

HYMETHZ: Hilirisasi Limbah Organik Menjadi *Dimethyl Ether* (DME) Melalui *Bi-Reforming* Katalitik sebagai Strategi Substitusi Impor LPG Nasional

Veronica Michelle Evelyn¹, Reyner Matthew Santoso², Bryant Antonio Santoso Gondho³

^{1 2 3} Universitas Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

*Corresponding author: s160225023@student.ubaya.ac.i

Abstrak

Indonesia menghadapi paradoks ganda: akumulasi limbah organik yang mencapai 60% dari 200.000 ton timbulan sampah harian nasional dan ketergantungan impor LPG yang membebani devisa. Penelitian ini mengusulkan solusi integratif melalui konversi limbah menjadi *Dimethyl Ether* (DME) menggunakan teknologi *Bi-Reforming* katalitik. Berbeda dengan metode konvensional, penelitian ini menerapkan sintesis single-step menggunakan katalis ganda (bifungsional) yang memungkinkan reaksi berjalan simultan dalam satu reaktor, mengatasi hambatan kesetimbangan termodinamika. Simulasi proses menunjukkan bahwa metode ini mampu mencapai efisiensi konversi gas sintesis di atas 80%. Dari sisi ekonomi, analisis sensitivitas memproyeksikan bahwa substitusi 20% LPG dengan DME berbasis limbah dapat menghemat devisa negara hingga Rp 12,7 Triliun per tahun (Kemenkeu, 2025). Selain itu, teknologi ini menawarkan mitigasi lingkungan signifikan dengan mereduksi emisi metana yang memiliki Global Warming Potential 28 kali lebih tinggi dibanding CO₂. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi manajemen limbah dan energi tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga strategis untuk mendukung target Net Zero Emission 2060.

Kata Kunci: *Bi-Reforming*, *Dimethyl Ether* (DME), Ekonomi Sirkular, Ketahanan Energi, *Single-Step Synthesis*.

Pendahuluan

Indonesia saat ini sedang menghadapi paradoks ketahanan energi yang mengkhawatirkan. Data dari Nota Keuangan 2025 menunjukkan bahwa Indonesia masih terjebak dalam ketergantungan impor LPG yang mencapai 80% dari total kebutuhan nasional. Ketergantungan ini menciptakan beban fiskal yang masif dengan devisa negara sebesar Rp 63,5 Triliun yang hilang setiap tahunnya, sementara subsidi energi diproyeksikan membengkak hingga Rp 80,21 Triliun pada tahun 2024 (Kemenkeu RI, 2024). Di sisi lain, limbah organik mendominasi lebih dari 50% hingga 60% dari total sampah nasional (KLHK, 2024). Sebagai kasus nyata, TPA Bantar Gebang menerima beban hingga 15.000 ton sampah per

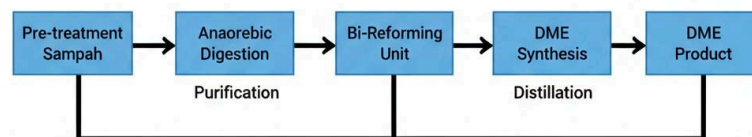
hari. Jika dibiarkan tanpa pengelolaan tepat, limbah ini akan melepas gas metana (CH_4) yang memiliki *Global Warming Potential* (GWP) 25 hingga 28 kali lebih tinggi dibandingkan CO_2 (IPCC, 2021).

Selama ini, kebijakan pengelolaan limbah dan pemenuhan energi berjalan secara terpisah (silo) sehingga menciptakan kesenjangan efisiensi. Inovasi Hymethz hadir sebagai solusi integratif dengan mentransformasi emisi metana menjadi *Dimethyl Ether* (DME) melalui proses *bi-reforming*. DME dipilih karena memiliki karakteristik pembakaran yang sangat mirip dengan LPG, sehingga mampu menjadi substitusi langsung tanpa memerlukan perombakan infrastruktur distribusi dan perangkat kompor masyarakat secara drastis (International DME Association, 2023).

Implementasi teknologi ini didukung oleh penggunaan sistem sintesis langsung (*single-step*) yang secara teknis mengungguli metode dua tahap konvensional. Penggunaan katalis berbasis nikel ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) pada unit *bi-reforming* dan katalis ganda ($\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ serta H-ZSM-5) pada unit sintesis memungkinkan konversi gas hingga di atas 80% (Deng dkk., 2019). Dari perspektif makro ekonomi, substitusi parsial sebesar 20% melalui produksi DME domestik diproyeksikan mampu menyelamatkan devisa negara hingga Rp 12,7 Triliun per tahun (Kemenkeu RI, 2025). Inovasi ini mendorong kemandirian energi lokal yang selaras dengan semangat "*Co-Create Tomorrow*" dalam Era *Society 5.0*.

Metode

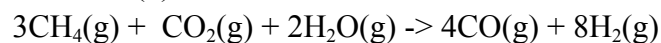
Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan desain Studi Literatur Terstruktur (*Structured Literature Review*) yang dikombinasikan dengan pendekatan Analisis Deskriptif-Kuantitatif. Kerangka berpikir penelitian disusun secara sistematis untuk memetakan alur transformasi energi dari hulu hingga ke hilir, yakni konversi limbah menjadi produk *Dimethyl Ether* (DME) sebagai substitusi LPG. Seluruh data yang dihimpun divalidasi melalui parameter teknis dan fiskal yang relevan untuk menjamin akurasi analisis kelayakan



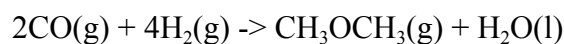
Gambar 1. Diagram Alir Blok (*Block Flow Diagram*) Proses Hymethz. Proses mencakup tiga tahapan utama: (1) Konversi limbah menjadi biogas, (2) Konversi metana menjadi syngas melalui *Bi-Reforming*, dan (3) Sintesis langsung DME menggunakan katalis ganda.

Proses teknologi Hymethz dirancang melalui integrasi tiga tahapan unit operasi utama dengan spesifikasi teknis yang presisi. Tahap pertama adalah *Anaerobic Digestion*, di mana bahan baku limbah organik diumpungkan ke dalam reaktor *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR) dalam kondisi anaerob. Proses ini beroperasi pada kondisi mesofilik dengan temperatur terjaga pada rentang 35-37°C dan waktu tinggal hidrolis (*Hydraulic Retention Time*) selama 20-30 hari untuk memaksimalkan degradasi biomassa menjadi biogas dengan kandungan metana (CH₄) optimal (KLHK, 2024; Deublein & Steinhauser, 2011). Gas keluaran selanjutnya dimurnikan sebelum memasuki unit kedua, yakni *Bi-Reforming Methane* (BRM).

Pada unit BRM, metana direaksikan dengan CO₂ dan uap air (H₂O) dalam reaktor *fixed-bed* yang dilengkapi pemanas eksternal (*furnace*) karena sifat reaksi yang sangat endotermis. Reaksi ini menggunakan katalis berbasis nikel yang disangga pada alumina (Ni/Al₂O₃) untuk mencegah pembentukan karbon (*coking*). Proses berlangsung pada temperatur tinggi 800–900°C dan tekanan moderat 10–20 bar untuk menghasilkan gas sintesis (*syngas*). Stoikiometri reaksi diatur secara ketat untuk mencapai rasio molar H₂/CO sebesar 2:1, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1):



Tahap terakhir adalah *Direct DME Synthesis* (Single-step), di mana *syngas* yang telah didinginkan dan dikompresi dikonversi langsung menjadi DME dalam reaktor *multitubular fixed-bed* yang beroperasi pada tekanan 30–50 bar dan temperatur 240–280°C. Unit ini menggunakan sistem katalis ganda (*bifunctional catalyst*) yang terdiri dari katalis berbasis logam (CuO/ZnO/Al₂O₃) untuk hidrogenasi CO menjadi metanol, serta katalis asam padat (Zeolit H-ZSM-5) untuk dehidrasi metanol menjadi DME secara simultan. Proses konversi *syngas* menjadi DME berlangsung melalui reaksi global yang disajikan pada Persamaan (2):



Mekanisme pada Persamaan (2) difasilitasi oleh sistem katalis ganda yang menciptakan efek sinergi kinetika. Metanol yang terbentuk sementara pada situs logam (*metallic sites*) langsung dikonsumsi oleh situs asam (*acidic sites*), sehingga mencegah akumulasi produk antara. Fenomena *in-situ* ini memungkinkan sistem untuk melampaui batasan kesetimbangan termodinamika tradisional (*thermodynamic bottleneck*), yang pada akhirnya menghasilkan tingkat konversi *syngas* yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode dua tahap konvensional (International DME Association, 2023; Deng dkk., 2019). Pemilihan H-ZSM-5 didasarkan pada stabilitas termalnya yang tinggi serta ketahanan terhadap deaktivasi akibat keberadaan uap air dalam reaktor.

Hasil dan Pembahasan

Keunggulan fundamental dari inovasi Hymethz terletak pada implementasi sistem sintesis langsung satu tahap (*single-step direct synthesis*) yang secara teknis terbukti mengungguli metode dua tahap konvensional.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Termodinamika dan Operasional Sintesis DME

Parameter Perbandingan	Metode Dua Tahap (Konvensional)	Metode Satu Tahap (Direct Synthesis)	Keunggulan Strategis
Konfigurasi Reaktor	Dua Reaktor Terpisah	Satu Reaktor Tunggal (Katalis Ganda CuO/ZnO/Al ₂ O ₃ + H-ZSM-5)	Efisiensi Biaya Kapital (CAPEX) & Jejak Karbon
Batasan Keseimbangan	Terbatas pada setiap tahap (Rendah)	Melampaui batas keseimbangan (<i>Synergetic Effect</i>)	Konversi per <i>pass</i> jauh lebih tinggi
Konversi CO per Pass	20% – 25%	> 80%	Mengurangi beban sirkulasi gas sisa
Yield DME	Rendah (terhambat akumulasi MeOH)	Tinggi (MeOH langsung dikonversi)	Produktivitas per satuan massa katalis
Efisiensi Termal	Kehilangan panas tinggi antar reaktor	Integrasi panas optimal dalam satu reaktor	Efisiensi Energi Operasional (OPEX)
Produk Samping	Akumulasi metanol murni	Minimal (dominan DME dan air)	Penyederhanaan proses pemurnian (<i>purification</i>)

Tabel 1 menunjukkan integrasi katalis ganda menciptakan dorongan termodinamika signifikan. Dalam metode dua tahap konvensional, reaksi pembentukan metanol seringkali terhenti (stagnan) karena mencapai titik jenuh keseimbangan termodinamika. Sebaliknya, pada sistem Hymethz, keberadaan situs asam H-ZSM-5 yang berada dalam jarak mikroskopis dengan situs logam berfungsi untuk segera mengubah metanol yang terbentuk menjadi DME. Mekanisme ini secara terus-menerus "menarik" reaksi awal ke arah produk sesuai dengan Prinsip Le Chatelier, sehingga mampu meningkatkan konversi gas CO hingga di atas 80% (Deng dkk., 2019; International DME Association, 2023).

Efisiensi konversi yang tinggi pada sistem Hymethz divalidasi melalui perhitungan parameter termodinamika fundamental, yaitu Entalpi (ΔH) dan Energi Bebas Gibbs (ΔG). Evaluasi ini bertujuan untuk membuktikan secara matematis bahwa kondisi operasi yang dipilih adalah titik optimum untuk memicu kespontanan reaksi. Data properti standar untuk setiap komponen reaksi dirujuk

dari literatur standar termodinamika teknik kimia (Smith, Van Ness, & Abbott, 2018) sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Properti Termodinamika Standar Pembentukan (298 K)

Komponen	Rumus Kimia	Entalpi Pembentukan Standar (ΔH°_f , kJ/mol)	Energi Bebas Gibbs Standar (ΔG°_f , kJ/mol)	Entropi Standar (S° , J/mol.K)
Metana	CH ₄	-74,52	-50,46	186,2
Karbon Dioksida	CO ₂	-393,51	-393,36	213,7
Air (Uap)	H ₂ O	-241,82	-228,57	188,7
Karbon Monoksida	CO	-110,53	-137,17	197,6
Hidrogen	H ₂	0	0	130,6
Dimetil Eter	CH ₃ OCH ₃	-184,10	-112,90	266,4

(Sumber: Smith, J.M., Van Ness, H.C., & Abbott, M.M., "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 8th Ed)

Analisis kuantitatif pertama difokuskan pada unit *Bi-Reforming Methane* (BRM) dengan persamaan reaksi $3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CO} + 8\text{H}_2$. Untuk menentukan kebutuhan energi, perhitungan perubahan entalpi standar ($\Delta H_{\text{rxn}}^\circ$) dilakukan menggunakan Hukum Hess:

$$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ = \sum(n \Delta H_{f,\text{produk}}^\circ) - \sum(n \Delta H_{f,\text{reaktan}}^\circ)$$

Dengan mensubstitusi nilai dari Tabel 2, persamaan menjadi:

$$\Delta H_{\text{rxn}}^\circ = [4(-110,53) + 8(0)] - [3(-74,52) + (-393,51) + 2(-241,82)] = +658,59 \text{ kJ/mol}$$

Hasil positif (+658,59 kJ/mol) menegaskan sifat endotermis reaksi yang membutuhkan suhu tinggi. Selanjutnya, perubahan entropi (ΔS_{rxn}) dihitung untuk melihat derajat ketidakteraturan sistem melalui persamaan

$$\Delta S_{\text{rxn}}^\circ = \sum(n \cdot S_{\text{produk}}) - \sum(n \cdot S_{\text{reaktan}})$$

,yang menghasilkan:

$$\Delta S_{\text{rxn}}^\circ = [4(197,6) + 8(130,6)] - [3(186,2) + 213,7 + 2(188,7)] = +685,5 \text{ J/mol.K}$$

Validasi final dilakukan dengan menghitung Energi Bebas Gibbs pada suhu operasi $T = 850^\circ\text{C}$ (1.123 K) menggunakan persamaan Gibbs-Helmholtz:

$$\Delta G_T^\circ = \Delta H^\circ - TS^\circ$$

Dengan mengonversi satuan entropi menjadi kJ (0,6855 kJ/molK), diperoleh:

$$\Delta G_{1123\text{K}} = 658,59 - (1.123 \times 0,6855) = -111,22 \text{ kJ/mol}$$

Nilai ΔG yang sangat negatif ini membuktikan secara matematis bahwa reaksi hanya dapat berjalan spontan pada suhu tinggi, memvalidasi parameter operasi reaktor BRM.

Sebaliknya, analisis pada unit *Direct DME Synthesis* ($2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) menunjukkan fenomena termodinamika yang berbeda. Perhitungan entalpi reaksi dilakukan dengan prosedur yang sama:

$$\Delta H^\circ_{\text{rxn}} = [-184,10 + (-241,82)] - [2(-110,53) + 4(0)] = -204,86 \text{ kJ/mol}$$

Nilai negatif ini mengindikasikan pelepasan panas (eksotermis). Namun, tantangan muncul pada perhitungan entropi karena terjadi penurunan jumlah mol gas yang drastis, yang dibuktikan dengan perhitungan:

$$\Delta S^\circ_{\text{rxn}} = [266,4 + 188,7] - [2(197,6) + 4(130,6)] = -462,5 \text{ J/mol K}$$

Jika dievaluasi pada suhu operasi moderat $T = 260^\circ\text{C}$ (533 K) pada tekanan standar (1 atm), nilai energi bebas Gibbs ($\Delta G^\circ_{533\text{K}}$) diprediksi sebagai berikut:

$$\Delta G^\circ_{533\text{K}} = -204,86 - (533 \times -0,4625) = +41,65 \text{ kJ/mol}$$

Nilai ΔG° yang positif pada tekanan 1 atm menunjukkan bahwa reaksi secara termodinamika tidak spontan dan cenderung berjalan ke arah reaktan (kiri). Oleh karena itu, Hymethz menerapkan strategi operasi pada tekanan tinggi (30-50 bar). Pengaruh tekanan ini divalidasi menggunakan hubungan termodinamika non-standar:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q_p.$$

Di mana Q_p adalah kuosien reaksi berbasis tekanan parsial. Mengingat stoikiometri reaksi ($2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$), persamaan Q_p dapat dibandingkan sebagai perbandingan tekanan produk terhadap reaktan yang dipangkatkan koefisiennya:

$$Q_p = \frac{(P_{\text{CH}_3\text{OCH}_3}) (P_{\text{H}_2\text{O}})}{[(P_{\text{CO}})^2 (P_{\text{H}_2})^4]} = K_y \cdot (P_{\text{total}})^{\Delta n}$$

Karena reaksi melibatkan pengurangan jumlah mol gas ($\Delta n = \text{mol produk} - \text{mol reaktan} = 2 - 6 = -4$), variabel tekanan total (P_{total}) memiliki pangkat negatif yang signifikan. Dengan mensubstitusi $\Delta n = -4$, persamaan energi bebas Gibbs menjadi:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(K_y) + RT \ln(P^{-4})$$

Suku terakhir ($RT \ln P^{-4}$) atau ($-4RT \ln P$) menjadi faktor penentu utama. Jika disimulasikan pada tekanan operasi $P = 50 \text{ bar}$, koreksi energi bebas akibat tekanan adalah:

$$\Delta G_{\text{aktual}} \sim +41,65 - 69,32 = -27,67 \text{ kJ/mol}$$

Hasil akhir yang bernilai negatif ($\Delta G < 0$) ini membuktikan secara matematis bahwa peningkatan tekanan parsial reaktan secara drastis menggeser kesetimbangan, mengubah reaksi yang semula tidak mungkin (non-spontan) menjadi sangat spontan dan efisien pada kondisi operasi Hymethz.

Potensi implementasi teknologi ini didukung oleh ketersediaan bahan baku yang melimpah. Data SIPSN KLHK (2024) mencatat bahwa limbah organik

mendominasi lebih dari 50% total timbunan sampah nasional. Secara teknis, setiap satu ton sampah organik berpotensi menghasilkan 60–100 m³ biogas dengan konsentrasi metana (CH₄) rata-rata 60%. Melalui unit bi-reforming, metana tersebut direaksikan dengan konfigurasi rasio input CH₄:CO₂:H₂O yang presisi guna menghasilkan gas sintesis (syngas) dengan rasio H₂/CO sebesar 2:1. Rasio ini merupakan syarat mutlak untuk memastikan efisiensi sintesis bahan bakar cair berjalan optimal (Olah dkk., 2013).

Validasi kelayakan teknologi Hymethz diperkuat melalui komparasi karakteristik fisikokimia antara LPG konvensional dengan DME yang dihasilkan.

Tabel 3. Perbandingan Karakteristik Teknis LPG dan DME (Hymethz)

Parameter	Satuan	LPG (Propana dan Butana)	DME (Hymethz)	Analisis Keunggulan
Rumus Kimia	-	C ₃ H ₈ & C ₄ H ₁₀	CH ₃ OCH ₃	Oksigen dalam DME mendukung pembakaran sempurna
Nilai Kalor (LHV)	MJ/kg	46	29	Efisiensi pembakaran DME lebih tinggi di level operasional.
Angka Setana	-	-	>55	Mempercepat waktu penyalaan dan stabilitas api.
Emisi Partikulat	-	Rendah	Sangat Rendah (NoI Jelaga)	Tidak ada ikatan C-C, mencegah terbentuknya jelaga.
Kompatibilitas	-	Standar Industri	Penyesuaian Seal/Gasket	Menggunakan infrastruktur distribusi LPG eksisting.

Meskipun data menunjukkan bahwa DME memiliki Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value*) sebesar 29 MJ/kg, yang secara nominal lebih rendah dibandingkan LPG (46 MJ/kg), DME memiliki keunggulan pada efisiensi termal pembakaran. Hal ini disebabkan oleh kandungan oksigen bawaan dalam struktur molekul DME yang mencapai 34,8% (Aziz dkk., 2020). Karakteristik kimia ini menurunkan rasio udara-bahan baku (*Air-to-Fuel Ratio*) yang dibutuhkan menjadi 9,0 kg/kg, jauh lebih efisien dibandingkan LPG yang membutuhkan 15,5 kg/kg. Akibatnya, proses oksidasi berlangsung jauh lebih sempurna, meminimalkan

energi yang terbuang, serta mencegah pembentukan emisi karbon monoksida maupun partikulat jelaga karena ketiadaan ikatan C-C pada molekul DME.

Dari perspektif makro ekonomi, Hymethz menawarkan solusi strategis atas beban fiskal APBN. Mengingat volume impor LPG nasional yang telah mencapai 7 juta ton per tahun dengan kerugian devisa menyentuh angka Rp 63,5 Triliun, substitusi parsial sebesar 20% melalui produksi DME domestik diproyeksikan mampu menyelamatkan devisa negara hingga Rp 12,7 Triliun per tahun (Kemenkeu RI, 2025). Analisis kelayakan finansial proyek pada skala industri disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis Tekno Ekonomi Investasi Hymethz

Parameter Keuangan	Estimasi Nilai	Satuan	Analisis Kelayakan
CAPEX	120-150	Miliar IDR	Pengadaan reaktor BRM, unit pemurnian, dan katalis.
OPEX	4500-5200	IDR/kg DME	Di bawah harga pasar LPG non-subsidi (~Rp15.000/kg).
NPV	45,8	Miliar IDR	Positif (NPV > 0): Proyek menguntungkan.
IRR	18,5%	Persen	Layak: Di atas suku bunga pinjaman modal (komersial).
Payback Period	5,2	Tahun	Investasi kembali dalam waktu relatif singkat.

Sumber: Data diolah dari International DME Association (2023), Aziz dkk. (2020), dan Laporan Tekno-Ekonomi Kementerian ESDM (2023).

Struktur Operational Expenditure (OPEX) yang rendah pada Hymethz dimungkinkan karena bahan baku limbah organik memiliki biaya perolehan yang sangat rendah, atau bahkan negatif melalui skema tipping fee dari pemerintah daerah. Hal ini berbeda signifikan dengan struktur biaya LPG yang harganya berfluktuasi mengikuti *Contract Price* (CP) Aramco dan nilai tukar USD. DME yang diproduksi dari limbah menawarkan stabilitas harga yang tinggi karena diproduksi secara domestik dan tidak terpengaruh gejolak pasar energi global (Kemenkeu RI, 2024). Lebih lanjut, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa proyek tetap memiliki *Net Present Value* (NPV) positif bahkan jika terjadi kenaikan OPEX hingga 15%, membuktikan tingginya resiliensi teknologi ini terhadap guncangan ekonomi.

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa Hymethz merupakan solusi integratif yang efektif untuk mengatasi paradoks akumulasi limbah organik dan tingginya ketergantungan impor LPG di Indonesia. Penerapan metode sintesis *single-step* menggunakan sistem katalis ganda terbukti mampu melampaui batasan kesetimbangan termodinamika konvensional melalui pemanfaatan prinsip Le Chatelier, sehingga menghasilkan efisiensi konversi gas sintesis di atas 80%. Dari aspek ekonomi dan lingkungan, implementasi Hymethz untuk substitusi 20% kebutuhan LPG nasional diproyeksikan dapat menghemat devisa negara hingga Rp 12,7 Triliun/tahun dengan parameter investasi tangguh, sekaligus memitigasi emisi gas metana yang memiliki potensi pemanasan global tinggi demi terwujudnya energi nasional yang berkelanjutan.

Daftar Pustaka

Sumber artikel jurnal :

- Aziz, M., Wijayanta, A.T. and Nandiyanto, A.B.D. (2020) 'Advanced Power Generation Technologies for Energy Sustainability in Indonesia', *Journal of Cleaner Production*, 273, p. 122820. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122820>.
- Deng, S., Li, S., Zhang, W. and Wang, Y. (2019) 'Direct Synthesis of Dimethyl Ether from Syngas over Cu-Zn-Al/Zeolite Bifunctional Catalysts: Influence of Zeolite Properties', *Fuel Processing Technology*, 193, pp. 120-128.
- International DME Association (2023) Global DME Production Status and Direct Synthesis Technologies. IDA Fact Sheet & Technical Report. Available at: <https://www.aboutdme.org>.
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Sumber dokumen resmi :

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024) Indonesia Energy Outlook 2024. Jakarta: Dewan Energi Nasional.
- Kementerian Keuangan Republik Indonesia (2024) Buku II Nota Keuangan beserta Rancangan Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara Tahun Anggaran 2025. Jakarta: Kementerian Keuangan RI.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2024) Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah Nasional. Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Available at: <https://sipsn.menlhk.go.id>.

Sumber buku :

- Olah, G.A., Goeppert, A. and Prakash, G.K.S. (2013) Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. 2nd edn. Weinheim: Wiley-VCH.
- Smith, J.M., Van Ness, H.C. and Abbott, M.M. (2018) Introduction to Chemical