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

ลักษมี พยัตติกุล*

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200 กลยุทธ ปัญญาวุธโธ และพฤกษ์ 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 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก ก๊าซไบโอมีเทนอัด หรือ CBG (compressed bio-methane gas) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำด้วยระบบการผลิตที่ สร้างขึ้นในขั้นแรก ซึ่งก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทดลองมาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาผลกระทบ ของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : ann.laksamee@gmail.com

doi: 10.14456/tstj.2017.74

ของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 400-600 °C อัตราการไหลของก๊าซไบโอ มีเทนอัดที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 50-300 ml/min และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้เท่ากับ 0.5 กรัม จากการทดลองพบว่าก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วยไอน้ำ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งที่อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดเท่ากับ 50 ml/min อุณหภูมิภายในเครื่อง ปฏิกรณ์เท่ากับ 600 °C ให้สัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุดเท่ากับ 34.74 % โดยคิดเป็นผลได้ร้อยละ (% yield of H₂) เท่ากับ 10.72 % ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ และสามารถคำนวณร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) ที่สูงที่สุดในการ ทดลองได้เท่ากับ 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 stream 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 biomethane 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 biomethane 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 H_2 (% yield of H_2) equal to 10.72 % which is the appropriate condition tests in this experiment. The maximum of the percent conversion of methane (% CH_4 conversion) in the experiment were 58.29 %.

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

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาด้าน อุตสาหกรรมมากขึ้น รวมถึงมีการใช้พาหนะในการ ขนส่งอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ประเทศไทยมีแนวโน้ม ของความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่ง แหล่งพลังงานที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด คือ แหล่งพลังงาน จากฟอสซิล (fossil fuel) ซึ่งใช้แล้วหมดไป นอกจาก ขั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดก๊าซ เรือนกระจก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นปัญหา สำคัญในปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าหาแหล่ง พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล โดยเชื้อเพลิง จากก๊าซไฮโดรเจน (H₂) เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ ได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย เนื่องจากก๊าซ ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่เมื่อเผาไหม้แล้ว จะไม่เกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงเพื่อ ขับเคลื่อนรถยนต์หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงผ่านเซลล์ เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิต ไฟฟ้า [1] ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนั้นให้พลังงานต่อหน่วย น้ำหนัก (power density) สูงสุดในบรรดาเชื้อเพลิง ์ทั้งหมด คือ ประมาณ 120 MJ/kg (เปรียบเทียบกับ ก๊าซมีเทนและแก๊สโซลีนที่มีค่าพลังงานต่อหน่วย น้ำหนักเท่ากับ 50 และ 44.4 MJ/kg ตามลำดับ) โดย การเผาไหม้ของก๊าซไฮโดรเจนในกรณีที่การเผาไหม้ สมบูรณ์นั้น จะได้ผลผลิตเป็นน้ำและพลังงานความร้อน

โดยไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 1 [2] 2H₂ + O₂ → 2H₂O + ความร้อน (1)

ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ของ ก๊าซมีเทน (CH₄) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซ ธรรมชาติที่เป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิล จะเห็นว่าได้ผล ผลิตออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย ดัง แสดงในสมการที่ 2

CH₄ + 2O₂ → CO₂ + 2H₂O + ความร้อน (2)

โดยกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นที่ ้นิยมมากที่สุด คือ กระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทน ด้วยไอน้ำ (steam methane reforming process) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ สูงแต่เสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ โดยในปัจจุบันได้เริ่มมี การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ [1,3, 41 เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซ มีเทน อีกทั้งได้มีการนำก๊าซชีวภาพมาปรับปรุงคุณภาพ จนมีปริมาณของก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า ก๊าซ ไบโอมีเทน (bio-methane gas) และในกรณีที่มีการ อัดลงถังเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ นิยม เรียกว่าก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG (compressed bio-methane gas) โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา พลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ศึกษาและ พัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก๊าซ CBG นี้มีสมบัติเทียบเท่า กับก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ (NGV) สามารถ นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับรถยนต์ที่ใช้ก๊าซ NGV อีกทั้งยังสามารถใช้ทดแทนก๊าซ LPG และ นอกจากนี้ก๊าซ CBG ยังสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นก๊าซ ไฮโดรเจน ซึ่งได้มีงานวิจัยของ พิมพรใจ และคณะ [5] ที่ใช้ก๊าซ CBG ไปผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวน การเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ พบว่าได้ปริมาณของก๊าซ ไฮโดรเจนสูงสุด 53.6 % โดยกระบวนการเปลี่ยนรูป ก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีหลักการ คือ การป้อนไอน้ำ (steam, H₂O) เข้าสู่ระบบ เพื่อทำ ปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (CH4) โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูก ดึงออกจากก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซมีเทนที่ ้ป้อนเข้าไปในระบบ ส่วนออกซิเจนที่เหลือจากน้ำและ คาร์บอนที่เหลือจากมีเทบจะรวมตัวกับเป็นก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) [6] โดยกระบวนการนี้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

1.1 ปฏิกิริยา reforming ระหว่างก๊าซมีเทนกับ ไอน้ำที่อุณหภูมิสูง (อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น ของแข็งร่วมด้วย) เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ดัง แสดงในสมการที่ 3

 1.2 จากขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่ามีก๊าซคาร์บอน-มอนอกไซด์ (CO) เกิดขึ้นร่วมด้วย ดังนั้นจะมีการนำ ไอ

> ขั้นที่ 1 : $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ ขั้นที่ 2 : $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ดังนั้นจะได้สมการรวมของปฏิกิริยา คือ $CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$

เมื่อพิจารณาสมการรวมของปฏิกิริยาข้างต้น (สมการที่ 5) พบว่าเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) ซึ่งจะใช้พลังงานค่อนข้างมากในการ เกิดปฏิกิริยา โดยจำเป็นต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในปริมาณมาก ซึ่งส่วน ใหญ่จะใช้อณหภูมิสงถึงประมาณ 700-1,000 องศา เซลเซียส จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ต้นทุนในการ ผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็น ้อย่างยิ่งที่จะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาร่วมด้วย เพื่อ เพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และถ้าหากสามารถ ลดอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงได้ ก็จะส่งผลให้ ต้นทุนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการนี้ ลดลงไปด้วย โดยได้มีงานวิจัยที่ได้ผลิตก๊าซไฮโดรเจน ้ผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำโดย ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ [7-9] พบว่าก๊าซไฮโดรเจน สามารถผลิตได้ผ่านกระบวนการนี้ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส และจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม ด้วย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะ ทรานซิชัน (transition metal) จำพวกนิกเกิล (Ni) เนื่องจากมีราคาถูกและมีความว่องไวในการเร่ง ปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม หากนำไปเปรียบเทียบกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะมีตระกูล (noble metal) เช่น โรเดียม (Rh) แพลเลเดียม (Pd) และแพลทินัม

น้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อีก ครั้ง เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการ ที่ 4 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า water-gas shift reaction (WGS) [6]

$$\Delta H_{298 \, \text{K}} = 206 \, \text{kJ mol}^{-1} \tag{3}$$

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

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

(Pt) จะพบว่านิกเกิลนั้นมีความว่องไวในการเร่ง ปฏิกิริยาต่ำกว่า และมีปัญหาการเกิดคาร์บอนบน พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (carbon formation) โดย ได้มีการรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Rh, Pd, และ Pt ช่วยเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ Reforming และสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนบน พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ [7]

โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาระบบการผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัด ด้วยไอน้ำ (steam reforming process) โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา(Pd/Al₂O₃) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (400-600 °C) และจะ กำหนดอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทน (CH₄) และ ไอน้ำ (H₂O) ที่ป้อนเข้าไปในระบบเท่ากับ 1:2 (CH₄: H₂O = 1:2) ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงใน สมการที่ 5 ซึ่งก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG ที่ใช้ในการ ทดลองมาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 81 % โดยก๊าซองค์ประกอบของ CBG ในส่วนที่เหลือ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ก๊าซไนโตรเจน (N2) และก๊าซออกซิเจน (O2) โดยในการทดลองนี้จะสร้าง ระบบการผลิตในระดับ lab scale เพื่อผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัด

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ด้วยไอน้ำ และศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยาและอัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่เข้าทำ ปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 400-600 ℃ อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการ ทดลองอยู่ในช่วง 50-300 ml/min และน้ำหนักของ ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้เท่ากับ 0.5 กรัม

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การสร้างระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale

2.1.1 อุปกรณ์ในระบบการผลิต

(1) pressure regulator ทำหน้าที่ลด ความดันจากถังเก็บ CBG

(2) digital flow meter ทำหน้าที่ ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ของก๊าซ CBG

(3) temperature controller ทำ า หน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของ humidifier, insulator heater tape และ mixing chamber

(4) humidifier หรือเครื่องทำความ
 ชื้น ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ภายใน ทำให้
 เกิดเป็นไอน้ำ และเมื่อก๊าซ CBG ไหลมารวมตัวกับ
 ไอน้ำที่อยู่ภายใน humidifier จะได้ก๊าซผสมที่
 เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา

(5) insulator heater tape หรื อ อุปกรณ์ให้ความร้อนที่หุ้มฉนวน 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 ทำ หน้าที่ป้องกันไม่ให้ไอน้ำที่อยู่ในก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามา เกิดการควบแน่น

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

(9) fixed bed catalytic reactor หรือเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบดนิ่ง ซึ่งอยู่ ภายใน vertical split tube furnace โดย catalytic reactor นั้นจะเป็นหลอดแก้ว quartz ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร ที่บรรจุ quartz wool และตัวเร่ง ปฏิกิริยาอยู่ภายใน

(10) ชุดหล่อเย็นก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ ออกมาจาก catalytic reactor ซึ่งจะประกอบไปด้วย ชุด condenser และ chiller

(11) ในแต่ละอุปกรณ์จะถูกเชื่อมต่อกัน ด้วยท่อที่ทำจาก stainless steel ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร

2.1.2 การดำเนินการสร้างระบบการผลิต ในระดับ lab scale

ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะถูก สร้างตามแผนภาพดังที่แสดงในรูปที่ 1

2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการ เปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ

2.2.1 วัสดุและสารเคมี

 (1) ก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ CBG
 (com-pressed bio-methane gas) จากสถาบันวิจัย และพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดย CBG มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH₄) เท่ากับ 81 % (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัว รองรับอะลูมินา (5 % Pd on alumina powder, Pd/Al₂O₃, Premetek, United States) (3) quartz wool (fine grade, Tosoh, Japan) จะเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ที่ ทำหน้าที่รองรับเบดตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 1 แผนภาพระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ

ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยในการทดลอง มีขั้นตอน ดังนี้

(1) ตั้งค่าอุณหภูมิของ insulator heater tape และ mixing chamber ไว้ที่ 110 ℃ และอุณหภูมิของ humidifier จะถูกควบคุมให้อยู่ ในช่วง 88-92 ℃

(2) ปล่อยก๊าซ CBG เข้าสู่ระบบ โดย CBG จะผ่าน pressure regulator เพื่อลดความดัน โดยลดความดันให้เหลือ 4 bar แล้วปรับตั้งค่าอัตรา การไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ของ CBG ผ่าน digital flow meter โดยในการทดลองจะ ปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของ CBG เท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/min ตามลำดับ

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

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

2.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำที่สร้างขึ้นมา

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

2.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบบ การผลิตที่สร้างขึ้น

ในการทดลองนี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากก๊าซไบโอมีเทนอัด (CBG) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ ต่ำด้วยระบบการผลิตที่สร้างขึ้น ซึ่งจะศึกษาผลกระทบ ของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหล ของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ ทดลองนี้ต้องมากกว่า 1008 g H₂O/kg CBG ซึ่งได้มา จากการกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทน (CH₄) และไอน้ำ (H₂O) ที่ป้อนเข้าไปในระบบเท่ากับ 1:2 (CH₄:H₂O = 1:2) ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาที่แสดง ในสมการที่ 5 โดยค่า 1008 ได้มาจากการคำนวณจาก สมการที่ 6

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

โดยค่า mixing ratio ในการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) ของไอน้ำและอัตราการไหลเชิงมวลของ CBG และในการควบคุมค่า mixing ratio ให้ได้ตาม ความต้องการนั้นจะควบคุมผ่านทาง humidifier temperature controller อุณหภูมิของ humidifier จะแปรผันตรงกับค่า mixing ratio โดยในการทดลองนี้ อุณหภูมิของ humidifier จะควบคุมให้อยู่ในช่วง 88-92 ℃

(4) ก๊าซผสมจะไหลไปยัง mixing chamber ที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ 110 ℃ เพื่อป้องกันไอน้ำ ที่ใหลผ่านเข้ามาเกิดการควบแน่น จากนั้นก๊าซผสมจะ ไหลเข้าสู่ fixed bed catalytic reactor ที่มี quartz wool และตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ น้ำหนัก 0.5 กรัม บรรจุอยู่ภายใน เพื่อให้ก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามาทำ ปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง catalytic reactor นี้ จะอยู่ภายใน vertical split tube furnace ที่มี PID digital temperature controller เป็นอุปกรณ์ ควบคุมอุณหภูมิโดยจะควบคุมอุณหภูมิของ reactor ให้เป็นไปตามที่กำหนดในการทดลอง คือ 400, 500 และ 600 ℃ ตามลำดับ



ร**ูปที่ 2** แผนภาพ fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace

(5) ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจาก reactor จะถูกส่งไปยังชุดหล่อเย็นก่อน เพื่อทำให้ก๊าซ ผลิตภัณฑ์เย็นลงและดักจับไอน้ำที่อาจจะเหลือออกมา จากปฏิกิริยา จากนั้นจะเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ใส่ถุงเก็บ โดยใช้เวลาในการเก็บก๊าซ 3 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography 2.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์หาผลได้ ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลอง (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) โดยมีสมการที่ใช้ ในการคำนวณ ดังนี้ [4,8]

% yield of
$$H_2 = \frac{\text{mole of } H_2 \text{ obtained}}{4 \times \text{mole of } CH_4 \text{ initial}} \times 100$$
 (7)
% $CH_4 \text{ conversion} = \frac{(\text{mole of } CH_4 \text{ initial} - \text{mole of } CH_4 \text{ remained})}{\text{mole of } CH_4 \text{ initial}} \times 100$ (8)

ไฮโดรเจนในระดับ lab scale ดังที่แสดงในรูปที่ 3 โดยในส่วนของ fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace นั้นจะบรรจุ quartz wool และตัวเร่งปฏิกิริยา แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) อยู่ ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale

ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวน การเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำจะถูกสร้างตามแผนภาพดังที่ แสดงในรูปที่ 1 โดยเมื่อต่ออุปกรณ์แต่ละชนิดเข้า ด้วยกันแล้ว จะได้ชุดทดสอบซึ่งเป็นระบบการผลิตก๊าซ



รูปที่ 3 ระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับ lab scale



รูปที่ 4 fixed bed catalytic reactor ที่อยู่ภายใน vertical split tube furnace

3.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการ เปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำโดยใช้ ระบบการผลิตที่สร้างขึ้น

ในการทดลองนี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก ก๊าซไบโอมีเทนอัด (CBG) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ ด้วยระบบการผลิตที่สร้างขึ้น ซึ่งจะศึกษาผลกระทบ ของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการไหล ของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณ ของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยก่อนการทดลองจะนำ ก๊าซ CBG ไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography เพื่อดูสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH₄) ที่ป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดง ในตารางที่ 1 จากนั้นจะทดลอง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ใน เครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400, 500 และ 600 ℃ อัตรา การไหลของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/min ตามลำดับ และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้เท่ากับ 0.5 กรัม จากนั้นจะนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography โดย ตัวอย่างของ chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ จะแสดงในรูปที่ 5

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

องค์ประกอบของก๊าซ CBG	สัดส่วนโดยโมล (% mole)	
CH4	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 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง จากการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ ทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography พบว่าก๊าซผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบ คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ก๊าซออกซิเจน (O₅) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยเมื่อ
 พิจารณาในส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจน
 (H₂) สามารถนำไปเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์
 ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และอุณหภูมิในถัง
 ปฏิกรณ์ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน ได้
 ดังนี้

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี







ร**ูปที่ 7** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา การไหลของก๊าซ CBG และผลได้ร้อยละ ของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในแต่ละช่วง อุณหภูมิ



ร**ูปที่ 8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา การไหลของก๊าซ CBG และร้อยละการ เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทนใน แต่ละช่วงอุณหภูมิ

และจากการทดลองจะคำนวณหา ผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจน (% yield of H₂)

และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% CH₄ conversion) จากสมการที่ 7 และสมการที่ 8 ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความ สัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG และผลได้ ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของ ก๊าซ CBG และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของ ก๊าซมีเทน (% conversion of CH₄) ในแต่ละช่วง อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม อัตราการไหลของ CBG จะได้ก๊าซไฮโดรเจนออกมา เป็นผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง และเมื่อพิจารณาในส่วนของ ผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% vield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซ มีเทน (% conversion of CH₄) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7 และ 8 พบว่ามีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่ออัตรา การไหลของ CBG เพิ่มขึ้น ผลได้ร้อยละของก๊าซ ไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และร้อยละการ เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซมีเทน (% conversion of CH₁) กลับมีค่าลดน้อยลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Kolbitsch และคณะ [4] และ Fernandes และ Soares [10] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการไหลของ CBG มีผลต่อระยะเวลาที่สารตั้งต้น (ในที่นี้ คือ ก๊าซ ผสมระหว่าง CBG กับไอน้ำ) อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ หรือ residence time ซึ่งค่า residence time นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 [1]

residence time = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้น โดยค่า residence time ที่ได้จากการ

คำนวณจะแสดงในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการไหลของ CBG และ residence time ในรูปที่ 9

ปีที่ 25 ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม 2560

ปฏิกรณ์จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็น ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kolbitsch และคณะ [4] พิมพรใจ และคณะ [5] Angelia และคณะ [8] และ Scott และคณะ [9] เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการเปลี่ยน รูปด้วยไอน้ำ (steam reforming process) นี้ถือเป็น ปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) ดังแสดง ในสมการที่ 5 โดยปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนนี้ อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหาก ้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นเกิดการ สลายตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ยิ่งเพิ่ม อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้นจะทำให้โมเลกุล สารตั้งต้นเดิมแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ มากขึ้น สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยากันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมาก ขึ้น ซึ่งจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 ℃ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ สูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂)

เป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าอุณหภูมิ 400 และ 500 ℃ และเมื่อพิจารณาร่วมกันระหว่างอัตรา การไหลของ CBG และอุณหภูมิที่ใช้ภายในเครื่อง ปฏิกรณ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่อง ปฏิกรณ์และลดอัตราการไหลของ CBG จะทำให้ได้ก๊าซ ไฮโดรเจน (H₂) เป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังกราฟที่แสดง ในรูปที่ 6 โดยที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 ℃ และที่อัตราการไหลของ CBG เท่ากับ 50 ml/min จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็นผลิต ภัณฑ์มากที่สุด คือ 34.74 % และสามารถคำนวณ ผลได้ร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (% yield of H₂) และร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของก๊าซ มีเทน (% conversion of CH₄) ได้เท่ากับ 10.72 และ



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา การไหลของก๊าซ CBG และระยะเวลาของ สารตั้งต้นที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time)

จากกราฟในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของ CBG มีความแปรผกผันกับ residence time โดยเมื่ออัตราการไหลมีค่าลดน้อยลง จะส่งผลให้ค่า residence time เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก ค่า residence time คือ ระยะเวลาของสารตั้งต้นที่อยู่ ในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นหากอัตราการไหลของก๊าซที่ เข้ามายังเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อย จะทำให้ก๊าซผสม ระหว่าง CBG และไอน้ำที่เป็นสารตั้งต้นมีเวลาอยู่ใน ้เครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น ทำให้สารตั้งต้นมีโอกาสไป ้สัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O3 ที่อยู่ ภายในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถลดพลังงานกระตุ้น (activated energy) ของ ปฏิกิริยาให้น้อยลง ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ สารตั้งต้นมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ได้ ก๊าซไฮโดรเจน (H2) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่อัตราการไหล ของ CBG เท่ากับ 50 ml/min ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ ้น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ ในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่อง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ไอน้ำหรือ steam reforming process ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิต่ำในช่วง 400-600 ℃ โดยใช้ระบบการผลิต ในระดับ lab scale ที่สร้างขึ้นและใช้แพลเลเดียมบน ตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง อัตราการไหลของก๊าซ CBG ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อปริมาณก๊าซ ไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของ CBG และลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้ได้ก๊าซ ไฮโดรเจนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง ซึ่งที่อัตรา การไหลของก๊าซไบโอมีเทนอัดเท่ากับ 50 ml/min อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 600 ℃ ถือเป็น ค่าอัตราการไหลและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ใน การทดลองนี้ โดยจะให้สัดส่วนโดยโมลของก๊าซ ไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สูงที่สุดเท่ากับ 34.74 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการการ ผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนโดยการเปลี่ยนรูป ด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จากสถาบันวิจัยและ พัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดย ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ จากสำนักงานคณะ กรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

6. รายการอ้างอิง

- ไกรฤทธิ์ นิลคูหา, มยุรพันธุ์ สัจจกุลนุกิจ, เดโช จันทร์หอม, ทรงศักดิ์ มธุรพจน์, กฤษณา สวน จันทร์, พีรายา ศิริพุฒ และธงไชย ศรีนพคุณ, 2553. การพัฒนาระบบผลิตพลังงานไฮโดรเจน จากแหล่งพลังงานทดแทนโดยเทคนิค Steam Reformation, วิศวกรรมสาร มก. 72(23): 30-38.
- [2] นิสิต ตัณฑวิเชฐ, 2553. เทคโนโลยีผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนที่สะอาดและยั่งยืน Water Electro-

58.29 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิภายใน ้เครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 400 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุด ที่ใช้ในการทดลองนี้ ที่อัตราการไหลของ CBG ที่มีค่า มาก คือ 200, 250 และ 300 ml/min ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ที่ได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณค่อนข้าง ้น้อยและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก อุณหภูมิ 400 ℃ ถือเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำสำหรับ ปฏิกิริยาของกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำที่ต้องใช้ ความร้อนช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยา ซึ่งหาก พิจารณาที่อัตราการไหลที่ต่ำลงมา คือ 50, 100 และ 150 ml/min จะเห็นว่าได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมา เป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตามอัตราการไหลของ CBG ที่ลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ ว่าหากต้องการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H2) จากกระบวน การเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (steam reforming process) โดยใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ จำเป็นจะต้องลดอัตรา การไหลของสารตั้งต้นให้ลดลงเพื่อเพิ่ม residence time ซึ่งจะส่งผลให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ออกมาเป็น ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น และในส่วนของการใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาในการทดลองนั้น สามารถกล่าวได้ว่าตัวเร่ง ปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วยไอน้ำ ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิมพรใจ และคณะ [5] และ Izquierdo และคณะ [11] ที่ได้นำตัวเร่ง ปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการ ผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการ steam reforming ภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วง 700-900 ℃ โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O3 สามารถเร่ง ปฏิกิริยาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

4. สรุป

ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) สามารถผลิตได้จาก กระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซไบโอมีเทนอัด (CBG) ด้วย lysis, ว.ส่งเสริมเทคโนโลยี 36(209): 59-62.

- [3] Effendi, A., Hellgardt, K., Zhang, Z.G. and Yoshida, T., 2005, Optimizing H₂ 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] พิมพรใจ ชัยนรานนท์, 2558. การผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนโดยการเปลี่ยนรูปด้วย ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์, วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 83 น.
- [6] รัชนีกร วันจันทึก, 2554. ก๊าซไฮโดรเจน : ความ คาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน, ว.วิทยา ศาสตร์บูรพา 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 ceriazirconia 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.