



Pengembangan Katalis Water-Gas Shift: Perspektif dari Sistem *Medium Temperature Shift* (MTS)

Salma Liska¹, Gita Nur Sajida², Lisa Legawati¹, Suhendri¹, Zuqni Meldha¹, Yogi Yolanda¹, Yola Bertilsya Hendri¹, Marcela Anandita Rusmana³

⁽¹⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

⁽²⁾Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

⁽³⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v8i3.48117

✉ Corresponding author:

[salma.liska@lecturer.unri.ac.id]

Article Info

Abstrak

Kata kunci:

Water gas shift (WGS);

Medium temperature shift (MTS);

Katalis Cu

Reaksi *water-gas shift* (WGS) merupakan proses penting dalam peningkatan produksi H₂ dengan meminimalisir kandungan CO. Reaksi WGS banyak diterapkan dalam industri petrokimia untuk menurunkan kadar CO dari *syngas* hasil reformasi hidrokarbon. Secara konvensional, reaksi ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu *high temperature shift* (HTS) dan *low temperature shift* (LTS), namun pendekatan ini memiliki keterbatasan teknis dan ekonomis. Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan katalis yang dapat bekerja optimal pada suhu menengah (*medium temperature shift*/MTS). Cakupan bahasan pada artikel ini terdiri dari tantangan pengembangan katalis seperti sintering, deaktivasi, dan reaksi samping. Artikel ini diharapkan dapat menjadi acuan perkembangan katalis WGS yang efisien dalam sistem produksi hidrogen pada kondisi *medium temperature shift* (MTS), serta strategi modifikasi untuk meningkatkan performa berdasarkan studi yang telah ada.

Abstract

Keywords:

Water gas shift (WGS);

Medium temperature shift (MTS);

Cu catalyst

The water-gas shift (WGS) reaction is a crucial process for increasing hydrogen (H₂) production by minimizing carbon monoxide (CO) content. It is widely applied in the petrochemical industry to reduce CO levels in syngas produced from hydrocarbon reforming. Conventionally, this reaction is conducted in two stages: high-temperature shift (HTS) and low-temperature shift (LTS). However, this approach presents both technical and economic limitations. To address these issues, catalysts capable of operating optimally at intermediate temperatures—referred to as medium-temperature shift (MTS)—have been developed. The scope of discussion in this article consists of catalyst development challenges such as sintering, deactivation, and side reactions. This review is intended to serve as a reference for the development of efficient WGS catalysts under MTS conditions, along with

1. PENDAHULUAN

Gas alam merupakan campuran berbagai jenis gas hidrokarbon yang terbentuk dari pelapukan material fosil dan memiliki potensi besar sebagai sumber energi maupun bahan baku dalam berbagai proses industri (Mokhatab & Poe, 2012). Di Indonesia, gas alam memainkan peran vital dalam mendukung sektor industri, pembangkit listrik, hingga keperluan komersial. Saat ini, sumber gas alam yang berada di blok Laut Natuna Timur belum banyak dieksplorasi dan diketahui mengandung lebih dari 70% CO₂ (Suhartanto dkk., 2001). Gas alam tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber produksi hidrogen. Namun demikian, tingginya kandungan karbon dioksida (CO₂) dalam gas alam Laut Natuna menjadi hambatan utama yang harus diatasi dalam proses pemanfaatannya.

Hidrogen dikenal sebagai bahan bakar alternatif yang prospektif untuk masa depan serta memiliki peran penting dalam upaya penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) (Baraj dkk., 2021). Salah satu metode konversi gas alam menjadi hidrogen adalah melalui proses dry reforming of methane (DRM). Metode ini dipilih karena mampu memanfaatkan kandungan CO₂ yang tinggi dalam gas alam sebagai reaktan dalam proses produksi hidrogen. *Dry reforming of methane* (DRM) merupakan salah satu metode pemrosesan gas alam menjadi hidrogen dengan memanfaatkan reaksi antara metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) untuk menghasilkan gas sintesis berupa H₂ dan CO (Abdulrasheed dkk., 2019). Produk DRM menghasilkan rasio H₂/CO sekitar 1 hingga 3, namun kandungan CO yang tinggi dalam gas hasil DRM dapat berisiko merusak anoda pada sistem sel bahan bakar (Jensen & Duyar, 2021). Oleh karena itu, reaksi *water-gas shift* (WGS) diperlukan untuk menurunkan kadar CO dalam gas hasil reformasi. Reaksi WGS ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$, $\Delta H = -41,1 \text{ kJ/mol}$) merupakan proses eksotermik penting dalam produksi hidrogen. Reaksi ini tidak hanya mengonversi karbon monoksida (CO) menjadi karbon dioksida (CO₂), tetapi juga menghasilkan tambahan hidrogen (H₂).

H₂ merupakan sumber energi masa depan yang dapat diproduksi melalui reformasi gas alam yang diikuti oleh reaksi WGS. Kedua proses tersebut merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan secara industri. Beberapa *review* terkait katalis WGS telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pal dkk. menyampaikan pentingnya penggunaan kombinasi logam aktif seperti Cu dengan material pendukung yang multifungsi, seperti CeO₂ dan Al₂O₃, untuk menciptakan sistem katalitik yang aktif dan tahan terhadap kontaminan (Pal dkk., 2018). Selain itu, katalis berbasis Ni dan Co yang didukung oleh CeO₂ juga dipertimbangkan sebagai alternatif logam murah, meskipun aktivitas dan selektivitasnya masih di bawah sistem Cu.

Baraj dkk. membahas berbagai jenis katalis yang digunakan dalam reaksi WGS pada suhu rendah hingga menengah (Baraj dkk., 2021). Mereka membahas secara khusus katalis berbasis logam transisi seperti Cu/ZnO/Al₂O₃ yang telah lama digunakan dalam industri, namun mengalami keterbatasan performa pada suhu menengah akibat sintering dan penurunan stabilitas. Untuk mengatasi hal tersebut, katalis Cu dikembangkan dengan penyangga oksida logam seperti CeO₂ dan CeZrO. Selain itu, penggunaan logam mulia seperti Pt dan Au yang didukung oleh CeO₂ juga direkomendasikan untuk meningkatkan aktivitas, meskipun dari sisi biaya masih menjadi kendala tersendiri. Sementara itu, Ebrahimi dkk. lebih fokus mengulas kinetika dan stabilitas katalis Cu/ZnO/Al₂O₃, yang masih menjadi sistem katalitik dominan untuk reaksi WGS pada kondisi MTS seperti pengaruh komposisi logam Cu, Zn, dan Al terhadap performa katalis, serta menunjukkan bahwa interaksi kuat antara Cu dan ZnO merupakan kunci utama dalam mempertahankan aktivitas dan mencegah sintering (Ebrahimi dkk., 2020).

Secara konvensional, reaksi WGS di industri dilakukan dalam dua tahap, yaitu *high temperature shift* (HTS) dan *low temperature shift* (LTS). Untuk menekan biaya operasional, telah dikembangkan katalis yang mampu beroperasi dalam satu tahap pada *condisi medium temperature shift* (MTS) (Fuentes dkk., 2014; Lucarelli dkk., 2018). Literatur yang ada telah banyak membahas katalis WGS, namun *review* pada kondisi MTS perlu dibahas lebih dalam. Tujuan dari penulisan artikel *review* ini adalah untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan terkini katalis *water-gas shift* (WGS) yang beroperasi pada kondisi MTS.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Reaksi water gas shift (WGS)

Reaksi water-gas shift (WGS) telah diterapkan secara luas dalam skala industri dan berfungsi untuk menurunkan kadar karbon monoksida (CO) dalam gas sintesis, sehingga menghasilkan hidrogen lebih (Sajida dkk., 2024). Secara industri, reaksi WGS dilakukan dalam dua tahap, yaitu *high temperature shift* (HTS) yang menggunakan katalis $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ dan *low temperature shift* (LTS) dengan katalis $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Pal dkk., 2018). Namun, katalis konvensional ini memiliki keterbatasan operasional: katalis $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ kehilangan aktivitasnya secara signifikan pada suhu di bawah $350\text{ }^\circ\text{C}$, sedangkan katalis $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ tidak stabil dan berpotensi mengalami sintering pada suhu di atas $250\text{ }^\circ\text{C}$ (Baraj dkk., 2021).

Kinetika reaksi *water-gas shift* (WGS) memainkan peran penting dalam perancangan dan optimasi sistem katalitik, terutama pemilihan suhu operasi dan jenis katalis yang digunakan. Reaksi WGS melibatkan konversi karbon monoksida (CO) dan uap air (H_2O) menjadi karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen (H_2). Mekanisme reaksi WGS dapat berlangsung melalui dua jalur utama, yaitu mekanisme redoks dan mekanisme asosiasi format (*formate mechanism*) (Saeidi dkk., 2017). Pada mekanisme redoks, reaksi berlangsung dalam dua tahap: pertama, CO teroksidasi oleh oksigen dari permukaan oksida logam membentuk CO_2 dan meninggalkan situs oksida tereduksi; kedua, H_2O kemudian bereaksi dengan situs tereduksi tersebut untuk melepaskan H_2 dan mengembalikan katalis ke keadaan teroksidasi. Sementara itu, pada mekanisme format, CO dan H_2O beradsorpsi secara simultan pada permukaan katalis membentuk senyawa antara seperti format, yang kemudian terdekomposisi menjadi CO_2 dan H_2 . Pemilihan mekanisme sangat bergantung pada jenis katalis dan suhu reaksi yang digunakan.

Konsep termodinamika

Reaksi WGS ini tidak melibatkan perubahan jumlah mol total gas, sehingga tekanan tidak memengaruhi posisi kesetimbangan secara langsung. Secara termodinamika, reaksi ini lebih menguntungkan pada suhu rendah, karena nilai konstanta kesetimbangan (K_p) menurun seiring dengan peningkatan suhu. Kajian yang dilakukan oleh Demirel dkk. (Demirel & Ayas, 2017) yaitu mengevaluasi aspek termodinamika dari reaksi water-gas shift dengan pendekatan energi bebas Gibbs. Hasil menunjukkan bahwa nilai energi bebas Gibbs (ΔG) untuk reaksi WGS meningkat seiring dengan kenaikan suhu dan menjadi positif pada suhu di atas 1100 K . Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang suhu *medium temperature shift* ($250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$), reaksi WGS berlangsung secara spontan. Namun, pada suhu yang lebih tinggi dari 1100 K , nilai ΔG yang positif menyebabkan kecenderungan reaksi berlangsung ke arah balik, sehingga menurunkan konversi CO secara termodinamika.

Salah satu parameter yang krusial pada reaksi WGS adalah penggunaan rasio *steam* terhadap CO pada umpan. Rasio *steam* terhadap CO berpengaruh terhadap arah kesetimbangan. Penambahan uap air dapat mendorong reaksi ke kanan dan meningkatkan produksi H_2 , tetapi rasio yang terlalu tinggi dapat meningkatkan beban energi proses dan menyebabkan pengenceran reaktan. Dengan demikian, pemahaman aspek termodinamika menjadi dasar penting dalam menentukan suhu operasi dan rasio reaktan yang tepat untuk mencapai efisiensi maksimal dalam proses WGS. Rasio yang terlalu rendah dapat memicu terbentuknya reaksi samping seperti metanasi, pembentukan karbon (deposisi), serta reaksi Fischer-Tropsch (Smith R J dkk., 2010). Uap air juga berperan sebagai agen pengoksidasi ringan yang berfungsi mencegah terjadinya reduksi berlebih pada oksida logam di permukaan katalis, sehingga mampu menjaga kestabilan dan aktivitas katalis selama reaksi berlangsung (Lee dkk., 2013). Baraj dkk. merekomendasikan rasio *steam*/CO sebesar 3 hingga 4 untuk mencapai kinerja reaksi yang optimal (Baraj dkk., 2021). Meskipun demikian, penentuan rasio *steam*/CO harus dilakukan dengan cermat karena rasio yang terlalu tinggi dapat menyebabkan lonjakan konsumsi energi (Wang dkk., 2016).

Katalis reaksi WGS

Reaksi WGS merupakan tahap krusial dalam pemurnian gas sintesis untuk meningkatkan produksi H_2 dan mengurangi kandungan CO. Meskipun secara konvensional reaksi ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu HTS dan LTS, pendekatan satu tahap melalui MTS menjadi sangat menarik untuk menurunkan biaya operasional dan kompleksitas proses. Dalam konteks ini, katalis berbasis tembaga (Cu) telah menunjukkan prospek menjanjikan sebagai kandidat utama untuk aplikasi MTS. Katalis Cu diketahui memiliki kemampuan tinggi dalam mendukung reaksi WGS pada suhu rendah hingga menengah karena kemampuannya dalam mengaktivasi molekul H_2O serta selektivitasnya terhadap pembentukan H_2 . Salah satu strategi yang umum digunakan adalah mengombinasikan Cu dengan ZnO dan Al_2O_3 atau dukungan berbasis zeolit seperti ZSM-5.

3. PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah ada, salah satu tantangan utama pada pengembangan katalis reaksi WGS yang dapat digunakan di kondisi MTS adalah deaktivasi katalis. Katalis Cu cenderung mengalami sintering pada suhu menengah. Penambahan logam pendukung atau pemilih penyangga yang tepat diperlukan untuk mempertahankan dispersi Cu yang tinggi dan mencegah aglomerasi selama reaksi berlangsung. Baraj dkk. (Baraj dkk., 2021) menjelaskan bahwa pada suhu menengah, partikel logam Cu cenderung mengalami migrasi dan aglomerasi, yang menyebabkan penurunan luas permukaan aktif dan efisiensi reaksi. Selain itu, uap air yang berlebih juga dapat mempercepat perubahan fasa penyangga dan menurunkan kestabilan katalis. Strategi mitigasi yang umum digunakan meliputi penambahan logam kedua sebagai promotor, pemilihan penyangga yang stabil secara termal, dan pengendalian rasio *steam*/CO untuk menghindari reaksi samping dan degradasi struktur katalis (Ebrahimi dkk., 2020).

Tantangan lainnya adalah selektivitas terhadap reaksi WGS perlu dipastikan karena pada suhu menengah terdapat kemungkinan berlangsungnya reaksi samping seperti metanasi dan reaksi balik WGS. Pada kondisi gas umpan yang kaya H_2 dan CO_2 , kecenderungan berlangsungnya reaksi balik (*reverse* WGS) serta reaksi metanasi cukup tinggi. Hal ini mengurangi efisiensi produksi H_2 dan menurunkan konversi dari reaktan. Untuk itu, desain katalis yang mampu mengendalikan adsorpsi dan desorpsi spesies CO dan H_2 menjadi penting. Strategi penggunaan penyangga yang bersifat asam lemah seperti ZSM-5 juga telah terbukti efektif dalam menekan metanasi dan meningkatkan selektivitas terhadap reaksi WGS (Liska, Devianto, dkk., 2024; Liska, Shalihah, dkk., 2024).

Pengembangan katalis WGS pada kondisi MTS harus mempertimbangkan kombinasi komposisi aktif dan penyangga, toleransi terhadap kontaminan, stabilitas termal, serta resistansi terhadap reaksi samping guna mencapai efisiensi konversi CO yang tinggi dan stabilitas jangka panjang. Modifikasi katalis Cu yang digabungkan dengan logam lain yang berperan sebagai promotor seperti Zn, Ce, K, La terbukti dapat memperkuat interaksi logam dan meningkatkan stabilitas terhadap sintering ataupun reaksi samping. Katalis yang digunakan tidak hanya aktif untuk reaksi utama, tetapi juga diharapkan mampu menahan reaksi samping.

Fuentes dkk. melaporkan bahwa katalis Cu yang disiapkan dari prekursor bertipe hidrotalsit (HT) menunjukkan aktivitas yang stabil pada rentang 200–350 °C (Fuentes dkk., 2014). Meskipun aktivitasnya sedikit lebih rendah dibanding katalis berbasis nikel, katalis Cu menawarkan keuntungan dalam hal sifat regeneratif dan kestabilan fase logam aktif bila didukung oleh ZnO dan Al_2O_3 . Lucarelli dkk. lebih lanjut menunjukkan bahwa katalis Cu-Zn-Al yang diperoleh dari prekursor HT dengan kandungan Cu sebesar 20 wt% dan rasio (Cu+Zn)/Al sebesar 2 memberikan performa terbaik (Lucarelli dkk., 2018). Katalis ini mencapai konversi CO hingga tingkat kesetimbangan dalam rentang suhu 250–350 °C dengan stabilitas jangka panjang yang sebanding dengan katalis komersial. Aktivitas tinggi ini dikaitkan dengan interaksi Cu-ZnO yang kuat serta dispersi Cu yang merata pada permukaan oksida hasil kalsinasi.

Dalam penelitian yang lebih mutakhir, beberapa peneliti (Liska, Devianto, dkk., 2024; Liska, Shalihah, dkk., 2024) mengembangkan katalis Cu/ZnO/ZSM-5 menggunakan metode impregnasi dengan variasi loading Cu (5, 10, dan 15 wt%). Hasilnya menunjukkan bahwa katalis dengan 15 wt% Cu menghasilkan konversi CO sebesar 35% dan yield H_2 sebesar 36% pada suhu 325 °C. Selain itu, katalis ini menunjukkan ketahanan terhadap deaktivasinya

akibat pembentukan karbon, dengan hanya 0,04 g karbon/g katalis terbentuk selama 32 jam waktu operasi, jauh lebih rendah dibandingkan dengan katalis komersial (0,105 g/g). Penggunaan penyangga ZSM-5 juga memberikan keuntungan tambahan melalui sifat asam dan luas permukaan tinggi (~350 m²/g), yang meningkatkan adsorpsi CO dan membantu memfasilitasi reaksi WGS. Interaksi sinergis antara Cu dan ZnO dalam matriks zeolit ikut meningkatkan efektivitas reduksi Cu²⁺ menjadi Cu⁰ serta mempercepat pembentukan H₂. Secara keseluruhan, katalis Cu yang diformulasikan untuk kondisi MTS menunjukkan performa yang kompetitif, terutama bila dikombinasikan dengan struktur dukungan yang stabil secara termal. Liska dkk. telah berhasil membuktikan bahwa kombinasi katalis Cu/ZnO/ZSM-5 dengan sifat redoks dan keasaman yang seimbang mampu memberikan performa unggul dalam aplikasi jangka panjang.

Aplikasi katalis WGS-MTS di industri sangat penting untuk mendukung integrasi teknologi reforming gas alam yang lebih efisien. Sistem satu reaktor dengan kondisi MTS lebih hemat energi, mengurangi kebutuhan alat penukar panas, dan mempermudah integrasi dengan sistem pemurnian. Namun, keberhasilan penerapannya akan sangat tergantung pada ketahanan katalis terhadap kondisi reaksi dan waktu operasional yang lama.

4. KESIMPULAN

Reaksi *water-gas shift* (WGS) pada kondisi *medium temperature shift* (MTS) menawarkan solusi efisien dalam produksi hidrogen murni. Katalis berbasis tembaga, khususnya dalam kombinasi dengan dukungan Al₂O₃ dan ZSM-5 menunjukkan performa dan selektivitas yang baik terhadap reaksi WGS. Namun, tantangan seperti sintering logam aktif dan reaksi samping seperti metanasi masih perlu diatasi. Strategi desain katalis melalui komposisi katalis yang tepat, pemilihan penyangga yang stabil secara termal, penggunaan promotor logam, dan pengendalian parameter operasi seperti rasio *steam*/CO menjadi kunci dalam mengembangkan katalis yang efektif digunakan. Kajian ini merangkum strategi terkini dalam pengembangan katalis WGS pada kondisi MTS untuk mendukung efisiensi dan keberlanjutan sistem produksi hidrogen.

5. REFERENSI

- Abdulrasheed, A., Jalil, A. A., Gambo, Y., Ibrahim, M., Hambali, H. U., & Shahul Hamid, M. Y. (2019). A review on catalyst development for dry reforming of methane to syngas: Recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108(11), 175–193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.054>
- Baraj, E., Ciahotný, K., & Hlinčík, T. (2021). The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism. *Fuel*, 288(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119817>
- Demirel, E., & Ayas, N. (2017). Thermodynamic Modeling of the Water-Gas Shift Reaction in Supercritical Water for Hydrogen Production 1. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 51(1), 76–87. <https://doi.org/10.1134/S0040579517010067>
- Ebrahimi, P., Kumar, A., & Khraisheh, M. (2020). A review of recent advances in water-gas shift catalysis for hydrogen production. *Emergent Materials*, 3(6), 881–917. <https://doi.org/10.1007/s42247-020-00116-y>
- Fuentes, E. M., Cadete Santos Aires, F. J., Prakash, S., Da Costa Faro, A., De Freitas Silva, T., Assaf, J. M., & Rangel, M. D. C. (2014). The effect of metal content on nickel-based catalysts obtained from hydrotalcites for WGS in one step. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), 815–828. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.114>
- Jensen, C., & Duyar, M. S. (2021). Thermodynamic Analysis of Dry Reforming of Methane for Valorization of Landfill Gas and Natural Gas. *Energy Technology*, 9(7), 1–12. <https://doi.org/10.1002/ente.202100106>
- Lee, D. W., Lee, M. S., Lee, J. Y., Kim, S., Eom, H. J., Moon, D. J., & Lee, K. Y. (2013). The review of Cr-free Fe-based catalysts for high-temperature water-gas shift reactions. *Catalysis Today*, 210, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.12.012>
- Liska, S., Devianto, H., Sajida, G. N., Restiawaty, E., Miyamoto, M., Uemiya, S., Nishiyama, N., & Budhi, Y. W. (2024). Strategy to Prevent Reverse Reactions in Water Gas Shift (WGS) Through Cu/ZnO Catalyst with MFI Type of Zeolite Support. *Evergreen*, 11(4), 3299–3306.
- Liska, S., Shalihah, R. K., Restiawaty, E., Devianto, H., Miyamoto, M., Uemiya, S., Nishiyama, N., Budhi, Y. W., & Chan, S. H. (2024). Catalytic enhancement of water gas shift reaction with Cu/ZnO/ZSM-5: Overcoming challenges of CO₂ and H₂ rich feeds. *International Journal of Hydrogen Energy*, 92(August), 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.093>

- Lucarelli, C., Molinari, C., Faure, R., Fornasari, G., Gary, D., Schiaroli, N., & Vaccari, A. (2018). Novel Cu-Zn-Al catalysts obtained from hydrotalcite-type precursors for middle-temperature water-gas shift applications. *Applied Clay Science*, 155(12), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.022>
- Mokhatab, S., & Poe, W. (2012). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66115-3>
- Pal, D. B., Chand, R., Upadhyay, S. N., & Mishra, P. K. (2018). Performance of water gas shift reaction catalysts: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(February 2017), 549–565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.003>
- Saeidi, S., Fazlollahi, F., Najari, S., Iranshahi, D., Klemeš, J. J., & Baxter, L. L. (2017). Hydrogen production: Perspectives, separation with special emphasis on kinetics of WGS reaction: A state-of-the-art review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 49, 1–25. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2016.12.003>
- Sajida, G. N., Liska, S., Saputera, W. H., Winoto, H. P., & Budhi, Y. W. (2024). Study of the water gas shift reaction thermodynamic, kinetic, and reactor modelling. *AIP Conference Proceedings*, 3215(1). <https://doi.org/10.1063/5.0236602>
- Smith R J, B., Loganathan, M., & Shantha, M. S. (2010). A review of the water gas shift reaction kinetics. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.2238>
- Suhartanto, T., York, A. P. E., Hanif, A., Al-Megren, H., & Green, M. L. H. (2001). Potential utilisation of Indonesia's natuna natural gas field via methane dry reforming to synthesis gas. *Catalysis Letters*, 71(1–2), 49–54. <https://doi.org/10.1023/A:1016600223749>
- Wang, C., Liu, C., Fu, W., Bao, Z., Zhang, J., Ding, W., Chou, K., & Li, Q. (2016). The water-gas shift reaction for hydrogen production from coke oven gas over Cu/ZnO/Al₂O₃ catalyst. *Catalysis Today*, 263, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.09.044>