

Potensi Limbah Cair Batik sebagai Sumber Bioenergi (Studi Kasus di UKM Batik Blimbing Malang)

Potential of Batik Wastewater as Bioenergy Sources (A Case Study in Batik Blimbing Malang SME)

Nur Hidayat, Martasari Beti Pangestuti, Reny Nurul Utami, Sri Suhartini*

Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya,
Jl. Veteran, Malang 65145, Indonesia

*Penulis korespondensi: Sri Suhartini, Email: ssuhartini@ub.ac.id

Tanggal sumbisi: 7 Januari 2020; Tanggal revisi: 20 April 2020, 18 Juli 2021;

Tanggal penerimaan: 21 Juli 2020

ABSTRAK

Batik merupakan salah satu produk kebanggaan bangsa Indonesia, yang umumnya diproduksi oleh usaha kecil menengah (UKM). Peningkatan permintaan batik mendorong adanya peningkatan jumlah UKM batik serta jumlah limbah cair batik yang dihasilkan. Masih banyak UKM batik yang membuang limbah cairnya langsung ke lingkungan yang berpotensi menimbulkan pencemaran pada tanah dan air. Hal ini disebabkan oleh belum adanya fasilitas pengolahan limbah yang memadai, sesuai dengan kondisi yang dialami oleh UKM Batik Blimbing Malang. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi pengolahan limbah cair batik secara anaerobik untuk memproduksi biogas sebagai sumber energi terbarukan. Pada penelitian ini digunakan teknologi *anaerobic digestion* yang dioperasikan secara batch dengan kondisi mesofilik (37 °C) tanpa pengadukan, dikenal sebagai uji *biochemical methane potential* (BMP) dengan waktu pengamatan selama 28 hari. Sampel yang diuji meliputi penambahan 100% limbah cair batik dengan berbagai variasi volume. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah cair batik memiliki kandungan bahan pencemar organik yang tinggi, yaitu sebesar 8.651 mg/L (BOD) dan 54.700 mg/L (COD). Hasil uji BMP juga menunjukkan rendahnya biogas yang dapat diproduksi dari limbah cair batik. Kondisi ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain tingginya kandungan COD, ammonia, zat pewarna beracun, dan nisbah C/N yang berpengaruh negatif terhadap pertumbuhan mikroorganisme.

Kata kunci: *Anaerobic digestion*; limbah cair batik; bioenergi; biogas

ABSTRACT

Batik is one of the Indonesian cultural assets, mostly produced by small and medium enterprises (SMEs). An increase in demand for batik is parallel to an increase in the number of Batik SMEs and the wastewater produced. However, there are still many batik SMEs of which the wastewater disposal is directly to the nearby environment, causing a detrimental impact and pollution to soil and water. Such practices are mainly due to inadequate wastewater treatment facilities owned by the batik SMEs, as also experienced by Batik Blimbing Malang SME. This study aimed to identify the potential valorisation of Batik wastewater into biogas as a renewable energy source. This research employed an anaerobic digestion technology operated under batch condition, also known as biochemical methane potential (BMP) test, for 28-day incubation. The samples tested included addition of

pure Batik wastewater with various volumes without dilution, as well as with the combination with other biomass materials. The results indicated that batik wastewater contained high organic pollutants with the value of 8,651 mg/L (BOD) dan 54,700 mg/L (COD). The BMP test showed a low biogas production from the digestion of batik wastewater alone. Various factors were found to contribute to reducing the biogas production, containing high concentrations of COD, BOD, ammonia, toxic chemicals, and high C/N ratio which negatively affect the growth of microorganisms.

Keywords: Anaerobic digestion; batik wastewater; bioenergy; biogas

PENDAHULUAN

Keberadaan industri tekstil sangat penting bagi perekonomian Indonesia. Salah satu produk tekstil adalah Batik yang merupakan salah satu kekayaan budaya Indonesia yang diakui oleh UNESCO dan banyak diminati oleh konsumen di dalam dan di luar negeri. Menurut Hardyanti dkk. (2017), pertumbuhan industri batik kian meningkat seiring dengan peningkatan permintaan. Sejak tahun 2011-2015 tercatat kenaikan jumlah industri batik sebesar 14,7% dari 41.623 menjadi 47.755 unit usaha. Industri batik di Indonesia pada umumnya merupakan industri kecil menengah (UKM), yang banyak tersebar di beberapa daerah dan pulau (Nurainun dkk., 2008).

Proses pembuatan batik terdiri dari beberapa tahapan yaitu penggambaran desain (menggambar motif batik pada kain mori), pemalaman (penempelan malam ke kain mori), pewarnaan dan pelorodan (proses penghilangan lilin malam yang menempel pada kain mori) (Suprihatin, 2014). Pada proses pewarnaan, banyak industri batik menggunakan pewarna kimia karena harganya yang relatif murah dan mudah mendapatkannya (Nurdalia, 2006). Selain itu, dari proses pembatikan tersebut, khususnya, pelorodan banyak dihasilkan limbah cair dan limbah padat.

UKM batik dapat menghasilkan limbah cair sebanyak 15-20 L/hari yang berasal dari proses pencelupan dan pencucian (Nurroisah dkk., 2014). Menurut Sumarko dkk. (2013), nilai BOD pada limbah cair batik dilaporkan mencapai 1099,22 mg/L dan COD berkisar 1310 mg/L. Kadar tersebut melebihi baku mutu yang telah ditetapkan pada Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 tentang baku mutu limbah cair tekstil yang hanya membatasi kadar BOD sebesar 60 mg/L dan COD 150 mg/L (Pusat Data Lingkungan, 2014).

Selama ini, UKM batik belum mempunyai fasilitas pengolahan limbah yang memadai, sehingga banyak yang membuang limbahnya langsung ke lingkungan (Natalina dan Firdaus, 2017). Pembuangan limbah cair batik tanpa pengolahan terlebih dahulu dapat menimbulkan dampak negatif, seperti timbulnya bau busuk pada perairan (Sumarko dkk., 2013),

menyebabkan penurunan kandungan *Dissolved Oxygen* (DO), meningkatkan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Total Suspended Solid* (TSS) dalam air (Kurniawan dkk., 2013).

Beberapa penelitian tentang penguraian dan penurunan kadar COD, BOD, TSS dan logam berat dari limbah cair batik telah dilakukan baik secara pengolahan fisika, kimia maupun biologi (Sumarko dkk., 2013). Namun, menurut Chan dkk. (2009), pengolahan secara biologi mempunyai beberapa keuntungan yaitu biaya yang rendah dan jika dilakukan analisis serta pengendalian lingkungan yang tepat maka akan menghasilkan konstituen *biodegradable* dengan rasio BOD/COD $\geq 0,5$ yang dapat diolah dengan mudah pada hampir semua air limbah. Pengolahan dan pemanfaatan limbah cair industri batik, salah satunya dapat dilakukan secara anaerobik. Hasil penelitian dari Syafila dkk. (2007) menunjukkan bahwa limbah cair batik dapat menghasilkan biogas dengan menggunakan teknologi *anaerobic digestion* (atau pencernaan anaerobik/digesti anaerobik). Selain itu, penelitian Sianita dan Nurchayati (2009) menunjukkan bahwa pengolahan limbah cair batik secara anaerobik dapat menurunkan COD sebesar 69,43%. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi pengolahan limbah cair batik secara anaerobik untuk memproduksi biogas sebagai sumber energi terbarukan. Diharapkan hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai data dasar untuk dilakukan penelitian pengembangan dalam pengolahan limbah cair batik, memberikan informasi potensi produksi biogas dari limbah cair batik, serta mengurangi pencemaran lingkungan akibat pembuangan langsung limbah cair batik ke lingkungan.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan adalah limbah cair batik yang diambil dari UKM Batik Blimbing Malang di Kota Malang. Inokulum yang digunakan adalah residu organik (*digestate*) dari digester pencernaan anaerobik

kotoran sapi di Balai Besar Penelitian Perternakan (BBPP) di Kota Batu. Bahan lainnya yang digunakan adalah α -selulosa (Sigma Aldrich, Jerman) dan larutan buffer pH 7 dan pH 9.

Alat

Peralatan yang digunakan pada proses anaerobik dalam uji BMP yaitu botol kaca 250 mL, manometer digital, *waterbath*, pH meter, timbangan analitik digital, oven, dan *muffle furnace*.

Pengambilan Sampel

Limbah cair batik diambil dari UKM Batik Blimbing Malang dengan metode *grab sampling*. Metode *grab sampling* merupakan teknik sampling dengan cara mengambil bagian yang berukuran besar dari suatu material secara acak (tanpa seleksi yang khusus) (Wijaya dkk., 2018). Pengambilan sampel limbah cair dilakukan satu kali saja secara acak dan langsung dimasukkan ke dalam wadah jerigen. Limbah cair yang tersedia yaitu berasal dari proses pembuatan batik selama beberapa hari, ditampung dalam wadah jerigen oleh pihak UKM. Kondisi limbah cair batik yaitu berwarna pekat dan keruh karena proses perwarnaan.

Persiapan inokulum

Inokulum yang telah diambil dari BBPP kemudian dilakukan penyaringan untuk menghilangkan partikel yang berukuran besar. Inokulum yang lolos dari saringan dimasukkan ke botol dan dilakukan *degased* selama 48 jam pada suhu 37 °C sebelum digunakan untuk uji BMP.

Uji Biochemical Methane Potential (BMP)

Penelitian anaerobik ini menggunakan prosedur uji BMP yang mengacu pada Suhartini (2014) dan Suhartini dkk. (2019a) dengan modifikasi. Uji BMP dilakukan selama 28 hari pada suhu 37 °C. Waktu inkubasi selama 28 hari adalah waktu standard minimal uji BMP yang diasumsikan telah mampu merepresentasikan bahwa biodegradasi bahan organik telah terjadi secara lengkap, serta mampu secara akurat memberikan data terkait produksi biogas/metana kumulatif (Lim dan Fox, 2013). Sampel uji BMP yang dibuat yaitu sampel kontrol *blank* (inokulum saja), sampel kontrol positif (inokulum dengan α -selulosa), dan sampel limbah cair batik, yang diulang sebanyak 3 kali ulangan. Perlakuan penambahan limbah cair batik dilakukan berdasarkan volume limbah cair batik yang ditambahkan ke dalam inokulum tanpa pengenceran, yaitu 1 mL (S1), 2 mL (S2), 3 mL (S3), 4 mL (S4) dan 5 mL (S5). Sampel kontrol *blank* digunakan untuk mengukur produksi biogas awal dari inokulum.

Sampel kontrol positif digunakan untuk menguji aktivitas konsortia mikroorganisme dalam inokulum.

Selanjutnya yaitu tahap uji BMP digunakan rasio *Volatile Solid* (VS) untuk menentukan volume sampel uji. Rasio inokulum dan substrat ($R_{I/S}$) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1:6, sebagaimana digunakan pada penelitian sebelumnya (Suhartini dkk., 2019a). Volume total pada setiap botol uji yaitu 40 mL. Pada kontrol *blank* berisi inokulum 40 mL. Kontrol positif (sampel α selulosa dengan inokulum) berisi α -selulosa sebanyak 0,13 g dan inokulum 39,87 g, dengan perhitungan mengacu pada Persamaan 1. Pada botol sampel digunakan limbah cair batik dengan volume masing-masing 1, 2, 3, 4, dan 5 mL, dan ditambahkan inokulum hingga 40 mL. Desain eksperimen untuk pengujian BMP dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain eksperimen pada uji BMP

Sampel	Inokulum (mL)	α selulosa (g)	Limbah cair batik (mL)
Kontrol <i>blank</i>	40	0	0
Kontrol α -selulosa	39,87	0,13	0
S1	40	0	1
S2	40	0	2
S3	40	0	3
S4	40	0	4
S5	40	0	5

$$M_s = \frac{M_i}{\left(1 + \left(\frac{R_{I/S} * VS_s}{VS_i}\right)\right)} \quad (1)$$

Dimana M_s adalah berat substrat (g), M_i adalah berat inokulum (g), $R_{I/S}$ adalah rasio inokulum dan substrat yang digunakan, VS_s adalah berat bahan organik dalam substrat (g VS/ kg berat basah/BB), dan VS_i adalah berat bahan organik pada inokulum (g VS/ kg BB).

Masing-masing sampel tersebut dimasukkan ke dalam botol uji 250 mL dan ditutup dengan rapat. Kemudian diinkubasi pada *waterbath* dengan suhu 37 °C. Setiap hari dilakukan pengukuran tekanan pada masing-masing sampel menggunakan manometer digital selama 28 hari. Kemudian dihitung dan dianalisa hasil produksi biogas kumulatif dan net. Pada akhir uji BMP dilakukan pengukuran kadar air, total solids (TS), kadar abu serta VS.

Analisa

Karakteristik limbah cair batik yang dianalisa meliputi pH, BOD, COD, TSS, amonia, sulfida, fenol,

minyak, dan lemak dan total Cr. pH diukur menggunakan digital pH meter dengan yang sebelumnya telah dikalibrasi dengan larutan buffer pH 4,7 dan 9,2 (APHA, 2005). BOD dianalisa menggunakan uji BOD₅ (Metode Standar 5210 B), COD menggunakan metode reflus tertutup dan titrasi (Metode Standar 5220 D), TSS menggunakan metode gravimetri (Metode Standar 2541 D), amonia menggunakan metode *phenate* (Metode Standar 4500-NH₃ F), sulfida dengan metode *methylene blue* (Metode Standar 4500-S₂ D), fenol dengan metode spektrofotometri (Metode Standar 5530), minyak dan lemak dengan metode reflus terbuka (Metode Standar 5220 B), dan total Cr dianalisa dengan metode *direct air-acetylene flame method* (Metode Standar 3111 B) menggunakan alat *Flame Atomic Absorption* (APHA, 2005). Parameter tersebut kemudian dibandingkan dengan Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 tentang baku mutu limbah cair tekstil yang mencakup limbah cair batik. Untuk parameter kadar air, TS, kadar abu, dan VS dianalisa menggunakan Metode Standar 2540 G (APHA, 2005).

Penghitungan volume biogas dalam botol uji dilakukan dengan mengkonversikan tekanan hasil pengukuran digital manometer dengan menggunakan hukum gas ideal Persamaan (2) sebagai (Suhartini dkk., 2019b)

$$\text{Volume Biogas (mL)} = \frac{(P \times \text{Vol} \times V_m)}{(R \times T)} \quad (2)$$

Dimana, P = Tekanan *headspace* botol uji (kPa), Vol = Volume *headspace* botol uji (mL), V_m = Volume molar dari gas ideal (diasumsikan sebesar 22,414 L/mol), T = Suhu inkubasi (K), dan R = Konstanta gas ideal (8.314 m³ Pa/K mol).

Perhitungan produksi biogas kumulatif dilakukan dengan menambahkan produksi biogas harian. Selanjutnya menghitung produksi biogas *net* dengan mengurangi produksi biogas dari sampel dengan rata-rata produksi biogas/metana dari kontrol inokulum di setiap periode waktu yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Limbah Cair Batik

Berdasarkan hasil observasi visual secara langsung, sampel limbah cair yang digunakan dalam penelitian ini terlihat tampak keruh dan berwarna ungu kehitaman yang pekat. Hal tersebut menunjukkan adanya zat pewarna yang digunakan dalam proses pembatikan. Hasil pengujian parameter fisik dan kimia sampel limbah cair batik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji karakteristik limbah cair batik

No	Parameter	Satuan	Hasil	Kadar maksimum *)
1.	pH	-	6,6	6 – 9
2.	BOD	mg/L	8.651	60
3.	COD	mg/L	54.700	150
4.	TSS	mg/L	1.483	50
5.	Amonia (NH ₃ -N)	mg/L	1,44	8
6.	Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0,06	0,30
7.	Fenol	mg/L	0,62	0,50
8.	Minyak dan lemak	mg/L	4,20	3,00
9.	Cr. Total	mg/L	<0,02	1,00

*) Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 Tahun 2013
Sumber: Pusat Data Lingkungan (2014)

Parameter yang tidak melebihi kadar maksimum yaitu pH, kandungan amonia, sulfida, dan kromium (Cr) total. Hasil penelitian Aryani dkk. (2004) juga menunjukkan tren yang sama di mana nilai pH limbah cair batik yaitu 6,9 dan kandungan kromium 0,05 mg/L. Penelitian Hardyanti dkk. (2017) juga menunjukkan hasil kandungan amoniak (5,47 mg/L), sulfida (0,04mg/L), kromium (0,14 mg/L) dan pH (6) yang masih sesuai dengan batas maksimum di Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 72 Tahun 2013.

Parameter yang melebihi ketentuan kadar maksimum yaitu nilai BOD (8.651 mg/L), COD (54.700 mg/L), TSS (1.483 mg/L), kandungan minyak dan lemak (4,20 m/L) dan fenol (0,62 mg/L). Menurut Sinha dkk. (2007), nilai BOD yang tinggi sebanding dengan tingginya jumlah bahan organik (polutan) pada air limbah. Menurut Swati dan Faruqui (2018), BOD tinggi menyebabkan habisnya jumlah oksigen terlarut secara cepat pada perairan jika langsung dibuang ke lingkungan (sungai, danau, dsb). Nilai COD tinggi menunjukan tingginya zat organik yang hanya dapat dioksidasi secara kimia (Sinha dkk., 2007). Efluen dengan kadar COD tinggi bersifat beracun (Swati dan Faruqui, 2018). Tingginya nilai TSS limbah cair batik diduga adanya sisa lilin dari proses pelepasan lilin (Aryani dkk., 2004). TSS dapat mempengaruhi kekeruhan limbah cair (Sinha dkk., 2007), menghambat fotosintesis organisme akuatik dan menyebabkan kekurangan oksigen dalam air (Yakoob dkk., 2018). Fenol dalam limbah cair batik berasal dari pelunturan lilin (Aryani dkk., 2004). Fenol digunakan sebagai pelarut pewarna kain. Senyawa fenol akan berbahaya jika langsung dibuang ke lingkungan (Saraswati dkk., 2014). Minyak dan lemak dihasilkan dari proses pencucian dengan air panas untuk menghilangkan lilin (Aryani dkk., 2004). Kadar minyak

yang melebihi 0,3 mg/L akan bersifat toksik terhadap perairan (Saraswati dkk., 2014).

Penghitungan rasio C/N dari sampel limbah cair batik dihasilkan rasio sebesar 37.99:1. Rasio C/N yang tinggi akan menyebabkan proses biodegradasi berlangsung lebih lama (Putra dkk., 2016). Menurut Dioha dkk. (2014), produksi biogas akan optimum pada nilai rasio C/N 25-30. Tingginya kandungan karbon (COD) akan menghasilkan lebih banyak pembentukan karbon dioksida dibandingkan metan.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat diketahui bahwa sampel limbah cair masih mengandung bahan pencemar organik dan non organik yang tinggi. Pembuangan secara langsung dapat menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan. Selain itu, nilai tersebut juga menunjukkan bahwa tingkat pencemaran yang akan disebabkan oleh limbah cair batik berpotensi sangat kuat, sehingga perlu dilakukan pengolahan dahulu, salah satunya sebagai sumber bahan bakar. Hal ini disebabkan karena kandungan bahan organik yang tinggi, sebagaimana terlihat pada kandungan BOD dan COD. Menurut Delée dkk. (1998) dan Lay dkk. (2012), limbah cair industri tekstil mengandung bahan organik yang mudah terbiodegradasi dan berpotensi untuk produksi energi gas terbarukan.

Hasil Uji Performansi Sebelum Dan Sesudah Uji BMP

Hasil pengujian residu organik (*digestate*) setelah uji BMP berakhir dapat dilihat pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa pH awal sampel sebelum uji BMP berada pada rentang 7,5 - 7,7, hal ini diduga karena adanya pengaruh dari substrat sampel yang ditambahkan. Menurut Cioabla dkk. (2012), rentang pH optimum dalam proses digesti anaerobik adalah 6,8 - 7,2. Namun, pada kondisi pH berkisar 6,5 - 8,0, proses digesti anaerobik juga dapat berlangsung dengan baik. Data tersebut

menunjukkan bahwa pH awal masih dalam rentang yang ideal untuk proses digesti anaerobik. Setelah uji BMP selesai, terdapat sedikit penurunan pH menjadi berkisar antara 7,2 - 7,6. Parameter pH merupakan salah faktor yang berpengaruh terhadap proses perombakan bahan organik menjadi biogas. Menurut Afrian dkk. (2017), penurunan pH mengindikasikan adanya aktivitas awal bakteri asidogenesis yang menaikkan kadar keasaman. Menurut Budiyono dkk. (2013), apabila digesti anaerobik berlangsung pada keadaan normal atau stabil, pH akan secara otomatis berkisar antara 7 - 8,5.

Tabel 3 juga menunjukkan bahwa kandungan VS pada residu organik pada semua sampel inokulum dengan limbah cair berada pada kisaran 65-66% berdasarkan *dry* basis. Hal tersebut menunjukkan bahwa *digestate* masih mengandung bahan organik yang cukup tinggi sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan atau diolah menjadi produk lainnya, seperti kompos atau biofertiliser (Al Seadi dkk., 2013; Pivitol dkk., 2016; Hassaneen dkk., 2020). Selain itu, *digestate* juga berpotensi untuk digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga, sebagaimana telah dilaporkan oleh beberapa penelitian terdahulu (Bjornsson dkk., 2013; Nagarajan dkk., 2019; Praveen dkk., 2018; Bona dkk., 2020). Namun, penelitian lebih lanjut sangat diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi residu organik dari digesti anaerobik limbah cair batik tersebut.

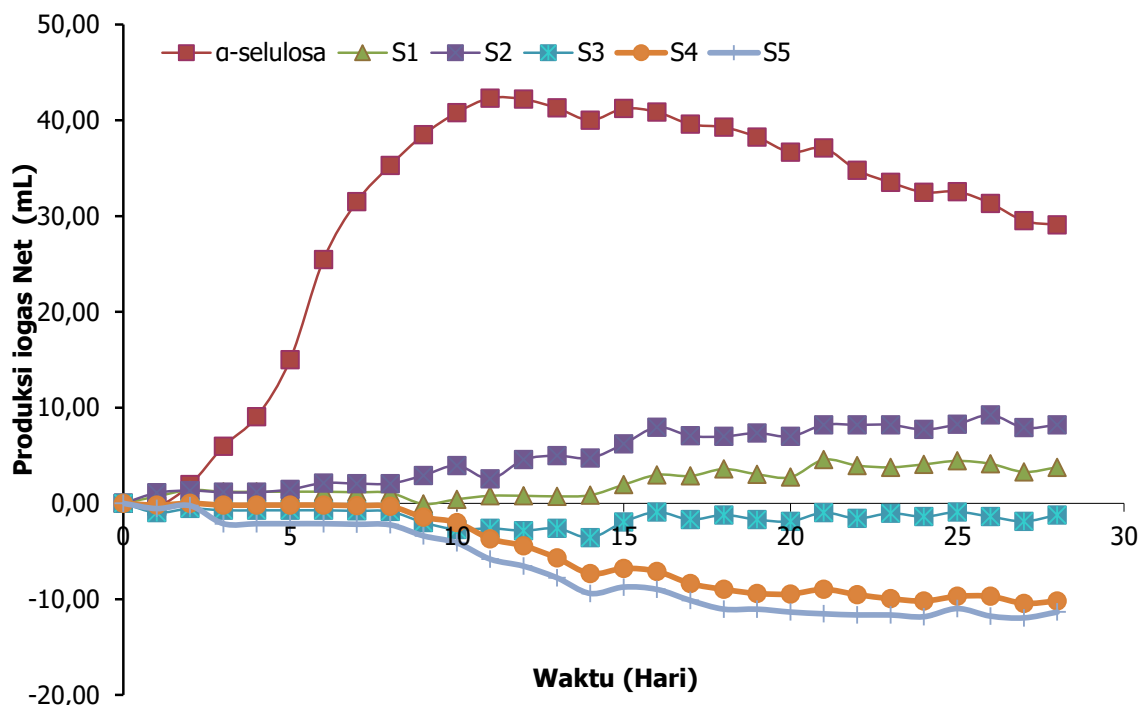
Produksi Biogas

Gambar 1 menunjukkan bahwa tidak terdapat produksi biogas yang dihasilkan dari sampel limbah cair batik (*net biogas production*). Grafik volume biogas dari sampel menunjukkan hasil perhitungan volume biogas yang telah dikurangi dengan kontrol inokulum (*blank*). Volume rata-rata produksi biogas pada kontrol inokulum yaitu 16,71 mL per 40 mL inokulum. Pada kontrol

Tabel 3. Karakteristik *digestate* setelah uji BMP

No.	Sampel	pH awal	pH akhir	TS* (%wb)	VS* (%wb)	VS** (%db)
1.	Kontrol inokulum (<i>blank</i>)	7,5	7,4	3,11	2,07	66,56
2.	Kontrol α -selulosa	7,6	7,2	2,75	1,85	67,27
3.	S1 (limbah cair batik 1 mL)	7,5	7,4	3,09	2,03	65,84
4.	S2 (limbah cair batik 2 mL)	7,5	7,5	3,04	2,02	66,08
5.	S3 (limbah cair batik 3 mL)	7,7	7,6	2,57	1,69	65,84
6.	S4 (limbah cair batik 4 mL)	7,7	7,6	2,46	1,62	65,81
7.	S5 (limbah cair batik 5 mL)	7,7	7,6	2,41	1,58	65,66

Keterangan: *persentase pada nilai TS dan VS berdasarkan *wet* basis, ** persentase nilai VS berdasarkan *dry* basis



Gambar 1. Grafik Net Biogas Production selama 28 hari (mL)

α-selulosa, volume rata-rata produksi biogas mengalami peningkatan hingga hari ke-11, lalu cenderung menurun mulai hari ke-12, dengan rata-rata produksi biogas net sebesar 29,83 mL.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata produksi biogas kumulatif per 40 mL untuk perlakuan S1 adalah sebesar 18,84 mL, S2 sebesar 21,69 mL, S3 sebesar 15,25 mL, S4 sebesar 11,32 mL dan S5 sebesar 10,90 mL. Berdasarkan hasil perhitungan, maka diperoleh volume produksi biogas *net* dari limbah cair batik pada S1, S2, S3, S4, dan S5 sebesar 2,13 mL, 4,98 mL, -1,45 mL, -5,39 mL, -5,81 mL, sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Nilai minus menandakan bahwa produksi biogas pada sampel perlakuan lebih rendah dibandingkan dengan kontrol inokulum, sehingga diduga terdapat penghambat pada proses digesti anaerobik dalam botol sampel uji. Hal ini sesuai dengan pendapat Gelegenis dkk. (2007) dan Lv dkk. (2019), yang menyatakan bahwa penurunan produksi biogas atau metana disebabkan karena proses digesti anaerobik yang tidak stabil yang menghambat terjadinya metanogenesis.

Rendahnya produksi biogas dapat disebabkan karena kandungan logam berat, fenol dari pewarna sintetik, rasio COD/N yang tinggi (37.986), dan nilai COD yang sangat tinggi (54.700 mg/L). Menurut Susilo dkk. (2017), penghambat proses digesti anaerobik dapat berasal dari senyawa beracun seperti logam berat

yang terdapat pada limbah organik. Menurut Putra dkk. (2016), nilai rasio C/N yang tinggi akan mengakibatkan proses biodegradasi berlangsung lebih lambat karena nitrogen akan menjadi faktor penghambat. Pada penelitian Budiyono dkk. (2013), hasil produksi biogas pada bahan yang mempunyai rasio COD:N 800:7 yaitu 3.839 mL, sedangkan pada rasio COD:N 1000:7 hanya menghasilkan 1586 mL. Semakin besar nilai rasio akan menghasilkan biogas semakin sedikit. Pada penelitian Utami dkk. (2016), produksi gas metan dipengaruhi oleh kandungan COD, dimana konsentrasi COD 8000 mg/L hanya menghasilkan metana 670 mL/hari, begitu sebaliknya jika konsentrasi COD berkurang menjadi 3200 mg/L maka akan terjadi peningkatan produksi metana menjadi 4680 mL/hari. Pada penelitian Desiana dan Setiadi (2009), sampel *biosludge* dari efluen *textile mill* yang mengandung COD 1.040 – 1.424 mg/L menghasilkan potensi produksi metan sebesar 62-73%, sedangkan pada konsentrasi COD 10.400 – 14.240 mg/L hanya menghasilkan potensi produksi metan 4-8%. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai COD akan mengurangi produksi gas metan.

Alternatif Pengolahan dan Pemanfaatan Limbah Cair Batik

Berbagai upaya pengolahan limbah cair batik telah dilakukan baik secara fisika, kimia, biologi

maupun kombinasi dari beberapa cara. Penelitian tentang pengolahan limbah cair batik telah dilakukan oleh Birgani dkk. (2016), dengan proses sekuensial. Proses asidifikasi mampu menghilangkan sekitar 78-95% COD, serta menghasilkan polimerisasi silikat (SiO_2). Proses magnesium oksida (MgO) bertujuan untuk menghilangkan sisa lilin, silikat, dan logam berat mampu menghilangkan 70% COD sebagai hidrogel. Aplikasi karbon aktif berbasis cangkang kelapa sawit digunakan untuk menghilangkan COD yang tersisa hingga <50 mg/L pada pH 3. Sutisna dkk. (2017) menggunakan lapisan nanopartikel TiO_2 yang diletakkan pada permukaan lembaran plastik untuk mendegradasi limbah cair batik. Proses dilakukan di bawah paparan sinar matahari. Jumlah lembaran katalis optimum dalam mendegradasi kandungan limbah cair batik adalah 8 buah dengan hasil degradasi hingga 50,41% selama 5 hari proses iradiasi.

Penelitian pengolahan limbah cair batik secara fisika-kimia seperti elektrokoagulasi dan elektrokatalitik juga telah banyak dilakukan. Khalik dkk. (2015) melakukan studi dekolorisasi dan mineralisasi terhadap limbah cair batik melalui proses fotokatalitik solar dengan menambahkan ZnO. Kondisi optimum proses degradasi yaitu pada pH 3 dengan penambahan 0,1 g ZnO dengan efisiensi 88,2% selama 10 jam iradiasi. Proses mineralisasi mampu mencapai 286 mg/L setelah dilakukan iradiasi 12 jam. Kombinasi metode netralisasi dan elektrokoagulasi mampu menurunkan konsentrasi logam (Cr total) hingga 99,90%, COD 96,37%, dan TSS hingga 86,18% (Dewanti dkk., 2019). Sementara itu, kombinasi proses elektrokoagulasi-oksidasi lanjut berbasis O_3/GAC pada limbah cair industri batik mampu menurunkan COD sebesar 95,08% dan TSS 81,39% dengan konstanta laju degradasi kontaminan organik sebesar 0,6931 per menit (Enjarlis dkk., 2019). Metode integrasi bioekualisasi-elektrokatalitik juga dapat digunakan untuk mengolah limbah cair batik, mengurangi kandungan TSS 72%, NH_3 78%, minyak 39% dalam HRT 48 jam, dan proses elektrokatalitik mampu menurunkan COD secara bertahap dari 32% pada 30 menit menjadi 62% pada 180 menit (Mukimin dkk., 2018). Riyanto dan Puspitasari (2018) menggunakan koagulasi elektrokimia dengan elektroda aluminium (Al) untuk mengolah limbah cair batik. Kondisi optimum penelitian ini yaitu pada waktu 90 menit, voltase 10 V, dan sodium klorida yang ditambahkan 1,25 g. Warna limbah berubah dari warna hitam menjadi warna kuning dengan penurunan kandungan Pb hingga 72,1%. Karamah dan Nurcahyani (2019) melakukan studi pengolahan limbah cair batik dengan proses oksidasi menggunakan kombinasi ozonasi dan kavitasasi hidrodinamik. Hasil penelitian mereka menunjukkan

kondisi optimum diperoleh pada proses selama 120 menit dengan hasil penurunan warna 67,96%, BOD 66,54%, COD 68,72%, dan TSS 79,84%. Febriyanti dan Winanti (2020), melakukan integrasi teknologi flokulasi koagulasi dan *constructed wetland*, namun efluen hasil penelitian belum memenuhi baku mutu sehingga dimanfaatkan sebagai air campuran dalam pembuatan beton biasa dan beton *Self Compacting Concrete* (SCC).

Penelitian pengolahan limbah cair batik secara biologi maupun kombinasi juga telah dilakukan oleh Sumarko dkk. (2013), menggunakan limbah baglog *Pleurotus ostreatus* untuk deodorisasi limbah cair batik dan menghasilkan penurunan BOD sebesar 93,95% serta COD 79,66% pada 96 jam waktu inkubasi. Selain itu, teknologi *constructed wetland* juga dilakukan untuk pengolahan limbah cair batik. *Hybrid constructed wetland* (gabungan horizontal dan vertikal *subsurface flow constructed wetland*) diaplikasikan untuk mengolah limbah cair hasil perebusan batik, yang mampu menurunkan COD sebesar 89,61% dan FOG 89,53% pada HRT 3 hari (Audina dan Rahmadyanti, 2019). Integrasi biofilter dan *constructed wetland* juga dilakukan sebagai alternatif pengolahan yang mampu menurunkan COD sekitar 72,67-86,67%; TSS 95,85-98,18%; minyak dan lemak 79,47-90,04% pada HRT 3 hari (Firmansyah dan Rahmadyanti, 2019). Sementara itu, integrasi teknologi flokulasi koagulasi dan CW dengan penambahan *Moringa oleifera seeds powder* dosis 750 mg/L mampu menetralkan pH menjadi 7,33 dan menurunkan COD 89,3%; TSS 98,1%; dan minyak lemak 92,1% pada HRT 5 hari (Febriyanti dan Winanti, 2020). Safauldeen dkk. (2019) memanfaatkan eceng gondok sebagai agen fitoremediasi limbah cair batik. Proses fitoremediasi ini dapat menurunkan tingkat warna dan COD berturut-turut hingga 83% dan 89% selama 9 hari. Penurunan TSS mampu dicapai hingga 92% selama 28 hari dengan 8 rumpun tanaman. Kristijanto dkk. (2011) menggunakan *anaerobic baffled reactor* (ARB) dan *rotating biological contactor* (RBC) untuk mengolah limbah cair batik. ARB dapat mengurangi kadar polutan dalam limbah hingga 75% selama 40 hari, sedangkan RBC efektif menurunkan kadar polutan hingga 57%.

Publikasi penelitian tentang pemanfaatan limbah cair batik masih sangat kurang, namun beberapa telah dilakukan. Fazal dkk. (2018) melaporkan bahwa limbah cair tekstil dapat digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga, dimana mikroalga yang dihasilkan dapat dikonversi menjadi biodiesel. Hal ini disebabkan karena adanya kandungan fosfat, nitrat, mikronutrient lainnya, serta pewarna alami (sebagai sumber karbon) untuk budidaya mikroalga. Wu dkk. (2017) juga menyatakan bahwa limbah cair industri tekstil mengandung sumber bahan organik, fosfor dan

nitrogen yang sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan dan juga akumulasi lemak pada mikroalga. Choong dkk. (2019), menemukan bahwa endapan limbah cair batik dapat digunakan sebagai prekursor absorben silikat untuk menghilangkan polutan organik seperti bisphenol A dan ibuprofen. Malliga dkk. (2019) menyatakan bahwa limbah cair tekstil dapat dimanfaatkan sebagai biofertiliser dengan menggunakan kombinasi antara *cyanobacteria* (makrolaga) dan limbah hasil pertanian.

Beberapa alternatif pengolahan limbah cair batik yang telah dilakukan tersebut terbukti mampu menurunkan kadar COD, TSS maupun kandungan logam berat, namun belum memenuhi baku mutu untuk dibuang ke lingkungan. Penelitian hingga saat ini lebih berfokus pada pengolahan untuk menurunkan kandungan COD, BOD, TSS, zat warna atau bahan berbahaya seperti logam berat dalam limbah cair batik. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih dalam tentang pengolahan dan pemanfaatan limbah cair batik sebagai sumber bahan baku produk yang bernilai ekonomi tinggi, baik itu energi, bahan kimia ataupun bioproduk/biomaterial lainnya.

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat diketahui bahwa penerapan teknologi digesti anaerobik - pada limbah cair batik tanpa perlakuan pendahuluan terlebih dahulu, seperti pengenceran, tidak dapat beroperasi secara optimal. Hal tersebut dikarenakan tingginya kandungan COD dan BOD, serta pewarna kimia pada limbah cair batik, yang dapat berperan sebagai racun bagi mikroorganisme anaerobik pada digester. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya Suhartini dkk. (2019c) yang menunjukkan produksi biogas yang rendah dari limbah cair batik. Penggunaan teknologi digesti anaerobik lainnya, atau kombinasi dengan perlakuan pendahuluan, atau melalui pencampuran dengan limbah cair lainnya, dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan konversi limbah cair batik menjadi biogas. Misalnya, hasil penelitian dari Senthilkumar dkk. (2011) mendemonstrasikan bahwa pencampuran limbah cair tekstil limbah cair industri tepung sagu (rasio 70:30) mampu menghasilkan biogas sebesar 312 L/hari dengan menggunakan teknologi reaktor dua-tahap *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). Apollo dkk. (2014), juga menunjukkan bahwa teknologi digesti anaerobik yang dikombinasikan dengan *integrated advanced oxidation processes* (AOP), dapat mengkonversi limbah cair tekstil menjadi biogas 2,7 kali lebih tinggi dibandingkan hanya dengan teknologi anaerobic digestion saja. Penelitian lain oleh Lin dkk. (2017) tentang kombinasi teknologi adsorpsi *granular activated carbon* (GAC), digesti anaerobik pada kondisi mesofilik dan budidaya mikrolaga *Scenedesmus* sp. menunjukkan hasil yang efektif untuk menghilangkan warna dan menurunkan kandungan COD, serta produksi gas metan

sebesar $2,07 \times 10^7$ kJ/ hari dan produksi mikroalga sebesar 9800 kg/minggu.

KESIMPULAN

Terjadinya penghambatan dalam produksi biogas dari limbah cair batik diduga disebabkan oleh nilai rasio C/N dan kandungan COD yang sangat tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah cair batik sebagai sumber bioenergi tanpa penambahan bahan organik lainnya masih perlu ditingkatkan, salah satunya adalah dengan menurunkan kandungan COD dan nilai rasio C/N terlebih dahulu. Selain itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada proses *co-digestion* limbah cair batik dengan bahan baku lainnya seperti limbah agroindustri, seperti limbah industri tempe dan industri tahu.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik atau kepentingan dengan pihak lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrian, C., Haryanto, A., Hasanudin, U., & Zulkarnain, I. (2017). Produksi biogas dari campuran kotoran sapi dengan rumput gajar (*Pennisetum purpureum*). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 6(1), 21–32.
- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., & Janssen, R. (2013). Biogas digestate quality and utilization. In *The Biogas Handbook* (pp. 267–301). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.267>
- APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2005*. American Public Health Association, Water Environment Federation.
- Apollo, S., Onyango, M. S., & Ochieng, A. (2014). Integrated UV photodegradation and anaerobic digestion of textile dye for efficient biogas production using zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 245(1), 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.027>
- Aryani, Y., Sunarto., & Widiyani, T. (2004). Toksisitas akut limbah cair pabrik batik CV. Giyant Santoso Surakarta dan efek sublethalnya terhadap struktur mikroanatomi branchia dan hepar ikan nila (*Oreochromis niloticus* T.). *Jurnal BioSmart.*, 6(2), 147–153.
- Audina, O., & Rahmadyanti, E. (2019). Kinerja hybrid constructed wetland sebagai upaya pelestarian sumber daya air pada pengolahan limbah cair industri batik di Sidoarjo. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 3(1), 1–8.
- Birgani, P. M., Ranjbar, N., Abdullah, R. C., Wong, K. T., Lee, G., Ibrahim, S., & Jang, M. (2016). An efficient

- and economical treatment for batik textile wastewater containing high levels of silicate and organic pollutants using a sequential process of acidification, magnesium oxide, and palm shell-based activated carbon application. *Journal of Environmental Management*, 184, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.066>
- Bjornsson, W. J., Nicol, R. W., Dickinson, K. E., & McGinn, P. J. (2013). Anaerobic digestates are useful nutrient sources for microalgae cultivation: functional coupling of energy and biomass production. *Journal of Applied Phycology*, 25(5), 1523–1528. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9968-0>
- Bona, D., Papurello, D., Flaim, G., Cerasino, L., Biasioli, F., & Silvestri, S. (2020). Management of digestate and exhausts from solid oxide fuel cells produced in the dry anaerobic digestion pilot plant: microalgae cultivation approach. *Waste and Biomass Valorization*, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00931-3>
- Budiyono, Khaerunnisa, G., & Rahmawati, I. (2013). Pengaruh pH dan rasio COD:N terhadap produksi biogas dengan bahan baku limbah industri alkohol (vinasse). *Eksergi Jurnal Prodi Teknik Kimia*, 11(1), 1–6.
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>
- Choong, C. E., Ibrahim, S., & Basirun, W. J. (2019). Mesoporous silica from batik sludge impregnated with aluminum hydroxide for the removal of bisphenol A and ibuprofen. *Journal of Colloid and Interface Science*, 541, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.071>
- Cioabla, A. E., Ionel, I., Dumitrel, G., & Popescu, F. (2012). Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnology for Biofuels*, 5(39), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-39>
- Delée, W., O'Neill, C., Hawkes, F. R., & Pinheiro, H. M. (1998). Anaerobic treatment of textile effluents: a review. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, 73, 323–335. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199812\)73:4<323::AID-JCTB976>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199812)73:4<323::AID-JCTB976>3.0.CO;2-S)
- Desiana, D., & Setiadi, T. (2009). Effect of ozonation and sonication on biochemical methane potential of biosludge from textile mill effluent. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 9, 461–467. <https://doi.org/10.1007/s11267-009-9239-5>
- Dewanti, B. S. D., Prastiwi, T. F., & Haji, A. T. S. (2019). Pengolahan limbah cair batik menggunakan kombinasi metode netralisasi dan elektrokoagulasi. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri*, 7(3), 358–369.
- Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., & Yusuf, M. B. S. (2014). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences*, 2(1), 27–36.
- Enjarlis., Hartanto, S., Christwardana, M., Sijabat, B. F., & Fatian, O. R. (2019). Kombinasi proses elektrokoagulasi-oksidasi lanjut berbasis O3/GAC pada limbah cair industri batik. *Jurnal Rekayasa Kimia Dan Lingkungan*, 14(1), 44–52. <https://doi.org/10.23955/rkl.v14i1.12274>
- Fazal, T., Mushtaq, A., Rehman, F., Khan, A. U., Rashid, N., Farooq, W., Rehman, M. S. U., & Xu, J. (2018). Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3107–3126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.029>
- Febriyanti, C. P., & Winanti, E. T. (2020). Efektifitas pengolahan limbah cair industri batik sidoarjo menjadi air bening non-konsumsi menggunakan integrasi flocculation coagulation dan constructed wetland. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 1–10.
- Firmansyah, G. A., & Rahmadyanti, E. (2019). Optimalisasi pengolahan air limbah industri batik menggunakan integrasi biofilter dan constructed wetlands sebagai sumber daya air terbarukan. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 3(1), 1–10.
- Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., & Mavris, V. (2007). Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy*, 32(13), 2147–2160. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.11.015>
- Hardyanti, I. S., Nurani, I., Hardjono, D. S., Apriliani, E., & Wibowo, E. A. P. (2017). Pemanfaatan silika (SiO₂) dan bentonit sebagai adsorben logam berat Fe pada limbah batik. *Jurnal Sains Terapan*, 3(2), 37–41. <https://doi.org/10.32487/jst.v3i2.257>
- Hassaneen, F. Y., Abdallah, M. S., Ahmed, N., Taha, M. M., Abd ElAziz, S. M. M., El-Mokhtar, M. A., Badary, M. S., & Allam, N. K. (2020). Innovative nanocomposite formulations for enhancing biogas and biofertilizers production from anaerobic digestion of organic waste. *Bioresource Technology*, 309(123350), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123350>
- Karamah, E. F., & Nurcahyani, P. A. (2019). Degradation of blue KN-R dye in batik effluent by an advanced oxidation process using a combination of ozonation and hydrodynamic cavitation. *Indonesian Journal Chemistry*, 19(1), 41–47. <https://doi.org/10.22146/ijc.26733>
- Khalik, W. F., Ho, L., Ong, S., Wong, Y., Yusoff, N. A., & Ridwan, F. (2015). Decolorization and mineralization of batik wastewater through solar photocatalytic process. *Sains Malaysiana*, 44(4), 607–612. <http://doi.org/10.17576/jsm-2015-4404-16>
- Kristijanto, A. I., Handayani, W., & Levi, P. A. A. (2011). The effectiveness of anaerobic baffled reactor and rotating

- biological contactor in batik wastewater treatment. *Makara Journal of Technology*, 15(2), 168–172. <http://doi.org/10.7454/mst.v15i2.935>
- Kurniawan, M. W., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2013). Strategi pengelolaan air limbah sentra UMKM batik yang berkelanjutan di Kabupaten Sukoharjo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 11(2), 62–72. <https://doi.org/10.14710/jil.11.2.62-72>
- Lay, C. H., Kuo, S. Y., Sen, B., Chen, C. C., Chang, J. S., & Lin, C. Y. (2012). Fermentative biohydrogen production from starch-containing textile wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 2050–2057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.003>
- Lim, S. J., & Fox, P. (2013). Biochemical methane potential (BMP) test for thickened sludge using anaerobic granular sludge at different inoculum/substrate ratios. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18(2), 306–312. <https://doi.org/10.1007/s12257-012-0465-8>
- Lin, C. Y., Nguyen, M. L. T., & Lay, C. H. (2017). Starch-containing textile wastewater treatment for biogas and microalgae biomass production. *Journal of Cleaner Production*, 168, 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.036>
- Lv, Z., Liang, J., Chen, X., Chen, Z., Jiang, J., & Loake, G. J. (2019). Assessment of the start-up process of anaerobic digestion utilizing swine manure: 13 C fractionation of biogas and microbial dynamics. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 13275–13285. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04703-3>
- Malliga, P., Bela, R. B., & Shanmugapriya, N. (2019). Conversion of textile effluent wastewater into fertiliser using marine cyanobacteria along with different agricultural waste. In N. K. Rathinam & R. K. Sani (Eds.), *Biovaloriation of Waste, Renewable Chemicals and Biofuels*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817951-2.00005-5>
- Mukimin, A., Vistanty, H., Zen, N., Purwanto, A., & Wicaksono, K. A. (2018). Performance of bioequalization-electrocatalytic integrated method for pollutants removal of hand-drawn batik wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 21, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.12.004>
- Nagarajan, D., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2019). Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. *Bioresour. Technology*, 121804, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121804>
- Natalina, & Firdaus, H. (2017). Penurunan kadar kromium heksavalen (Cr⁶⁺) dalam limbah batik menggunakan limbah udah (kitosan). *Jurnal Teknik*, 38(2), 99–102. <https://doi.org/10.14710/teknik.v38i2.13403>
- Nurainun, Heiyana, & Rasyimah. (2008). Analisis industri batik di Indonesia. *Jurnal Fokus Ekonomi*, 7(3), 124–135.
- Nurdalia, I. (2006). *Kajian dan analisis peluang penerapan produksi bersih pada usaha kecil batik cap (Studi kasus pada tiga usaha industri kecil batik cap di Pekalongan)*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Nurroisah, E., Indarjo, S., & Wahyuningsih, A. S. (2014). Keefektifan aerasi sistem tray dan filtrasi sebagai penurun chemical oxygen demand dan padatan tersuspensi pada limbah cair batik. *Unnes Journal of Public Health*, 3(4), 56–64.
- Pivato, A., Vanin, S., Raga, R., Lavagnolo, M. C., Barausse, A., Rieple, A., Laurent, A., & Cossu, R. (2016). Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management*, 49, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.009>
- Praveen, P., Guo, Y., Kang, H., Lefebvre, C., & Loh, K. C. (2018). Enhancing microalgae cultivation in anaerobic digestate through nitrification. *Chemical Engineering Journal*, 354, 905–912. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.099>
- Pusat Data Lingkungan. (2014). *Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 72 Tahun 2013 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya*. www.pusdaling.jatimprov.go.id
- Putra, H. P., Andrio, D., & Elystia, S. (2016). Pengaruh rasio pencampuran limbah cair tahu dan kotoran sapi terhadap proses anaerob. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, 3(2), 1–5.
- Riyanto, & Puspitasari, E. (2018). Treatment of wastewater batik by electrochemical coagulation using aluminium (Al) electrodes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 299, 012081.
- Safauldeen, S. H., Hasan, H. A., & Abdullah, S. R. S. (2019). Phytoremediation efficiency of water hyacinth for batik textile effluent treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 20(9), 177–187. [10.12911/22998993/112492](https://doi.org/10.12911/22998993/112492)
- Saraswati, Y. W., Haeruddin, & Purwann, F. (2014). Sebaran spasial dan temporal fenol, kromium dan minyak di sekitar sentra industri batik Kabupaten Pekalongan. *Diponegoro Journal of Maquares*, 3(1), 186–192.
- Senthilkumar, M., Gnanapragasam, G., Arutchelvan, V., & Nagarajan, S. (2011). Treatment of textile dyeing wastewater using two-phase pilot plant UASB reactor with sago wastewater as co-substrate. *Chemical Engineering Journal*, 166(1), 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.057>
- Sianita, D., & Nurchayati, I. S. (2009). *Kajian pengolahan limbah Cair industri batik kombinasi aerob-anaerob dan penggunaan koagulan tawas*. Universitas Diponegoro, Semarang.

- Sinha, R. K., Bharambe, G., & Bapat, P. (2007). Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermi-filtration technology using earthworms. *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(6), 486–501.
- Suhartini, S. (2014). *The Anaerobic Digestion of Sugar Beet Pulp*. University of Southampton.
- Suhartini, S., Lestari, Y. P., & Nurika, I. (2019a). Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 230, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012075>
- Suhartini, S., Heaven, S., Zhang, Y., & Banks, C. J. (2019b). Antifoam, dilution and trace element addition as foaming control strategies in mesophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 145(104812), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104812>
- Suhartini, S., Pangestuti, M. B., & Hidayat, N. (2019c). Textile wastewater treatment: biodegradability on aerobic and anaerobic process. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 230, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012091>
- Sumarko, H. T., Lestari, S., & Dewi, R. S. (2013). Deodorisasi limbah cair batik menggunakan limbah baglog *Plerotus ostreatus* dengan kombinasi volume dan waktu inkubasi berbeda. *Molekul*, 8(2), 151–166.
- Suprihatin, H. (2014). *Kandungan Organik Limbah Cair Industri Batik Jetis Sidoarjo dan Alternatif Pengolahannya*.
- Susilo, B., Damayanti, R., & Izza, N. (2017). *Teknik Bioenergi*. UB Press.
- Sutisna, Wibowo, E., Rokhmat, M., Rahman, D. Y., Murniati, R., Khairurrijal, & Abdullah, M. (2017). Batik wastewater treatment using TiO₂ nanoparticles coated on the surface of plastic sheet. *Procedia Engineering*, 170, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.015>
- Swati, S. S., & Faruqui, A. N. (2018). Investigation on ecological parameters and COD minimization of textile effluent generated after dyeing with mono and bi-functional reactive dyes. *Journal Environmental Technology and Innovation*, 11(2018), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.j.eti.2018.06.003>
- Syafila, M., Setiadi, T., Mulyadi, A. H., & Esmiralda. (2007). Kajian biodegradasi limbah cair industri biodiesel pada kondisi anaerob dan aerob. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 39(1–2), 165–178. <http://dx.doi.org/10.5614/itbj.sci.2007.39.1-2.9>
- Utami, I., Redjeki, S., & Astuti, D. H. (2016). Biogas production and removal COD-BOD and TSS from wastewater industrial alcohol (vinasse) by modified UASB bioreactor. *MATEC Web of Conferences*, 58(01005), 1–5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165801005>
- Wijaya, I. P. K., Lestari, W., Ariyanti, N., Pandu, J., Saifuddin, F., Utama, W., & Bahri, A. S. (2018). Studi kelayakan perangkat CO₂ berdasarkan analisa fisik sedimen (Studi kasus: formasi kabuh, Cekungan Jawa Timur Utara). *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 2(2018), 227–231. <http://dx.doi.org/10.12962/j.23546026.y2018i1.3386>
- Wu, J. Y., Lay, C. H., Chen, C. C., & Wu, S. Y. (2017). Lipid accumulating microalgae cultivation in textile wastewater: Environmental parameters optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 79, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.02.017>
- Yakoob, M. A., Radin, R. M. S., Al-Gheethi, A. A. S., & Kassim, A. H. M. (2018). Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. *Chemical Engineering Transaction*, 63(2018), 637–642. <https://doi.org/10.3303/CET1863107>