

# Peranan Gasifikasi Batubara Menjadi Dimetil Eter (DME) dalam Bauran Energi Baru dan Kontribusinya pada Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia

Putri Nur Fadhilla<sup>1</sup>, Nazaruddin Sinaga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro;

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Email : [putrinurfadhilla@students.undip.ac.id](mailto:putrinurfadhilla@students.undip.ac.id), [nsinaga19.undip@gmail.com](mailto:nsinaga19.undip@gmail.com)

**Abstrak :** Bauran energi primer di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil, salah satunya batubara. Indonesia tercatat memiliki sumber daya batubara sebesar 110,07 Milyar Ton dan cadangan sebesar 36,28 Milyar Ton, yang didominasi oleh batubara kalori rendah dan sedang. Sekitar 72% dari produksi batubara dalam negeri dilakukan ekspor. Saat ini Pemerintah tengah mendorong pemanfaatan batubara untuk peningkatan nilai tambah (PNT) melalui gasifikasi batubara menjadi Dimetil Eter (DME). DME memiliki karakteristik yang serupa dengan *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) sebagai bahan bakar untuk memasak rumah tangga. Pemanfaatan batubara melalui gasifikasi batubara menjadi DME diharapkan mampu mengurangi impor LPG yang pada tahun 2021 mencapai 6,33 juta ton (75,84%). Melalui beberapa regulasi dan insentif yang telah disiapkan oleh Pemerintah, gasifikasi batubara diharapkan dapat menekan import LPG hingga 1,9 juta ton pada tahun 2050. Selain terciptanya ketahanan energi nasional, upaya ini juga berkontribusi terhadap peningkatan bauran energi baru sebesar 3% pada tahun 2025 dan 1,9% pada tahun 2050, serta berkontribusi pada penurunan gas rumah kaca hingga 14,03% pada tahun 2025 dan 33,35% pada tahun 2050 pada pembakaran DME sebagai bahan bakar memasak rumah tangga. Untuk mengurangi timbulan emisi CO<sub>2</sub>, perlu dilakukan beberapa pengembangan dalam produksi DME diantaranya menggunakan biomassa sebagai bahan baku, penangkapan CO<sub>2</sub>, dan yang baru-baru ini dikembangkan adalah memanfaatkan CO<sub>2</sub> yang ditangkap sebagai bahan baku untuk memproduksi DME.

**Kata Kunci :** gasifikasi batubara, DME, energi baru, gas rumah kaca

**Abstract :** *The primary energy mix in Indonesia is still dominated by fossil energy, one of which is coal. Indonesia is recorded to have coal resources of 110.07 billion tons and reserve of 36.28 billion tons, dominated by low and medium calorie coal. About 72% of domestic coal production is exported. Currently, the Government is encouraging the use of coal to increase added value through coal gasification into Dimethyl Ether (DME). DME has similar characteristics to Liquefied Petroleum Gas (LPG) as household cooking fuel. The utilization of coal* Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2023, Vol. 4, No. 2, pp 83 – 96

Received : 16 Februari 2023

Accepted : 12 April 2023

Published : 20 July 2023



**Copyright:** © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

*through coal gasification into DME is expected to reduce LPG imports, which in 2021 reached 6.33 million tons (75.84%). Through several regulations and incentives that have been prepared by the Government, coal gasification is expected to reduce LPG imports by up to 1.9 million tons in 2050. In addition to creating national energy security, this effort also contributes to an increase in the new energy mix by 3% in 2025 and 1.9% in 2050, and contributes to a reduction in greenhouse gases by 14.03% in 2025 and 33.35% in 2050 on the combustion of DME as household cooking fuel. To achieve lower greenhouse gas emission, advancements have to be made in producing DME include using biomass as a feedstock, capturing CO<sub>2</sub>, and more recently utilizing CO<sub>2</sub> as the material to produce DME.*

**Keywords :** *coal gasification, DME, new energy, greenhouse gases*

---

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan LPG di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 8,35 juta ton yang didominasi oleh kebutuhan rumah tangga (95,9%) (KESDM, 2022). Hal ini merupakan buah keberhasilan dari program substitusi minyak tanah dengan LPG untuk memasak di rumah tangga dan usaha kecil yang telah diterapkan sejak tahun 2007. Kebutuhan LPG dalam negeri dipenuhi dari produksi kilang dan impor LPG. Produksi LPG dalam negeri relatif tidak meningkat karena keterbatasan bahan baku, sehingga tingginya permintaan LPG sebagian besar disuplai dari impor LPG yang saat ini mencapai 75,84%. Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) tahun 2015 – 2050, kebutuhan LPG tahun 2025 diproyeksikan sebesar 9,5 juta ton, dan pada tahun 2050 mencapai 13,2 juta ton apabila tidak dilakukan kebijakan pengurangan impor. Kebutuhan LPG dan skenario pengurangan impor salah satunya dipenuhi melalui pengembangan DME.

DME, dengan rumus kimia (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O merupakan salah satu senyawa golongan eter, yang bersifat mudah menguap, namun tidak karsinogenik, tidak teratogenik, tidak mutagenik, dan tidak beracun (Semelsberger et al., 2006). Good et al (1998) telah melakukan penelitian terhadap umur tinggal dan potensi pemanasan global dari DME dengan hasil bahwa DME mampu tinggal di troposfer selama 5,1 hari dengan potensi pemanasan global sebesar 1,2 (20 tahun), 0,3 (100 tahun), dan 0,1 (500 tahun). DME diyakini menjadi salah satu kandidat yang tepat untuk substitusi penggunaan LPG karena memiliki karakteristik yang sama, menghasilkan api berwarna, serta memiliki rentang tekanan uap yang sama (Parbowo et al., 2019).

Salah satu proses pembentukan DME adalah melalui gasifikasi batubara. Indonesia tercatat memiliki sumber daya batubara sebesar 110,07 Milyar Ton dan cadangan sebesar 36,28 Milyar Ton, yang didominasi oleh batubara kalori rendah dan sedang (Badan Geologi KESDM, 2022). Sekitar 72% dari produksi batubara dalam negeri dilakukan ekspor, sedangkan sisanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri. Pemanfaatan batubara dalam negeri mayoritas digunakan sebagai bahan bakar pada sektor pembangkit (PLTU) yaitu sekitar 80%, selebihnya digunakan sebagai bahan bakar pada industri semen, tekstil, kertas, dan metalurgi. Kondisi tersebut diharapkan dapat mendorong pemanfaatan batubara dalam negeri melalui gasifikasi batubara menjadi DME untuk meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi impor LPG.

Tidak dapat dipungkiri bahwa pemanfaatan energi fosil (batubara sebagai bahan baku proses gasifikasi) juga berkaitan erat dengan berbagai masalah lingkungan hidup terutama meningkatnya pemanasan global. Kekhawatiran tentang isu pemanasan global yang kian meningkat menjadikan

penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca khususnya CO<sub>2</sub>. Batubara menyumbang 37,62% dari bauran energi primer (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2022) dan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pemanfaatan batubara baik dalam kegiatan pembangkit listrik maupun industri lainnya diyakini menyumbang emisi CO<sub>2</sub> terbesar dari sektor energi. Indonesia sebagai salah satu negara anggota yang turut menyetujui Paris Agreement, berkomitmen untuk mencapai target penurunan emisi gas rumah kaca hingga tahun 2050. Oleh karena itu sangat penting untuk mencari teknologi gasifikasi yang bersih dan berefisiensi tinggi, serta metode penangkapan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan selama proses gasifikasi untuk mengatasi masalah gas rumah kaca.

Dari uraian di atas, beberapa poin penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemanfaatan DME adalah ketersediaan bahan baku. Meski cadangan batubara diproyeksikan masih mencukupi untuk kebutuhan selama 65 tahun ke depan, akan lebih baik apabila juga mempertimbangkan energi terbarukan seperti biomassa. Kedua, pengolahan batubara menjadi DME harus aman bagi lingkungan, baik dalam proses produksi DME maupun emisi sehingga tidak memperburuk timbulan emisi yang telah ada. Ketiga, implementasi DME harus layak secara ekonomi. Dalam tulisan ini akan dibahas peranan gasifikasi batubara menjadi DME dalam bauran energi baru sesuai target yang telah ditetapkan dalam KEN, serta kontribusinya pada penurunan emisi gas rumah kaca di Indonesia.

## **2. Kebijakan dan Insentif terkait Gasifikasi Batubara**

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), batubara masih menjadi prioritas sumber energi dengan arah pengembangan dan pemanfaatan batubara untuk peningkatan nilai tambah (PNT) salah satunya melalui gasifikasi batubara menjadi DME, khususnya untuk batubara kualitas rendah. Proyek DME diharapkan dapat meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil lainnya khususnya LPG yang cadangannya semakin berkurang, serta mengurangi biaya impor yang semakin hari jumlahnya semakin bertambah.

Pada praktiknya, peningkatan nilai tambah batubara melalui gasifikasi batubara di Indonesia belum mencapai tahap komersial. Beberapa tantangan yang dihadapi selain dari sisi teknologi, diantaranya adalah minimnya investasi di sektor ini, belum jelasnya aturan mengenai harga DME, serta jaminan pasokan batubara dalam negeri (Sasongko et al., 2011). Guna mendukung terlaksananya PNT batubara, Pemerintah telah menerbitkan beberapa regulasi serta memberikan insentif bagi Perusahaan yang melakukan kegiatan PNT. Melalui Peraturan Pemerintah Nomor 96 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Kegiatan Usaha Pertambangan Mineral dan Batubara, telah diatur bahwa Pemegang Izin Usaha Pertambangan Khusus (IUPK) sebagai kelanjutan dari Perjanjian Karya Pengusahaan Pertambangan Batubara (PKP2B) wajib melaksanakan kegiatan pengembangan dan/atau pemanfaatan batubara dalam negeri secara terintegrasi (mulai dari proses penambangan sampai dengan pengolahan batubara). Seperti diketahui bahwa Perusahaan pemegang PKP2B merupakan Perusahaan tambang yang besar, baik dari sisi luasan wilayah pertambangan maupun kapasitas produksi batubara.

Selain itu, melalui Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Energi dan Sumber Daya Mineral, Pemerintah juga memberikan dukungan insentif bagi Perusahaan yang melakukan kegiatan PNT, diantaranya pengurangan royalti batubara hingga 0%, harga khusus batubara untuk PNT yang dilakukan di mulut tambang, serta jangka waktu khusus Izin Usaha Pertambangan (IUP) yang digunakan untuk PNT yaitu menjadi sesuai umur ekonomis (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2021). Proyek gasifikasi batubara saat ini telah dikembangkan oleh

pertusahaan tambang batubara yang telah memperoleh perpanjangan izin dari PKP2B menjadi IUPK di Tanjung Enim, yang mengolah batubara menjadi DME dengan kapasitas produksi 1,4 juta ton DME yang dihasilkan dari 6 juta ton batubara berkalori rendah. Pabrik ini diperkirakan akan beroperasi pada tahun 2024. Tentu saja perkembangan ini akan diikuti oleh Perusahaan pemegang PKP2B lainnya terutama generasi I yang izinnnya akan segera berakhir dan beralih menjadi IUPK. Oleh karena itu diharapkan kegiatan PNT dapat mencapai tahap komersial sehingga dapat mengurangi impor LPG guna memberikan kontribusi bagi peningkatan ketahanan energi dalam negeri, membuka lapangan pekerjaan, menambah investasi asing, serta menghemat cadangan devisa negara.

### 3. DME sebagai Bahan Bakar Memasak Rumah Tangga

DME memiliki beberapa kegunaan, salah satunya sebagai bahan bakar untuk kebutuhan memasak rumah tangga menggantikan LPG. DME dipilih sebagai kandidat yang potensial menggantikan LPG dengan pertimbangan bahwa DME memiliki beberapa sifat antara propana dan n-butana, yang merupakan komposisi utama penyusun LPG. DME mudah dicairkan di bawah tekanan (Nakyai & Saebea, 2019) sehingga memiliki fase yang sama dengan LPG.

**Tabel 1.** Sifat Fisika DME, Propana, dan n-Butana (Bhattacharya et al., 2013 dan Arya et al., 2016)

	Propana	n-Butana	DME
Rumus kimia	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
Berat molekul (g/mol)	44,1	58,12	46,07
Titik leleh (°C)	-189,69	-138,32	-141,5
Titik didih (°C)	-42,07	-0,6	-24,9
Titik nyala (°C)	-104	-72	-41,11
Batas ledakan (%)	2.1-9.5	1.9-8.5	3.4-17
Nilai kalor tertinggi (MJ/kg)	50,34	49,49	31,7
Nilai kalor terendah (MJ/kg)	46,4	48	28,8
Angka cetan	5	-	55-60
Entalpi pembakaran (kJ/mol)	-2220	-2877,5	-1460,4
Suhu <i>auto-ignition</i> (°C)	450	405	235
Berat jenis (fase gas) (g/cm <sup>3</sup> )	1,969	2,595	2,057
Berat jenis (fase cair) (g/cm <sup>3</sup> )	0,49	0,599	0,67
Tekanan uap pada 20°C (bar)	8,4	2,1	5,1

Dari tabel di atas terlihat bahwa terdapat perbedaan sifat fisik antara DME dan LPG (propana dan n-butana) yang disebabkan oleh perbedaan struktur kimia keduanya. Kompor dengan memanfaatkan 100% DME telah dikembangkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi Indonesia (LEMIGAS) yang menunjukkan efisiensi kompor berkisar 72 – 74% (Yuliarita et al., 2020) dengan uji kinerja yang sebanding dengan kompor LPG dengan waktu pemasakan 1,1 – 1,2 kali lebih lama. Anggarani et al (2014) juga melakukan penelitian terhadap uji kinerja kompor LPG dengan campuran DME-LPG bervariasi dari 5 – 50% terhadap konsumsi panas, efisiensi bahan bakar, dan stabilitas nyala api sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 7368:2007. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi DME di dalam campuran menyebabkan konsumsi panas dan efisiensi bahan bakar kompor menurun (Murti et al., 2021), yang disebabkan karena desain kompor

yang digunakan lebih kompatibel dengan LPG murni. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi Oleh karena itu penggunaan DME murni sebagai bahan bakar untuk memasak perlu untuk dilakukan modifikasi terhadap kompor yang saat ini digunakan.

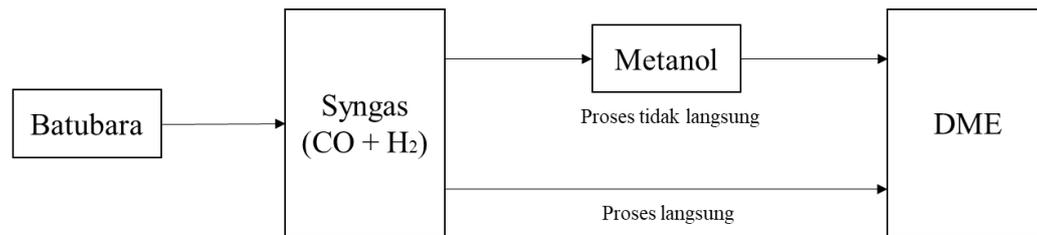
Perbedaan desain kompor yang ada saat ini menjadikan penggunaan campuran DME-LPG menjadi alternatif yang layak untuk dilakukan. Beberapa penelitian terkait campuran DME-LPG yang optimal telah dilakukan. Campuran antara DME dan LPG dengan proporsi 20% DME dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk memasak dengan hasil yang optimum tanpa perlu dilakukan modifikasi terhadap kompor eksisting (International DME Association, 2013). (Marchionna et al., 2008) meneliti campuran DME-LPG terhadap lima kompor masak LPG konvensional dengan tiga pembakar yang berbeda dan menemukan bahwa konsentrasi volume optimum DME dalam campuran LPG adalah 15-20%.

Dalam rangka mendukung pemanfaatan DME sebagai substitusi LPG, Pertamina melakukan pengembangan kompor yang dapat digunakan secara bergantian untuk bahan bakar LPG, DME, dan gas bumi, yang disebut dengan *flexy gas stove*. Hasil dari kegiatan pengembangan saat ini antara lain proses desain ulang *prototype flexy gas stove*, desain gambar teknis *flexy gas stove* (termasuk dimensi dan data material komponen kompor), daftar rekomendasi komponen non logam pada kompor dan perlengkapannya (termasuk katup kompor, selang, regulator, seal luar katup tabung, dan seal dalam katup tabung), konsep untuk usulan SNI *flexy gas stove*, dan estimasi biaya produksi dan harga jual kompor (KESDM, 2022). Seiring dengan proses realisasi pabrik gasifikasi batubara hingga ke tahap komersialisasi, diharapkan kompor ini juga siap untuk digunakan.

#### 4. Sintesis DME dari Batubara Melalui Gasifikasi

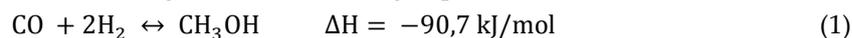
Di antara metode konversi termokimia, gasifikasi adalah proses yang lebih disukai dibandingkan dengan pirolisis dan pembakaran karena produk gas yang dihasilkan lebih bersih, memiliki efisiensi pemulihan energi yang lebih tinggi dan menguntungkan dalam hal kapasitas panas (Tezer et al., 2022), serta melepaskan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih sedikit (Midilli et al., 2021). Proses gasifikasi berlangsung pada suatu reaktor gasifikasi. Terdapat beberapa jenis gasifier bergantung pada agen gasifikasi yang digunakan, temperatur, tekanan, metode pasokan panas, serta jenis material bed yang digunakan, di antaranya *fixed bed*, *fluidized bed*, *entrained bed gasification* (Wang et al., 2009), and *plasma gasification* (Midilli et al., 2021).

Gasifikasi mengubah material padat yang mengandung karbon menjadi produk gas yang disebut dengan syngas (yang sebagian besar mengandung CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>), biochar, abu, dan tar dengan keberadaan agen gasifikasi yang berlangsung pada temperatur tinggi. Syngas sebagai senyawa antara pada sintesis DME merupakan rute yang dianggap bersih untuk memproses batubara kualitas rendah. Syngas diperoleh dari gasifikasi batubara dengan bantuan katalis K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> atau Ca(OH)<sub>2</sub> (Masudi et al., 2020), yang selanjutnya dikonversi menjadi DME. Terdapat 2 metode sintesis DME yang umum digunakan, yaitu metode langsung, dimana DME diproduksi langsung dari syngas, dan metode tidak langsung, dimana DME diperoleh melalui dehidrasi metanol (Azizi et al., 2014).

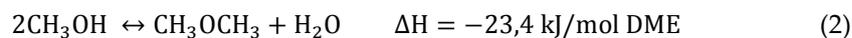


**Gambar 1.** Metode Sintesis DME (Azizi et al., 2014)

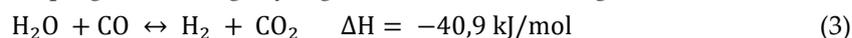
Pada metode tidak langsung, DME diproduksi dari syngas dalam 2 langkah proses, pertama produksi dan pemurnian metanol, kemudian konversi metanol menjadi DME melalui proses dehidrasi (Sikarwar et al., 2017). Metanol disintesis dengan bantuan katalis berbasis tembaga seperti  $\text{CuO/ZnO/Al}_2\text{O}_3$  (Larson & Yang, 2004), sesuai dengan persamaan reaksi di bawah ini:



DME diproduksi dari proses dehidrasi metanol menggunakan katalis  $\gamma$ -alumina sesuai dengan persamaan reaksi:



Dari persamaan di atas terlihat bahwa reaksi dehidrasi metanol merupakan reaksi eksotermik, sehingga produksi DME lebih disukai pada suhu rendah (Fortin et al., 2020). Dengan mengkombinasikan katalis pada proses pembentukan metanol dan dehidrasi pada reaktor yang sama, reaksi 1 dan 2 di atas dapat berlangsung simultan menjadi sintesis langsung DME. Ateka et al (2018) menggunakan katalis bifungsional ( $\text{CuO-ZnO-MnO}$  dan zeolit) pada suhu operasi dan tekanan masing-masing  $200\text{-}300^\circ\text{C}$  dan  $30\text{-}70$  bar. Reaksi pergeseran air-gas terlingkup di dalamnya karena katalis yang digunakan dalam pembentukan metanol di reaksi sintesis DME secara langsung juga dapat berlaku sebagai katalis reaksi pergeseran air-gas yang efektif (Larson & Yang, 2004):



Sintesis DME secara langsung mengkombinasikan persamaan reaksi 1, 2, dan 3 sebagai berikut:

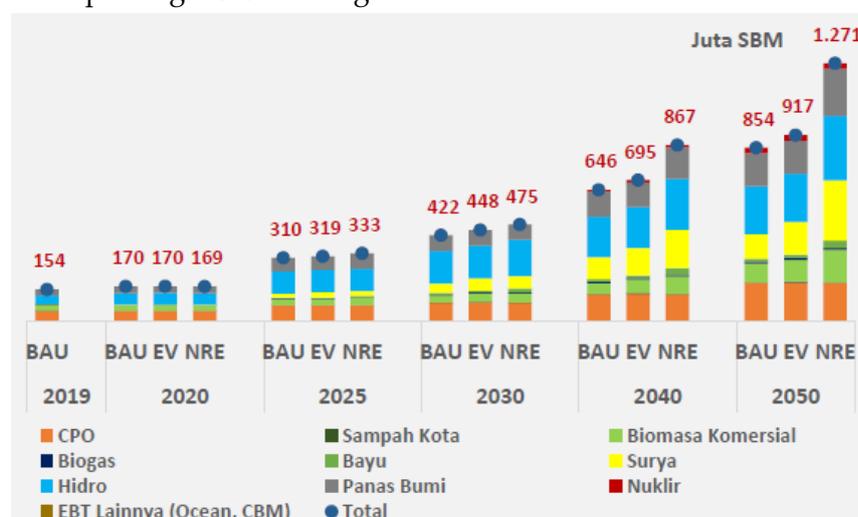


DME hasil sintesis diperoleh dengan memisahkan produk dari syngas yang tidak dikonversi melalui destilasi. Sintesis DME secara langsung dari syngas umumnya lebih disukai karena menunjukkan konversi CO yang tinggi, selektivitas dan perolehan DME yang lebih tinggi dari perspektif termodinamika (Chen et al., 2019) daripada methanol dan biaya produksinya yang lebih rendah (Chang et al., 2012).  $\text{CO}_2$  yang terbentuk sebagai produk samping dari sintesis DME dapat ditangkap melalui teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS), untuk mengurangi emisi  $\text{CO}_2$  yang terlepas ke atmosfer.  $\text{CO}_2$  ditangkap pada saat berlangsung reaksi pergeseran air-gas, atau sebelum proses sintesis DME untuk menghindari penurunan hasil DME (Kabir & Bhattacharya, 2011). Penurunan hasil DME terjadi karena  $\text{CO}_2$  bersaing pada proses hidrogenasi dan katalis asam bifungsional sehingga mengurangi tingkat dehidrasi methanol (Brown et al., 1991).  $\text{CO}_2$  yang ditangkap kemudian disimpan untuk didaur ulang sebagai bahan baku untuk menghasilkan DME, atau dimanfaatkan lebih lanjut melalui teknologi *Integrated Carbon Capture Usage* (ICCU) untuk dimanfaatkan sebagai energi listrik.

## 5. DME dalam Bauran Energi Baru

Bauran energi primer di Indonesia masih didominasi oleh batubara, karena dianggap paling ekonomis serta sumber dayanya yang melimpah, terutama untuk memenuhi kebutuhan sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang KEN, Pemerintah menargetkan penyediaan dan pemanfaatan energi primer dimana pada tahun 2025 peran batubara minimal 30% dan pada tahun 2050 minimal 25%. Peran Energi Baru dan Energi Terbarukan (EBT) paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan paling sedikit 31% pada tahun 2050 sepanjang keekonomiannya terpenuhi. Pada tahun 2020, pencapaian bauran energi EBT baru mencapai 11,28% (Siaran Pers KESDM Nomor: 25.Pers/04/SJI/2022), dan pada tahun 2021 hanya terjadi sedikit peningkatan menjadi 11,5%. Pencapaian ini masih jauh dari target yang ditetapkan oleh KEN.

Data yang dirilis oleh BPPT pada tahun 2021 menyebutkan bahwa dengan skenario *Business as Usual* (BaU), pada tahun 2025 pangsa EBT diperkirakan hanya mencapai 15,2 % dan pada tahun 2050 sebesar 18% yang masih cukup jauh dari target bauran EBT sesuai KEN. Dari angka tersebut diketahui bahwa pertumbuhan penyediaan EBT dengan skenario ini dalam kurun waktu 2019 – 2050 rata-rata sebesar 5,7% per tahun. Jika menggunakan skenario EV (*Electric Vehicle*) terdapat kenaikan rata-rata nya menjadi 5,9% per tahun, sehingga pada tahun 2025 pangsa EBT diperkirakan mencapai 15,6% dan pada tahun 2050 sebesar 19,1%. Jika menggunakan skenario NRE (*New Renewable Energy*) terdapat kenaikan pertumbuhan rata-rata menjadi 7% per tahun, sehingga pada tahun 2025 pangsa EBT diperkirakan mencapai 16,2% dan pada tahun 2050 mencapai 25,4% yang pemanfaatannya didominasi untuk pembangkit listrik terutama oleh hidro, panas bumi, biomassa (termasuk CPO), dan energi surya. Dengan ketiga skenario di atas (BaU, EV, dan NRE), penyediaan EBT masih belum mampu untuk mencapai target sesuai dengan KEN.



Gambar 2. Penyediaan Energi Baru dan Terbarukan Menggunakan 3 Skenario (BPPT, 2021)

Jika dilihat pada Gambar 2 di atas, pengembangan dan pemanfaatan yang dilakukan masih sebatas terkait dengan energi terbarukan, dan belum terlihat untuk kontribusi dari

sumber energi baru. Definisi sumber energi baru berdasarkan Peraturan Pemerintah tersebut yaitu sumber energi yang dapat dihasilkan oleh teknologi baru, baik yang berasal dari sumber energi terbarukan maupun sumber energi tak terbarukan, antara lain nuklir, hidrogen, gas metana batubara (*coal bed methane*), batubara tercairkan (*liquefied coal*), dan batubara tergasakan (*gasified coal*). Oleh karena itu gasifikasi batubara menjadi DME merupakan salah satu bentuk energi baru.

**Tabel 2.** Hasil Pemodelan Kebutuhan Dan Pasokan LPG Tahun 2015 – 2050 Sesuai RUEN

Satuan: Juta ton

Keterangan	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2040	2050
Produksi LPG	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,7	3,7	3,7	3,7
Impor LPG	3,2	3,5	3,7	4,1	4,4	4,7	4,0	4,2	4,2	4,4
Demand LPG (dengan upaya pengurangan impor LPG)	6,2	6,5	6,8	7,2	7,5	7,8	7,8	7,9	7,9	8,1
DME	0	0,002	0,002	0,04	0,04	0,04	1,0	1,2	1,5	1,9

Berdasarkan Tabel 2 di atas, Pemerintah telah menetapkan target penyediaan DME untuk substitusi LPG pada tahun 2025 sebesar 1 juta ton, dan pada tahun 2050 mencapai 1,9 juta ton. Target tersebut secara tidak langsung juga berkontribusi terhadap bauran energi baru sebesar 3% pada tahun 2025, dan 1,9% pada tahun 2050. Apabila produksi DME dalam negeri mampu melebihi target yang telah ditentukan sesuai Tabel 2 di atas, maka kontribusinya terhadap bauran energi baru juga semakin meningkat.

#### 6. Kontribusi Gasifikasi Batubara Menjadi DME dalam Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca

Pada dasarnya DME merupakan bahan bakar ramah lingkungan dengan emisi (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HC, dan PM) yang lebih rendah dibandingkan dengan LPG (Felixius et al., 2021; Makos et al., 2019). Namun tidak dapat dipungkiri bahwa pemanfaatan energi fosil (batubara sebagai bahan baku proses gasifikasi) juga berkaitan erat dengan berbagai masalah lingkungan hidup terutama meningkatnya pemanasan global akibat terlepasnya emisi gas rumah kaca berupa CO<sub>2</sub> ke atmosfer, baik dalam proses perolehan bahan baku batubara hingga proses produksinya. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui potensi timbulan emisi gas rumah kaca dari proses produksi DME dibandingkan dengan LPG.

**Tabel 3.** Potensi Timbulan Gas Rumah Kaca dari Produksi LPG dan DME

Lingkup penilaian daur hidup	LPG	DME	Referensi
Penambangan batubara, transportasi dan konversi batubara menjadi DME	-	5,5 kg CO <sub>2eq</sub> /kg DME	Lecksiwilai et al., 2016

Lingkup penilaian daur hidup	LPG	DME	Referensi
Penambangan batubara, transportasi dan konversi batubara menjadi DME	-	1,46 kg CO <sub>2eq</sub> /kg DME	Kim et al., 2012
Produksi	0,3 kg CO <sub>2eq</sub> /kg LPG	-	AEER, 2020; Shahrier et al., 2020
Ekstraksi dan pemurnian	0,1268 kg CO <sub>2eq</sub> /kg LPG	-	Kaushik & Muthukumar, 2018
Produksi	0,177 kg CO <sub>2eq</sub> /kg LPG	-	Johnson, 2009
Produksi bahan baku, proses, distribusi	43,05 kg CO <sub>2eq</sub> /GJ delivered heat for cooking	253,7 kg CO <sub>2eq</sub> /GJ delivered heat for cooking	US EPA, 2016

Dari tabel di atas terlihat bahwa faktor emisi produksi LPG sekitar 5 kali lebih rendah daripada DME. Hal ini cukup rasional karena dalam produksi DME melibatkan lebih banyak reaksi kimia dan energi yang ekstensif (Felixius et al., 2021). Guna mengurangi potensi terlepasnya gas rumah kaca ke atmosfer, perlu untuk mengembangkan teknologi gasifikasi yang bersih, serta menerapkan metode penangkapan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan selama proses gasifikasi. Banyak teknologi yang telah dikembangkan untuk menangkap CO<sub>2</sub> diantaranya absorpsi, adsorpsi, membran, rektifikasi pada temperatur rendah (Li et al., 2022), dan yang terkini dikembangkan adalah *carbon capture and storage* (CCS).

Proses gasifikasi batubara dapat digabungkan dengan teknologi CCS untuk menangkap emisi CO<sub>2</sub> sebelum dilepaskan ke atmosfer. CO<sub>2</sub> yang ditangkap selanjutnya didaur ulang untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk menghasilkan DME melalui dua pendekatan, yaitu sintesis metanol diikuti dengan reaksi dehidrasi (sintesis tidak langsung) dan hidrogenasi langsung CO<sub>2</sub> menjadi DME (sintesis langsung) (Centi et al., 2013), atau dimanfaatkan lebih lanjut melalui teknologi IGCC untuk dimanfaatkan sebagai energi listrik. Dalam siaran pers nya, Pertamina menyatakan bahwa melalui inisiatif *Integrated Carbon Capture and Usage* (ICCU) dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 45%. (Larson & Tingjin, 2003) dan (Liu & Larson, 2014) melakukan penelitian terhadap beberapa teknologi CO<sub>2</sub> *capture/separation* dari sintesis DME sebagai pembangkit listrik dengan potensi reduksi CO<sub>2</sub> sebesar 27-38%. Penelitian yang dilakukan terhadap daur ulang CO<sub>2</sub> sebagai agen gasifikasi pada proses produksi DME secara signifikan dapat mengurangi dampak buruk lingkungan berupa penurunan emisi mencapai 20% (Tomatis et al., 2019) atau 1.704 ton CO<sub>2</sub>/ton DME (Wu & Chien, 2022). Oleh karena itu melalui pemilihan teknologi yang tepat, proyek DME juga diharapkan dapat berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca dari sektor energi.

Bertolak belakang dari sisi produksi, emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan dari pembakaran DME sebagai bahan bakar untuk memasak jauh lebih rendah dibandingkan LPG. International DME Association (2013) menyatakan bahwa campuran DME/LPG dapat mengurangi timbulan emisi gas rumah kaca sebesar 30-80% dibandingkan dengan pembakaran LPG murni. Dalam publikasinya, US EPA (2016) menyatakan bahwa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran DME dan LPG

di Cina masing-masing sebesar 92 kg CO<sub>2eq</sub>/GJ kalor dan 145 kg CO<sub>2eq</sub>/GJ kalor. Berdasarkan nilai kalor DME dan LPG berturut-turut sebesar 28,4 MJ/kg dan 49 MJ/kg (Zhang et al., 2000), upaya substitusi LPG dengan DME sesuai dengan target dalam RUEN dapat mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 14,03% pada tahun 2025 dan 33,35% pada tahun 2050. Peningkatan produksi DME dalam negeri melebihi target yang telah ditentukan sesuai Tabel 2 di atas, maka kontribusinya penurunan emisi gas rumah kaca juga semakin meningkat.

## 7. Manfaat Ekonomi yang Diperoleh

Untuk dapat mencapai tahap komersial dan mensubstitusi penggunaan LPG, proyek DME harus layak secara ekonomi. Selain biaya investasi awal, terdapat biaya lainnya yang perlu diperhitungkan untuk mengetahui total pembiayaan proyek DME hingga layak untuk dikomersialkan. Investasi modal dan biaya operasional dapat diperhitungkan secara individual untuk setiap komponen yang berperan serta dalam proses gasifikasi, sedangkan rantai pasokan batubara melibatkan penentuan biaya pada beberapa tahap seperti proses penambangan, transportasi, dan penyimpanan (Narnaware & Panwar, 2022). Biaya investasi modal yang terlibat dalam sistem gasifikasi batubara meliputi biaya gasifier, sistem pengkondisian gas, dan penanganan produk. Biaya lainnya melibatkan konstruksi sipil, biaya operasional, biaya distribusi, biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan, dan lain-lain. Proyek DME diharapkan juga mampu berkontribusi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca, sehingga dalam perhitungan biaya perlu mempertimbangkan teknologi untuk mereduksi emisi CO<sub>2</sub> selama proses.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (2022) menyatakan bahwa harga patokan DME *Ex-Factory* sebesar USD 378/MT, dengan penambahan biaya distribusi (pipa, hub, freight cost, operational cost) serta mempertimbangkan margin yang diperoleh, maka harga patokannya menjadi USD 576/MT. Apabila ditambahkan biaya penanganan karbon sebagai upaya untuk mereduksi emisi CO<sub>2</sub> dari proses, maka total harga patokan menjadi sebesar USD 617,2/MT. Mempertimbangkan kesetaraan nilai kalor sebesar 1,3, maka harga patokan DME menjadi USD 802,4/MT, terhitung lebih mahal dari rata-rata harga patokan LPG 5 tahun terakhir (USD 703,96/MT), namun lebih rendah dari tahun 2021 (USD 842,91/MT) dan 10 tahun terakhir (USD 805,67/MT). Upaya ini diperkirakan dapat menghemat cadangan devisa negara hingga Rp 9,14 triliun/tahun.

## 8. Kesimpulan

Teknologi gasifikasi batubara hingga tahap komersialisasi sangat penting diterapkan di Indonesia guna mendukung kebijakan peningkatan nilai tambah batubara serta mengurangi impor LPG yang jumlahnya semakin bertambah. Selain didukung dari ketersediaan sumber daya serta cadangan batubara yang melimpah, karakteristik batubara Indonesia dengan mayoritas kalori menengah dan rendah sangat cocok diterapkan untuk teknologi gasifikasi. Di samping untuk meningkatkan ketahanan energi dalam negeri dan mengurangi impor LPG, gasifikasi batubara menjadi DME juga dapat berperan dalam bauran energi baru sesuai target yang telah ditetapkan dalam KEN, serta berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca di Indonesia. Berdasarkan hasil pemodelan kebutuhan dan pasokan LPG tahun 2015 – 2050 sesuai RUEN, upaya ini dapat berkontribusi terhadap peningkatan bauran energi baru sebesar 3% pada tahun 2025 dan 1,9% pada tahun 2050, serta berkontribusi pada penurunan gas rumah kaca hingga 14,03% pada tahun 2025 dan 33,35% pada tahun 2050 pada pembakaran DME sebagai bahan bakar memasak rumah tangga. Beberapa pengembangan perlu dilakukan untuk mengurangi timbulan emisi CO<sub>2</sub>, diantaranya menggunakan biomassa sebagai bahan baku,

penangkapan CO<sub>2</sub>, dan yang baru-baru ini dikembangkan adalah memanfaatkan CO<sub>2</sub> yang ditangkap sebagai bahan baku untuk memproduksi DME. Berdasarkan analisis kelayakan ekonomi yang telah dilakukan, proyek ini diperkirakan dapat menghemat cadangan devisa negara hingga Rp 9,14 triliun/tahun.

#### Daftar Pustaka

- AEER. (2020). *Hilirisasi Batubara Dalam Bentuk Dimethyl Ether (DME) Akan Meningkatkan Emisi Gas Rumah Kaca*. <http://aeer.info>
- Anggarani, R., Wibowo, C. S., & Rulianto, D. (2014). Application of dimethyl ether as LPG substitution for household stove. *Energy Procedia*, 47, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.218>
- Arya, P. K., Tupkari, S., Satish, K., Thakre, G. D., & Shukla, B. M. (2016). DME blended LPG as a cooking fuel option for Indian household: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 53, pp. 1591–1601). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.007>
- Ateka, A., Ereña, J., Bilbao, J., & Aguayo, A. T. (2018). Kinetic modeling of the direct synthesis of dimethyl ether over a CuO-ZnO-MnO/SAPO-18 catalyst and assessment of the CO<sub>2</sub> conversion. *Fuel Processing Technology*, 181, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.024>
- Azizi, Z., Rezaeimanesh, M., Tohidian, T., & Rahimpour, M. R. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. In *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* (Vol. 82, pp. 150–172). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.06.007>
- Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Neraca Sumber Daya dan Cadangan Batubara Indonesia 2021*.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2021). *Outlook Energi Indonesia 2021*.
- Bhattacharya, S., Kabir, K. B., & Hein, K. (2013). Dimethyl ether synthesis from Victorian brown coal through gasification - Current status, and research and development needs. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 39, Issue 6, pp. 577–605). <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2013.06.003>
- Brown, D. M., Bhatt, B. L., Hsiung, T. H., Lewnard, J. J., & Waller, F. J. (1991). Novel Technology for the Synthesis of Dimethyl Ether from Syngas. *Catalysis Today*, 8(3), 279–304.
- Centi, G., Quadrelli, E. A., & Perathoner, S. (2013). Catalysis for CO<sub>2</sub> conversion: a key technology for rapid introduction of renewable energy in the value chain of chemical industries. *Energy & Environmental Science*, 6(6), 1711. <https://doi.org/10.1039/c3ee00056g>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.044>
- Chen, J., Yang, S., & Qian, Y. (2019). A novel path for carbon-rich resource utilization with lower emission and higher efficiency: An integrated process of coal gasification and coking to methanol production. *Energy*, 177, 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.161>
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2021). *Laporan Kinerja Tahun 2020*.
- Felixius, V., Angelina, N., & Weslie, T. (2021). Achieving Sustainable Energy Security in Indonesia Through Substitution of Liquefied Petroleum Gas with Dimethyl Ether as Household Fuel. In *Indonesian Journal of Energy* (Vol. 4, Issue 2).
- Fortin, C., Gianfolcaro, N., Gonzalez, R., Lohest, J., Lonneux, A., Mordant, P., Kesnelle, A., Siliki, N., Peiffer, T., Renson, R., & Schmitz, C. (2020). *Dimethyl ether, A review of production processes and a modeling of the indirect route*.

- Good, D. A., Francisco, J. S., Jain, A. K., & Wuebbles, D. J. (1998). Lifetimes and global warming potentials for dimethyl ether and for fluorinated ethers: CH<sub>3</sub>OCF<sub>3</sub> (E143a), CHF<sub>2</sub>OCHF<sub>2</sub> (E134), CHF<sub>2</sub>OCF<sub>3</sub> (E125). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D21), 28181–28186. <https://doi.org/10.1029/98JD01880>
- International DME Association. (2013). *IDA Fact Sheet No. 1*.
- Johnson, E. (2009). Charcoal versus LPG grilling: A carbon-footprint comparison. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(6), 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.02.004>
- Kabir, K. B., & Bhattacharya, S. P. (2011, September 18). Dimethyl ether production from gasification of victorian brown coal-process model and related preliminary experiments. *CHEMECA 2011: Engineering a Better World*. <https://www.researchgate.net/publication/233959719>
- Kaushik, L. K., & Muthukumar, P. (2018). Life cycle Assessment (LCA) and Techno-economic Assessment (TEA) of medium scale (5–10 kW) LPG cooking stove with two-layer porous radiant burner. *Applied Thermal Engineering*, 133, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.050>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2022a). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2022b). *Laporan Kinerja Kementerian ESDM 2021*.
- Kim, S., Kim, J., & Yoon, E. S. (2012). Evaluation of coal-based dimethyl ether production system using life cycle assessment in South Korea. *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, 1387–1391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59506-5.50108-5>
- Larson, E. D., & Tingjin, R. (2003). Synthetic fuel production by indirect coal liquefaction. *Energy for Sustainable Development*, 7(4), 79–102. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60381-6](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60381-6)
- Larson, E. D., & Yang, H. (2004). Dimethyl ether (DME) from coal as a household cooking fuel in China. *Energy for Sustainable Development*, 8(3), 115–126. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60473-1](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60473-1)
- Lecksiwilai, N., Gheewala, S. H., Sagisaka, M., & Yamaguchi, K. (2016). Net Energy Ratio and Life cycle greenhouse gases (GHG) assessment of bio-dimethyl ether (DME) produced from various agricultural residues in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 134(Part B), 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.085>
- Li, H., Zhang, R., Wang, T., Sun, X., Hou, C., Xu, R., Wu, Y., & Tang, Z. (2022). Simulation of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> removal from IGCC syngas by cryogenic distillation. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100012>
- Liu, G., & Larson, E. D. (2014). Gasoline from coal via DME with electricity co-production and CO<sub>2</sub> capture. *Energy Procedia*, 63, 7367–7378. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.773>
- Makos, P., Słupek, E., Sobczak, J., Zabrocki, D., Hupka, J., & Rogala, A. (2019). Dimethyl ether (DME) as potential environmental friendly fuel. *E3S Web of Conferences*, 116. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600048>
- Marchionna, M., Patrini, R., Sanfilippo, D., & Migliavacca, G. (2008). Fundamental investigations on dimethyl ether (DME) as LPG substitute or make-up for domestic uses. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1255–1261. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.013>
- Masudi, A., Che Jusoh, N. W., & Muraza, O. (2020). Recent progress on low rank coal conversion to dimethyl ether as clean fuel: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 277). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124024>

- Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, Issue 50, pp. 25385–25412). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>
- Murti, G. W., Priyanto, U., Masfuri, I., & Adelia, N. (2021). The Effect Of Dimethyl Ether (D.M.E.) as LPG Substitution On Household Stove: Mixture Stability, Stove Efficiency, Fuel Consumption, And Materials Testing. *15(2)*, 77–86.
- Nakyai, T., & Saebea, D. (2019). Exergoeconomic comparison of syngas production from biomass, coal, and natural gas for dimethyl ether synthesis in single-step and two-step processes. *Journal of Cleaner Production*, *241*, 118334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118334>
- Narnaware, S. L., & Panwar, N. L. (2022). Biomass gasification for climate change mitigation and policy framework in India: A review. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 17). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100892>
- 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 Conference Series: Materials Science and Engineering*, *543(1)*, 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/543/1/012060>
- Sasongko, N. A., Lambok, H., & Silalahi, M. A. O. (2011). Tinjauan Perkembangan Teknologi Gasifikasi Batubara di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Fundamental Dan Aplikasi Teknik Kimia 2011*, 1–5.
- Semelsberger, T. A., Borup, R. L., & Greene, H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, *156(2)*, 497–511. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.082>
- Shahrier, F., Jahan Eva, I., Mahi, A., Sadid Alam, C., & Harunur Rashid, A. (2020). Literature Review on LCA of LPG as a Transportation and Cooking Fuel. *Proceeding of the International Conference on Industrial & Mechanical Engineering and Operation Management*.
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Fennell, P. S., Shah, N., & Anthony, E. J. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, *61*, 189–248. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.001>
- Tezer, Ö., Karabağ, N., Öngen, A., Çolpan, C. Ö., & Ayol, A. (2022). Biomass gasification for sustainable energy production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.158>
- Tomatis, M., Mahmud Parvez, A., Afzal, M. T., Mareta, S., Wu, T., He, J., & He, T. (2019). Utilization of CO<sub>2</sub> in renewable DME fuel production: A life cycle analysis (LCA)-based case study in China. *Fuel*, *254*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115627>
- US EPA. (2016). *Life Cycle Assessment of Cookstove Fuels in India and China, Final Report*. [www.epa.gov/research](http://www.epa.gov/research)
- Wang, J., Li, Y., Han, Y., Sun, Y., Fang, Y., Zhao, J., & Qin, Z. (2009). Coal to liquid fuels by gasification and the associated hot gas cleanup challenges. In *Cuihua Xuebao / Chinese Journal of Catalysis* (Vol. 30, Issue 8, pp. 770–775). Science Press. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(08\)60123-0](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(08)60123-0)
- Wu, T. W., & Chien, I. L. (2022). A novel energy-efficient process of converting CO<sub>2</sub> to dimethyl ether with techno-economic and environmental evaluation. *Chemical Engineering Research and Design*, *177*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.013>
- Yuliarita, E., Zulkifliani, Atmanto, M. D., Sunarjanto, D., & Lubad, A. M. (2020). Kajian Pemanfaatan Gas DME (Dimethyl Ether) atau Uji Terap pada Sektor Rumah Tangga di Wilayah Sumatera Selatan. *Lembaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, *54(2)*, 61–67.

Zhang, J., Smith, K. R., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., & Thorneloe (2000). Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospheric Environment*, 34(26), 4537–4549. [https://pdxscholar.library.pdx.edu/phy\\_fac/314](https://pdxscholar.library.pdx.edu/phy_fac/314)