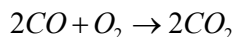


NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT KHẢ NĂNG CHUYỂN ĐỔI KHÍ CO Ở NHIỆT ĐỘ PHÒNG CỦA VẬT LIỆU TỔ HỢP Pd/Al₂O₃/rGO

NGUYỄN NGỌC ANH ⁽¹⁾, TRẦN VĂN HẬU ⁽¹⁾, NGUYỄN THỊ HUYỀN ⁽¹⁾,
PHẠM VĂN TRÌNH ⁽¹⁾, NGUYỄN VĂN CHÚC ⁽¹⁾, NGUYỄN VĂN TÚ ⁽¹⁾

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khí CO là một chất khí không màu, không mùi, độc tính cao. Khi nồng độ CO chiếm khoảng 0,01% trong không khí (~ 35ppm) cũng có thể gây tử vong cho người và động vật do CO kết hợp với hemoglobin trong hồng cầu làm ngăn cản quá trình vận chuyển oxy tới não cũng như các tế bào khác của cơ thể sống. Ngoài ra, CO còn liên kết với myoglobin gây tổn thương tim [1,2]. Khí CO thường được sinh ra từ các hoạt động sản xuất công nghiệp, hoạt động của các nhà máy nhiệt điện, các hoạt động vận chuyển bằng xe cơ giới, trong đó, ngành giao thông vận tải phát thải phần lớn khí CO. Do CO rất ít tan trong nước nên quá trình loại bỏ nó khỏi không khí gặp nhiều khó khăn. Vì vậy, phương pháp được sử dụng nhiều nhất để làm giảm lượng khí CO trong không khí là oxy hoá CO thành khí carbon đioxit (CO₂) sử dụng vật liệu xúc tác. Trong các nguyên tố thì kim loại chuyển tiếp thường được sử dụng rộng rãi làm vật liệu xúc tác để oxy hóa CO do chúng có orbital d trống, dễ dàng cho hoặc nhận thêm electron tạo các liên kết hóa học. Trong đó, Pd cho thấy là vật liệu xúc tác tiềm năng do kim loại Pd có hoạt tính cao và thường được dùng trong phản ứng oxy hoá CO do khả năng hấp phụ chọn lọc rất tốt của nó theo phương trình phản ứng.



Tuy nhiên, việc sử dụng các hạt nano Pd làm xúc tác vẫn tồn tại một số nhược điểm: i) các hạt nano Pd dễ bị kết đám dẫn đến hiệu suất xúc tác giảm. ii) do sự tương tác mạnh giữa Pd và CO phân tử, rất khó cho oxy để hấp thụ và kích hoạt bề mặt của các chất xúc tác. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu sử dụng các vật liệu hỗ trợ xúc tác là các oxit kim loại như TiO₂, CeO₂, Fe₃O₄, MgO, ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂... [3-9] để cung cấp thêm các tâm hoạt hoá cho CO và O₂. Trong số chúng, Al₂O₃ nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu do một số ưu điểm. Thứ nhất, Al₂O₃ có sự ổn định nhiệt cao, không bị khử thành Al khi làm việc trong điều kiện có tác nhân khử là CO ở nhiệt độ cao. Thứ hai, bề mặt alumina có các vị trí axit Lewis, ảnh hưởng chính đến sự phân bố và trạng thái của các thành phần hoạt động và xúc tác hoạt động trong các phản ứng khác nhau. Thứ ba, Al₂O₃ có cấu trúc spinel không hoàn hảo chứa một lượng các vị trí trống mang điện tích âm [10], tạo điều kiện thuận lợi cho sự tương tác của thành phần hoạt động với sự hỗ trợ xúc tác. Người ta cũng chứng minh được rằng, hiệu suất hấp phụ và chuyển đổi CO thành CO₂ sử dụng xúc tác Pd/Al₂O₃ phụ thuộc vào nhiều tham số như nhiệt độ, áp suất khí, độ xốp của cấu trúc, kích thước hạt Pd, hàm lượng Pd trong hỗn hợp. Trong đó, kích thước hạt và hàm lượng Pd là hai thông số quan trọng nhất trong ứng dụng. Do đó, để Pd đạt hoạt tính xúc tác cao, các hạt nano Pd cần có kích thước nhỏ và phân tán đồng đều trên bề mặt của các hạt Al₂O₃.

Gần đây, vật liệu graphen thu hút sự chú ý như một vật liệu carbon lai hóa sp^2 không có độ rộng vùng cấm. Nó có triển vọng cho nhiều ứng dụng, như điện tử, cảm biến, sản xuất năng lượng, chuyển đổi và lưu trữ năng lượng, vì các đặc tính nhiệt, cơ học, quang học và điện hóa ưu việt của nó [11]. Tấm graphen hai chiều (2D) cũng sở hữu tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao, thể hiện các cấu trúc hỗ trợ xúc tác 2D thú vị cho các phản ứng xúc tác [12]. Ngoài ra, do khiếm khuyết của vị trí cacbon và các nhóm chức được trình bày trong graphen có nguồn gốc hóa học, các ion kim loại có thể được hấp phụ và xen kẽ vào các tấm graphene để tạo thành vật liệu composit bền nhiệt [12]. Trên cơ sở các đặc tính độc đáo của nó, graphen được kỳ vọng là vật liệu hỗ trợ tuyệt vời cho các chất xúc tác dị thể khác nhau [13, 14]. Tuy nhiên, để ứng dụng graphen trong chế tạo vật liệu xúc tác, các nhóm chức cần được gắn lên bề mặt nhằm tăng khả năng phân tán của graphene trong dung dịch. Gần đây, các nhà khoa học đang tập trung vào các dẫn xuất của graphen như graphen oxit (GO), graphen oxit dạng khử (rGO) có gắn nhóm chức trong quá trình tổng hợp. Do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành chế tạo vật liệu tổ hợp Pd /Al₂O₃/rGO bằng phương pháp đồng kết tủa. Đặc tính hình thái học, cấu trúc của vật liệu được đánh giá thông qua các phép phân tích SEM and XRD. Kết quả đo chuyển đổi khí CO thể hiện rằng vật liệu tổ hợp có thể chuyển đổi đến 90% CO (700 ppm) ở nhiệt độ phòng trong thời gian 1000s.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Hoá chất tổng hợp tổ hợp vật liệu: Tấm graphit (Sigma-Aldrich, 99%), Al(NO₃)₃.9H₂O (Trung Quốc, 99%), muối Pd(OAc)₂ (Sigma-Aldrich 99%), NH₄OH (Trung Quốc, 99%), H₂SO₄ (Trung Quốc ≥ 98%), H₃PO₄ (Trung Quốc, ≥ 85%), H₂O₂ (Trung Quốc, ≥ 30%).

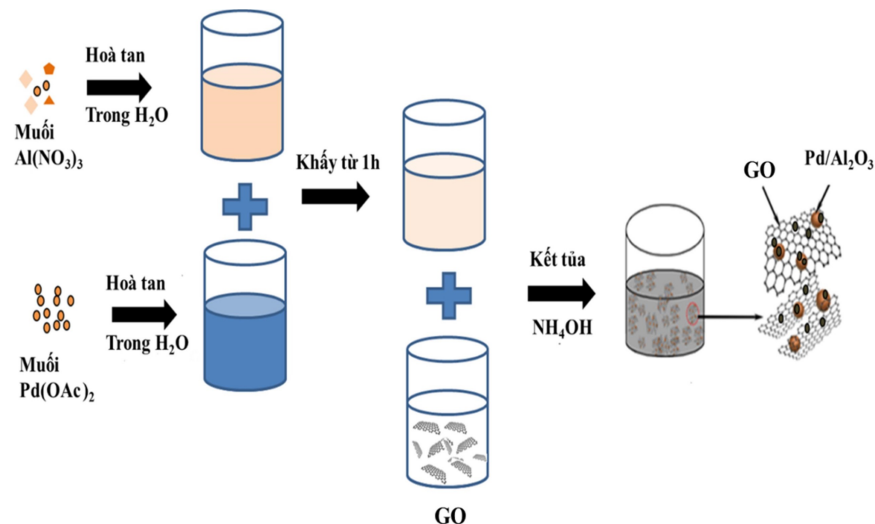
2.2. Chế tạo vật liệu GO

Vật liệu GO được chế tạo bằng phương pháp Hummer cải tiến. Quá trình chế tạo được tóm tắt như sau: Đầu tiên, một hỗn hợp axit nồng độ cao gồm H₂SO₄ và H₃PO₄ với tỉ lệ 9:1 (360:40 ml) được thêm vào hỗn hợp gồm bột graphit dạng tấm (3g) và (18g) ở 35-40°C. Sau đó, phản ứng được gia nhiệt đến 50°C và được khuấy trong suốt 12h. Tiếp theo, phản ứng được làm lạnh xuống nhiệt độ phòng và được rót vào bình đá (400 ml) với 30 % H₂O₂ (3 ml). Tiếp đó, hỗn hợp được lọc rửa nhiều lần qua nước cất sử dụng màng lọc polyeste (Carpenter Co). Cuối cùng, mẫu được phân tán trong nước.

2.3. Chế tạo tổ hợp vật liệu Pd/Al₂O₃/rGO

10 g tổ hợp vật liệu Pd/Al₂O₃/rGO được chế tạo bằng phương pháp đồng kết tủa với quy trình được thực hiện như sau: Đầu tiên, 71g muối Al(NO₃)₃.9H₂O được hoà tan trong 500ml nước cất và 0,64g muối Pd (OAc)₂ hoà tan trong hỗn hợp 100ml aceton và 100 ml nước. Tiếp đó, hai dung dịch muối được trộn với nhau và khuấy trong 1 h ở nhiệt độ phòng. Tiếp đó, dung dịch hỗn hợp muối được thêm vào cốc có chứa 500 ml dung dịch GO trong nước (10ml GO: 490 ml nước). Sau khi

khấy đều hỗn hợp trong 30 phút, 300 ml dung dịch NH_4OH (25-28%) được thêm vào từ từ đến khi hỗn hợp chuyển sang màu trắng sữa. Hỗn hợp được để lắng và tiến hành ly tâm ở tốc độ 3000 vòng/phút trong 5 phút. Tiếp theo, hỗn hợp sau ly tâm được trộn đều với dung dịch PVA trong 30 phút. Tiếp đó, hỗn hợp được ủ ở nhiệt độ 100°C trong 24 giờ. Cuối cùng, mẫu được ủ ở 750°C trong môi trường khí H_2 để chuyển PdO thành hạt Pd kích thước nano đồng thời $\text{Al}(\text{OH})_3$ chuyển thành Al_2O_3 và GO chuyển thành rGO.



Hình 1. Quá trình chế tạo vật liệu tổ hợp $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{rGO}$ bằng phương pháp đồng kết tủa

2.4. Phương pháp nghiên cứu đặc tính

Hình thái học vật liệu được phân tích thông qua ảnh kính hiển vi điện tử phát xạ trường FE-SEM Hitachi 4800 (Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam) và đặc trưng cấu trúc được đánh giá thông qua phép đo nhiễu xạ tia X (XRD) (Empyrean của hãng PANalytical, Hà Lan). Diện tích bề mặt riêng BET được đánh giá sử dụng hệ TRI START 3000, MICROMERITICS. Hình thái và độ dày các tấm GO được xác định thông qua phép đo AFM (XE-100, Park systems).

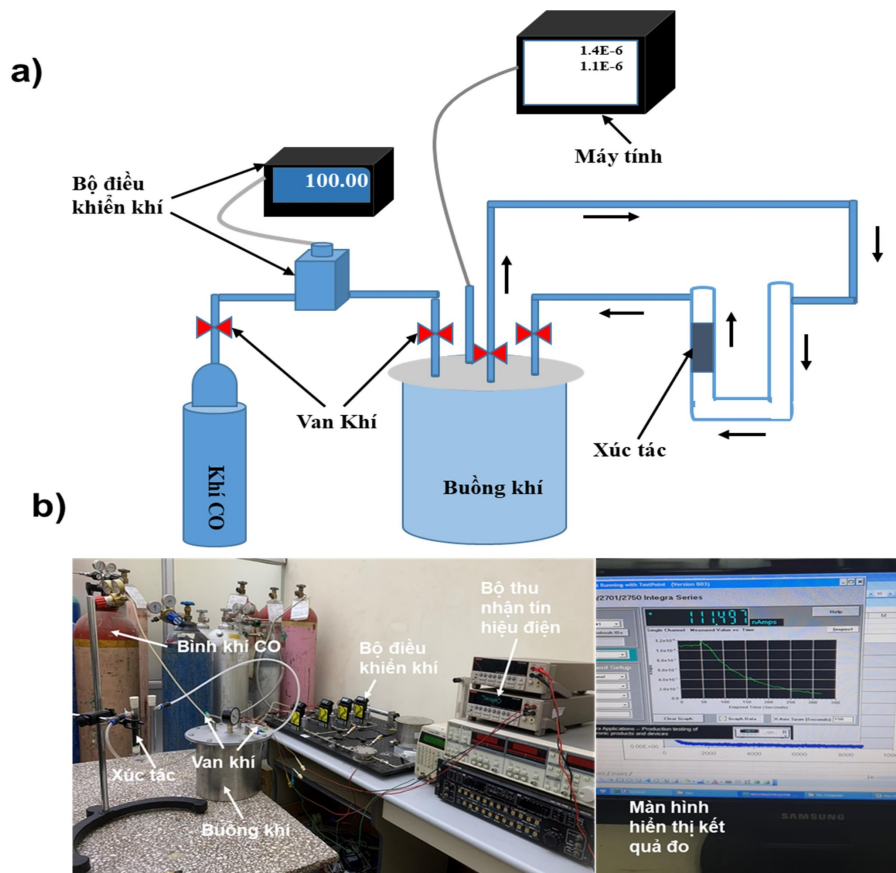
2.5. Xác định độ chuyển hoá khí CO

Để đo khả năng chuyển hoá khí CO của tổ hợp vật liệu $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{rGO}$ ở nhiệt độ phòng chúng tôi tiến hành thiết kế một hệ đo như được mô tả trong sơ đồ hình 2. Hệ đo gồm 3 bộ phận chính: 1) Buồng chứa khí với thể tích 6 l bên trong được đặt module CMM5042 (tích hợp cảm biến khí CO TGS5042, dải hoạt động 0-800 ppm, hãng Figaro-Mỹ) và một bơm khí có chức năng đưa khí tuần hoàn qua xúc tác. 2) Hệ thống lưu lượng kế điện tử (Aalborg Digital Mass Flowmeter GFC cho CO) có chức năng điều khiển lưu lượng khí vào buồng chứa một cách chính xác. 3) Hệ thống thu nhận tín hiệu (2700 multimeter, Keithley) và kết nối máy tính. Khối lượng mẫu xúc tác được sử dụng cho quá trình đó là 9 g. Phép đo độ chuyển hoá được mô tả như sau:

Đầu tiên, hỗn hợp khí CO (1% CO trong hỗn hợp N₂: O₂ (~ 4:1)) được đưa vào buồng phản ứng đến khi nồng độ CO trong buồng đạt giá trị 700 ppm (tương ứng với tín hiệu dòng 1.4 μA). Khi giá trị này ổn định trong một khoảng thời gian thì các van đầu vào và đầu ra được đóng và kết nối qua hệ thống vật liệu xúc tác sao cho đầu ra của buồng khí sẽ kết nối với đầu vào của hệ xúc tác. Đầu ra của hệ xúc tác sẽ kết nối với đầu vào của buồng khí tạo nên một quá trình tuần hoàn. Khi các van mở và bơm khí trong buồng hoạt động, lượng khí CO sẽ di chuyển tuần hoàn từ xúc tác và quay trở về buồng khí. Khi đó ta thu được kết quả độ giảm nồng độ khí CO như là một hàm của thời gian. Độ chuyển hoá khí CO được tính theo công thức:

$$n = \frac{C_{CO}^o - C_{CO}^t}{C_{CO}^o} \times 100\%$$

Trong đó: C_{CO}^o là nồng độ của CO ban đầu có trong hỗn hợp khí và C_{CO}^t là nồng độ khí CO đi qua hỗn hợp khí trong một khoảng thời gian t (s).

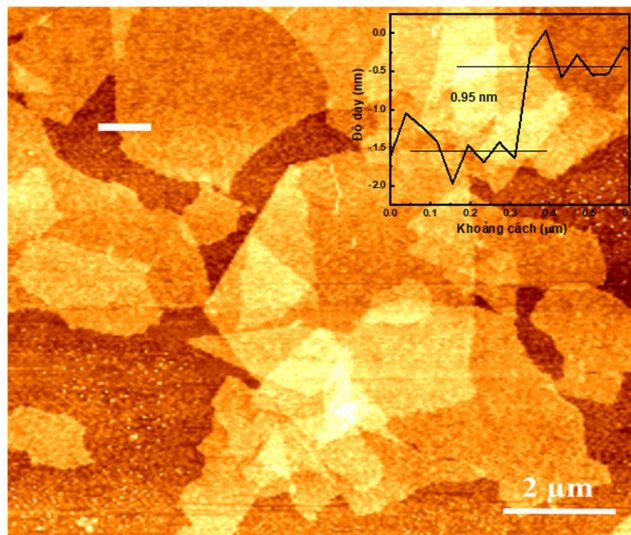


Hình 2. a) Sơ đồ hệ thiết bị đo chuyển đổi khí CO ở nhiệt độ phòng,
b) Ảnh chụp hệ thiết bị đo

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

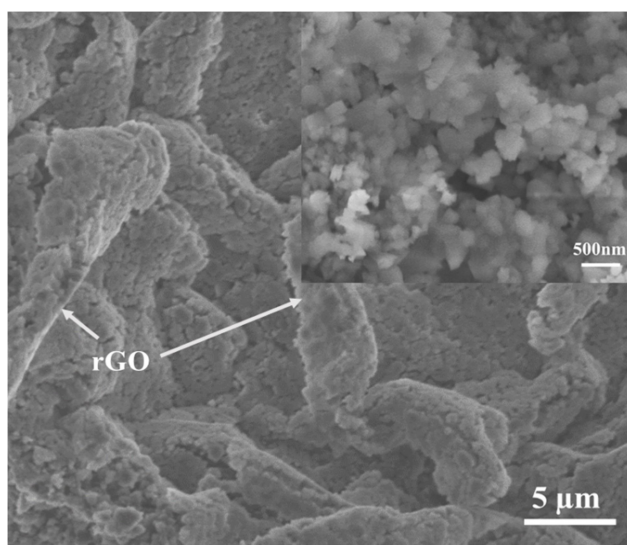
3.1. Chế tạo vật liệu GO

Để đánh giá hình thái học bề mặt, kích thước và độ dày các tấm GO sau khi tổng hợp bằng phương pháp Hummer cải tiến, mẫu GO được phân tán trong nước ở nồng độ thấp và được phủ lên bề mặt đế SiO_2/Si để thực hiện phép đo AFM. Ảnh AFM (hình 3) chỉ ra rằng các tấm GO được chế tạo có kích thước từ 1 μm đến vài μm với độ dày từ 1-2 lớp và một bề mặt tương đối sạch.



Hình 3. Ảnh AFM của mẫu GO được phân tán và phủ lên bề mặt đế SiO_2/Si

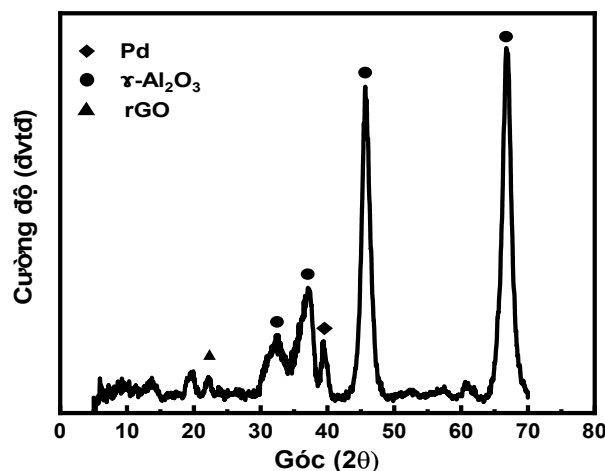
3.2. Tổng hợp vật liệu $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{rGO}$



Hình 4. Ảnh SEM của tổ hợp vật liệu $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{rGO}$

Hình thái học bề mặt vật liệu tổ hợp Pd/Al₂O₃/Gr được chỉ ra trong hình 4. Ta có thể quan sát thấy các rGO được bao phủ bởi các hạt Pd và Al₂O₃ với mật độ dày đặc. Để quan sát một cách chi tiết hơn, một ảnh SEM phóng đại đã được chụp. Ảnh chỉ ra rằng, các hạt bao phủ trên bề mặt rGO có kích thước rất nhỏ từ 100-250 nm. Tuy nhiên, thật khó để có thể phân biệt được các hạt này trong tổ hợp vật liệu. Từ ảnh SEM cận cảnh ta cũng có thể thấy rằng, vật liệu tổ hợp có cấu trúc xốp cao. Như đã được chứng minh, cấu trúc xốp của vật liệu ảnh hưởng rất nhiều tới đặc tính xúc tác của vật liệu. Do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi cũng tiến hành đánh giá độ xốp của vật liệu tổ hợp thông qua kết quả đo diện tích bề mặt BET. Vật liệu tổ hợp có diện tích bề mặt tương đối lớn 184,6 m²/g. Kết quả này là tương đối phù hợp với kết quả chỉ ra trong ảnh SEM.

Giản đồ XRD trong hình 5 cho phép khẳng định sự có mặt của Pd kim loại thể hiện qua các đỉnh nhiễu xạ tại các vị trí $2\theta \approx 40$ ứng với các mặt lập phương tâm mặt (111) của Pd. Vị trí các đỉnh của γ -Al₂O₃ được quan sát ở vị trí $2\theta = 32, 37, 46$ và 67 . Bên cạnh đó, đỉnh nhiễu xạ của rGO xuất hiện trong khi đỉnh của GO là tương đối yếu. Điều này có thể giải thích là do hầu hết các tấm GO được khử ở nhiệt độ 750°C để hình thành rGO.

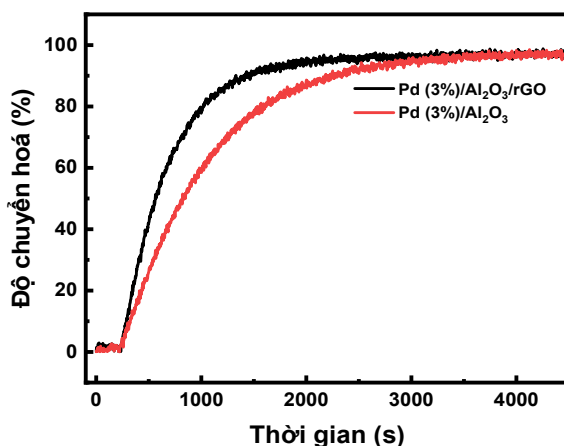


Hình 5. Giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu tổ hợp Pd (3%)/Al₂O₃/rGO

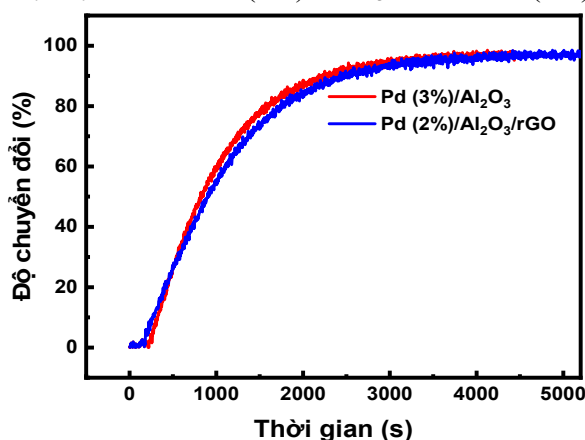
3.3. Kết quả đo độ chuyển hoá khí CO ở nhiệt độ phòng

Đường cong màu đen trong hình 6 thể hiện sự chuyển hoá khí CO ở nhiệt độ phòng của vật liệu tổ hợp Pd (3%)/Al₂O₃/rGO. Kết quả chỉ ra rằng vật liệu tổ hợp thể hiện một hiệu suất chuyển hoá cao. Trong khoảng thời gian 1000s, mẫu vật liệu tổ hợp Pd (3%)/Al₂O₃/rGO có thể chuyển hoá 90% lượng khí CO (700 ppm) trong buồng chứa khí. Trước đó, một số nhóm đã nghiên cứu hiệu suất chuyển đổi khí CO của vật liệu xúc tác Pd /Al₂O₃. Để đánh giá vai trò của rGO trong vật liệu tổ hợp lên tốc độ chuyển đổi khí CO, vật liệu xúc tác Pd (3%)/Al₂O₃ không có rGO cũng được chế tạo để so sánh (tất cả các thông số và điều kiện đo là như nhau). Từ kết quả đo, chúng tôi nhận thấy rằng xúc tác Pd (3%)/Al₂O₃ (đường cong màu đỏ hình 6) cũng

thể hiện một hiệu suất chuyển hoá khí CO ở nhiệt độ phòng cao. Tuy nhiên, tốc độ chuyển hoá khí CO của mẫu Pd (3%)/Al₂O₃ là thấp hơn so với tốc độ chuyển hoá của mẫu Pd (3%)/Al₂O₃/rGO. Điều này được thể hiện thông qua thời gian để vật liệu xúc tác Pd (3%)/Al₂O₃ chuyển hoá 90 % khí CO tăng lên 2000s khi so sánh với mẫu vật liệu tổ hợp Pd (3%)/Al₂O₃/rGO (1000s). Kết quả này có thể được cho là do khi thêm thành phần rGO dẫn đến sự tăng diện tích tiếp xúc. Từ đánh giá này, chúng tôi cho rằng rGO thể hiện một đóng góp quan trọng đến sự hình thành của các hạt nano Pd và nano Al₂O₃ mà ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ xúc tác. Để khẳng định điều này, chúng tôi thử nghiệm giảm lượng Pd xuống 2% trong vật liệu tổ hợp và so sánh kết quả đo chuyển đổi khí CO với mẫu xúc tác Pd (3%)/Al₂O₃. Kết quả đo trong hình 7 cho thấy rằng hai mẫu xúc tác có hiệu suất và tốc độ chuyển hoá khí CO là tương đương nhau.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện sự chuyển hoá khí CO theo thời gian ở nhiệt độ phòng của vật liệu xúc tác Pd (3%)/Al₂O₃/rGO và Pd (3%)/Al₂O₃



Hình 7. Sự so sánh hiệu suất chuyển và tốc độ chuyển hoá của mẫu xúc tác có rGO nhưng hàm lượng Pd là 2% và mẫu xúc tác không có rGO nhưng hàm lượng Pd là 3%

4. KẾT LUẬN

Vật liệu tổ hợp (3%)/Al₂O₃/rGO được chế tạo thành công bằng phương pháp đồng kết tủa. Kết quả hình thái học chỉ ra rằng các hạt nano Pd/Al₂O₃ có kích thước đồng đều được phân bố với mật độ dày đặc trên bề mặt các tấm rGO. Vật liệu tổ hợp thể hiện hiệu suất và tốc độ chuyển hoá khí CO ở nhiệt độ phòng cao. Sự có mặt của rGO giúp giảm hàm lượng Pd xuống 2% trong vật liệu tổ hợp, trong khi hiệu suất và tốc độ chuyển hoá là tương đương với 3% Pd/Al₂O₃. Kết quả này cũng mở ra một hướng tiếp cận mới trong việc chế tạo các vật liệu chuyển hoá khí CO ở nhiệt độ phòng với hàm lượng Pd đưa vào thấp khi sử dụng thêm vật liệu màng mỏng 2 chiều rGO.

Lời cảm ơn: Tập thể tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST) với mã số đề tài HTCBT.03/22-22.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. R. S. Salama, M. A. Mannaa, H. M. Altass, A. A. Ibrahim, A. E-R. S. Khder, *Palladium supported on mixed-metal/organic framework (Co/Mn-MOF-74) for efficient catalytic oxidation of CO*, RSC Adv., 2021, **11**:4318-26.
2. B. Z. S. Qureshi, E. A. Jaseer, *Silica-supported gold nanocatalyst for CO oxidation*, Publ., Febr. 13th. 2019.
3. A. N. Grace and K. Pandian, *One pot synthesis of polymer protected Pt, Pd, Ag and Ru nanoparticles and nanoprisms under reflux and microwave mode of heating in glycerol-A comparative study*, Mater. Chem. Phys., 2007, **104**:191-198.
4. P. S. Roy, J. Bagchi and S. K. Bhattacharya, *Size-controlled synthesis and characterization of polyvinyl alcohol coated palladium nanoparticles*, Transit. Met Chem., 2009, **34**:447-453.
5. Y. Nishihata, J. Mizuki, T. Akao, H. Tanaka, M. Uenishi, M. Kimura, T. Okamoto and N. Hanada, *Self-regeneration of a Pd-perovskite catalyst for automotive emissions control*, Nature, 2002, **418**:164-167.
6. N. S. Babu, N. Lingaiah, N. Pasha, J. V. Kumar, P. S. Sai Prasad, *Influence of particle size and nature of Pd species on the hydrodechlorination of chloroaromatics: Studies on Pd/TiO₂ catalysts in chlorobenzene conversion*, Catal. Today, 2009, **141**:120-124.
7. S. Ivanova and M. M. Tejada, *Special issue catalysis by precious metals, past and future*, Catalysts, 2020.
8. H. Li, Meiqing S. M. Shen, J. Wang, H. Wang, and J. Wang, *Effect of support on CO oxidation performance over the Pd/CeO₂ and Pd/CeO₂-ZrO₂ catalyst*, Ind. Eng. Chem. Res., 2020, **59**(4):1477-1486.
9. A. S. Ivanova, E. M. Slavinskaya, O. A. Stonkus, R. V. Gulyaev, T. S. Glazneva, A. S. Noskov and A. I. Boronin, *Highly active and durable Pd/Fe₂O₃ catalysts for wet CO oxidation under ambient conditions*, Catal. Sci. Technol., 2016, **6**:3918-3928.

10. S. Abbet, U. Heiz, H. Häkkinen, and U. Landman, *CO oxidation on a single Pd atom supported on magnesia*, Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:5950-5953.
11. K. Föttinger, W. Emhofer, D. Lennon, G. Rupprechter, *Adsorption and reaction of CO on (Pd-)Al₂O₃ and (Pd-)ZrO₂, vibrational spectroscopy of carbonate formation*, Top Catal, 2017, **60**:1722-1734.
12. K. Zorn, S. Giorgio, E. Halwax, C. R. Henry, H. Grönbeck, and G. Rupprechter, *CO oxidation on technological Pd-Al₂O₃ catalysts: Oxidation state and activity*, J. Phys. Chem. C., 2011, **115**(4):1103-1111.
13. K. Murata, E. Eleeda, J. Ohyama, Y. Yamamoto, S. Araid and A. Satsuma, *Identification of active sites in CO oxidation over a Pd/Al₂O₃ catalyst*, Phys. Chem., 2019, **21**:18128-18137.
14. A. Mvenezia, L. Fliotta, G. Pantaleo, VLa Parola, G. Deganello, Abeck, Zs. Koppány, K. Frey, D. Horváth, L. Guzcic, *Activity of SiO₂ supported gold-palladium catalysts in CO oxidation*, Applied Catalysis A: General, 2003, **251**(2):359-368.

SUMMARY

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF Pd/Al₂O₃/rGO NANOCOMPOSITE FOR ROOM - TEMPERATURE CARBON MONOXIDE OXIDATION

In this work, we present a report on preparing Pd/Al₂O₃/rGO nanocomposite by utilizing the co-precipitation method. SEM images show that highly dense Pd/Al₂O₃ nanoparticles are decorated on the graphene surface. The nanocomposite has a high surface area of 184.6 m²/g is confirmed by BET measurement. The crystal structure of the nanocomposite is also done by X-ray measurement. The catalytic performance of the nanocomposite for room - temperature CO oxidation is tested. The measured results demonstrated that the performance of room-temperature CO oxidation could be retained with low Pd content (2% w/w) by using rGO nanosheets as catalyst support.

Keywords: Room-temperature CO oxidation, nanoparticles, Pd/Al₂O₃, reduced graphene oxide (rGO).

Nhận bài ngày 14 tháng 7 năm 2022

Phản biện xong ngày 16 tháng 8 năm 2022

Hoàn thiện ngày 18 tháng 10 năm 2022

⁽¹⁾ Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Liên hệ: Nguyễn Văn Tú

Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội
Điện thoại: 0367129828; Email: tunv@ims.vast.ac.vn