

Efek Rasio Umpan Co-Gasifikasi Batu Bara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Produksi Metanol : Studi Simulasi

(Effects of Feedstock Ratio in the Co-Gasification Process of Coal and Oil Palm Empty Fruit Bunch on the Methanol Production: A Simulation Study)

Rahma Muthia^{1,2}

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

²Sustainable Energy Systems and Policy Research Cluster, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

Inti Sari

Metanol memiliki banyak kegunaan di berbagai bidang, baik sebagai senyawa kimia antara untuk diproses lebih lanjut, sebagai penyusun sebuah senyawa kimia akhir, maupun sebagai bahan bakar. Fleksibilitas penggunaan metanol menjadikan peranannya strategis dalam pengembangan bahan kimia dan energi masa depan. Penelitian ini mengkaji efek rasio umpan batu bara dan tandan kosong kelapa sawit pada proses co-gasifikasi untuk menghasilkan metanol, dengan melakukan studi simulasi di piranti lunak Aspen Plus v.11. Variasi rasio tersebut adalah 100-0, 85-15, 70-30, 50-50, 30-70, 15-85, dan 0-100, di mana rasio 100-0 menunjukkan proses gasifikasi batu bara murni. Performa proses diukur dengan menggunakan parameter *process mass intensity* (PMI), yaitu parameter yang lazim diterapkan di dunia industri untuk mengevaluasi aspek berkelanjutan sebuah proses. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa berkurangnya komposisi batu bara pada umpan co-gasifikasi menyebabkan terjadinya penurunan kandungan CO pada *syngas*. Hal ini menyebabkan penurunan produktivitas proses sintesis metanol, yang diindikasikan dengan meningkatnya nilai PMI. Selain itu, penelitian ini juga menghasilkan luaran berupa tren PMI terhadap komposisi batu bara di dalam umpan. Tren tersebut memberikan sebuah persamaan polinomial berorde dua ($y = 0,0002x^2 - 0,0481x + 5,3381$) yang berguna bagi para perancang pabrik untuk memprediksi secara cepat mengenai jumlah metanol yang dapat dihasilkan apabila rasio umpan co-gasifikasi divariasikan.

Kata Kunci: Co-gasifikasi, batu bara, tandan kosong kelapa sawit, metanol, *process mass intensity*

Keywords: Co-gasification, coal, oil palm empty fruit bunch, methanol, *process mass intensity*

Abstract

Methanol is widely used for many purposes, including as an intermediate product, a mixture compound in a final product and fuel. Its flexibility for many applications makes methanol important for the development of future chemicals and fuels. This study evaluates the effects of feedstock ratio in the co-gasification process of coal and oil palm empty fruit bunch on the methanol production, by performing simulations in the Aspen Plus v.11

Published by

Department of Chemical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Universitas Muslim Indonesia, Makassar

Address

Jalan Urip Sumohardjo km. 05 (Kampus 2 UMI)
Makassar- Sulawesi Selatan

Email :

jcpe@umi.ac.id

*Corresponding Author

rahmamuthia@ui.ac.id



Journal History

Paper received : 29 Januari 2023

Received in revised : 23 April 2023

Accepted : 16 Agustus 2023

process simulator. The feed ratios were varied at 100-0, 85-15, 70-30, 50-50, 30-70, 15-85, 0-100, in which the ratio of 100-0 indicates the gasification process of pure coal. The process performance was quantified using the process mass intensity (PMI) parameter that is commonly used in industries to assess the sustainability aspect of a process. The findings of this research suggest that a lower coal composition in the feed causes a decrease of CO in syngas. This results in the decrease of productivity in the methanol synthesis as indicated by an increasing PMI. Furthermore, this study invents a PMI trend over the coal composition in the feed stream. The trend can be described by a second-order polynomial equation ($y = 0.0002x^2 - 0.0481x + 5.3381$) that is useful for plant designers to quickly quantify methanol that can be produced when different feed ratios are used in the co-gasification process.

PENDAHULUAN

Metanol dianggap sebagai zat kimia serba guna dikarenakan penggunaannya yang sangat luas, baik sebagai salah satu komponen penyusun sebuah produk akhir, senyawa kimia yang merupakan produk antara, maupun bahan bakar [1]. Penggunaan metanol sebagai bahan baku dari produk kimia lain di antaranya pada sintesis formaldehida, dimetil eter, *tert*-amil metil eter, asam asetat, metil klorida, dan olefin [2]. Tingginya fleksibilitas penggunaan metanol menyebabkan peranan senyawa kimia tersebut dianggap strategis dalam pengembangan bahan kimia dan energi masa depan [3].

Dalam dua dekade terakhir, permintaan metanol secara global memiliki tren peningkatan, di mana permintaan metanol pada tahun 2006 dan 2015 adalah sebesar 32 juta dan 75 juta ton, secara berurutan [4]. Sedangkan, permintaan metanol pada tahun 2020 diestimasi telah berada pada kisaran 100 juta ton, dan jumlah tersebut diprediksi akan terus meningkat dengan pesat [5].

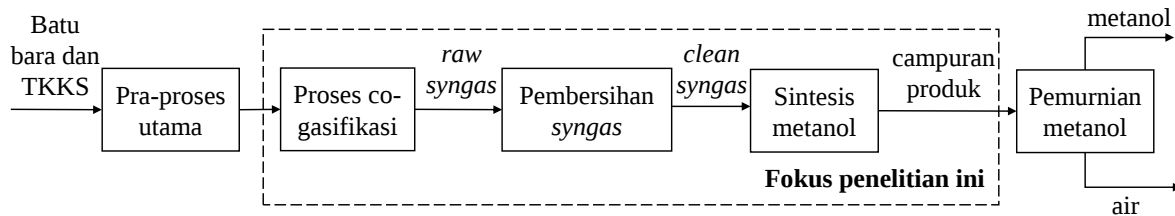
Metanol dapat diproduksi dari sumber daya konvensional, seperti batu bara dan gas alam, dan sumber daya terbarukan, seperti biomassa [6]. Salah satu rute proses produksi metanol yang lazim adalah melalui gasifikasi, di mana umpan dikonversikan terlebih dahulu menjadi *synthetic gas* (*syngas*) dengan kehadiran agen gasifikasi berupa udara, oksigen, dan/atau uap air di dalam reaktor gasifikasi yang menyebabkan terjadinya oksidasi parsial [7]. *Syngas*, yang komponen utamanya berupa gas CO, H₂, dan sejumlah CO₂, dibersihkan dari zat pengotor dan selanjutnya direaksikan pada tekanan dan temperatur tertentu agar dapat menghasilkan metanol.

Produksi metanol dari biomassa melalui proses gasifikasi berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya konvensional. Namun, hingga saat ini penerapannya masih menghadapi tantangan, di

mana produksi bio-metanol dalam skala besar membutuhkan biomassa dalam jumlah yang masif [8]. Selain itu, gasifikasi biomassa menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang lebih rendah dibandingkan *syngas* dari bahan baku konvensional [9, 10].

Dalam rangka mengantisipasi tantangan tersebut sekaligus untuk mendukung berlangsungnya transisi pemakaian sumber daya energi, proses co-gasifikasi menjadi alternatif yang prospektif untuk diterapkan. Co-gasifikasi batu bara dan biomassa diprediksi dapat memperbaiki fleksibilitas proses dalam aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan [11]. Sejumlah penelitian terkait co-gasifikasi batu bara dan biomassa berfokus pada kajian ketiga aspek tersebut. Liu [12] melakukan analisis keekonomian terhadap produksi metanol dari gasifikasi batu bara tunggal, biomassa tunggal, dan co-gasifikasi. Qin dkk. [13] mengevaluasi efek co-gasifikasi terhadap efisiensi energi dan intensitas gas rumah kaca. Li dkk. [14] menggunakan piranti lunak Aspen Plus untuk mengetahui efek jenis agen gasifikasi, rasio pemisahan *syngas*, dan rasio daur ulang *syngas* terhadap produksi metanol.

Kendati pun berbagai penelitian telah menghasilkan temuan yang bermanfaat dalam pengembangan proses co-gasifikasi batu bara dan biomassa, saat ini terdapat kesenjangan pemahaman mengenai efek variabel yang ditetapkan pada proses co-gasifikasi terhadap produk metanol yang dihasilkan. Emami-Tabatabaie dkk. [15] telah mengkaji efek komposisi umpan co-gasifikasi terhadap kualitas *syngas*, tetapi tidak mengevaluasi efek yang dihasilkan terhadap produk metanol. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut, di mana penelitian ini mengevaluasi efek rasio umpan co-gasifikasi batu bara dan biomassa terhadap kuantitas metanol yang dihasilkan. Parameter *process mass intensity* menjadi tolak ukur performa konversi umpan menjadi metanol melalui co-gasifikasi. Luaran yang



Gambar 1. Proses konversi umpan menjadi metanol melalui proses co-gasifikasi

disampaikan pada penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam penerapan teknologi co-gasifikasi sebagai upaya transisi dari pemakaian sumber energi konvensional menuju sumber energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan tiga tahapan proses untuk konversi umpan menjadi metanol, yaitu co-gasifikasi batu bara dan biomassa, pembersihan *syngas*, dan reaksi *syngas* menjadi metanol. Simulasi dilakukan dengan menggunakan simulator proses Aspen Plus v.11. Urutan proses tersebut menjadi fokus penelitian ini, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1 di dalam garis putus-putus. Dalam praktiknya, diperlukan perlakuan pra-proses, misalnya pencucian dan penggilingan biomassa, serta perlakuan post-proses, yaitu pemisahan metanol dari produk samping berupa air. Perlakuan tersebut berada di luar fokus penelitian ini. Penjelasan mengenai tahapan pra-proses biomassa dijelaskan secara menyeluruh oleh Ramos dkk. [16].

Adapun jenis biomassa yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), sedangkan jenis batu bara (BB) yang diumpankan adalah lignit atau lazim disebut batu bara cokelat. Hasil analisis *ultimate* dan *proximate* umpan yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1 dan 2. Variabel bebas pada penelitian ini adalah rasio batu bara dan TKKS yang diumpankan ke dalam proses co-gasifikasi, yaitu 100-0, 85-15, 70-30, 50-50, 30-70, 15-85, dan 0-100. Rasio 100-0 menunjukkan umpan berupa batu bara murni, sedangkan rasio 0-100 mengindikasikan umpan berupa TKKS murni.

Untuk mengetahui efek rasio umpan co-gasifikasi terhadap performa proses produksi metanol, penelitian ini menggunakan parameter *process mass intensity* (PMI) sebagai sebuah tolak ukur. PMI dituliskan sebagai,

$$PMI = \frac{F_U}{F_M} \quad (1)$$

di mana F_U adalah total laju alir batu bara dan TKKS yang diumpankan ke dalam proses co-gasifikasi (kg/jam) dan F_M adalah laju alir produk metanol (kg/jam). Parameter PMI telah digunakan di dunia industri sekitar 15 tahun terakhir untuk mengevaluasi upaya pelaku industri menuju proses produksi yang berkelanjutan [19]. Dengan alasan konsistensi, total laju alir umpan proses co-gasifikasi untuk semua variasi rasio umpan pada penelitian ditetapkan sebesar 3×10^6 kg/jam.

Simulasi co-gasifikasi mencakup mekanisme reaksi yang ditampilkan pada Tabel 3 [20]. Penelitian ini mensimulasikan proses gasifikasi di dalam sebuah reaktor unggun ganda terfluidisasi, di mana terdapat zona pembakaran arang di dalam reaktor yang menyuplai energi ke zona gasifikasi. Agen gasifikasi yang digunakan adalah uap air yang dapat menghasilkan proses yang lebih bersih dibandingkan gasifikasi yang menggunakan jenis agen lain [21].

Tabel 3. Mekanisme reaksi pada proses gasifikasi [20]

Reaksi	Mekanisme reaksi
<i>water-gas</i>	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$
<i>water-gas shift</i>	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$
<i>steam reforming</i>	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$
<i>Boudouard reaction</i>	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$

Tabel 1. Analisis *proximate* batu bara dan TKKS dalam basis kering [17, 18]

Material	Kandungan uap air (%)	Kandungan abu (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)
Batu bara	< 0,1	14,10	44,75	41,15
Tandan kosong kelapa sawit	10,45	3,43	68,67	17,45

Tabel 2. Analisis *ultimate* batu bara dan TKKS dalam basis kering [17, 18]

Material	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
Batu bara	62,11	4,98	1,46	1,29	16,06
Tandan kosong kelapa sawit	44,06	6,06	0,29	0,11	46,05

Pada penelitian ini, proses gasifikasi disimulasikan pada tekanan standar 1 atm. Temperatur operasi dan rasio agen gasifikasi terhadap umpan merujuk pada nilai yang diusulkan oleh Puig-Gamero, dkk. [20], yaitu 900°C dan 0,5, secara berurutan. Sejumlah asumsi digunakan di dalam simulasi, yaitu (1) proses dalam keadaan tunak, (2) gas bersifat ideal, dan (3) tekanan dan temperatur bernilai homogen di setiap bagian dalam reaktor.

Raw syngas yang telah dihasilkan dari proses co-gasifikasi selanjutnya memasuki tahap pembersihan *syngas* untuk mengeliminasi pengotor berupa H₂S dan NH₃ dan menghasilkan *clean syngas*. Pembersihan *syngas* dilakukan dengan pengoperasian unit *pressure swing adsorption*, dengan fraksi pemisahan senyawa yang merujuk pada Gutiérrez Ortiz, dkk. [22].

Selanjutnya, konversi *clean syngas* menjadi metanol disimulasikan di dalam sebuah reaktor dengan model *plug-flow*. Kondisi operasi reaktor yang digunakan adalah 49,3 atm dan 230°C, sesuai dengan kondisi yang digunakan oleh Nyári, dkk. [23]. Mekanisme reaksi yang terlibat di dalam proses ini ditampilkan pada Tabel 4.

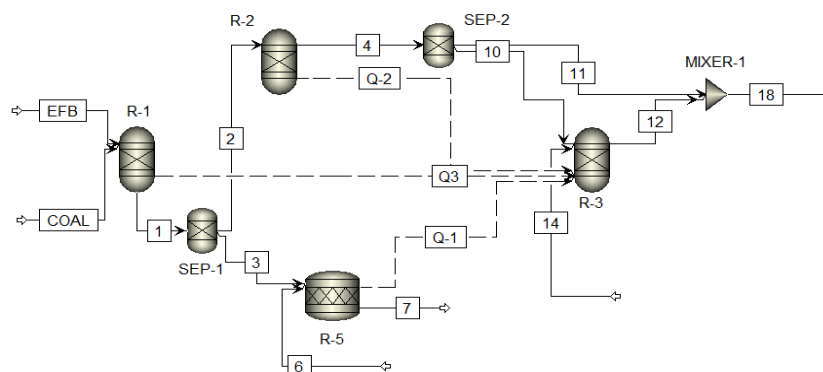
Tabel 4. Mekanisme reaksi pada proses sintesis metanol [25]

Reaksi	Mekanisme reaksi
hidrogenasi karbon monoksida	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$
hidrogenasi karbon dioksida	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
<i>water-gas shift</i>	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

Adapun jenis katalis yang digunakan adalah Cu/Zn/Al/Zr, di mana model kinetik yang digunakan pada simulasi ini merujuk pada Nyári, dkk. [23] dan Kiss, dkk. [24].

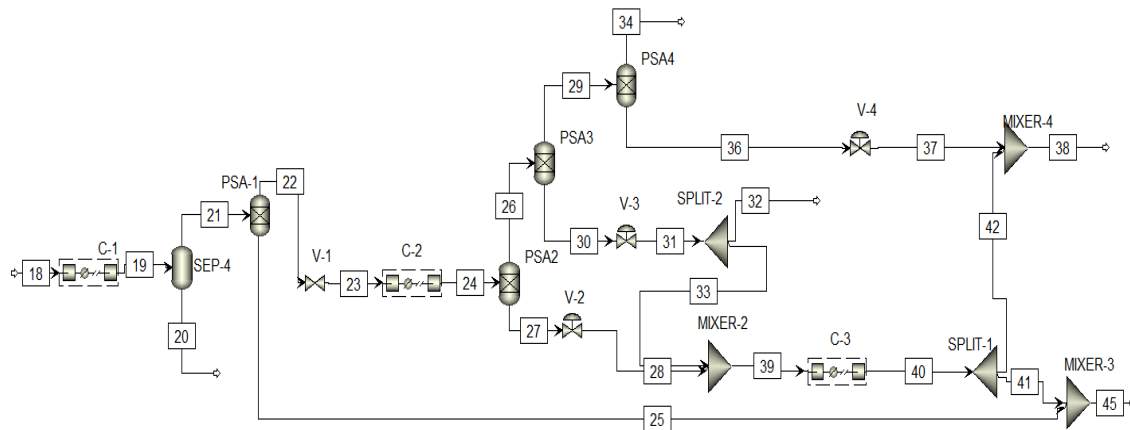
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi tiga tahapan proses utama untuk produksi metanol dari umpan batu bara dan TKKS ditampilkan pada Gambar 2-4. Keempat reaktor yang ditampilkan di dalam Gambar 2 menunjukkan mekanisme proses co-gasifikasi secara menyeluruh di dalam sebuah reaktor unggun ganda terfluidisasi, di mana terjadi dekomposisi umpan menjadi unsur penyusunnya (R-1), stabilisasi ikatan kimia (R-2), pembakaran arang (R-4), dan fenomena transformasi senyawa menjadi komposisi penyusun *syngas* (R-3).

**Gambar 2.** Simulasi proses co-gasifikasi batu bara dan TKKS

Gambar 3 menampilkan hasil simulasi *pressure swing adsorption* yang terdiri dari empat unit separator dan dioperasikan pada tekanan 30 atm dan temperatur

35°C. Adanya kompresor dan *valve* diperlukan untuk menyesuaikan tekanan masuk dan keluar dari sebuah



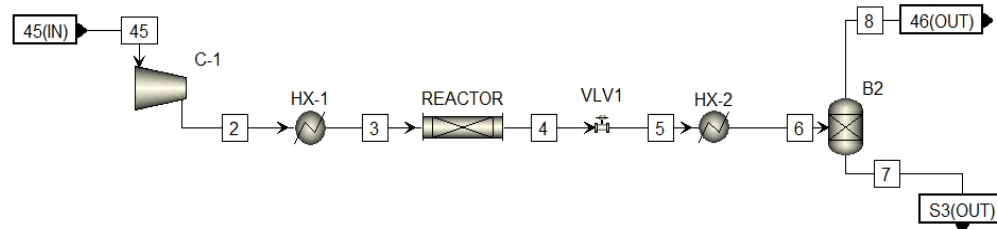
Gambar 3. Simulasi proses pembersihan syngas

Tabel 5. Komposisi *clean syngas* yang dihasilkan dengan berbagai rasio umpan co-gasifikasi

Material	Fraksi mol <i>clean syngas</i>						
	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O	CH ₄	NH ₃	H ₂ S
100 – 0	0,005	0,256	0,734	0,001	0,000	0,003	0,002
85 – 15	0,011	0,242	0,742	0,001	0,000	0,002	0,001
70 – 30	0,018	0,230	0,750	0,001	0,000	0,001	0,001
50 – 50	0,026	0,213	0,759	0,001	0,000	0,001	0,001
30 – 70	0,035	0,195	0,767	0,001	0,000	0,000	0,001
15 – 85	0,043	0,182	0,773	0,001	0,000	0,000	0,001
0 – 100	0,051	0,169	0,778	0,001	0,000	0,000	0,000

unit *pressure swing adsorption*. *Clean syngas* yang diperoleh dari berbagai rasio umpan co-gasifikasi ditampilkan pada Tabel 5. Distribusi produk yang diperoleh pada penelitian ini memiliki tren yang sejalan dengan temuan Puig-Gamero dkk. [20], di mana hidrogen dan karbon monoksida merupakan senyawa kimia dengan fraksi terbesar. Dengan

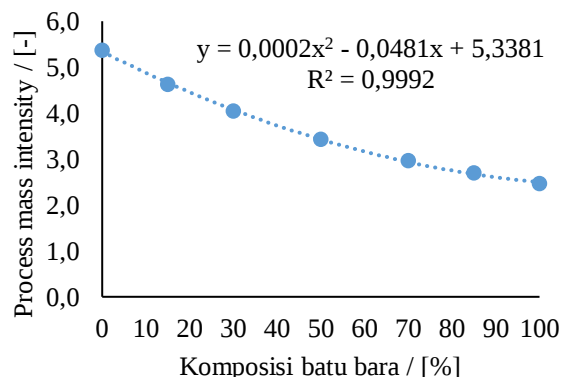
berkurangnya komposisi batu bara pada umpan, dapat diobservasi tren penurunan kandungan CO serta sedikit peningkatan CO₂ dan H₂ di dalam *syngas*. Perubahan komposisi tersebut berpotensi mempengaruhi jumlah metanol yang dapat diproduksi, yang diketahui lebih lanjut dari hasil simulasi sintesis metanol.

Gambar 4. Simulasi proses sintesis metanol dari *clean syngas*

Gambar 4 menampilkan simulasi proses produksi metanol dari *clean syngas*. Adanya sebuah unit kompresor sebelum reaktor diperlukan untuk menyesuaikan tekanan aliran dengan kondisi operasi reaktor. Unit valve dan pendingin diletakkan setelah reaktor agar tekanan dan temperatur kembali mendekati kondisi standar. Sebuah unit separator

ditempatkan untuk memisahkan senyawa berfasa gas dan cair. Campuran metanol dan air selanjutnya perlu dikirim ke unit distilasi untuk pemurnian senyawa. Pemisahan tersebut diproyeksikan tidak memiliki kendala teknis dikarenakan tidak adanya azeotrop yang terbentuk antara metanol dan air.

Setelah mendapatkan hasil simulasi dari ketiga tahapan proses, selanjutnya dilakukan analisis efek rasio umpan terhadap kuantitas metanol yang dihasilkan. Gambar 5 menunjukkan korelasi *process mass intensity* terhadap komposisi batu bara di dalam umpan gasifikasi. Peningkatan *process mass intensity* diobservasi terjadi saat kandungan batu bara di dalam umpan berkurang.



Gambar 5. Tren PMI terhadap komposisi batu bara dalam umpan co-gasifikasi

Nilai PMI yang lebih tinggi mengindikasikan lebih sedikitnya metanol yang dihasilkan dari umpan dengan laju alir yang sama. Lebih tingginya nilai PMI tersebut memiliki kaitan dengan adanya tren penurunan CO di dalam *syngas* saat komposisi TKKS yang digunakan lebih besar. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4, CO merupakan reaktan utama untuk proses produksi metanol.

Sebuah tren PMI terhadap komposisi batu bara pada umpan co-gasifikasi dapat dihasilkan pada Gambar 5. Tren tersebut memberikan sebuah persamaan polinomial berorder dua, yaitu $y = 0.0002x^2 - 0.0481x + 5.3381$. Persamaan ini dapat digunakan oleh para perancang proses agar secara cepat mendapatkan informasi tentang kuantitas metanol yang dapat dihasilkan apabila suatu rasio umpan co-gasifikasi diterapkan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan simulasi proses produksi metanol melalui proses co-gasifikasi batu bara dan tandan kosong kelapa sawit. Co-gasifikasi dianggap dapat menjadi strategi untuk transisi pengurangan ketergantungan terhadap sumber daya konvensional. Lebih rendahnya komposisi batu bara di dalam umpan co-gasifikasi mengakibatkan penurunan CO dan sedikit peningkatan CO₂ dan H₂ pada *syngas*

yang dihasilkan dari proses co-gasifikasi. Penurunan CO tersebut memberikan kontribusi terhadap lebih rendahnya kuantitas metanol yang dihasilkan. Hal tersebut dibuktikan dengan meningkatnya nilai *process mass intensity* saat persentase batu bara di dalam umpan lebih rendah.

Penelitian ini juga merekomendasikan sebuah persamaan yang menunjukkan hubungan *process mass intensity* dengan komposisi batu bara yang diumpankan. Persamaan tersebut memberikan manfaat untuk secara cepat mengetahui PMI yang dapat diperoleh apabila suatu rasio umpan diterapkan, di mana perancang proses tidak perlu melakukan simulasi terlebih dahulu untuk mengetahui nilai PMI yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Z. S. Ling, J. J. Foo, X.-Q. Tan, and W.-J. Ong, "Transition into Net-Zero Carbon Community from Fossil Fuels: Life Cycle Assessment of Light-Driven CO₂ Conversion to Methanol Using Graphitic Carbon Nitride," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 11 (14), pp. 5547–5558, 2023, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c07375.
- [2] J. Sehested, "Industrial and scientific directions of methanol catalyst development," *J. Catal.*, vol. 371, pp. 368–375, 2019, doi: 10.1016/j.jcat.2019.02.002.
- [3] M. Bukhtiyarova, T. Lunkenbein, K. Kähler, and R. Schlögl, "Methanol Synthesis from Industrial CO₂ Sources: A Contribution to Chemical Energy Conversion," *Catal. Lett.*, vol. 147, pp. 416–427, 2017, doi: 10.1007/s10562-016-1960-x.
- [4] J. Mahabir, K. Bhagaloo, N. Koylass, M. N. Boodoo, R. Ali, M. Guo, and K. Ward, "What is required for resource-circular CO₂ utilization within Mega-Methanol (MM) production?" *J. CO₂ Util.*, vol. 45, 101451, 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101451.
- [5] C. Jaggaï, Z. Imkaraaz, K. Samm, A. Pounder, N. Koylass, D. P. Chakrabarti, M. Guo, K. Ward, "Towards greater sustainable development within current Mega-Methanol (MM) production," *Green Chem.*, vol. 22 (13), pp. 4279–4294, 2020, doi: 10.1039/d0gc01185a.
- [6] G. Iaquaniello, G. Centi, A. Salladini, and E. Palo, "Methanol Economy: Environment, Demand, and Marketing With a Focus on the Waste-to-Methanol Process," in *Methanol*, A. Basile, F. Dalena, Eds., Elsevier, 2018, pp. 595–612, doi: 10.1016/B978-0-444-63903-5.00022-4.

- [7] P. Gautam, Neha, S. N. Upadhyay, and S. K. Dubey, "Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective," *Fuel*, vol. 273, 117783, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117783.
- [8] N. S. Shamsul, S. K. Kamarudin, N. A. Rahman, N. T. Kofli, "An overview on the production of bio-methanol as potential renewable energy," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 33, pp. 578–588, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.024.
- [9] M. Shahabuddin and S. Bhattacharya, "Enhancement of performance and emission characteristics by co-gasification of biomass and coal using an entrained flow gasifier," *J. Energy Inst.*, vol. 95, pp. 166–178, 2021, doi: 10.1016/j.joei.2021.01.012.
- [10] S. Li, X. Sun, L. Liu, and J. Du, "A full process optimization of methanol production integrated with co-generation based on the co-gasification of biomass and coal," *Energy*, vol. 267, 126566, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126566.
- [11] A. Hasanoğlu, E. Faki, A. Seçer, Ş. Üzden, "Co-solvent effects on hydrothermal co-gasification of coal/biomass mixtures for hydrogen production," *Fuel*, vol. 331 (1), 125693, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125693.
- [12] Z. Liu, "Economic analysis of methanol production from coal/biomass upgrading," *Energy Sources Part B*, vol. 13 (1), pp. 66–71, 2018, doi: 10.1080/15567249.2017.1403501.
- [13] Z. Qin, Y. Tang, Z. Zhang, and X. Ma, "Techno-economic-environmental analysis of coal-based methanol and power poly-generation system integrated with biomass co-gasification and solar based hydrogen addition," *Energy Convers. Manage.*, vol. 228, 113646, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113646.
- [14] S. Li, X. Sun, L. Liu, and J. Du, "A full process optimization of methanol production integrated with co-generation based on the co-gasification of biomass and coal," *Energy*, vol. 267, 126566, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126566.
- [15] L. Emami-Taba, M. F. Irfan, W. M. A. W. Daud, and M. H. Chakrabarti, "Fuel blending effects on the co-gasification coal and biomass," *Biomass Bioenergy*, vol. 57, pp. 249–263, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.043.
- [16] A. Ramos, E. Monteiro, A. Rouboa, "Biomass pre-treatment techniques for the production of biofuels using thermal conversion methods – A review," *Energy Convers. Manage.*, vol. 270, 116271, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116271.
- [17] W. W. Purwanto, D. Supramono, and H. Fisafarani, "Biomass Waste and Biomass Pellets Characteristics and Their Potential in Indonesia," *The 1st International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering*, 2010.
- [18] L. Yi, J. Feng, Y.-H. Qin, and W.-Y. Li, "Prediction of elemental composition of coal using proximate analysis," *Fuel*, vol. 193, pp. 315–321, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.044.
- [19] C. H. Benison, P. R. Payne, "Manufacturing mass intensity: 15 Years of Process Mass Intensity and development of the metric plant cleaning and beyond," *Curr. Res. Green Sustainable Chem.*, vol. 5, 100229, 2022, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100229.
- [20] M. Puig-Gamero, J. Argudo-Santamaria, J. L. Valverde, P. Sánchez, and L. Sanchez-Silva, "Three integrated process simulation using aspen plus®: Pine gasification, syngas cleaning and methanol synthesis," *Energy Convers. Manage.*, vol. 177, pp. 416–427, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.088.
- [21] A. AlNouss, G. McKay, T. Al-Ansari, "A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study," *Energy Convers. Manage.*, vol. 208, 112612, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112612.
- [22] F. J. Gutiérrez Ortiz, A. Serrera, S. Galera, P. Ollero, "Methanol synthesis from syngas obtained by supercritical water reforming of glycerol," *Fuel*, vol. 105, pp. 739–751, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.073.
- [23] J. Nyári, M. Magdeldin, M. Larmi, M. Järvinen, A. Santasalo-Aarnio, "Techno-economic barriers of an industrial-scale methanol CCU-plant," *J. CO₂ Util.*, vol. 39, 101166, 2020, doi: 10.1016/j.jcou.2020.101166.
- [24] A. A. Kiss, J. J. Pragt, H. J. Vos, G. Bargeman, G., M. T. de Groot, "Novel efficient process for methanol synthesis by CO₂ hydrogenation," *Chem. Eng. J.*, vol. 284, pp. 260–269, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2015.08.101.
- [25] F. Manenti, A. R. Leon-Garzon, Z. Ravaghi-Ardebili, C. Pirola, "Systematic staging design applied to the fixed-bed reactor series for methanol and one-step methanol/dimethyl ether synthesis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 70(2), 1228–1237, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.011.