

PROSES KONVERSI METANOL MENJADI SENYAWA AROMATIK

Angelita Sendi Sinaga¹, Alifa Rahma Zuhri¹, Natasya Shafira Putri Rahmat¹,
Muhammad Lord Yoshikawa¹, Muhammad Aria Jatnika¹, Dessy Agustina Sari^{*1}

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang
Email: *¹dessy.agustina8@staff.unsika.ac.id

Masuk: 29 November 2022, Revisi masuk: 9 Maret 2023, Diterima: 15 Maret 2023

ABSTRACT

Methanol compound is a raw material or other intermediate product needed by chemical industries. This need is proven by further processing to become aromatic compounds with a higher selling value than the previous reactant compounds. The review of the process of converting methanol into aromatic compounds utilizes studies of research results from some previous researchers to explain the use of both catalysts and yields achieved. First, the involvement of the HZSM-5 zeolite includes the methanol process at relatively mild reaction conditions. The molar ratio is in the preferred reaction conditions for the methanol to aromatic (MTA) process. Second, using methanol-pentane co-feeding achieves aromatization by adopting a conversion reactor model based on raw material conversion and product distribution. The review results show that using HZSM-5 zeolite through its catalytic performance is superior to conventional catalysts. This review is evidence of the synergistic effect of the hierarchical structure and level of acidity of the two types of catalysts after being applied. The use of methanol-pentane co-feeding indicates it is a methanol-based case. Then, the pentane-based case causes the lowest and highest total energy consumption, respectively. However, the techno-economic analysis revealed that the methanol-based case resulted in the lowest NPV of \$133.93 MM. This impact can increase economic performance significantly and become a consideration for the needs of further researchers.

Keywords: aromatic compound, co-feeding, HZSM-5, methanol, zeolite.

INTISARI

Senyawa metanol merupakan satu bahan baku maupun produk antara yang dibutuhkan oleh industri kimia lainnya. Kebutuhan ini terbukti dengan memproses lebih lanjut untuk menjadi senyawa aromatic yang memiliki nilai jual lebih tinggi dibandingkan senyawa reaktan sebelumnya. Ulasan proses konversi metanol menjadi senyawa aromatic memanfaatkan kajian hasil riset dari sejumlah peneliti terdahulu untuk memaparkan penggunaan kedua katalis dan *yield* yang diraih. Pertama, keterlibatan zeolite HZSM-5 meliputi proses metanol pada kondisi reaksi yang relatif ringan dan rasio molar berada dalam kondisi reaksi yang disukai untuk proses metanol hingga aromatic (MTA). Kedua, penggunaan *co-feeding* metanol-pentana mencapai aromatisasi dengan mengadopsi model reaktor konversi berdasarkan konversi bahan baku dan distribusi produk. Secara analisis ulasan hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan zeolite HZSM-5 melalui kinerjanya secara katalitik lebih unggul dibandingkan katalis konvensional. Hal ini menjadi bukti atas adanya efek sinergitas dari struktur hierarkis dan tingkat keasaman yang dimiliki kedua jenis katalis pasca diterapkan. Penggunaan *co-feeding* metanol-pentana menunjukkan bahwa kasus berbasis metanol. Lalu, kasus berbasis pentana menyebabkan konsumsi energi total terendah dan tertinggi, secara berturut-turut. Namun, analisis tekno-ekonomi memberikan bahwa kasus berbasis metanol menghasilkan NPV terendah \$133,93 MM. Dampak ini dapat meningkatkan kinerja ekonomi secara signifikan dan menjadi pertimbangan bagi kebutuhan peneliti selanjutnya.

Kata-kata kunci: *co-feeding*, HZSM-5, metanol, senyawa aromatic, zeolit.

PENDAHULUAN

Metanol merupakan produk antara atau akhir yang penting dalam industri kimia. Sintesis metanol didapatkan dari berbagai

bahan baku, termasuk batu bara, gas hasil pengovenan kokas, gas alam, dan biomassa. Produksi metanol telah meningkat cukup besar dalam beberapa

tahun terakhir seiring semakin matangnya teknologi sintesis metanol. Hal itu memberikan kemungkinan hadirnya metanol menjadi petrokimia, seperti metanol menjadi olefin, metanol menjadi bensin, dan metanol menjadi aromatik (Jiang et al., 2020).

Reaksi metanol menjadi senyawa aromatik (MTA – *Methanol to Aromatic*) termasuk dalam kelompok umum yang disebut konversi metanol menjadi hidrokarbon (MTH – *Methanol to Hydrocarbon*). Reaksi ini memungkinkan untuk memperoleh bahan bakar dan bahan kimia tanpa menggunakan minyak bumi. Reaksi MTH telah dipelajari secara ekstensif sejak penemuan mobil pada tahun 1976. Penemuan ini mendapat banyak perhatian karena berbagai proses dan ketersediaan metanol dari sumber yang relatif melimpah dan beragam (seperti batu bara, gas alam, biomassa dan bahkan CO₂). Proses MTH melibatkan beberapa langkah reaksi dengan mekanisme yang cukup kompleks. Mekanisme kolam hidrokarbon siklus ganda diterima saat ini secara luas. Menurut tahapan ini, prosesnya adalah reaksi autokatalitik dimana molekul alkena dan aromatik bertindak sebagai perantara dalam dua siklus yang saling terkait dan melibatkan banyak reaksi seperti metilasi, perengkahan, transfer hidrida, siklisasi, dan dealkilasi. Akhirnya, reaksi intermediet yaitu antara hidrokarbon dan molekul metanol atau kombinasi hidrokarbon menyebabkan pembentukan molekul yang terlalu besar. Melalui pendifusian pori-pori zeolit dan tetap terperangkap di dalam kerangka, perkembangan terkait pembentukan endapan karbon menjadi tanggung jawab deaktivasi katalis (Chen et al., 2019).

Metanol menjadi aromatik (MTA) dikenal sebagai jalur non-petroleum dengan kondisi layak diproduksi, di atas aromatik yang bernilai tinggi. Hal ini didasari oleh metanol yang dapat dihasilkan dari ragam sumber karbon seperti gas alam, biomassa dan batu bara, atau bahkan gas rumah kaca CO₂. Namun, karena jalur konversi metanol yang rumit (melalui katalis zeolit asam) memberikan distribusi produk yang luas dan rendahnya selektivitas aromatik. Kebutuhan energi tidak hanya dibutuhkan bagi teknologi pemisahan. Proses pemurnian pada produk berikutnya juga mengalami hal demikian. Selain itu, kuatnya keasaman katalis, dan mudah terbentuknya kokas pada permukaan katalis mampu menghasilkan penonaktifan

katalis secara cepat. Regenerasi katalis menjadi peranan penting untuk penggunaan berulang, dan di sisi lain turut menghabiskan sejumlah sumber daya energi. Akibat keberadaan faktor ini sangat membatasi pengaplikasian teknologi MTA ke industri. Oleh karena itu, perhatian lebih ditingkatkan kepada penstabilan konversi metanol menjadi senyawa aromatik dengan selektivitas yang tinggi (Fu, Shao, et al., 2021), (Pinilla-Herrero et al., 2018).

Senyawa aromatik merupakan bahan baku dasar yang penting bagi industri petrokimia. Benzena, toluena, dan xilena (BTX) adalah contoh bahan baku organik dari sejumlah senyawa aromatik. Ketiga bahan ini juga merupakan bahan baku dasar yang penting dalam mensintesis resin, karet, dan serat. Umumnya, produksi aromatik bergantung pada perolehan minyak bumi secara konvensional. Minyak bumi menempati posisi terdepan saat ini untuk mendukung konsumsi energi secara global, sekitar 33,5% (Jiang et al., 2020).

Untuk mengurangi ketergantungan energi tidak terbarukan ini, sejumlah negara terutama negara yang miskin akan minyak) tetapi berlimpahnya batu bara, gas alam, atau biomassa menjadi opsi pencarian teknologi alternatif dalam menghasilkan senyawa aromatik (C. Wang et al., 2019). Misalnya, negara Cina memiliki cadangan batu bara yang melimpah, sehingga produksi aromatik dari metanol dengan basis batu bara dapat mengurangi ketergantungan aromatik pada sumber daya alam minyak bumi. Pabrik percontohan MTA dengan skala produksi aromatik 30 kt/tahun telah dibangun di provinsi Shaanxi di Cina (Jiang et al., 2020).

Modifikasi serangkaian logam (Ag, Zn, Ni, Cu, Fe dan La) katalis zeolit ZSM-5 telah disiapkan dengan impregnasi baru dan dievaluasi secara co-aromatisasi katalitik bagi n-pentana dan metanol. Penggunaan bahan berpori seperti alumino-silikat berpori dan kerangka logam-organik (MOFs – *Metal Organic Frameworks*) telah diterapkan di bidang katalisis, pemisahan secara adsorpsi. Hal ini didasari oleh besarnya luas permukaan, terkontrolnya struktur, dan tingginya sifat permukaan yang yang dimilikinya. Zeolit ZSM-5 adalah contoh dari bahan berpori tersebut dan mampu berperan sebagai katalis yang mengkonversi secara katalitik metanol menjadi senyawa aromatik (Fu et al., 2021).

Pemeriksaan sifat bifungsional dari pusat aktif untuk ko-konversi n-pentana dan metanol menjadi aromatik didasari analisis secara sistematis sifat asam dan selektivitas produk katalis zeolit logam-ZSM-5 dengan berbagai muatan logam dan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Selain itu, mempelajari reaksi sinergis n-pentana dan metanol dengan uji aktivitas di bawah kondisi reaksi yang berbeda serta mengeksplorasi mekanisme co-aromatisasi pada tingkat konversi bahan baku yang beragam. Tahap selanjutnya adalah pengusulan proses unggul terfluidisasi yang bersirkulasi untuk komersialisasi alkana C_5 , co-aromatisasi metanol, dan aplikasi potensial. Beberapa peneliti mengusulkan reaktor unggul terfluidisasi dua tahap adalah yang lebih efektif untuk meningkatkan hasil aromatik dibandingkan dengan reaktor unggul terfluidisasi satu tahap (Zhu et al., 2021).

Analisis tekno-ekonomi dan lingkungan komparatif bertujuan untuk menghasilkan aromatik dari metanol dan nafta. Pertama, pembuatan model produksi aromatik dari metanol dan nafta di Aspen HYSYS. Kemudian, neraca massa dan energi didapatkan melalui model simulasi yang ketat. Tahap selanjutnya adalah analisis konsumsi energi, ekonomi, dan sensitivitas produksi aromatik dari metanol dan nafta. Kisaran harga bahan baku di mana memproduksi aromatik dari metanol secara ekonomi lebih baik daripada memproduksi aromatik dari nafta. Siklus hidup yang terjadi memiliki dampak terhadap lingkungan dari hasil produksi aromatik melalui penggunaan bahan dasar metanol, misalnya berasal dari batu bara, gas oven kokas, gas alam, dan biomassa. Selain metanol, ada nafta yang dibandingkan dengan berdasarkan pada dampak titik tengah. Proses produksi aromatik dari metanol dimodelkan oleh peneliti (C. Wang et al., 2019). Proses siklus regenerasi dari pembentukan ulang katalis (*catalytic reforming*) dipilih untuk menetapkan model produksi aromatik dari nafta. Alasannya adalah model ini telah banyak digunakan dan memiliki rendemen aromatik yang relatif tinggi (Jiang et al., 2020).

Analisis ekonomi dan lingkungan produksi metanol saat ini telah menerapkan berbagai cara. Evaluasi siklus hidup produksi metanol yang berdasarkan *coke oven gas* - COG dari rute COG memiliki dampak lingkungan lebih rendah dibandingkan dengan rute batu

bara. Selain itu, produksi metanol untuk rute COG masing-masing sebesar 25,1% dan 19,8%. Capaian ini mengindikasikan bahwa biaya produksi lebih rendah dibandingkan untuk rute batu bara dan gas alam.

Penilaian siklus hidup sistem *coal to methanol* (CTM), *coke oven gas to methanol* (CGTM), dan *natural gas to methanol* (NTM) juga dilakukan. Hasil dari ketiga siklus tersebut menunjukkan bahwa sistem CTM memiliki dampak lingkungan terbesar. Pada rute keseluruhan, metanol ke aromatik menggunakan bahan baku yang berbeda. Kemudian, adanya pengusulan kerangka proses secara komprehensif berdasarkan optimasi sistem untuk menentukan siapa yang paling menguntungkan atas proses produksi aromatik dari gas alam. Hasilnya menunjukkan bahwa biaya bersih nilai produksi aromatik dari gas alam sebesar \$3800 MM. Selain itu, biaya investasinya mencapai 65% lebih rendah dari sistem batu bara ke aromatik pada skala yang sama.

Kuantifikasi pengaruh jenis biomassa terhadap keuntungan keseluruhan kilang diketahui melalui investigasi residu hutan, residu pertanian dan tanaman tahunan yang dijadikan sebagai bahan baku. Kemudian, analisis ekonomi dilakukan untuk menghasilkan proporsi yang berbeda untuk o-xilena, m-xilena, dan p-xilena. Hasilnya menunjukkan bahwa penyulingan aromatik yang paling menguntungkan yaitu p-xilena, tetapi pemanfaatan o-xilena membutuhkan biaya modal yang paling rendah.

Analisis komparatif tekno-ekonomi dan lingkungan produksi aromatik menggunakan metanol dan nafta. Hasil penelitian dari kedua senyawa tersebut menunjukkan bahwa nilai produksi senyawa aromatik dari metanol lebih tinggi secara signifikan daripada nafta. Metanol yang diturunkan dari gas alam memiliki potensi ekotoksitas air tawar yang paling rendah. Metanol yang berasal dari biomassa memiliki potensi yang paling rendah untuk mendegradasi abiotik, potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, dan pembentukan ozon fotokimia (Ren & Feng, 2022).

Karya ini bertujuan untuk mengulas proses perubahan metanol menjadi aromatik dan untuk melihat cara terbaik mendapatkan produk aromatik. Penggunaan ulasan literatur menjadi tinjauan dan sumber data sekunder dalam penyusunan artikel. Beberapa metode katalitik diterapkan dan menghasilkan aromatik, yaitu zeolite

HZSM-5, *co-feeding* metanol-pentana, reaktor unggul. Ulasan pada artikel ini berfokus pada proses pengubahan metanol melalui metode yang berbeda untuk mencapai senyawa aromatik dengan hasil terbaik.

PEMBAHASAN

Penggunaan Metanol

Reaksi *methanol to aromatic* (MTA) termasuk ke dalam kelompok umum yang disebut *methanol to hydrocarbon* (MTH). Reaksi ini menjadi jalan untuk memperoleh bahan bakar dan bahan kimia tanpa menggunakan minyak bumi (Pinilla-Herrero et al., 2018). Penggunaan bahan dasar metanol dalam memproduksi aromatik dapat mentransformasi metana menjadi bahan kimia yang lebih berguna. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengubah metana menjadi bahan kimia yang bernilai tinggi, contohnya: olefin, turunan senyawa aromatik, dan metanol. Namun, proses konversi metana secara langsung untuk menjadi bahan kimia cair yang lebih berharga membutuhkan kondisi reaksi yang lebih tinggi atau tajam (*harsh*). Hal ini disebabkan adanya ikatan C-H yang tertinggi (439,3 kJ/mol). Sedangkan, pengubahan metana yang non-oksidatif untuk menjadi hidrokarbon tinggi berlangsung suhu tinggi, biasanya di atas 700 °C (Xi et al., 2019).

Pembuatan metanol menggunakan bahan baku yaitu, batu bara, gas alam, dan biomassa. Metanol menjadi aromatik dengan biomassa memiliki manfaat untuk lingkungan lebih baik dibandingkan batu bara ataupun gas alam (Ren & Feng, 2022). Perolehan metanol dari tar batu bara menggunakan o-kresol dan produknya diolah menjadi model senyawa model yang berefek *coupling* (penggabungan dua atau lebih fragmen melalui bantuan katalis). Zeolit ZSM-5 bergradasi melalui mesopori yang lebih besar dan keberadaan asam Bronsted yang lebih tinggi memiliki kinerja katalitik lebih tinggi untuk reaksi *coupling*. Perlakuan penambahan zeolit ZSM-5 dan 0,3 M NaOH memberikan rendemen aromatik tertinggi dengan kokas terendah (Wang et al., 2021).

Melalui Reaktor Unggun Terfluidisasi

Penggunaan jenis reaktor unggul terfluidisasi menjadi langkah strategi konversi

dalam memproduksi metanol menjadi aromatik (Chen et al., 2019). Namun, ada pula langkah lainnya yaitu pengumpanan secara bersama antara furan dan metanol (atau dikenal sebagai *co-feeding*) ke dalam reaktor unggul tetap dengan aliran kontinyu, suhu 400-600°C dan HZSM-5 (Wang et al., 2019).

Tahap pertama adalah melakukan aromatisasi metanol pada suhu 470°C, dan hasilnya berupa senyawa hidrokarbon C₁ hingga C₅. Tahap kedua merupakan langkah aromatisasi pada suhu tinggi, yaitu 550°C. Tahap ini disusul dengan langkah dehidrogenasi hidrokarbon ringan pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan konversi parafin C₃-C₅ menjadi aromatik serta olefin melalui aromatisasi dan dehidrogenasi. Langkah ketiga adalah mengubah lebih lanjut olefin yang dihasilkan (dari langkah kedua) menjadi aromatik pada suhu 470°C.

Tahap ketiga adalah memproduksi aromatik di aliran keluaran tahap ini. Kisaran yang dihasilkan sebesar 62-66% dengan waktu reaksi lebih panjang dibandingkan tahap pertama.

Umumnya, pengkonversian senyawa C₅₊ dan olefin menjadi aromatik berhasil dilakukan melalui penekanan pembentukan produk samping yang berupa propana. Strategi ini memberikan celah bagi peneliti lain tentang bagaimana memisahkan reaksi kompleks selama konversi metanol dalam meningkatkan produksi aromatik dengan diiringi pengontrolan jumlah produk reaksi samping (Chen et al., 2019).

Melalui Reaksi Katalitik Katalis HZSM-5

Katalis ini dibuat melalui pembuatan larutan prekursor dengan mencampurkan 12 g TPAOH; 12,5 g TEOS; 0,36 g imidazole; dan 44g air suling. Pengadukan bahan tersebut berlangsung pada 80°C selama 24 jam. Selanjutnya, penambahan 0,46 g Al(NO₃)₃ dan 0,24 g NaOH ke larutan prekursor dengan wadah Teflon. Gel induk dikristalkan pada suhu 180°C selama 24 jam. Pengontrolan pH sampel menggunakan aquades sebagai media pencucian sampel untuk mencapai nilai netral. Selanjutnya, sampel ditempatkan ke dalam *muffle furnace* untuk dikeringkan pada suhu 110°C selama 12 jam. *Templates* pada produk katalis Na-ZSM-5 dihilangkan melalui proses kalsinasi pada suhu 550°C selama 6 jam.

Katalis Na-ZSM-5 yang telah terkalsinasi diolah kembali untuk menjadi sampel IHS tipe H. Caranya adalah katalis ini dicampurkan dengan larutan NH_4NO_3 1 M pada suhu 80°C selama 2 jam sebanyak 3 kali. Lalu, proses pengeringan diberikan pada suhu 110°C selama 12 jam. Proses akhirnya adalah kalsinasi pada suhu 550°C selama 6 jam untuk menukar ion Na^+ dengan proton.

Serangkaian langkah pembuatan katalis H-ZSM-5 ini dapat digunakan juga untuk mendapatkan katalis HS konvensional yang bebas dari imidazol. Sampel katalis ditekan, digiling, dan diayak untuk mencapai ukuran 2040 mesh dan dilanjutkan ke penggunaan reaksi MTA (Tian et al., 2017). Capaian penelitian ini menjelaskan bahwa katalis HZSM-5 termodifikasi memiliki kinerja katalitik yang lebih unggul dibandingkan katalis konvensional. Hal ini disebabkan oleh keberadaan efek sinergis dari struktur hierarkis dan tingginya keasaman. Peningkatan unit produksi metanol mampu menurunkan aktivitas katalis, tetapi jeda waktu untuk mencapai yield menurun secara signifikan. Tentunya, dampak atas jeda waktu tersebut secara bersamaan akan menurunkan aktivitas katalis (Li et al., 2018).

Katalis IHS yang berstruktur hierarkis mampu memberikan banyak kapasitas bagi katalis untuk menampung kokas yang lebih tinggi. Tingginya keasaman (terutama dari gugus permukaan yang melimpah) adalah silanol yang *perturbed*, kelompok ilanol, dan kelompok $\text{Al}(\text{OH})\text{Si}$. Tingginya pH tersebut mampu memberikan lebih banyak situs aktif dalam memproduksi aromatik. Namun asam kuat juga merupakan pusat aktif dalam mendeposisi kokas. Hal ini menjadi dasar utama penonaktifan katalis pada reaksi MTA.

Hasil penelitian (Tian et al., 2017) memberikan kondisi optimal, yaitu tekanan proses 0,1 MPa; 400°C ; 0,02 MPa untuk tekanan CH_3OH ; dan laju alir total = 25 ml/menit. Produk aromatik meningkat sebesar 7,4% dan penggunaan katalis mampu di atas 20 jam untuk IHS dibandingkan katalis HS. Capaian ini menunjukkan bahwa pemodifikasian imidazol merupakan metode yang menjanjikan untuk mensintesis zeolit dengan struktur tipe MFI secara katalitik dan kinerjanya terbilang sangat baik pada reaksi MTA. Metode ini selanjutnya memberikan

gap dan ide kebaruan untuk struktur topologi lainnya dengan ukuran nano sintesis zeolit.

Melalui *Co-Feeding* Metanol dan Pentana

Reaktor aromatisasi adalah pusat kerja dari unit aromatisasi dengan menambahkan peralatan pompa dan penukar panas sebelum memasuki reaktor. Dalam kasus tiga *co-feeding*, penyuplaian selain *recycle* metanol- pentana dan input tambahan (eksternal) pentana digunakan untuk mempertahankan rasio metanol terhadap pentana.

Untuk basis pentana, pengumpanan hanya melibatkan *recycle* pentana dan eksternalnya. Simulasi proses untuk mencapai aromatisasi mengadopsi model reaktor konversi. Tipe reaktor ini berdasarkan pengubahan bahan baku dan distribusi produk. Keluaran reaktor ini berupa benzena, toluena, xilena, senyawa aromatik C_{9+} , hidrokarbon ringan, hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, dan air.

Reaksi aromatisasi metanol berlangsung sangat eksotermis. Hal ini menjadi celah untuk memulihkan (*recovery*) panas dan menghasilkan uap yang bertekanan tinggi. Efluen panas dari reaktor panas digunakan kembali ke penukar panas untuk memanaskan bahan baku. Cara ini bertujuan untuk penghematan energi dan biaya produksi. Efluen keluaran dari penukar panas memiliki suhu yang lebih rendah dan menuju ke unit selanjutnya untuk memisahkan aromatik dan non-aromatik (Zhang et al., 2019).

Hasil penggunaan simulasi Aspen HYSIS memberikan keseimbangan massa dan energi. Umumnya, program ini membantu mahasiswa Teknik Kimia (Sutardi et al., 2020). Secara analisis energi didapatkan bahwa persoalan yang berbasis metanol menghabiskan konsumsi energi total terendah. Hal sebaliknya terjadi jika berbasis pentana. Namun, analisis secara tekno-ekonomi menunjukkan bahwa persoalan pertama membutuhkan NPV (*Net Present Value*) terendah, yaitu \$133,93 MM. Kedua persoalan dengan perbandingan yang sama mampu menghasilkan NPV tertinggi, yaitu \$490,20 MM. Hal ini menjadi paling menarik dalam memproduksi aromatik.

Penggunaan *co-feeding* metanol maupun pentana dapat meningkatkan nilai ekonomi secara signifikan. Ketergantungan ini lebih menitikberatkan ke harga metanol.

Penanganannya dapat teratasi secara parsial melalui *co-feeding* metanol dan pentana. Pandangan terkait harga baik metanol dan pentana memberikan pilihan terbaik bagi penggunaan kedua persoalan dengan perbandingan yang sama. Hal ini masih dapat diterapkan meski penyimpangan harga metanol dan pentana sebesar 8-18 dan 10-18%, secara berturut-turut. Deviasi ini juga berhubungan dengan harga minyak bumi atas kedua persoalan tersebut. NPV dengan nilai tertinggi sebelumnya masih dapat diraih dengan penurunan harga minyak tidak lebih dari 28%.

KESIMPULAN

Methanol to Aromatic (MTA) dikenal sebagai jalur non-petroleum yang layak diproduksi dengan nilai tinggi di atas aromatik. Hal ini disebabkan bahwa metanol dapat dibuat dari berbagai sumber karbon, seperti gas alam, biomassa, batubara, bahkan gas rumah kaca – karbon dioksida. Sebaliknya, jalur konversi metanol yang rumit melalui penggunaan katalis zeolit asam memberikan distribusi produk yang luas dan rendahnya selektivitas aromatik. Teknologi pemisahan kerap dibutuhkan dalam pemurnian produk selanjutnya dan menjadi beban karena adanya pemenuhan energi tambahan atas unit proses tersebut. Namun, produk yang terbentuk menuntut keberadaan unit pemurnian dan hal ini juga membutuhkan energi. Karena jalur kompleks bagi konversi metanol yang dikatalisis oleh zeolit asam memberikan luasnya distribusi produk dengan diikuti rendahnya selektivitas aromatik. Selain itu, metanol yang diturunkan dari gas alam memiliki potensi ekotoksitas air tawar yang paling rendah. Untuk metanol yang berasal dari biomassa memiliki potensi paling rendah dalam mendekomposisi secara abiotik, pemanasan global, pereduksian lapisan ozon, dan pembentukan ozon fotokimia. Sisi lainnya, penggunaan bahan dasar metanol sebagai bahan untuk memproduksi aromatik dapat ditempuh dengan mengubah metana. Senyawa metana ini merupakan bahan kimia yang lebih bermanfaat.

DAFTAR PUSTAKA

Chen, Z., Hou, Y., Song, W., Cai, D., Yang, Y., Cui, Y., & Qian, W. (2019). High-yield

production of aromatics from methanol using a temperature-shifting multi-stage fluidized bed reactor technology. *Chemical Engineering Journal*, 371, 639–646.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.024>

Chen, Z., Hou, Y., Yang, Y., Cai, D., Song, W., Wang, N., & Qian, W. (2019). A multi-stage fluidized bed strategy for the enhanced conversion of methanol into aromatics. *Chemical Engineering Science*, 204, 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.013>

Fu, T., Guo, Y., Shao, J., Ma, Q., & Li, Z. (2021). Precisely regulating acid density and types to promote the stable two-step conversion of methanol to aromatics via light hydrocarbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, 320, 111103.

<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111103>

Fu, T., Shao, J., & Li, Z. (2021). Catalytic synergy between the low Si/Al ratio Zn/ZSM-5 and high Si/Al ratio HZSM-5 for high-performance methanol conversion to aromatics. *Applied Catalysis B: Environmental*, 291, 120098.

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120098>

Jiang, J., Feng, X., Yang, M., & Wang, Y. (2020). Comparative techno-economic analysis and life cycle assessment of aromatics production from methanol and naphtha. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123525.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123525>

Li, N., Meng, C., & Liu, D. (2018). Deactivation kinetics with activity coefficient of the methanol to aromatics process over modified ZSM-5. *Fuel*, 233, 283–290.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.044>

Pinilla-Herrero, I., Borfecchia, E., Holzinger, J., Mentzel, U. V., Joensen, F., Lomachenko, K. A., Bordiga, S., Lamberti, C., Berlier, G., Olsbye, U., Svelle, S., Skibsted, J., & Beato, P. (2018). High Zn/Al ratios enhance dehydrogenation vs hydrogen transfer reactions of Zn-ZSM-5 catalytic systems in methanol conversion to aromatics. *Journal of Catalysis*, 362, 146–163.

<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2018.03.032>

Ren, S., & Feng, X. (2022). Emergency evaluation of aromatics production from methanol and naphtha. *Chinese Journal*

- of Chemical Engineering*, 46, 134–141.
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.04.025>
- Sutardi, M. P., Fardiansyah, M. I., Fauzia, F., & Sari, D. A. (2020). Program simulasi Aspen Hysis bagi mahasiswa teknik kimia di semester awal. *PROSIDING SEMINAR NASIONAL UNIVERSITAS ISLAM SYEKH YUSUF*, 1, 1370–1373.
<https://doi.org/10.31219/osf.io/e3t72>
- Tian, H., Zhang, Z., Chang, H., & Ma, X. (2017). Catalytic performance of imidazole modified HZSM-5 for methanol to aromatics reaction. *Journal of Energy Chemistry*, 26(3), 574–583.
<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.03.008>
- Wang, C., Si, Z., Wu, X., Lv, W., Bi, K., Zhang, X., Chen, L., Xu, Y., Zhang, Q., & Ma, L. (2019). Mechanism study of aromatics production from furans with methanol over zeolite catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 139, 87–95.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.013>
- Wang, Y., Yu, J., An, H., Jin, W., Qiao, J., Sun, Y., & Cao, J. (2021). Catalytic upgrading of coal tar coupling with methanol using model compound over hierarchical ZSM-5 for increasing light aromatic production under atmosphere pressure. *Fuel Processing Technology*, 211, 106600.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106600>
- Xi, Z., Zhou, B., Jiang, B., Wang, J., Liao, Z., Huang, Z., & Yang, Y. (2019). Efficient conversion of methane to aromatics in the presence of methanol at low temperature. *Molecular Catalysis*, 475, 110493.
<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2019.110493>
- Zhang, D., Yang, M., & Feng, X. (2019). Aromatics production from methanol and pentane: Conceptual process design, comparative energy and techno-economic analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 126, 178–188.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.002>
- Zhu, X., Wang, Y., Wang, G., Hou, Y., Yu, M., Yang, X., & Yin, F. (2021). Synergistic co-conversion of pentane and methanol to aromatics over bifunctional metal/ZSM-5 zeolite catalysts. *Microporous and Mesoporous Materials*, 320, 111107.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111107>

BIODATA PENULIS

Angelita Sendi Sinaga, lahir di Bekasi pada tanggal 09 April 2003, tengah menempuh pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Singaperbangsa Karawang tahun masuk 2021.

Alifa Rahma Zuhri, lahir di Kebumen pada tanggal 20 Juli 2003, tengah menempuh pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Singaperbangsa Karawang tahun masuk 2021.

Natasya Shafira Putri Rahmat, lahir di Purwakarta pada tanggal 24 Desember 2003, tengah menempuh pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Singaperbangsa Karawang tahun masuk 2021.

Muhammad Lord Yoshikawa, lahir di Depok pada tanggal 27 November 2002, tengah menempuh pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Singaperbangsa Karawang tahun masuk 2021.

Muhammad Aria Jatnika, lahir di Cianjur pada tanggal 13 Desember 2001 tengah menempuh pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Singaperbangsa Karawang tahun masuk 2021.

Dessy Agustina Sari*, lahir di Bandar Lampung pada tanggal 09 Agustus 1988, menyelesaikan pendidikan S-1 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Lampung tahun 2011, S-2 bidang ilmu Teknik Kimia dari Universitas Diponegoro tahun 2014. Saat ini tercatat sebagai Dosen Tetap di Universitas Singaperbangsa Karawang dengan jabatan akademik Lektor/III/d pada bidang minat keteknikkimiaan seperti energi terbarukan, pemrosesan bahan pangan, pengeringan, absorpsi atau pereduksian gas CO₂.