

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนอัดด้วยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำโดยใช้แพลเลเดียมบนตัว
รองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
Production of Hydrogen Gas from Compressed Bio-methane Gas by Steam
Reforming Process with Alumina-supported Palladium (Pd/Al₂O₃) Catalyst

รชนีกร ชันทอง¹, กลยุทธิ์ ปัญญาวุธ^{2*} และ พุกฤษ อักกะรังสี³
Rachaneekorn Khunthong¹, Konlayutt Punyawudho^{2*} and Pruk Aggarangsi³

¹บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

^{2,3}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*Corresponding author: konlayutt.p@cmu.ac.th

E-mail: rachaneekorn.kh@gmail.com¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนอัดด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำโดยมีแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยชุดทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และอัตราการไหลเข้าระบบของก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือก๊าซ CBG ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ก๊าซ CBG ที่มีก๊าซมีเทน 81 % เป็นองค์ประกอบหลัก ทำการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทนและไอน้ำที่ป้อนเข้าระบบเป็น 1:2 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหนัก 0.5 กรัม และใช้อัตราการไหลเข้าระบบของก๊าซ CBG เท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 L/min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 700 °C, 800 °C และ 900 °C ตามลำดับ และนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) เพื่อหาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในก๊าซผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไบโอมีเทน 0.1 L/min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 900 °C จะได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจนสูงที่สุดเท่ากับ 69.31 %

คำสำคัญ: ก๊าซไฮโดรเจน, ไบโอมีเทน, ไบโอมีเทนอัด, การเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ

Abstract

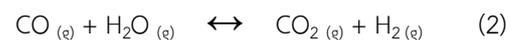
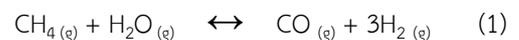
This research focused on the hydrogen production from compressed bio-methane gas (CBG) by steam reforming process with alumina-supported palladium (Pd/Al₂O₃) catalyst. The experiment was set up to study on the effects of temperature and flow rate of CBG in the reactor to the H₂ conversion by catalytic steam reforming process. Upstream CBG had 81 % CH₄ by mole and the experiment was set up to maintain molar ratio of the CH₄ : steam at 1:2 with 0.5 g Pd/Al₂O₃ catalyst, input of the CBG flow rate was 0.1, 0.2 and 0.3 L/min at the temperatures of 700 °C, 800 °C and 900 °C, respectively. Afterwards, the product gas was analyzed by gas chromatography (GC) to measure mole fraction composition. The result showed that the maximum %mole of H₂ was 69.31 % at a flow rate of CBG 0.1 L/min and a temperature of 900 °C.

Keywords: Hydrogen, Bio-methane, CBG, Steam reformin

1. บทนำ

ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานยังคงสูงขึ้นทุกวันแต่แหล่งพลังงานต่างๆ โดยเฉพาะแหล่งพลังงานที่มาจากซากดึกดำบรรพ์นั้นกลับมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งการใช้พลังงานทั้งหมดของโลกในระหว่างปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2573 เชื้อเพลิงฟอสซิลมีการใช้เพิ่มขึ้น รวมทั้งพลังงานนิวเคลียร์และพลังงานอื่นๆ ที่มีการขยายการใช้เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การใช้งานของก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน มีการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นเป็น 65 % และ 74 % ตามลำดับ การใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 42 % ในขณะที่พลังงานนิวเคลียร์และพลังงานหมุนเวียนที่มีการเพิ่มการใช้พลังงานที่ช้ากว่าที่กำหนดไว้ โดยคาดว่าจะมีการใช้เพิ่มขึ้น 44 % และ 61 % ตามลำดับ [1] ดังนั้นในหลายๆ ประเทศจึงได้พยายามศึกษาค้นคว้าหาแหล่งพลังงานรูปแบบใหม่ๆ ที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหรือพลังงานทดแทน ประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนเช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานไฮโดรเจน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนยุทธศาสตร์ด้านพลังงานไฮโดรเจนและเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงไว้ โดยวางวิสัยทัศน์ไว้ว่า “พลังงานไฮโดรเจน เป็นพลังงานทางเลือกที่สะอาด มีความยืดหยุ่น ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรที่มีอยู่มากมายในประเทศโดยมีการใช้อย่างปลอดภัยในทุกสาขา เศรษฐกิจ และครอบคลุมทั่วประเทศภายในปี พ.ศ. 2573” [2] ปัจจุบันเชื้อเพลิงไฮโดรเจนถูกนำไปใช้งานควบคู่กับเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ ซึ่งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนหรือการสกัดไฮโดรเจนให้อยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (Stream reforming), วิธีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification), วิธีออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ซึ่งแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานเบื้องต้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต เช่น ก๊าซธรรมชาติ ชีวมวล หรือถ่านหิน โดยวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ วิธีเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ คิดเป็น 95 % ของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมด เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุดและค่าใช้จ่ายต่ำ [3] นอกจากนี้สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้พัฒนาพลังงานทดแทนที่เรียกว่า “ก๊าซไบโอมีเทนอัด” ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซมีเทน โดยการนำก๊าซชีวภาพมาปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และความชื้นออกจากก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยีการดูดซับด้วยน้ำ (Water scrubbing technology) และ เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane

technology) เพื่อให้ได้ก๊าซไบโอมีเทนอัดหรือ Compressed bio-methane gas (CBG) [4] โดยก๊าซไบโอมีเทนอัดมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซมีเทนสูงถึง 80 % ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนเป็นอย่างยิ่ง โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยของพิมพ์พรใจ [5] ที่ใช้ก๊าซ CBG ผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ พบว่าได้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด 53.6 % ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีหลักการคือ การป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกดึงออกจากก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซมีเทนที่ป้อนเข้าไปในระบบ ส่วนก๊าซออกซิเจนที่เหลือน้ำและคาร์บอนที่เหลือน้ำจากมีเทนจะรวมตัวกันเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยา Reforming ระหว่างก๊าซมีเทนกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูง (อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งร่วมด้วย) เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ 1 และจากขั้นตอนแรกจะเห็นว่ามีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นร่วมด้วย ดังนั้นจะมีการนำไอน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อีกครั้ง เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า “ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ” (Water-gas shift reaction หรือ WGS) [6-7]



ดังนั้น จะได้สมการรวมของปฏิกิริยาคือ



เมื่อพิจารณาสมการรวมของปฏิกิริยาข้างต้น (สมการที่ 3) พบว่าเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (Endothermic reaction) ซึ่งจะใช้พลังงานค่อนข้างมากในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาร่วมด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนส่วนมากจะเป็นธาตุทรานซิชัน ประกอบด้วยธาตุเหล็ก, โคบอลต์, นิกเกิล, โรเดียม, รูทีเนียม, แพลเลเดียม, ออสเมียม, แพลทินัม และ อิริเดียม (Fe, Co, Ni, Rh, Ru, Pd, Os, Pt และ Ir) [8] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนอัดซึ่งเป็นไบโอมีเทนที่สถาบันพลังงานวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สามารถผลิตเองได้โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ โดยใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่

ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาก๊าซไฮโดรเจนโดยกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในช่วงอุณหภูมิ 700-1000 °C [5-9] ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้พัฒนามาจากงานวิจัยของพิมพ์ใจ [5] ที่ใช้ชุดทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการในการทำการศึกษาก๊าซของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และอัตราการไหลเข้าระบบของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากก๊าซไฮโดรเจน เพื่อศึกษาแนวทางการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไฮโดรเจนอัดด้วยกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำสำหรับใช้เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้ก๊าซไฮโดรเจนอัดที่มีอยู่สำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาก๊าซไฮโดรเจนจากไฮโดรเจนอัดด้วยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำโดยใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบไปด้วย ก๊าซไฮโดรเจนอัดหรือก๊าซ CBG จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีก๊าซของค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (5% Palladium on alumina powder, Pd/Al₂O₃, Premetek, United States) ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2 ไยแก้ว (Quartz wool, fine grade, tosoh, Japan) ฤกษ์เก็บก๊าซผลิตภัณฑ์ ขนาดกว้าง 17.8 ซม. และยาว 17.8 ซม. ความจุ 1 ลิตร (Multilayer gas sample bag, restek, United States) ชุดทดสอบสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ และเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC 7890A, Agilent technologies, United States)

โดยชุดทดสอบสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ชุดถังบรรจุก๊าซไฮโดรเจน พร้อมวาล์วหัวถัง
2. ตัวควบคุมแรงดัน (Pressure regulator/Pressure gauge) ทำหน้าที่ลดแรงดันจากถังเก็บ CBG
3. เครื่องทำความชื้น (Humidifier) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ไอน้ำที่อยู่ภายใน ทำให้เกิดเป็นไอน้ำ และเมื่อก๊าซ CBG ไหลมารวมตัวกับไอน้ำที่อยู่ภายใน จะได้ก๊าซผสมที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา

4. ถังผสม (Mixing chamber) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิอน้ำที่อยู่ในก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามาเกิดการควบแน่น

5. เครื่องวัดอัตราการไหลแบบดิจิทัล (Digital flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) ของก๊าซ CBG

6. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความชื้น, เตาความร้อนแบบหุ้มฉนวน และถังผสม

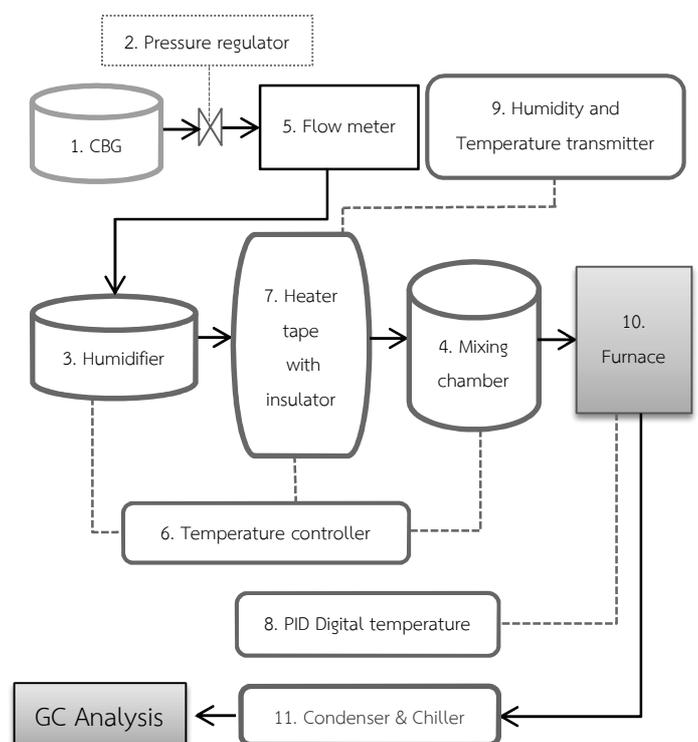
7. เตาความร้อนแบบหุ้มฉนวน (Heater tape with insulator)

8. เครื่องควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (PID digital temperature with step controller)

9. เครื่องบันทึกค่าความชื้นและอุณหภูมิ (Humidity and Temperature transmitter) สำหรับอ่านค่าอัตราส่วนผสม (X) ของก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซ CBG

10. เตาเผาหลอดแก้วแบบเปิด (Vertical split tube furnace) โดยภายในจะเป็นหลอดแก้ว (Quartz tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. ความยาว 30 ซม.

11. ชุดหล่อเย็น (Cooling system) ซึ่งประกอบไปด้วยหลอดคอนเดนเซอร์ (Condenser) และเครื่องทำความเย็น (Chiller) ใช้สำหรับดึงไอน้ำออกจากก๊าซผลิตภัณฑ์ก่อนเก็บก๊าซตัวอย่าง



รูปที่ 1 ผังแสดงระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไฮโดรเจนอัดด้วยกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซ CBG ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง
ก๊าซโครมาโทกราฟี

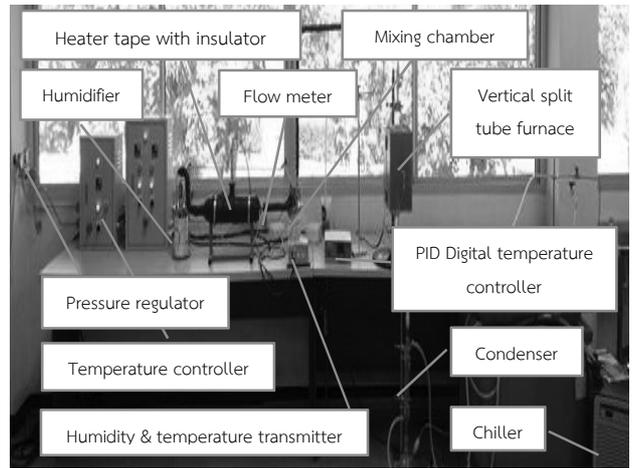
องค์ประกอบของก๊าซ CBG	(%mole)
CH ₄	80.98
CO	-
CO ₂	10.33
O ₂	1.62
N ₂	7.08
H ₂	-
Totals	100

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/Al₂O₃ ที่ใช้ในงานวิจัย [5]

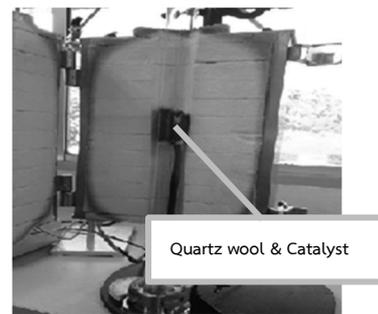
พารามิเตอร์	ปริมาณ
แพลเลเดียม (Pd, %)	5.0 ± 0.1
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average particle diameter, μm)	70
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area, m ² /g)	100
ความหนาแน่นบัลค์ Bulk density (g/cm ³)	0.80 ~1.00
ปริมาตรรูพรุน (Pore volume, cm ³ /g)	0.40 ~ 0.60
น้ำ (Water, %)	0.50 max
คลอรีน (Chlorine, %)	0.05 max
ซิลิกา (SiO ₂ , %)	0.50 max
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O, %)	0.45 max
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃ , %)	0.05 max

2.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และอัตรา การไหลเข้าระบบของก๊าซไบโอมีเทนอัดที่มีผลต่อการผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนด้วยวิธีเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ

ทำการทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปด้วย
ไอน้ำ โดยใช้ชุดทดสอบสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธี
เปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้น ดังแสดง
ในรูปที่ 2 และภายในเตาปฏิกรณ์จะบรรจุใยแก้วที่มีตัวเร่ง-
ปฏิกิริยา (Quartz wool and Pd/Al₂O₃ catalyst) ปริมาณ
0.5 กรัม กระจายอยู่ด้านใน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ชุดทดสอบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซไบโอมีเทนอัดด้วย
กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ



รูปที่ 3 ถังปฏิกรณ์ที่อยู่ภายในเตาเผาหลอดแก้วแบบเปิด

ซึ่งในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทนและไอน้ำ
ที่ป้อนเข้าระบบเป็น 1:2 โดยควบคุมจากค่าอัตราส่วนผสม (X)
ที่อ่านค่าได้จากเครื่องบันทึกค่าความชื้นและอุณหภูมิ
(Humidity and temperature transmitter) โดยค่าอัตรา
ส่วนผสมที่ต้องการใช้ในการทดลองนี้ต้องมีค่ามากกว่า 1008 g
H₂O/kg CBG ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณตามสมการที่ 4

$$\text{ค่าอัตราส่วนผสม (X)} = \frac{\text{gram of H}_2\text{O}}{\text{kilogram of CBG}} \quad (4)$$

เพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการจะต้องตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำ
ความชื้นไว้ที่ 88-90 °C ส่วนอุณหภูมิของเตาความร้อนและถัง
ผสมจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 110 °C และในส่วนของชุดหล่อเย็นจะตั้ง
ค่าอุณหภูมิไว้ที่ 14 °C ใช้ Pd/Al₂O₃ ปริมาณ 0.5 กรัมเป็นตัว-
เร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราการไหลเข้าระบบของก๊าซ CBG
เท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 L/min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เท่า-
กับ 700 °C, 800 °C และ 900 °C ตามลำดับ และทำการเก็บ
ก๊าซตัวอย่างเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) และ
นำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนโดย
ใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบใช้สาร-

มาตรฐานภายนอก (External standard method) จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกรอบ และนำข้อมูลปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ได้จากก๊าซผลิตภัณฑ์มาคำนวณหาผลผลิตร้อยละของไฮโดรเจน (%H₂ yield) และค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทน (%CH₄ conversion) ดังสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ตามลำดับ [12]

$$\%H_2 \text{ yield} = \frac{H_{2,\text{output}}}{4 \times CH_{4,\text{input}}} \times 100 \quad (5)$$

H₂ output = โมลของก๊าซ H₂ ที่ผลิตได้จากระบบ

CH₄ input = โมลของก๊าซ CH₄ ที่ป้อนเข้าไปในระบบ

หมายเหตุ ในสมการที่ 5 ใช้เลข 4 คูณกับความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ป้อนเข้าไป เนื่องจากจำนวนโมลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากการป้อนก๊าซไปโอมีเทนเข้าไปในระบบคือ 4 ตามสมการ CH₄ (g) + 2H₂O (g) ↔ CO₂ + 4H₂ (g)

$$\%CH_4 \text{ conversion} = \frac{CH_{4,\text{input}} - CH_{4,\text{output}}}{CH_{4,\text{input}}} \times 100 \quad (6)$$

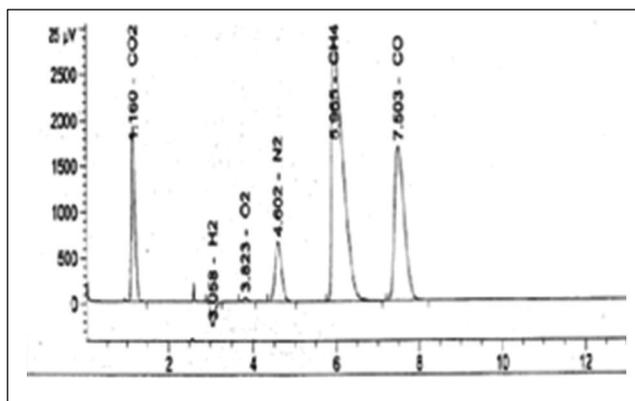
CH₄ input = ปริมาณของมีเทนที่ป้อนเข้าไปในระบบ

CH₄ output = ปริมาณของมีเทนที่เหลือออกมาที่ก๊าซผลิตภัณฑ์

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของงานวิจัยของพิมพรใจ [5] ที่ใช้ก๊าซ CBG ไปผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำเช่นเดียวกัน ซึ่งได้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด 53.6 %

3. ผลการทดลอง

จากการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีพบว่า ก๊าซผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ก๊าซไฮโดรเจน (H₂), ก๊าซออกซิเจน (O₂), ก๊าซไนโตรเจน (N₂), ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังแสดงในโครมาโทแกรมตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ CBG 0.1 L/min, อุณหภูมิ 700 °C

เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของคุณสมบัติของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อนำค่าของปริมาณไฮโดรเจนที่ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของพิมพรใจ [5] ที่ได้ทำการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไปโอมีเทนโดยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าระบบชุดทดสอบที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นส่งผลให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์มากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 800-900 °C โดยในการทดลองนี้ได้ก๊าซไฮโดรเจนมากถึง 57.04 %-69.31 % ซึ่งจากเดิมได้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดอยู่ที่ 53.6 % ที่อัตราการไหล 0.1 L/min และอุณหภูมิ 900 °C เท่ากัน แต่ที่อุณหภูมิ 700 °C ที่อัตราการไหล 0.2 และ 0.3 L/min ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยของพิมพรใจเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water-gas shift reaction) แบบย้อนกลับทำให้ก๊าซไฮโดรเจนถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2 [7]

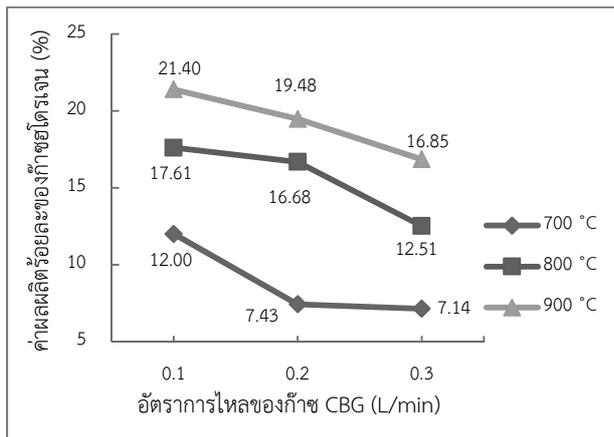


และเมื่อนำค่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 3 ไปทำการคำนวณหาผลผลิตร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนและค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทน สามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่าผลผลิตร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ

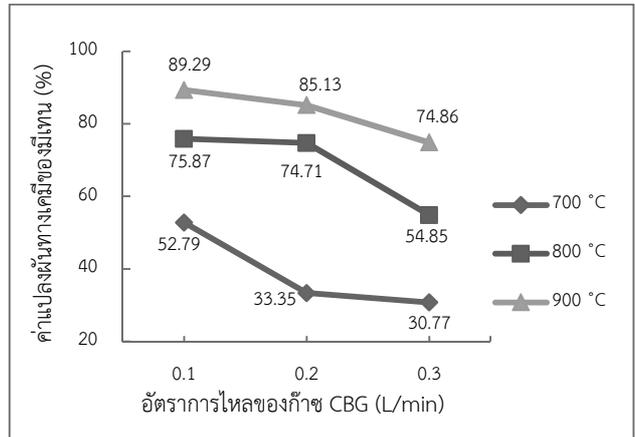
ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี

ก๊าซตัวอย่าง	อัตราการไหลเข้าของ CBG (L/min)	อุณหภูมิ (°C)	CH ₄ (%mole)	H ₂ (%mole)	
				งานวิจัยนี้	งานวิจัยของพิมพ์ใจ
CBG	-	-	80.98	-	-
CBG + ไอน้ำ	0.1	700	38.23	38.88	35.3
		800	19.54	57.04	42.5
		900	8.67	69.31	53.6
	0.2	700	53.97	24.06	35.1
		800	20.48	54.04	38.9
		900	12.04	63.09	48.9
	0.3	700	56.06	23.13	34.7
		800	36.56	40.52	36.7
		900	20.36	54.59	45.6

จากการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงขึ้นจะมีก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพิมพ์ใจ [5]



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่าผลิตร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

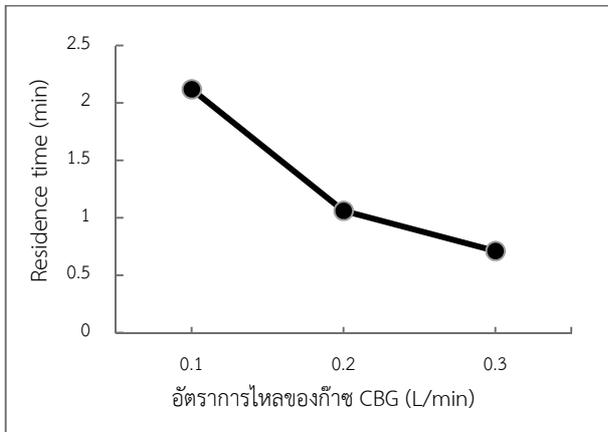


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากก๊าซไปโอมีเทนอัดกับไอน้ำที่เป็นสารตั้งต้นจะสามารถเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้มากขึ้นทำให้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นและเมื่อนำข้อมูลปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าผลิตร้อยละของไฮโดรเจนและค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทน พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในทุกๆ อัตราการไหลเข้าของก๊าซไปโอมีเทนอัดที่อุณหภูมิ 900 °C จะได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และค่าผลิตร้อยละของไฮโดรเจน รวมทั้งค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนสูงกว่าที่อุณหภูมิ 700 °C และ 800 °C ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราการไหลเข้าของก๊าซไปโอมีเทนอัดกลับพบว่าที่อัตราการไหลเข้าน้อยๆ ทำให้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และค่าผลิตร้อยละของไฮโดรเจน รวมทั้งค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนที่มากขึ้น [11-13] เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซ CBG มีผลต่อระยะเวลาที่สารตั้งต้น (ในที่นี้คือก๊าซผสมระหว่าง CBG กับไอน้ำ) ที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์หรือ Residence time ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 [14]

$$\text{Residence time} = \frac{\text{ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้น}} \quad (7)$$

โดยที่ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 212.06 มิลลิลิตร ดังนั้นค่า Residence time ที่ได้ แสดงดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่า Residence time ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับค่า Residence time ที่อัตราการไหลต่างๆ

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของก๊าซ CBG มีความแปรผกผันกับ Residence time คือ เมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Residence time ลดลง เนื่องจากค่า Residence time คือ ระยะเวลาของสารตั้งต้นที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นหากอัตราการไหลของก๊าซที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อย จะทำให้สารตั้งต้นมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น ทำให้สารตั้งต้นมีโอกาสไปสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดพลังงานกระตุ้น (Activated energy) ของปฏิกิริยาได้มากขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้สารตั้งต้นมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น [5,14] ดังนั้นจึงทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่อัตราการไหลเข้าของไบโอมีเทนอัด 0.1 L/min ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและค่าผลผลิตร้อยละของไฮโดรเจน รวมทั้งค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนสูงกว่าที่อัตราการไหล 0.2 L/min และ 0.3 L/min ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ CBG กับอุณหภูมิที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และลดอัตราการไหลของก๊าซ CBG จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุดเท่ากับ 69.31 % คิดเป็นค่าผลผลิตร้อยละของไฮโดรเจนได้เท่ากับ 21.40 % และมีค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนเท่ากับ 89.29 % ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ CBG 0.1 L/min ภายใต้อุณหภูมิ 900 °C

4. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากไบโอมีเทนอัดด้วยการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำโดยใช้แพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา (Pd/Al₂O₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้ ได้ใช้ชุดทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการตามที่สร้างขึ้น โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทนและไอน้ำที่ป้อนเป็น 1:2 ซึ่งค่าอัตราส่วนผสมที่จะทำให้ได้อัตราส่วนโดยโมลตามที่ต้องการมีค่าประมาณ 1008 g H₂O/kg CBG และจากการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี พบว่าปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้และผลผลิตร้อยละของไฮโดรเจนรวมถึงค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นและอัตราไหลเข้าระบบของไบโอมีเทนอัดลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือผลการทดลองที่อัตราการไหลเข้าของ CBG 0.1 L/min ภายใต้อุณหภูมิ 900 °C ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 69.31 % คิดเป็นค่าผลผลิตร้อยละของไฮโดรเจนได้เท่ากับ 21.40 % และค่าแปลงผันทางเคมีของมีเทน เท่ากับ 89.29 %

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้และสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy technology for environment research center. (2016). *Situation Energy*. Retrieved from: <http://www.thailandenergyeducation.com/handbook>
- [2] 4.dede.go.th (2016). Retrieved from: http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=120%3A2010-05-06-10-52-51&catid=57%3A2010-04-06-09-13-01&Itemid=68 &lang=th
- [3] Tantavichet, N. (2010). Water electrolysis. *Technology energy journal*. Chulalongkorn university, 36, 59-62.
- [4] Compressed Bio-methane Gas (2016). Retrieved from: <http://www.erd.cmu.ac.th/index.php/services/view?pid=5>.
- [5] Chainanon, P. (2015). Production of Hydrogen Gas from bio-methane by steam and CO₂ reforming. (Master thesis). Graduat school, Chiangmai university. (in Thai)
- [6] Wanchanthuek, R. (2011). Hydrogen Gas: The Expectation to Be a Promising Sustainable Energy Source. *Burapha science journal*, 16, 131-140. (in Thai)

- [7] GIWA, A., and GIWA, S. (2013). Simulation sensitivity analysis and optimization of hydrogen production by steam reforming of methane using aspen plus. *International journal of engineering research & technology (IJERT)*, 2, 1719-1729.
- [8] Ruangpornvisut, V. (2001). *Catalysis surface chemistry and petrochemical*. Bangkok:Technology promotion association (Thailand-Japan).
- [9] Avraam, D., Halkides, T., Liguras, D., Bereketidou, O., and Gola, M. (2010). An experimental and theoretical approach for the biogas steam reforming reaction. *International journal of hydrogen energy*, 35, 9818-9827.
- [10] Laobuthee, A. (2011). Preparation of gadolinia – doped ceria from the metal complex decomposition method for use as catalysts in methane steam reforming reactions. *Kasetsart Engineering Journal*, 76, 68-83. (in Thai).
- [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. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 7026-7033.
- [12] Kolbitsch, P., Pfeifer, C., and Hofbauer, H. (2008). Catalytic steam reforming of model biogas. *Fuel*, 87, 701-706.
- [13] Fernandes, F.A.N., and Soares, JR, A.B. (2006). Modeling of methane steam reforming in a palladium membrane reactor. *Latin American applied research*, 36, 155-161.
- [14] Ninkuha, K. (2010). Development of hydrogen energy from alternative energy sources using steam reformation. *Kasetsart Engineering Journal*, 72, 30- 38. (in Thai)