

Reaksi Hidrogenasi Metoksida Menjadi Metanol pada Klaster Pd₆Ni

Adhitya Gandaryus Saputro ^{1,2*}) dan Fiki Taufik Akbar³⁾

¹Kelompok Keahlian Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

²Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

³Kelompok Keilmuan Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

*Corresponding author: ganda@tf.itb.ac.id

ABSTRAK

Kami melakukan kajian teoretis mengenai reaksi hidrogenasi metoksida (H_3CO) menjadi metanol (CH_3OH) pada katalis klaster Pd₆Ni secara teoretis menggunakan perhitungan berbasis teori fungsional kerapatan (DFT). Reaksi ini merupakan salah satu reaksi pembatas laju pada proses konversi gas karbon dioksida (CO_2) menjadi metanol. Hasil perhitungan kami menunjukkan bahwa reaksi hidrogenasi metoksida pada katalis klaster Pd₆Ni memiliki energi aktivasi yang lebih baik dibandingkan dengan energi aktivasi pada katalis konvensional berbasis permukaan Cu. Hal ini disebabkan karena klaster Pd₆Ni mampu menstabilkan adsorpsi molekul metanol dengan baik dan memiliki energi adsorpsi *H yang relatif lemah.

Kata kunci : reaksi pembentukan metanol, hidrogenasi metoksida, Pd₆Ni, DFT

1. PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan salah satu permasalahan serius yang dihadapi dunia saat ini. Sumber utama dari permasalahan ini adalah efek rumah kaca yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas CO_2 di atmosfer bumi. Konsentrasi gas CO_2 di atmosfer bumi telah meningkat secara terus menerus mulai dari ~280 ppm sebelum revolusi industri, menjadi ~390 ppm pada 2010 dan diperkirakan akan mencapai ~570 ppm pada akhir abad ini [1]. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu upaya yang serius untuk mengurangi emisi gas CO_2 .

Salah satu skema yang mungkin diterapkan untuk mengurangi masalah emisi ini adalah dengan mengonversi gas CO_2 menjadi metanol melalui proses hidrogenasi. Belakangan ini, skema produksi metanol ini menjadi popular di bidang energi alternatif. Metanol merupakan bahan bakar cair praktis yang dapat digunakan untuk mesin pembakaran dalam dan juga untuk sel bahan bakar metanol (*direct methanol fuel cell*; DMFC) [2]. Selain itu metanol juga dapat digunakan sebagai sarana penyimpanan gas hidrogen [3,4].

Pada skala industri, selama ini metanol diproduksi menggunakan campuran gas CO_2 dan H_2 (gas-gas ini diperoleh melalui proses konversi metana gas alam pada temperatur ~850 °C) pada tekanan tinggi (50-120 bar) dan pada temperatur 230-280°C dengan menggunakan katalis konvensional berbasis Cu/ZnO [5]. Sayangnya, persentase konversi CO_2 menjadi metanol pada katalis ini masih kecil dan terbatas secara kinetik pada kisaran 15-25% [6]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan katalis baru yang dapat meningkatkan persentase konversi gas CO_2 menjadi metanol.

Secara keseluruhan, reaksi pembentukan metanol melalui hidrogenasi CO_2 bersifat eksotermik. Namun sayangnya, reaksi pembentukan metanol ini tersusun atas beberapa reaksi elementer yang bersifat endotermik dan memiliki energi aktivasi yang besar. Persentase konversi gas CO_2 menjadi metanol melalui proses hidrogenasi dapat ditingkatkan apabila katalis yang digunakan dapat menurunkan secara signifikan energi aktivasi dari reaksi-reaksi pembatas laju (*rate limiting reaction*: rlr) yang terlibat dalam proses ini. Salah satu reaksi pembatas laju utama pada rangkaian reaksi hidrogenasi CO_2 menjadi metanol pada permukaan katalis berbasis Cu adalah reaksi hidrogenasi metoksida (H_3CO) menjadi metanol. Reaksi ini bersifat endotermik dan memiliki energi aktivasi yang cukup besar pada permukaan Cu(111) ($E^{act} \geq 1.17-1.25$ eV) [7,8]. Salah satu cara untuk menurunkan energi aktivasi dari reaksi hidrogenasi H_3CO ini adalah dengan mencari katalis yang dapat menstabilkan adsorpsi metanol relatif terhadap H_3CO . Dengan demikian, maka profil reaksi hidrogenasi H_3CO akan menjadi eksotermik sehingga energi aktivasinya juga akan menjadi jauh lebih rendah.

Pada penelitian ini kami mencoba menggunakan klaster paladium yang didoping dengan nikel (Pd_6Ni) sebagai katalis reaksi hidrogenasi H_3CO menjadi metanol. Pada penelitian sebelumnya, kami menemukan bahwa kluster Pd_6Ni ini dapat mengikat molekul CO_2 dengan cukup kuat (chemisorption) dan dapat memaksa molekul CO_2 terikat dengan konfigurasi *bidendate* [9]. Katalis klaster Pd_6Ni ini diharapkan dapat menurunkan energi aktivasi reaksi hidrogenasi H_3CO menjadi metanol. Penelitian ini merupakan kajian teoretis yang dilakukan dengan metoda teori fungsional kerapatan.

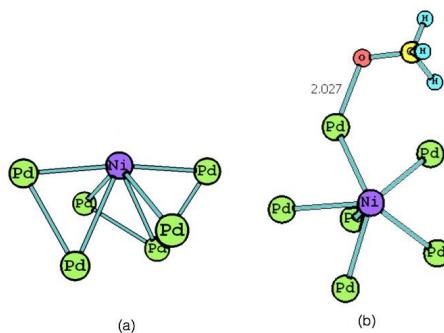
2. METODE KOMPUTASI

Pemodelan reaksi hidrogenasi H_3CO menjadi metanol pada klaster Pd_6Ni ini dilakukan dengan menggunakan kalkulasi berbasis teori fungsional kerapatan (*density functional theory*; DFT) [10,11]. Perangkat lunak yang digunakan untuk perhitungan DFT adalah Gaussian 09 [12]. Perhitungan energi total dari sistem katalis dilakukan dengan potensial *exchange-correlation* B3LYP dengan basis set LANL2DZ untuk atom Pd dan basis set 6-311G** untuk atom ringan (C,O,H).

Struktur optimal dari klaster Pd_6Ni ditampilkan pada Gambar 1a. Dalam proses optimasi geometri semua atom pada klaster Pd dibiarkan bergerak bebas. Energi adsorpsi (E_{ad}) dari suatu molekul dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_{ad} = E_{tot} - (E_{mol} + E_{surf}). \quad (1)$$

E_{tot} merupakan energi total dari sistem adsorpsi, E_{mol} merupakan energi total dari molekul dan E_{surf} merupakan energi total dari Pd_6Ni . Perhitungan struktur transisi untuk proses hidrogenasi H_3CO menjadi metanol dilakukan dengan metode *synchronous transit-guided quasi-Newton* (STQN) [13,14].



Gambar 1. Struktur optimal klaster Pd_6Ni (a) dan adsorpsi H_3CO pada klaster Pd_6Ni (b).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri optimal dari adsorpsi molekul H_3CO pada klaster Pd_6Ni ditunjukkan pada Gambar 1b. Atom O dari molekul $^*\text{H}_3\text{CO}$ (* X: atom X terikat pada permukaan katalis) terikat pada salah satu atom Pd dari klaster Pd_6Ni dengan jarak $\text{Pd}-\text{O}$ 2.027 Å. Molekul ini terikat secara kimia melalui interaksi antara orbital-*d* dari klaster Pd_6Ni dengan orbital-*p* atom O dari molekul $^*\text{H}_3\text{CO}$. Struktur dari klaster Pd_6Ni mengalami rekonstruksi geometri ketika mengikat molekul H_3CO . Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi $\text{Pd}_6\text{Ni}-\text{H}_3\text{CO}$ cukup kuat. Konfigurasi adsorpsi ini mirip dengan struktur adsorpsi H_3CO di permukaan Cu(111) [7,8].

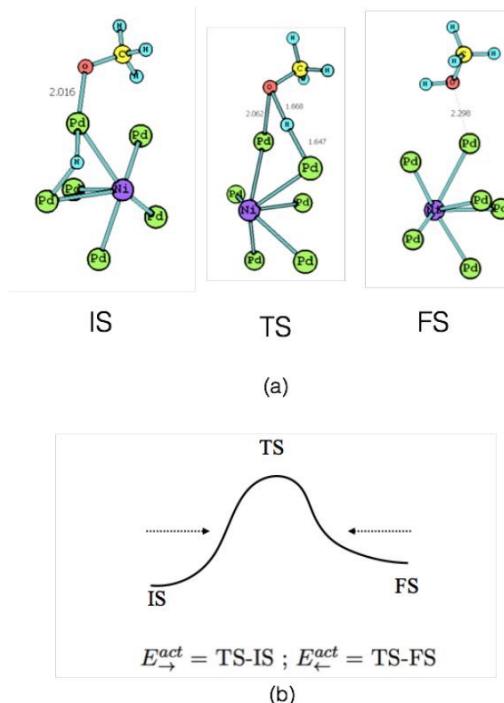
Reaksi hidrogenasi $^*\text{H}_3\text{CO}$ menjadi metanol memerlukan kehadiran setidaknya satu atom H pada klaster Pd_6Ni . Struktur optimum dari adsorpsi atom H pada sistem $\text{Pd}_6\text{Ni}-^*\text{H}_3\text{CO}$ ditunjukkan pada Gambar 2a. Atom $^*\text{H}$ terikat pada situs Pd-Pd bridge di dekat situs $^*\text{H}_3\text{CO}$. Jarak atom $^*\text{H}$ ke atom O dari molekul $^*\text{H}_3\text{CO}$ adalah 3.686 Å. Posisi optimum atom H yang dekat dengan situs $^*\text{H}_3\text{CO}$ ini akan sangat membantu proses hidrogenasi menjadi metanol. Apabila jarak ini terlalu jauh, maka dapat dipastikan energi aktivasi yang diperlukan menjadi sangat besar.

Geometri dari kondisi awal (IS), transisi (TS), final (FS) dan energi aktivasi dari reaksi pembentukan metanol melalui hidrogenasi H_3CO pada klaster Pd_6Ni disajikan pada Gambar 2 dan Tabel 1. Hasil perhitungan kami menunjukkan bahwa energi aktivasi yang diperlukan untuk proses hidrogenasi

molekul H_3CO menjadi metanol adalah 0.41 eV. Nilai energi aktivasi ini jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai energi aktivasi pada katalis klaster Pd_7 (1.05 eV) dan pada katalis konvensional berbasis $\text{Cu}(111)$ ($E^{\text{act}}_{\rightarrow} = 1.17\text{-}1.25$ eV) [7,8].

Tabel 1. Energi aktivasi dari reaksi hidrogenasi ${}^*\text{H}_3\text{CO}$ pada klaster Pd_6Ni . Definisi dari $E^{\text{act}}_{\rightarrow}$, $E^{\text{act}}_{\leftarrow}$, IS dan FS ditunjukkan pada Gambar 2b.

Reaction	Cluster type	$E^{\text{act}}_{\rightarrow}$ (eV)	$E^{\text{act}}_{\leftarrow}$ (eV)	FS-IS (eV)
${}^*\text{H}_3\text{CO} + {}^*\text{H} \longrightarrow {}^*\text{CH}_3\text{OH}$	Pd_6Ni	0.41	1.23	-0.82



Gambar 2. Geometri dari kondisi awal (IS: ${}^*\text{H}_3\text{CO} + {}^*\text{H}$), transisi (TS: ${}^*\text{H}-\text{H}_3\text{CO}$) dan kondisi akhir (FS: ${}^*\text{CH}_3\text{OH}$ (metanol)) dari proses hidrogenasi H_3CO di klaster Pd_6Ni (a). Definisi dari $E^{\text{act}}_{\rightarrow}$, $E^{\text{act}}_{\leftarrow}$, IS dan FS (b).

Untuk menjelaskan fenomena ini, kita perlu melihat profil energi dari sistem sebelum dan sesudah terjadi reaksi hidrogenasi. Data energi reaksi (FS-IS) pada Tabel 1 menunjukkan bahwa reaksi hidrogenasi H_3CO pada klaster Pd memiliki profil eksotermik (melepas energi, bernilai negatif). Hal ini sangat berbeda dengan profil energi reaksi pada katalis $\text{Cu}(111)$ yang memiliki profil endotermik (FS -IS bernilai positif) [7,8]. Profil eksotermik inilah yang menyebabkan klaster Pd memiliki energi aktivasi reaksi hidrogenasi H_3CO pada jauh lebih baik daripada permukaan $\text{Cu}(111)$. Profil eksotermik pada klaster Pd menunjukkan bahwa klaster Pd dapat menstabilkan adsoprsi molekul metanol secara signifikan bila dibandingkan dengan katalis permukaan $\text{Cu}(111)$. Penstabilan adsoprsi molekul metanol ini disebabkan oleh karakter orbital- d dari klaster Pd yang sangat terlokalisasi bila dibandingkan dengan orbital- d pada permukaan $\text{Cu}(111)$. Karakter orbital- d dari klaster Pd ini memudahkan interaksi dengan orbital molekul dari metanol yang kemudian berakibat pada penstabilan adsoprsi molekul metanol.

Dari struktur TS yang ditunjukkan pada Gambar 2a, dapat dilihat bahwa proses pembentukan metanol perlu melewati satu tahapan penting yaitu desorpsi atom ${}^*\text{H}$ dari Pd-Pd bridge menuju atom O dari molekul ${}^*\text{H}_3\text{CO}$. Energi adsoprsi atom ${}^*\text{H}$ pada klaster Pd_6Ni (0.44 eV) sedikit lebih lemah dibandingkan dengan energi adsoprsi atom ${}^*\text{H}$ pada klaster Pd_7 (0.45 eV). Hal ini menunjukkan bahwa atom ${}^*\text{H}$ di Pd-Pd bridge dari klaster Pd_6Ni lebih mudah terdesorpsi sehingga energi aktivasi hidrogenasi

molekul H₃CO di klaster ini (0.41 eV) lebih rendah bila dibandingkan dengan energi aktivasi pada klaster Pd₇ (1.05 eV).

Dari diskusi di atas, dapat disimpulkan bahwa klaster Pd₆Ni memiliki energi aktivasi reaksi hidrogenasi H₃CO yang rendah karena katalis ini mampu menstabilkan adsorpsi molekul metanol dengan baik dan memiliki energi adsorpsi *H yang relatif lemah

4. KESIMPULAN

Kami telah mempelajari reaksi hidrogenasi molekul H₃CO menjadi metanol pada katalis klaster Pd₆Ni dengan menggunakan perhitungan berbasis teori fungsional kerapatan DFT. Reaksi ini merupakan salah satu reaksi pembatas laju utama (rate limiting reaction) pada proses pembentukan metanol melalui hidrogenasi gas CO₂. Hasil perhitungan kami menunjukkan bahwa reaksi hidrogenasi H₃CO pada katalis klaster Pd₆Ni memiliki energi aktivasi yang lebih baik dibandingkan dengan energi aktivasi pada katalis konvensional berbasis permukaan Cu. Hal ini disebabkan karena katalis ini mampu menstabilkan adsorpsi molekul metanol dengan baik dan memiliki energi adsorpsi *H yang relatif lemah. Dua poin ini dapat dijadikan sebagai parameter untuk mendesain katalis baru untuk reaksi hidrogenasi H₃CO menjadi metanol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Semua kalkulasi dalam penelitian ini dilakukan di fasilitas komputasi Teknik Fisika ITB. AGS dan FTA berterima kasih pada ITB atas bantuan yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. D. Xu and J. A. Moulijn, Mitigation of CO₂ by Chemical Conversion: Plausible Chemical Reactions and Promising Products, *Energy Fuels*, 1996, 10, 305–325.
- [2] Olah G. A., Goeppert A. and Prakash G. K. S., Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, 2nded.; Wiley-VCH: Weinheim, 2009.
- [3] M. Nielsen, E. Alberico, W. Baumann, H.-J. Drexler, H. Junge, S. Gladiali and M. Beller, *Nature*, 2013, 495, 85–89.
- [4] K. M. K. Yu, W. Tong, A. West, K. Cheung, T. Li, G. Smith, Y. Guo and S. C. E. Tsang, *Nat Commun*, 2012, 3, 1230.
- [5] Waugh K.C., Methanol Synthesis, *Catal. Today* 1992, 15, 51–75.
- [6] Liu X. M., Lu G. Q., Yan Z. F., Beltramini, Recent Advances in Catalysts for Methanol Synthesis via Hydrogenation of CO and CO₂, *J. Ind. Eng. Chem. Res.* 2003, 42, 6518.
- [7] Yixiong Yang, Michael G. White, and Ping Liu, Theoretical Study of Methanol Synthesis from CO₂ Hydrogenation on Metal-Doped Cu(111) Surfaces, *J. Phys. Chem. C*, 2012, 116 (1), pp 248– 256.
- [8] Grabow L. C. and Mavrikakis M., Mechanism of Methanol Synthesis on Cu through CO₂ and CO Hydrogenation, *ACS Catal.* 2011, 1, 365–384.
- [9] A.G. Saputro, M.K. Agusta, T.D.K. Wungu, Suprijadi, F.Rusydi and H.K.Dipojono, "DFT study of adsorption of CO₂ on palladium cluster doped by transition metal" *Journal of Physics: Conference Series* **739** (2016) 012083.
- [10] P. Hohenberg and W. Kohn, *Phys. Rev.*, 1964, 136, B864–B871.
- [11] W. Kohn and L. J. Sham, *Phys. Rev.*, 1965, 140, A1133–A1138.
- [12] M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, G. Scalmani, V. Barone, B. Mennucci, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, M. Caricato, X. Li, H. P. Hratchian, A. F. Izmaylov, J. Bloino, G. Zheng, J. L. Sonnenberg, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J.

Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, T. Vreven, J. A. Montgomery, Jr., J. E. Peralta, F. Ogliaro, M. Bearpark, J. J. Heyd, E. Brothers, K. N. Kudin, V. N. Staroverov, R. Kobayashi, J. Normand, K. Raghavachari, A. Rendell, J. C. Burant, S. S. Iyengar, J. Tomasi, M. Cossi, N. Rega, J. M. Millam, M. Klene, J. E. Knox, J. B. Cross, V. Bakken, C. Adamo, J. Jaramillo, R. Gomperts, R. E. Stratmann, O. Yazyev, A. J. Austin, R. Cammi, C. Pomelli, J. W. Ochterski, R. L. Martin, K. Morokuma, V. G. Zakrzewski, G. A. Voth, P. Salvador, J. J. Dannenberg, S. Dapprich, A. D. Daniels, Ö. Farkas, J. B. Foresman, J. V. Ortiz, J. Cioslowski and D. J. Fox, *Gaussian09 Revision D.01*, Gaussian Inc. Wallingford CT 2009.

[13] C. Peng, P. Y. Ayala, H. B. Schlegel, and M. J. Frisch: *J. Comput. Chem.* 17 (1996) 49.

[14] C. Peng and H. B. Schlegel: *Isr. J. Chem.* 33 (1994) 449.