. Mechanical *Pretreatment* of lignocelluloses for enhanced biogas production: methane yield prediction from biomass structural components. *Bioresour. Technol.* 280, 18–26.

Deng, L., Liu, Y., & Wang, W. (2020). Biogas technology. In *Biogas Technology*. Registered company Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3>

Elsayed, M., Ran, Y., Ai, P., Azab, M., Mansour, A., Jin, K., Zhang, Y., Abomohra, A.E.-F., 2020. Innovative integrated approach of biofuel production from agricultural wastes by anaerobic digestion and black soldier fly larvae. *J.Clean. Prod.* 263,121495 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121495>.

Fagbohunge, M., Herbert, B., Hurst, L., Ibeto, C., Li, H., Usmani, S., Semple, K., 2017. The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion. *Waste. Manage.* 61, 236–249.

Federation, W. E., & Aph Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 2005, 21.

Feng, R., Zaidi, A.A., Zhang, K., Shi, Y., 2018. Optimization of microwave *Pretreatment* for biogas enhancement through anaerobic digestion of microalgal biomass. *Period. Polytech. Chem. Eng.* 63, 65–72.

Greses, S., Gaby, J.C., Aguado, D., Ferrer, J., Seco, A., Horn, S.J., 2017. Microbial community characterization during anaerobic digestion of *Scenedesmus spp.* under mesophilic and thermophilic conditions. *Algal Res.* 27, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.002>.

Indren, M., Birzer, C.H., Kidd, S.P., Hall, T., Medwell, P.R., 2020. Effects of biochar parent material and microbial pre-loading in

- biochar-amended high- solids anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 298, 122457 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122457>.
- Iweka, S. C., Owuama, K. C., Chukwuneke, J. L., & Falowo, O. A. (2021). Optimization of biogas yield from anaerobic co-digestion of corn-chaff and cow dung digestate: RSM and python approach. *Heliyon*, 7(11), e08255.
- Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V.K., Vijay, V., Thakur, I.S., Kamyab, H., Nguyen, D.D., Kumar, A., 2020. Advances in biogas valorization and utilization systems: a comprehensive review. *J. Clean. Prod.* 273, 123052 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>.
- Karimi, K., Taherzadeh, M.J., 2016b. A critical review of analytical methods in *Pretreatment* of lignocelluloses: composition, imaging, and crystallinity. *Bioresour. Technol.* 200, 1008–1018.
- Koupaie, E.H., Dahadha, S., BazyarLakeh, A.A., Azizi, A., Elbeshbishy, E., 2019. Enzymatic *Pretreatment* of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production– a review. *J Environ. Manage.* 233, 774–784.
- Kumar, A.K., Sharma, S., 2017. Recent updates on different methods of *Pretreatment* of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresour. Bioprocess.* 4, 7.
- Lima, D.R.S., Adarme, O.F.H., Baêta, B.E.L., Gurgel, L.V.A., de Aquino, S.F., 2018. Influence of different thermal *Pretreatments* and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis. *Ind. Crop. Prod.* 111, 684–693.
- Lin, R., Cheng, J., Ding, L., Murphy, J.D., 2018. Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges. *Chem. Eng. J.* 350, 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.173>.
- Luo, T., Huang, H., Mei, Z., Shen, F., Ge, Y., Hu, G., Meng, X., 2019. Hydrothermal *Pretreatment* of rice straw at relatively lower temperature to improve biogas production via anaerobic digestion. *Chin. Chem. Lett.* 30, 1219–1223.
- Millati, R., Wikandari, R., Ariyanto, T., Putri, R.U., Taherzadeh, M.J., 2020. *Pretreatment* technologies for anaerobic digestion of lignocelluloses and toxic feedstocks. *Bioresour. Technol.* 304, 122998.
- Mustafa, A.M., Poulsen, T.G., Sheng, K., 2016. Fungal *Pretreatment* of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solidstate anaerobic digestion. *Appl. Energy* 180, 661–671.
- Neshat, S.A., Mohammadi, M., Najafpour, G.D., Lahijani, P., 2017. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 308–322.
- Ni'mah, L. 2014. Biogas from Solid Waste of Tofu Production and Cow Manure Mixture: Composition Effect. *Chemica Volume 1, Nomor 1* ISSN :2355- 8776.
- Pan, J., Ma, J., Liu, X., Zhai, L., Ouyang, X., Liu, H., 2019a. Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure. *Bioresour. Technol.* 275, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.068>.
- Patinvoh, R.J., Osadolor, O.A., Chandolias, K., Horváth, I.S., Taherzadeh, M.J., 2017. Innovative *Pretreatment* strategies for biogas production. *Bioresour. Technol.* 224, 13–24.
- Paudel, S.R., Banjara, S.P., Choi, O.K., Park, K.Y., Kim, Y.M., Lee, J.W., 2017. *Pretreatment* of agricultural biomass for

- anaerobic digestion: current state and challenges. *Bioresour. Technol.* 245, 1194–1205.
- Phuttaro, C., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Boonsawang, P., Chaiprapat, S., Khanal, S.K., 2019. Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of *Pretreatment* temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. *Bioresour. Technol.* 284, 128–138.
- Ramdiana. 2017. Pengaruh Variasi Komposisi pada Campuran Limbah Cair Aren dan Kotoran Sapi Terhadap Produksi Biogas. *Eksergi*, 14(2) ISSN: 1410-394X.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., 2017. *Pretreatment* techniques used in biogas production from grass. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 1193–1204.
- Romero-Güiza, M.S., Vila, J., Mata-Alvarez, J., Chimenos, J.M., Astals, S., 2016. The role of additives on anaerobic digestion: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 1486–1499.
- Rusdiyono, A. P., Kirom, M. R., dan Qurthobi, A. 2017. Perancangan Alat Ukur Konsentrasi Gas Metana dari Anaerobic Baffled Reactor (Abr) Semi- Kontinyu dengan Substrat Susu Basi. *E-proceeding Of Engineering. Vol.4 No.1* ISSN : 2355-9365
- Saif, I., Salama, E. S., Usman, M., Lee, D. S., Malik, K., Liu, P., & Li, X. (2021). Improved digestibility and biogas production from lignocellulosic biomass: Biochar addition and microbial response. *Industrial Crops and Products*, 171, 113851.
- Saini, J.K., Saini, R., Tewari, L., 2015. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation biogas production: concepts and recent developments. *3 Biotech* 5, 337–353.
- Sepehri, A., Sarrafzadeh, M.H., Avateffazeli, M., 2019. Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119164>
- Shrestha, S., Fonoll, X., Khanal, S.K., Raskin, L., 2017. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: current status and future perspectives. *Bioresour. Technol.* 245, 1245–1257.
- Tabatabaei, M., Karimi, K., Kumar, R., Horváth, I.S., 2015. Renewable Energy and alternative fuel technologies. *Biomed. Res. Int* 245935.
- Taherdanak, M., Zilouei, H., Karimi, K., 2016. The influence of dilute sulfuric acid *Pretreatment* on biogas production from wheat plant. *Int. J. Green Energy* 13, 1129–1134.
- Travaini, R., Martín-Juárez, J., Lorenzo-Hernando, A., Bolado-Rodríguez, S., 2016. Ozonolysis: an advantageous *Pretreatment* for lignocellulosic biomass revisited. *Bioresour. Technol.* 199, 2–12.
- Tun, M.M., Juchelková, D., Raclavská, H., Sassmanová, V., 2018. Utilization of biodegradable wastes as a clean energy source in the developing countries: a case study in Myanmar. *Energies* 11, 3183.
- Wagner, A.O., Lackner, N., Mutschlechner, M., Prem, E.M., Markt, R., Illmer, P., 2018. Biological *Pretreatment* strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies* 11, 1797.
- Wang, S., Yuan, R., Liu, C., Zhou, B., 2020a. Effect of Fe²⁺ adding period on the biogas production and microbial community distribution during the dry anaerobic digestion process. *Process. Saf. Environ.* 136, 234–241.

- Xiao, B., Tang, X., Yi, H., Dong, L., Han, Y., Liu, J., 2020. Comparison of two advanced anaerobic digestions of sewage sludge with high-temperature thermal *Pretreatment* and low-temperature thermal-alkaline *Pretreatment*. *Bioresour. Technol.* 304, 122979.
- Xue, Y., Li, Q., Gu, Y., Yu, H., Zhang, Y., & Zhou, X. (2020). Improving biodegradability and biogas production of miscanthus using a combination of hydrothermal and alkaline *Pretreatment*. *Industrial crops and products*, 144, 111985.
- Zhang, J., Zhou, H., Gu, J., Huang, F., Yang, W., Wang, S., Yuan, T., Liao, B., 2020a. Effects of nano-Fe₃O₄-modified biochar on iron plaque formation and Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environ. Pollut.* 260, 113970.
- Zhang, M., & Wang, Y. (2020). Effects of Fe-Mn-modified biochar addition on anaerobic digestion of sewage sludge: biomethane production, heavy metal speciation and performance stability. *Bioresource Technology*, 313, 123695.
- Zieliński, M., Kisielewska, M., Dębowski, M., Elbruda, K., 2019. Effects of nutrients supplementation on enhanced biogas production from maize silage and cattle slurry mixture. *Water Air Soil Pollut.* 230, 117.