

Jalur produksi bahan bakar nabati (*biofuel*) potensial di Indonesia: Gambaran umum tentang proses, bahan baku, dan jenis bahan bakar

Disusun oleh: Tenny Kristiana dan Chelsea Baldino

Pada tahun 2004, pemerintah Indonesia mengembangkan strategi terkait bahan bakar nabati (*biofuel*) sesuai dengan Kebijakan Energi Nasional (KEN), yang dikeluarkan sebagai bagian dari Peraturan Presiden No. 5/2006, untuk mempromosikan produksi biodiesel dan bioetanol.¹ Sejak saat itu, pemerintah juga mengeluarkan beberapa peraturan lain untuk mendukung kebijakan tersebut. Di antaranya adalah keputusan presiden yang membantu pembentukan tim nasional pengembangan *biofuel*, yang mengeluarkan *Blueprint* Pengembangan *Biofuel* pada tahun 2008.² Baru-baru ini, program tersebut diperluas sehingga mencakup lebih banyak proyek gasifikasi dan bahan bakar cair yang lebih canggih.³ Pemerintah Indonesia juga mulai mendorong penggunaan biogas dan biomassa untuk sektor ketenagalistrikan.⁴

Agar kebijakan *biofuel* dapat mendukung komitmen Indonesia untuk mencapai pertumbuhan rendah karbon,⁵ maka sangatlah penting untuk memilih bahan baku

1 Anastasia Kharina, Chris Malins, and Stephanie Searle, *Biofuels policy in Indonesia: Overview and status report*. (ICCT: Washington, DC, 2016), <https://theicct.org/publications/biofuels-policy-indonesia-overview-and-status-report>

2 Ibid.

3 "Tingkatkan Penggunaan Energi Bersih, Pemerintah Dorong Pengembangan Green Diesel," EBTKE-ESDM, diakses pada 26 November, 2020, <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/07/21/2589/tingkatkan.penggunaan.energi.bersih.pemerintah.dorong.pengembangan.green.diesel?lang=en>; "Kurangi Impor LPG, Gasifikasi Batubara jadi Kebijakan Strategis", ESDM, diakses pada 26 November, 2020, <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kurangi-impor-lpg-gasifikasi-batubara-jadi-kebijakan-strategis>

4 "Analisis Biaya dan Manfaat Pembiayaan Investasi Limbah Menjadi Energi Melalui Kredit Program (Laporan Akhir)". (PKPPIM BKF Kementerian Keuangan RI dan UK LCF Programme, 2014), <https://www.kemenkeu.go.id/sites/default/files/financing%20wte.pdf>

5 Pemerintah Indonesia menegaskan kembali komitmennya dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional pada konferensi Low Carbon Development and Green Economy pada 11 Oktober 2018 di Bali: <http://greengrowth.bappenas.go.id/en/goi-committed-to-low-carbon-development-and-green-economy/>

Ucapan Terima Kasih: Studi ini didukung oleh David and Lucile Packard Foundation. Terima kasih kepada Tommy Pratama, Martin Baker, dan Fariz Panghegar dari Traction Energy Asia, dan Stephanie Searle, untuk ulasan yang bermanfaat.

www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Indonesia memiliki sumber biomassa yang melimpah, namun beberapa diantaranya memiliki karbon yang intensif. Selain itu, banyak *biofuel* generasi pertama yang menggunakan bahan baku tanaman pangan dan pakan ternak, yang dapat dikaitkan dengan emisi yang ditimbulkan oleh perubahan penggunaan lahan. Sementara itu, *biofuel* generasi kedua memiliki intensitas karbon yang lebih rendah karena menggunakan bahan baku yang bervariasi, seperti tanaman non-pangan, limbah, dan residu.

Dalam studi ini, kami memberikan gambaran umum tentang beberapa opsi jalur produksi *biofuel* yang paling menarik bagi pembuat kebijakan di Indonesia. Kami membahas proses teknologi yang digunakan dalam memproduksi bahan bakar, jenis bahan baku yang dapat digunakan, dan jenis bahan bakar yang diproduksi.

Jalur produksi bahan bakar nabati (*biofuel*) potensial di Indonesia mencakup beberapa jenis teknologi, bahan baku, output bahan bakar dan tingkat pencampuran sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1.⁶ Perlu dicatat bahwa Indonesia memiliki bahan baku biofuel yang melimpah sehingga semua jalur tersebut dapat dikembangkan tanpa hambatan.

Tabel 1: Rangkuman jalur produksi biofuel potensial di Indonesia

Jalur produksi	Bahan baku	Jenis bahan bakar	Generasi pertama atau kedua	Hambatan Pencampuran
Biodiesel/Fatty Acid Methyl Ester (FAME)	Kelapa sawit, minyak jelantah (<i>used cooking oil/UCO</i>), kelapa, kedelai, jarak pagar, lemak hewani	Biodiesel	pertama	5% - 10% di sebagian besar negara, tetapi campuran di Indonesia saat ini lebih tinggi
Hydroprocessing	Kelapa sawit, minyak jelantah (<i>used cooking oil/UCO</i>), kelapa, kedelai, jarak pagar, lemak hewani	Bahan bakar yang dapat langsung digunakan (<i>drop-in fuels</i>), seperti <i>Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)</i> atau solar terbarukan (<i>renewable diesel</i>), dan <i>Hydroprocessed Esters dan Fatty Acids (HEFA)</i>	pertama	tidak ada
Bioetanol Konvensional	Tebu, molase, <i>sweet sorghum</i> , singkong, jagung	Etanol	pertama	5% - 15%
Cellulosic Ethanol	Residu kelapa sawit, jerami padi, batang jagung, ampas tebu, batang singkong, porsi biologis dari limbah padat kota, kayu bongkaran	Etanol	kedua	5% - 15%
Gasifikasi - Fischer-Tropsch synthesis	Gas alam, batu bara, <i>petroleum coke</i> , dan jenis biomassa yang sama sebagaimana digunakan untuk <i>cellulosic ethanol</i>	Bahan bakar yang dapat langsung digunakan (<i>Drop-in fuels</i>), seperti solar terbarukan (<i>renewable diesel</i>), bahan bakar jet (<i>jet fuel</i>), bensin	kedua	tidak ada
Anaerobic Digestion	<i>Palm oil mill effluent (POME)</i> , limbah yang dapat didegradasi, kotoran ternak, lumpur limbah, residu pertanian, sampah makanan	Biogas (yang dapat dibakar menjadi listrik atau dibersihkan dan dikompresi menjadi metana)	pertama	tidak ada

BIODIESEL (FATTY ACID METHYL ESTER)

Fatty Acid Methyl Ester (FAME) biasa disebut dengan biodiesel dan merupakan jenis biofuel generasi pertama. FAME diproduksi melalui transesterifikasi, proses konversi yang relatif sederhana yang dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan

⁶ Untuk informasi lebih lanjut tentang jalur *hydroprocessing*, *cellulosic ethanol* dan gasifikasi, lihat Chelsea Baldino dkk., *Advanced alternative fuel pathways: Technology overview and status*. (ICCT: Washington, DC, 2019), <https://theicct.org/publications/advanced-alternative-fuel-pathways>

sederhana. Dengan demikian, biodiesel dapat diproduksi dalam skala kecil di fasilitas berukuran kecil dan dengan biaya modal yang relatif rendah.⁷

BAHAN BAKU

Di Indonesia, biodiesel sebagian besar diproduksi dari minyak kelapa sawit, namun pada dasarnya biodiesel dapat diproduksi dari beberapa jenis bahan baku, termasuk:⁸

- » Tanaman pangan yang mengandung minyak nabati: kelapa sawit, kelapa, dan kedelai.
- » Limbah dan residu: lemak hewani (misalnya, lemak daging sapi, lemak babi, lemak unggas dan minyak ikan), minyak goreng bekas/jelantah, dan residu dari penyulingan minyak kelapa sawit (misalnya, *palm fatty acid distillate*, dan *palm oil sludge*).⁹ *Palm oil sludge* adalah sisa minyak yang terapung yang dapat dipisahkan dari limbah cair pabrik kelapa sawit.¹⁰
- » Tanaman tidak dapat dimakan yang mengandung minyak: jarak pagar, nyamplung (*Calophyllum inophyllum*), moringa oleifera, dan kemiri sunan.

PROSES PRODUKSI

Minyak nabati seperti kelapa sawit memiliki viskositas yang tinggi dan tidak dapat digunakan langsung pada kendaraan tanpa memodifikasi mesin dan sistem bahan bakarnya.¹¹ Oleh karena itu, minyak nabati biasanya diubah menjadi FAME agar dapat digunakan pada kendaraan diesel, karena FAME memiliki viskositas yang lebih dekat dengan bahan bakar solar dari fosil.¹²

Semua bahan baku memerlukan proses pengolahan awal (*pretreatment*) untuk menghilangkan *gums* dan kontaminan lainnya sebelum menjalani proses transesterifikasi (Gambar 1). Bahan baku dari limbah minyak secara khusus memiliki beberapa kontaminan, seperti asam lemak bebas (FFA) yang dapat menurunkan kualitas dan hasil produksi biodiesel.¹³ Ada beberapa metode proses pengolahan awal:¹⁴

1. Mencampurkan minyak rendah FFA dengan minyak berkualitas rendah sedemikian rupa sehingga masih dapat memproduksi biodiesel dengan kualitas cukup baik. Metode pengolahan awal ini telah dipraktikkan secara luas.
2. Melakukan *acid esterification* dengan katalis padat, sehingga menghasilkan biodiesel dan gliserol yang lebih bersih tanpa air atau garam.
3. Menggunakan proses *degumming* yang sama yang digunakan dalam penyulingan minyak kelapa sawit mentah untuk menghilangkan kotoran seperti air, FFA, dan *phospholipids* (*gums*). *Phospholipids* dapat memblokir katalis

7 Josh Tickell, *Biodiesel America: How to Achieve Energy Security, Free America from Middle-East Oil Dependence, and Make Money Growing Fuel*, (Yorkshire Press, 2006) and John Duncan, "Cost of Biodiesel Production," prepared for Energy Efficiency and Conservation Authority, (2003), http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0305_Duncan_-_Cost-of-biodiesel-production.pdf

8 Debabrata Das and Jhansi Varanasi, *Fundamentals of Biofuels Production Processes*, (Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2019).

9 Ab Gapor Md Top, "Production and Utilization of Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)," *Lipid Technology* 22, no. 1 (2010): 11-13. <https://doi.org/10.1002/lite.200900070>

10 Nur Sulihatimarsyila et al., "Value-Added Products From Palm Sludge Oil," *Journal of Applied Sciences* 12, no. 11 (2012): 1199-1202. <https://doi.org/10.3923/jas.2012.1199.1202>. Lihat bagian *Anaerobic Digestion* untuk informasi lebih lanjut.

11 Ayhan Demirbas. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. (London: Springer, 2008).

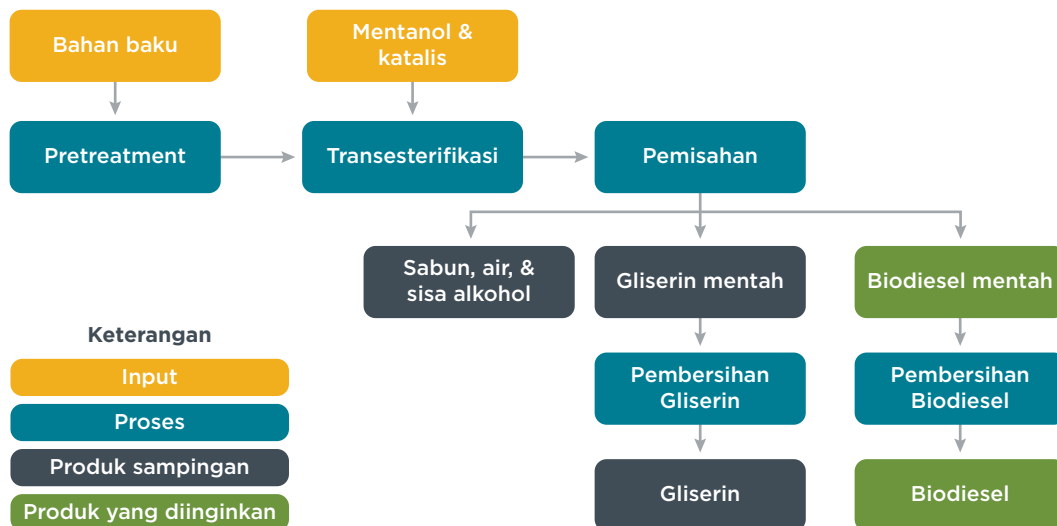
12 Ibid.

13 Andre Ribeiro, Fernando Castro, and José Carvalho, "Influence of Free Fatty Acid Content in Biodiesel Production on Non-Edible oils," Waste: Solutions, Treatments and Opportunities International Conference, September 2011, <https://core.ac.uk/download/pdf/55615141.pdf>

14 Ahmed Tafesh and Sohbi Basheer, "Pretreatment Methods in Biodiesel Production Processes," in *Pretreatment Techniques for Biofuels and Biorefineries*, ed. Zhen Fang, (Berlin: Springer, 2013), 417-434.

selama proses produksi FAME dan mengganggu proses pemisahan biodiesel dan gliserol.¹⁵

Setelah proses pengolahan awal, bahan baku melalui proses transesterifikasi, dimana minyak bereaksi dengan metanol dan katalis untuk menghasilkan biodiesel (FAME) dan produk sampingan gliserin mentah, air limbah, sisa alkohol, dan residu padat, seperti sabun.¹⁶ Produsen biodiesel menggunakan katalis untuk mempercepat proses produksi dan dengan alasan transesterifikasi non-katalis membutuhkan suhu dan tekanan yang lebih tinggi, yang menjadikannya lebih mahal.¹⁷ Biodiesel mentah yang dihasilkan kemudian dicuci dengan air asam hangat untuk menghilangkan sisa metanol dan garam, dan kemudian dikeringkan.¹⁸



Gambar 1: Gambaran sederhana transesterifikasi.

Catatan: Diadaptasi dari Jorge Mario Marchetti, "A Comparison Between Raw Material and Technologies for a Sustainable Biodiesel Production Industry," in *Economic Effects of Biofuel Production*, ed. Marco Aurelio dos Santos Bernandes (Croatia: InTechOpen, 2011); dan Demirbas, *Biodiesel*.

SIFAT DAN PENCAMPURAN BAHAN BAKAR

Biodiesel tidak sepenuhnya kompatibel dengan kendaraan diesel konvensional dan biasanya dicampurkan ke dalam bahan bakar solar dari fosil dengan persentase yang rendah.¹⁹ Worldwide Fuel Charter hanya menyarankan pencampuran biodiesel hingga 5% dalam solar dari fosil, karena volume yang lebih tinggi dapat mengurangi penghematan bahan bakar, merusak beberapa komponen dan material kendaraan, dan meningkatkan emisi polutan gas buang.²⁰ Walaupun tingkat campuran biodiesel bervariasi di berbagai wilayah, sebagian besar negara dengan program biofuel mencampurkan biodiesel dengan angka maksimum antara 5% dan 10%.²¹ Saat ini,

15 Sangeeta Kanakraj and Savita Dixit, "A Comprehensive Review on Degummed Biodiesel," *Biofuels* 7, no. 5 (2016): 1-12. <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1168021>

16 Demirbas, *Biodiesel*.

17 Sadia Nasreen et al., "Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production," in *Biofuels State of Development*, ed. Krzysztof Biernat (London: IntechOpen, 2018), <https://www.intechopen.com/books/biofuels-state-of-development>

18 Demirbas, *Biodiesel*.

19 Ibid. Perlu dicatat bahwa biodiesel mengandung oksigen dalam jumlah yang banyak yang membuat bahan bakar lebih korosif dibandingkan solar. Selain itu, biodiesel juga menarik air, yang meningkatkan korosi dan merusak bagian-bagian kendaraan.

20 Untuk penjelasan lebih lanjut tentang emisi polutan, lihat Jane O'Malley, Stephanie Searle, and Tenny Kristiana, *Air quality impacts of palm biodiesel in Indonesia*, (ICCT: Washington, DC, 2021), <https://theicct.org/publications/AQ-impacts-biodiesel-indonesia-jan2021>

21 Tim Dallmann, "To B10 or not to B10: Reference Fuel Debates Should Not Delay Adoption of World-Class Heavy-Duty Vehicle Emission Standards in Brazil" International Council on Clean Transportation, August 1, 2018, <https://theicct.org/blog/staff/brazil-p8-reference-fuel-q8-20180801>

Indonesia merupakan satu-satunya negara yang memiliki mandat pencampuran biodiesel yang lebih tinggi, yaitu 30% (B30).

STATUS TEKNOLOGI

Tanaman perkebunan penghasil minyak yang tidak dapat dikonsumsi yang termasuk dalam bahan baku tersebut di atas telah digunakan pada skala demonstrasi untuk memproduksi biodiesel di beberapa negara, termasuk di India.²² Selain itu, terdapat peluang yang secara potensial signifikan untuk memproduksi biodiesel berbasis limbah di Indonesia.²³ Pemanfaatan minyak limbah (*waste oil*) sebagai bahan baku alternatif minyak sawit memberikan manfaat, antara lain karena harga minyak limbah lebih murah dibandingkan dengan harga minyak nabati yang dapat dikonsumsi.

HYDROPROCESSING

Hydroprocessing adalah istilah umum untuk beberapa proses yang mengubah minyak dan lemak menjadi bahan bakar yang dapat langsung digunakan ("*drop-in*" *fuel*) yang dapat dicampur dengan kadar yang jauh lebih tinggi dibandingkan FAME untuk digunakan pada kendaraan diesel konvensional. Walaupun *Hydroprocessing* telah lama digunakan untuk meningkatkan kualitas dan hasil dari produk minyak bumi dalam proses penyulingan minyak mentah, penggunaannya dalam produksi biofuel merupakan perkembangan yang relatif baru. Di sektor transportasi darat, *hydrotreated vegetable oil* (HVO), jenis biofuel yang paling umum yang dihasilkan dari *hydroprocessing*, dikenal pula sebagai solar terbarukan (*renewable diesel*) atau *green diesel*. HVO merupakan bahan bakar yang dapat langsung digunakan ("*drop-in*" *fuel*) karena secara kimiawi hampir identik dengan bahan bakar fosil, sehingga berpotensi untuk dapat digunakan dalam pencampuran dengan kadar yang tinggi - dan bahkan sampai dengan 100%, sebagai HVO murni - pada kendaraan diesel.²⁴

Hydroprocessing membutuhkan fasilitas berskala besar dan karena itu memerlukan investasi modal yang lebih besar. Akan tetapi, bahan baku biologi dapat juga diproses secara bersamaan (*co-processing*) dengan minyak bumi untuk mengurangi beban biaya modal.

BAHAN BAKU

Walaupun minyak nabati (*virgin vegetable oil*) sering digunakan sebagai bahan baku untuk *hydroprocessing*, HVO juga diproduksi dari minyak limbah (*waste oil*) dan lemak, seperti minyak jelantah dan lemak abdomen sapi (*tallow*). Produksi HVO dan produksi FAME menggunakan bahan baku yang sama, tetapi proses teknologi keduanya sangat berbeda.

PROSES

Proses pengolahan awal (*pretreatment*) bahan baku untuk HVO mirip dengan FAME, termasuk *degumming* dan bersifat opsional, bergantung pada jenis bahan baku yang digunakan. Sebagai contoh, produsen biasanya menggunakan minyak yang sudah disuling, diputihkan, dan dihilangkan baunya, sehingga dalam hal ini, tidak perlu melalui proses pengolahan awal.²⁵

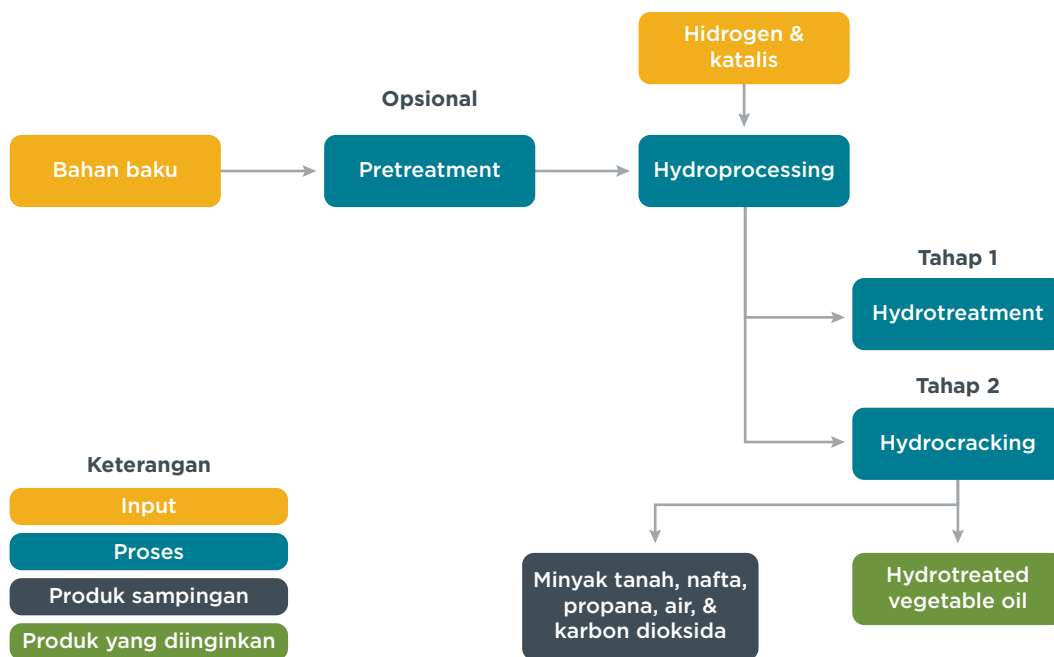
22 Simon Gmunder et al., "Environmental Impacts of *Jatropha curcas* Biodiesel in India," *BioMed Research International*, (2012): 1-10. <https://doi.org/10.1155/2012/623070>.

23 Yuanrong Zhou, Stephanie Searle and Tenny Kristiana, *Opportunities for waste fats and oils as feedstocks for biodiesel and renewable diesel in Indonesia*, (ICCT: Washington DC, 2021), <https://theicct.org/publications/waste-fats-and-oils-biodiesel-indonesia-en-mar2021>

24 ETIP Bioenergy, "Hydrogenated vegetable oil (HVO)," (2020), https://etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_HVO_feb2020.pdf

25 Tim O'Mara, "Renewable Diesel Feedstocks: Pretreatment and Purification," Burns & McDonnell, March 5, 2020, <https://blog.burnsmcd.com/renewable-diesel-feedstocks-pretreatment-and-purification>

Hydrotreatment merupakan tahap pertama dari proses *hydroprocessing* (Gambar 2). Pada suhu reaksi antara 300°C dan 390°C, hidrogen ditambahkan ke bahan baku untuk memecah molekul lemak berantai ganda (trigliserida) menjadi asam lemak berantai tunggal yang sebagian besar terdiri atas karbon, hidrogen, dan oksigen.²⁶ Kemudian, asam lemak mengalami hidrodeoksigenasi, dekarboksilasi, atau kombinasi keduanya, untuk menghilangkan oksigen dari molekul, proses ini menghasilkan hidrokarbon murni yang terdiri atas hidrogen dan karbon.²⁷ Bahan bakar yang dihasilkan lebih stabil dan memiliki densitas energi yang lebih tinggi daripada FAME yang masih mengandung fraksi oksigen yang tinggi.²⁸



Gambar 2: Gambaran sederhana *hydroprocessing*.

Catatan: Diadaptasi dari Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*; and Adam Brown et al., *Advanced biofuels – Potential for cost reduction*, (IEA Bioenergy, 2020), <https://www.ieabioenergy.com/publications/new-publication-advanced-biofuels-potential-for-cost-reduction/>

Jenis hidrokarbon tersebut masih relatif panjang, sehingga dapat menghasilkan lilin padat atau bahan bakar yang sangat pekat dan kental. Sebagai contoh, Gambar 3 menunjukkan struktur molekul lilin parafin. Tahap kedua *hydroprocessing*, yaitu *hydrocracking*, memecah rantai karbon yang panjang tersebut menjadi rantai karbon pendek yang memiliki nilai lebih tinggi. Berbeda dengan *hydrotreatment* yang berlangsung pada suhu dan tekanan ringan, *hydrocracking* menambahkan hidrogen ke dalam campuran bahan bakar mentah pada suhu dan tekanan yang tinggi dengan adanya katalis (misalnya, *nickel/molybdenum*, *cobalt/molybdenum* atau *nickel/tungsten*).²⁹ Proses ini menghasilkan campuran hidrokarbon, yang kemudian dimasukkan ke dalam kolom fraksionator untuk memisahkan bahan bakar yang jenisnya berbeda, seperti solar, bensin, dan minyak tanah, selain itu proses ini menghasilkan

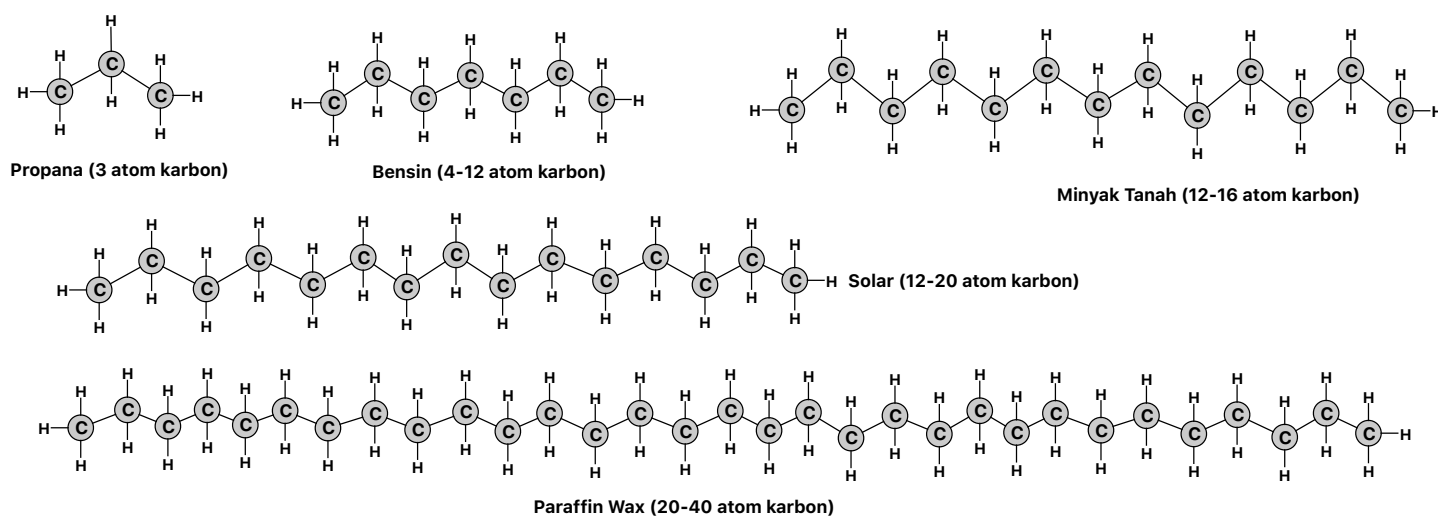
26 ETIP Bioenergy, "Hydrotreatment to HVO," (2019), <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/hydrotreatment-to-hvo>

27 Ibid., and Elvan Sari, "Green Diesel Production via Catalytic Hydrogenation/Decarboxylation of Triglycerides and Fatty Acids of Vegetable Oil and Brown Grease" (PhD diss., Wayne State University, 2013). Diambil dari <https://core.ac.uk/download/pdf/56683753.pdf>

28 Ibid.

29 Savvas L. Douvaetzides et al., "Green Diesel: Biomass Feedstocks, Production Technologies, Catalytic Research, Fuel Properties and Performance in Compression Ignition Internal Combustion Engines," *Energies* 12, no. 5 (2019): 1–42 <https://doi.org/10.3390/en12050809> and Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

sejumlah propana.³⁰ Gambar 3 juga menunjukkan struktur molekul dari jenis bahan bakar ini dan menunjukkan rantai hidrokarbon yang lebih pendek yang dihasilkan dari pemecahan molekul lilin yang panjang.



Gambar 3: Struktur molekul berbagai jenis hidrokarbon.

SIFAT DAN PENCAHAMPURAN BAHAN BAKAR

HVO menyimpan dengan baik dan tidak mudah menarik larutan air, sehingga tidak menimbulkan masalah korosi yang sama terhadap FAME.³¹ Tidak seperti FAME, HVO juga tidak akan meningkatkan emisi polutan knalpot, pembentukan endapan yang dapat menyumbat suku cadang mesin, masalah stabilitas penyimpanan, dan penuaan oli mesin yang lebih cepat.

Minyak tanah yang berasal dari *hydroprocessing* minyak dan lemak disebut juga sebagai *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA). Produk ini dapat dicampur dengan bahan bakar jet berbasis fosil (minyak tanah) dengan kadar sampai dengan 50% dan dianggap sebagai bahan bakar yang dapat langsung digunakan (*“drop-in” fuel*).³² Propana adalah bahan bakar gas yang antara lain dapat digunakan untuk memasak dan sebagai pemanas. Selain itu, bahan bakar ini dapat diproses melalui *steam reforming* untuk menghasilkan hidrogen, yang kemudian dapat didaur ulang untuk digunakan dalam *hydroprocessing*.³³ *Hydroprocessing* juga berpotensi menghasilkan bensin terbarukan yang dapat langsung digunakan (*drop-in renewable gasoline*), tetapi biasanya proses ini tidak dilakukan dengan alasan biaya.

STATUS TEKNOLOGI

Walaupun saat ini tidak terdapat fasilitas HVO di Indonesia, namun pemerintah Indonesia sedang mengembangkan *standalone* HVO sesuai dengan Rencana

30 Chamila Rajeeva Thilakarathne, “Understanding Catalytic Pyrolysis of Biomass for Production of Biofuels” (PhD diss., Iowa State University, 2016). Diambil dari <https://lib.dr.iastate.edu/etd/15821/> and Brown et al., *Advanced biofuels*.

31 Athanasios Dimitriadis et al., “Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine,” *Frontiers in Mechanical Engineering* 4, (2018): 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>.

32 Untuk informasi lebih lanjut tentang HEFA+ untuk aviasi/penerbangan, lihat Nikita Pavlenko and Anastasia Kharina, *Policy and environmental implications of using HEFA+ for aviation*, (ICCT: Washington, DC, 2018), <https://theicct.org/publications/policy-and-environmental-implications-using-hefa-aviation>

33 Susan Van Dyk et al. “Drop-In’ Biofuels: The Key Role That Co-processing Will Play in Its Production” (IEA Bioenergy, 2019), <https://www.ieabioenergy.com/publications/new-publication-drop-in-biofuels-the-key-role-that-co-processing-will-play-in-its-production/>

Pembangunan Jangka Menengah (RPJM 2020-2024).³⁴ Ada sejumlah fasilitas HVO di negara lain. Misalnya, Neste mengoperasikan fasilitas *standalone* HVO di Finlandia, Belanda, dan Singapura.³⁵

BIOETANOL

BIOETANOL KONVENSIONAL

Etanol adalah alkohol yang diproduksi melalui fermentasi gula atau pati. Proses ini menggunakan teknologi generasi pertama dan dapat digunakan pada kendaraan yang secara khusus dirancang untuk menggunakan etanol dengan kadar pencampuran yang tinggi. Namun praktik yang umum terjadi, etanol dicampur dengan bensin dalam kadar tertentu.

Bahan baku

Tanaman perkebunan penghasil gula dan pati digunakan untuk memproduksi etanol konvensional. Tanaman perkebunan yang mengandung pati mencakup jagung, singkong, dan gandum. Tanaman perkebunan yang mengandung gula termasuk tebu, tetes tebu dan *sweet sorghum*. Semakin tinggi kadar pati atau gula dalam bahan baku tersebut, semakin tinggi hasil etanol dan dengan demikian semakin rendah biaya konversinya dibandingkan dengan bahan baku lainnya. Bahan baku ini dapat ditemukan di beberapa provinsi di Indonesia. Jawa Timur memproduksi lebih dari 50% dari total produksi tebu di Indonesia, sementara Lampung, Jawa Tengah, dan Jawa Barat, Sumatera Selatan, Sulawesi, dan Nusa Tenggara menghasilkan sisanya.³⁶ *Sweet sorghum* juga diproduksi di Jawa Timur, serta di Jawa Tengah, Jawa Barat, dan Nusa Tenggara Timur.³⁷ Jagung terutama diproduksi di Jawa Timur dan Jawa Tengah, Sulawesi Selatan, Sumatera Utara, dan Lampung.³⁸ Lampung merupakan penghasil utama ubi kayu, diikuti oleh Jawa Timur, Jawa Tengah, dan Jawa Barat serta Sumatera Utara.³⁹ Indonesia juga memproduksi gandum dalam jumlah kecil, sehingga sebagian besar konsumsi dalam negeri mengandalkan impor.

Proses

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4, tidak diperlukan proses pengolahan awal (*pretreatment*) untuk tanaman perkebunan penghasil gula karena sari tebu langsung diekstraksi dari tebu. Sementara itu, tanaman perkebunan yang mengandung pati pada umumnya digiling, baik dalam keadaan basah maupun kering, untuk dijadikan bubuk atau pasta.⁴⁰ Pada proses penggilingan basah, butiran dibasahi atau direndam dalam air panas untuk memudahkan pemisahan butiran menjadi bagian-bagian komponennya.⁴¹ Setelah proses pengolahan awal selesai, bahan baku yang mengandung tepung tersebut melewati proses hidrolisis, dimana pati dipecah oleh enzim menjadi gula bebas untuk membuat glukosa yang siap difermentasi. Gula tersebut kemudian diubah menjadi etanol oleh mikroba, pada umumnya berupa ragi,

34 Untuk informasi lebih lanjut, lihat Peraturan Presiden No. 18/2020 - Lampiran II, 17 Januari, 2020, <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/131386/perpres-no-18-tahun-2020>

35 NESTE, "Neste Manufactures Its High-quality Products in Finland, the Netherlands and Singapore." Diakses pada 27 November, 2020, <https://www.neste.com/about-neste/who-we-are/production>

36 Badan Pusat Statistik, "Statistik Tebu Indonesia 2018," (2019). <https://www.bps.go.id/publication/2019/11/22/9d2b03409986c2dcfd43ae4/statistik-tebu-indonesia-2018.html>

37 Herman Subagio, and Muh. Aqil, "Pengembangan Produksi Sorgum di Indonesia," Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian, (2013): 199–214. <http://kalsel.litbang.pertanian.go.id/ind/images/pdf/prosiding/20%20herman.pdf>

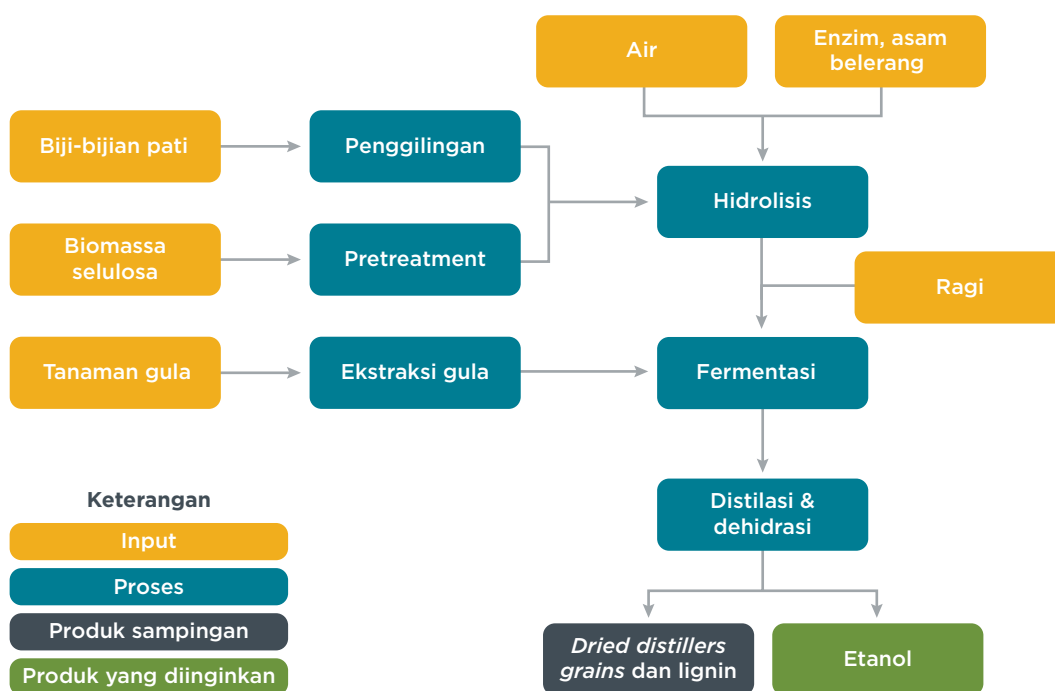
38 Badan Pusat Statistik, "Produksi Jagung Menurut Provinsi (ton), 1993-2015." Diakses pada Juni 2020, <https://www.bps.go.id/dynamic/2015/09/09/868/produksi-jagung-menurut-provinsi-ton-1993-2015.html>

39 Badan Pusat Statistik, "Produksi Ubi Kayu Menurut Provinsi (ton), 1993-2015." Diakses pada Juni 2020, <https://www.bps.go.id/dynamic/2015/09/09/880/produksi-ubi-kayu-menurut-provinsi-ton-1993-2015.html>

40 United States Department of Energy, "Clean Cities Fact Sheet" (2008), <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/43835.pdf>

41 Ibid.

melalui proses biologis anaerobik (yaitu, proses tanpa menggunakan atau dengan menggunakan sedikit oksigen) yang disebut fermentasi.⁴²



Gambar 4: Gambaran sederhana fermentasi.

Catatan: Diadaptasi dari Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*; Das and Varanasi, *Fundamentals of Biofuels*; IEA-RETD, *Towards advanced biofuels: Options for integrating conventional and advanced biofuels production sites*, (Utrecht, 2016). <http://iea-rettd.org/archives/publications/res-t-bioplant/>; and Dominik Rutz and Rainer Janssen, *Biofuel Technology Handbook* (München: WIP Renewable Energies, 2007).

Pada tahap akhir, hasil tumbukan tersebut dipanaskan untuk memisahkan etanol. Etanol menguap pada suhu yang lebih rendah daripada air, sehingga ia dapat menguap terlebih dahulu. Apabila biji-bijian digunakan untuk menghasilkan etanol, biji-bijian yang tersisa disebut produk sampingan penyulingan (“*distillers grains*”). Sebagian besar pati yang ada telah dihilangkan, tetapi *distillers grains* masih mengandung sedikit pati dan sejumlah besar protein dan serat, sehingga dapat digunakan untuk pakan ternak, baik dalam keadaan basah maupun kering.⁴³ Etanol yang telah melalui proses penyulingan masih mengandung sisa air dan disebut etanol dengan kadar air (“*hydrous ethanol*”). *Hydrous ethanol* juga dikenal sebagai etanol yang terhidrasi, biasanya memiliki kadar air antara 5% - 7%.⁴⁴ *Hydrous ethanol* dapat digunakan pada kendaraan-kendaraan yang dirancang khusus untuk bahan bakar tersebut dan penggunaan ini lazim ditemukan di Brazil.⁴⁵ Sebagai alternatif, air sisa dalam etanol dapat dihilangkan melalui berbagai proses dehidrasi untuk menghasilkan etanol bebas air (“*anhydrous ethanol*”) dengan kadar kemurnian lebih dari 99%.⁴⁶ Penggunaan *anhydrous ethanol* dalam sektor transportasi lebih umum ditemukan secara global daripada *hydrous ethanol*.

42 Wei-Cho Huang, and I-Ching Tang, “Bacterial and Yeast Cultures – Process Characteristics, Products, and Applications,” in *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, ed. Shang-Tian Yang, (Oxford: Elsevier, 2007), 185-223.

43 Stefan Schwietzke et al., “Ethanol Production from Maize,” in *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*, ed. Alan L. Kriz and Brian A. Larkins, (Springer, 2009), 347-364.

44 Russian Biofuels Association, “Fuel Bioethanol”. Diakses pada 28 Oktober, 2020, <http://www.biofuels.ru/bioethanol/what-is-bioethanol/>.

45 Tadeu C. Cordeiro de Melo et al., “Hydrous Ethanol-Gasoline Blends-Combustion and Emission Investigations on a Flex-Fuel Engine,” *Fuel* 97, (2012): 796-804. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.018>

46 Howard A. Saffy et al., “Energy, Carbon Dioxide and Water Use Implications of Hydrous Ethanol Production,” *Energy Conversion and Management* 105, no. 15 (2015): 900-907. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.039>

Sifat dan Pencampuran Bahan Bakar

Etanol memiliki oktan yang tinggi, sehingga menambahkannya ke dalam bensin dapat meningkatkan angka oktan bahan bakar. Sebagian besar negara mengizinkan penggunaan campuran *anhydrous ethanol* sebesar 5-15% dalam bensin untuk kendaraan konvensional. Untuk kendaraan berbahan bakar bensin yang dirancang untuk beroperasi dengan menggunakan etanol yang lebih tinggi, yang disebut “*total flex-fuel vehicles*”, etanol dapat digunakan dengan kadar yang lebih tinggi, sampai dengan 100%.⁴⁷ Indonesia pernah melakukan pencampuran 2% (E2) etanol ke dalam bensin, tetapi program tersebut telah dihentikan karena ketersediaan bahan baku yang rendah dan tingginya harga etanol.⁴⁸

CELLULOSIC ETHANOL

Cellulosic ethanol adalah *biofuel* generasi kedua dan proses konversinya membutuhkan teknologi yang lebih maju dibandingkan dengan produksi etanol konvensional.⁴⁹ *Cellulosic ethanol* diproduksi dengan cara memecah selulosa, sebuah karbohidrat yang sangat kompleks, menjadi gula sebelum memasuki tahap fermentasi.

Bahan baku

Semua jenis biomassa dengan kandungan selulosa yang tinggi dapat digunakan untuk menghasilkan *cellulosic ethanol*. Di Indonesia, terdapat beberapa bahan baku yang dapat digunakan untuk memproduksi *cellulosic ethanol*, termasuk diantaranya batang pohon kelapa sawit dan tandan buah kosong kelapa sawit, jerami padi, batang jagung, ampas tebu, batang singkong, limbah padat perkotaan, kayu hasil pembongkaran dan banyak lagi.⁵⁰

Proses

Konversi bahan baku selulosa membutuhkan lebih banyak proses pengolahan awal (*pretreatment*) dibandingkan dengan bahan baku bioetanol konvensional. Dalam beberapa kasus, bahan baku ini harus dibersihkan terlebih dahulu; terutama untuk jerami dan sisa pertanian lainnya yang dipanen dari permukaan tanah. Bahan baku juga harus dipecah menjadi partikel kecil, mirip dengan proses penggilingan biji-bijian. Metode *pretreatment* berbeda satu sama lain, hal ini bergantung pada jenis biomassa. Salah satu metode proses pengolahan awal (*pretreatment*) yang membantu mengurangi ukuran partikel adalah *steam explosion*, dimana partikel biomassa dipanaskan dengan cepat oleh uap bertekanan tinggi.⁵¹

Bahan baku selulosa kemudian dihidrolisis menjadi gula. Proses ini lebih sulit daripada hidrolisis pati karena selulosa adalah karbohidrat yang jauh lebih kompleks daripada pati.⁵² Hidrolisis untuk bahan baku selulosa dapat dilakukan dengan menggunakan enzim, asam atau kombinasi keduanya. Dari tahap ini, proses terus berlanjut seperti proses produksi etanol konvensional, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

47 R.J. Pearson, and J.W.G. Turner, “Using Alternative and Renewable Liquid Fuels to Improve the Environment Performance of Internal Combustion Engines: Key Challenges and Blending Technologies,” in *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, ed. Richard Folkson, (Woodhead Publishing, 2014), 52–89.

48 Pertamina, “Ethanol Dilemma.” Diakses pada 20 Mei, 2020, <https://www.pertamina.com/id/news-room/market-insight/ethanol-dilemma>

49 U.S. Department of Energy, “Clean Cities.”

50 Untuk informasi lebih lanjut tentang ketersediaan residu kelapa sawit di Indonesia, lihat Julia Paltseva, Stephanie Searle, and Chris Malins, *Potential for advanced biofuel production from palm residues in Indonesia*, (ICCT, Washington, DC, 2016), <https://theicct.org/publications/potential-advanced-biofuel-production-palm-residues-indonesia>

51 Yi Zheng, Zhongli Pan, and Ruihong Zhang, “Overview of Biomass Pretreatment for Cellulosic Ethanol Production,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 2, no. 3 (2009): 51–68.

52 Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

Selain etanol sebagai produk akhir, dari proses ini dihasilkan pula air limbah dan residu lignin, yang keduanya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Air limbah dapat diolah dengan proses anaerobik dan diubah menjadi biogas (lihat bab selanjutnya), sedangkan lignin dapat diolah melalui proses pembakaran. Lignin dapat menghasilkan pendapatan tambahan jika diolah melalui proses pembakaran untuk memproduksi listrik yang dijual untuk pemanfaatan atau pengguna lain.⁵³ Jumlah produk sampingan lignin yang dihasilkan dalam proses produksi *cellulosic ethanol* bergantung pada kandungan lignin dari bahan baku yang digunakan. Misalnya, kayu memiliki kandungan lignin yang jauh lebih tinggi daripada rumput.

Status teknologi

Cellulosic ethanol masih dalam tahap awal komersialisasi dan membutuhkan investasi modal yang signifikan. Selain itu diperlukan biaya operasional yang cukup tinggi untuk pabrik pertama karena kompleksitas proses konversi dan kematangan teknologi yang masih rendah.⁵⁴ Namun demikian, biaya di masa yang akan datang berpotensi turun. Secara khusus, biaya produksi *cellulosic ethanol* dapat dikurangi apabila tersedia bahan baku murah; misalnya, studi ICCT sebelumnya menemukan bahwa penggunaan batang pohon kelapa sawit untuk membuat *cellulosic ethanol* menjadikannya lebih kompetitif secara ekonomi dibandingkan dengan penggunaan jerami dan brangkasan jagung yang digunakan di banyak negara lain.⁵⁵

Ada beberapa fasilitas *standalone cellulosic ethanol* di seluruh dunia. Di Asia, perusahaan Jepang Marubeni dan Tsukishima Kikai Co., Ltd., telah membangun sebuah pabrik di Osaka untuk mengolah limbah kayu dan menghasilkan 1,4 juta liter *cellulosic ethanol* per tahun. Selain itu, Verenium Corporation telah membangun pabrik yang berkapasitas 3 juta liter per tahun di Saraburi, Thailand,⁵⁶ dan sebuah perusahaan dari India, Praj Industries Limited, memiliki fasilitas demo dan berencana untuk mendirikan pabrik *cellulosic ethanol* yang terintegrasi di daerah Maharashtra.⁵⁷ Pabrik *cellulosic ethanol* komersial pertama di Cina, yang dimiliki oleh Longlive Group, memproses residu jagung di daerah Shandong.⁵⁸

GASIFIKASI

Gasifikasi adalah proses termokimia yang mengubah bahan yang mengandung karbon menjadi bahan bakar atau bahan kimia yang dapat digunakan dengan cara memanaskan bahan baku dengan oksigen dalam jumlah terbatas, tetapi tidak cukup banyak untuk memungkinkan pembakaran.⁵⁹ Proses ini biasanya dilakukan pada suhu dan tekanan tinggi dengan menggunakan udara, oksigen atau uap sebagai agen gasifikasi. Gasifikasi merupakan teknologi generasi kedua dan harus dikombinasikan dengan proses sintesis bahan bakar (*fuel synthesis*) untuk menghasilkan bahan bakar untuk sektor transportasi. Di dalamnya dapat mencakup *drop-in renewable diesel* (solar terbarukan), bensin, minyak tanah, gas alam terkompresi (*compressed natural gas/CNG*), metana yang disimpan pada tekanan tinggi atau bahan bakar yang dapat

53 Tao Li, and Sudhakar Takkellapati, "The Current and Emerging Sources of Technical Lignins and Their Applications." *Biofuels, Bioproducts, & Biorefining* 12, no. 5 (2018): 1-32. <https://doi.org/10.1002/bbb.1913>

54 Monica Padella, Adrian O'Connell, and Matteo Prussi, "What is Still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector," *Applied Sciences* 9, no. 21 (2019): 4523. <https://doi.org/10.3390/app9214523>

55 Yuanrong Zhou, et al., *Techno-economic analysis of cellulosic ethanol in Indonesia using palm residues*, (ICCT: Washington, DC, 2020), <https://theicct.org/publications/techno-economic-cellulosic-ethanol-2020>

56 Climate Technology Centre & Network, "Cellulosic Ethanol." Diakses pada 29 Juni, 2020, <https://www.ctc-n.org/technologies/cellulosic-ethanol>

57 Anuj Chandel, and Rajeev Sukumaran, *Sustainable Biofuels Development in India*, (Springer, 2017).

58 Bioenergy International, "Ethanol Development in China", 20 September, 2016, <https://bioenergyinternational.com/biofuels-oils/ethanol-development-in-china#:~:text=China's%20first%20commercialized%20cellulosic%20ethanol,value%20products%20using%20proprietary%20technology>

59 Vineet Sikarwar, and Ming Zhao, "Biomass Gasification," *Encyclopedia of Sustainable Technologies Volume 3* (2017): 205-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10533-0>

dicampurkan dalam solar dan bensin dengan kadar pencampuran rendah, seperti *dimethyl ether* (DME) dan metanol.⁶⁰

BAHAN BAKU

Sebenarnya, hampir semua bahan baku yang mengandung energi dapat digasifikasi. Bahan baku gasifikasi yang biasa dibahas meliputi batubara, gas alam, *petroleum coke* dan biomassa. Gasifikasi batubara telah digunakan secara luas di berbagai daerah dan saat ini sedang dikembangkan di Indonesia. Biomassa juga dapat dijadikan bahan baku untuk gasifikasi, baik secara tunggal atau dicampurkan dengan batubara.

Ada berbagai macam bahan baku biomassa yang potensial untuk gasifikasi, seperti residu pertanian, limbah padat perkotaan, residu hutan, tanaman energi lignoselulosa, dan gliserin. Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia memiliki residu kelapa sawit yang melimpah, yang dapat digunakan untuk gasifikasi seperti tandan buah kosong, cangkang sawit (*palm kernel shells/PKS*), serat sawit, dan pelepah sawit, serta gliserin dari produksi biodiesel.⁶¹ Penggunaan biomassa untuk gasifikasi di Indonesia dapat membantu pemerintah memenuhi target capaian energi terbarukan.⁶²

PROSES

Bahan baku harus diolah terlebih dahulu sebelum proses gasifikasi dan hal ini umumnya mencakup penyaringan, mengubah bahan baku menjadi partikel kecil, dan pengeringan. Pengeringan adalah proses terpenting dalam *pretreatment* karena membantu meningkatkan efisiensi gasifikasi.⁶³ Ada beberapa teknologi *pretreatment* lainnya, termasuk *torrefaction* dan *pelletization*.⁶⁴ *Torrefaction* adalah pengolahan panas (*thermal treatment*), sedangkan *pelletization* adalah pengeringan biomassa untuk kemudian dikompresi menjadi pelet dengan volume yang lebih rendah dan kepadatan energi yang lebih tinggi. Pelet ini mudah disimpan, diangkut, dan digunakan dalam konversi energi.⁶⁵

Setelah proses pengolahan awal (*pretreatment*), bahan baku siap untuk dimasukkan ke reaktor gasifikasi. Ada beberapa jenis reaktor. Setiap jenis reaktor memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dan beberapa reaksi berbeda terjadi di gasifier tersebut:⁶⁶

- 1. Dehidrasi:** Panas yang tinggi menguapkan kelembaban yang masih ada di dalam bahan baku. Uap yang dihasilkan berfungsi dalam reaksi selanjutnya.
- 2. Pirolisis (dikenal juga sebagai devolatilisasi):** Saat biomassa terus memanaskan, molekul yang mengandung karbon, seperti lignin dan selulosa, terurai menjadi komponen gas, misalnya CO₂ dan uap yang dapat dikondensasi, seperti arang (zat berkarbon tinggi) dan air
- 3. Gasifikasi:** Arang tersebut bereaksi dengan CO₂, air, dan oksigen dengan adanya panas sehingga membentuk karbon monoksida, hidrogen, dan metana. Campuran gas ini disebut *syngas*. Arang yang tersisa adalah produk sampingan padat yang berkarbon tinggi

60 Transport & Environment, *CNG and LNG for vehicles and ships – The facts*, (October 2018), https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_TE_CNG_and_LNG_for_vehicles_and_ships_the_facts_EN.pdf

61 Untuk penjelasan lebih rinci tentang potensi produksi advanced biofuel dari residu kelapa sawit di Indonesia, lihat Paltseva, Searle, and Malins, *Potential for advanced biofuel production*.

62 Untuk penjelasan lebih lanjut tentang opsi gasifikasi biomassa untuk Indonesia, lihat Tenny Kristiana, "Gasifying Palm Residues: Helping Indonesia Go Renewable," International Council on Clean Transportation, 16 Juni, 2020, <https://theicct.org/blog/staff/gasifying-palm-residues-helping-indonesia-go-renewable>

63 Jin Hu, Jin, Fei Yu, and Yongwu Lu, "Application of Fischer-Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion," *Catalysts* 2, no. 2 (2012): 303–326. <https://doi.org/10.3390/catal2020303>

64 Ibid.

65 Ibid.

66 Untuk informasi lebih lanjut, lihat Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

PENGOLAHAN BAHAN BAKAR LANJUTAN

Syngas dari gasifikasi dapat dibakar untuk pembangkit tenaga listrik atau diproses lebih lanjut untuk menghasilkan bahan bakar sintetis. Kontaminan seperti sulfur, nitrogen dan senyawa klorida harus dipisahkan dari *syngas* selama tahap pembersihan (lihat gambar di bawah) karena kontaminan tersebut merupakan polutan berbahaya dan dapat meracuni katalis yang digunakan untuk produksi bahan bakar di industri hilir.⁶⁷

Sebelum dapat diproses lebih lanjut, *syngas* perlu dibersihkan, dan proses ini dapat terjadi dalam dua rute yang dikenal dengan rute “panas” dan “dingin”. Kedua rute tersebut menggunakan teknologi yang sudah matang dan pembersihan gas melalui rute panas berfokus pada penyingkiran *tar*, materi partikulat, dan sulfur.⁶⁸ Rute ini memberikan keuntungan yakni efisiensi termal, kesederhanaan proses dan berpotensi mengurangi biaya jika dibandingkan dengan rute dingin.⁶⁹ Namun demikian, rute dingin lebih luas penggunaannya, karena lebih efektif untuk menghilangkan hampir seluruh kontaminan dan dapat menghasilkan kembali sulfur sebagai produk sampingan.⁷⁰

Di Indonesia, *syngas* dari gasifikasi batubara disintesis menjadi *dimethyl ether* (DME), metanol, dan *mono ethylene glycol* (MEG), sebuah cairan tidak berwarna yang digunakan dalam pembuatan serat poliester dan film, botol dan wadah kemasan serta pendingin mesin.⁷¹ *Syngas* juga dapat digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi hidrogen, metana, dan bahan bakar cair yang dapat langsung digunakan untuk transportasi, termasuk solar, bensin, dan nafta. Di Amerika Utara, Fulcrum BioEnergy (Amerika Serikat) dan Enerkem (Kanada) memiliki fasilitas gasifikasi biomassa yang menghasilkan biofuel. Di Inggris, BioSNG menggunakan hasil gasifikasi limbah untuk memproduksi metana. Sedangkan di Finlandia dan Belanda, ada beberapa *biomass co-gasification* pada pembangkit listrik batubara.⁷²

Berbagai teknologi sintesis bahan bakar dapat digunakan untuk mengkonversikan *syngas* dari proses gasifikasi menjadi bahan bakar cair dan gas. Proses sintesis *Fischer-Tropsch* (FT) merupakan salah satu yang menarik karena dapat menghasilkan bahan bakar solar terbarukan yang dapat langsung digunakan (*drop-in renewable diesel*) dan bahan bakar jet terbarukan (*renewable jet fuel*) (Gambar 5). Penting untuk dicatat bahwa *syngas* perlu dibersihkan sebelum menjalani FT karena *syngas* mengandung kotoran, seperti sulfur, yang dapat mencemari katalis yang digunakan selama proses sintesis FT, yang merupakan komponen mahal dalam proses.⁷³

67 Ronaldo Goncalves dos Santos, and Andre Cardoso Alencar, “Biomass-Derived Syngas Production via Gasification Process and its Catalytic Conversion into Fuels by Fischer Tropsch Synthesis: A Review,” *International Journal of Hydrogen Energy* 45, no. 36 (2020): 18114–18132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.133>

68 Patrick Woolcock and Robert Brown, “A Review of Cleaning Technologies for Biomass-Derived Syngas,” *Biomass and Bioenergy* 52, (2013): 54–84. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.036>

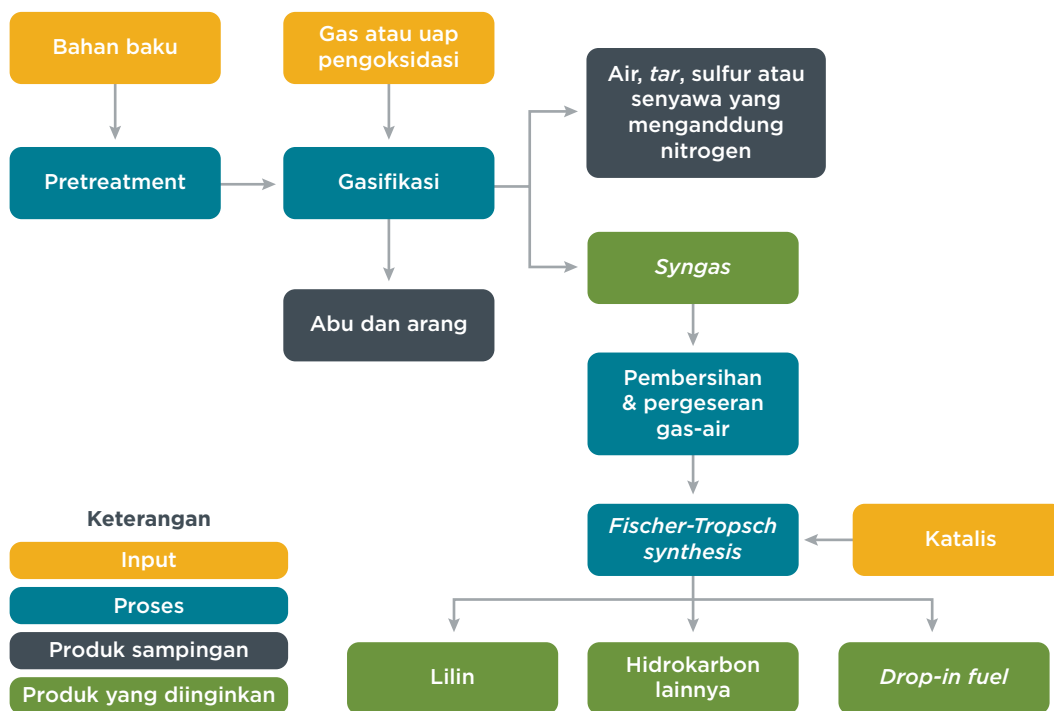
69 Ibid.

70 Ibid.

71 Mohsen Moayed and Leila Mahdavian, “Recycling Monoethylene Glycol (MEG) From the Recirculating Waste of an Ethylene Oxide Unit.” *Open Chemistry* 15, no. 1 (2017): 167–174. <https://doi.org/10.1515/chem-2017-0018>; and Bukit Asam, “Menteri BUMN dukung penuh PTBA lakukan gasifikasi batu bara.” Diakses pada 08 Juni, 2020, <http://www.ptba.co.id/id/berita/detail/1175/menteri-bumn-dukung-penuh-ptba-lakukan-gasifikasi-batu-bara>

72 Sergios Karatzos, James McMillan, and Jack Saddler, *The potential and challenges of drop-in biofuels*, (IEA Bioenergy, 2014), <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Task-39-Drop-in-Biofuels-Report-FINAL-2-Oct-2014-ecopy.pdf>.

73 Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.



Gambar 5: Gambaran sederhana gasifikasi.

Catatan: Diadaptasi dari Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

Produk akhir dari FT meliputi *drop-in renewable diesel*, bensin, propana, minyak tanah (bahan bakar jet/*jet fuel*) and lilin. Komposisi yang tepat dari produk-produk tersebut dapat dimodifikasi, misalnya untuk memproduksi fraksi minyak tanah yang lebih besar. Karena *syngas* telah dibersihkan sebelum pemurnian, maka produk dari FT telah bebas dari sulfur dan nitrogen. Produk solar FT mirip dengan solar minyak bumi dalam hal kepadatan, viskositas, dan kandungan energinya. Produk itu juga dianggap lebih unggul dari solar minyak bumi karena angka setana yang lebih tinggi dan rendahnya kandungan aromatik, dan menimbulkan polusi udara yang lebih rendah akibat pembakaran.⁷⁴ FT solar dapat dicampur dengan solar minyak bumi dalam proporsi berapa pun tanpa perlu memodifikasi mesin kendaraan.⁷⁵

Proses gasifikasi juga dapat dioptimalkan untuk produksi hidrogen, yang kemudian dapat digunakan pada *fuel cell vehicles* atau *hydroprocessing*. Produksi hidrogen dari FT dapat ditingkatkan dengan cara melakukan *water-gas shift reaction* pada *syngas* dari gasifikasi, dimana uap bereaksi dengan karbon monoksida untuk menghasilkan hidrogen dan karbon dioksida.⁷⁶ Proses ini menggunakan katalis dan yang paling umum digunakan adalah katalis berbasis besi oksida dibandingkan dengan katalis berbasis tembaga.⁷⁷

STATUS TEKNOLOGI

Secara umum, gasifikasi membutuhkan biaya modal yang tinggi karena menggunakan suhu operasi yang lebih tinggi, proses yang cukup kompleks, dan persyaratan yang mencakup berbagai kondisi panas-dingin dan siklus kompresi.⁷⁸ Tidak seperti gasifikasi batubara, potensi komersial dari gasifikasi biomassa masih dalam tahap

74 Multimedia Working Group, *Multimedia evaluation of renewable diesel*, (California Air Resources Board, 2013), https://ww3.arb.ca.gov/fuels/multimedia/meetings/renewabledieselstaffreport_nov2013.pdf

75 Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

76 Meng Ni et al., "An Overview of Hydrogen Production from Biomass," *Fuel Processing Technology* 87, no. 5 (2006): 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.11.003>

77 Baldino et al., *Advanced alternative fuel pathways*.

78 Karatzos et al., *The potential and challenges of drop-in biofuels*.

awal pengembangan.⁷⁹ Tantangan untuk gasifikasi biomassa terletak pada prosesnya yang menghasilkan tar, yang dapat menyumbat peralatan. Oleh karena itu, dibutuhkan proses tambahan untuk mengurangi produksi tar dan meningkatkan metode untuk menghilangkannya dari peralatan gasifikasi.

ANAEROBIC DIGESTION

Anaerobic digestion merupakan teknologi generasi pertama yang telah matang secara komersial, yang dapat mengubah berbagai jenis biomassa basah menjadi biogas. Dengan konsentrasi metananya yang tinggi, yang setara dengan gas alam, biogas kaya akan energi dan dapat melalui proses pembakaran di tempat untuk menghasilkan energi. Sebagai alternatif, biogas dapat dibersihkan, dengan menghilangkan CO₂ dan kotoran lainnya, sehingga menjadi metana murni dan dapat digunakan dalam infrastruktur gas alam, kendaraan, dan penggunaan lainnya. Kotoran yang terkandung dalam biogas dapat berupa hidrogen sulfida dan uap air, dimana hidrogen sulfida mendapat perhatian khusus karena dapat menyebabkan korosi pada mesin.⁸⁰

BAHAN BAKU

Bahan baku untuk *anaerobic digestion* pada umumnya merupakan bahan basah, seperti limbah yang dapat didegradasi, limbah makanan, kotoran ternak, lumpur limbah, dan residu pertanian; bahan yang disebutkan terakhir ini harus diolah dengan bahan baku yang basah.⁸¹ Di Indonesia, biogas dapat dikumpulkan dari kolam limbah pabrik kelapa sawit (*palm oil mill effluent*/POME) yang tertutup. POME adalah limbah dari proses penggilingan kelapa sawit dan merupakan limbah yang berbahaya bagi lingkungan yang biasanya diolah di kolam sebelum dibuang ke saluran air. POME mengandung residu buah sawit, minyak, dan bahan organik, dan secara alami melepaskan biogas pada saat terurai.

PROSES

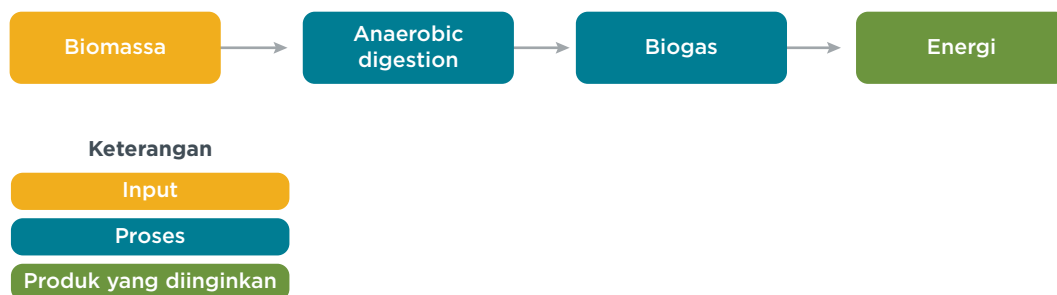
Dalam wadah yang tertutup rapat, mikroorganisme menguraikan biomassa menjadi CO₂ dan dengan cepat akan kehabisan oksigen. Pada titik ini, sekumpulan mikroorganisme yang berbeda yang tidak membutuhkan oksigen akan terus mengkonsumsi biomassa tersebut melalui *anaerobic digestion* (tanpa oksigen). Tanpa oksigen, mikroba ini tidak dapat sepenuhnya memecah biomassa menjadi CO₂ dan sebaliknya menghasilkan metana dalam jumlah paling besar (50%-75%), dengan sekitar 25-50% karbon dioksida (CO₂), dan sejumlah kecil hidrogen, amonia dan gas lainnya (Gambar 6).⁸²

79 Ibid.

80 Clare Lukehurst, and Angela Bywater, *Exploring the viability of small scale anaerobic digesters in livestock farming*, (IEA Bioenergy, 2015), <https://www.ieabioenergy.com/publications/exploring-the-viability-of-small-scale-anaerobic-digesters-in-livestock-farming/>

81 ETIP Bioenergy, "Raw Biogas." Diakses pada 20 Mei, 2020, <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/intermediates/raw-biogas>.

82 M.R. Atelge et al., "Biogas Production From Organic Waste: Recent Progress and Perspectives," *Waste and Biomass Valorization* 11, no. 3 (2020): 1019-1040, <https://doi.org/10.1007%2Fs12649-018-00546-0>



Gambar 6: Gambaran sederhana *anaerobic digestion*.

Catatan: Diadaptasi dari Teodorita Al Seadi, *Good practice in quality management of AD residues from biogas production*, (IEA Bioenergy, 2001), [http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/70996A6A88900B70C125753F005B70AD/\\$FILE/IEA%20BUENAS%20PR%C3%81CTICAS%20DA.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/70996A6A88900B70C125753F005B70AD/$FILE/IEA%20BUENAS%20PR%C3%81CTICAS%20DA.pdf)

STATUS TEKNOLOGI

Saat ini, biogas hasil produksi dari POME dapat ditemukan di Malaysia.⁸³ Di Indonesia, proses ini telah menarik minat industri kelapa sawit sejak tahun 2011 dan pemerintah telah memberikan beberapa dukungan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral telah mengeluarkan skema tarif listrik tetap (*feed-in-tariffs*) untuk Produsen Listrik Swasta (*Independent Power Producers/IPP*) yang menghasilkan listrik dari biomassa dan biogas; skema ini memungkinkan mereka membuat perjanjian jual beli tenaga listrik (*power purchase agreement/PPA*) yang menguntungkan dengan perusahaan listrik negara (PLN).⁸⁴ Sebagai contoh, sebuah IPP penghasil biogas dengan kapasitas listrik 1,6 MW telah memiliki kontrak PPA dengan PLN sejak tahun 2013.⁸⁵

RANGKUMAN TENTANG PERKEMBANGAN DI INDONESIA

Semua jalur yang dibahas di atas telah tersedia secara komersial dan status perkembangan masing-masing jalur di Indonesia dirangkum dalam Tabel 2. Indonesia terus mengembangkan industri biodiesel, bioetanol konvensional, dan biogas (melalui *anaerobic digestion*). Sementara itu, jalur *hydroprocessing* dan gasifikasi masih dalam tahap awal pengembangan dan pembahasan tentang *cellulosic ethanol* masih terbatas pada tahap awal. Pemerintah Indonesia pada umumnya mendukung produksi *biofuel* melalui penerbitan peraturan, mendorong BUMN atau bahkan memberikan subsidi, seperti BPDPKS untuk biodiesel dan etanol konvensional dengan menggunakan APBN.

83 Informasi lebih lanjut tentang treatment POME di Malaysia dapat ditemukan di Bidattul Syirat Zainal et al., "Integrated System Technology of POME Treatment for Biohydrogen and Biomethane Production in Malaysia," *Applied Science* 10, no. 3 (2020): 951. <https://doi.org/10.3390/app10030951>

84 New and Renewable Energy Directorate General, "Sosialisasi Peraturan Menteri ESDM Nomor 27 Tahun 2014" (2014), <http://ebtke.esdm.go.id/post/2014/11/03/703/sosialisasi.peraturan.menteri.esdm.nomor.27.tahun.2014>

85 Ministry of Energy and Mineral Resources, "Melihat lebih dekat pembangkit listrik biogas komersil pertama di Indonesia" (2017), <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/melihat-lebih-dekat-pembangkit-listrik-biogas-komersil-pertama-di-indonesia>

Tabel 2: Status jalur produksi biofuel di Indonesia

Jalur Produksi	Skala Bisnis	Total Produksi	Dukungan Pemerintah	Status Perkembangan
Biodiesel/Fatty Acid Methyl Ester (FAME) (a)	20+ fasilitas	8,4 juta kl	ya	Berkembang sepenuhnya dan terus bertumbuh
Hydroprocessing (b)	1 (Pertamina)	1.000 bpd	ya	Tahap awal dan sedang berlangsung
Bioetanol Konvensional (c)	2 fasilitas	40.000 kl	ya	Berkembang sepenuhnya
Cellulosic Ethanol	0	0	ya/tidak	Studi awal
Gasifikasi (d)	4-7 fasilitas	6+ juta metrik ton DME	ya	Direncanakan dan sedang berlangsung
Anaerobic Digestion (e)	(tidak ada data, kemungkinan besar banyak)	30 MW	ya	Bertumbuh

Catatan:

- [a] Skala bisnis: APROBI, "Anggota Aprobi." Diakses pada 27 Oktober, 2020, <https://aprobi.or.id/partners/>; total produksi: APORBI, "Data Produksi dan Distribusi Biodiesel Hasil Rekonsiliasi EBTKE." Diakses pada 27 Oktober, 2020, <https://aprobi.or.id/project>
- [b] Pertamina, "Successful Trial of Processing 100% Palm Oil into Green Energy, Pertamina is Ready to Produce the First D-100 in Indonesia," 15 Juli, 2020, <https://pertamina.com/en/news-room/news-release/successful-trial-of-processing-100-palm-oil-into-green-energi-pertamina-is-ready-to-produce-the-first-d-100-in-indonesia>
- [c] ESDM, "Rencana Strategis: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi 2020-2024." Diakses pada 11 Desember, 2020, <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/10/01/2648/rencana-strategis.renstra.ditjen.ebtke.2020-2024>
- [d] Hanya gasifikasi batubara untuk menghasilkan *syngas*, tanpa proses sintesis FT untuk menghasilkan *drop-in fuels*. Proyeksi produksi DME oleh PTBA dan 4 pabrik Pertamina masing-masing 1,4 juta metrik ton. Sumber: "Pertamina Akan Bangun 4 Pabrik Gasifikasi Batu Bara," CNN Indonesia, 26 Februari, 2020, <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20200225204252-85-478093/pertamina-akan-bangun-4-pabrik-gasifikasi-batu-bara>
- [e] Direktorat Energi Baru dan Terbarukan ESDM memproyeksikan potensi pembangkit listrik dari POME sebesar 1,5 GW. Sumber: Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, "Diskusi Alternatif Pemanfaatan Biogas Berbasis POME," 4 Oktober 2018, <https://ebtke.esdm.go.id/post/2018/10/04/2029/diskusi.alternatif.pemanfaatan.biogas.berbasis.pome>