



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
“Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

การศึกษานิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ

Investigation of reaction rate expressions for steam methane reforming process

วรรณวิไล จำรูญโรจน์¹

รศ.ดร. ผึ้งผาย พรรณวดี²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำในปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุน กระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำมักถูกรายงานว่ามีปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ 1) ปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ 2) ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ และ 3) ปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทน แม้ว่าโดยอุณหพลศาสตร์จะมีเพียง 2 ปฏิกิริยาอิสระเท่านั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะหาว่าสมมติฐานของการมี 2 ปฏิกิริยาหลัก คือปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 จะสามารถคำนวณสมรรถนะของปฏิกรณ์ได้เหมือนกับที่คำนวณโดยสมมติว่ามี 3 ปฏิกิริยาหลักได้หรือไม่ การจำลองเชิงตัวเลขทำสำหรับ 4 อุณหภูมิ โดยกำหนดอัตราการไหลเชิงโมลขาเข้าของก๊าซ องค์ประกอบของก๊าซ และความดันในปฏิกรณ์คงที่ ผลการวิจัยแสดงว่าการคำนวณโดยใช้ 2 สมมติฐานดังกล่าวนี้ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสมมติฐานของ 2 ปฏิกิริยาจึงน่าใช้มากกว่าเพราะง่ายกว่า

คำสำคัญ มีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ, อัตราเร็วของปฏิกิริยา, การจำลอง

Abstract

This article involves investigation of the steam methane reforming process in a reactor packed with non-porous catalyst. It has been reported that this process has three main reactions, including 1) steam methane reforming, 2) water gas shift, and 3) reverse methanation, although thermodynamically there are only two independent reactions. The objective of this research is to find out whether the assumption of having 2 main reactions, i.e., reactions 1 and 2, can give the same reactor performance as that calculated by assuming that there are 3 main reactions. Numerical simulation was performed for four temperatures by fixing the feed flow rate, feed composition, and pressure in the reactor. It



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
“Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

was found that the calculation results obtained by using the two different assumptions are very close to each other. The assumption of having two reactions is therefore preferred due to its simplicity.

Keywords Steam methane reforming, Reaction rate, Simulation

บทนำ

ในปัจจุบันนี้การค้นคว้าหาแหล่งพลังงานทางเลือกมีบทบาทมากขึ้น หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่คาดว่าจะ เป็นพลังงานหลักในอนาคตคือพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนมีค่าพลังงานความร้อนของการเผาไหม้ที่ สูงกว่าเชื้อเพลิงที่มาจากซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuel) และสามารถเก็บได้ทั้งในรูปแบบของเหลวหรือก๊าซ (Armor, 1999; Dincer and Acar, 2015) อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่สะอาด หลังการเผาไหม้ไม่ก่อให้เกิดก๊าซ เรือนกระจก (Villacampa *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2013; Bej *et al.*, 2013) นอกจากนี้ไฮโดรเจนยัง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบ (raw material) ให้กับหลายๆกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการผลิต แอมโมเนียและเมทานอล กระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ (hydrodesulfurization) และกระบวนการอื่นๆ (Armor, 1999; Villacampa *et al.*, 2003)

ปัจจุบันร้อยละ 98% ของปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดถูกผลิตขึ้นจากซากดึกดำบรรพ์ (Abbas and Wan Daud, 2010) มีเทนเป็นเชื้อเพลิงราคาถูก กระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทนสามารถทำได้จาก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (steam methane reforming) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วนของมีเทน และกระบวนการแตกสลายตัวของมีเทน (Bej *et al.*, 2013) กระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่นิยมในเชิงพาณิชย์มากที่สุดเนื่องจากสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในปริมาณ มากและมีค่าใช้จ่ายต่ำ (Twigg, 1996; Levent *et al.*, 2003) แม้ว่าแหล่งของมีเทนส่วนมากมาจากซากดึกดำบรรพ์ มีเทนสามารถผลิตจากกระบวนการหมัก (Gunaseelan, 1997; Molino *et al.*, 2013) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำมักเป็นโลหะนิกเกิลและกลุ่มโลหะมีตระกูล ได้แก่ โรเดียม (Rh) แพลเลเดียม (Pd) แพลทินัม (Pt) และรูทีเนียม (Ru) แต่ในเชิงพาณิชย์แล้วโลหะนิกเกิลถูกใช้ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและความว่องในการเกิดปฏิกิริยาสูง (Rostrup-Nielsen, 1984; Rostrup-Nielsen *et al.*, 1988)

กระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำโดยส่วนใหญ่มีรายงานว่ามีการปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (water gas-shift) และปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทน (reverse methanation) (Xu and Froment, 1989; Soliman *et al.*, 1992; Elnashaie and Elshishini, 1993; Avraam *et al.*, 2010) แต่ในทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) กระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำมี 2 ปฏิกิริยาอิสระ (independent reaction) ได้แก่ปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ส่วนปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทนเป็นผลรวมของปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ จึงไม่ใช่ปฏิกิริยาอิสระ หากสามารถพิสูจน์ได้ว่า การสมมติว่า



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

กระบวนการนี้มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ให้ผลการคำนวณ ด้านสมรรถนะของปฏิกรณ์ ใกล้เคียงกับกรณีที่สมมติ ว่ากระบวนการมีปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา การคำนวณเพื่อออกแบบปฏิกรณ์ หรือการหาสมรรถนะของปฏิกรณ์ ก็จะสามารถทำได้ โดยการสมมติว่ากระบวนการนี้มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการคำนวณ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการมีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำโดยมุ่งเน้นที่จะลดจำนวนของปฏิกิริยาหลักของกระบวนการ ซึ่งจะง่ายต่อการคำนวณสมรรถนะของปฏิกรณ์

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้ทำโดยการจำลอง (simulation) กระบวนการในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุน รูปแบบการไหลเป็นแบบท่อไหล (plug flow) กระบวนการปฏิบัติการที่สภาวะคงตัว (steady state operation) อุณหภูมิคงที่สม่ำเสมอทั่วทั้งปฏิกรณ์ และไม่มีความดันลด (pressure drop) ในปฏิกรณ์ การจำลองกระบวนการทำภายใต้อุณหภูมิ 800-875 °C (Levent *et al.*, 2003; Bej *et al.*, 2013) ปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา ได้แก่

ปฏิกิริยามีเทนรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ



ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์



ปฏิกิริยาผันกลับของการเกิดมีเทน



การจำลองกรณีที่สมมติว่ามีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาที่ (1) และ (2)

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาเพื่อหาว่า เราจะสมมติว่ากระบวนการนี้มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา เราจะคำนวณสมรรถนะของปฏิกรณ์ที่ได้จากกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยามาเปรียบเทียบกับสมรรถนะของปฏิกรณ์ที่ได้จากการสมมติว่ามีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ในที่นี้สมรรถนะของปฏิกรณ์บ่งชี้โดยการแปลงผัน (conversion) ของมีเทน ถ้าการแปลงผันของมีเทนที่คำนวณจากทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก ก็จะถือได้ว่าการสมมติว่ามีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยาสามารถทำได้ การแปลงผันของมีเทนคือจำนวนโมลของมีเทนที่ทำปฏิกิริยาไปได้เทียบกับจำนวนโมลของมีเทนที่เข้าปฏิกรณ์ ร้อยละการแปลงผันของมีเทนคำนวณโดย



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

$$\%conversion = \frac{F_{CH4i} - F}{F_{CH4i}} \times 100 \quad (4)$$

โดย F_{CH4i} คืออัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซมีเทนที่เข้า
 F คืออัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซมีเทนที่สกัดได้ของปฏิกรณ์

เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป จำนวนโมลของมีเทนจะถูกใช้ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จำนวนโมลของมีเทนจึงลดลงจากทางเข้าของปฏิกรณ์จนถึงทางออกของปฏิกรณ์ ดังนั้นการแปลงผันของมีเทนจะมีค่าสูงขึ้นจากที่ทางเข้าจนถึงทางออกของปฏิกรณ์ การคำนวณการแปลงผันของมีเทนจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมมติฐานต่อไปนี้

1. กระบวนการดำเนินไปที่สภาวะคงตัว (steady state operation)
2. อุณหภูมิคงที่สม่ำเสมอทั้งปฏิกรณ์
3. ความดันลด (pressure drop) น้อยมาก จนถือว่าความดันเท่ากันทั้งระบบ
4. การไหลของของไหลในปฏิกรณ์เป็นแบบท่อไหล (plug flow)

สมการดุลมวลของก๊าซแต่ละชนิดเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dF_i}{dZ} - \sum_{j=1}^3 \nu_{ij} r_j A = 0 \quad (5)$$

โดยที่ F_i คืออัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซ i (mol/s)
 Z คือพิกัดตามแนวแกนของปฏิกรณ์ (m)
 ν_{ij} คือสัมประสิทธิ์ stoichiometric ของก๊าซองค์ประกอบ i ในปฏิกิริยา j
 r_j คืออัตราเร็วของปฏิกิริยา j (mol/m³ s)
 A คือพื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ (m²)

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับของก๊าซแต่ละชนิดที่ทางเข้าของปฏิกรณ์แสดงดังนี้

$$Z = 0 \quad F_i = F_{i0} \quad (6)$$

นิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยา r_j ในสมการที่ (5) ในงานวิจัยนี้ใช้ของ Xu และ Froment (1989) ซึ่งได้รับการยอมรับมากที่สุด (Levent *et al.*, 2003; Ghouse and Adams, 2013; Cipiti *et al.*, 2016) นิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยาเขียนดังนี้



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

$$r_1 = \frac{k_1 \left(P_{CH_4} P_{H_2O} / P_{H_2}^{2.5} \right) \left(1 - (P_{H_2}^3 P_{CO} / K_{p1} P_{CH_4} P_{H_2O}) \right)}{Den^2} \quad (7)$$

$$r_2 = \frac{k_2 \left(P_{CO} P_{H_2O} / P_{H_2} \right) \left(1 - (P_{H_2} P_{CO_2} / K_{p2} P_{CO} P_{H_2O}) \right)}{Den^2} \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{k_2 \left(P_{CO} P_{H_2O}^2 / P_{H_2}^{3.5} \right) \left(1 - (P_{H_2} P_{CO_2} / K_{p2} P_{CO} P_{H_2O}) \right)}{Den^2} \quad (9)$$

โดย

$$Den = 1 + K_{CO} P_{CO} + K_{H_2} P_{H_2} + K_{CH_4} P_{CH_4} + K_{H_2O} P_{H_2O} / P_{H_2} \quad (10)$$

$$k_j = k_{0j} \exp \left(\frac{-E_{aj}}{RT} \right) \quad (11)$$

$$K_i = K_{0i} \exp \left(\frac{-\Delta H_i}{RT} \right) \quad (12)$$

ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (k_{0j}) พลังงานกระตุ้น (E_{aj}) ค่าคงที่การดูดซับ (K_{0i}) ความร้อนของการดูดซับ ($-\Delta H_i$) และค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาเคมี (K_{pi}) แสดงในตารางที่ 1



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

ตารางที่ 1 พรีเอ็กโพเนนเชียลแฟกเตอร์ ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าความร้อนของการดูดซับ และค่าคงที่สมดุล ปฏิกิริยาเคมี

ค่าคงที่	พรีเอ็กโพเนนเชียลแฟกเตอร์ (k_{0j}); (K_{0i})	พลังงานกระตุ้น, E_{aj} (kJ/mol) ความร้อนของการดูดซับ($-\Delta H_i$) (kJ/mol)
k_1 (mol bar ^{0.5} /(m ³ s))	8.918×10^{15}	240.1
k_2 (mol/(m ³ s bar))	4.127×10^6	67.13
k_3 (mol bar ^{0.5} /(m ³ s))	2.153×10^{15}	243.9
K_{CO} (bar ⁻¹)	8.23×10^{-5}	70.65
K_{CH_4} (bar ⁻¹)	6.65×10^{-4}	38.28
K_{H_2O} (-)	1.77×10^5	-88.68
K_{H_2} (bar ⁻¹)	6.12×10^{-9}	82.9
$K_{p1} = \exp(-26830/T+30.114)$, (bar) ²
$K_{p2} = \exp(4400/T-4.036)$, dimensionless
$K_{p3} = \exp(-22430/T+26.078)$, (bar) ²

ในการลดจำนวนของปฏิกิริยาหลักของกระบวนการโดยการสมมติว่ามีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา (ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2) เราไม่สามารถใช้นิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่แสดงโดยสมการที่ (7) และ (8) ได้โดยตรง เราจะใช้รูปแบบเดียวกับสมการทั้งสองสมการ แต่ต้องเปลี่ยนพารามิเตอร์ในนิพจน์ ดังนั้นเราจึงเขียนนิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ดังนี้

$$r_1 = \frac{k_1 \left(P_{CH_4} P_{H_2O}^{\alpha 11} / P_{H_2}^{\alpha 12} \right) \left(1 - (P_{H_2}^3 P_{CO} / K_{p1} P_{CH_4} P_{H_2O}) \right)}{Den^2} \quad (13)$$

$$r_2 = \frac{k_2 \left(P_{CO} P_{H_2O}^{\alpha 21} / P_{H_2}^{\alpha 22} \right) \left(1 - (P_{H_2} P_{CO_2} / K_{p2} P_{CO} P_{H_2O}) \right)}{Den^2} \quad (14)$$



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

พรีเอกโพเนนเชียลแฟกเตอร์ (k_{01} และ k_{02}) พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_{a1} และ E_{a2}) และเลขชี้กำลังความดันย่อยของมีเทน ไอน้ำและไฮโดรเจน (α_{11} α_{12} α_{13} α_{21} α_{22} และ α_{23}) จะหาโดยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ร้อยละการแปลงผันของก๊าซมีเทนตามพิกัดของปฏิกรณ์เป็น objective function ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$OF = \sum (X_{CH_4}^{3rate} - X_{CH_4}^{2rate})^2 \quad (15)$$

ผลการวิจัย

ผลวิเคราะห์การถดถอยได้นิพจน์อัตราเร็วของปฏิกิริยากรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา เป็นดังนี้

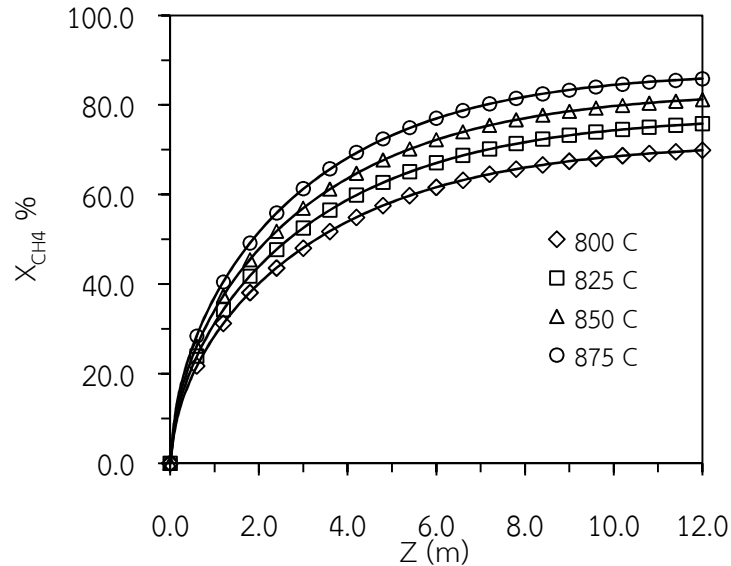
$$r_1 = \frac{8.92 \times 10^{15} \exp\left(\frac{-239.3}{RT}\right) (P_{CH_4}^{0.853} P_{H_2O}^{1.43} / P_{H_2}^{2.91}) (1 - (P_{H_2}^3 P_{CO} / K_{p1} P_{CH_4} P_{H_2O}))}{Den^2} \quad (16)$$

$$r_2 = \frac{4.13 \times 10^6 \exp\left(\frac{-41.91}{RT}\right) (P_{CO}^{1.99} P_{H_2O}^{1.63} / P_{H_2}^{0.005}) (1 - (P_{H_2} P_{CO_2} / K_{p2} P_{CO} P_{H_2O}))}{Den^2} \quad (17)$$

รูปที่ 1 แสดงการแปลงผันของมีเทนที่เปลี่ยนแปลงตามพิกัดของปฏิกรณ์ที่ได้จากคำนวณโดยใช้ปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยาและที่ใช้ปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา จากรูปจะเห็นว่าค่าการแปลงผันของมีเทนที่ได้จากคำนวณโดยใช้ปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยาและใช้ปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยาใกล้เคียงกันมากทุกอุณหภูมิ ความแตกต่างของค่าการแปลงผันที่ทางออกของปฏิกรณ์มีค่าไม่เกิน 0.1 % นั้นหมายความว่าเราไม่จำเป็นต้องใช้ 3 ปฏิกิริยา การสมมติว่ากระบวนการนี้มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยาสามารถทำได้



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”



รูปที่ 1 การแปลงผันของมีเทนที่เปลี่ยนตามพิกัดของปฏิกรณ์ สำหรับกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 800 °C (), 825 °C (), 850 °C () และ 875 °C () เทียบกับกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ()

นอกจากนี้ ยังได้วิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชนิดอื่นด้วย ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดที่ทางออกของปฏิกรณ์ที่ได้จากคำนวณโดยใช้ปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 800 และ 825 °C ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 850 และ 875 °C จากตารางเห็นได้ว่ากรณีที่สมมติว่ามีปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ให้ผลการคำนวณองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดที่ทางออกของปฏิกรณ์ใกล้เคียงกับกรณีที่มีปฏิกิริยาหลัก 3 ปฏิกิริยามากทุกอุณหภูมิ ยืนยันได้ว่าการคำนวณสมรรถนะของปฏิกรณ์สามารถใช้ 2 ปฏิกิริยาหลักแทน 3 ปฏิกิริยาหลักได้



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
 “Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

ตารางที่ 2 % dry composition ของ 3 ปฏิกริยาและ 2 ปฏิกริยา ที่อุณหภูมิ 800 และ 825 °C

อุณหภูมิ (°C)	800		825	
องค์ประกอบ	3 ปฏิกริยา	2 ปฏิกริยา	3 ปฏิกริยา	2 ปฏิกริยา
CH ₄	8.10	8.10	6.22	6.22
CO	10.31	10.30	11.56	11.56
CO ₂	12.82	12.83	12.08	12.08
H ₂	68.76	68.77	70.13	70.13

ตารางที่ 3 % dry composition ของ 3 ปฏิกริยาและ 2 ปฏิกริยา ที่อุณหภูมิ 850 และ 875 °C

Temp (°C)	850		875	
component	3 ปฏิกริยา	2 ปฏิกริยา	3 ปฏิกริยา	2 ปฏิกริยา
CH ₄	4.67	4.66	3.41	3.38
CO	12.72	12.73	13.76	13.79
CO ₂	11.37	11.36	10.71	10.70
H ₂	71.24	71.25	72.12	72.13

สรุป

ผลการจำลองเชิงตัวเลขแสดงว่าไค้การแปลงผันของมีเทนตามพิกัดของปฏิกรณ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ 3 ปฏิกริยาและ 2 ปฏิกริยาหลัก ใกล้เคียงกันมากที่ทุกอุณหภูมิปฏิบัติการ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดพบว่าองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดที่ขาออกของปฏิกรณ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ 3 ปฏิกริยาและ 2 ปฏิกริยาหลักก็ใกล้เคียงกัน ยืนยันได้ว่า 3 ปฏิกริยาหลักและ 2 ปฏิกริยาหลักให้สมรรถนะของปฏิกรณ์ที่เหมือนกัน ดังนั้นการสมมติว่ากระบวนการนี้มีปฏิกริยาหลัก 2 ปฏิกริยาก็คือเพียงพอแล้ว



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
“Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

เอกสารอ้างอิง

- Abbas, H.F., W.M.A. Wan Daud. (2010). Hydrogen production by methane decomposition: A review. *International Journal of Hydrogen energy*. 35, 1160-1190.
- Armor, J.N. (1999). The multiple roles for catalysis in the production of H₂. *Applied Catalysis A: General*. 176, 159-176.
- Bej, B., C.P. Narayan and S. Neogi. (2013). Production of hydrogen by steam reforming of methane over alumina supported nano-NiO/SiO₂ catalyst. *Catalysis today*. 207, 28-35.
- Cipiti, F., O. Barbera, N. Briguglio, G. Giacoppo, C. Italiano, A. Vita. (2016). Design of a biogas steam reforming reactor: A modelling and experimental approach. *International Journal of Hydrogen energy*. 41, 11577-11583.
- Dincer, I., C. Acar. (2015). Review and evaluation of hydrogen production method for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40, 11094-11111.
- Ghouse, J.H., T.A. Adams. (2013). A multi-scale dynamic two-dimensional heterogeneous model for catalytic steam methane reforming reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38, 9984-9999.
- Gunaseelan, V.N. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy*. 13, 83-114.
- Levent, M., D.J. Gunn and M. Ali El-Bousiffi. (2003). Production of hydrogen-rich gases from steam reforming of methane in an automatic catalytic microreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 28, 945-959.
- Rostrup-Nielsen, J.R. (1984). Catalytic steam reforming. In Anderson, J.R. and Boudart, M. (Ed.), *Catalysis Science and Technology*. (pp. 1-117). Berlin: Springer-Verlag.
- Rostrup-Nielsen, J.R., L.J. Christiansen and J.-H. Bak Hansen. (1988). Activity of steam reforming catalysts: role and assessment. *Applied Catalysis*. 43, 287-303.
- Twigg, M.V. (1996). *Catalyst Handbook* (2nd ed.). London: Manson Publishing Ltd.
- Villacampa, J.I., C. Royo, E. Romeo, J.A. Montoya, P. Del Angel, A. Monzon. (2003). Catalytic decomposition of methane over Ni-Al₂O₃ coprecipitated catalysts: Reaction and regeneration studies. *Applied catalysis A: General*. 252, 363-383.



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8
“Research 4.0 Innovation and Development SSRU’s 80th Anniversary”

Wang, F., B. Qi, G. Wang, L. Li. (2013). Methane steam reforming: Kinetics and modeling over coating catalyst in micro-channel reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38, 5693-5704.

Xu, J. and G.F. Froment. (1989). Methane steam reforming, methanation and water-gas shift. I. Intrinsic kinetics. *AIChE Journal*. 35, 88-96.