ANALISA KELAYAKAN DARI ASPEK EKONOMI DAN LINGKUNGAN PADA BAHAN KIMIA DAN SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN

Muflih Arisa Adnan[1*] dan Nur Indah Fajar Mukti[2]
[1,2] *Prodi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia*

[*]*Email*: muflih.adnan@uii.ac.id

ABSTRAK

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi, pengembangan sumber energi berkelanjutan menjadi sangat penting. Listrik diprediksi dapat menjadi satu pilihan energi berkelanjutan karena dapat dihasilkan dari sumber rendah emisi karbon seperti matahari (photovoltaic/sel surya), pembangkit listrik tenaga air (PLTA), dan pembangkit listrik tenaga biomassa (PLTB). Metanol dan dimetil eter (DME) adalah bahan kimia dengan kepadatan energi tinggi sehingga sangat potensial sebagai bahan bakar. DME dapat diproduksi melalui proses elektrokimia yang memanfaatkan listrik (power-to-DME), sedangkan metanol dapat dihasilkan langsung dari biomassa melalui proses termal. Oleh karena itu, perlu diketahui kelayakan dari aspek ekonomi dan lingkungan pada produksi metanol dan DME dengan proses berkelanjutan. Pada saat ini proses power-to-DME tidak ekonomis. Levelized cost DME didapatkan sebesar $1695/ton-DME, yang itu berarti 3,4 kali lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional ($500/ton-DME). Proses ini dapat menjadi lebih ekonomis jika biaya elektrolisis air dan harga elektrolizer turun di bawah 52 kWh/kg-H_2 dan $200/kW, serta harga listrik kurang dari $0,03/kWh. Selain itu, faktor emisi listrik harus di bawah 19 g-CO_2/kWh untuk memberikan manfaat lingkungan pada rute power-to-DME. Untuk penyederhanaan proses dan menekan biaya produksi, sumber energi dapat diganti dari listrik menjadi biomassa dan produk diganti dari DME menjadi metanol. Untuk proses biomass-to-metanol, diperlukan harga biomassa <195 $/ton dan harga gasifier di bawah 1000 $/kW agar harga metanol dapat kompetitif. Emisi CO_2 dari metanol dari biomassa juga bernilai negatif, yaitu –0,562 kg-CO_2/kg-metanol untuk tandan kosong kelapa sawit dan –0,728 kg-CO_2/kg-metanol untuk alga.

Kata kunci: energi berkelanjutan, metanol, dimetil eter, biomasa, listrik

ABSTRACT

With the increasing demand for energy, the development of sustainable energy sources is crucial. Electricity is predicted to be a sustainable energy option as it can be generated from low-carbon emission sources such as solar power (photovoltaic), hydropower (hydroelectric), and biomass power plants. Methanol and dimethyl ether (DME) are chemicals with high energy densities, making them highly promising as fuels. DME can be produced through an electrochemical process using electricity (power-to-DME), while methanol can be directly produced from biomass through a thermal process. Therefore, the economic and environmental feasibility of producing methanol and DME through sustainable processes needs to be assessed. The power-to-DME process is currently not economically viable. The levelized cost of DME was estimated to be $1695/ton-DME, which is 3.4 times higher than the conventional method ($500/ton-DME). This process could become more economical if water electrolysis costs and electrolyzer prices drop below 52 kWh/kg-H2 and $200/kW, respectively, and electricity prices fall below $0.03/kWh. Additionally, the electricity emission factor must be below 19 g-CO2/kWh to provide environmental benefits for the power-to-DME route. To simplify the process and reduce production costs, the energy source can be switched from electricity to biomass, and the product can be changed from DME to methanol. For the biomass-to-

methanol process, biomass prices need to be below $195/ton and gasifier prices below $1000/kW for methanol to be cost-competitive. The CO2 emissions from biomass-based methanol are also negative, at –0.562 kg-CO2/kg-methanol for empty palm fruit bunches and –0.728 kg-CO2/kg-methanol for algae.

Keywords: sustainable energy, methanol, dimethyl ether, biomass, electricity

PENDAHULUAN

Suhu global semakin tinggi dalam beberapa dekade terakhir (NASA, 2023). Peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) di atmosfer dipercaya sebagai penyebab utama pemanasan global (Jones et al., 2023). Hal ini dapat dikaitkan dengan penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama (Rosado, 2024). Untuk menghindari dampak negatif pemanasan global terhadap lingkungan, penting untuk mengeksplorasi sumber energi alternatif guna mengurangi tingkat emisi CO_2 ke atmosfer, dengan tetap menjaga laju ekonomi yang positif. Sejak 2016, komunitas global telah menyetujui perjanjian dalam Kesepakatan Paris (*Paris Agreement*) untuk memperlambat pemanasan global dengan batasan kenaikan suhu 2°C di atas suhu pra-industri (UN, 2023). Ini berarti penurunan emisi CO_2 tahunan sebesar 43% pada tahun 2030 dan mencapai karbon netral pada tahun 2070 (Analytics, 2020).

Metanol menjanjikan sebagai bahan kimia sintetis karena aplikasinya yang luas dalam industri kimia dan sebagai pembawa energi. Dengan densitas energi tinggi (22,7 MJ/kg atau 18 MJ/L), metanol mudah dalam hal penyimpanan dan transportasi (Adnan and Kibria, 2020). Sebagai bahan kimia perantara, metanol dapat diubah menjadi berbagai produk seperti kerosene, bahan bakar penerbangan berkelanjutan (SAF), dan dimetil eter (DME) (Makcharoen et al., 2021; Zhang et al., 2019). DME juga berpotensi sebagai pengganti bahan bakar fosil konvensional dengan densitas energi sebesar 28,8 MJ/kg atau 19,3 MJ/L.

Produksi metanol dapat dilakukan melalui proses hidrogenasi syngas (Graaf et al., 1988). Syngas merupakan gas yang komposisi utamanya adalah CO dan H_2. Sumber CO dan H_2 untuk pembuatan syngas dapat dilakukan dengan gasifikasi biomassa, elektrolisis CO_2 menjadi CO dan elektrolisis air menjadi H_2 (Adnan et al., 2020). Produksi DME dilakukan melalui proses dehidarasi metanol. Karena DME merupakan turunan metanol, bila metanol diproduksi dari sumber bahan baku dan energi yang rendah emisi karbon, maka DME akan menjadi DME yang rendah emisi karbon.

Kinerja produksi metanol dari biomassa telah dipelajari secara luas. Misalnya, Nurdiawati dan rekan menyelidiki efisiensi produksi metanol dari alga menggunakan perangkat lunak simulasi Aspen Plus (Nurdiawati et al., 2019). Mereka mengusulkan penggunaan gasifikasi

e-ISSN: 2963-2277

looping kimia untuk mengubah alga menjadi syngas, diikuti dengan reaktor hidrogenasi. Kelompok kami menyelidiki produksi metanol dari alga dengan fokus pada kandungan kelembapan alga (Adnan and Hidayat, 2024). Selain evaluasi kinerja, analisis techno-ekonomi dan lingkungan mulai mendapatkan perhatian. Harris dan rekan-rekannya (Harris et al., 2021) menemukan bahwa metanol berbasis biomassa akan secara ekonomi layak dalam jangka pendek. Liu et al. (Liu et al., 2020) melakukan penilaian siklus hidup produksi metanol dari biomassa melalui gasifikasi dan hidrogenasi. Mereka membandingkan potensi emisi dari rute metanol berbasis biomassa dan rute berbasis batu bara menggunakan urutan proses yang serupa. Mereka membuktikan bahwa penggunaan biomassa untuk konversi metanol dapat mengurangi emisi CO_2 ke atmosfer. Meskipun semua literatur yang diterbitkan melaporkan potensi biomassa sebagai bahan baku alternatif, informasi tentang penilaian komparatif dari keuntungan ekonomi dan lingkungan metanol berbasis biomassa dibandingkan dengan metanol berbasis fosil masih jarang. Selain itu, belum banyak dibahas tentang parameter kunci yang terkait dengan kinerja rute berbasis biomassa.

Berkenaan dengan DME, DME komersial umumnya diproduksi dari gas alam atau batu bara. Pada saat ini biomassa dianggap sebagai bahan baku yang menjanjikan untuk produksi DME. Biomassa diubah menjadi syngas melalui gasifikasi, lalu syngas diubah menjadi DME melalui proses hidrogenasi dan dehidrasi (Chang et al., 2012). Alternatifnya, metanol hijau dapat digunakan untuk memproduksi DME, karena sebagian besar DME komersial diproduksi melalui reaksi dehidrasi metanol (Semmel et al., 2021). Schühle dan rekan-rekannya mengevaluasi kelayakan DME hijau sebagai pembawa H_2 hijau dan membandingkannya dengan pembawa H_2 hijau lainnya seperti NH_3 dan metanol (Schühle et al., 2023). Mereka menyimpulkan bahwa DME memiliki tingkat kesiapan teknologi (TRL) yang tinggi karena kompatibilitas yang baik dengan infrastruktur yang ada. Michailos dan kelompoknya menyelidiki kelayakan ekonomi produksi DME melalui elektrolisis H_2O, hidrogenasi syngas, dan dehidrasi metanol (Michailos et al., 2019). Mereka menemukan bahwa harga jual minimum DME adalah sekitar $2400/ton saat harga listrik $95/kWh. Meskipun CO_2 telah banyak diteliti sebagai sumber karbon untuk produksi DME, Kofler dan rekan-rekannya mengusulkan pemanfaatan biomassa sebagai sumber karbon dalam rute power-to-DME (Kofler et al., 2024). Meskipun banyak laporan tentang rute power-to-DME, informasi tentang penilaian ekonomi dan lingkungan secara komprehensif untuk rute yang menjanjikan ini, yang didukung oleh sumber listrik rendah karbon yang kuat, masih terbatas.

Dalam penelitian ini, kami melakukan analisis ekonomi dan lingkungan secara menyeluruh untuk proses produksi metanol dan DME berbasis sumber energi berkelanjutan. Untuk produksi metanol, beberapa biomassa telah dipilih yaitu tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan alga. Sebagai pembanding, batubara kualitas rendah juga diambil sebagai bahan baku produksi metanol. Kami juga menilai produksi dimetil eter (DME) menggunakan berbagai sumber listrik rendah karbon seperti angin, matahari, dan nuklir. Dua rute produksi DME dievaluasi: rute konvensional dari gas alam dan rute power-to-DME yang menggunakan CO_2 dan air, di mana air diubah menjadi H_2 menggunakan listrik rendah karbon, dan CO_2 serta H_2 digunakan untuk menghasilkan DME.

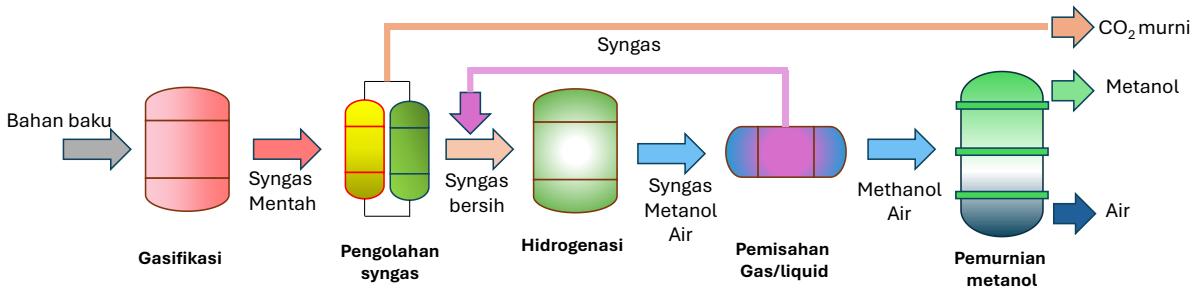
METODE PENELITIAN

Umumnya, pabrik produksi metanol beroperasi pada kapasitas antara 500 hingga 5000 ton per hari (EIA, 2019). Oleh karena itu, produksi metanol sekitar 1000 ton per hari dipilih sebagai dasar untuk studi ini. Bahan baku padat seperti biomassa dan batubara mengalami dekomposisi termal menjadi syngas di unit gasifikasi pada tekanan 1 atm dan rentang suhu 973,15 K hingga 1573,15 K. Ketika batu bara dan TKKS digunakan sebagai bahan baku, *steam* ditambahkan ke dalam unit gasifikasi dengan rasio *steam* terhadap *carbon* (S/C) sebesar 0,5. Rasio S/C ini mengacu pada rasio molar *steam* yang masuk ke gasifier terhadap unsur karbon dalam bahan baku. Penggunaan *steam* sebagai agen gasifikasi dapat meningkatkan produksi H_2 (Shen, 2024). Syngas dengan rasio $(nH_2 - nCO_2)/(nCO + nCO_2)$ sekitar 2 merupakan nilai optimal untuk produksi methanol (Ribeiro et al., 2012). Ketika alga menjadi bahan baku produksi metanol, tidak ada *steam* tambahan yang ditambahkan ke unit gasifikasi karena kelembaban *Porphyra yezoensis* tinggi (40 wt%). Sebagai perbandingan, kandungan kelembaban TKKS dan batu bara peringkat rendah masing-masing adalah 11% dan 21% wt (Byambajav et al., 2018; Okokpujie et al., 2023). Syngas mentah kemudian diarahkan ke unit perlakuan syngas yang terdiri dari unit pemurnian gas untuk menghilangkan sulfur dan penyerapan CO_2 untuk menghilangkan CO_2 dari aliran syngas. Unit penyerapan ini mampu menangkap ~90% CO_2 dari aliran syngas (Peters et al., 2011). CO_2 murni (90%) kemudian dikompresi hingga 25 atm sebelum didistribusikan kepada pengguna. Syngas bersih kemudian diberi umpan ke proses hidrogenasi untuk sintesis metanol. Sebelum reaktor hidrogenasi, syngas dikompresi hingga 69 bar dan didinginkan hingga 323,15°C. Suhu operasi reaktor dipertahankan dengan mengalirkan fluida termal pada suhu 511 K. Aliran keluar sintesis metanol mengandung metanol, air, dan gas yang tidak bereaksi. Gas yang tidak bereaksi didaur

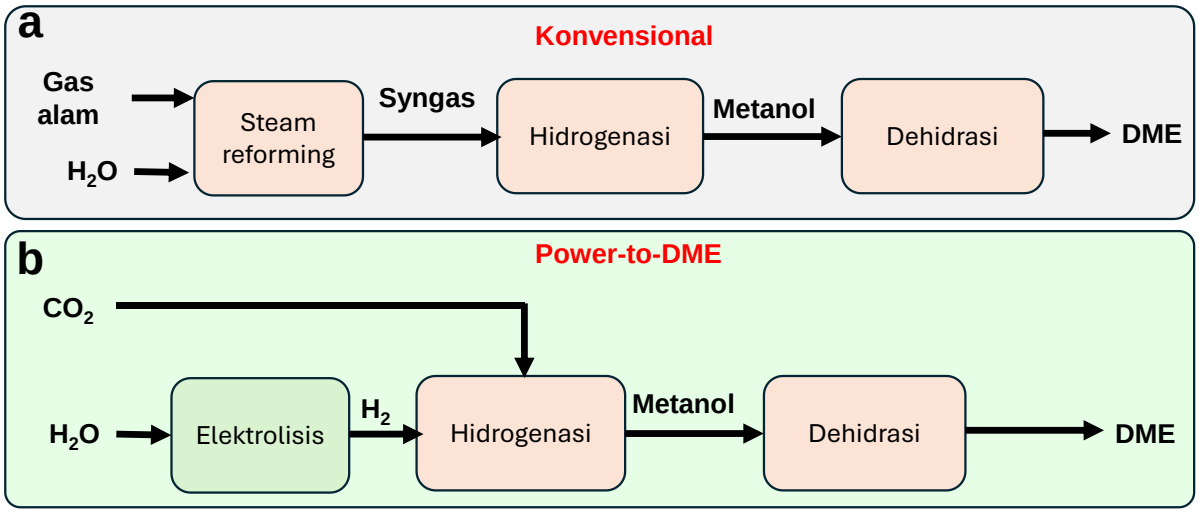
e-ISSN: 2963-2277

ulang ke reaktor hidrogenasi. Campuran metanol dan air kemudian diberi umpan ke kolom distilasi untuk memperoleh metanol 99% wt sebagai produk utama. Diagram skematik sederhana dari proses sintesis metanol dari bahan bakar padat ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk pembuatan DME, metanol diumpankan ke reaktor dehidrasi pada suhu 573 K K dan tekanan 1 atm. Campuran DME dan air kemudian diarahkan ke kolom distilasi. Produk atas menara distilasi adalah DME (99 wt.%), sementara produk bawah terdiri dari metanol (26 wt.%), air (73 wt.%), dan sebagian kecil DME (1 wt.%). Produk bawah didaur ulang ke inlet reaktor dehidrasi. Produksi DME sekitar 750 ton per hari diambil sebagai dasar dengan alasan menyesuaikan kapasitas listrik rendah emisi karbon. Sebagai informasi, kapasitas pabrik DME komersial berkisar antara 60 hingga 5000 ton per hari (Liu et al., 2023; Vassilev et al., 2010) sehingga kapasitas 750 ton per hari masih dalam rentang kapasitas pada umumnya. Diagram alir proses pembuatan DME secara konvensional dan power-to-DME disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1 Diagram alir pembuatan metanol



Gambar 2 Diagram alir pembuatan dimetil eter secara (a) konvensional dan (b) melalui rute power-to-DME

Mengenai parameter ekonomi untuk studi produksi metanol dari biomassa, harga bahan baku dan harga alat divariasikan dan dikategorikan dalam dua skenario sebagaimana dirangkum pada Tabel 1. Pada evaluasi ekonomi produksi DME, parameter ekonomi juga dikategorikan menjadi dua skenario dengna beberapa perbedaan bila dibandingkan dengan proses produksi metanol. Rangkuman parameter ekonomi produksi DME dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Ringkasan parameter ekonomi produksi metanol

Parameter	Dasar	Optimis
Harga alga ($/ton)	2200	650
Harga TKKS ($/ton)	100	85
Harga Batubara ($/ton)	100	70
Harga gasifier ($/kW)	1000	400
Harga gas alam ($/GJ)	3	2
Harga jual CO_2 ($/ton)	25	35
Harga listrik ($/kWh)	0.08	0.02

Tabel 1. Ringkasan parameter ekonomi produksi DME

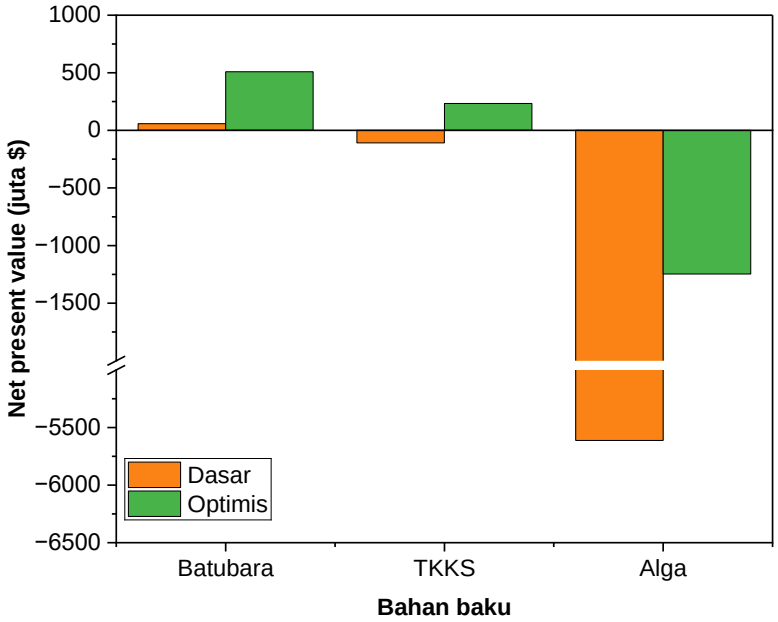
Parameters	Dasar	Optimis
Harga listrik ($/kWh)	0.07	0.02
Harga jual CO_2 ($/ton)	30	15
Harga gas alam ($/GJ)	3	2
Harga jual O_2 ($/ton)	50	100
Harga PEM ($/kW)	700	200
Biaya energi PEM (kWh/kg-H_2)	60	40

HASIL DAN PEMBAHASAN

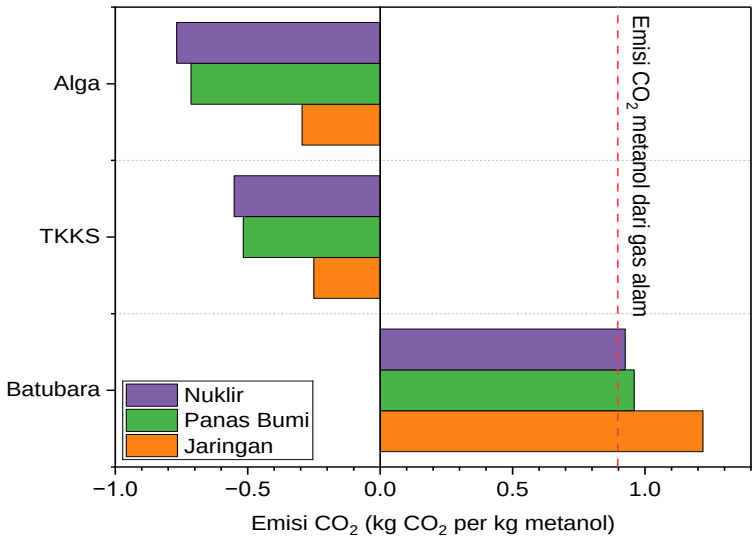
Harga pasar methanol secara global terendah ($400/ton) digunakan untuk memperkirakan *net present value* (NPV) dari proses produksi methanol (Methanex, 2024). NPV merujuk pada nilai ekonomi dari suatu aktivitas dari awal hingga akhir periode. NPV positif menunjukkan bahwa aktivitas tersebut akan memberikan keuntungan secara finansial, sementara NPV negatif menunjukkan bahwa aktivitas tersebut akan mengakibatkan kerugian secara finansial. Meskipun semua jalur produksi metanol (misalnya, batubara, PKS, dan alga) menggunakan rute produksi yang mirip, NPV yang diperkirakan tetap bervariasi, tergantung pada bahan bakunya. Produksi metanol dari batubara menunjukkan NPV positif baik pada skenario dasar maupun skenario optimis. Sementara itu, metanol berbasis PKS memberikan NPV negatif pada skenario dasar dan berubah menjadi NPV positif pada skenario optimis. NPV negatif diamati pada jalur metanol dari alga baik pada skenario dasar maupun skenario optimis. Temuan ini menunjukkan bahwa biaya bahan baku memainkan peran penting dalam menentukan NPV.

e-ISSN: 2963-2277

Selain analisis ekonomi, kami juga memperluas analisis kami ke aspek lingkungan. Kami menyelidiki emisi CO_2 dari produksi metanol dengan menggunakan tenaga geotermal dan nuklir untuk mewakili listrik berkarbon rendah (Gambar 4). Kami juga menunjukkan emisi CO_2 ketika proses produksi metanol memanfaatkan listrik dari jaringan distribusi Listrik (grid). Emisi CO_2 dari produksi metanol berbasis batu bara dengan menggunakan listrik dari jaringan lebih tinggi dibandingkan emisi CO_2 dari metanol berbasis gas alam dengan sumber listrik yang sama. Hal ini dapat dijelaskan oleh konsumsi energi yang lebih tinggi dari metanol berbasis batu bara (4,24 kWh/kg-metanol) dibandingkan dengan metanol berbasis gas alam (2,72 kWh/kg-metanol). Penggunaan listrik berkarbon rendah seperti panas bumi (*geothermal*) dan nuklir dapat mengimbangi konsumsi energi tinggi dari rute produksi metanol berbasis batu bara. Perubahan sumber listrik dari jaringan ke panas bumi dan ke nuklir mengurangi faktor emisi dari listrik dari 303 kg-CO_2/ton-metanol menjadi 19 kg-CO_2/ton-metanol dan 10 kg-CO_2/ton-metanol. Dampak positif dari penggunaan listrik berkarbon rendah juga terlihat pada rute metanol berbasis PKS dan alga. Emisi CO_2 dari metanol berbasis PKS dan alga adalah negatif, yang mencerminkan kemampuan PKS dan alga untuk menangkap CO_2 selama proses budidaya. Temuan ini menunjukkan potensi biomassa sebagai bahan baku untuk produksi metanol dalam mencapai emisi nol bersih di masa depan.



Gambar 3 Net present value (NPV) pembuatan metanol berdasar alir pembuatan dimetil eter



Gambar 4 Emisi CO_2 dari pembuatan metanol dengan berbagai bahan baku

Selain dapat diproduksi dari gas alam maupun bahan bakar padat seperti batubara dan biomassa, metanol juga dapat juga dapat diproduksi melalui proses elektrokimia sebagaiman pada Gambar 2. Selanjutnya, metanol diproses dengan metode dehidrasi (penghilangan air) sehingga menjadi DME. Dalam studi ini, kami membandingkan produksi DME konvensional dengan rute power-to-DME. Produksi DME Konvensional memerlukan gas alam sebagai bahan baku utama, sedangkan bahan baku untuk Power-to-DME adalah H_2O dan CO_2. Kelayakan ekonomi ditentukan dengan menggunakan NPV, yang telah banyak digunakan dalam studi teknis-ekonomi [9]. NPV dapat digunakan untuk memperkirakan biaya rata-rata DME (LC-DME). LC-DME adalah harga jual DME yang menghasilkan NPV nol. LC-DME dapat dibandingkan dengan harga pasar. Jika LC-DME lebih rendah dari harga pasar, maka DME lebih mungkin untuk menembus pasar saat ini.

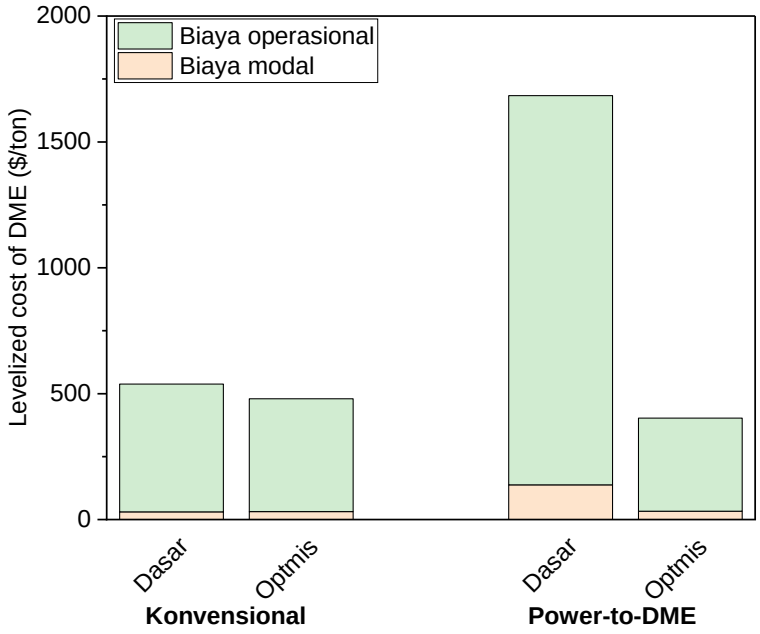
Harga pasar DME global berkisar antara 500 hingga 1000 $/ton tergantung pada lokasi geografis dan jenis bahan baku serta harganya (misalnya, gas alam, batu bara, atau metanol) (Analytiq, 2024). Dalam studi ini, kisaran rendah (~500 $/ton) dipilih sebagai baseline harga pasar. LC-DME dari rute konvensional dan rute power-to-DME ditunjukkan dalam Gambar 5. Dalam semua skenario, LC-DME berada dalam kisaran harga pasar DME saat menggunakan rute Konvensional. Ini menunjukkan bahwa asumsi ekonomi dan pemodelan proses sesuai dengan situasi pasar yang sebenarnya. Sementara itu, LC-DME dari Power-to-DME secara ekonomis tidak menarik dalam skenario dasar. Ketika membandingkan rute konvensional dan rute power-to-DME, LC-DME dari Power-to-DME dalam skenario dasar adalah 3 kali lebih tinggi dibandingkan LC-DME dari rute Konvensional. Namun, dalam skenario optimis, LC-DME dari Power-to-DME lebih rendah dari harga pasar dan juga lebih rendah daripada LC-

e-ISSN: 2963-2277

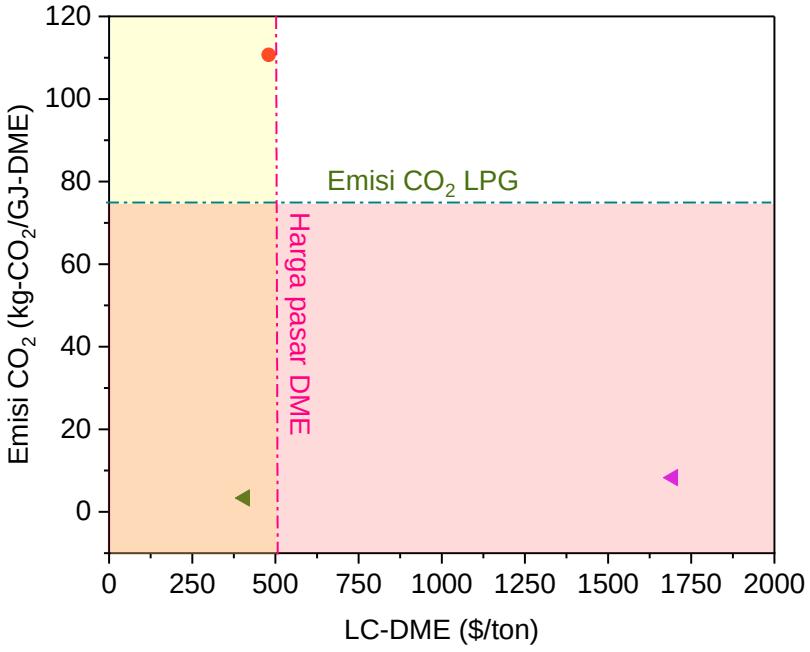
DME dari rute Konvensional. Penurunan baik dalam biaya operasional maupun biaya modal memiliki kontribusi yang sama terhadap penurunan biaya produksi DME di rute Power-to-DME.

Selain dari perspektif finansial, kami juga ingin menyelidiki kelayakan produksi DME dari perspektif lingkungan. Dalam studi ini, kami fokus pada gas rumah kaca yang dapat diukur sebagai emisi CO_2. Untuk membandingkan faktor emisi produksi DME secara adil, kami memilih emisi CO_2 dari produksi propana dari gas alam sebagai baseline (75 kg-CO_2/GJ) (Rawlusyk et al., 2022). Propana dipilih karena DME telah diusulkan sebagai pengganti propane (Marchionna et al., 2008). Rute produksi DME konvensional menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih tinggi (~110 kg-CO_2/GJ) dibandingkan dengan propana (Gambar 6). Emisi CO_2 yang terkait dengan ekstraksi bahan baku (gas alam) menyumbang ~4,5%, sementara kontributor utama emisi CO_2 adalah pembakaran bahan bakar (gas alam) untuk keperluan pemanasan (95,4%). Konsumsi bahan bakar tertinggi ditemukan pada reaktor dehidrasi (81%), diikuti oleh distilasi DME (14%), reformer (2%), distilasi metanol (2%), dan reaktor hidrogenasi (<1%). Emisi CO_2 akibat konsumsi listrik hanya menyumbang 0,15%.

Dalam rute power-to-DME, baik gas alam maupun listrik menjadi sumber energi utama. Oleh karena itu, emisi CO_2 dari pembakaran gas alam dan pembangkit listrik mengatur emisi CO_2 dari produksi DME. Faktor emisi listrik nuklir adalah ~28 g-CO2/kWh (WNA, 2010). Ketika listrik dihasilkan dari batubara (misalnya, batubara kualitas rendah (1069 g-CO_2/kWh), Batubara kualitas tinggi (888 g-CO2/kWh)) (WNA, 2010), emisi CO_2 terkait dengan produksi DME lebih tinggi dibandingkan dengan produksi propana. Netralitas karbon dari power-to-DME, di mana emisi CO_2 bersih dari produksi DME adalah nol, dapat dicapai ketika menggunakan listrik dengan faktor emisi 19 g-CO_2/kWh. Ini berarti bahwa emisi CO_2 negatif dapat diperoleh jika faktor emisi pembangkit listrik berada di bawah 19 g-CO_2/kWh. Jenis listrik ini dapat dipenuhi oleh berbagai sumber, seperti panel surya yang canggih dan nuklir. Dari Gambar 6, terlihat bahwa menggantikan propana dengan DME dapat menjadi potensi yang menjanjikan untuk mengurangi pemanasan global karena rute power-to-DME berpotensi menghasilkan emisi CO_2 yang lebih rendah dibandingkan dengan emisi CO_2 dari produksi propana. Ketika parameter operasional dalam skenario optimis serta listrik karbon rendah dapat tercapai, DME menjadi layak secara ekonomi dan lingkungan sebagai vektor energi, khususnya sebagai pengganti propana.



Gambar 5 Kontribusi biaya operasional dan biaya modal terhadap biaya rata-rata DME pada rute konvensional dan rute Power-to-DME pada dua skenario.



Gambar 6. Emisi CO_2 dan biaya LC-DME. Simbol bulat merah mewakili rute DME dari gas alam.

Simbol segitiga menunjukkan rute power-to-DME dalam skenario dasar (ungu), dan skenario optimis (hijau). Faktor emisi dihitung dengan batas *cradle-to-gate*. Emisi dari produksi propana

e-ISSN: 2963-2277

(garis putus-putus hijau) dan harga pasar DME (garis putus-putus merah muda) diambil dari literatur.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, kami melakukan analisis menyeluruh mengenai aspek ekonomi dan lingkungan dari produksi metanol dan DME berbasis sumber energi berkelanjutan. Kami membandingkan produksi metanol dari berbagai sumber biomassa seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan alga, serta dari batubara sebagai pembanding. Metanol berbasis batubara menunjukkan NPV positif dalam skenario dasar dan optimis, sedangkan metanol berbasis PKS dan alga menunjukkan NPV negatif pada skenario dasar. Temuan ini menyoroti pentingnya biaya bahan baku dalam menentukan NPV. Untuk produksi DME, kami mengevaluasi dua rute: konvensional dari gas alam dan power-to-DME yang menggunakan CO_2 dan air yang diubah menjadi H_2 menggunakan listrik rendah karbon. Biaya rata-rata DME (LC-DME) dari rute konvensional sesuai dengan harga pasar global, sedangkan LC-DME dari rute power-to-DME lebih tinggi dalam skenario dasar tetapi lebih rendah dalam skenario optimis.

Analisis lingkungan juga dilakukan dengan fokus pada emisi CO_2 dari produksi metanol dan DME. Kami membandingkan emisi CO_2 dari produksi metanol menggunakan listrik dari berbagai sumber, termasuk geotermal dan nuklir, serta dari jaringan distribusi listrik. Emisi CO_2 dari metanol berbasis batu bara lebih tinggi dibandingkan dengan metanol berbasis gas alam. Namun, penggunaan listrik berkarbon rendah dapat mengimbangi konsumsi energi tinggi dari metanol berbasis batu bara. Emisi CO_2 dari metanol berbasis PKS dan alga menunjukkan nilai negatif, mencerminkan kemampuan biomassa untuk menangkap CO_2. Untuk rute power-to-DME, netralitas karbon dapat dicapai dengan menggunakan listrik dengan faktor emisi di bawah 19 g-CO_2/kWh. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa DME memiliki potensi untuk mengurangi pemanasan global, terutama jika diproduksi dengan listrik berkarbon rendah dan efisiensi proses yang tinggi diproduksi secara massal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM) Universitas Islam Indonesia atas pendanaan penelitian ini berdasar kontrak No. 008/Dir/DPPM/70/Pen.Unggulan/IV/2024.

DAFTAR PUSTAKA

Adnan, M. A., Hidayat, A. (2024). Production of sustainable methanol from aquatic biomass via thermal conversion route. *Process Safety and Environmental Protection*.

Adnan, M. A., Hossain, M. M., & Kibria, M. G. (2020). Biomass upgrading to high-value chemicals via gasification and electrolysis: A thermodynamic analysis. *Renewable Energy, 162*, 1367–1379.

Adnan, M. A., & Kibria, M. G. (2020). Comparative techno-economic and life-cycle assessment of power-to-methanol synthesis pathways. *Applied Energy, 278*, 115614.

Analytics, C. (2020). Global update: Paris Agreement turning point. *Climate Analytics*.

Analytiq, B. (2024). Dimethyl ether price August 2024 and outlook. *Business Analytiq*.

Byambajav, E., Paysepar, H., Nazari, L., & Xu, C. (2018). Co-pyrolysis of lignin and low rank coal for the production of aromatic oils. *Fuel Processing Technology, 181*, 1–7.

Chang, J., Fu, Y., & Luo, Z. (2012). Experimental study for dimethyl ether production from biomass gasification and simulation on dimethyl ether production. *Biomass and Bioenergy, 39*, 67–72.

EIA (U.S. Energy Information Administration). (2019). New methanol plants expected to increase industrial natural gas use through 2020. *U.S. Energy Information Administration*.

Graaf, G. H., Winkelman, J. G. M., Stamhuis, E. J., & Beenackers, A. A. C. M. (1988). Kinetics of the three-phase methanol synthesis, in: Bourne, J. R., Regenass, W., & Richarz, W. (Eds.), *Tenth International Symposium on Chemical Reaction Engineering* (pp. 2161–2168). Pergamon.

Harris, K., Grim, R. G., Huang, Z., & Tao, L. (2021). A comparative techno-economic analysis of renewable methanol synthesis from biomass and CO2: Opportunities and barriers to commercialization. *Applied Energy, 303*, 117637.

Jones, M. W., Peters, G. P., Gasser, T., Andrew, R. M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., Houghton, R. A., Friedlingstein, P., Pongratz, J., & Le Quéré, C. (2023). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data, 10*, 155.

Kofler, R., Campion, N., Hillestad, M., Meesenburg, W., & Clausen, L. R. (2024). Techno-economic analysis of dimethyl ether production from different biomass resources and off-grid renewable electricity. *Energy & Fuels, 38*, 8777–8803.

e-ISSN: 2963-2277

Liu, Y., Li, G., Chen, Z., Shen, Y., Zhang, H., Wang, S., Qi, J., Zhu, Z., Wang, Y., & Gao, J. (2020). Comprehensive analysis of environmental impacts and energy consumption of biomass-to-methanol and coal-to-methanol via life cycle assessment. *Energy, 204*, 117961.

Liu, Y., Yao, D., Xu, Z., Zhou, M., Zhou, Y., Wang, Y., Cui, P., & Zhu, Z. (2023). Comparative analysis of life cycle water accounting of the Lurgi low-pressure methanol production process with biomass or coal as raw materials. *Science of The Total Environment, 856*, 159129.

Makcharoen, M., Kaewchada, A., Akkarawatkhoosith, N., & Jaree, A. (2021). Biojet fuel production via deoxygenation of crude palm kernel oil using Pt/C as catalyst in a continuous fixed bed reactor. *Energy Conversion and Management: X, 12*, 100125.

Marchionna, M., Patrini, R., Sanfilippo, D., & Migliavacca, G. (2008). Fundamental investigations on di-methyl ether (DME) as LPG substitute or make-up for domestic uses. *Fuel Processing Technology, 89*, 1255–1261.

Methanex. (2024). Pricing. *Methanex*.

Michailos, S., McCord, S., Sick, V., Stokes, G., & Styring, P. (2019). Dimethyl ether synthesis via captured CO2 hydrogenation within the power to liquids concept: A techno-economic assessment. *Energy Conversion and Management, 184*, 262–276.

NASA (The National Aeronautics and Space Administration). (2023). Global temperature. *NASA*.

Nurdiawati, A., Zaini, I. N., & Aziz, M. (2019). Dual-stage chemical looping of microalgae for methanol production with negative-carbon emission. *Energy Procedia, 158*, 842–847.

Okokpujie, I. P., Onokwai, A. O., Onokpite, E., Babaremu, K., Ajisegiri, E. S. A., Osueke, C. O., Akinlabi, S. A., & Akinlabi, E. T. (2023). Modelling and optimisation of intermediate pyrolysis synthesis of bio-oil production from palm kernel shell. *Cleaner Engineering and Technology, 16*, 100672.

Peters, L., Hussain, A., Follmann, M., Melin, T., & Hägg, M. B. (2011). CO2 removal from natural gas by employing amine absorption and membrane technology—A technical and economical analysis. *Chemical Engineering Journal, 172*, 952–960.

Rawlusyk, B., Birn, K., Crawford, C., & Woloschuk, J. (2022). Life cycle analysis of emissions for propane from natural gas production in the Montney. *S&P Global Commodity Insights*.

Ribeiro, A. M., Santos, J. C., Rodrigues, A. E., & Rifflart, S. (2012). Syngas stoichiometric adjustment for methanol production and co-capture of carbon dioxide by pressure swing adsorption. *Separation Science and Technology*, *47*, 850–866.

Rosado, H. R. a. P. (2024). Energy mix. *Our World in Data*.

Schühle, P., Stöber, R., Semmel, M., Schaadt, A., Szolak, R., Thill, S., Alders, M., Hebling, C., Wasserscheid, P., & Salem, O. (2023). Dimethyl ether/CO2 – a hitherto underestimated H2 storage cycle. *Energy & Environmental Science*, *16*, 3002–3013.

Semmel, M., Ali, R. E., Ouda, M., Schaadt, A., & Sauer, J. (2021). Power-to-DME: A cornerstone towards a sustainable energy system, in: Spazzafumo, G. (Ed.), *Power to Fuel* (pp. 123–151). Academic Press.

Shen, Y. (2024). Biomass pretreatment for steam gasification toward H2-rich syngas production – An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, *66*, 90–102.

UN (United Nations). (2023). The Paris Agreement. *United Nations*.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*, 913–933.

WNA (World Nuclear Association). (2010). Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources. *World Nuclear Association*.

Zhang, H., Wang, L., Van herle, J., Maréchal, F., & Desideri, U. (2019). Techno-economic optimization of CO2-to-methanol with solid-oxide electrolyzer. *Energies*, *12*, 3742.

e-ISSN: 2963-2277