

PEMANFAATAN LIMBAH TEBU SEBAGAI BIOENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA

Erry Ika Rhofita

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan
Ampel Surabaya

Email: erryikarhofita@uinsby.ac.id

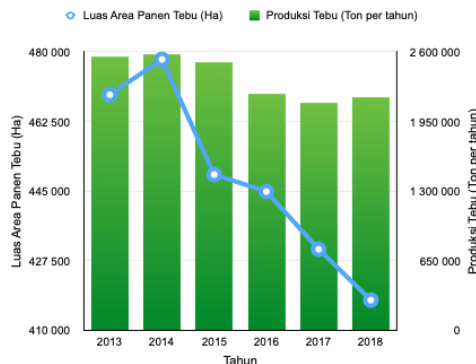
A. Pendahuluan

Konsep bioenergi dari limbah pertanian seperti limbah tebu berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia, dengan pertimbangan tidak terjadi kompetisi dengan produksi makanan. Disisi lain, permasalahan lingkungan seperti perubahan iklim dan pemanasan global akibat meningkatnya efek gas rumah kaca (GRK), menurunnya cadangan bahan bakar fosil, dan ketidakstabilan harga minyak bumi semakin mendorong pengembangan residu biomasa sebagai alternatif bahan bakar yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Di Indonesia, dukungan pemerintah melalui regulasi dan kebijakan tentang peningkatan produksi dan konsumsi bioenergi berkelanjutan mulai dipromosikan pada tahun 2006. Berawal dengan diterbitkannya Peraturan Presiden RI No 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menjelaskan bahwa pada tahun 2025 bauran penggunaan energi primer (*primary energy mix*) dengan cara meningkatkan substitusi konsumsi bahan bakar nabati (*biofuel*) dan energi baru terbarukan lainnya seperti biomassa menjadi 5%. Berdasarkan uraian sederhana tersebut, selanjutnya dalam bab ini akan dijelaskan secara detail potensi limbah tebu sebagai bahan baku bioenergi, pemanfaatan dan karakteristik limbah tebu saat ini. Dukungan teknologi konversi sebagai faktor utama penentu kualitas dan kuantitas bioenergi yang dihasilkan. Terakhir visi atau gambaran masa depan pengembangan limbah tebu sebagai biofuel diperkenalkan pada sub-bab terakhir.

B. Potensi Limbah Tebu Sebagai Bioenergi

Indonesia, negara agraris, 2018 menjadi produsen tebu urutan ke-12 dunia, dengan produksi rata-rata mencapai 2,2 juta ton per tahun (Hirschmann, 2020). Produksi tebu cenderung tetap dengan pertumbuhan rata-rata mencapai 0,03%, sedangkan luas panen

mengalami peningkatan rata-rata 0,67% dalam satu dekade terakhir. Berdasarkan proyeksi Direktorat Jendral Perkebunan, Kementerian Pertanian RI diperkirakan luas panen tebu akan meningkat 0,45% per tahun, tetapi produktivitas cenderung menurun sebesar 2,12% per tahun (Respati, 2019). Lebih jelas, data dari Badan Pusat Statistik rata-rata produksi tebu Indonesia pada tahun 2013-2018 mencapai 2.355.419 ton dengan produktivitas rata-rata 5 ton/Ha. Hampir 50% produksi tebu nasional disuplai oleh Propinsi Jawa Timur dengan total produksi tahunan lebih dari 1,1 juta ton, sisanya dipenuhi oleh sembilan propinsi yang mayoritas di Pulau Jawa, sebagian pulau Sumatera (Lampung, Sumatera Selatan, dan Sumatera Utara) dan Sulawesi (Sulawesi Selatan dan Gorontalo). Gambar 1 menunjukkan hubungan antara luas area panen dan produksi tebu tahunan Indonesia.



Gambar 1. Luas panen dan produksi tebu tahunan di Indonesia

Saat ini, batang tanaman tebu dimanfaatkan sebagai bahan baku gula beserta turunannya. Batang tersusun atas serat (42% selulosa, 34% hemiselulosa dan 13% lignin), gula (sukrosa, fruktosa dan laktosa) dan lebih dari 80% berupa air. Sedangkan, dari budidaya tebu akan menghasilkan limbah tebu berupa ampas tebu (*bagasse*) dan sisa daun beserta pucuknya, dengan komposisi 31,8% dan 32,9%, berturut-turut (Cortez et al., 2020). Carvalho et al., (2017), (Hofsetz & Silva, 2012), dengan kadar air sekitar 48% (Cardona et al., 2010) dan nilai kalor sebesar 7,62 MJ/kg (Mbohwa & Fukuda, 2003).

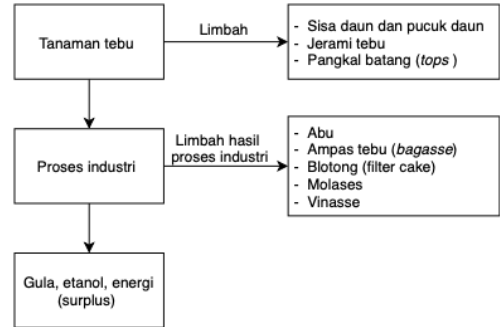
Seiring dengan kemajuan teknologi akan mendorong integrasi pengembangan agro-industri tebu berkelanjutan sebagai paradigma baru. Moraes et al. (2014) menjelaskan bioproses industri tebu memungkinkan untuk memproduksi bahan bakar nabati dan bahan

kimia yang memiliki nilai tambah serta menghasilkan daya dan panas. Selain itu, dari segi komposisi, tebu sebagai bahan baku utama dan bahan tambahan mampu menghasilkan berbagai produk bernilai jual tinggi di bidang pertanian, bioenergi, industri makanan dan obat-obatan, kertas (*pulp and paper*), serta bahan baku material gedung. Semua proses manufaktur tersebut secara tidak langsung akan menghasilkan limbah tebu yang dapat dikonversi menjadi berbagai jenis bioenergi yang bermanfaat untuk mendukung program pemerintah dalam mencapai target KEN. Sederhana pemanfaatan limbah tebu sebagai bahan bakar sejak lama diterapkan dalam industri gula (Gambar 2), (Lopes Silva et al., 2014). Lebih dari 50% ampas tebu hasil samping proses produksi digunakan sebagai energi untuk menggerakkan ketel uap. Setiap satu ton limbah tebu setara dengan 0,17 ton energi yang dihasilkan oleh minyak bumi. Secara spesifik energi yang diperoleh dari sisa daun dan pucuk daun tebu per hektar setara dengan energi yang dihasilkan oleh 10 ton batu bara, (Karthiga Devi et al., 2020). Pierossi and Bertolani (2018) dan Cortez et al. (2020) juga menjelaskan bahwa kandungan energi dalam tanaman tebu mencapai 7400 MJ, secara terperinci diilustrasikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi massa dan energi tanaman tebu (basis kering)

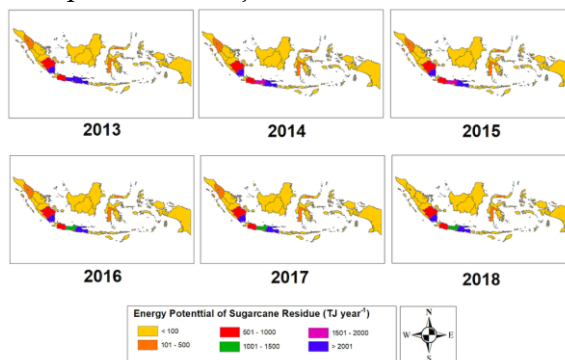
Komponen	Massa		Energi	
	kg/t	%	MJ	%
Sisa daun dan pucuk daun	140	32,9	2500	33,8
Ampas tebu	135	31,8	2400	32,4
Gula	150	35,3	2500	33,8
Jumlah	425	100	7400	100

Sumber: Cortez et al. (2020)



Gambar 2. Produk dan produk sampingan hasil tanaman tebu

Jumlah limbah tebu sebagai bahan bakar nabati dapat dihitung dari produksi tahunan tebu dan nilai perbandingan ampas (*bagasse ratio/BR*) serta nilai perbandingan sisa daun dan pucuk daun (*top and leaves ratio/LV*). Besarnya nilai BR dan LV sebesar 0,33 dan 0,05 dan nilai kalor residue tebu sebesar 20 MJ/kg (Avcioğlu et al., 2019; Hiloidhari et al., 2014; Singh et al., 2007). Secara teoritis diperkirakan potensi energi limbah tebu di Indonesia mencapai 14 ribu TJ sampai 17 ribu TJ dari ampas tebu dan 2300 TJ dari sisa daun beserta pucuknya. Jika dikonversi menjadi energi listrik limbah tebu tersebut menghasilkan 0,501 TWh setara dengan 139,321 MW setiap tahunnya. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menghitung potensi energi listrik limbah tebu dapat mencapai 1295 MW di tiga pulau di Indonesia, yaitu Jawa (854 MW), Sumatera (399 MW) dan Sulawesi (42 MW), (Mulyana, 2016). Hasil prediksi rata-rata dan distribusi spasial energi potensial limbah tebu di Indonesia tahun 2013 sampai 2018 ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi spasial potensi energi limbah tebu di Indonesia 2013-2018

Gambar 3 menunjukkan dalam kurun waktu enam tahun terakhir belum terjadi perubahan signifikan nilai energi potensial yang dihasilkan dari limbah tebu. Energi listrik yang dapat dibangkitkan dari limbah tebu di Indonesia per tahun mencapai 132,65 MW. Jika dikalkulasi dengan total konsumsi listrik nasional mampu mensuplai 4,83% per tahun. Sentral utama penghasil tebu terbesar di Indonesia adalah propinsi Jawa Timur dengan produktivitas tebu mencapai 5,67 ton/Ha setiap tahunnya, dengan potensi energi 8.640,34 TJ setara dengan 67,203 MW energi listrik.

Peningkatan produksi bioenergi limbah tebu di Jawa Timur didukung dengan adanya sembilan pabrik gula aktif berkapasitas antara 2500 sampai 7200 TCD (ton tebu per hari) sebagai pemasok kebutuhan gula nasional. Selanjutnya, sentra penghasil tebu lainnya di Indonesia adalah Propinsi Lampung, Jawa Tengah, Sumatera Selatan dan Jawa Barat yang mampu membangkitkan energi listrik limbah tebu sebesar 41,06; 12,67; 6,29 dan 4,88 MW, berturut-turut. Berbeda dengan pulau Sulawesi hanya dua propinsi sentral penghasil tebu, yaitu Sulawesi Selatan dan Gorontalo yang berpotensi menghasilkan energi listrik per tahun sebesar 265,06 TJ dan 253,45 TJ, ekuivalen dengan energi listrik 2,06 MW dan 1,97 MW. Propinsi-propinsi di pulau Kalimantan dan Papua sebagai sentra penghasil kelapa sawit secara umum tidak memproduksi tebu dan tidak terdapat pabrik gula aktif sehingga tanaman tebu tidak diusahakan secara maksimal.

C. Pemanfaatan dan Karakteristik Limbah Tebu

Ampas tebu dan sisa daun beserta pucuk daun yang disebut dengan residu atau sampah yang berasal dari budidaya tanaman tebu. Dibidang pertanian residu tebu dimanfaatkan sebagai pupuk organik dan mulsa organik. Selama budidaya tebu, sebagian petani dengan sengaja meninggalkan jerami dan sisa daun tebu dipermukaan tanah sebagai penambah unsur hara tanah. Sedangkan sisa limbah tebu yang tidak ditinggalkan di lahan atau dibakar dimanfaatkan oleh lebih 30% peternak sebagai pakan ternak ruminansia besar khususnya sisa daun dan pucuk daun tebu. Dibiidang industri, pemanfaatan limbah tebu dapat menghasilkan berbagai macam produk baik sebagai bahan baku utama atau bahan pendukung produksi dan sumber bioenergi. Gambar 4 menunjukkan produk samping/limbah beserta produk yang dihasilkan dari agro-industri tebu. Setiap tahun pemanfaatan tanaman tebu semakin meningkat berbanding lurus dengan konsumsi gula dan ekspansi perkebunan tebu. Sehingga secara tidak langsung produk samping atau limbah yang dihasilkan oleh agro-industri tebu jumlahnya cukup besar. Lebih lanjut teknologi pemanfaatan limbah tebu dalam bioproses dan bioenergi dipengaruhi oleh komponen penyusun limbah tebu.

Karakteristik residue tebu hasil analisis ultimate menunjukkan bahwa jerami dan ampas tebu tersusun dari karbon (C) dan oksigen (O), dengan jumlah sekitar 90% dari masa kering komponen. Berbeda dengan kadar sulfur untuk semua jenis limbah tebu memiliki nilai sama. Analisis kadar hidrogen (H) ampas dan jerami tebu juga memiliki nilai yang sama sebesar 5,8%. Selanjutnya, hasil analisis kadar nitrogen (N) semua residue tebu bernilai dibawah 1%, kecuali limbah pucuk daun memiliki kadar nitrogen tepat 1% (Tabel 2).

Tabel 2. Karakteristik ultimate analisis komponen tebu
(dalam % basis kering)

Komponen	C	H	N	O	S
Daun kering	46,2	6,2	0,5	43,0	0,1
Pucuk daun	45,7	6,2	1,0	42,8	0,1
Pangkal batang (<i>tops</i>)	43,9	6,1	0,8	44,0	0,1
Ampas tebu (<i>bagasse</i>)	44,6	5,8	0,6	44,5	0,1
Jerami tebu (<i>straw</i>)	41,6	5,8	0,45	52,1	0,18

Sumber: Cortez et al. (2020)

Analisis proximate limbah tebu secara umum terdapat perbedaan yang signifikan untuk nilai *volatile matter*, kadar karbon, abu, dan kadar air (Tabel 3). Perbedaan nilai antara komponen dan antara komponen yang sama sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah dan iklim (seperti kondisi cuaca, jenis tanah, pupuk, varietas tebu dan curah hujan), waktu panen, cara penanganan sampel pada saat pra-analisis sampai pada saat menganalisis. Nilai kalor limbah tebu dipengaruhi oleh kadar C dan H, rata-rata nilai kalor limbah tebu antara 15,90-18,73 MJ/kg (Zhang et al., 2012). Faktor lain yang mempengaruhi nilai kalor adalah kadar air, kadar abu, komposisi kimia dan varietas biomasa.

Kandungan mineral limbah tebu memiliki proporsi yang berbeda untuk setiap jenis limbah (Tabel 4). Kandungan kalium oksida (K₂O) pada sisa daun kering dan pucuk daun, kalsium oksida (CaO) dalam sisa daun dan besi oksida (Fe₂O₃) dan aluminium oksida (Al₂O₃) lebih tinggi dibandingkan ampas tebu. Pangkal batang tebu mengandung K₂O paling tinggi bila dibandingkan dengan limbah tebu lainnya mencapai 29,5 g/kg. Mineral lain,

seperti fosfor, magnesium, tembaga, seng, mangan, dan natrium, juga ditemukan dalam proporsi yang lebih rendah. Bahkan pada ampas tebu tidak ditemukan kandungan seng dan tembaga. Berbeda dengan kadar besi dan aluminium pada ampas tebu sebesar 2,3 g/kg paling tinggi bila dibandingkan dengan jenis limbah tebu lainnya.

Tabel 3. Karakteristik proximate analisis komponen tebu
(dalam % basis kering)

Komponen	FC ^a	VM ^b	Abu	H ₂ O	HHV ^c
Daun kering	11,6	84,5	3,9	13,5	17,4
Pucuk daun	15,7	80,6	3,7	67,7	17,4
Pangkal batang (<i>tops</i>)	16,4	79,3	4,3	83,2	16,4
Ampas tebu (<i>bagasse</i>)	18,0	79,9	2,2	50,2	18,1
Jerami tebu (<i>straw</i>)	6,9	81,6	11,7	9,9	17,7

Sumber: Cortez et al. (2020)

Keterangan:

^aFC = *fixed carbon* atau kadar karbon

^bVM = *volatile matter* atau bahan yang mudah menguap

^cNilai kalor (*high heating value/HHV*) dalam MJ/kg.

Tabel 4. Karakteristik analisis mineral komponen tebu (dalam g/kg)

Mineral	Daun kering	Pucuk daun	Pangkal batang (<i>tops</i>)	Ampas tebu (<i>bagasse</i>)
P ₂ O ₅	0,5	2,0	2,5	0,5
K ₂ O	2,7	13,3	29,5	1,7
CaO	4,7	3,9	2,6	0,7
MgO	2,1	2,2	2,5	0,5
Fe ₂ O ₃	0,9	0,5	0,2	2,3
Al ₂ O ₃	3,5	1,4	0,5	2,3
CuO	< 0,00006	< 0,00006	< 0,00006	-
ZnO	0,009	0,015	0,035	-
MnO ₂	0,169	0,120	0,155	0,062
Na ₂ O	0,123	0,128	0,119	0,045

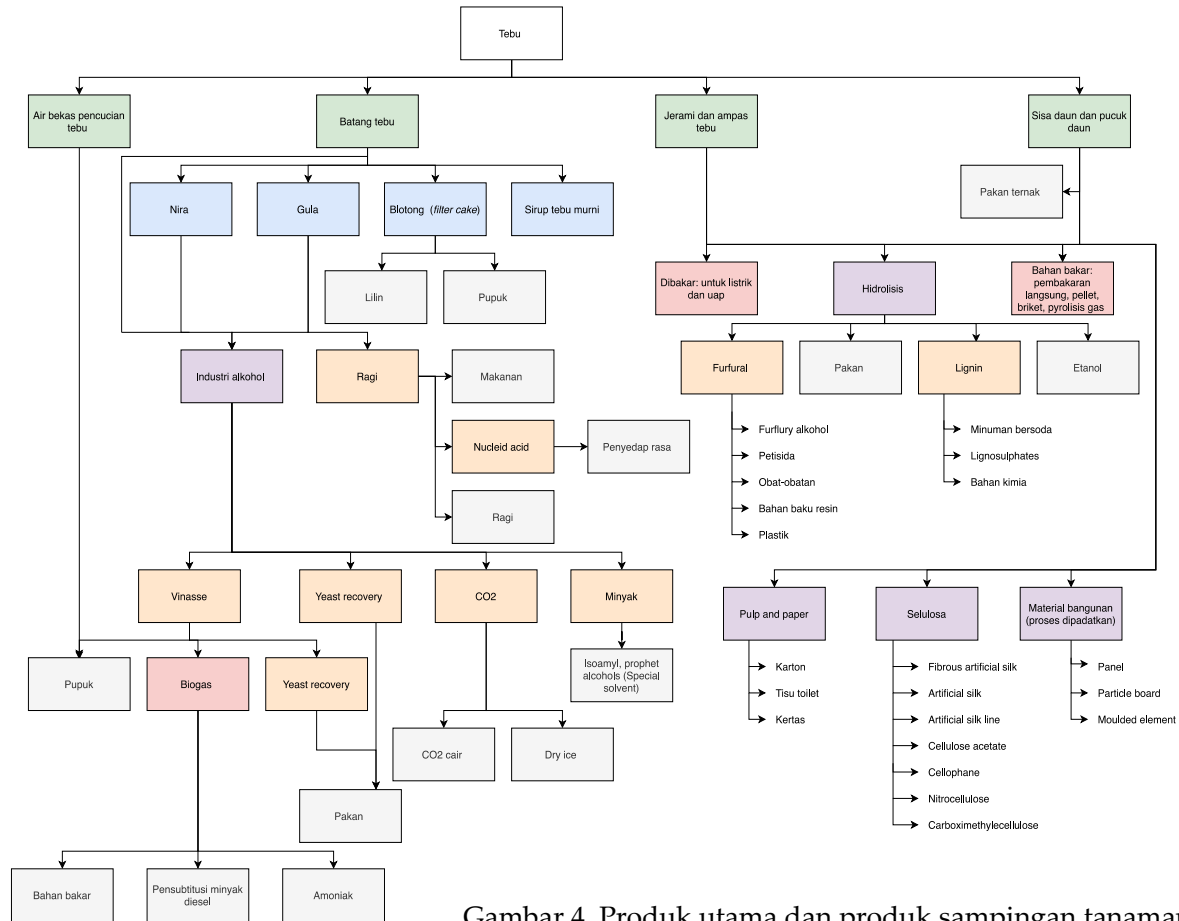
Sumber: Cortez et al. (2020)

Tabel 5. Karakteristik analisis kimia komponen tebu

Komponen	Daun kering	Pucuk daun	Limbah industri gula	Ampas tebu (<i>bagasse</i>)
Sellulose	44,5 ± 0,5	40,5 + 0,8	40,1 + 0,4	46,86 + 0,22
Hemisolulose	30,4 ± 0,3	30,8 + 0,8	30,7 + 0,2	27,50 + 0,14
Lignin	12,3 + 0,2	22,8 + 0,2	22,9 + 0,2	26,27 + 0,71
Extractives	3,7 + 0,1	2,5 + 0,1	3 + 0,3	-

Sumber: Cortez et al. (2020)

Karakteristik kimia residu tebu lebih berfokus pada kandungan lignoselulosa tebu (serat) yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa dan lignin) (Tabel 5). Ampas tebu sebagai salah satu limbah terbesar dari kegiatan ekstraksi tebu dengan kandungan rata-rata selulosa 35-45%, hemiselulosa 11-25% dan lignin 3-7%, bergantung pada iklim, varietas tebu dan umur panen (Karthiga Devi et al., 2020). Berbeda dengan komposisi selulose, hemiseloluse dan lignin pada sisa daun kering dan pucuk daun yang bernilai lebih rendah dari konsentrasi kimia yang terdapat pada ampas tebu.



Gambar 4. Produk utama dan produk sampingan tanaman tebu

D. Teknologi Konversi Limbah Tebu Sebagai Bioenergi

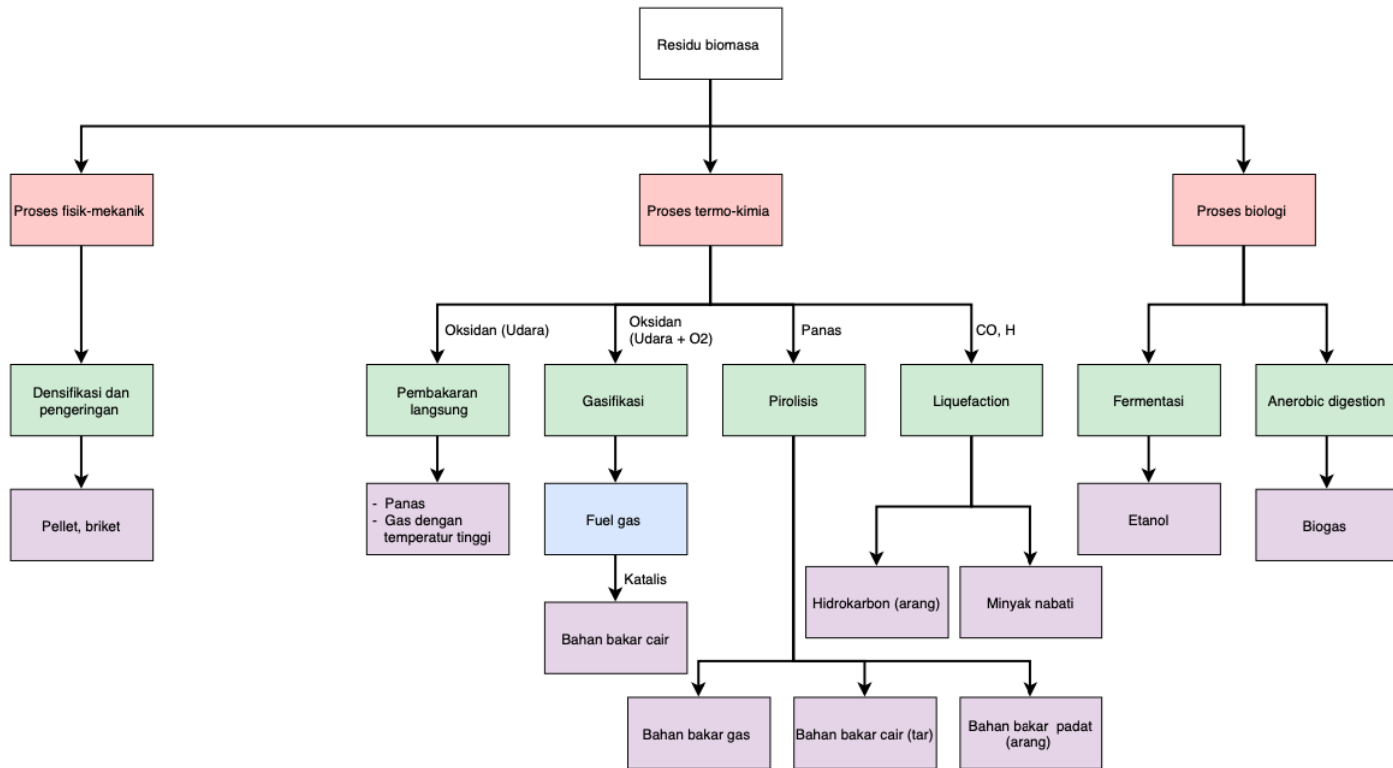
Pengembangan residu biomasa khususnya limbah tebu mempunyai peluang yang besar untuk menghasilkan bioenergi dalam bentuk produk pembangkit listrik atau panas, bahan bakar transportasi maupun substrat untuk bahan kimia. Teknologi konversi secara tidak langsung akan berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas produk energi yang akan dihasilkan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan teknologi konversi, antara lain: (1) jenis biomassa, (2) kuantitas biomassa, (3) bentuk energi yang diinginkan, (4) standar lingkungan, (5) kondisi perekonomian, dan (6) faktor spesifik proyek, (Bajpai, 2020). Selain itu, pemilihan teknologi konversi juga harus mampu memperhatikan beberapa hal pendukung seperti nilai efisiensi proses, keberlanjutan pasokan bahan baku dan kontribusi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK). Lebih detail pemilihan teknologi konversi bioenergi harus dianalisis secara komprehensif melalui penilaian daur hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan tujuan mengetahui besaran dampak lingkungan yang dihasilkan. Namun, dalam sub-bab ini hanya akan membahas secara detail teknologi konversi residu tebu melalui tiga proses, yaitu secara fisik-mekanik, termo-kimia, dan bio-kimia (Gambar 5).

Konversi fisik-mekanik terdiri dari densifikasi atau pemadatan dan pengeringan, dimana limbah tebu (jerami atau ampas tebu) dipadatkan dengan ukuran tertentu sebagai sumber bahan bakar padat atau sebagai langkah *pre-treatment* sebelum dilakukan proses konversi lainnya. Konversi secara bio-kimia mencakup dua proses utama yaitu *anaerobic digestion* untuk memproduksi biogas (metana dan karbon dioksida) dan fermentasi untuk memproduksi etanol untuk mensubstitusi bahan bakar disektor transportasi. Sedangkan konversi termo-kimia, secara umum terdapat empat proses antara lain pembakaran, pirolisis, gasifikasi, dan *liquefaction* atau pencairan. Masing-masing proses konversi menghasilkan produk yang berbeda-beda disesuaikan dengan kegunaannya.

Teknologi konversi secara fisik-mekanik banyak diaplikasikan untuk meningkatkan nilai kerapatan masa jenis (*bulk density*). Limbah tebu (jerami, blotong dan ampas tebu) memiliki nilai kerapatan masa jenis relatif rendah ($60\text{-}150\text{ kg/m}^3$), sehingga proses transportasinya menjadi lebih rumit dan memerlukan tempat yang

luas. Akibatnya efisiensi dan efektifitas transportasi dari segi biaya, waktu dan energi lebih kecil bila dibandingkan dengan biomasa yang mempunyai kerapatan masa jenis yang besar seperti jerami padi ($150\text{-}250\text{ kg/m}^3$), batang jagung ($127,32\text{ kg/m}^3$) atau batang kapuk ($150\text{-}450\text{ kg/m}^3$), (Zhang et al., 2012).

Rendahnya nilai kerapatan masa jenis akan mempengaruhi nilai energi yang diproduksi. Selain itu, dalam perencanaan rantai pasok biomasa, karakteristik fisik baik kerapatan masa jenis, kadar air dan porositas akan mempengaruhi biaya operasional. Salah satu teknologi yang digunakan untuk meningkatkan nilai kerapatan masa jenis biomassa melalui densifikasi atau pemadatan. Tumuluru et al., (2011) menjelaskan bahwa densifikasi menggunakan tekanan dan proses lain seperti *binder* atau bahan pengikat, temperatur, diameter cetakan dan kecepatan pemadatan untuk meningkatkan masa jenis biomasa. Densifikasi juga mampu menaikkan nilai kerapatan masa jenis sebesar 100-600%, tergantung pada teknologi densifikasi, kualitas *raw material* seperti kadar air, ukuran partikel, dan komposisi biomassa (protein, lemak, selulose, hemiselulose dan lignin), (Adapa et al., 2013; Mani et al., 2004, 2006). Selanjutnya, perubahan tekanan densifikasi juga mampu meningkatkan nilai kerapatan massa limbah ampas tebu dari $117,6\text{ kg/m}^3$ menjadi $1030\text{-}1260\text{ kg/m}^3$ (Erlich et al., 2006; Navalta et al., 2020). (Anukam et al., 2016), telah membandingkan teknologi densifikasi ampas tebu berdasarkan kondisi pengoperasiannya (Tabel 6). Selain itu, teknologi densifikasi menjadi langkah awal (*pretreatment*) untuk mengkonversi biomasa melalui termo-kimia, seperti pembakaran langsung (*direct combustion*), pirolisis, gasifikasi dan torefaksi (Kaliyan & Vance Morey, 2009).



Gambar 5. Teknologi konversi energi biomasa

Teknologi konversi secara termo-kimia dan bio-kimia untuk menghasilkan energi dari limbah tebu mempunyai kelemahan dan kelebihan tertentu. Misalnya, proses termo-kimia membutuhkan energi yang lebih besar untuk membangkitkan panas yang digunakan selama proses konversi. Berbeda dengan dengan proses bio-kimia lebih banyak melibatkan bakteri (ragi) untuk menguraikan bahan organik dalam biomasa menjadi gas dan etanol.

Tabel 6. Perbandingan teknologi densifikasi ampas tebu

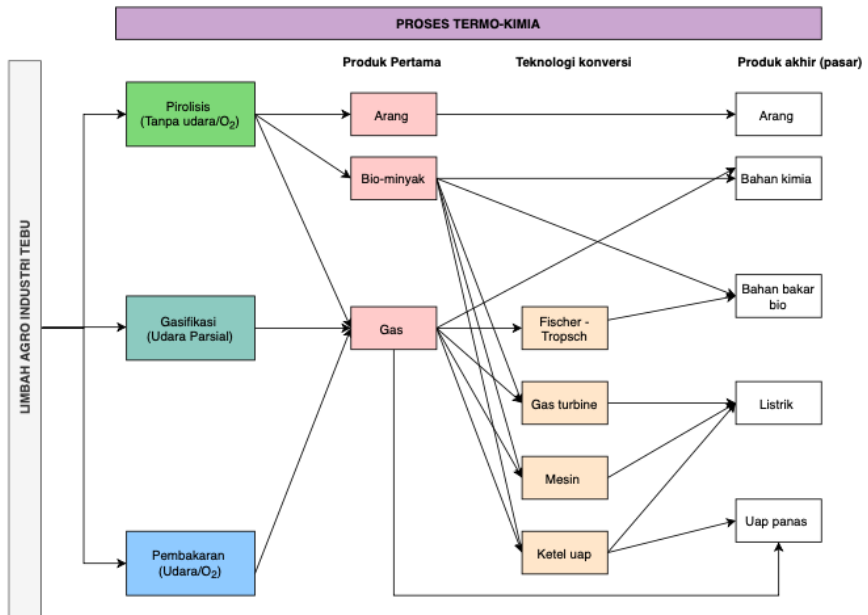
	Piston press	Screw press	Roller press	Pellet mill
Kadar air optimum bahan	10-15%	8-9%	10-15%	10-15%
Ukuran partikel bahan	Besar	Kecil	Besar	Kecil
Keluaran mesin	<i>In stroke</i>	<i>Continous</i>	<i>Continous</i>	<i>Continous</i>
Konsumsi energi spesifik (kWh/ton)	37,4-77	36,8-150	29,91-83,1	16,4-74,5
Kapasitas produksi (ton/jam)	2,5	0,5	5-10	5
Masa jenis briket/pellet (kg/m ³)	1000-1200	1000-1400	600-700	700-800
Perawatan	Rendah	Tinggi	Rendah	Rendah
Performansi pembakaran briket/pellet	Sedang	Sangat baik	Sedang	Sangat baik

Proses bio-kimia yang paling populer untuk mengkonversi limbah tebu menjadi energi adalah *anaerobic digestion* dan fermentasi. *Anerobic digestion* merupakan serangkaian proses metabolisme yang kompleks dan berurutan tanpa adanya oksigen

dan bergantung pada aktivitas sekelompok mikroorganisme (jamur, bakteri atau enzim) untuk menguraikan senyawa organik dalam biomasa (selulosa dan hemiselulosa), yang akan menghasilkan metana (CH_4) dan karbondioksida (CO_2), (Janke et al., 2015). Pada agro-industri gula, sisa produk vinasse dikonversi dengan proses ini untuk menghasilkan biogas yang digunakan mensuplai kebutuhan listrik. Lain halnya dengan limbah agro-industri tebu yang berupa jerami, ampas tebu dan vinasse melalui proses hidrolisis dan fermentasi untuk menghasilkan etanol dan bio-produk. Selama fermentasi limbah tebu menjadi etanol, kinerja proses ditentukan oleh aspek analitik dan operasional, seperti: (1) waktu fermentasi, (2) prosentasi penyabunan, (3) bau, (4) kadar gula, (5) temperatur fermentasi, (6) derajat keasaman (pH), (7) kalkulasi efisiensi proses dan (8) kapasitas produksi, (de Vasconcelos, 2015).

Proses termo-kimia dapat dievaluasi dari produk yang dihasilkan dari konversi limbah tebu seperti bahan kimia, biofuel, listrik, dan panas dengan membandingkan entalpi selama konversi dalam hal ini nilai kalor (*heating value*). Sebagai contoh, ampas tebu memiliki nilai kalor antara 17-20 MJ/kg, sedangkan nilai kalor jerami tebu antara 21-23 MJ/kg (Cortez et al., 2020; Rabelo et al., 2020). Konversi energi limbah tebu secara termo-kimia dapat dibedakan menjadi tiga proses, yaitu pirolisis, gasifikasi dan pembakaran, yang diilustrasikan dalam Gambar 6.

Rute proses termo-kimia yang paling umum adalah pembakaran secara langsung limbah tebu seperti ampas, jerami dan sisa daun untuk menghasilkan panas (penggerak ketel uap) dan pembangkit listrik. Produk yang dihasilkan adalah CO_2 dan uap air, serta bahan pencemar lain seperti NO_x , SO_x dan CO. Aplikasi proses pembakaran langsung limbah tebu di industri gula dengan memanfaatkan teknologi mesin *Stirling* dan siklus tenaga uap *Rankine*. Namun, nilai efisiensinya sangat rendah dan pemanfaatannya hanya sebagai penghasil panas untuk menggerakkan ketel uap pada proses pemasakan nira. Lain halnya dengan teknologi pirolisis dan gasifikasi yang memiliki nilai efisiensi lebih tinggi secara energi dan ekonomi.



Gambar 6. Rute konversi termo-kimia dari limbah agro-industri tebu

Pirolisis adalah dekomposisi termal bahan organik tanpa adanya keberadaan oksigen baik secara penuh atau sebagian, terjadi pada temperatur tinggi antara 300-800°C (Anderson et al., 2008). Berdasarkan temperatur pemanasan dan waktu proses, pirolisis dibedakan menjadi pirolisis lambat dan cepat, (Varma & Mondal, 2017). Menurut (Demirbas & Arin, 2002) pirolisis lambat dikenal dengan karbonisasi untuk menghasilkan arang dengan waktu proses yang lama dan temperatur (200-400°C) dan laju pemanasan yang lebih rendah (5-10°C/menit). Sedangkan pirolisis cepat digunakan untuk memproduksi char dan bio-oil dengan temperatur proses antara 450-650 °C, laju pemanasan antara 10-200 °C/detik dan waktu proses lebih pendek (0,5-10s, biasanya <2s). Pirolisis pada limbah tebu akan menghasilkan produk yang mudah menguap (terutama terdiri dari CH₄, H₂, CO, CO₂), dan juga residu non-volatil yang kaya karbon, arang dan bio-minyak yang dapat diaplikasikan untuk bahan bakar maupun bahan kimia. Kualitas produk hasil pirolisis bergantung pada jenis reaktor, katalis, dan karakter proses (temperatur, laju pemanasan dan waktu). Beberapa kajian pirolisis ampas tebu telah diringkas pada Tabel 7.

Gasifikasi merupakan konversi termal dari limbah tebu (mengandung karbon) menjadi syngas. Syngas (*synthetic gas*) adalah gas berenergi yang tersusun atas karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄). Pada proses gasifikasi, temperatur dan tekanan operasi yang digunakan antara 800-1800°C dan lebih dari 1 atm, (Haro et al., 2013). Komposisi dan kualitas syngas dipengaruhi oleh, komposisi bahan baku, jenis reaktor gasifikasi, agen gasifikasi, stoikiometri, temperatur, tekanan, dan ada atau tidaknya katalis. Selain itu, gas yang dihasilkan dalam proses gasifikasi dapat diubah menjadi bahan bakar cair sebagai hidrokarbon cair melalui konversi Fischer-Tropsch (temperatur dan tekanan antara 200-500°C dan 25-60 bar), (Hu et al., 2012). Proses gasifikasi adalah proses yang paling banyak digunakan di seluruh dunia untuk menghasilkan energi dari limbah tebu, ada lebih dari 250 fasilitas gasifikasi yang beroperasi, (Solarte-Toro et al., 2018).

Tabel 7. Pirolisis ampas tebu

Tipe pirolisis	Tipe reaktor	Temperatur (°C)	Laju pemanasan (°C/menit)	Sumber
Cepat	<i>Induction-heating</i>	400-800	100-500	(Tsai et al., 2006)
Lambat	<i>Fixed bed tubular</i>	400-550	25	(Parihar et al., 2007)
Lambat	<i>Fixed bed</i>	300-600	50	(Asadullah et al., 2007)
Lambat	<i>Fixed bed</i>	600 dan 800	10	(Bonelli et al., 2007)
Cepat	<i>Fluidized bed</i>	400-500	100	(Islam et al., 2010)
Lambat	<i>Batch</i>	400-600	-	(Vecino Mantilla et al., 2014)
Cepat	<i>Fluidized</i>	500 dan	-	(Montoy

	<i>bed</i>	550		a et al., 2015)
Lambat	<i>Fluidized bed turbular</i>	350-550	-	(Parthasarathy & Narayanan, 2015)
Cepat	<i>Semi batch</i>	350-650	10 dan 50	(Varma & Mondal, 2017)
Cepat	<i>Semi batch</i>	400-800	-	(Sohaib et al., 2017)
Cepat	<i>Twin-screw mixer</i>	500	-	(Schmitt et al., 2020)

E. Visi Masa Depan Limbah Tebu di Indonesia

Sumber energi terbarukan yang berasal dari limbah tebu mempunyai potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Dukungan pemerintah untuk meningkatkan swasembada gula sesuai dengan road map peningkatan produksi tebu menuju swasembada gula 2016-2045 akan berdampak pada peningkatan kuantitas bioenergi yang dapat dihasilkan dari limbah budidaya dan agroindustri tebu. Beberapa upaya yang telah dilakukan untuk mendukung peningkatan potensi limbah tebu, seperti dukungan regulasi dan kebijakan, pengembangan varietas unggul baru dan prediksi pangsa pasar bioenergi limbah tebu.

Dukungan regulasi dan kebijakan pemerintah mengharuskan peningkatan produksi gula telah dikeluarkan, sebagai contoh Instruksi Presiden RI No. 5 tahun 1997 tentang Program Pengembangan Tebu Rakyat dan Peraturan Menteri Pertanian RI No. 53/Permentan/KB.110/10/2015 tentang Pedoman Budidaya Tebu Giling yang Baik. Selain itu, kebijakan dan regulasi pemerintah yang tercantum dalam Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Peraturan Presiden No. 22 tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional, yang

menjelaskan target pengembangan bioenergi Indonesia 2025. Penggunaan biomasa dalam bauran energi nasional harus mencapai 8,4 juta ton sesuai untuk memenuhi target energi mix bioenergi 23% (setara dengan 23 MTOE).

Pengembangan varietas tebu baru untuk meningkatkan produktivitas terus dilakukan oleh pemerintah dengan tujuan utama mencapai swasembada gula dan pemenuhan efisiensi konversi energi. Tahun 2020, Balai Penelitian dan Pengembangan Pertanian telah mengembangkan empat varietas unggul baru (varietas AAS Agribun, ASA Agribun, AMS Agribun dan CMG Agribun) yang mempunyai toleransi cekaman abiotik (kekeringan dan lahan masam) dan produktivitas (lebih dari 5,7 ton/Ha) untuk dibudidayakan di lahan suboptimal. Sebelumnya, Badan Penelitian Tanaman Pemanis dan Serat telah memproduksi lebih dari 70 varietas dengan 20 varietas unggul nasional.

Peluang pengembangan bioenergi di Indonesia dari residu tebu melalui teknologi konversi secara termo-kimia dan bio-kimia terus ditingkatkan efisiensinya untuk mengurangi permasalahan lingkungan. Sebagai contoh, bioetanol limbah tebu untuk transportasi dianggap penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) di masa depan jika dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar fosil (gasolin). Dukungan pemerintah untuk pengembangan bioetanol tebu ditunjukkan dengan membangun pabrik bioetanol yang terintegrasi dengan pabrik gula. Tahun 2013 pemerintah meresmikan pabrik bioetanol milik PT Perkebunan Nusantara X (Persero) yang terintegrasi dengan pabrik gula Gempol Krep di Mojokerto, yang berkapasitas produksi 30 juta liter per tahun. Dua pabrik bioetanol yang terintegrasi dengan pabrik gula adalah PT. Pasa Djatiroto, Lumajang dan PT. Madu Baru, Yogyakarta dengan kapasitas produksi 7,5 juta dan 7 juta liter per tahun. Diprediksi peluang pasar bioetanol per tahun mencapai 6,68 milyar liter jika diasumsikan bioetanol digunakan sebagai campuran bahan bakar minyak (BBM) 20% dari total kebutuhan BBM nasional. Selanjutnya, pemerintah juga mengatur harga pasar bioetanol guna mendukung keberlanjutan produksi bioetanol. Keputusan Menteri ESDM No. 6034/K/12/MEM/2016 tentang Harga Indeks Pasar Bahan Bakar Nabati (Biofuel) yang Dicampur ke Dalam Jenis Bahan Bakar Nabati (HIP BBN) jenis bioetanol per 1 Juni 2020 sebesar Rp. 11.516

per liter. Lebih lanjut di masa depan limbah tebu dapat menghasilkan bio-oil dari pirolisis yang dapat mensubstitusi kebutuhan bahan bakar biojet untuk keperluan transportasi laut dan udara. Sehingga inovasi pengembangan teknologi konversi limbah tebu menjadi biofuel harus terus ditingkatkan melalui kerjasama percepatan dan pengembangan dengan *stakeholder*.

F. Referensi

Adapa, P. K., Tabil, L. G., & Schoenau, G. J. (2013). Factors affecting the quality of biomass pellet for biofuel and energy analysis of pelleting process. *International Journal of Agricultural And Biological Engineering*, 6(2), 1–12. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130602.001>

Anderson, C. J., Pas, S. J., Arora, G., Kentish, S. E., Hill, A. J., Sandler, S. I., & Stevens, G. W. (2008). Effect of pyrolysis temperature and operating temperature on the performance of nanoporous carbon membranes. *Journal of Membrane Science*, 322(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.04.064>

Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Meyer, E., & Okoh, O. (2016). Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 775–801. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>

Asadullah, M., Rahman, M. A., Ali, M. M., Rahman, M. S., Motin, M. A., Sultan, M. B., & Alam, M. R. (2007). Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, 86(16), 2514–2520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.007>

Avcıoğlu, A. O., Dayıoğlu, M. A., & Türker, U. (2019). Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610–619. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053>

Bajpai, P. (2020). Biomass conversion processes. In *Biomass to Energy Conversion Technologies* (pp. 41–151). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818400-4.00005-0>

Bonelli, P. R., Buonomo, E. L., & Cukierman, A. L. (2007). Pyrolysis of Sugarcane Bagasse and Co-pyrolysis with an Argentinean Subbituminous Coal. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(8), 731–740. <https://doi.org/10.1080/00908310500281247>

Cardona, C. A., Quintero, J. A., & Paz, I. C. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 101(13), 4754–4766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.097>

Carvalho, D. J., Veiga, J. P. S., & Bizzo, W. A. (2017). Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. *Energy*, 119, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.067>

Cortez, L. A. B., Baldassin, R., & de Almeida, E. (2020). Energy from sugarcane. In *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives* (pp. 117–139). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00007-X>

de Vasconcelos, J. N. (2015). Ethanol Fermentation. In *Sugarcane* (pp. 311–340). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00015-3>

Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An Overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources*, 24(5), 471–482. <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>

Erlich, C., Bjornbom, E., Bolado, D., Giner, M., & Fransson, T. (2006). Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood. *Fuel*, 85(10–11), 1535–1540. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.12.005>

Haro, P., Ollero, P., Villanueva Perales, Á. L., & Vidal-Barrero, F. (2013). Potential routes for thermochemical biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(5), 551–572. <https://doi.org/10.1002/bbb.1409>

Hiloidhari, M., Das, D., & Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.025>

Hirschmann, R. (2020, May 27). *Production of sugar cane in Indonesia from 2012 to 2018* [Global Data Platform]. <https://www.statista.com/statistics/706999/production-of-sugar-cane-in-indonesia/>

Hofsetz, K., & Silva, M. A. (2012). Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. *Biomass and Bioenergy*, 46, 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.038>

Hu, J., Yu, F., & Lu, Y. (2012). Application of Fischer–Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion. *Catalysts*, 2(2), 303–326. <https://doi.org/10.3390/catal2020303>

Islam, M. R., Haniu, H., Islam, M. N., & Uddin, Md. S. (2010). Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse into Bio-Crude Oils by Fluidized-Bed Pyrolysis Technology. *Journal of Thermal Science and Technology*, 5(1), 11–23. <https://doi.org/10.1299/jtst.5.11>

Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas Production from Sugarcane Waste: Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 20685–20703. <https://doi.org/10.3390/ijms160920685>

Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

Karthiga Devi, G., Vignesh, K., & Chozhavendhan, S. (2020). Effective utilization of sugarcane trash for energy production. In *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts* (pp. 259–273). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00012-0>

Lopes Silva, D. A., Delai, I., Delgado Montes, M. L., & Roberto Ometto, A. (2014). Life cycle assessment of the sugarcane bagasse

electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 532–547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>

Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2004). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>

Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>

Mbohwa, C., & Fukuda, S. (2003). Electricity from bagasse in Zimbabwe. *Biomass and Bioenergy*, 25(2), 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00011-4)

Montoya, J. I., Valdés, C., Chejne, F., Gómez, C. A., Blanco, A., Marrugo, G., Osorio, J., Castillo, E., Aristóbulo, J., & Acero, J. (2015). Bio-oil production from Colombian bagasse by fast pyrolysis in a fluidized bed: An experimental study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.007>

Moraes, B. S., Junqueira, T. L., Pavanello, L. G., Cavalett, O., Mantelatto, P. E., Bonomi, A., & Zaiat, M. (2014). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*, 113, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018>

Mulyana, R. (2016). *Pedoman Investasi Bioenergi di Indonesia*. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konversi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI. <https://drive.esdm.go.id/wl/?id=6JLd3yXfSsPqRp2xExLrQe3TUzdIahpS>

Navalta, C. J. L. G., Banaag, K. G. C., Raboy, V. A. O., Go, A. W., Cabatingan, L. K., & Ju, Y.-H. (2020). Solid fuel from Co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran. *Renewable Energy*, 147, 1941–1958. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.129>

Parihar, M. F., Kamil, M., Goyal, H. B., Gupta, A. K., & Bhatnagar, A. K. (2007). An Experimental Study on Pyrolysis of Biomass. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(5), 458–465. <https://doi.org/10.1205/psep07035>

Parthasarathy, P., & Narayanan, S. (2015). Effect of combined slow pyrolysis and steam gasification of sugarcane bagasse on hydrogen generation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(11), 2236–2246. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0038-6>

Pierossi, M. A., & Bertolani, F. C. (2018). Sugarcane Trash as Feedstock for Biorefineries. In *Advances in Sugarcane Biorefinery* (pp. 17–39). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804534-3.00002-1>

Rabelo, S. C., Paiva, L. B. B. de, Pin, T. C., Pinto, L. F. R., Tovar, L. P., & Nakasu, P. Y. S. (2020). Chemical and energy potential of sugarcane. In *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives* (pp. 141–163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00008-1>

Respati, E. (2019). *Buku Outlook Komoditas Perkebunan Tebu* (No. 1907–1507; p. 73). Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, Kementerian Pertanian.

Schmitt, C. C., Moreira, R., Neves, R. C., Richter, D., Funke, A., Raffelt, K., Grunwaldt, J.-D., & Dahmen, N. (2020). From agriculture residue to upgraded product: The thermochemical conversion of sugarcane bagasse for fuel and chemical products. *Fuel Processing Technology*, 197, 106199. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106199>

Singh, J., Panesar, B., & Sharma, S. (2007). Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—A case study of Punjab. *Biomass and Bioenergy*, S0961953407001754. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.003>

Sohaib, Q., Muhammad, A., & Younas, M. (2017). Fast pyrolysis of sugarcane bagasse: Effect of pyrolysis conditions on final product distribution and properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(2), 184–190. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1212292>

Solarte-Toro, J. C., Chacón-Pérez, Y., & Cardona-Alzate, C. A. (2018). Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material. *Electronic Journal of Biotechnology*, 33, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.03.005>

Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. M. (2006). Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 76(1–2), 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.11.007>

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>

Varma, A. K., & Mondal, P. (2017). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*, 95, 704–717. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>

Vecino Mantilla, S., Gauthier-Maradei, P., Álvarez Gil, P., & Tarazona Cárdenas, S. (2014). Comparative study of bio-oil production from sugarcane bagasse and palm empty fruit bunch: Yield optimization and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.04.003>

Zhang, Y., Ghaly, A. E., & Li, B. (2012). Availability and Physical Properties of Residues from Major Agricultural Crops for Energy Conversion Through Thermochemical Processes. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 7(3), 312–321. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2012.312.321>



Dr. Erry Ika Rhofita, S.TP, M.P, menyelesaikan program Sarjana Teknologi Pertanian di Teknik Pertanian, Universitas Brawijaya, pada tahun 2009, mendapatkan gelar Magister Pertanian dari Keteknikan, Universitas Brawijaya, pada tahun 2011, dan menyelesaikan program doktor dari Génie des Procédés et de l'Environnement, Institut National Polytechnique de Toulouse Perancis, pada tahun 2023. Mengajar di Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya mulai tahun 2014. Minat pada bidang penelitian pengembangan bioenergi.