

Prospek Produksi Bioetanol dari Limbah Pertanian dan Sampah Organik

The Prospect of Bioethanol Production from Agricultural Waste and Organic Waste

Yuana Susmiati*

Department of Renewable Energy Engineering, State Polytechnic of Jember
Jl. Mastrip, Jember 68121, Indonesia

*yuanasusmiati@gmail.com

Received: 08th February, 2018; 1st Revision: 14th April 2018; 2nd Revision: 26th April, 2018; Accepted: 27th April, 2018

Abstrak

Bioetanol merupakan salah satu bioenergi yang digunakan sebagai substitusi bensin dan bersifat ramah lingkungan. Bahan baku bioetanol yang bersumber dari tanaman budidaya membutuhkan biaya tinggi dan bersaing dengan penyediaan pangan. Limbah pertanian dan sampah organik mempunyai kandungan kimia yang potensial digunakan sebagai bahan baku alternatif pembuatan bioetanol. Tujuan dari kajian ini adalah menentukan potensi limbah pertanian dan sampah organik sebagai bahan baku bioetanol di Indonesia, mengidentifikasi jenis teknologi proses produksi bioetanol yang dapat dikembangkan, serta menentukan dampak pengembangan produksi bioetanol tersebut terhadap lingkungan, sosial ekonomi dan keberlanjutannya. Metode penelitian yang dilakukan meliputi pengumpulan data jumlah limbah pertanian dan sampah organik, penghitungan potensi bioetanol yang dapat diproduksi dan analisis sesuai hasil kajian pustaka. Potensi limbah pertanian dan sampah organik di Indonesia pada tahun 2015 cukup tinggi yaitu 156.892.752,7 ton dan 1.035.889,2 ton serta dapat dikonversi menjadi bioetanol sebanyak 11.880.641,29 kiloliter dan 72.511,2 kiloliter. Teknologi proses pengolahan limbah pertanian dan sampah organik menjadi bioetanol dapat dilakukan secara *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF), *Simultaneous Saccharification Fermentation* (SSF) dan *Consolidated BioProcessing* (CBP). Konsep keberlanjutan pengembangan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik dituangkan dalam causal loop diagram dan memberikan dampak positif terhadap lingkungan, sosial dan ekonomi.

Kata kunci: bioetanol, limbah pertanian, sampah organik

Abstract

Bioethanol is environmentally friendly bioenergy used as a gasoline substitute. Bioethanol raw materials sourced from cultivated plants require high cost and compete with the provision of food. Agricultural waste and organic waste have potential chemical content used as alternative feedstock for bioethanol production. The objective of this study is to determine the potential of agricultural and organic waste as a raw material for bioethanol in Indonesia, to identify the types of bioethanol production process technologies that can be developed, and to determine the impact of bioethanol production development on the environment, socio-economic and sustainability. The research methods include collecting data on the amount of agricultural and organic waste, calculating bioethanol producing potential and analysis according to the results of a literature review. The potential of agricultural waste and organic waste in Indonesia in 2015 is quite high at 156,892,752.7 tons and 1,035,889.2 tons and can be converted into bioethanol as much as 11,880,641.29 kiloliters and 72,511.2 kiloliters. Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF), Simultaneous Saccharification Fermentation (SSF) and Consolidated BioProcessing (CBP) are some of the technology that turns waste and organic waste into bioethanol. The concept of sustainable development of bio-ethanol from agricultural waste and organic waste is poured into causal loop diagrams and has a positive impact on the environment, social and economic.

Keywords: agricultural waste, bioethanol, organic waste

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi adalah salah satu faktor penting di dalam kehidupan manusia yang berpengaruh terhadap semua lini kehidupan, mulai dari pemerintahan, ekonomi, pendidikan dan juga sosial budaya. Konsumsi energi meningkat sei-

ring dengan peningkatan jumlah penduduk dan peningkatan kebutuhan hidupnya. Sesuai dengan data Badan Pusat Statistik (2016), total konsumsi energi final di Indonesia meningkat dari 4,47 exajoule pada tahun 2010 menjadi 5,28 exajoule di tahun 2012 dan menurun menjadi 4,44 exajoule pada tahun 2014. Pada tahun 2014 sektor

transportasi merupakan sektor yang konsumsi energi finalnya terbesar yaitu 42%, diikuti oleh sektor rumah tangga sebesar 30%. Berdasarkan jenis energi, BBM (Bahan Bakar Minyak) masih merupakan sumber energi fosil yang penting bagi Indonesia dan pangsaanya semakin meningkat dari 43% pada tahun 2010 menjadi 62% pada tahun 2014.

Penggunaan energi, utamanya bahan bakar fosil akan menyisakan residu yang memberikan dampak pada pencemaran lingkungan dan peningkatan suhu bumi. Penggunaan bahan bakar fosil menyumbang emisi gas rumah kaca (CO_2) sebesar 76% yang terdiri dari proses industri 65% dan kehutanan beserta penggunaan lahan lainnya 11%. Pemakaian bahan bakar bensin dan solar pada kendaraan bermotor juga menghasilkan CO_2 . Jumlah kendaraan bermotor yang semakin meningkat berbanding lurus dengan peningkatan emisi CO_2 . Emisi CO_2 dari kendaraan bermotor. Pada tahun 2014 sebesar 126,56 juta ton yang terdiri dari emisi CO_2 dari pemakaian bahan bakar bensin sebesar 69,63 juta ton dan emisi CO_2 dari pemakaian solar sebesar 56,92 juta ton (Badan Pusat Statistik, 2016).

Terkait dengan permasalahan energi dan efek gas rumah kaca tersebut, pengembangan bioenergi dapat menjadi alternatif solusinya. Keuntungan dari penggunaan bioenergi adalah dapat mengurangi emisi gas rumah kaca di seluruh siklus hidup bioenergi. Penggunaan biomassa untuk memproduksi biofuel, seperti etanol terbukti dapat mengurangi emisi CO_2 jika dibandingkan dengan produksi bensin. *International Energy Agency* (IEA) melaporkan bahwa penggunaan biofuel diproyeksikan dapat mengurangi emisi CO_2 sekitar 2,1 gigaton per tahun 2050 jika diproduksi secara stabil (Jin & Sutherland, 2016).

Bioetanol merupakan bioenergi yang dapat diperbarui, sedikit polusi, dan dapat diproduksi dari bahan-bahan yang mengandung gula dan pati seperti jagung, kentang, gandum, tebu, molases dan yang lainnya. Sementara itu, penggunaan lahan pertanian untuk memproduksi tanaman bioenergi akan bersaing dengan budidaya tanaman pangan. Selain itu produksi bioenergi dari tanaman yang dibudidayakan akan membutuhkan biaya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan produksi energi dari minyak bumi, dan kurang menguntungkan. Oleh karena itu diperlukan alternatif sumber bahan baku yang murah dan berlimpah (Ma, Cai, & Liu, 2017).

Alternatif sumber bahan baku yang dapat dimanfaatkan adalah limbah pertanian dan sampah organik. Limbah pertanian merupakan sumber karbon alami yang melimpah, harganya mu-

rah dan tidak mengganggu rantai pangan serta jejak lingkungan (Banerjee, Chintagunta, & Ray, 2017). Limbah pertanian dan sampah rumah tangga termasuk limbah padat, yang jumlahnya meningkat seiring dengan laju pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, urbanisasi dan modernisasi. Hal tersebut menyebabkan peningkatan permintaan terhadap makanan dan kebutuhan lainnya, sehingga limbah ataupun sampah semakin meningkat. Menurut Organisasi Pangan dan Pertanian PBB, setiap tahun sejumlah 1,3 miliar ton sampah dihasilkan dari sepertiga jumlah makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia. Sampah tersebut termasuk sampah dari makanan laut, sereal, buah dan sayuran, produk dari daging dan susu (Kresna, 2017).

Limbah pertanian dan sampah organik memerlukan penanganan dan pemanfaatan secara serius agar tidak memberikan dampak buruk terhadap lingkungan (kesehatan/sanitasi serta estetika/keindahan). Limbah pertanian umumnya mengandung pati, selulosa dan hemiselulosa yang cukup tinggi. Kandungan kimia limbah pertanian tersebut dapat dijadikan sebagai bahan baku dalam proses pembuatan bioetanol (Khaidir, 2016).

Konversi sampah organik yang terdiri dari sampah sayur dan buah-buahan, sampah rumah tangga, sampah makanan telah dikaji dan terbukti dapat menghasilkan bioetanol (Anisah, Herliati, & Widyaningrum, 2014; Sugiarta, Kusuma, & Santhiarsa, 2017; Hasanah, Zaenab, & Rofieq, 2015; dan Nikmah & Astuti, 2010). Proses pembuatan bioetanol dari jerami padi juga dapat dilakukan melalui proses delignifikasi, hidrolisis dan fermentasi (Jannah, 2010; Said, Diah, & Sabang, 2014; dan Hayuningtyas, Sunarto, & Sari, 2014). Selain itu penelitian tentang konversi limbah pertanian lainnya menjadi bioetanol juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya adalah tandan kosong kelapa sawit/TKKS oleh Fuadi dan Pranoto, (2016); Kristina, Sari, dan Novia (2012); serta Nadia, Fauziah, Mayori, dan Sunardi (2017), bioetanol dari tongkol jagung oleh Fitriani, Bahri, dan Nurhaeni (2013); Fachry, Astuti, dan Puspitasari (2013) serta Mushlihah dan Trihadiningrum (2013). Bioetanol dari ampas tebu dilakukan oleh Irvan, Prawati, dan Trisakti (2015), bioetanol dari kulit singkong oleh Erna, Said, dan Abram (2017), bioetanol dari kulit pisang oleh Sukowati, Sutikno, dan Rizal (2014), bioetanol dari kulit kopi oleh Murni, Arifan, dan Abidin (2015) serta Siswati, Yatim, dan Hidayanto (2010). Selain yang tercantum masih banyak penelitian atau kajian tentang potensi limbah pertanian atau sampah organik menjadi bioetanol lainnya.

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian terse-

sebut, perlu diketahui bagaimana potensi produksi bioetanol di Indonesia ditinjau dari ketersediaan limbah pertanian dan sampah organik yang dapat dikonversi menjadi bioetanol. Selain itu juga tentang teknologi yang bisa dikembangkan untuk pengolahan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik serta dampak pengembangan produksi bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik terhadap lingkungan dan sosial ekonomi serta keberlanjutannya.

METODE PENELITIAN

Artikel ini ditulis berdasarkan hasil kajian atau studi pustaka yang terkait dengan bioetanol dari sampah dan limbah pertanian. Metode penelitian meliputi pengambilan data sekunder dari Badan Pusat Statistik berupa situs resmi dan buku yang diakses secara *online*, review jurnal terkait dengan konversi bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik, pengolahan data (penghitungan potensi bioetanol yang dapat dihasilkan) dan analisis serta pembahasan. Data produksi pertanian diperoleh dari situs resmi Badan Pusat Statistik, sedangkan data jumlah sampah yang dicantumkan dalam tabel merupakan data dari Badan Pusat Statistik 2016 dalam buku Statistik Lingkungan Hidup Indonesia, katalog nomor 3305001.

Komoditi pertanian yang dipilih merupakan komoditi utama, yaitu komoditi yang paling banyak dikembangkan di Indonesia sebagai sumber pangan ataupun bahan baku industri. Komoditi bahan pangan pokok yang dipilih diantaranya adalah padi, jagung, dan singkong. Komoditi tanaman perkebunan meliputi kelapa sawit, kelapa, kopi, kakao, tebu, sedangkan untuk komoditi tanaman buah-buahan meliputi nanas, pisang dan durian. Nilai potensi limbah dan potensi bioetanol yang dapat diproduksi pada setiap komoditi ditentukan berdasarkan jurnal-jurnal yang dijadikan referensi.

Nilai limbah pertanian dari setiap komoditi dihitung berdasarkan rumus:

$$\text{Jumlah limbah pada komoditi} = \text{Tingkat produksi komoditi} \times \% \text{ Nilai potensi limbah}$$

Nilai bioetanol yang dapat dihasilkan dari limbah pertanian yang ada pada setiap komoditi:

$$\text{Jumlah bioetanol setiap komoditi} = \% \text{ Potensi bioetanol} \times \text{Jumlah limbah pada komoditi}$$

Data banyaknya sampah organik yang ada di Indonesia diambil contoh pada lima kota besar yang menghasilkan sampah paling banyak. Pada tahun 2015, data yang tersedia ada lima kota besar penghasil sampah yaitu Semarang, Surabaya, Medan, Makasar dan Denpasar. Pada kota Jakarta

dapat didekati dengan data perkiraan sesuai tahun sebelumnya. Jumlah sampah organik sendiri dihitung berdasarkan rumus berikut sesuai dengan penelitian Anisah *et al.* (2014):

$$\text{Jumlah sampah organik} = 65\% \times \text{Jumlah sampah yang ada}$$

Sedangkan potensi bioetanol dari sampah organik adalah :

$$\text{Jumlah bioetanol sampah organik} = \% \text{ Potensi bioetanol} \times \text{Jumlah sampah organik}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Limbah Pertanian dan Sampah Organik sebagai Bahan Baku Bioetanol

Sektor pertanian merupakan salah satu usaha yang telah berkembang dalam rangka memenuhi kebutuhan pokok misalnya pangan, dan kebutuhan-kebutuhan lain yang merupakan kebutuhan tambahan. Pengolahan hasil pertanian mulai dari lahan pertanian sampai menjadi bahan atau barang yang siap dikonsumsi akan menyisakan bagian-bagian yang tidak dimanfaatkan berupa limbah. Limbah pertanian memerlukan penanganan dan pemanfaatan secara serius agar tidak memberikan dampak buruk terhadap lingkungan (ke-sehatan/sanitasi serta estetika/keindahan). Sampah sayuran dan buah-buahan di pasar, sampah kulit buah-buahan seperti kulit nanas, kulit pisang, tempurung dan ampas kelapa sisa pengolahan buah kelapa, jerami, tongkol jagung, merupakan limbah pertanian yang kurang bermanfaat (Khaidir, 2016).

Limbah pertanian dan sampah rumah tangga termasuk limbah padat, yang jumlahnya meningkat seiring dengan laju pertumbuhan penduduk, urbanisasi, modernisasi dan perkembangan industri. Hal tersebut menyebabkan peningkatan permintaan terhadap makanan dan kebutuhan lainnya, sehingga sampah semakin meningkat. Pada penelitian ini, limbah pertanian dikategorikan sebagai sisa-sisa dari proses penanaman, pemanenan, hingga penanganan pasca panen di industri. Limbah pertanian yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioetanol adalah limbah pertanian organik, yang di dalamnya terdapat kandungan gula, pati, selulosa dan hemiselulosa. Beberapa contoh dari limbah pertanian adalah tetes tebu, onggok ubi kayu, kulit pisang, dan kulit kentang. Tetes tebu merupakan limbah pengolahan tebu menjadi gula yang kandungan gulanya masih tinggi. Onggok ubi kayu merupakan sisa atau ampas pada proses pembuatan pati yang masih mempunyai kadar pati yang tinggi serta selulosa yang bisa dikonversi menjadi gula. Kulit pisang,

kulit kentang, merupakan limbah yang kandungan pati dan selulosanya tinggi.

Limbah pertanian yang berpotensi dapat diolah menjadi bioetanol adalah pelepah kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit, ampas sagu, batang jagung, serbuk gergaji, ampas tebu, dan limbah tanaman hortikultura (Irfan, 2013). Menurut Ulya (2011), beberapa limbah industri pangan yang dapat diolah menjadi bioetanol antara lain limbah minyak kelapa sawit (CPO), limbah padi dan limbah pabrik gula. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah limbah padat dari industri pengolahan kelapa sawit yang komponen utamanya terdiri dari selulosa (41-46%), hemiselulosa (25-33%) dan lignin (25-32%). Jerami padi merupakan limbah pertanian yang mengandung polisakarida dalam bentuk selulosa, hemiselulosa, pektin dan lignin. Jerami merupakan golongan kayu lunak yang mempunyai komponen utama selulosa. Jumlah kandungan selulosa dalam jerami antara 35-40% (Ulya, 2011). Limbah daun nanas mengandung selulosa 41,15%, hemiselulosa 21,02%, lignin 13,05–14,4% dan abu 5,88% (Banerjee *et*

al., 2017). Limbah kulit kentang mengandung protein 15,1%, lemak 0,52%, air 6,78%, pati 48,46%, abu 7,2% (Khawla *et al.*, 2014). Keterseediaan limbah pertanian yang tinggi menunjukkan bahwa potensi bahan baku bioetanol juga tinggi. Tabel 1 menunjukkan tingkat produksi pertanian untuk beberapa bahan pokok pada tahun 2015 (Badan Pusat Statistik, 2015), serta hasil perhitungan jumlah limbah pertanian yang dapat dijadikan sebagai bahan baku bioetanol serta potensi bioetanol yang dapat dihasilkan dari limbah tersebut.

Tingkat produksi tanaman pertanian menunjukkan angka yang cukup tinggi sehingga dari Tabel 1 dapat diperkirakan bahwa hasil produksi tersebut menyisakan limbah atau sampah yang cukup banyak. Data dari diambil Badan Pusat Statistik (2015) dan dipilih beberapa komoditi utama yaitu padi, jagung, ubi kayu, tebu, kelapa, kelapa sawit, kopi, kakao, nanas, pisang dan durian. Pemilihan komoditi didasarkan pada tingkat produksi pertanian yang cukup besar dan sudah adanya riset tentang pemanfaatan limbah dari ko-

Tabel 1. Potensi limbah pertanian dan produksi bioetanol di Indonesia pada tahun 2015

Komoditi	Produksi (ton)		Potensi limbah			Potensi Bioetanol		
	Data BPS Tahun 2015	Nilai (%)	Jumlah Limbah (ton)	Jenis	Pustaka	Nilai % (v/b)	Pustaka	Jumlah Bioetanol (kiloliter)
Padi	75.397.841	150	113.096.761,5	Jerami	(Jannah, 2010)	8,96	(Hayuningtyas <i>et al.</i> , 2014)	10.133.469,83
Jagung	19.612.435	30	5.883.730,5	Tongkol jagung	(Fachry <i>et al.</i> , 2013)	1,3	(Fachry <i>et al.</i> , 2013)	76.488,4965
Ubi kayu	21.801.415	12	2.616.169,8	Kulit	(Erna <i>et al.</i> , 2017)	6	(Erna <i>et al.</i> , 2017)	156.970,188
Tebu	2.498.000	11,4	2.485.361,31	Onggok	(Irvan <i>et al.</i> , 2015)	7,3	(Nisa, 2014)	181.431,3756
		32	799.360	Bagas		4,76	(Trisakti, Silitonga, & Irvan, 2015)	38.049,536
		4,5	112.410	Tetes		8,79	(Wardani & Pertiwi, 2013)	9.880,839
Kelapa sawit	31.070.000	22	6.835.400	TKKS	(Fuadi & Pranoto, 2016)	4,37	(Kristina <i>et al.</i> , 2012)	298.706,98
		13	4.039.100	Serat		2,86	(Ni'mah, Ardiyanto, & Zainuddin, 2015)	115.518,26
		5,5	1.708.850	Cangkang biji		1,23	(Fuadi & Pranoto, 2016)	21.018,855
Kelapa	2.920.700	33,33	973.469,31	Sabut kelapa	(Anggorowati & Dewi, 2013)	0,013	(Anggorowati & Dewi, 2013)	126,5510103
Kopi	639.400	35	223.790	Kulit kopi	(Siswati <i>et al.</i> , 2010)	8	(Saisa & Syabriana, 2018)	17.903,2
Kakao	593.300	74	439.042	Kulit kakao	(Listyati, 2015)	10,9	(Pratiwi, Eka, Yatim, & Edahwati, 2010)	47.855,578
Nanas	1.729.603	77,5	1340.442,325	Sampah padatan	(Seguí Gil & Fito Maupoey, 2018)	5,4	(Seguí Gil & Fito Maupoey, 2018)	72.383,88555
Pisang	7.299.275	213	15.547.455,75	Batang, tongkol, daun	(Bey-Ould Si Said <i>et al.</i> , 2016)	4,4	(Guerrero & Muñoz, 2018)	684.088,053
Durian	995.735	79,48	791410,178	Kulit dan biji	(Guerrero & Muñoz, 2018)	3,38	(Anggorowati <i>et al.</i> , 2015)	26.749,66402
					(Anggorowati, Pampang, & Yunita, 2015)			
Jumlah			156.892.752,7			Jumlah		11.880.641,29

Tabel 2. Produksi dan volume sampah yang terangkut perhari beberapa kota besar di Indonesia

Kota Penghasil Sampah Cukup Banyak	Perkiraan Produksi Sampah Per Hari (m ³)		Volume Sampah yang Terangkut Per Hari (m ³)	
	Tahun 2014	Tahun 2015	Tahun 2014	Tahun 2015
DKI Jakarta	6.748,03	-	6.212,05	-
Semarang	4.917,00	4.998,67	4.179,00	4.348,84
Surabaya	9.185,93	9.475,21	4.853,33	4.925,50
Medan	3.834,50	4.936,86	3.244,70	3.651,50
Makasar	4.494,86	4.183,41	4.063,10	3.962,63
Denpasar	3.507,67	3.710,61	3.418,56	3.596,38

Sumber: Badan Pusat Statistik (2016)

Tabel 3. Banyaknya sampah dan potensi bioetanol yang dapat dihasilkan di beberapa kota besar di Indonesia per hari tahun 2015

Kota	Jumlah Sampah (m ³)	Jumlah Sampah Organik (ton)	Potensi Etanol (%)	Jumlah etanol (kiloliter)
Semarang	4.998,67	422,39	7	29,57
Surabaya	9.475,21	800,66	7	56,05
Medan	4.936,86	417,16	7	29,20
Makasar	4.183,41	353,50	7	24,74
Denpasar	3.710,61	313,55	7	21,95
Jakarta	6.748,03	570,21	7	39,91
Jumlah		2.877,47		201,42

Sumber: Nikmah & Astuti (2010)

moditi tersebut menjadi bioetanol. Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan diketahui bahwa di Indonesia pada tahun 2015 tersedia limbah sebanyak 156.892.752,7 ton. Ketersediaan limbah pertanian itu dapat dikonversi menjadi bioetanol sebanyak 11.880.641,29 kiloliter.

Sampah organik adalah semua sisa-sisa dari rumah tangga, baik makanan ataupun bagian tidak dapat dimakan dari buah dan sayuran yang bersifat alami, serta mudah terurai oleh mikroorganisme. Sampah dapur meningkat seiring dengan peningkatan laju pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang akan meningkatkan rata-rata konsumsi. Sampah dapur dapat berasal dari rumah tangga, restoran dan industri pengolahan makanan yang menghasilkan bahan makanan tidak terpakai seperti sisa nasi, daging, buah-buahan dan sayuran, roti dan produk lainnya. Sampah dapur biasanya mengandung 60% karbohidrat, 20% protein dan 10% lemak. Komposisi dari karbohidrat tersebut terdiri dari pati, selulosa dan hemiselosa (Hafid, Rahman, Shah, Baharuddin, & Ariff, 2017).

Sampah kota utamanya terdiri dari sampah organik sebanyak 65%. Kandungan berat kering biomassa yang terdapat pada sampah organik tersebut adalah 75%. Pada sampah organik terdapat kandungan pati, hemiselulosa, selulosa dan terdiri atas sayur-sayuran, buah-buahan, dedaunan, kulit buah, bambu, ranting kayu dan juga sisa-sisa makanan. Sampah sayur yang dihidrolisis menggunakan asam sulfat encer 1% dan dengan

penambahan mikroorganisme EM4, kemudian difermentasi menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* 8% dapat menghasilkan bioetanol 68,17% (Anisah *et al.*, 2014).

Sampah kota saat ini menjadi masalah yang harus segera dipecahkan mengingat produksi sampah yang terus meningkat setiap harinya. Pada tahun 2011 Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah Jakarta menyatakan bahwa produksi sampah DKI Jakarta dalam sehari berjumlah 7.500 ton. Lebih dari 54% dari jumlah tersebut adalah sampah makanan baik sisa makanan maupun sampah produksi makanan. Penyumbang sampah terbesar adalah rumah tangga. Tingkat pencemaran lingkungan sangat memprihatinkan, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan menyebutkan bahwa total sampah di Indonesia mencapai 187,2 juta ton per tahun. Meningkatnya angka kepadatan penduduk serta keterbatasan lahan untuk menampung sisa konsumsi menjadi salah satu faktor penyebab volume sampah yang terus menggunung (Kresna, 2017).

Menurut Jaspi, Yenie, dan Elystia (2015) sampah organik mempunyai berat jenis 0,13 kg/l, atau 130 kg/m³, sehingga banyaknya sampah dalam berat (kg atau ton) yang bisa dikonversi menjadi bioetanol dapat ditentukan. Berdasarkan proses penghitungan maka banyaknya sampah organik per hari di tahun 2015 tampak pada Tabel 3. Pada Tabel 3 dapat diketahui bahwa setiap hari dari 6 kota besar di Indonesia menghasilkan sampah organik sebanyak 2.877,47 ton sehingga da-

lam tahun 2015 sampah organik yang tersedia sebanyak 1.035.889,2 ton (dengan asumsi 1 tahun 360 hari). Berdasarkan jumlah sampah organik yang tersedia dapat dihasilkan bioetanol dari sampah sebesar 201,42 kiloliter per hari atau 72.511,2 kiloliter pada tahun 2015. Jika potensi limbah pertanian dan sampah organik digabungkan maka ada sekitar 11.953.152,49 kiloliter bioetanol yang dapat dihasilkan. Nilai yang cukup besar meskipun belum semua jenis limbah pertanian terdaftar dan belum semua kota di Indonesia yang ikut diperhitungkan sampahnya.

Sesuai dengan data-data tersebut dapat disimpulkan bahwa limbah pertanian dan sampah organik merupakan sumber bahan baku bioetanol yang berlimpah, murah dan mudah didapatkan. Keuntungan lain yang dapat dicapai dari pengolahan limbah pertanian dan sampah organik tersebut adalah dapat mengatasi pencemaran lingkungan dan estetika serta permasalahan penanganan utamanya di perkotaan.

Teknologi Pengolahan Bioetanol dari Limbah Pertanian dan Sampah Organik

Etanol (C_2H_5OH) merupakan salah satu alternatif sumber energi yang dapat menggantikan gasolin/bensin (C_7H_{17}) karena mempunyai beberapa kelebihan. Etanol mengandung angka oktan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin yaitu 106-111, sehingga dapat digunakan untuk meningkatkan oktan bensin menjadi 91-96. Tingginya angka oktan pada etanol juga dapat digunakan untuk mengurangi *knocking* atau ketukan pada mesin selama proses pembakaran. Nilai entalpi penguapan pada etanol 1177 kJ/kg pada suhu 60°C, sedangkan bensin 348 kJ/kg pada suhu 60°C. Bioetanol juga lebih ramah lingkungan karena mengandung 34,7% oksigen yang tidak terdapat pada bensin, sehingga efisiensi pembakaran bioetanol 15% lebih tinggi dibandingkan dengan bensin (Zabed, Sahu, Suely, Boyce, & Faruq, 2017).

Bioetanol dapat dikonversi dari bahan nabati yang berupa gula, pati dan lignoselulosa. Dalam proses pengolahannya secara umum bahan baku diolah melalui tiga tahap proses yang utama yaitu sakarifikasi, fermentasi dan pemurnian. Proses sakarifikasi adalah proses perubahan bahan menjadi gula sederhana yang dilakukan tergantung dari jenis bahannya. Proses sakarifikasi diperlukan pada bahan yang mengandung pati dan lignoselulosa namun tidak diperlukan pada bahan yang mengandung gula. Pada proses sakarifikasi terdapat proses *pretreatment* (perlakuan awal) dan proses hidrolisis yang tujuannya mengubah polisakarida menjadi monosakarida. Setelah itu dilanjutkan de-

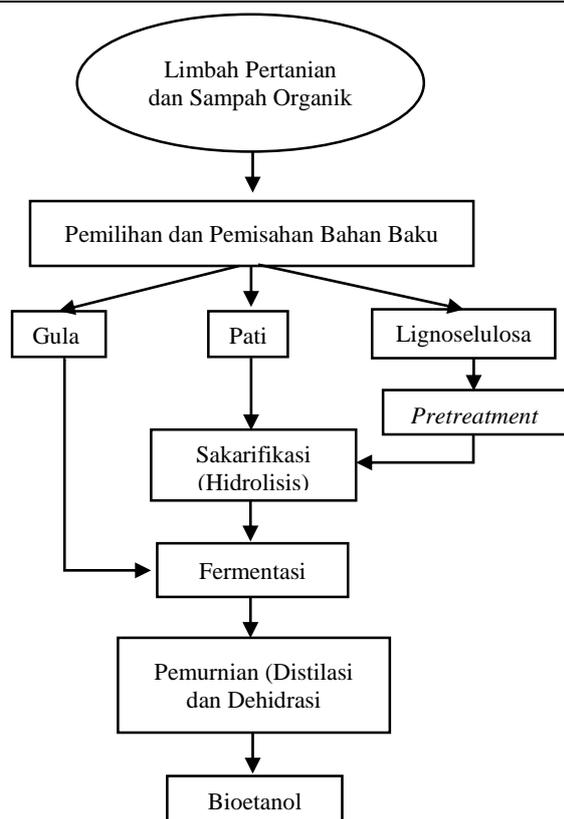
ngan proses fermentasi, yaitu perubahan gula menjadi etanol yang dilakukan oleh mikroorganisme. Ada berbagai macam mikroorganisme yang biasanya digunakan dalam proses ini, yang paling banyak adalah *Saccharomyces cerevisiae*. Bioetanol hasil fermentasi kemudian dipisahkan dari padatan dan air sehingga didapatkan etanol murni melalui proses distilasi dan dehidrasi (Zabed *et al.*, 2017; Sarkar, Ghosh, Bannerjee, & Aikat, 2012).

Ada beberapa macam teknologi yang dikembangkan dalam proses pembuatan bioetanol, tergantung dari jenis bahan baku yang tersedia. Tantangan dan faktor kunci dalam produksi dan komersialisasi bioetanol dari bahan lignoselulosa adalah waktu inkubasi yang pendek. Maka dari itu telah dikembangkan beberapa teknik proses produksi bioetanol seperti sakarifikasi simultan dan fermentasi (SSF), *prehydrolysis* simultan sakarifikasi dan fermentasi (PSSF), sakarifikasi simultan dan co-fermentasi (SSCF) dan konsolidasi *bioprocessing* (CBP) (Chintagunta, Ray, & Banerjee, 2017).

Limbah pertanian dan sampah organik, mempunyai kandungan utama karbohidrat yang terdiri dari pati, selulosa dan lignoselulosa, disamping lemak, protein, abu dan lainnya. Komponen karbohidrat ini yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan bioetanol. Sesuai dengan proses umum pembuatan bioetanol, maka dalam pembuatan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik ini diperlukan proses pemisahan dan pemilihan bahan baku. Pada proses ini dilakukan klasifikasi bahan baku yaitu bergula, berpati ataupun berlignoselulosa. Hal tersebut dilakukan untuk menentukan jenis proses yang harus dilakukan terhadap limbah atau sampah yang dikelola. Misalnya molases yang merupakan limbah dari industri pengolahan gula, kandungan gulanya sangat tinggi (mayoritas gula dan air), sehingga tidak perlu proses sakarifikasi.

Onggok singkong, merupakan limbah pengolahan pati dari singkong atau ubi kayu, perlu proses sakarifikasi yang dilakukan dengan proses hidrolisis secara enzim ataupun asam. Kulit pisang, kulit kentang, jerami, bagas, tandan kosong kelapa sawit, perlu proses sakarifikasi yang harus didahului dengan proses *pretreatment* terlebih dahulu karena kandungan utamanya adalah selulosa, hemiselulosa dan lignin. Berdasarkan hasil kajian proses pembuatan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik secara umum dapat didesain sesuai dengan bagan alir yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pengembangan dari masing-masing proses diperlukan untuk efisiensi proses dan mengoptimalkan bioetanol yang dihasilkan.

Pretreatment atau perlakuan awal perlu dila-



Gambar 1. Proses pembuatan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik secara umum

kukan dalam proses pembuatan bioetanol dari biomassa berupa limbah pertanian ataupun sampah organik karena untuk meningkatkan kemampuan proses hidrolisis asam ataupun enzim. *Pretreatment* bertujuan untuk mengubah atau merusak struktur dari komponen penyusun pada biomassa tersebut sehingga memudahkan enzim untuk menghidrolisis menjadi monomer-monomer gula (Hafid *et al.*, 2017). Metode *pretreatment* mengacu pada proses pelarutan dan pemisahan satu atau lebih komponen-komponen dari bahan (biomassa) sehingga pada ikatan komponen bahan tersebut menjadi longgar dan memudahkan bahan kimia ataupun biologi masuk kemudian menguraikannya. Proses *pretreatment* yang efektif perlu dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Pembentukan gula secara langsung atau selanjutnya melalui proses hidrolisis.
2. Mengurangi kehilangan dan atau degradasi gula sederhana yang dibentuk.
3. Membatasi pembentukan senyawa inhibitor.
4. Mengurangi energi yang dibutuhkan.
5. Meminimalkan biaya yang dikeluarkan (Sarkar *et al.*, 2012).

Ada beberapa macam proses *pretreatment* yang dapat dikembangkan, seperti yang disampaikan oleh Sarkar *et al.* (2012) dan Hafid *et al.* (2017) yaitu *pretreatment* secara fisik, kimia dan biologi. *Pretreatment* secara fisik bertujuan untuk

merombak struktur penyusun biomassa, yang bertujuan untuk memaksimalkan luas permukaan bahan yang dapat disentuh oleh bahan kimia atau enzim selama proses hidrolisis sehingga kecepatan hidrolisis pada proses sakarifikasi meningkat. Proses fisik dapat dilakukan dengan cara pengecilan ukuran (pencacahan, peremukan, penggilingan) untuk memperkecil ukuran bahan dan memperluas permukaannya. Proses fisik juga dapat dilakukan dengan pelarutan pada air panas pada suhu 60°C–170°C. Proses pengovenan menggunakan *microwave*, *steam explosion* dan *ammonia fiber explosion* juga dapat dilakukan pada biomassa.

Pretreatment secara kimia dilakukan dengan penambahan asam misalnya asam sulfat (H₂SO₄) encer pada suhu 130°C–210°C, penambahan senyawa alkali misalnya NaOH, oksidasi basah yaitu perlakuan dengan air dan udara (oksigen) pada suhu dibawah 120°C dan organosolv untuk proses delignifikasi. *Pretreatment* secara biologis biasanya menggunakan mikroorganisme pembusuk, seperti *brown rot*, *white rot* dan *soft rot fungi* (Sarkar *et al.*, 2012).

Teknologi proses pembuatan etanol dari limbah dan sampah organik yang bisa dikembangkan secara terintegrasi untuk mengoptimalkan proses yaitu (Hafid *et al.*, 2017):

- a. *Separate Hydrolysis and Fermentation* (SHF): proses hidrolisis yang dilakukan terpisah dari proses fermentasi, sehingga masing-masing pada reaktor yang berbeda. Proses ini mengeluarkan biaya yang cukup besar karena proses hidrolisis merupakan tahapan tersendiri yang perlu waktu, tenaga, investasi reaktor, begitu juga dengan proses fermentasinya.
- b. *Simultaneous Saccharification and Fermentation* (SSF): proses hidrolisis dan fermentasi pada satu reaktor, sehingga menghemat waktu dan biaya produksi. Produksi enzim dilakukan di luar reaktor untuk hidrolisis dan fermentasi.
- c. *Consolidated Bioprocessing* (CPB): hampir sama dengan SSF yaitu proses hidrolisis dan fermentasi dalam satu reaktor, akan tetapi di dalam reaktor yang sama juga dilakukan pertumbuhan mikroba/enzim penghidrolisis. Dalam proses pembuatan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik ada beberapa faktor yang berpengaruh untuk mendapatkan etanol yang optimal antara lain (Zabed *et al.*, 2017):
 - a. Suhu: merupakan faktor penting yang harus diperhatikan pada proses hidrolisis dan fermentasi. Suhu proses *pretreatment* dan hidrolisis tergantung dari jenis proses yang di-

- pilih. Suhu fermentasi yang optimal biasanya pada rentang 28°C– 32°C.
- b. pH: pH pada proses hidrolisis dan fermentasi harus diperhatikan karena enzim atau mikroba akan dapat hidup optimal pada pH tertentu. Misalnya enzim selulase pada pH 4,5-5. Demikian juga *Saccharomyces cerevisiae* dapat menghasilkan etanol dengan optimal
- pada pH 4 – 5 dan *Zimomonas mobilis* optimal pada pH 5 – 6.
- c. Waktu inkubasi: waktu inkubasi merupakan faktor yang berpengaruh secara signifikan pada proses hidrolisis dan fermentasi. Waktu hidrolisis secara enzimatik lebih lama dibandingkan hidrolisis secara kimia (asam). Waktu fermentasi yang optimal 42 jam – 72 jam,

Tabel 4. Proses pengolahan limbah pertanian dan sampah organik menjadi bioetanol

Jenis Limbah Pertanian / Sampah Organik	Proses Pengolahan	Pustaka
Sampah organik, buah-buahan dan sayuran	<i>Pretreatment</i> (pegecilan ukuran), hidrolisis, fermentasi, distilasi	(Anisah <i>et al.</i> , 2014) (Sugiarta <i>et al.</i> , 2017) (Hasanah <i>et al.</i> , 2015)
Sampah makanan rumah makan	Hidrolisis, fermentasi, distilasi	(Nikmah & Astuti, 2010)
Jerami padi	<i>Pretreatment</i> , SSF dan distilasi <i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi	(Baharuddin, Sappewali, Karisma, & Fitriyani, 2016) (Baharuddin <i>et al.</i> , 2016) (Said <i>et al.</i> , 2014) (Jannah, 2010) (Hayuningtyas <i>et al.</i> , 2014)
Tandan kosong kelapa sawit (TKKS)	<i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> dan SSF dan distilasi	(Fuadi & Pranoto, 2016) (Fathimah, Idiawati, Adhityawarman, & Arianie, 2014) (Ni'mah <i>et al.</i> , 2015) (Nadia <i>et al.</i> , 2017) (Kristina <i>et al.</i> , 2012)
Tongkol jagung	<i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi Delignifikasi, hidrolisis, fermentasi dan distilasi	(Mushlihah & Trihadiningrum, 2013) (Fitriani <i>et al.</i> , 2013)
Kulit singkong/ubi kayu Onggok ubi kayu Ampas tebu	Delignifikasi, hidrolisis, fermentasi, distilasi Sakarifikasi, fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , hidrolisis dan fermentasi dan distilasi	(Erna <i>et al.</i> , 2017) (Nisa, 2014) (Irvan <i>et al.</i> , 2015) (Trisakti <i>et al.</i> , 2015)
Tetes tebu, molases Sabut kelapa	Fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi	(Wardani & Pertiwi, 2013) (Anggorowati & Dewi, 2013)
Ampas kelapa Air kelapa	Sakarifikasi, fermentasi dan distilasi Fermentasi dan distilasi	(Widyatmoko & Duhita, 2012) (Malle, Kapelle, & Lopulalan, 2014) (Wulandari & Utami, 2015) (Andari, Mulyadi, & Puspawiningtyas, 2015)
Kulit pisang	<i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , SSF	(Wusnah, Bahri, & Hartono, 2016) (Sukowati <i>et al.</i> , 2014) (Retno & Nuri, 2011) (Guerrero, Ballesteros, & Ballesteros, 2018)
Limbah padat sagu Ampas tahu Kulit buah cokelat/pod kakao Pulp kakao	<i>Pretreatment</i> , SSF dan distilasi Hidrolisis, fermentasi dan distilasi Pengecilan ukuran, Hidrolisis, fermentasi dan distilasi Pemisahan cairan <i>pulp</i> dan kulitnya, fermentasi dan distilasi	(Nuryanti, Muria, & Chairul, 2014) (Wijayanti & Sunardi, 2011) (Pratiwi <i>et al.</i> , 2010) (Purwati & Nurhatika, 2016)
Kulit kopi	<i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi	(Murni <i>et al.</i> , 2015) (Saisa & Syabriana, 2018) (Siswati <i>et al.</i> , 2010) (Widyaningrum, 2017)
Kulit mangga Kulit nanas	<i>Pretreatment</i> , fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , SSF	(Setyawati & Rahman, 2011) (Susanti, Prakoso, & Prabawa, 2013) (Seguí Gil & Fito Maupoey, 2018)
Daun nanas Kulit ari kedelai Kulit durian	Hidrolisis, fermentasi dan distilasi <i>Pretreatment</i> , hidrolisis, fermentasi dan distilasi	(Wachid, 2011) (Anggorowati <i>et al.</i> , 2015)
Biji alpukat Kulit kentang	Hidrolisis, fermentasi dan distilasi Hidrolisis, detoksifikasi, fermentasi dan distilasi	(Muin, Lestari, & Sari, 2014) (Purba, Suprihatin, & Laksmiwati, 2016)

- akan tetapi sampai 96 jam mikroba masih menghasilkan etanol. Proses fermentasi yang terlalu lama akan mengakibatkan keracunan proses yang dapat membunuh mikroba.
- d. Konsentrasi substrat: konsentrasi substrat yang tinggi akan mempengaruhi pertumbuhan mikroba fermentasi. Konsentrasi substrat pada waktu proses berkisar antara 12%–8%. Semakin tinggi konsentrasi substrat dibutuhkan waktu yang semakin lama, karena gula yang ada meningkatkan pertumbuhan mikroba untuk pembentukan sel dan memperlama proses penghasilan etanol, sehingga meningkatkan biaya *recovery* selanjutnya.
 - e. Beban mikroba dan akumulasi *byproduct*: selama proses fermentasi tidak menutup kemungkinan akan terjadi pertumbuhan bakteri kontaminan dan terbentuk produk samping seperti asam laktat, asam asetat dan gliserol sebagai hasil dari aktivitas metabolik pada yeast dan bakteri kontaminan tersebut.

Proses konversi limbah pertanian dan sampah organik menjadi bioetanol tidak semuanya sama. Masing-masing jenis limbah ataupun sampah organik diproses melalui tahapan yang berbeda-beda, tergantung pada kandungan utama dan jenis proses yang diinginkan. Tabel 4 adalah proses pembuatan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti.

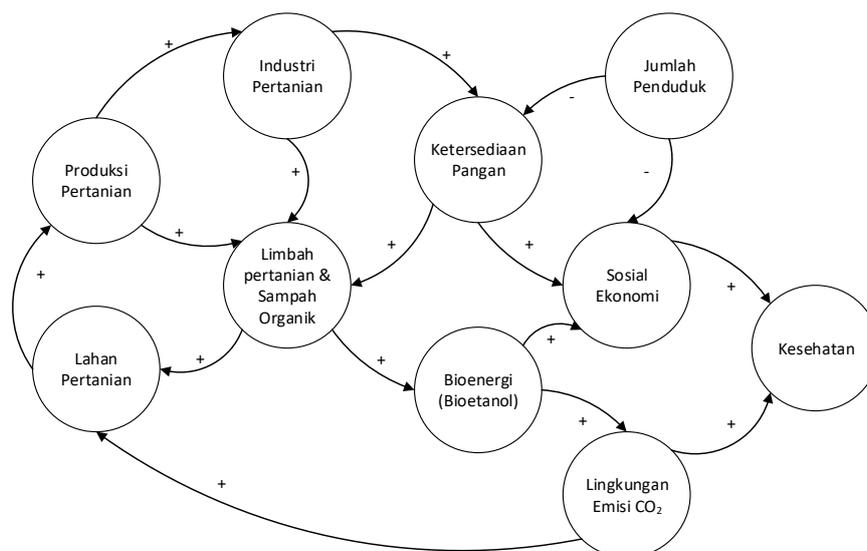
Dampak Pengembangan Bioetanol dari Limbah Pertanian dan Sampah Organik

Pengembangan industri bioetanol yang menggunakan bahan baku limbah pertanian dan sampah organik mempunyai beberapa keuntungan dan dampak terhadap lingkungan, ekonomi dan sosial. Keberlanjutan industri bioenergi diasumsikan terdiri dari empat dimensi yaitu lingkungan, sosial, ekonomi dan institusional (Rimppi, Uusitalo, Väisänen, & Soukka, 2016). Usaha pengolahan sampah organik menjadi bioetanol merupakan suatu sistem yang berlanjut (*sustainable*) dan dinamis. Tahapan pertama dalam membangun suatu konsep dinamis adalah dengan membuat *Causal Loop Diagram* (CLD). Pada CLD ini akan ditunjukkan keterkaitan/hubungan antar elemen yang berbeda dalam suatu sistem. Penambahan notasi positif (+) dan negatif (-) pada diagram memberi arti bagaimana hubungan sebab akibat antar elemen tersebut (Jin & Sutherland, 2016). Konsep pengembangan bioetanol dari sampah organik ditunjukkan pada Gambar 2.

Limbah pertanian dan sampah organik merupakan bahan yang berlimpah dan murah jika digunakan sebagai bahan baku bioetanol. Kandungan kimia dari limbah pertanian dan sampah organik menunjukkan bahwa bahan ini cocok digunakan sebagai bahan baku bioetanol. Ketersediaan dari limbah pertanian dan sampah organik sangat dipengaruhi oleh banyak sedikitnya lahan pertanian, produksi pertanian, industri pengolahan hasil pertanian dan ketersediaan pangan. Semakin luas lahan pertanian akan meningkatkan produksi pertanian yang juga meningkatkan aktivitas industri pertanian dalam pengolahan bahan hasil pertanian untuk menghasilkan makanan. Pada masing-masing proses tersebut akan menyisakan limbah ataupun sampah organik. Semakin banyak makanan yang diproduksi akan semakin banyak juga sampah yang dihasilkan.

Ketersediaan pangan terkait juga dengan jumlah penduduk, dimana semakin tinggi jumlah penduduk maka kecukupan pangan akan menurun, meskipun sampah yang dihasilkan untuk penyediaan pangannya meningkat. Ketersediaan pangan yang tinggi meningkatkan taraf hidup. Jumlah penduduk yang tinggi juga menyebabkan ketahanan ekonomi menurun. Supaya terjadi sistem yang baik maka jumlah penduduk harus dikendalikan. Banyaknya limbah dan sampah organik yang diolah menjadi bioetanol akan memberikan dampak positif bagi lingkungan, yaitu menekan adanya emisi CO₂, sehingga kesehatan juga meningkat. Selain berdampak bagi lingkungan dan kesehatan, industri bioetanol dari limbah dan sampah juga dapat menambah pendapatan masyarakat dan membuka lapangan pekerjaan sehingga kehidupan sosial dan ekonomi masyarakat meningkat. Pengembangan industri bioetanol ini juga tidak mengganggu ketahanan pangan sehingga tidak ada persaingan antara pangan dan energi (Hafid *et al.*, 2017).

Dampak pengembangan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah pertanian terhadap lingkungan hidup dapat dianalisis dengan menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA adalah metode pengukuran dampak suatu produk terhadap ekosistem yang dilakukan dengan cara mengidentifikasi, mengukur, menganalisis dan menakar besarnya konsumsi energi dan bahan baku, emisi serta faktor-faktor lainnya yang berkaitan dengan produk sepanjang siklus hidupnya. Analisis efek penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif terhadap lingkungan, salah satunya dilakukan oleh Guerrero dan Muñoz (2018) yaitu LCA pada penggunaan campuran bensin dan bioetanol dari limbah pisang sebagai bahan bakar



Gambar 2. Causal Loop Diagram produksi bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik

dibandingkan dengan bensin murni. Dalam kategori dampak *Climate Change* (CC), penggunaan 1 MJ bioetanol menghasilkan 0,031 kg CO₂ eq, dibandingkan dengan 1 MJ bensin reguler menghasilkan 0,072 kg CO₂ eq (EPA, 2014). Hasil analisisnya menyatakan bahwa penggunaan bioetanol dapat mengurangi perubahan iklim (*climate change*, CC), pembentukan oksidan fotokimia (*photochemical oxidant formation*, PO), pembentukan partikel-partikel (*particulate matter formation*, PM) dan penipisan fosil (*fossil depletions*, FD) tetapi menyebabkan peningkatan pengasaman terestrial (*terrestrial acidification*, TA), eutrofikasi air tawar (*freshwater eutrophication*, FE). Keseimbangan energi hasil analisis positif yaitu dengan nilai *energi ratio* (ER) sebesar 2,68MJ/MJ.

Hasil LCA dari produksi bioetanol sangat dipengaruhi oleh proporsi bioetanol dalam campuran bensin-bioetanol dan oleh sumber bahan baku: pengurangan emisi gas rumah kaca kurang dari 10% untuk campuran E10 dan lebih tinggi dari 40% untuk E85 dan campuran atas. Ketika membandingkan bahan baku untuk campuran E100, pengurangan GHG tertinggi per jarak yang ditempuh diperoleh untuk residu pertanian, dengan pengurangan antara 82 dan 91%. Dalam kasus *switchgrass* dan kayu, masing-masing nilai reduksi adalah antara 53-93% dan 50-62% (Morales, Quintero, Conejeros, & Aroca, 2015). Woods dan Bauen (2003) menetapkan bahwa produksi etanol generasi kedua dari jerami gandum bervariasi dari 0,023-0,072 kg CO₂ eq / MJ, tergantung pada teknologi. Sementara itu, studi tentang bahan yang sama menggunakan uap asam sulfat yang dikatalisis sebagai *pretreatment*

menemukan bahwa kategori perubahan iklim memiliki dampak 0,084 kg CO₂ eq / MJ (Wang, Littlewood, & Murphy, 2013), yang lebih tinggi daripada penelitian lain. Akhirnya Handler, Shonnard, Griffing, Lai, dan Palou-Rivera (2016) mengkuantifikasi potensi pemanasan global karbon yang mengandung bahan baku, seperti residu hutan (0,015 kg CO₂ eq / MJ) dan brangkas jagung (0,036 kg CO₂ eq / MJ). Pada LCA perbedaan bahan baku dan teknologi yang digunakan dalam proses produksi bioetanol, memberikan dampak yang berbeda.

KESIMPULAN

Ketersediaan limbah pertanian pada beberapa komoditi utama di Indonesia pada tahun 2015 adalah 156.892.752,7 ton, dan dapat dikonversi menjadi bioetanol sebanyak 11.880.641,29 kiloliter. Ketersediaan sampah organik di beberapa kota besar di Indonesia pada tahun 2015 sebanyak 1.035.889,2 ton dan dapat dikonversi menjadi bioetanol sebanyak 72.511,2 kiloliter. Teknologi pengolahan bioetanol dari limbah pertanian dan sampah organik tersebut dipilih berdasarkan jenis bahannya (bergula, berpati atau berlignoselulosa), sedangkan untuk efisiensi prosesnya bisa dilakukan secara hidrolisis dan fermentasi terpisah/*Separate hydrolysis and fermentation* (SHF), hidrolisis dan fermentasi dalam satu reaktor/*Simultaneous saccharification and fermentation* (SSF) dan hidrolisis dan fermentasi dalam satu reaktor disertai dengan penumbuhan mikroba dalam reaktor tersebut/*Consolidated Bioprocessing* (CPB). Dampak pengembangan bioetanol dari limbah

pertanian dan sampah organik cukup positif dari sisi lingkungan, sosial dan ekonomi.

Daftar Pustaka

- Andari, Y., Mulyadi, A. H., & Puspawiningtyas, E. (2015). Pengaruh konsentrasi ragi dan waktu fermentasi pada proses pembuatan bioetanol dari air kelapa. In *Seminar Nasional Teknologi 2015* (pp. 56–61). Purwokerto: Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
- Anggorowati, D. A., & Dewi, B. K. (2013). Pembuatan bioetanol dari limbah sabut kelapa dengan metode hidrolisis asam dan fermentasi dengan menggunakan ragi tape. *Industri Inovatif: Jurnal Teknik Industri*, 3(2), 9–13.
- Anggorowati, D. A., Pampang, H., & Yunita, L. (2015). Potensi Limbah Kulit Durian Sebagai Bahan Baku Pembuatan Energi Alternatif. In *Seminar Nasional Teknologi 2015* (pp. 843–850). Malang: Institut Teknologi Nasional Malang.
- Anisah, D., Herliati, & Widyaningrum, A. (2014). Pemanfaatan sampah sayuran sebagai bahan baku pembuatan bioetanol. *Jurnal Konversi*, 3(1), 13–18.
- Badan Pusat Statistik. (2015). *Tabel Dinamis Holtikultura, Perkebunan dan Tanaman Pangan*. Jakarta. Retrieved from <https://www.bps.go.id/site/pilihdata.html>
- Badan Pusat Statistik. (2016). *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2016*. Jakarta: Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Baharuddin, M., Sappewali, S., Karisma, K., & Fitriyani, J. (2016). Produksi bioetanol dari jerami padi (*Oryza sativa* L) dan kulit pohon dao (*Dracontamelon*) melalui proses sakarifikasi dan fermentasi serentak (SFS). *Chimica et Natura Acta*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.24198/cna.v4.n1.10441>
- Banerjee, R., Chintagunta, A. D., & Ray, S. (2017). A cleaner and eco-friendly bioprocess for enhancing reducing sugar production from pineapple leaf waste. *Journal of Cleaner Production*, 149, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.088>
- Bey-Ould Si Said, Z., Haddadi-Guemghar, H., Boulekbache-Makhlouf, L., Rigou, P., Remini, H., Adjaoud, A., ... Madani, K. (2016). Essential oils composition, antibacterial and antioxidant activities of hydrodistilled extract of *Eucalyptus globulus* fruits. *Industrial Crops and Products*, 89, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.018>
- Chintagunta, A. D., Ray, S., & Banerjee, R. (2017). An integrated bioprocess for bioethanol and biomanure production from pineapple leaf waste. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1508–1516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.179>
- EPA. (2014). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator (WWW Document)*. Retrieved from <https://www.epa.gov/energy/greenhousegas-equivalencies-calculator>
- Erna, Said, I., & Abram, P. H. (2017). Bioetanol dari limbah kulit singkong (*Manihot esculenta* Crantz) melalui proses fermentasi. *Jurnal Akademi Kimia*, 5(3), 121–126. <https://doi.org/10.22487/j24775185.2016.v5.i3.8045>
- Fachry, A. R., Astuti, P., & Puspitasari, T. G. (2013). Pembuatan bioetanol dari limbah tongkol jagung dengan variasi konsentrasi asam klorida dan waktu fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 19(1), 60–69.
- Fathimah, S., Idiawati, N., Adhityawarman, & Arianie, L. (2014). Penentuan kinetika hidrolisis enzimatis dalam pembuatan etanol dari tandan kosong kelapa sawit. *Kimia Khatulistiwa*, 3(4), 46–51.
- Fitriani, Bahri, S., & Nurhaeni. (2013). Produksi bioetanol jagung (*Zea mays*) dari hasil proses delignifikasi. *Natural Science: Journal of Science and Technology*, 2(3), 66–74.
- Fuadi, A. M., & Pranoto, H. (2016). Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan glukosa. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 3(1), 1–5.
- Guerrero, A. B., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2018). The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. *Fuel*, 213, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.105>
- Guerrero, A. B., & Muñoz, E. (2018). Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste: Environmental impacts and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, 174, 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.298>
- Hafid, H. S., Rahman, N. A. A., Shah, U. K. M., Baharuddin, A. S., & Ariff, A. B. (2017). Feasibility of using kitchen waste as future substrate for bioethanol production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 671–686. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.071>
- Handler, R. M., Shonnard, D. R., Griffing, E. M., Lai, A., & Palou-Rivera, I. (2016). Life cycle

- assessments of ethanol production via gas fermentation: Anticipated greenhouse gas emissions for cellulosic and waste gas feedstocks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3253–3261. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03215>
- Hasanah, N., Zaenab, S., & Rofieq, A. (2015). Perbedaan Kadar Bioetanol Hasil Fermentasi Berbagai Dosis Ragi Tape dari Limbah Sayuran dan Buah. In *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi "Peran Biologi dan Pendidikan Biologi dalam Menyiapkan Generasi Unggul dan Berdaya Saing Global"* (pp. 149–156). Malang: Program Studi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Muhammadiyah Malang.
- Hayuningtyas, S. K., Sunarto, & Sari, A. L. A. (2014). Produk bioetanol dari jerami padi (*Oryza sativa*) melalui hidrolisis asam dan fermentasi dengan *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioteknologi*, 11(1), 1–4. <https://doi.org/10.13057/biotek/c110101>
- Irfan, M. (2013). Pengembangan Produksi Bioetanol dari Limbah Pertanian. *Kutubkhanah*, 16, 1–6.
- Irvan, Prawati, P., & Trisakti, B. (2015). Pembuatan bioetanol dari tepung ampas tebu melalui proses hidrolisis termal dan fermentasi: Pengaruh pH, jenis ragi, dan waktu fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(2), 27–31.
- Jannah, A. M. (2010). Proses fermentasi hidrolisis jerami padi untuk menghasilkan bioetanol. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 17(1), 44–52.
- Jaspi, K., Yenie, E., & Elystia, S. (2015). Studi timbulan komposisi dan karakteristik sampah domestik Kecamatan Tampan Kota Pekanbaru. *JOM FT Universitas Riau*, 2(1), 1–6.
- Jin, E., & Sutherland, J. W. (2016). A Proposed Integrated Sustainability Model for a Bioenergy System. *Procedia CIRP*, 48, 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.159>
- Khaidir. (2016). Pengolahan limbah pertanian sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Agrium*, 13(2), 63–68.
- Khawla, B. J., Sameh, M., Imen, G., Donyes, F., Dhouha, G., Raoudha, E. G., & Oumèma, N.-E. (2014). Potato peel as feedstock for bioethanol production: A comparison of acidic and enzymatic hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 52, 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.025>
- Kresna, M. (2017). DKI Hasilkan 4 Ribuan Ton Sampah Makanan Per Hari. Retrieved March 28, 2018, from <https://tirto.id/dki-hasilkan-4-ribuan-ton-sampah-makanan-per-hari-cjti#> 22 February, 2017
- Kristina, Sari, E. R., & Novia. (2012). Alkaline pretreatment dan proses simultan sakarifikasi - fermentasi untuk produksi etanol dari tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 18(3), 34–43.
- Listyati, D. (2015). Peluang peningkatan pendapatan petani dari kulit buah kakao. *Sirkuler Inovasi: Tanaman Industri Dan Penyegar*, 3(3), 145–156.
- Ma, Y., Cai, W., & Liu, Y. (2017). An integrated engineering system for maximizing bioenergy production from food waste. *Applied Energy*, 206, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.190>
- Malle, D., Kapelle, I. B. D., & Lopulalan, F. (2014). Pembuatan bioetanol dari limbah air kelapa melalui proses fermentasi. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 2(1), 155–159.
- Morales, M., Quintero, J., Conejeros, R., & Aroca, G. (2015). Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1349–1361. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.097>
- Muin, R., Lestari, D., & Sari, T. W. (2014). Pengaruh konsentrasi asam sulfat dan waktu fermentasi terhadap kadar bioetanol yang dihasilkan dari biji alpukat. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 20(4), 1–7.
- Murni, Arifan, F., & Abidin, Z. (2015). Optimasi proses bioetanol dari kulit kopi dengan menggunakan proses hidrolisis vibrous bed bioreaktor. *Traksi : Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, 15(1), 1–9.
- Mushlihah, S., & Trihadiningrum, Y. (2013). Produksi Bioetanol dari Limbah Tongkol Jagung sebagai Energi Alternatif Terbarukan. In *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi VXIII* (pp. D–15–1 – D–15–8). Surabaya: Program Studi Magister Manajemen Teknologi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nadia, A., Fauziah, A., Mayori, E., & Sunardi. (2017). Potensi limbah lignoselulosa kelapa sawit di Kalimantan Selatan untuk produksi bioetanol dan xylitol. *Quantum : Jurnal Inovasi Pendidikan Sains*, 8(2), 41–51.
- Ni'mah, L., Ardiyanto, A., & Zainuddin, M. (2015). Pembuatan bioetanol dari limbah serat kelapa sawit melalui proses pretreatment, hidrolisis

- asam dan fermentasi menggunakan ragi tape. *INFO-TEKNIK*, 16(2), 227–242.
- Nikmah, K., & Astuti, A. (2010). *Kajian Fermentasi Bioetanol dari Sisa Makanan Rumah Makan dengan Berbagai Konsentrasi dan Bentuk Inokulum Jamur Aspergillus oryzae*. Yogyakarta.
- Nisa, W. W. (2014). *Produksi Bioetanol dari Onggok (Limbah Padat Tapioka) dengan Proses Sakarifikasi dan Fermentasi Serentak Menggunakan Khamir Hasil Isolasi dari Tetes Tebu*. Skripsi. Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim. Malang.
- Nuryanti, L., Muria, S. R., & Chairul. (2014). Pembuatan bioetanol limbah padat sagu menggunakan enzim selulase dan yeast *Saccharomyces cerevisiae* dengan proses simultaneous saccharification and fermentation (SSF). *JOM FT Universitas Riau*, 1(1), 1–6.
- Pratiwi, Eka, P., Yatim, M., & Edahwati, L. (2010). Pemanfaatan limbah kulit buah cokelat sebagai bioethanol. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Soebardjo Brotohardjono "Ketahanan Pangan dan Energi"* (pp. 1–10). Surabaya: Universitas Pembangunan Veteran.
- Purba, D. E. H., Suprihatin, I. E., & Laksmiwati, A. A. I. A. M. (2016). Pembuatan bioetanol dari kupasan kentang (*Solanum tuberosum* L.) dengan proses fermentasi. *Jurnal Kimia*, 10(1), 155–160.
- Purwati, L. S., & Nurhatika, S. (2016). Efektivitas penggunaan bioetanol dari limbah pulp kakao (*Theobroma cacao* L.) terhadap lama pembakaran kompor bioetanol. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 5(1), 11–16.
- Retno, D. T., & Nuri, W. (2011). Pembuatan Etanol dari Kulit Pisang. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia* (pp. 11–1 – 11–7). Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.
- Rimppi, H., Uusitalo, V., Väisänen, S., & Soukka, R. (2016). Sustainability criteria and indicators of bioenergy systems from steering, research and Finnish bioenergy business operators' perspectives. *Ecological Indicators*, 66, 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.005>
- Said, M., Diah, A. W. M., & Sabang, S. M. (2014). Sintesis bioetanol dari jerami padi (*Oryza sativa* L) melalui fermentasi. *Jurnal Akademika Kimia*, 3(4), 178–182.
- Saisa, & Syabriana, M. (2018). Produksi bioetanol dari limbah kulit kopi menggunakan enzim *Zymomonas mobilis* dan *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Serambi Engineering*, 3(1), 271–278.
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>
- Seguí Gil, L., & Fito Maupoey, P. (2018). An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.284>
- Setyawati, H., & Rahman, N. A. (2011). Bioetanol dari kulit nanas dengan variasi massa *Saccharomyces cerevisiae* dan waktu fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia*, 6(1), 1–4.
- Siswati, N. D., Yatim, M., & Hidayanto, R. (2010). Bioetanol dari limbah kulit kopi dengan proses fermentasi. *Jurnal Hasil Riset*, 1–4.
- Sugiarta, I. K. A., Kusuma, I. G. B. W., & Santhiarsa, I. G. N. N. (2017). Pengujian alat konversi sampah menjadi etanol. *Jurnal Mettek: Jurnal Ilmiah Nasional Dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin*, 3(1), 53–59.
- Sukowati, A., Sutikno, & Rizal, S. (2014). Produksi bioetanol dari kulit pisang melalui hidrolisis asam sulfat. *Jurnal Teknologi & Industri Hasil Pertanian*, 19(3), 274–288.
- Susanti, A. D., Prakoso, P. T., & Prabawa, H. (2013). Pembuatan bioetanol dari kulit nanas melalui hidrolisis dengan asam. *Ekuilibrium*, 12(1), 11–16.
- Trisakti, B., Silitonga, Y. B. R., & Irvan. (2015). Pembuatan bioetanol dari tepung ampas tebu melalui proses hidrolisis termal dan fermentasi serta recycle vinasse (pengaruh konsentrasi tepung ampas tebu, suhu dan waktu hidrolisis). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(3), 17–22.
- Ulya, M. (2011). Pemanfaatan Limbah Industri Pertanian Sebagai Sumber Bioetanol. In *Prosiding Konferensi Nasional "Inovasi dalam Desain dan Teknologi"* (pp. 349–356). Surabaya: Sekolah Tinggi Teknik Surabaya.
- Wachid, M. (2011). Potensi bioethanol dari limbah kulit ari kedelai limbah produksi tempe. *Gamma*, 6(2), 113–122.

- Wang, L., Littlewood, J., & Murphy, R. J. (2013). Environmental sustainability of bioethanol production from wheat straw in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 715–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.031>
- Wardani, A. K., & Pertiwi, F. N. E. (2013). Produksi etanol dari tetes tebu oleh *Saccharomyces cerevisiae* pembentuk flok (NRRL-Y265). *Agritech*, 33(2), 131–139.
- Widyaningrum, T. (2017). Pengaruh Dosis Ragi dan Waktu Fermentasi Kulit Mangga (*Mangifera indica*) terhadap Kadar Bioetanol Hasil Fermentasi. In *The 5th University Research Colloquium Proceeding* (pp. 1239–1247). Yogyakarta: Universitas Ahmad Dahlan.
- Widyatmoko, H., & Duhita, S. A. (2012). Pembuatan etanol dari limbah ampas kelapa dengan menggunakan *Rhizopus oligosporus* dan *Saccharomyces cerevisiae* dengan penambahan fosfat. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 6(1), 15–22.
- Wijayanti, K., & Sunardi. (2011). Pengolahan Ampas Tahu Menjadi Etanol sebagai Alternatif Sumber Bahan Bakar Nabati Non-Pangan. In *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia III "Teori Aplikasi Sains dalam Isu Globalisasi Lingkungan, Profesionalisasi Pembelajaran dan Kewirausahaan"* (pp. 362–368). Surakarta: Program Studi Pendidikan Kimia Jurusan PMIPA FKIP Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Woods, J., & Bauen, A. (2003). *Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK*. London.
- Wulandari, R. R. A., & Utami, B. (2015). Pembuatan Bioetanol dari Kelapa Tua Menggunakan Proses Fermentasi. In *Prosiding Seminar Nasional Kimia 2015* (pp. 147–152). Yogyakarta: Jurusan Pendidikan Kimia Fakultas MIPA Universitas negeri Yogyakarta.
- Wusnah, Bahri, S., & Hartono, D. (2016). Proses pembuatan bioetanol dari kulit pisang kepok (*Musa acuminata* B.C.) secara fermentasi. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 5(1), 57–65.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>