

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PEMANFAATAN *CELLULOSIC ETHANOL* DI INDONESIA YANG BERASAL DARI LIMBAH KELAPA SAWIT

Penulis: Yuanrong Zou, Stephanie Searle, Nikita Pavlenko, Tenny Kristiana
(International Council on Clean Transportation), Sudaryadi, Ricky Harry
Amukti (Traction Energy Asia)



**TRACTION
ENERGY ASIA**

www.theicct.org

communications@theicct.org

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

ACKNOWLEDGMENTS

Penelitian ini didukung oleh David and Lucile Packard Foundation dan Norwegian Agency for Development Cooperation. Terima kasih kepada Dr. Bayu Prabowo M. Eng dan Nelliza Putri dari PT. Pertamina (Persero) dan Tommy Pratama dari Traction Energy Asia untuk ulasan yang bermanfaat..

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650,
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2020 International Council on Clean Transportation

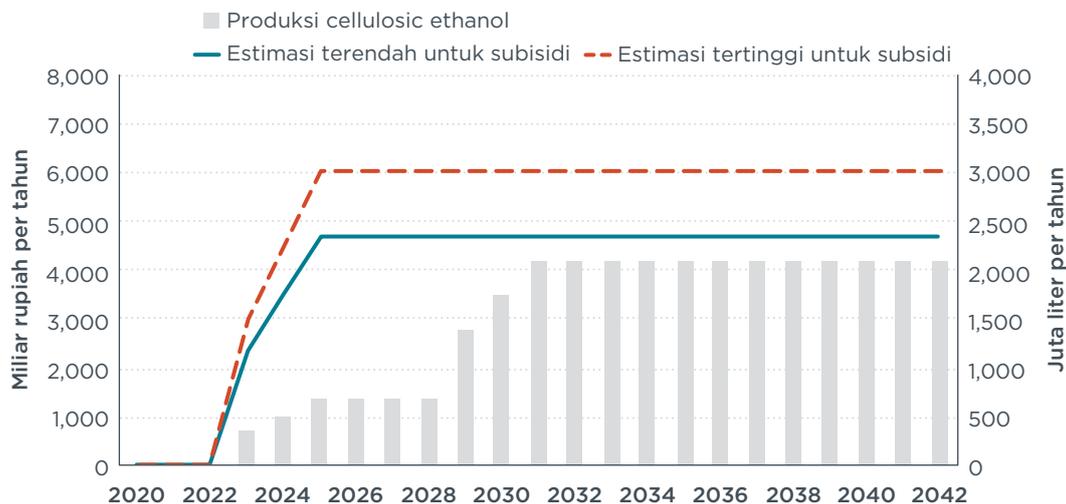
RINGKASAN EKSEKUTIF

Indonesia memiliki target yang ambisius untuk mengganti bahan bakar minyak (BBM) dengan bahan bakar nabati (BBN). Terlebih, target pencampuran biodiesel di Indonesia merupakan yang tertinggi di dunia. Meskipun berhasil meningkatkan industri biodiesel, Indonesia hampir tidak mencatat kemajuan dalam pemanfaatan bioetanol. Studi ini mengevaluasi tekno-ekonomi *cellulosic ethanol*, BBN/biofuel generasi kedua yang dapat dicampur dengan bensin, di Indonesia.

Berbeda dengan negara-negara lain yang harus membayar biaya yang tinggi untuk bahan baku, ketersediaan bahan baku murah bukan menjadi faktor pembatas bagi industri *cellulosic ethanol* di Indonesia. Jumlah ketersediaan residu dari industri kelapa sawit Indonesia sangat besar dan lebih dari cukup untuk mendukung lusinan pabrik *cellulosic ethanol* skala komersial. Residu seperti batang sawit; tandan kosong sawit; dan sabut sawit, biasanya tidak dimanfaatkan lagi dan dibiarkan di lahan perkebunan hingga membusuk. Industri *cellulosic ethanol* dapat memanfaatkan sumber daya yang melimpah ini.

Dalam studi ini, kami memperkirakan biaya produksi *cellulosic ethanol* di Indonesia dengan menggunakan model *discounted cashflow* (DCF), dengan memperhitungkan berbagai biaya pembangunan dan pengoperasian pabrik baru *cellulosic ethanol*, termasuk di dalamnya biaya peralatan, konstruksi, tanah, bahan baku, hingga tenaga kerja. Kemudian kami memberikan roadmap tentang bagaimana industri baru *cellulosic ethanol* dapat dikembangkan dan ditingkatkan selama dua dekade mendatang di Indonesia. Sepengetahuan kami, studi ini merupakan studi pertama yang menilai biaya dan potensi peningkatan produksi *cellulosic ethanol*, khususnya di Indonesia.

Kami menemukan bahwa Indonesia memiliki potensi yang besar untuk memproduksi *cellulosic ethanol* secara efisien karena biaya bahan baku, tenaga kerja, tanah, dan konstruksi yang kompetitif dibandingkan dengan negara lain. Meski demikian, dukungan pemerintah tetap diperlukan untuk awal pendirian industri ini. Kami memperkirakan subsidi tahunan pemerintah yang diperlukan untuk mendukung peningkatan 10 fasilitas yang cukup besar (dengan kapasitas produksi 70 juta liter per fasilitas) membutuhkan dana Rp 4,7 – 6 triliun (0,3 – 0,4 miliar USD), tergantung pada ketersediaan berbagai jenis bahan baku. Gambar RE1 menunjukkan kapan jumlah subsidi tersebut perlu dibayar berdasarkan tingkat peningkatan industri (sumbu kiri). Kami berharap ketika gelombang pertama fasilitas *cellulosic ethanol* meningkat, momen tersebut dapat dijadikan pembelajaran untuk mengurangi biaya fasilitas di masa mendatang dan biaya pembangunan fasilitas gelombang kedua mungkin dapat bersaing tanpa insentif dari pemerintah. Kami mengilustrasikan jumlah *cellulosic ethanol* yang dapat diproduksi dari fasilitas bersubsidi gelombang pertama, serta fasilitas tak bersubsidi gelombang kedua yang lebih besar pada Gambar RE1 (sumbu kanan). Alternatifnya, pemerintah Indonesia dapat memberikan insentif dalam format pembayaran satu kali di muka. Kami memperkirakan total pembayaran satu kali sebesar Rp. 90-116 triliun (6,4 – 8,3 miliar USD) untuk mendukung pengembangan industri.



Gambar RE1. Subsidi tahunan yang dibutuhkan untuk mendukung pendirian industri *cellulosic ethanol* (sumbu kiri) dan total kuantitas *cellulosic ethanol* yang dapat diproduksi tiap tahunnya (sumbu kanan)

Pengembangan industri *cellulosic ethanol* dalam negeri dapat membawa banyak manfaat bagi Indonesia dan sejalan dengan agenda pemerintah. Hal ini akan mengurangi impor bensin dan meningkatkan neraca perdagangan Indonesia, serta akan mendorong industri baru dan menciptakan lapangan kerja. Pemanfaatan residu kelapa sawit yang terbuang dapat membawa pendapatan tambahan untuk industri kelapa sawit, serta membantu mengurangi gas rumah kaca (GRK) lebih besar daripada biofuel/BBN konvensional. Untuk mendapatkan semua manfaat tersebut, kami memiliki beberapa rekomendasi kebijakan untuk Indonesia:

- » Mengeluarkan peraturan yang menjelaskan bahwa residu kelapa sawit merupakan bahan baku biofuel/BBN yang memenuhi syarat;
- » Pemerintah memberikan insentif seperti subsidi produksi atau hibah investasi untuk mendukung awal pendirian industri *cellulosic ethanol* dalam negeri;
- » Memperluas infrastruktur jalan di area perkebunan kelapa sawit serta membangun kesadaran dan pengetahuan tentang nilai residu sawit di kalangan pekebun mandiri untuk mendorong pembentukan rantai pasok bahan baku yang stabil dan berkelanjutan;
- » Menetapkan Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) di sekitar fasilitas *cellulosic ethanol* dan rantai pasoknya untuk mendorong pembangunan ekonomi regional;
- » Mengintegrasikan *cellulosic ethanol* ke dalam inisiatif pemerintah untuk meningkatkan oktan bensin dan mengurangi polusi udara dari kendaraan.

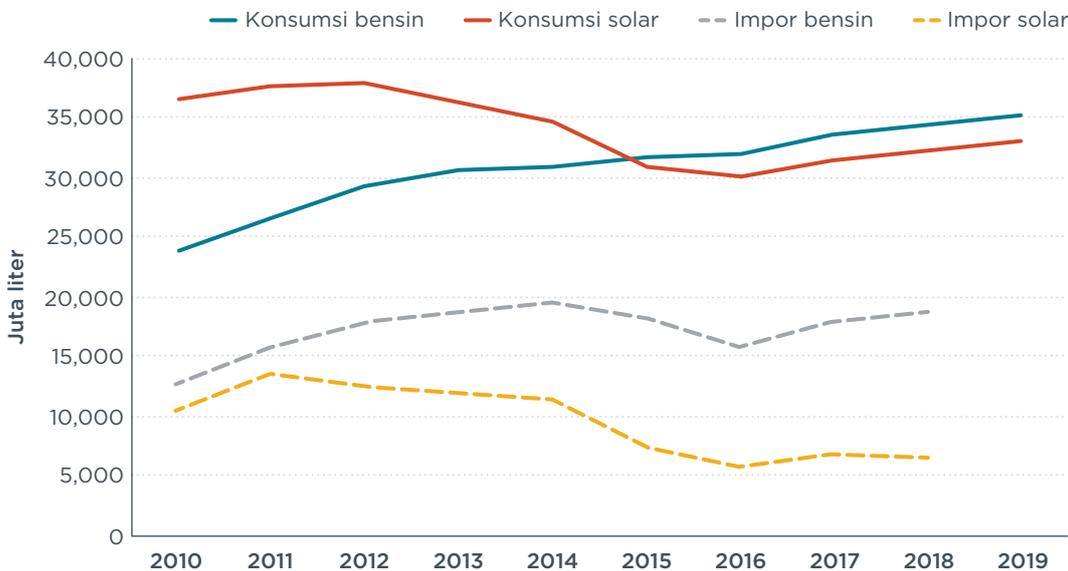
DAFTAR ISI

Ringkasan Eksekutif	i
Pendahuluan	1
Metodologi	3
Ketersediaan bahan baku	3
Model discount cash flow	3
Biaya modal.....	5
Biaya operasional.....	5
Pendapatan	7
Penentuan biaya produksi dan insentif pemerintah.....	7
Deployment model untuk cellulosic ethanol.....	8
Hasil Penelitian	9
Diskusi	14
Rekomendasi Kebijakan	16
Referensi	18
Lampiran	21

PENDAHULUAN

Biofuel/BBN merupakan komponen penting dalam rencana energi nasional Indonesia. Indonesia telah melakukan upaya yang signifikan dalam pelembagaan biodiesel dan industri biodiesel menjadi berkembang dikarenakan kebijakan tersebut, termasuk di dalamnya meningkatkan bauran biodiesel dan insentif finansial. Sejak 2016, sektor transportasi diharuskan menggunakan B20, bahan bakar campuran 20% biodiesel dan solar dari bahan bakar fosil kemudian di tahun 2020 pencampuran menjadi 30% biodiesel atau B30. (MEMR, 2015). Pada akhir tahun 2019 lalu, pemerintah Indonesia telah mengumumkan rencana untuk memperluas pemanfaatan biodiesel menjadi B50 dalam beberapa tahun mendatang (Gorbiano, 2019). Biodiesel di Indonesia dibuat dari bahan baku kelapa sawit. Untuk mendukung kebijakan mandatori pemanfaatan biodiesel, pemerintah memberikan subsidi dengan menggunakan anggaran negara, namun mulai tahun 2015, dukungan keuangan diganti. Semenjak itu, dukungan insentif diberikan dengan menggunakan pungutan ekspor minyak sawit dan produk turunannya untuk mengimbangi selisih harga dari perbedaan harga biodiesel dan solar. Beberapa waktu lalu, pemerintah Indonesia memberikan dana tambahan dari APBN untuk mensubsidi industri biodiesel sawit sebagai respon dari turunnya daya saing biodiesel sawit terhadap minyak solar yang terkena dampak dari pandemik COVID-19.

Sebaliknya, sejak 2016 di Indonesia tercatat tidak ada produksi dan konsumsi bahan bakar bioetanol (USDA, 2019a), walaupun pemerintah telah mendorong pemanfaatan bioetanol dengan target pencampuran sebesar 2% (E2) di beberapa kota di Indonesia (Aprobi, 2016). Gambar 2 menunjukkan bahwa konsumsi bensin di Indonesia selama periode tahun 2010-2019 terus meningkat hingga melebihi konsumsi solar di tahun 2015 dengan tingkat pertumbuhan sebesar 48%. Untuk memenuhi permintaan bahan bakar bensin, Indonesia diprediksi akan terus meningkatkan impor BBM dan penelitian memproyeksikan bahwa permintaan BBM dan impor akan mengalami terus meningkat kedepannya. (Akhmad and Amir, 2018; Mayasari and Dalimi, 2019; Shao, Miller, and Jin, 2020).



Gambar 2. Konsumsi bensin dan solar serta impor di Indonesia. Sumber: MEMR, 2018; USDA, 2019a

Cellulosic ethanol merupakan salah satu solusi potensial untuk menjamin ketersediaan dan memenuhi permintaan bensin dalam negeri, sekaligus mengurangi ketergantungan impor bahan bakar fosil. *Cellulosic ethanol* merupakan bahan bakar nabati generasi kedua yang dapat dicampur dengan bensin untuk dijadikan bioetanol. *Cellulosic ethanol* menggunakan bahan baku yang berbeda dengan etanol konvensional yang

berasal dari bahan baku sari pati dan gula. Cellulosic ethanol terbuat dari selulosa, yang merupakan salah satu bagian dari tanaman. Contoh bahan baku *cellulosic ethanol* adalah kayu, residu pertanian, seperti limbah sawit, ampas tebu dan limbah padat kota. Langkah pertama pembuatan *cellulosic ethanol* ialah dengan pemisahan komponen lignin dari selulosa dan hemiselulosa, yang kemudian melalui proses hidrolisis selulosa menggunakan enzim untuk memecah selulosa menjadi gula. Selanjutnya, gula akan difermentasi dengan ragi yang kemudian menghasilkan etanol. Langkah kedua ini identik dengan proses produksi etanol yang berasal dari sari pati dan gula. Penelitian dari Baldino et al. (2019) menjelaskan lebih detail tentang proses konversi bahan bakar.

Pemanfaatan *cellulosic ethanol* sebagai bahan baku alternatif akan memberikan cukup banyak manfaat bagi Indonesia selain dapat meningkatkan kemandirian energi dan berkurangnya impor BBM: Pertama, *cellulosic ethanol* akan membuka dan meningkatkan pasar bahan bakar bioetanol di Indonesia sehingga hal ini akan membuka lapangan kerja baru; Kedua, karena berasal dari bahan baku limbah maka pembuatan *cellulosic ethanol* tidak akan mengancam/mengganggu industri lain. Lebih dari itu, dari sisi lingkungan, pemanfaatan *cellulosic ethanol* dapat mengurangi emisi karbon gas rumah kaca lebih daripada biofuel konvensional. (Padella, O'Connell dan Prussi, 2019).

Berdasarkan manfaat tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kelayakan pemanfaatan *cellulosic ethanol* di Indonesia. Penelitian ini juga menganalisis kebutuhan biaya produksi *cellulosic ethanol* dan merumuskan pola/bentuk insentif dari pemerintah yang diperlukan untuk proses produksi *cellulosic ethanol*. Dari analisa perkiraan biaya produksi ini dapat menjadi basis penyusunan *roadmap* pengembangan dan peningkatan industri *cellulosic ethanol* di Indonesia. Dan yang terakhir, penelitian ini ingin memberikan rekomendasi kebijakan untuk pemanfaatan *cellulosic ethanol* di Indonesia.

METODOLOGI

KETERSEDIAAN BAHAN BAKU

Industri *cellulosic ethanol* diharapkan dapat memanfaatkan kelebihan residu sawit yang diproduksi dari industri minyak sawit Indonesia. Studi ICCT sebelumnya mengevaluasi residu dari proses pengolahan kelapa sawit dan residu di kebun kelapa sawit serta penggunaannya di Indonesia. Studi tersebut menemukan bahwa meskipun sebagian kecil dari residu kelapa sawit digunakan, seperti untuk perbaikan tanah dan pembangkit listrik, nyatanya sebagian besar residu sawit masih terbuang percuma padahal dapat digunakan untuk biofuel lanjutan (Paltseva et al., 2016). Kesimpulan ini sebagian didapat dari penelitian ilmu tanah bahwa limbah perkebunan kelapa sawit seperti tandan buah kosong tidak efektif sebagai mulsa. Di sisi lain, daun dari pohon kelapa sawit yang terpankas justru paling tepat untuk mulsa dan pupuk (Teh, 2016). Oleh karena itu menggunakan limbah perkebunan kelapa sawit (selain daun) sebagai bahan baku *cellulosic ethanol* dipastikan tidak akan mengganggu kinerja industri minyak kelapa sawit, industri perkebunan kelapa sawit bahkan industri lainnya.

Dalam studi ini, kami mempertimbangkan tiga jenis residu kelapa sawit sebagai bahan baku *cellulosic ethanol*:

1. Tandan buah kosong (Tankos): selubung di sekeliling buah kelapa sawit yang tersisa setelah buah diekstraksi di pabrik kelapa sawit;
2. Sabut kelapa sawit: ampas serat setelah minyak sawit ditekan dari buahnya;
3. Batang pohon kelapa sawit: batang pohon kelapa sawit yang tersisa setelah pohon kelapa sawit ditebang pada akhir umur produktivitasnya.

Pada penelitian ini, asumsi yang dipakai untuk menghitung tingkat ketersediaan bahan baku *cellulosic ethanol* berasal dari hasil penelitian Paltseva et al (2016). Potensi ketersediaan ketiga jenis limbah tersebut dihitung berdasarkan hasil produksi/ panen TBS di perkebunan kelapa sawit per hektarnya. Adapun data jumlah dan luas kebun kelapa sawit dari data statistik Indonesia tahun (2019) menggunakan data terbaru tahun 2018. Karena area perkebunan kelapa sawit di Indonesia cenderung terus meningkat, potensi ketersediaan biomassa kemungkinan akan lebih tinggi dari yang diperkirakan dalam laporan ini. Ada kemungkinan juga bahwa dengan program pemerintah dan upaya lainnya, para pekebun mandiri dapat menanam kembali perkebunan sebelum pohon kelapa sawit mereka berakhir untuk memperkenalkan varietas unggul; hal ini akan berdampak pada ketersediaan biomassa batang sawit yang lebih tinggi daripada yang kami perkirakan di sini. Tabel A1 pada Lampiran menyajikan produksi per hektar serta komposisi kimia dari ketiga jenis residu sawit. Kami tidak memperhitungkan cangkang sawit karena umumnya tidak dianggap sebagai bahan baku potensial untuk membuat *cellulosic ethanol*, juga membutuhkan biaya yang lebih tinggi daripada residu sawit lain yang dipelajari di sini.

MODEL DISCOUNT CASH FLOW

Penelitian ini menggunakan model *Discounted Cashflow* (DCF) untuk menganalisa estimasi biaya produksi *cellulosic ethanol* dan insentif pembiayaan yang dibutuhkan dalam mendukung industri ini. Model DCF memperhitungkan biaya produksi suatu produk dengan memperhitungkan nilai uang dengan dasar waktu yang berbeda. Aspek analisa model DCF terdiri dari: biaya modal; biaya operasional; dan pendapatan operasional dari penjualan produk. Biaya modal adalah investasi di muka yang diperlukan untuk membangun pabrik *cellulosic ethanol* dan persiapan untuk beroperasi. Investasi ini biasanya mencakup biaya desain, konstruksi, serta pembelian dan pemasangan peralatan. Biaya operasional adalah biaya yang dikeluarkan untuk menjalankan pabrik etanol setelah selesai dibangun, yaitu biaya pemeliharaan dan operasi tahunan yang timbul dari produksi etanol tahunan.

Analisis penelitian ini menggunakan data khusus untuk pendirian pabrik *cellulosic ethanol* dari dua studi, tekno ekonomi (Eisentraut, 2010; Humbird et al., 2011; Kugemann, 2015; Zhao et al., 2015; Cheng et al., 2019; Parbowo et al., 2019) dan pengembangan proyek (Peters, Alberici, dan Passmore, 2015; IEA Bioenergy, 2020). Khususnya, Humbird et al. (2011) memberikan analisa tekno ekonomi *cellulosic ethanol* di Amerika Serikat yang komprehensif berdasarkan proses desain *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Studi ini berguna dalam memberikan rincian perbedaan komponen biaya dan juga menjadi dasar untuk studi tekno ekonomi *cellulosic ethanol* lanjutan. Khususnya, studi dari Zhao et al. (2015) memperbaharui model DCF dari Humbird et al. (2011) dengan menyertakan parameter yang sesuai dengan situasi di Cina. Kami menggunakan studi ini untuk menyesuaikan dengan kondisi negara berkembang. Peters, Alberici dan Passmore (2015) mengumpulkan data rincian dan estimasi biaya dari hasil wawancara dengan pelaku Industri di Amerika Serikat dan Eropa serta dari kajian pustaka. Kombinasi studi tersebut sangat membantu dan menjadi acuan penelitian ini. Namun, karena data dari kedua penelitian tersebut diatas berdasarkan pendirian proyek di Amerika Serikat, maka dalam penelitian ini kami melakukan penyesuaian data yang mencerminkan realitas kasus di Indonesia. Secara khusus, kami mengasumsikan bahwa biaya konstruksi, tanah dan tenaga kerja di Indonesia lebih rendah. Kami memberikan detail lebih lanjut tentang penyesuaian tersebut dalam penjelasan di bawah. Untuk semua data biaya yang diperoleh dari studi dan proyek tahun sebelumnya, kami mengubah nilainya menurut harga saat ini untuk memperhitungkan faktor inflasi.

Tabel 1 menampilkan asumsi pada pendirian pabrik dan parameter kunci dari model DCF. Berdasarkan tinjauan dari proyek *cellulosic ethanol* lainnya, diasumsikan pembuatan desain dan konstruksi pabrik akan memakan waktu 3 tahun dan butuh 2 tahun lagi agar fasilitas dapat meningkatkan kapasitasnya secara maksimal. Kapasitas maksimal yang dimaksud ialah pabrik dengan kapasitas produksi 55.000 ton (70 juta liter) etanol per tahun. Perlu diperhatikan bahwa asumsi untuk peningkatan kapasitas pabrik berbeda-beda dari studi dan proyek yang telah ada, bisa berkisar beberapa bulan hingga beberapa tahun. Hal ini disebabkan adanya perbedaan pada teknik *pre-treatment* yang digunakan untuk bahan baku yang berbeda, serta juga permasalahan yang tidak sengaja timbul saat *pre-treatment* sehingga hal ini berdampak pada dibutuhkan waktu yang cukup lama untuk peningkatan kapasitas pada beberapa proyek yang sudah ada (Pavlenko, 2018; Baldino et al., 2019). Analisis kami memperkirakan lama umur pabrik (termasuk fase peningkatan) umumnya adalah 20 tahun. Terdapat sejumlah parameter dalam mengukur/menghitung arus kas. Analisis DCF memperkirakan biaya produksi pada nilai saat ini; maka dengan menggunakan *discount rate* kami melakukan konversi penerimaan arus kas pada masa mendatang ke dalam nilai saat ini. *Discount rate* yang digunakan adalah sebesar 10%, sama dengan studi DCF lainnya untuk biofuel/BBN. Penelitian ini juga menghitung penyusutan (depresiasi) nilai aset atau investasi modal. Umur pabrik etanol adalah 20 tahun di Indonesia dengan nilai penyusutan 5% menggunakan metode garis lurus (PWC, 2019). Penelitian ini juga memperhitungkan tingkat inflasi untuk memperhitungkan kenaikan harga secara umum di masa mendatang. Terakhir, pajak penghasilan perusahaan diperhitungkan sekitar 25% di Indonesia (PWC, 2019).

Tabel 1. Asumsi pabrik *cellulosic ethanol* dan parameter kunci dalam model DCF

Parameter	Indikator		Sumber
Waktu pembuatan design dan konstruksi	3 tahun		Peters, Alberici, and Passmore, 2015; Pavlenko, 2018; Pavlenko, Searle, and Baldino, 2019; Pavlenko and Searle, 2019
Masa peningkatan pabrik	5 tahun		
Persentase kapasitas pabrik selama fase peningkatan	tahun 1	tahun 2	
	50%	75%	
Umur Pabrik	20 years		
Kapasitas Pabrik	55,000 tonnes (= 70 juta liter) produksi etanol per tahun		
Discount rate	10%		Humbird et al., 2011; Peters, Alberici, and Passmore, 2015
Penyusutan	5% (straight-line method)		PWC, 2019
Inflasi	3%		Trading Economics, 2020
PPH Perusahaan	25%		PWC, 2019

Biaya modal

Biaya modal (CAPEX), yaitu investasi di muka, memerlukan banyak komponen termasuk lahan, pengembangan situs, konstruksi, pembelian dan pemasangan peralatan, modal kerja, dan beberapa biaya lainnya. Tabel A2 di Lampiran memberikan tata letak rinci dari komponen CAPEX dalam analisis kami. Mengikuti metodologi dari Humbird et al. (2011), total biaya pembelian peralatan merupakan titik awal estimasi CAPEX karena komponen CAPEX lainnya sebanding dengan total biaya pembelian peralatan. Dataset oleh Peters, Alberici, dan Passmore (2015) menyediakan biaya pembelian peralatan per unit untuk dua proyek AS dan UE dengan kapasitas pabrik yang sama seperti yang diasumsikan dalam studi ini, sekitar 1,08 USD per kapasitas etanol liter tahunan (sesuai nilai dolar 2020) (Peters, Alberici, dan Passmore, 2015). Kami berasumsi bahwa Indonesia akan mengimpor peralatan dari UE dan dengan demikian tidak melakukan penyesuaian apa pun pada biaya pembelian unit peralatan. Kami mengalikan biaya unit dengan kapasitas pabrik 70 juta liter etanol dalam asumsi kami (Tabel 1) untuk memperkirakan total biaya pembelian peralatan. Karena peralatan kemungkinan besar perlu diimpor, tarif perdagangan dan biaya pengiriman sudah termasuk dalam CAPEX. Dengan asumsi peralatan diimpor dari UE, kami menemukan bahwa bea ekspor untuk mesin adalah 1,7% dari nilai produk yang diekspor (European Commission, 2020). Bea masuk impor mesin Indonesia adalah 5% dari nilai produk impor (International Trade Center, 2020). Jadi, kami mengasumsikan total tarif sebesar 6,7% untuk impor peralatan. Kami mengasumsikan biaya pengiriman barang dan asuransi menjadi 10% dari biaya pembelian peralatan (OECD / WTO, 2017). Untuk komponen CAPEX lainnya, kami menggunakan rasio yang sama antara biaya setiap komponen dengan biaya pembelian peralatan seperti yang diberikan dalam Humbird et al. (2011), kecuali biaya pemasangan peralatan; untuk komponen ini kami menurunkan biaya pemasangan dari rasio 50% dari biaya pembelian peralatan menjadi 39% mengikuti Zhao et al. (2015) untuk memperhitungkan perbedaan regional antara negara maju dan berkembang, termasuk perbedaan biaya tenaga kerja. Demikian pula kami juga melakukan penyesuaian pada komponen CAPEX lainnya dengan mengambil rasio biaya konstruksi pabrik berteknologi tinggi antara Amerika Serikat dan Indonesia dari studi oleh Turner & Townsend (2019) sebagai faktor *downscaling*. Kami menggunakan biaya tanah untuk membangun pabrik biofuel canggih serupa di Indonesia dari Parbowo et al. (2019). Kami mengasumsikan CAPEX yang sama di tiga jenis bahan baku dalam studi ini.

Biaya operasional

Biaya operasional terdiri dari biaya operasional tetap (tenaga kerja dan pemeliharaan) dan biaya operasional variabel (bahan baku dan input bahan). Biaya operasional tetap

dibutuhkan tanpa memperdulikan apakah pabrik beroperasi dalam kapasitas penuhnya atau tidak dan kami menganggap biaya ini, seperti CAPEX, tidak berbeda ketika menggunakan berbagai jenis residu kelapa sawit sebagai bahan baku. Mirip dengan perhitungan CAPEX, kami menggunakan metodologi campuran dari studi Humbird et al. (2011) dan Zhao et al. (2015) untuk lebih mencerminkan biaya dari negara ekonomi berkembang. Secara khusus, kami menurunkan gaji karyawan dari studi Humbird et al. (2011) menggunakan selisih biaya tenaga kerja antara Amerika Serikat dan Indonesia dari studi Turner & Townsend (2019). Kami mengasumsikan beban tenaga kerja, termasuk biaya pengupahan, keperluan umum, layanan keamanan dan kebersihan, dan lainnya, menjadi 40% dari gaji karyawan seperti dalam studi Zhao et al. (2015), bukannya 90% dalam studi Humbird et al. (2011). Kami mengikuti metodologi dari studi Humbird et al. (2011) untuk memperkirakan biaya pemeliharaan dan biaya lain-lain seperti asuransi properti.

Berbeda dengan biaya operasional tetap, biaya operasional variabel tergantung pada jumlah produksi etanol per tahun. Biaya variabel mencakup biaya pembelian bahan baku dan jumlahnya bervariasi tergantung pada jenis bahan baku. Biaya variabel juga mencakup biaya enzim, energi, dan air. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan harga dan konsumsi bahan bakunya serta bahan input lainnya seperti enzim, energi dan air. Tabel 2 menunjukkan detail data jumlah bahan baku yang dibutuhkan dan biaya bahan baku dari tiga macam bahan baku. Kami juga menambahkan biaya pengiriman bahan baku ke fasilitas atau pabrik etanol, dimana biaya tersebut terbagi dalam tiga komponen—harga di tingkat petani, biaya pemuatan bahan baku, dan biaya transportasi bahan baku. Terdapat beberapa studi yang memberikan detail harga beli di tingkat petani untuk bahan baku tandan kosong kelapa sawit dan serat sawit di Indonesia dan studi kami mengambil harga rata-ratanya. Namun, kami tidak mendapatkan data harga beli di petani untuk bahan baku batang pohon kelapa sawit. Berdasarkan penemuan tersebut dan studi sebelumnya (Paltseva et al., 2016), kami berkesimpulan bahwa batang pohon kelapa sawit biasanya tidak digunakan atau dianggap sebagai komoditas di Indonesia dan kami berasumsi tidak memiliki harga beli di tingkat petani. Reeb et al. (2014) mengembangkan model perhitungan biaya logistik dan transportasi limbah kelapa sawit; kami mengadopsi perhitungan tersebut untuk memperkirakan biaya ini dan menambahkannya ke harga bahan baku di tingkat petani untuk menghitung biaya pengiriman bahan baku akhir. Konsumsi setiap bahan baku diperkirakan sesuai dengan ethanol yield dari masing-masing bahan baku (Tabel 2). Studi umumnya memberikan hasil etanol per unit biomassa kering. Oleh karena itu, untuk mendapatkan jumlah aktual bahan baku yang dikonsumsi per liter etanol yang diproduksi untuk menerapkan perkiraan harga bahan baku, yang biasanya dalam biomassa basah, kami memperhitungkan kadar air untuk setiap bahan baku (Tabel 2).

Tabel 2. Biaya, ethanol yield, dan kadar air dari bahan baku dalam studi ini

	Batang Pohon Kelapa Sawit	Tandang Kosong Kelapa Sawit	Serat Sawit	Sumber
Harga bahan baku di petani	0	Rp.146/kg (0,01 USD/kg)	Rp.280/kg (0,02 USD/kg)	
Biaya pemuatan bahan baku		Rp77/kg (0,005 USD/kg)		Reeb et al., 2014; Kresnowati, Mardawati, and Setiadi, 2015; Afifah, Sriyoto, and Sumantri, 2016; Alamsyah, and Supriatna, 2018; Erivianto, 2018; Parbowo et al., 2019
Biaya transportasi bahan baku		Rp.327/kg (0,02 USD/kg)		
Biaya pengiriman bahan baku	Rp.404/kg (0,03 USD/kg)	Rp.550/kg (0,04 USD/kg)	Rp.684/kg (0,05 USD/kg)	
ethanol yield (g ethanol /g biomassa kering)	0,25	0,14	0,08	Joseph, 2010; Prawitwong et al., 2012; Geng, 2013; Emo et al., 2015; Elgharbawy et al., 2018; Pangsang et al., 2019
Kadar air	71%	65%	40%	Sudiyani et al., 2013; Paltseva et al., 2016

Selain biaya bahan baku, biaya operasional variabel juga mencakup biaya input bahan, seperti bahan kimia, energi, dan air yang diperlukan untuk mengubah biomassa selulosa menjadi etanol. Kami mengambil perkiraan konsumsi input material lain untuk produksi *cellulosic ethanol* dari Model *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation* (GREET). Bahan baku selulosa yang dimodelkan dalam GREET mencakup residu pertanian seperti brangkasan jagung, tanaman energi seperti *Miscanthus*, residu hutan, dan biomassa kayu seperti poplar. GREET tidak memberikan data khusus untuk residu sawit. Namun, kami menemukan bahwa default dari input material tidak berbeda jauh diantara bahan-bahan baku tersebut karena GREET menggunakan asumsi yang sama untuk pra-pengolahan dan produksi etanol. Oleh karena itu, kami menggunakan data default GREET untuk poplar dalam memperkirakan jumlah konsumsi setiap input material dalam penelitian ini. Kami mengumpulkan harga setiap bahan kimia dari studi sebelumnya (The Glostest Associates, 2010; Tao et al., 2017). Kami memperkirakan Indonesia akan mengimpor enzim dari negara lain dan dengan demikian memasukkan jumlah tarif perdagangan - 6,3% dari bea ekspor dari Eropa (European Commission, 2020) dan 0 bea masuk oleh Indonesia (International Trade Center, 2020) - dan biaya pengiriman - 10% dari biaya pembelian enzim (OECD / WTO, 2017). Untuk energi dan air, kami mengambil harga spesifik sektor industri di Indonesia. Kami memberikan rincian kuantitas input material dan harga satuan pada Tabel A4 di Lampiran.

Pendapatan

Pendapatan utama pabrik *cellulosic ethanol* adalah penjualan etanol ke BU BBM (SPBU). Selain pendapatan dari penjualan etanol, fasilitas *cellulosic ethanol* juga dapat memperoleh penghasilan dari menjual surplus listrik yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, bahan baku selulosa mengandung lignin dan selulosa. Lignin adalah salah satu bagian dari tanaman, terutamanya di dalam kayu, yang tidak bisa dikonversi menjadi gula dan oleh sebab itu tidak bisa diubah menjadi *cellulosic ethanol*. Lignin merupakan produk bernilai rendah dan biasanya hanya dibakar untuk menghasilkan energi. Asumsi kami yakni lignin dapat digunakan untuk menghasilkan panas dan listrik untuk digunakan pabrik *cellulosic ethanol* dan surplus listriknya dapat dijual. Model GREET juga memperhitungkan *output* listrik sebagai produk sampingan fasilitas *cellulosic ethanol*. Kemudian, apabila melihat harga *wholesale* listrik di Indonesia, maka penelitian ini dapat memperkirakan pendapatan dari penjualan listrik.

Penentuan biaya produksi dan insentif pemerintah

Dari hasil pemodelan DCF, kami menghitung biaya produksi yang diratakan, yakni harga minimum penjualan untuk menentukan *Break Even Point* (BEP). Secara khusus, biaya produksi yang diratakan di sini merupakan harga bersih (net) saat ini dari biaya produksi satu liter *cellulosic ethanol* yang telah mencakup perhitungan nilai investasi untuk membangun pabrik (biaya modal), menjalankan produksi (biaya operasional) dan pendapatan dari penjualan etanol, termasuk pendapatan penjualan listrik. Dari perhitungan ini, kami memperkirakan nilai insentif yang harus diberikan pemerintah misalnya melalui pemberian subsidi agar proyek investasi *cellulosic ethanol* mencapai BEP. Nilai insentif yang diperlukan dihitung dari selisih biaya produksi dengan harga *wholesale ethanol* yang sebanding dengan harga jual bensin sesuai dengan basis energi yang setara. Etanol memiliki kepadatan yang lebih rendah dibandingkan dengan bensin, sehingga untuk jarak tempuh yang sama sebuah mobil membutuhkan 1,5 liter etanol, sedangkan jika menggunakan bensin hanya membutuhkan 1 liter. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan bahwa etanol harus dijual lebih murah dari harga *wholesale* bensin karena Indonesia mengimpor bensin dari Singapura dalam jumlah yang besar, maka kami menggunakan harga bensin *Free on Board* (FOB) Singapura untuk mewakili harga *wholesale* bensin di Indonesia. Di antara tingkatan bensin yang berbeda, kami memperkirakan bensin RON 92 akan digunakan paling banyak di Indonesia dan karenanya menggunakan harga tingkatan tersebut dalam penelitian

ini. Kami mengambil harga RON 92 FOB Singapura antara 2017 dan 2019 dari OPEC (2020), dan menggunakan rata-ratanya untuk studi ini.

DEPLOYMENT MODEL UNTUK *CELLULOSIC ETHANOL*

Apabila model DCF dapat kita gunakan untuk menganalisis biaya produksi, kami menggunakan deployment model sebagai simulasi atau *roadmap* pengembangan industri *cellulosic ethanol* di Indonesia. Dalam deployment model ini, diskenariokan terdapat dua tahap pembangunan industri *cellulosic ethanol* dalam jangka waktu 20 tahun kedepan. Pada tahap pertama, Indonesia secara agresif membangun 10 pabrik *cellulosic ethanol*. Perlu diketahui bahwa saat ini kurang dari 10 pabrik *cellulosic ethanol* yang beroperasi di dunia (Padella, O'Connell dan Prussi, 2019), jadi skenario ini dapat dikatakan merupakan proyek yang ambisius. Setelah pabrik-pabrik tersebut mencapai kapasitas produksi penuh, teknologi yang diterapkan dan industri tersebut terbukti memiliki nilai keekonomian yang layak, sehingga biaya produksi etanol akan menurun. Oleh karena itu, pada tahap kedua bisa berdiri 20 pabrik lagi karena resiko kegagalannya menjadi rendah. Kami menggunakan asumsi data pada Tabel 1 untuk pendirian 30 pabrik *cellulosic ethanol* gelombang pertama dan kedua.

HASIL PENELITIAN

Kami telah merangkum biaya menurut Model DCF dan juga rentang dari penelitian sebelumnya dalam Tabel 3. Kami memperkirakan total biaya pendirian pabrik *cellulosic ethanol* di Indonesia dengan kapasitas 55 ribu ton adalah Rp 2,860 miliar (204 juta USD). Biaya produksi tahunan per 1 liter etanol sebesar Rp 41.022 (2,93 USD). Biaya ini lebih rendah dibandingkan perhitungan dari penelitian-penelitian lain. Perbedaan ini terjadi karena dalam penelitian-penelitian lain asumsi biaya yang digunakan yakni apabila pabrik tersebut didirikan di Amerika Serikat atau Eropa, sementara penelitian ini menggunakan asumsi biaya di Indonesia dimana beberapa komponen biaya seperti biaya konstruksi dan tanah relatif lebih murah. Tabel 2 di Lampiran memberikan perhitungan yang lebih detail untuk komponen-komponen CAPEX.

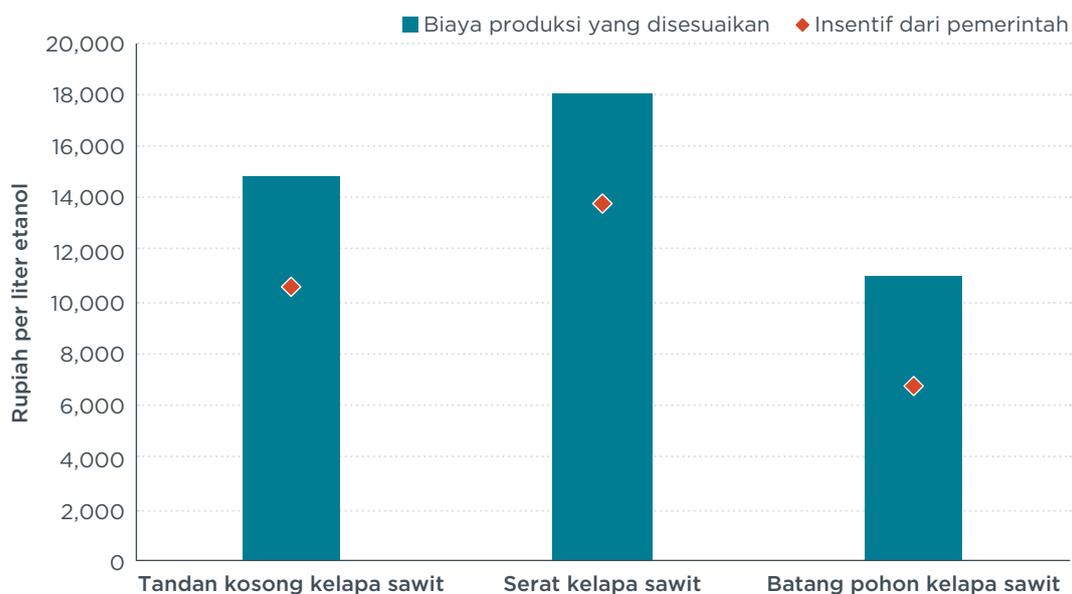
Dalam penelitian ini, total biaya operasional (tenaga kerja dan pemeliharaan) sebesar Rp 57,7 miliar (4 juta USD) per tahun atau Rp 828 (0,06 USD) per liter. Nilai ini juga lebih murah dibandingkan perhitungan dari penelitian lainnya karena biaya tenaga kerja di Indonesia lebih rendah. Tabel A3 pada bagian Lampiran memberikan rincian biaya variabel tetap. Untuk biaya variabel (penggunaan bahan baku dan input produksi lainnya) per 1 liter etanol adalah sebesar Rp 7.000 – Rp 13.860 (0,5 – 0,99 USD), hal ini tergantung jenis bahan baku yang digunakan. Batang pohon kelapa sawit adalah jenis bahan baku yang paling murah serta memiliki *ethanol yield* yang lebih tinggi, sehingga konsumsi bahan bakunya lebih sedikit dibanding limbah kelapa sawit lainnya. Secara keseluruhan, rentang biaya operasional variabel antara Rp 317 – Rp 12.908 (0,02 USD – 0,95 USD) per liter. Kisaran biaya operasional ini berada di dalam kisaran perkiraan sebelumnya. Hal ini dikarenakan asumsi dalam penelitian ini menggunakan berbagai macam bahan baku. Misalnya, beberapa studi menganggap limbah sebagai bahan baku dan berasumsi tidak ada biaya pembelian bahan baku, sementara itu sebagian besar studi memasukkan biaya bahan baku dengan menghitung biaya tenaga kerja dan penggunaan mesin untuk mengumpulkan bahan baku tersebut. Penelitian menggunakan asumsi biaya bahan baku proporsinya mencapai mulai dari 55% (jika menggunakan batang sawit) hingga 75% (jika menggunakan sabut sawit) dari total biaya operasional, termasuk di dalamnya biaya tetap dan variabel. Hasil temuan dalam studi ini konsisten dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang juga menyimpulkan bahwa bahan baku merupakan komponen biaya yang paling besar (Humbird et al., 2011; Cheng et al., 2019; Padella, O' Connel dan Prussi, 2019; IEA Bioenergy, 2020). Disamping itu, juga perlu diketahui bahwa total biaya produksi *cellulosic ethanol* sangat sensitif terhadap biaya bahan baku.

Tabel 3. Modal etanol per liter, operasional, dan total biaya produksi yang disesuaikan untuk perkiraan bahan baku dalam penelitian ini, dibandingkan dengan kisaran perkiraan untuk *cellulosic ethanol* dari penelitian lain.

Biaya dalam Rupiah (Rp) per liter (USD per liter)	Batang pohon kelapa sawit	Tandan kosong kelapa sawit	Serat kelapa sawit	Kisaran dari penelitian lain
Biaya modal (capital cost)		Rp 41.022 (2,93 USD)		Rp23.784 – Rp78.013 (1,75 – 5,75 USD)
biaya tetap operasional tahunan		Rp 828 (0,06 USD)		Rp645 – Rp.5.034 (0,03 – 0,37 USD)
biaya variabel operasional tahunan	Rp 7.000 (0,5 USD)	Rp 11.480 (0,82 USD)	Rp 13.860 (0,99 USD)	Rp317 – Rp12.908 (0,02 – 0,95 USD)
Biaya produksi yang disesuaikan (Levelized production cost)	Rp10.970 (0,78 USD)	Rp14.798 (1,06 USD)	Rp. 18.077 (1,29 USD)	Rp 7.054 – Rp 21.163 (0,52 – 1,56 USD)

Sumber: Eisentraut, 2010; Humbird et al., 2011; Diep et al., 2012; Kugemann, 2015; Peters, Alberici, and Passmore, 2015; Zhao et al., 2015; Cheng et al., 2019; Parbowo et al., 2019; IEA Bioenergy, 2020

Gambar 3 menunjukkan biaya produksi yang telah disesuaikan dan besarnya insentif dari pemerintah yang dibutuhkan agar pabrik *cellulosic ethanol* bisa mencapai BEP yang direncanakan. Limbah batang pohon kelapa sawit memiliki biaya produksi yang paling rendah dibandingkan limbah kelapa sawit lainnya (tabel 3). Oleh karena itu, menggunakan limbah batang pohon kelapa sawit menjadikan biaya produksi rendah dan membuat insentif pemerintah yang dibutuhkan menjadi rendah, yakni sebesar Rp 6.720 (0,48 USD) per liter etanol. Sementara jika menggunakan limbah tankos kelapa sawit dan sabut kelapa sawit sebagai bahan baku membutuhkan insentif yang lebih besar, masing-masing sebesar Rp 10,548 (0,75 USD) dan Rp 13,827 (0,99 USD) per liter etanol agar industri ini bisa bersaing dengan harga bensin di Indonesia.

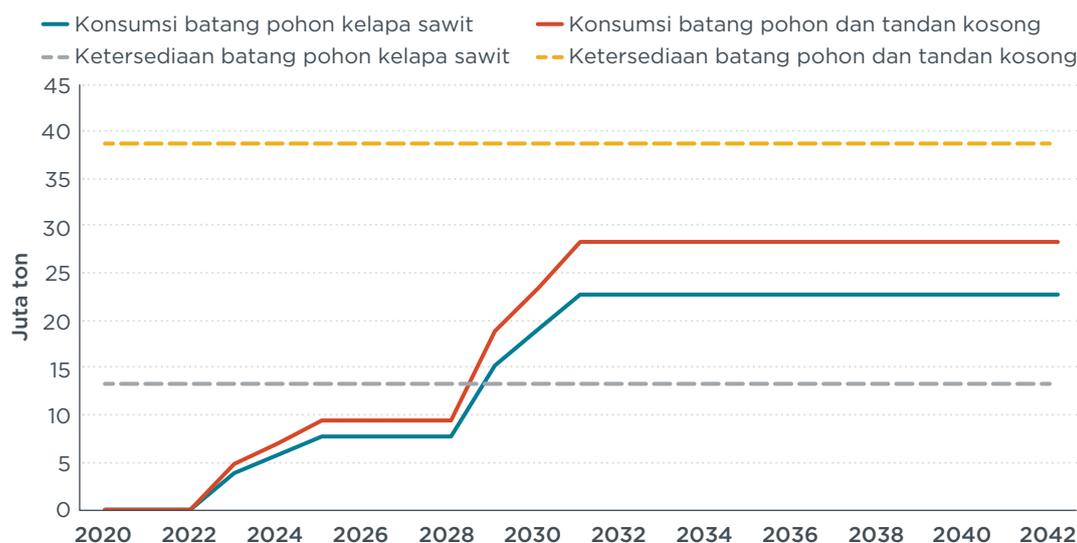


Gambar 3. Biaya produksi yang disesuaikan dan insentif pemerintah yang diperlukan untuk mencapai BEP investasi

Tabel 4 menunjukkan jumlah bahan baku yang dibutuhkan untuk mendukung pabrik *cellulosic ethanol* dengan kapasitas 55.000 ton jika menggunakan satu bahan baku tunggal, luas perkebunan kelapa sawit yang diperlukan untuk memproduksi bahan baku tersebut, dan area tersebut sebagai bagian dari total luas perkebunan sawit Indonesia. Jika melihat karakteristik ketiga bahan baku tersebut, maka bisa diduga Indonesia akan mengutamakan penggunaan bahan baku batang pohon kelapa sawit, baru kemudian tankos kelapa sawit. Gambar 3 menunjukkan komparasi kami terkait jumlah ketersediaan kedua bahan baku (batang dan tankos) dari studi Paltseva et al. (2016) dengan jumlah yang diperlukan untuk mendukung produksi *cellulosic ethanol* secara penuh sesuai dengan deployment model yang kita pakai. Kami memperkirakan sekitar 13 juta ton basah batang pohon kelapa sawit per tahun tersedia dan dapat memasok bahan baku 17 pabrik *cellulosic ethanol* dengan kapasitas produksi 55.000 ton. Jumlah ketersediaan bahan baku ini tentunya tidak akan cukup jika untuk memasok 30 pabrik *cellulosic ethanol* apabila semua pabrik tersebut beroperasi penuh pada 2031. Oleh karena itu untuk memenuhi kekurangannya digunakan tankos kelapa sawit. Namun, jika industri perkebunan kelapa sawit terus berkembang maka ketersediaan batang pohon kelapa sawit akan mencukupi untuk memasok ke 30 pabrik tersebut.

Tabel 4. Jumlah bahan baku dan area perkebunan kelapa sawit yang dibutuhkan untuk memenuhi *cellulosic ethanol* berkapasitas 55.000 ton menggunakan bahan baku yang berbeda

Kuantitas yang dibutuhkan untuk 55.000 ton pabrik	Batang Pohon Kelapa Sawit	Tandan kosong kelapa sawit	Serat Kelapa Sawit
Bahan Baku (Juta ton kering)	0,22	0,39	0,69
Area kebun sawit (Juta ha)	0,24	0,25	0,86
Proporsi dari total perkebunan kelapa sawit	2,35%	2,36%	8,26%

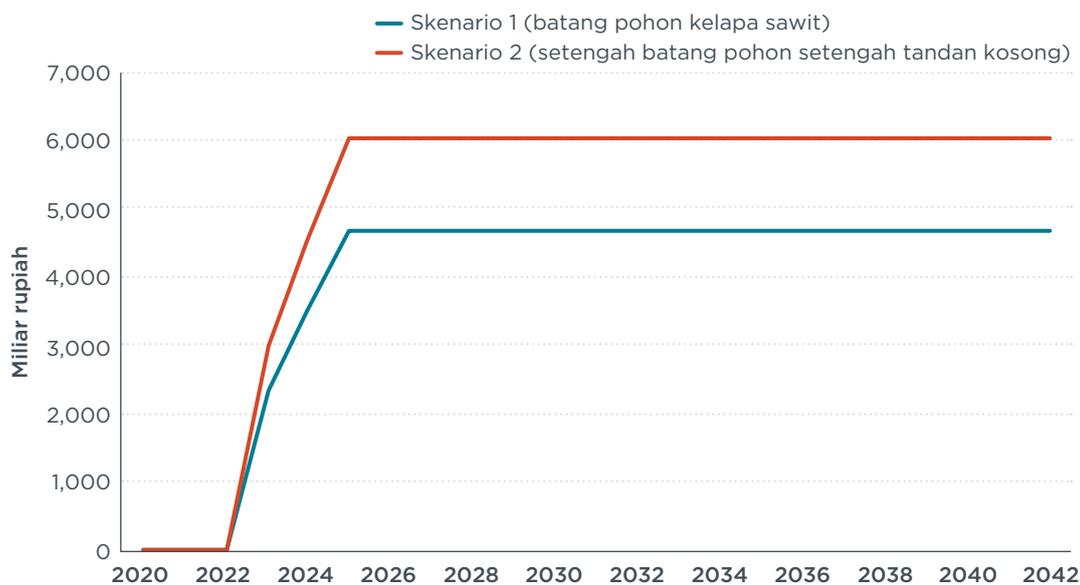


Gambar 4. Ketersediaan (saat ini) batang sawit dan tandan kosong sawit tahunan yang berkelanjutan dibandingkan dengan jumlah bahan baku yang dibutuhkan untuk memasok industri *cellulosic ethanol* sesuai dengan penerapan deployment model

Penelitian ini menggunakan dua skenario untuk pemanfaatan dua jenis bahan baku tersebut karena kedua bahan baku (batang sawit dan tankos) tersebut akan dibutuhkan. Skenario pertama adalah menggunakan seluruh batang pohon kelapa sawit yang ada untuk 17 pabrik dan kemudian berganti menggunakan tandan kosong. Hal ini berarti 10 pabrik dari tahap pertama akan menggunakan batang pohon kelapa sawit. Kemudian untuk pabrik tahap kedua, 7 pabrik menggunakan batang pohon kelapa sawit dan sisanya menggunakan tankos. Pada skenario kedua, seluruh 30 pabrik menggunakan setengah bahan baku batang pohon kelapa sawit dan setengah menggunakan tandan kosong. Skenario ini dapat dilihat pada “*Trunk & PEFB consumption*” di Gambar 3. Skenario ini mempertimbangkan kemungkinan apabila tidak dapat menghabiskan batang pohon kelapa sawit sebelum menggunakan tankos. Asumsi jumlah ketersediaan 13 juta basah batang pohon kelapa sawit ini adalah hasil hitungan kotor dari limbah batang pohon kelapa sawit yang ditebang setiap tahunnya di Indonesia, tetapi belum tentu bisa terkumpul sejumlah itu untuk digunakan sebagai bahan baku produksi *cellulosic ethanol*. Karena bisa saja sebagian dari jumlah itu berada di daerah terpencil yang butuh upaya sangat ekstra seandainya mau diangkut ke pabrik *cellulosic ethanol*.

Atas kemungkinan-kemungkinan tersebut, penelitian ini mengevaluasi berbagai skenario pemanfaatan bahan baku yang berpengaruh besar terhadap besarnya insentif yang harus disediakan pemerintah. Kami mengevaluasi skenario (1) insentif dengan pemberian subsidi tahunan dan (2) hibah dimuka untuk menutup sebagian biaya konstruksi. Gambar 4 menunjukkan jumlah subsidi tahunan yang dibutuhkan pabrik

cellulosic ethanol tahap pertama sesuai dengan kedua skenario deployment. Jumlah subsidi yang diperlukan diperkirakan terus meningkat seiring dengan peningkatan produksi *cellulosic ethanol*. Ketika 10 pabrik *cellulosic ethanol* tahap pertama tersebut berproduksi secara maksimal maka subsidi tahunan yang diperlukan sebesar Rp 4,7 triliun (0,3 miliar USD), dengan catatan hanya menggunakan bahan baku batang pohon kelapa sawit saja. Kemudian, jika menggunakan setengah batang pohon kelapa sawit dan setengah tankos maka subsidi tahunan akan menjadi Rp 6 triliun (0,4 miliar USD). Sebagai perbandingan, subsidi tahunan yang diberikan ke industri Biodiesel pada tahun 2015 - 2019 rata-rata mencapai Rp 7,6 triliun (543 juta USD) (Hariandja, 2020). Subsidi di tahun 2020 kemungkinan akan jauh lebih tinggi karena dukungan pemerintah terkait krisis COVID-19 (Ministry of Finance, 2020). Sementara itu, Tabel 5 memberikan gambaran apabila menggunakan insentif pemberian hibah dimuka untuk kedua skenario penggunaan bahan baku. Untuk mendukung 10 pabrik *cellulosic ethanol* tahap pertama, jumlah total hibah yang dibutuhkan mencapai 90 triliun (6,4 miliar USD) bila menggunakan bahan baku batang pohon kelapa sawit saja; dan sebesar Rp 116 triliun (8,3 miliar USD) jika menggunakan setengah batang sawit dan setengah tankos. Terkait dua pilihan kebijakan tersebut, kami memperkirakan bahwa dukungan pemerintah hanya dibutuhkan pada awal pendirian pabrik, yakni pada tahap pertama. Sementara, pada tahap kedua atau sepuluh tahun kemudian, industri tersebut kemungkinan besar akan terbukti layak secara ekonomi, dan insentif tidak akan diperlukan.



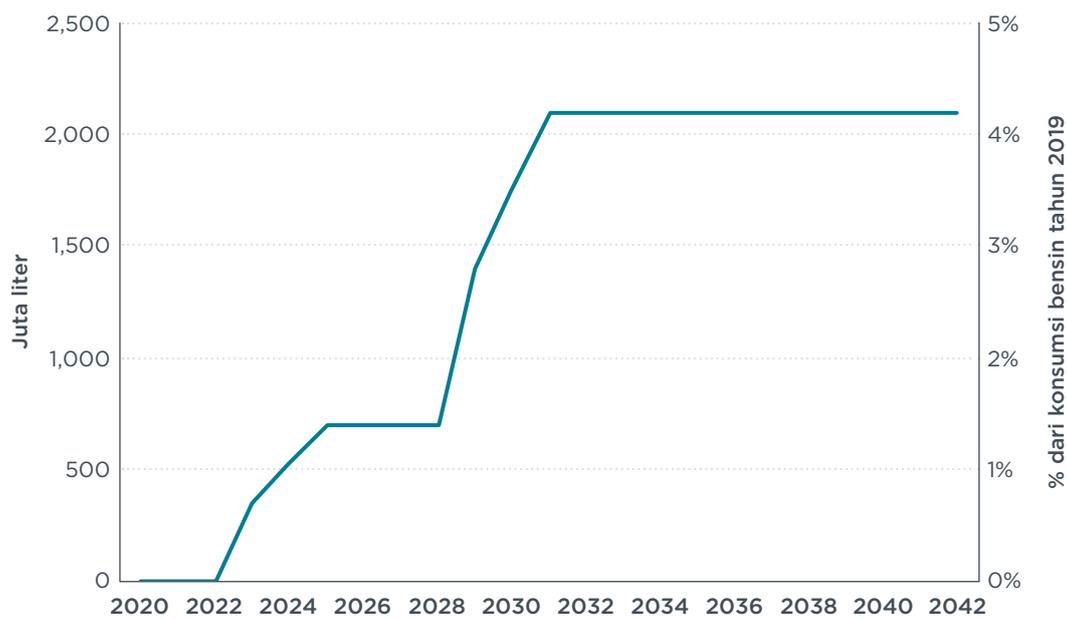
Gambar 5. Subsidi tahunan untuk mendukung industri *cellulosic ethanol*

Tabel 4. Hibah di muka diperlukan untuk mendukung industri *cellulosic ethanol*

Skenario	Pembiayaan (hibah) yang dibutuhkan
Skenario 1 (batang sawit saja)	Rp.90 triliun (6,4 miliar USD)
Skenario 2 (50% batang sawit + 50% tankos)	Rp.116 triliun (8,3 miliar USD)

Gambar 5 menunjukkan jumlah produksi *cellulosic ethanol* per tahun (berdasarkan asumsi studi) dan persentase permintaan bensin yang dapat disubstitusi. Pada tahun 2031, jika 30 fasilitas dari tahap pertama dan tahap kedua berproduksi pada kapasitas penuh, setidaknya akan menghasilkan sekitar 2,100 juta liter etanol setiap tahunnya (setara dengan 1,400 juta liter bensin) atau setara dengan 4% dari total permintaan bensin Indonesia pada tahun 2019 (USDA, 2019). Namun, mengingat jumlah permintaan

bensin di Indonesia kemungkinan terus meningkat, persentase jumlah *cellulosic ethanol* tersebut kemungkinan menjadi lebih rendah dari yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Jumlah produksi *cellulosic ethanol* tahunan dan persentase permintaan bensin tahun 2019

DISKUSI

Indonesia memiliki peluang yang sangat luas dalam memanfaatkan potensi sumber daya domestiknya untuk memproduksi *cellulosic ethanol*. Pengembangan *cellulosic ethanol* dapat menjadi solusi untuk mencapai target prioritas negara seperti: pengembangan energi baru terbarukan; mewujudkan kemandirian energi; memperluas kesempatan usaha/pekerjaan dan memberikan manfaat pada ekonomi; pengelolaan limbah; dan mitigasi perubahan iklim. Berbeda dengan negara lain, Indonesia memiliki ketersediaan bahan baku (biomassa sawit) yang murah dan mudah didapatkan. Dari analisis perhitungan penelitian ini, Indonesia memiliki peluang dapat mensubstitusi sebesar 4% konsumsi bensinnya dengan *cellulosic ethanol* dengan biaya produksi yang relatif rendah.

Beberapa negara mengalami kesulitan dalam memanfaatkan *cellulosic ethanol* sebagai bahan bakar alternatif. Hanya sedikit proyek yang terbilang sukses; kurang dari 10 pabrik *cellulosic ethanol* yang beroperasi dalam skala komersial dan produksi *cellulosic ethanol* dunia dalam beberapa tahun terakhir tercatat sekitar 125 juta liter, meskipun kapasitas yang terbangun lebih tinggi dari jumlah ini (USDA, 2019b; USDA, 2019c; USDA, 2019d; EPA, 2020). Hambatan utama proyek baru *cellulosic ethanol* adalah biaya produksi yang relatif tinggi. Secara khusus, banyak pengembang proyek menganggap ketersediaan modal sebagai penghalang terbesar. *Cellulosic ethanol* memiliki biaya di muka yang tinggi, yang dapat menghalangi investasi, terutama untuk teknologi baru yang belum terbukti pada skala komersial (Peters, Alberici, dan Passmore, 2015).

Tantangan finansial merupakan hal yang biasa ditemui dalam upaya pengembangan teknologi baru dan canggih, tidak hanya dihadapi oleh industri *cellulosic ethanol* saja. Salah satu strategi efektif untuk menghadapi tantangan tersebut adalah dukungan kebijakan dari pemerintah. Khususnya, insentif finansial tidak hanya membantu meringankan hambatan finansial dalam pembangunan proyek-proyek padat modal, namun juga menjadi sinyal kuat adanya kemauan politik pemerintah untuk mempromosikan pengembangan industri, dimana dapat menjadi pemicu daya tarik bagi investor (Zhou et al., 2020).

Berdasarkan penelitian ini, kami melihat dua opsi insentif kebijakan yang dapat dijalankan pemerintah, yaitu subsidi tahunan atau bantuan hibah di muka. Kedua jenis dukungan kebijakan ini sangat umum dilakukan, dan akan berjalan dengan baik secara teori. Pemberian subsidi per unit produksi per tahun akan menjadi daya tarik investor karena investasi yang dilakukan pada tahun-tahun mendatang dapat terbayar kembali. Sementara itu, untuk dukungan kebijakan berupa pemberian bantuan hibah di muka, hal ini akan meringankan pengeluaran investasi awal dan membuat proyek secara finansial dapat dijalankan. Umumnya, pemberian bantuan hibah di muka dianggap lebih efektif dalam menarik investasi dari luar dikarenakan investor akan merasa lebih aman dengan tersedianya uang di muka, sementara untuk subsidi tahunan, selalu ada resiko subsidi dapat dicabut nantinya, menjadikan proyek *cellulosic ethanol* terbengkalai. Pemerintah Indonesia dapat merancang program subsidi yang serupa dengan subsidi biodiesel dari kelapa sawit yang saat ini diberlakukan. Dengan subsidi ini, pemerintah menentukan harga biofuel/BBN dan membayar selisih kurang dari perbedaan harga produksi biofuel/BBN dan harga BBM. Skema ini sangat efisien karena pemerintah tidak selalu membayar lebih insentif/subsidi atas perbedaan harga ke produsen. Peralnya, jika harga bensin/solar meningkat maka pembayaran selisih perbedaan harga ke produsen biofuel menjadi lebih rendah. Analisis penelitian ini tidak memproyeksikan volatilitas harga solar atau bensin di masa mendatang, kami mengasumsikan bahwa pemerintah Indonesia akan merumuskan insentif/subsidi yang polanya seperti ini yakni hanya membayar sebagian dari yang diperhitungkan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemberian insentif dengan opsi manapun untuk produksi *cellulosic ethanol* akan menjadi cara yang efisien untuk mendukung

pengembangan bahan bakar terbarukan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa setidaknya dibutuhkan anggaran biaya untuk pemberian insentif antara Rp 4,7 – 6 triliun per tahunnya untuk mendukung komersialisasi industri *cellulosic ethanol* di Indonesia,. Alokasi ini lebih rendah dibandingkan pemberian insentif untuk industri biodiesel yang mencapai rata-rata Rp 7,6 triliun per tahun dalam beberapa tahun terakhir. Sementara, dari sisi tingkat kelayakan biaya, Indonesia memiliki keunggulan yang paling kuat dibandingkan negara lain. Dari hasil analisis, Pemerintah Indonesia hanya perlu memberikan insentif paling sedikit senilai Rp 6.720 (0,48 USD) per liter untuk mendukung industri *cellulosic ethanol*. Sementara untuk negara-negara di Eropa setidaknya dibutuhkan insentif paling sedikit senilai Rp16.000 (1,1 USD) per liter (Pavlenko, Searle dan Baldino, 2019).

Selain memiliki potensi ketergantungan yang lebih rendah pada insentif pemerintah, keunggulan lain yang dimiliki Indonesia dalam produksi *cellulosic ethanol* adalah melimpahnya bahan baku yang murah. Indonesia memiliki jumlah residu kelapa sawit yang besar dan terus bertambah, tetapi residu kelapa sawit bukan satu-satunya bahan baku yang dapat digunakan Indonesia. Sebagai penghasil beras, jagung, dan tebu yang signifikan, Indonesia juga dapat memanfaatkan sisa pertanian dari tanaman-tanaman ini, yaitu jerami padi, brangkasan jagung, dan ampas tebu, untuk memproduksi *cellulosic ethanol*. Kami memperkirakan produksi residu pertanian Indonesia dari tiga tanaman teratas yang diproduksi pada tahun 2018 selain minyak sawit menggunakan data produksi tanaman dari FAO (2020), yang ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasar dari metodologi Searle and Malins (2016) dan Pavlenko and Searle (2019), kami memperkirakan jumlah residu pertanian yang dihasilkan dari masing-masing tanaman ini dan jumlah *cellulosic ethanol* dari residu tersebut. Kami memperkirakan bahwa dengan menggunakan semua residu pertanian ini dapat menghasilkan lebih dari 50 miliar liter produksi *cellulosic ethanol* setiap tahun (Tabel 5). Hal ini, sekali lagi menunjukkan bahwa ketersediaan bahan baku bukan merupakan faktor pembatas untuk produksi *cellulosic ethanol* di Indonesia.

Tabel 5. Produksi residu pertanian dari tanaman utama lainnya di Indonesia serta potensi produksi *cellulosic ethanol*nya

	Produksi hasil panen tahun 2018 (juta ton)	Residu Pertanian	Jumlah Residu (juta ton)	Cellulosic ethanol (miliar liter)
Beras, Padi	83	Jerami	151	40
Jagung	30	Brangkasan Jagung	31	10
Tebu	21.2	Ampas Tebu	8	2

Sumber: Searle and Malins, 2016; Pavlenko and Searle, 2019; FAO, 2020

Secara keseluruhan, Indonesia dapat memanfaatkan bahan baku yang melimpah dan murah, dan tidak terlalu mahal tenaga kerja, lahan dan sumber daya lain dibandingkan dengan negara lain untuk memproduksi *cellulosic ethanol* dengan biaya yang lebih efisien. Keunggulan tersebut dapat menjadikan Indonesia menjadi pemimpin global dalam pengembangan teknologi canggih ini. Hal ini tidak hanya memberikan dampak lingkungan dan ekonomi bagi Indonesia, tetapi juga bagi negara lain.

REKOMENDASI KEBIJAKAN

Dalam studi ini, kami menemukan bahwa *cellulosic ethanol* yang diproduksi dari residu kelapa sawit dapat menjadi pilihan energi terbarukan yang efektif dan relatif hemat untuk menggantikan kebutuhan bensin dalam negeri. Dengan memproduksi *cellulosic ethanol*, dapat membantu mengurangi impor minyak, memperbaiki defisit perdagangan Indonesia, mendukung pemilik perkebunan kelapa sawit, mengurangi emisi GRK, dan mendukung pembangunan ekonomi pedesaan dan membuka lapangan pekerjaan di Indonesia. *Cellulosic ethanol* membutuhkan teknologi yang kompleks dan membangun fasilitas pabriknya membutuhkan investasi modal yang signifikan. Berdasarkan penemuan kami, diperlukan dukungan dari pemerintah untuk mempromosikan/mengembangkan industri *cellulosic ethanol*. Kami memberikan beberapa rekomendasi berikut terkait dukungan kebijakan pemerintah untuk *cellulosic ethanol*:

Memperkenalkan peraturan tentang kelayakan bahan baku selulosa/cellulosic

Perlu adanya regulasi dari pemerintah pusat yang menyatakan “kelayakan” penggunaan biomassa sawit sebagai bahan baku *cellulosic ethanol*. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan residu kelapa sawit diperbolehkan/tidak ilegal. Namun, untuk produksi seluruh bahan bakar, termasuk *cellulosic ethanol*, pada skala komersial harus disetujui dan diatur oleh pemerintah pusat.

Mendukung awal pendirian industri *cellulosic ethanol* dengan cara pemberian insentif oleh pemerintah

Di Indonesia, hampir semua BBM yang diperuntukan sektor publik atau jenis BBM “kelas non premium” dijual dengan harga subsidi. Fenomena ini mengisyaratkan bahwa persoalan energi masih merupakan isu sensitif, yang menyangkut aspek jaminan ketersediaan dan tingkat keterjangkauan daya beli masyarakat (ekonomi). Pemerintah Indonesia dapat mengembangkan kebijakan menggunakan sebagian dari subsidi BBM guna mendukung pemanfaatan residu kelapa sawit untuk *cellulosic ethanol*. Dengan menggunakan strategi ini, pemerintah secara efektif dapat mengatasi tantangan biaya modal yang tinggi dalam pembangunan industri *cellulosic ethanol*.

Insentif yang paling tepat untuk pengembangan industri *cellulosic ethanol* adalah pemberian bantuan dana di muka atau subsidi produksi tahunan. Pemberian bantuan/hibah dimuka akan mengurangi beban investasi awal, sementara memberikan insentif untuk biaya produksi tahunan akan memungkinkan produk tersedia dengan harga yang bersaing. Kedua jenis insentif tersebut dapat membantu pendirian pabrik *cellulosic ethanol* layak secara finansial.

Membangun infrastruktur jalan raya dan membangkitkan kesadaran untuk membangun rantai pasok bahan baku yang stabil dan berkelanjutan

Pengembangan industri *cellulosic ethanol* di Indonesia sebagian bergantung pada pemeliharaan rantai pasok bahan baku yang stabil dan berkelanjutan. Untuk alasan ini, pemerintah Indonesia dapat mengembangkan dua jenis kebijakan pendukung untuk membentuk rantai pasok bahan baku yang matang. Pertama, perlu dibangun jalan pertanian di area perkebunan kelapa sawit - sepanjang tidak membuka lahan hutan di sekitar - dan menghubungkannya dengan jalan arteri kabupaten, sehingga residu sawit dari semua lokasi dapat diangkut ke *cellulosic biorefinery*. Jalan pertanian yang disebutkan untuk saat ini sangatlah jarang ditemukan di daerah pedesaan. Diperlukan kerjasama antara pemerintah pusat dan daerah untuk memperluas infrastruktur jalan. Pembangunan jalan pertanian biasanya menjadi tanggung jawab pemerintah daerah, namun karena pemerintah daerah seringkali memiliki keterbatasan dana, diperlukan intervensi/bantuan dari pemerintah pusat. Hal tersebut akan membantu petani swadaya untuk mendapatkan akses pasar untuk residu sawit mereka sembari menghindari pembakaran residu di lokasi. Kedua, diperlukan kesadaran di antara petani swadaya agar mereka memahami residu sawitnya memiliki nilai ekonomi. Misalnya, pemerintah daerah mengembangkan program pelatihan untuk menyebarkan informasi

pada petani swadaya tentang cara mengelola residu sawit. Ini memberikan dampak positif dengan melibatkan petani swadaya sebagai pemasok bahan baku untuk industri *cellulosic ethanol* yang dikembangkan. Khususnya, petani swadaya kurang terdidik secara baik tentang bagaimana pengelolaan atau pemeliharaan residu yang tepat selama kegiatan perkebunan dan penanaman kembali. Pengumpulan residu sawit dan menjualnya sebagai bahan baku *cellulosic ethanol* akan memberikan pendapatan tambahan dan dapat mengurai insentif finansial bagi petani swadaya yang akan memperluas area perkebunannya.

Membangun Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) di sekitar fasilitas *cellulosic ethanol* dan perkebunan kelapa sawit untuk mendorong pembangunan ekonomi daerah

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa biaya pengangkutan bahan baku cukup signifikan persentasenya dari total biaya produksi *cellulosic ethanol*. Oleh karena itu, membangun pabrik *cellulosic ethanol* di dekat bahan baku dapat membantu industri *cellulosic ethanol* beroperasi dengan biaya yang lebih efisien. Hal tersebut juga akan mendorong aglomerasi kawasan, suatu proses di mana sekelompok perusahaan di satu kawasan membentuk pusat industri, memusatkan tenaga kerja. Dampak positif dari aglomerasi termasuk penurunan biaya transportasi dan perencanaan tata ruang yang lebih baik.

Pemerintah Indonesia dapat mendeklarasikan Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) di sekitar industri *cellulosic ethanol* dan perkebunan kelapa sawit. KEK adalah area dimana pemerintah pusat menawarkan pengaturan preferensial tentang infrastruktur dan perpajakan untuk mendorong investasi di lokasi spesifik tersebut. KEK umumnya dirancang untuk memaksimalkan kegiatan industri, perdagangan, dan kegiatan lainnya yang bernilai ekonomi tinggi. KEK dimaksudkan untuk memenuhi pencapaian Agenda Pembangunan Prioritas Nasional melalui (1) meningkatkan produktivitas dan daya saing di pasar internasional; (2) mempercepat pembangunan daerah dan mengatasi ketimpangan pembangunan antar wilayah; (3) meningkatkan produksi produk bernilai tinggi Indonesia dibandingkan dengan produk bahan mentah; dan (4) meningkatkan daya saing ekonomi pulau-pulau terluar yang tertinggal di Indonesia melalui pembangunan infrastruktur wilayah. KEK yang dibentuk di seputar fasilitas *cellulosic ethanol* dan pemasok bahan bakunya dapat membantu memenuhi tujuan tersebut.

Mengintegrasikan *cellulosic ethanol* ke dalam strategi komprehensif peningkatan oktan bensin dan mengurangi polusi udara

Pemerintah Indonesia memiliki tujuan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar dan mengurangi polusi udara kendaraan melalui serangkaian tindakan, termasuk di dalamnya mengadopsi standar emisi kendaraan yang lebih bersih dan menghentikan bensin oktan rendah secara bertahap. Bensin dengan oktan tinggi dapat mendukung kendaraan untuk lebih efisien, dimana akan mengurangi emisi GRK dan polusi udara, sejalan dengan pengurangan konsumsi bahan bakar. Etanol memiliki nilai oktan tinggi dan mencampurkannya ke dalam bensin dapat membantu mencapai bahan bakar beroktan tinggi. Pemerintah dapat mendukung berbagai inisiatif pada kualitas dan emisi bahan bakar dengan mengintegrasikan *cellulosic ethanol* ke dalam rencana untuk meningkatkan oktan bensin.

REFERENSI

- Afifah, S., Sriyoto, & Sumantri, B. (2016). The economic value of oil palm industry waste at PT. Sandabi Indah Lestari in North Bengkulu. *AGRISEP*, 15(2), 189-202.
- Ahmad, T., Rafatullah, M., Ghazali, A., Sulaiman, O., & Hashim, R. (2011). Oil palm biomass-based adsorbents for the removal of water pollutants - A review. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 29, 177-222.
- Akhmad, & Amir. (2018). Study of fuel oil supply and consumption in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(4), 13-20.
- Alamsyah, R., & Supriatna, D. (2018). Technical and Economical analysis of biomass waste of empty fruit bunches (EFB) pellet as renewable fuel for production scale. *Warta IHP*, 35(1), 1-11.
- Anis, M., Siti Nadrah, A.H., Kamruddin, H., Astimar, A.A., Mohd Basri, W. (2011). Isolation and functional properties of hemicelluloses from oil palm trunks. *Journal of Oil Palm Research*, 23, 1178-1184.
- APEC Energy Working Group. (2010). *Biofuel costs, technologies and economics in APEC Economics*.
- Aprobi. (2016). *Bulletin Bioenergy: Mandatory B20*. Retrieved from <https://aprobi.or.id/bulletin/>
- Baldino, C., Berg, R., Pavlenko, N., & Searle, S. (2019). *Advanced alternative fuel pathways: Technology overview and status*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_advanced_alt_fuel_pathways_20190723.pdf
- Bahari, M.A.M.B. (2010). *Oil palm trunk (OPT) as an alternative cellulosic material for brown paper production*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/65f4/f831c434a488b2ac11af43762721b1502ad3.pdf>
- Cheng, M.H., Wang, Z., Dien, B.S., Slininger, P.J.W., & Singh, V. (2019). Economic analysis of cellulosic ethanol production from sugarcane bagasse using a sequential deacetylation, hot water and disk-refining pretreatment. *Processes*, 7, 642. doi :10.3390/pr7100642
- Diep, N.Q., Fujimoto, S., Yanagida, T., Minowa, T., Sakanishi, K., Nakagoshi, N., & Tran, X.D. (2012). Comparison of the potential for ethanol production from rice straw in Vietnam and Japan via techno-economic evaluation. *International Energy Journal*, 13, 113-122.
- Eisentraut, A. (2010). *Sustainable production of second-generation biofuels: Potential and perspectives in major economies and developing countries*. Retrieved from <https://www.oecd.org/berlin/44567743.pdf>
- Elgharbawy, A.A., Alam, Md.Z., Moniruzzaman, M., Kabbashi, N.A., & Jamal, P. (2018). Chemical and structural changes of pretreated empty fruit bunch (EFB) in ionic liquid-cellulose compatible system for fermentability to bioethanol. *3 Biotech*, 8(5), 236. doi: [10.1007/s13205-018-1253-8](https://doi.org/10.1007/s13205-018-1253-8)
- Eom, I., Yu, J., Jung, C., & Hong, K. (2015). Efficient ethanol production from dried oil palm trunk treated by hydrothermolysis and subsequent enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 83.
- EPA. (2020). *RINs generated transactions*. Retrieved from EPA <https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/rins-generated-transactions>
- Ervianto, D. (2018). Economic assessment of using palm oil waste as a fuel of biomass power plant. *Royal National Seminar*, 1(1), 417-422.
- European Commission. (2020). *TARIC Consultation*. Retrieved from https://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/taric/taric_consultation.jsp?Lang=en
- FAO. (2020). *FAOSTAT*. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Geng, A. (2013). *Conversion of oil palm empty fruit bunch to biofuels*. Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/liquid-gaseous-and-solid-biofuels-conversion-techniques/conversion-of-oil-palm-empty-fruit-bunch-to-biofuels>
- Gorbiano, M.I. (2019). *Jokowi wants 30% biodiesel in cars as soon as January next year*. Retrieved from <https://www.thejakartapost.com/news/2019/08/12/jokowi-wants-30-biodiesel-in-cars-as-soon-as-january-next-year.html>
- Hariandja, R. (2020). *When the subsidies to the biodiesel industry are minimal for oil palm farmers*. Retrieved from <https://www.mongabay.co.id/2020/06/28/kala-subsidi-ke-industri-biodiesel-minim-buat-petani-sawit/>
- Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., Hsu, D., Aden, A., Schoen, P., et al. (2011). *Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47764.pdf>
- IEA Bioenergy. (2020). *Advanced biofuels - Potential for cost reduction*. Retrieved from <https://www.iea-bioenergy.com/publications/new-publication-advanced-biofuels-potential-for-cost-reduction/>
- International Trade Center. (2020). *Trade map*. Retrieved from <https://www.trademap.org/Index.aspx>

- Joseph, L.M.H. (2010). A case study of palm empty fruit bunch as energy feedstock. *SEGi Review*, 3(2), 3-15.
- Kresnowati, M., Mardawati, E., & Setiadi, T. (2015). Production of xylitol from oil palm empty fruits bunch: A case study on biorefinery concept. *Modern Applied Science*, 9(7), 206-213. doi:10.5539/mas.v9n7p206.
- Kugemann, M. (2015). *Financial analysis of a biochemical cellulosic ethanol plant and the impact of potential regulatory measures*. Retrieved from <https://www.merit.unu.edu/publications/working-papers/abstract/?id=5907>
- Mayasari, F., & Dalimi, R. (2019). Fuel oil supply demand projection and planning in Indonesia using system dynamics modeling. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 8(1), 11-21. doi: 10.12720/sgce.8.1.11-21
- MdYunos, N.S.H., Samsu Baharuddin, A., MdYunos, K.F., Hafid, H.S., Busu, Z., Mokhtar, M.N., Sulaiman, A., & et al. (2015). The physicochemical characteristics of residual oil and fibers from oil palm empty fruit bunches. *BioRes.*, 10(1), 14-29.
- MEMR. (2015). *MEMR Regulation No. 12/2015*. Retrieved from <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/Permen%20ESDM%2012%20Thn%202015.pdf>
- MEMR. (2018). *Handbook of energy in & economics statistics of Indonesia (final edition)*. Retrieved from <https://www.esdm.go.id/en/publication/handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-heesi>
- Ministry of Finance. (2020). *Impact, handling, National Economic Recovery (PEN), & proposed changes to president 54 year 2020*. Retrieved from https://www.kemenkeu.go.id/media/15323/v922-skema-pemulihan-ekonomi-nasional_media.pdf
- OECD/WTO. (2017). *Aid for trade at a glance 2017: Promoting trade, inclusiveness and connectivity for sustainable development*. Retrieved from OECD https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/aid_glance-2017-en.pdf?expires=1595968636&id=id&acname=guest&checksum=A3F163244097D1A2B1A7898F99E175AC
- OPEC. (2020). Montly oil market report. Retrieved from the Organization of the Petroleum Exporting Countries https://www.opec.org/opec_web/en/publications/338.htm
- Padella, M., O'Connell, A., & Prussi, M. (2019). What is still limiting the deployment of cellulosic ethanol? Analysis of the current status of the sector. *Appl. Sci.*, 9(21), 4523. doi:10.3390/app9214523
- Paltseva, J., Searle, S., & Malins, Chris. (2016). *Potential for advanced biofuel production from palm residues in Indonesia*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation https://theicct.org/sites/default/files/publications/Indonesia%20Palm%20Oil%20White%20Paper_vFinal.pdf
- Pangsang, N., Rattanapan, U., Thanapimmetha, A., Srinopphakhun, P., Liu, C., Zhao, X., Bai, F., et al. (2019). Chemical-free fractionation of palm empty fruit bunch and palm fiber by hot-compressed water technique for ethanol production. *Energy Reports*, 5, 337-348.
- Parbowo, H.S., Ardy, A., & Susanto, H. (2019). Techno-economic analysis of dimethyl ether production using oil palm empty fruit bunches as feedstock - a case study for Riau. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 534, 012060. doi:10.1088/1757-899X/543/1/012060
- Pavlenko, N. (2018). *Failure to launch: Why advanced biorefineries are so slow to ramp up production*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation <https://theicct.org/blog/staff/failure-to-launch-biorefineries-slow-ramp-up>
- Pavlenko, N., & Searle, S. (2019). *The potential for advanced biofuels in India: Assessing the availability of feedstocks and deployable technologies*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation https://theicct.org/sites/default/files/publications/Potential_for_advanced_biofuels_in_India_20191213_0.pdf
- Pavlenko, N., Searle, S., & Baldino, C. (2019). *Assessing the potential advanced alternative fuel volumes in Germany in 2030*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation https://theicct.org/sites/default/files/publications/Advanced_fuels_potential_Germany_20190916.pdf
- Peters, D., Alberici, S., & Passmore, J. (2015). *How to advance cellulosic biofuels: Assessment of costs, investment options and required policy support*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation https://theicct.org/sites/default/files/publications/Ecofys-Passmore%20Group_How-to-advance-cellulosic-biofuels_rev201602.pdf
- Prawitwong, P., Kosugi, A., Arai, T., Deng, L., Lee, K.C., Ibrahim, D., Murata, Y., et al. (2012). Efficient ethanol production from separated parenchyma and vascular bundle of oil palm trunk. *Bioresource technology*, 125, 37-42.
- PWC. (2019). *Indonesian Pocket Tax Book 2019*. Retrieved from PWC <https://www.pwc.com/id/en/pocket-tax-book/english/pocket-tax-book-2019.pdf>
- Reeb, C.W., Hays, T., Venditti, R.A., Gonzalez, R., & Kelley, S. (2014). Supply chain analysis, delivered cost, and life cycle assessment of oil palm empty fruit bunch biomass for green chemical production in Malaysia. *BioResources*, 9(3), 5385-5416.

- Searle, S., & Malins, C. (2016). Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. *Biomass and Bioenergy*, 89, 2-10.
- Shao, Z., Miller, J., & Jin, L. (2020). *Soot-free road transport in Indonesia: A cost-benefit analysis and implications for fuel policy*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Indonesia-sootfree-CBA-02182020.pdf>
- Statistics Indonesia. (2019). *Indonesia oil palm statistics 2018*. Retrieved from <https://www.bps.go.id/publication/2019/11/22/1bc09b8c5de4dc77387c2a4b/statistik-kelapa-sawit-indonesia-2018.html>
- Sudiyani, Y., Styarini, D., Triwahyuni, E., Sudiyarmanto, Sembiring, K.C., Aristiawan, Y., Abimanyu, H, et al. (2013). Utilization of biomass waste empty fruit bunch fiber of plam oil for bioethanol production using pilot - scale unit. *Energy Procedia*, 32, 31-38.
- Tao, L., Markham, J. N., Haq, Z., & Bidy, M. J. (2017). Technoeconomic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks. *Green Chemistry*, 19, 1082-1101. doi: 10.1039/C6GC02800D.
- Teh, C.B.S. (2016). *Availability, use and removal of oil palm biomass in Indonesia*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation <http://theicct.org/availability-use-and-removal-oil-palm-biomass-indonesia>
- The Glostren Associates. (2010). *Sodium Hydroxide (NaOH) practicality study*. Retrieved from [https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/953CCBEB820F0470852577920076316D/\\$File/NaOH+Practicality+Study.pdf](https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/953CCBEB820F0470852577920076316D/$File/NaOH+Practicality+Study.pdf)
- Trading Economics. (2020). *Indonesia inflation rate*. Retrieved from <https://tradingeconomics.com/indonesia/inflation-cpi>
- Turner & Townsend. (2019). *International construction market survey 2019*. Retrieved from Turner & Townsend http://www.infrastructure-intelligence.com/sites/default/files/article_uploads/Turner%20Townsend%20International%20Construction%20Market%20Survey%202019.pdf
- USDA. (2019a). *Indonesia Biofuels Annual Report 2019*. Retrieved from USDA https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Jakarta_Indonesia_8-9-2019.pdf
- USDA. (2019b). *Brazil Biofuels Annual Report 2019*. Retrieved from USDA https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_8-9-2019.pdf
- USDA. (2019c). *China Biofuels Annual Report 2019*. Retrieved from USDA https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Biofuels%20Annual_Beijing_China%20-%20Peoples%20Republic%20of_8-9-2019.pdf
- USDA. (2019d). *EU Biofuels Annual Report 2019*. Retrieved from USDA http://artfuelsforum.eu/wp-content/uploads/2019/09/Biofuels-Annual_The-Hague_EU-28_8-9-2019.pdf
- Zhao, L., Zhang, X., Xu, J., Ou, X., Chang, S., & Wu, M. (2015). Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic biomass in China: Dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. *Energies*, 8, 4096-4117. doi:10.3390/en8054096
- Zhou, Y., Evans, M., Yu, S., Sun X., & Wang, J. (2020). Linkages between policy and business innovation in the development of China's energy performance contracting market. *Energy Policy*, 140, 111208. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111208>

LAMPIRAN

Tabel A1. Nilai produksi bahan baku dan komposisi kimia batang sawit, tandan kosong sawit, dan sabut sawit

		Batang Pohon Kelapa Sawit	Tandan Kosong Kelapa Sawit	Serat Kelapa Sawit	Asumsi di penelitian ini (nilai default untuk poplar dalam model GREET)
Produksi residu per areal perkebunan sawit (ton kering rata-rata per hektar per tahun)		0.9	1.6	0.8	-
Komposisi Kimia (%berat kering)	Lignin	16-23	18-32	11-37	26
	Hemicellulose	26-29	24-34	20-35	17
	Cellulose	42-46	37-50	38-63	46

Sumber: Bahari, 2010; Ahmad et al., 2011; Anis et al., 2011; Sudiyani et al., 2013; MdYunos et al., 2015; Paltseva et al., 2016

Tabel A2. Rincian biaya modal(CAPEX)

Komponen CAPEX	Deskripsi Perhitungan	Miliar IDR (Juta USD)	Proporsi dari total CAPEX
Pembelian Peralatan	1,08 USD per liter kapasitas etanol	1052 (75)	37%
Pemasangan/instalasi peralatan	39% dari Pembelian Peralatan	410 (29)	14%
Total Pembelian + Instalasi Peralatan (TPIP)		1462 (104)	51%
Tarif Perdagangan Peralatan	6.7% dari Pembelian Peralatan	70,5 (5)	2%
Pengiriman peralatan dan asuransi	10% dari Pembelian Peralatan	105 (7,5)	4%
Gudang	4% dari TPIP, dikalikan 0,23 untuk diperkecil sesuai dengan situasi Indonesia	13,5 (0,96)	0,5%
Pengembangan wilayah	9% dari TPIP, dikalikan 0,23 untuk diperkecil sesuai dengan situasi Indonesia	30 (2,2)	1%
Pipa Tambahan	4,5% dari TPIP, dikalikan 0,23 untuk diperkecil sesuai dengan situasi Indonesia	15 (1,1)	1%
Total Biaya Langsung (TBL)		1697 (121)	59%
Pengeluaran yang di prorata	10% dari TBL	170 (12)	6%
Pengeluaran Lapangan	10% dari TBL	170 (12)	6%
Biaya Konstruksi	20% dari TBL	339 (24)	12%
Kontinjensi Proyek	10% dari TBL	170 (12)	6%
Biaya awal dan Komisioning lainnya	10% dari TBL	170 (12)	6%
Penanaman Modal Tetap (PMT)		2714,5 (194)	95%
Biaya Lahan	Dari Parbowo et al. (2019)	9 (0,6)	0,3%
Modal Kerja	5% PMT	136 (9)	5%
Total CAPEX		2859 (204)	100%

Sumber: Peters, Alberici, and Passmore, 2015; Parbowo et al., 2019

Table A3. Rencana biaya operasi tetap tahunan (OPEX)

Sumber: Humbird et al., 2011; Turner and Townsend, 2019

Komponen OPEX	deskripsi perhitungan	Miliar Rupiah (Juta USD) per tahun	Proporsi total tetap tahunan OPEX
Gaji tenaga kerja	4,76 \$ cent per gallon produksi etanol dari penelitian di US, dikalikan dengan 0,02 untuk mengurangi situasi di Indonesia	0,19 (,014)	0,3%
Overhead	40% Dari Gaji tenaga kerja	0,077 (0,006)	0,1%
Pemeliharaan	3% TPIP dari Tabel A2	44 (3)	76%
Asuransi	0,5% PMT dari Tabel A2	14 (1)	24%
Total tahunan OPEX		58 (4)	100%

Sumber: Humbird et al., 2011; Turner and Townsend, 2019

Tabel A4. Kuantitas unit input material dan harga unit untuk biaya operasional variabel (OPEX) selain pembelian bahan baku

Material	Unit	Kuantitas (unit per liter produksi etanol)	Harga_IDR per unit (USD per kg)	Biaya IDR per liter produksi etanol (US cent per liter)	Proporsi OPEX variabel bukan bahan baku tahunan
Solar	Btu	89	0,15	13,5 (0,1)	0,5%
Sulfuric acid	g	91,5	1,82 (0,13)	166,5 (1,2)	6,3%
Ammonia	g	11	9,24 (0,66)	101,4 (0,7)	3,8%
Corn steep liquor	g	34,8	1,12 (0,08)	38,9 (0,3)	1,5%
Diammonium phosphate (DAP)	g	3,7	20,02 (1,43)	73,2 (0,5)	2,8%
Natrium hidroksida (NaOH)	g	31,1	2,08 (0,15)	64,8 (0,5)	2,5%
Kalsium oksida (CaO)	g	20,1	3,29 (0,24)	66,2 (0,5)	2,5%
Urea	g	5,5	5,04 (0,36)	27,7 (0,2)	1%
Selulosa	g	28,2	61,71 (4,41)	1739,8 (12,4)	65,8%
Ragi	g	7	38,22 (2,73)	268,3 (1,9)	10,2%
Air	gallon	1,4	58,06	82,1 (0,6)	3,1%

Sumber: The Glosthen Associates, 2010; Tao et al., 2017