

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทน
อัดด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา
ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ

Hydrogen Production from Compressed Bio-methane Gas
by Steam Reforming Process with
Alumina-supported Palladium Catalyst (Pd/Al₂O₃)
under Low Temperature Condition

ลักขมี พยัตติกุล*

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

กลยุทธ์ ปัญญาวิทย์ และพลฤกษ์ อักกะรังสี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Laksamee Payattikul*

Graduate School, Chiang Mai University, Huay Kaew Road, Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

Konlayutt Punyawudho and Pruk Aggarangsi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,

Huay Kaew Road, Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วยไอน้ำ (steam reforming process) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (400-600 °C) โดยจะแบ่งการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การสร้างระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) และขั้นตอนที่สอง คือ การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไบโอมีเทนอัด หรือ CBG (compressed bio-methane gas) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำด้วยระบบการผลิตที่สร้างขึ้นในขั้นแรก ซึ่งก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทดลองมาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : ann.laksamee@gmail.com

ของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 400-600 °C อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50-300 mL/min และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้เท่ากับ 0.5 กรัม จากการทดลองพบว่าก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งที่อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดเท่ากับ 50 mL/min อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 °C ให้สัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สูงสุดเท่ากับ 34.74 % โดยคิดเป็นผลได้ร้อยละ (% yield of H₂) เท่ากับ 10.72 % ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ และสามารถคำนวณร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) ที่สูงที่สุดในการทดลองได้เท่ากับ 58.29 %

คำสำคัญ : ก๊าซไฮโดรเจน; กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ; ก๊าซไบโอมีเทนอัด; แพลเลเดียม

Abstract

This research aimed to study the production of hydrogen from compressed bio-methane gas by steam reforming process under low temperature condition (400-600 °C). The study can be divided into 2 parts. The first part was creating a system in lab scale to produce hydrogen with a steam reforming process. This system is used fixed bed reactor. The second part was hydrogen production by steam reforming process under low temperature condition from system in first part. The production was used compressed bio-methane gas (CBG) from Energy Research and Development Institute – Nakornping, Chiang Mai University as a feedstock and alumina-supported palladium (Pd/Al₂O₃) as a catalyst. This will study the effects of temperature inside the reactor and the flow rate of compressed bio-methane gas in the reaction that affects the amount of hydrogen produced. The temperature in the reactor is in the range 400-600 °C, flow rate of compressed bio-methane gas used in experiments in the range 50-300 mL/min and the weight of the Pd/Al₂O₃ catalyst at 0.5 grams. The results had shown that hydrogen can be produced from compressed bio-methane gas by steam reforming process under low temperature conditions. The temperature inside the reactor and the flow rate of compressed bio-methane gas in the reaction can affect the amount of hydrogen produced. The maximum molar ratio of hydrogen gas at 34.74 % was achieved at compressed bio-methane gas flow rate of 50 mL/min and reactor temperature at 600 °C, representing percent yield of H₂ (% yield of H₂) equal to 10.72 % which is the appropriate condition tests in this experiment. The maximum of the percent conversion of methane (% CH₄ conversion) in the experiment were 58.29 %.

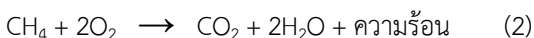
Keywords: hydrogen; steam reforming process; compressed bio-methane gas; palladium

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น รวมถึงมีการใช้พาหนะในการขนส่งอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ประเทศไทยมีแนวโน้มของความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งแหล่งพลังงานที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด คือ แหล่งพลังงานจากฟอสซิล (fossil fuel) ซึ่งใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าหาแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล โดยเชื้อเพลิงจากก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่เมื่อเผาไหม้แล้ว จะไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงเพื่อขับเคลื่อนรถยนต์หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้า [1] ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนั้นให้พลังงานต่อหน่วยน้ำหนัก (power density) สูงสุดในบรรดาเชื้อเพลิงทั้งหมด คือ ประมาณ 120 MJ/kg (เปรียบเทียบกับก๊าซมีเทนและแก๊สโซลีนที่มีค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 50 และ 44.4 MJ/kg ตามลำดับ) โดยการเผาไหม้ของก๊าซไฮโดรเจนในกรณีที่มีการเผาไหม้สมบูรณ์นั้น จะได้ผลผลิตเป็นน้ำและพลังงานความร้อนโดยไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 1 [2]



ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ของก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติที่เป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิล จะเห็นว่าได้ผลผลิตออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2

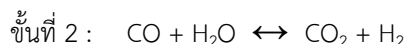
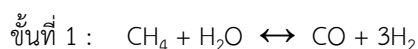


โดยกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (steam methane reforming process) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพสูงแต่เสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ โดยในปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ [1,3,4] เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซมีเทน อีกทั้งได้มีการนำก๊าซชีวภาพมาปรับปรุงคุณภาพจนมีปริมาณของก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า ก๊าซไบโอมีเทน (bio-methane gas) และในกรณีที่มีการอัดลงถึงเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ นิยมเรียกว่าก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG (compressed bio-methane gas) โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก๊าซ CBG นี้มีสมบัติเทียบเท่ากับก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ (NGV) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับรถยนต์ที่ใช้ก๊าซ NGV อีกทั้งยังสามารถใช้ทดแทนก๊าซ LPG และนอกจากนี้ก๊าซ CBG ยังสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งได้มีงานวิจัยของ พิมพรใจ และคณะ [5] ที่ใช้ก๊าซ CBG ไปผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ พบว่าได้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด 53.6 % โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีหลักการ คือ การป้อนไอน้ำ (steam, H_2O) เข้าสู่ระบบ เพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (CH_4) โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกดึงออกจากก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซมีเทนที่ป้อนเข้าไปในระบบ ส่วนออกซิเจนที่เหลือจากน้ำและคาร์บอนที่เหลือจากมีเทนจะรวมตัวกันเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) [6] โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

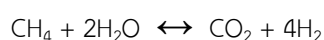
1.1 ปฏิกิริยา reforming ระหว่างก๊าซมีเทนกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูง (อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น

ของแข็งร่วมด้วย) เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังแสดงในสมการที่ 3

1.2 จากขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่ามีการคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดขึ้นร่วมด้วย ดังนั้นจะมีการนำ ไ



ดังนั้นจะได้สมการรวมของปฏิกิริยา คือ



น้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อีกครั้ง เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 4 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า water-gas shift reaction (WGS) [6]

$$\Delta H_{298\text{ K}} = 206 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (3)$$

$$\Delta H_{298\text{ K}} = -41 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta H_{298\text{ K}} = 165 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาสมการรวมของปฏิกิริยาข้างต้น (สมการที่ 5) พบว่าเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) ซึ่งจะใช้พลังงานค่อนข้างมากในการเกิดปฏิกิริยา โดยจำเป็นต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในปริมาณมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 700-1,000 องศาเซลเซียส จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาร่วมด้วย เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และถ้าหากสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้ ก็จะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการนี้ลดลงไปด้วย โดยได้มีงานวิจัยที่ได้ผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำโดยภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ [7-9] พบว่าก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้ผ่านกระบวนการนี้ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส และจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะทรานซิชัน (transition metal) จำพวกนิกเกิล (Ni) เนื่องจากมีราคาถูกและมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม หากนำไปเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะมีตระกูล (noble metal) เช่น โรเดียม (Rh) แพลเลเดียม (Pd) และแพลทินัม

(Pt) จะพบว่านิกเกิลนั้นมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่า และมีปัญหาการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (carbon formation) โดยได้มีการรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Rh, Pd, และ Pt ช่วยเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ Reforming และสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ [7]

โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วยไอน้ำ (steam reforming process) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al_2O_3) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (400-600 °C) และจะกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทน (CH_4) และไอน้ำ (H_2O) ที่ป้อนเข้าไปในระบบเท่ากับ 1:2 ($CH_4:H_2O = 1:2$) ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในสมการที่ 5 ซึ่งก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG ที่ใช้ในการทดลองมาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 81 % โดยก๊าซองค์ประกอบของ CBG ในส่วนที่เหลือคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2) โดยในการทดลองนี้จะสร้างระบบการผลิตในระดับ lab scale เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัด

ด้วยไอน้ำ และศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่เข้าทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 400-600 °C อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50-300 mL/min และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้เท่ากับ 0.5 กรัม

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การสร้างระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale

2.1.1 อุปกรณ์ในระบบการผลิต

(1) pressure regulator ทำหน้าที่ลดความดันจากถังเก็บ CBG

(2) digital flow meter ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ของก๊าซ CBG

(3) temperature controller ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของ humidifier, insulator heater tape และ mixing chamber

(4) humidifier หรือเครื่องทำความชื้น ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ภายใน ทำให้เกิดเป็นไอน้ำ และเมื่อก๊าซ CBG ไหลมารวมตัวกับไอน้ำที่อยู่ภายใน humidifier จะได้ก๊าซผสมที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา

(5) insulator heater tape หรืออุปกรณ์ให้ความร้อนที่หุ้มฉนวน ในที่นี้ฉนวนที่ใช้ คือ ฉนวนใยแก้วและฉนวนโฟม

(6) humidity and temperature transmitter (Series HMT330, Vaisala, Finland) หรือเครื่องบันทึกค่าความชื้นและอุณหภูมิรวมไปถึงค่า mixing ratio (X) ของก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซ

CBG ที่อยู่ภายใน insulator heater tape

(7) mixing chamber หรือถังผสม ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ไอน้ำที่อยู่ในก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามาเกิดการควบแน่น

(8) vertical split tube furnace (เตาเผาหลอดแก้วแบบเปิด) ชนิด electrical heater ซึ่งเตาเผา นี้ จะบรรจุ catalytic reactor ไว้ภายใน โดยมี PID digital temperature with step controller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ

(9) fixed bed catalytic reactor หรือเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบดนิ่ง ซึ่งอยู่ภายใน vertical split tube furnace โดย catalytic reactor นั้นจะเป็นหลอดแก้ว quartz ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร ที่บรรจุ quartz wool และตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายใน

(10) ชุดหล่อเย็น ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจาก catalytic reactor ซึ่งจะประกอบไปด้วยชุด condenser และ chiller

(11) ในแต่ละอุปกรณ์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยท่อที่ทำจาก stainless steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร

2.1.2 การดำเนินการสร้างระบบการผลิตในระดับ lab scale

ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะถูกสร้างตามแผนภาพดังที่แสดงในรูปที่ 1

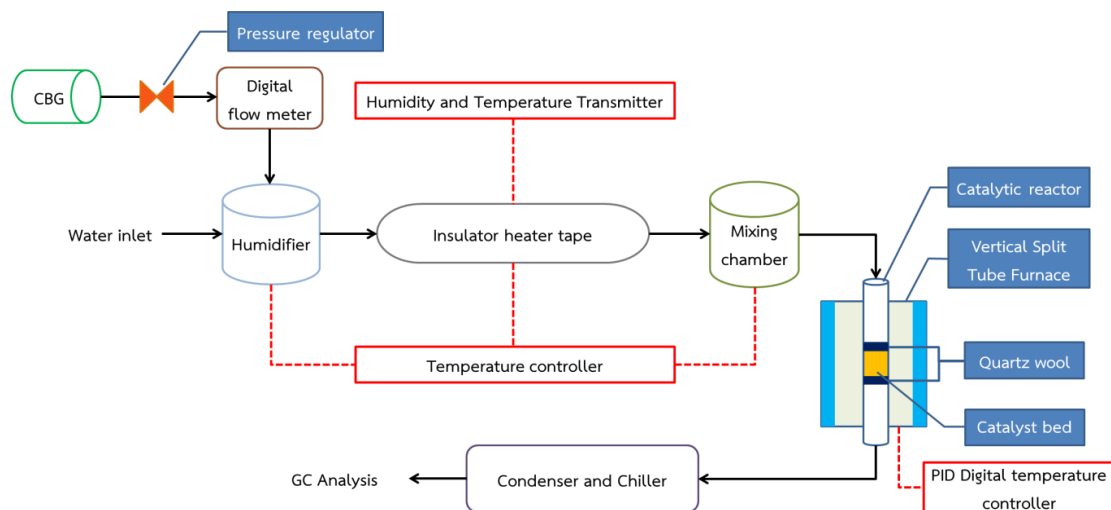
2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ

2.2.1 วัสดุและสารเคมี

(1) ก๊าซไบโอมีเทนอัด หรือ CBG (compressed bio-methane gas) จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดย CBG มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH₄) เท่ากับ 81 %

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (5 % Pd on alumina powder, Pd/Al₂O₃, Premetek, United States)

(3) quartz wool (fine grade, Tosoh, Japan) จะเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ที่ทำหน้าที่รองรับเบตตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 1 แผนภาพระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ

(4) ถุงเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ ขนาด 17.8 × 17.8 เซนติเมตร ความจุ 1 ลิตร (multi-layer gas sample bag, Restek, United States)

2.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำที่สร้างขึ้น

(2) เครื่อง gas chromatography (GC 7890A, Agilent technologies, United States) เพื่อใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์

2.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบบการผลิตที่สร้างขึ้น

ในการทดลองนี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไบโอมีเทนอัด (CBG) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำด้วยระบบการผลิตที่สร้างขึ้น ซึ่งจะศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ

ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยในการทดลองมีขั้นตอน ดังนี้

(1) ตั้งค่าอุณหภูมิของ insulator heater tape และ mixing chamber ไว้ที่ 110 °C และอุณหภูมิของ humidifier จะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 88-92 °C

(2) ปล่อยก๊าซ CBG เข้าสู่ระบบ โดย CBG จะผ่าน pressure regulator เพื่อลดความดันโดยลดความดันให้เหลือ 4 bar แล้วปรับตั้งค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ของ CBG ผ่าน digital flow meter โดยในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของ CBG เท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/min ตามลำดับ

(3) อ่านค่า mixing ratio (X) ของก๊าซผสมผ่านทางเครื่อง humidity and temperature transmitter โดยค่า mixing ratio ที่ต้องการใช้ในการ

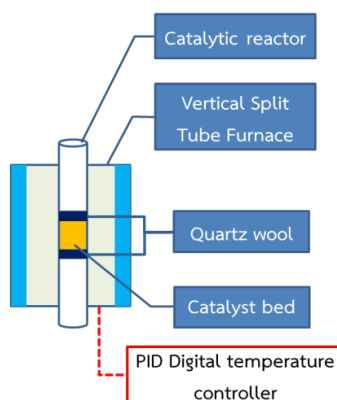
ทดลองนี้ต้องมากกว่า 1008 g H₂O/kg CBG ซึ่งได้มาจากการกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทน (CH₄) และไอน้ำ (H₂O) ที่ป้อนเข้าไปในระบบเท่ากับ 1:2 (CH₄:H₂O = 1:2) ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในสมการที่ 5 โดยค่า 1008 ได้มาจากการคำนวณจากสมการที่ 6

$$\text{Mixing ratio (X)} = \frac{\text{Mass of water (g)}}{\text{Mass of dry air (kg)}} \quad (6)$$

โดยค่า mixing ratio ในการทดลองนี้คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) ของไอน้ำและอัตราการไหลเชิงมวลของ CBG และในการควบคุมค่า mixing ratio ให้ได้ตามความต้องการนั้นจะควบคุมผ่านทาง humidifier temperature controller อุณหภูมิของ humidifier จะแปรผันตรงกับค่า mixing ratio โดยในการทดลองนี้ อุณหภูมิของ humidifier จะควบคุมให้อยู่ในช่วง 88-92 °C

(4) ก๊าซผสมจะไหลไปยัง mixing chamber ที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ 110 °C เพื่อป้องกันไอน้ำที่ไหลผ่านเข้ามาเกิดการควบแน่น จากนั้นก๊าซผสมจะไหลเข้าสู่ fixed bed catalytic reactor ที่มี quartz wool และตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ น้ำหนัก 0.5 กรัม บรรจุอยู่ภายใน เพื่อให้ก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง catalytic reactor นี้จะอยู่ภายใน vertical split tube furnace ที่มี PID digital temperature controller เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยจะควบคุมอุณหภูมิของ reactor

ให้เป็นไปตามที่กำหนดในการทดลอง คือ 400, 500 และ 600 °C ตามลำดับ



รูปที่ 2 แผนภาพ fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace

(5) ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจาก reactor จะถูกส่งไปยังชุดหล่อเย็นก่อน เพื่อให้ก๊าซผลิตภัณฑ์เย็นลงและดักจับไอน้ำที่อาจจะเหลือออกมาจากปฏิกิริยา จากนั้นจะเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ใส่ถุงเก็บ โดยใช้เวลาในการเก็บก๊าซ 3 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography

2.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์หาผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลอง (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) โดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้ [4,8]

$$\% \text{ yield of H}_2 = \frac{\text{mole of H}_2 \text{ obtained}}{4 \times \text{mole of CH}_4 \text{ initial}} \times 100 \quad (7)$$

$$\% \text{ CH}_4 \text{ conversion} = \frac{(\text{mole of CH}_4 \text{ initial} - \text{mole of CH}_4 \text{ remained})}{\text{mole of CH}_4 \text{ initial}} \times 100 \quad (8)$$

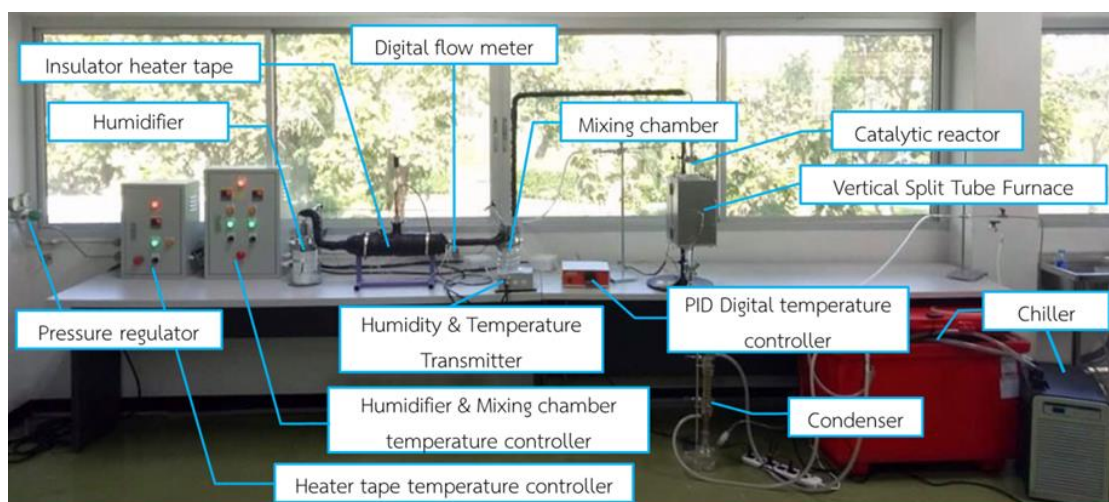
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale

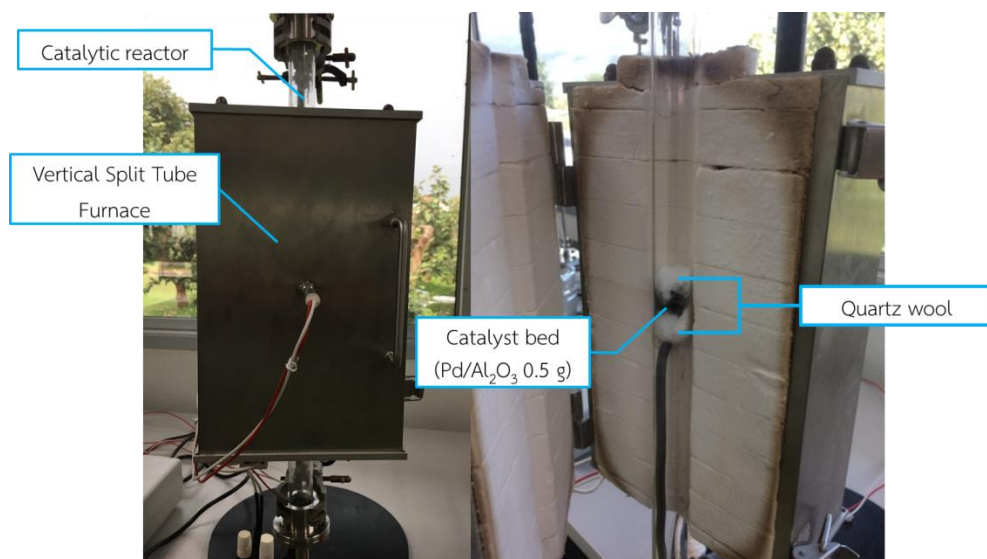
ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำจะถูกสร้างตามแผนภาพดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดยเมื่อต่ออุปกรณ์แต่ละชนิดเข้าด้วยกันแล้ว จะได้ชุดทดสอบซึ่งเป็นระบบการผลิตก๊าซ

ไฮโดรเจนในระดับ lab scale ดังที่แสดงในรูปที่ 3

โดยในส่วนของ fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace นั้นจะบรรจุ quartz wool และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา ($\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$) อยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale



รูปที่ 4 fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace

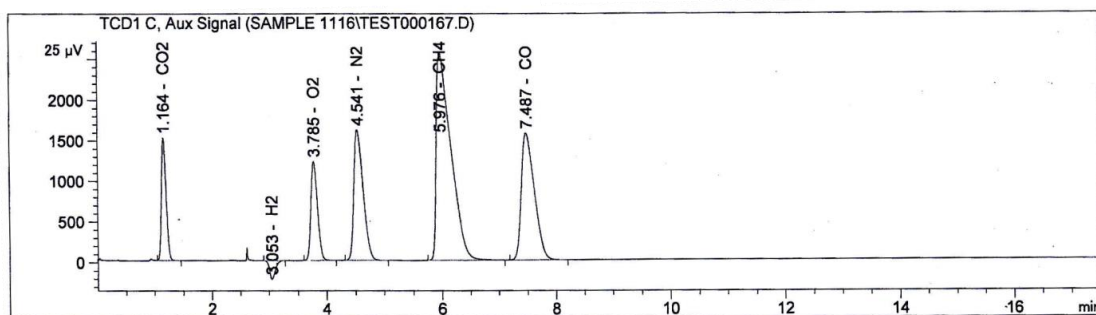
3.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ระบบการผลิตที่สร้างขึ้น

ในการทดลองนี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไบโอมีเทนอัด (CBG) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำด้วยระบบการผลิตที่สร้างขึ้น ซึ่งจะศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยก่อนการทดลองจะนำก๊าซ CBG ไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography เพื่อดูสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) ที่ป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นจะทดลอง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400, 500 และ 600 °C อัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/min ตามลำดับ และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ใช้เท่ากับ

0.5 กรัม จากนั้นจะนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography โดยตัวอย่างของ chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซไบโอมีเทนอัด (compressed bio-methane gas, CBG) ที่ใช้ในการทดลอง

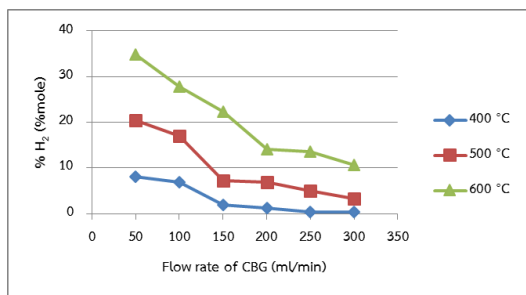
องค์ประกอบของก๊าซ CBG	สัดส่วนโดยโมล (% mole)
CH_4	80.98
CO	-
CO_2	10.33
O_2	1.62
N_2	7.08
H_2	-
Totals	100



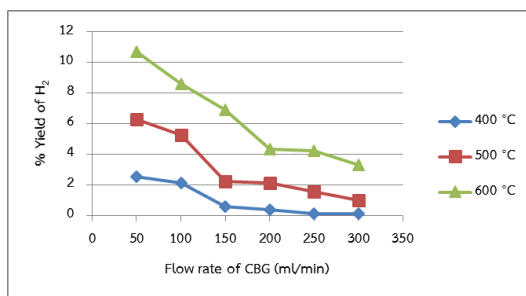
รูปที่ 5 ตัวอย่าง chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์

3.2.1 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองจากการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography พบว่าก๊าซผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซมีเทน

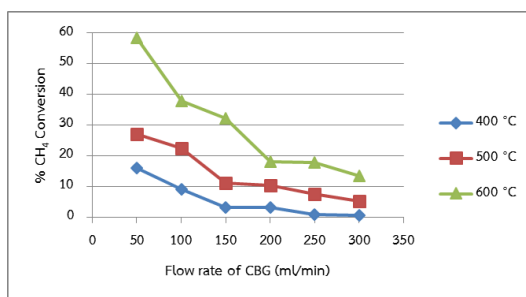
(CH_4) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยเมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) สามารถนำไปเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน ได้ดังนี้



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และสัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ



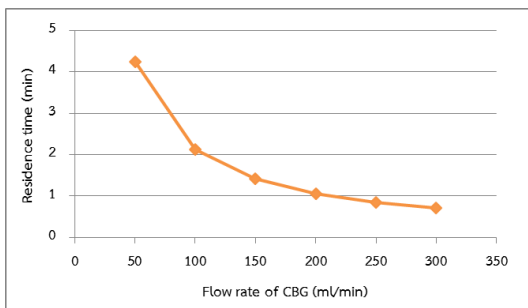
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทนในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

และจากการทดลองจะคำนวณหาผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจน (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) จากสมการที่ 7 และสมการที่ 8 ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% conversion of CH₄) ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของ CBG จะได้ก๊าซไฮโดรเจนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง และเมื่อพิจารณาในส่วนของผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% conversion of CH₄) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7 และ 8 พบว่ามีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่ออัตราการไหลของ CBG เพิ่มขึ้น ผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% conversion of CH₄) กลับมีค่าลดน้อยลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kolbitsch และคณะ [4] และ Fernandes และ Soares [10] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการไหลของ CBG มีผลต่อระยะเวลาที่สารตั้งต้น (ในที่นี้ คือ ก๊าซผสมระหว่าง CBG กับไอน้ำ) อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ หรือ residence time ซึ่งค่า residence time นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 [1]

$$\text{residence time} = \frac{\text{ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้น}} \quad (9)$$

โดยค่า residence time ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของ CBG และ residence time ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และระยะเวลาของสารตั้งต้นที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time)

จากกราฟในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของ CBG มีความแปรผกผันกับ residence time โดยเมื่ออัตราการไหลมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่า residence time เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า residence time คือ ระยะเวลาของสารตั้งต้นที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นหากอัตราการไหลของก๊าซที่เข้ามายังเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อย จะทำให้ก๊าซผสมระหว่าง CBG และไอน้ำที่เป็นสารตั้งต้นมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น ทำให้สารตั้งต้นมีโอกาสไปสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดพลังงานกระตุ้น (activated energy) ของปฏิกิริยาให้น้อยลง ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้สารตั้งต้นมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลของ CBG เท่ากับ 50 ml/min ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่อง

ปฏิกรณ์จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kolbitsch และคณะ [4] พิมพ์ใจ และคณะ [5] Angelia และคณะ [8] และ Scott และคณะ [9] เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (steam reforming process) นี้ถือเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) ดังแสดงในสมการที่ 5 โดยปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนนี้ อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหากอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลสารตั้งต้นเดิมแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยากันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าอุณหภูมิ 400 และ 500 °C

และเมื่อพิจารณาส่วนกันระหว่างอัตราการไหลของ CBG และอุณหภูมิที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และลดอัตราการไหลของ CBG จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 โดยที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 °C และที่อัตราการไหลของ CBG เท่ากับ 50 ml/min จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ 34.74 % และสามารถคำนวณผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H_2) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% conversion of CH_4) ได้เท่ากับ 10.72 และ

58.29 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ ที่อัตราการไหลของ CBG ที่มีค่ามาก คือ 200, 250 และ 300 ml/min ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณค่อนข้างน้อยและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิ 400 °C ถือเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำสำหรับปฏิกิริยาของกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำที่ต้องใช้ความร้อนช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยา ซึ่งหากพิจารณาที่อัตราการไหลที่ต่ำลงมา คือ 50, 100 และ 150 ml/min จะเห็นว่าได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอัตราการไหลของ CBG ที่ลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าหากต้องการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (steam reforming process) โดยใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ จำเป็นจะต้องลดอัตราการไหลของสารตั้งต้นให้ลดลงเพื่อเพิ่ม residence time ซึ่งจะส่งผลให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น และในส่วนของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนั้น สามารถกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al_2O_3 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซโบไมเทนอัดด้วยไอน้ำได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิมพ์ใจ และคณะ [5] และ Izquierdo และคณะ [11] ที่ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al_2O_3 ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการ steam reforming ภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วง 700-900 °C โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al_2O_3 สามารถเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

4. สรุป

ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) สามารถผลิตได้จากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซโบไมเทนอัด (CBG) ด้วย

ไอน้ำหรือ steam reforming process ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำในช่วง 400-600 °C โดยใช้ระบบการผลิตในระดับ lab scale ที่สร้างขึ้นและใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของ CBG และลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง ซึ่งที่อัตราการไหลของก๊าซโบไมเทนอัดเท่ากับ 50 ml/min อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 °C ถือเป็นค่าอัตราการไหลและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยจะให้สัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุดเท่ากับ 34.74 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากโบไมเทนโดยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

6. รายการอ้างอิง

- [1] ไกรฤทธิ นิลคุหา, มยุรพันธุ์ สัจจกุลนุกิจ, เดโช จันทร์หอม, ทรงศักดิ์ มธุรพจน์, กฤษณา สวนจันทร์, พีรยา ศิริพุด และธงชัย ศรีนพคุณ, 2553. การพัฒนาระบบผลิตพลังงานไฮโดรเจนจากแหล่งพลังงานทดแทนโดยเทคนิค Steam Reformation, วิศวกรรมสาร มก. 72(23): 30-38.
- [2] นิสิต ตันทวิเชษฐ, 2553. เทคโนโลยีผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สะอาดและยั่งยืน Water Electro-

- lysis, ว.ส่งเสริมเทคโนโลยี 36(209): 59-62.
- [3] Effendi, A., Hellgardt, K., Zhang, Z.G. and Yoshida, T., 2005, Optimizing H_2 production from model biogas via combined steam reforming and CO shift reactions, Fuel 84: 869-874.
- [4] Kolbitsch, P., Pfeifer, C. and Hofbauer, H., 2008, Catalytic steam reforming of model biogas, Fuel 87: 701-706.
- [5] พิมพ์ใจ ชัยนรนนท์, 2558. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนโดยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 83 น.
- [6] รัชนิกร วันจันทิก, 2554. ก๊าซไฮโดรเจน : ความคาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน, ว.วิทยาศาสตร์บูรพา 16(1): 131-140.
- [7] Halabi, M.H., de Croon, M.H.J.M., van der Schaaf, J., Cobden, P.D. and Schouten, J.C., 2010, Low temperature catalytic methane steam reforming over ceria-zirconia supported rhodium, Appl. Catalys. A Gen. 389: 68-79.
- [8] Angeli, S.D., Turchetti, L., Monteleone, G. and Lemonidou, A.A., 2016, Catalyst development for steam reforming of methane and model biogas at low temperature, Appl. Catalys. B Environ. 181: 34-46.
- [9] TengKho, E., Scott, J. and Amal, R., 2016, Ni/TiO₂ for low temperature steam reforming of methane, Chem. Eng. Sci. 140: 161-170.
- [10] Fernandes, F.A.N and Soares, A.B.Jr., 2006, Modeling of Methane Steam Reforming in a Palladium Membrane Reactor, Departamento de Engenharia Quimica, Universidade Federal do Ceara.
- [11] Izquierdo, U., Barrio, V.L, Cambra, J.F., Requies, J., Guemez, M.B., Arias, P.L., Kolb, G., Zapf, R., Gutierrez, A.M. and Arraibi, J.R., 2012, Hydrogen production from methane and natural gas steam reforming in conventional and micro reactor reaction systems, Int. J. Hydrogen Energy 37: 7026-7033.