กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา

ชนวีร์ ฉิมสิทธิ์
นิรุต เปี่ยมเนินกุ่ม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา

ชนวีร์ ลิขสิทธิ์
นิรุต เปี่ยมเนินกุ่ม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYDROGEN PRODUCTION WITH IN SITU CARBON DIOXIDE REMOVAL

Chonnawee Likkasit

Nirut Piemnernkoom

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป พร้อมการทำปฏิกิริยา

โดย นายชนวีร์ ลิขสิทธิ์
นายนิรุต เปี่ยมเนินกุ่ม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ญาณีพร พัชรวรโชติ
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ญาณีพร พัชรวรโชติ)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(ผศ.รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา
จัดทำโดย	นายชนวีร์ ลิขสิทธิ์ รหัสประจำตัว 53010295
	นายนิรุต เปี่ยมเนินกุ่ม รหัสประจำตัว 53010861
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ญาณีพร พัชรวรโชติ
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา โดยการจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แล้ววิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้ซอฟแวร์ AspenPlus™ เพื่อจำลองกระบวนการ การวิเคราะห์ใช้วิธีการหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Minimization of Gibbs free energy) ในการคำนวณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุล มีการจำลองกระบวนการทั้งกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้และพลังงานที่ใช้ระหว่างสองกระบวนการ ตัวแปรสภาวะที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ (700 – 1,200 เคลวิน) ความดัน (1 – 21 บาร์) และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน (1 – 12) จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า ความดันที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองกระบวนการคือความดันต่ำ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีการดูดซับคือ 850 เคลวิน ซึ่งน้อยกว่ากระบวนการแบบปกติที่ใช้ 1,000 เคลวิน โดยที่อุณหภูมินี้กระบวนการที่มีการดูดซับสามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่ากระบวนการแบบปกติ อัตราส่วนการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมคือ 6 และ 5 สำหรับกระบวนการแบบปกติและที่มีการดูดซับตามลำดับ ข้อได้เปรียบของกระบวนการที่มีการดูดซับคือ ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูงกว่าร้อยละ 99 โดยโมล (dry basis) ซึ่งสามารถผลิตได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (700 – 900 เคลวิน) ในขณะที่กระบวนการปกติได้ความบริสุทธิ์สูงสุดเพียงร้อยละ 78 โดยโมล (dry basis) และจากการวิเคราะห์ทางพลังงานที่ใช้พบว่ากระบวนการที่มีการดูดซับต้องการพลังงานน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่ากระบวนการที่มีการดูดซับสามารถปรับปรุงและพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Hydrogen production with *in situ* carbon dioxide removal
By	Mr. Chonnawee Likkasit ID.NO. 53010295
	Mr. Nirut Piemnernkoom ID.NO. 53010861
Advisor	Dr. Yaneeporn Patcharavorachot
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering
	Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	2013

ABSTRACT

In this work, the hydrogen production with *in situ* carbon dioxide removal was studied by simulation of sorption-enhanced steam methane reforming. The thermodynamics analysis was performed on both conventional steam methane reforming (SMR) and sorption-enhanced steam methane reforming (SESMR) in order to compare between each process. The AspenPlus™ simulation software was used to calculate the equilibrium compositions of the products based on the minimization of Gibbs free energy method. The effect of operating conditions, i.e. temperature (700 – 1,200 K), pressure (1 – 21 bar) and steam to methane ratio, S/M (1 – 12) was examined to determine their effect to hydrogen production and energy used. The simulation results show that low pressure is suitable for both processes. The most favorable temperature for SESMR is 850 K which is 150 K lower than SMR process (1,000 K) and capable of producing hydrogen more than SMR processes. The appropriate S/M is 6 and 5 for SMR and SESMR respectively. The advantage of SESMR is the purity of hydrogen product which is over 99 %mole (dry basis) and can be achieved at 700 – 900 K compared to SMR process in which the highest purity is 78 %mole (dry basis). Furthermore, the energy analysis shows that SESMR process requires less energy than SMR process. All results indicate that SESMR process could be the solution for improving the hydrogen production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยานี้ประสบความสำเร็จอย่างสมบูรณ์และลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความกรุณาและความอนุเคราะห์ของ ดร.ญาณีพร พัชรวรโชติ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์และช่วยแนะนำแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความมุ่งมั่น ตั้งใจ เอาใจใส่เป็นอย่างดี และสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน ทั้งนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับทุกเวลาอันมีค่าของอาจารย์ที่ได้มอบให้ เพื่อช่วยดำเนินงานปริญญานิพนธ์นี้ นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ อาจารย์ผู้ให้คำแนะนำในส่วนของการดำเนินงาน สำหรับทุกความตั้งใจและความกรุณาของอาจารย์ที่มีต่อลูกศิษย์

ตลอดระยะการดำเนินงานปริญญานิพนธ์นี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ให้ความรัก เมตตา กรุณา ความห่วงใยและกำลังใจต่อผู้จัดทำจนสำเร็จ ตลอดจนคอยสั่งสอนและตักเตือน ทำให้ผู้จัดทำมีความตั้งใจ มุ่งมั่นและรับผิดชอบ

ทุกประโยชน์และความดีของปริญญานิพนธ์นี้ ขอมอบให้เป็นเครื่องบูชาบิดา มารดาและอาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบความรู้และคำสอนแก่ผู้จัดทำจนสามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ที่จำเป็น คำสั่งสอนที่สำคัญ และคำปรึกษาที่ดี มาตลอดระยะเวลาการศึกษา

ชนวีร์ ลิขสิทธิ์
นิรุต เปี่ยมเนินกุ่ม
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป IX

สัญลักษณ์ XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ 3

1.3 ขอบเขตการศึกษา 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ไฮโดรเจน 4

2.2 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน 5

2.3 มีเทน 7

2.4 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป พร้อมกับการทำปฏิกิริยา 8

2.5 การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 8

2.6 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ 9

2.7 แคลเซียมออกไซด์ 10

2.8 การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยวิธี Minimization of Gibbs free energy 10

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 15

3.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ 15

3.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 17

3.3 การจำลองกระบวนการ 19

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ 27

4.1 การเลือก Physical property methods สำหรับการจำลองกระบวนการ 21

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ 22

4.3 การศึกษาหาสภาวการณ์ดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (Steam methane reforming, SMR) 27

4.4 การศึกษาหาสภาวการณ์ดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorption-enhanced steam methane reforming, SESMR) 31

4.5 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 37

บทที่ 5 สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ 42

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ 42

5.2 ข้อเสนอแนะ 44

เอกสารอ้างอิง 45

ภาคผนวก ก 47

ภาคผนวก ข 56

ภาคผนวก ค 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนในแต่ละกระบวนการ 7

2.2 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการใช้พร้อมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ 10

3.1 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ 19

3.2 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ 20

4.1 ผลการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ B. Balasubramanian และคณะ 25

4.2 ผลการจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ B. Balasubramanian และคณะ 26

4.3 ผลการจำลองกระบวนการและผลการทดลองในช่วง Prebreakthrough ของ B. Balasubramanian และคณะ 26

4.4 ผลการจำลองกระบวนการและผลการทดลองในช่วง Postbreakthrough ของ B. Balasubramanian และคณะ 26

5.1 สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการ และผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมดังกล่าว 43

ก.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะเริ่มต้นอุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 และความดัน 1 บาร์ 48

ก.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 50

ก.3 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์ 51

ก.4 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ก.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละโดยโมลของสารต่างๆ (dry basis) ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 และความดัน 1 บาร์ 53

ก.6 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสมอุณหภูมิ 1,000 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 และความดัน 1 บาร์ 54

ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะเริ่มต้นอุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง 57

ข.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 59

ข.3 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์ 60

ข.4 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 61

ข.5 ผลของอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 และความดัน 1 บาร์ 62

ข.6 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละโดยโมลของสารต่างๆ (dry basis) ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 5 และความดัน 1 บาร์ 63

ข.7 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสมอุณหภูมิ 850 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 5 ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง 64

ค.1 อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการทั้งสองแบบที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ 67

ค.2 ภาระความร้อนของเครื่อง HEATER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนและอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ค.3 ภาระของเครื่อง REFORMER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์ 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปริมาณพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงต่างๆ	4
3.1	กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ	15
3.2	กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	17
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ได้ผลิตได้จาก Physical property methods กับอุณหภูมิที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 2	22
4.2	แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง	23
4.3	ผลการทดลองจากเครื่องปฏิกรณ์	24
4.4	ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3	28
4.5	ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์	29
4.6	ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3	30
4.7	ผลของอุณหภูมิต่อความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6	31
4.8	ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3	32
4.9	ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์	33
4.10	ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3	34
4.11	ผลของอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ โดยอุณหภูมิ 900 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.12 ผลของอุณหภูมิต่อความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 36
4.13 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการทั้งสองแบบที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนแตกต่างกันและความดัน 1 บาร์ 37
4.14 ภาระความร้อนของเครื่อง HEATER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์ 39
4.15 ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์ 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

a_{ji}	จำนวนอะตอมของธาตุ j ในองค์ประกอบ i
b_j	จำนวนอะตอมของธาตุ j ในสารตั้งต้น
G	ค่า Gibbs free energy ทั้งหมดของระบบ
ΔG^f	Standard Gibbs free energy of formation
n	ปริมาณเชิงโมลขององค์ประกอบทั้งหมด
n_i	จำนวนโมลขององค์ประกอบ i ในระบบ
n_T	จำนวนโมลรวมขององค์ประกอบในระบบ
P	ความดัน (bar)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (J/K·mol)
S	เอนโทรปี
T	อุณหภูมิ (K)
V	ปริมาตร
y	เศษส่วนโดยโมล
μ	ศักย์ทางเคมี
λ	ตัวคูณลากรองจ์
$\hat{\phi}$	สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตี้ของแก๊สผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ไฮโดรเจนมีความสำคัญต่อหลายอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมเคมีใช้ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น กระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เพื่อผลิตแอมโมเนียจากไนโตรเจน เป็นต้น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้ไฮโดรเจนในกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization) เพื่อกำจัดซัลเฟอร์ออกจากแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับอนาคตเพื่อใช้ในยานพาหนะ เนื่องจากพลังงานจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด เมื่อเผาไหม้แล้วให้ความร้อนและไอน้ำเป็นผลพลอยได้ จึงไม่เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ไฮโดรเจนยังมีค่าพลังงานความร้อน (Heating value) สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น [1-3] จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น แต่อีกหนึ่งบทบาทที่สำคัญของไฮโดรเจนในอนาคตคือ ใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นหนึ่งทางเลือกที่กำลังได้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์อื่นๆ [2]

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 3 กระบวนการ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming) โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในปัจจุบัน เนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนมากกว่ากระบวนการอื่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับสารไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น มีเทน โพรเพน เมทานอล และเอทานอล เป็นต้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและผลพลอยได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถือเป็นสารปนเปื้อนในไฮโดรเจนที่ผลิตได้ กระบวนการผลิตไฮโดรเจนจึงต้องประกอบด้วย 2 ส่วนคือ กระบวนการผลิตและกระบวนการทำให้ไฮโดรเจนมีความบริสุทธิ์ โดยในปัจจุบันการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคการดูดซึม (Absorption) เทคนิคการดูดซับ (Adsorption) เทคนิคไครโอเจนิค (Cryogenics) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (Selective permeable membrane) ซึ่งการเลือกเทคโนโลยีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแก๊สผสมที่เกิดขึ้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากประโยชน์อันหลากหลายและคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของไฮโดรเจนทำให้ปริมาณความต้องการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เช่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อนสูงมาก (Highly endothermic reaction) จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงและพลังงานจำนวนมากในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนมาก และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics equilibrium) [5-10] ผลผลิตไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณจำกัด เป็นต้น นอกจากนี้ความบริสุทธิ์ของแก๊สไฮโดรเจนก็ยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่คำนึงถึง เพราะในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเสมอ ปริญญานิพนธ์สนใจศึกษาการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกับกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการหลังจากผลิตไฮโดรเจนได้แล้ว แต่ในการศึกษาการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเลือกวิธีที่สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในอุณหภูมิสูงเพื่อปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งวิธีที่มีความเป็นไปได้คือวิธีการดูดซับ โดยตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงคือ แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) โดยแคลเซียมออกไซด์มีข้อดีคือ มีราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย [5,6,11-14]

การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาจะเป็นการรบกวนสมดุลทางเคมีให้เลื่อนไปทางด้านผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำลงซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงาน นอกจากนี้ยังเป็นการรวมการผลิตและการทำให้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ไว้ในระบบเดียวกันจึงช่วยลดต้นทุนในการผลิต [5,6,8,9,14] โดยปริญญานิพนธ์นี้จะพัฒนากระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจากซอฟแวร์จำลองกระบวนการ AspenPlus™ โดยออกแบบและพัฒนาแบบจำลองกระบวนการ จากการใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor model) ในซอฟแวร์มาพัฒนา เพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการดูดซับไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา (Adsorptive reactor) ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะใช้ศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการดึงแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา และศึกษาตัวแปร (อุณหภูมิและความดันที่ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อไฮโดรคาร์บอนที่ใช้) ที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้และพลังงานที่ใช้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา โดยใช้ซอฟแวร์จำลองกระบวนการ AspenPlus™
2. จำลองกระบวนการจากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นและจากนั้นจึงนำผลการจำลองที่ได้ไปเปรียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
3. ศึกษาหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการนี้ โดยใช้แบบจำลองซึ่งผ่านการตรวจสอบกับข้อมูลการทดลอง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ และอัตราการป้อนตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา
2. ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับกระบวนการนี้ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการใช้ปรับปรุงกระบวนการได้
3. สามารถปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตไฮโดรเจน โดยการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

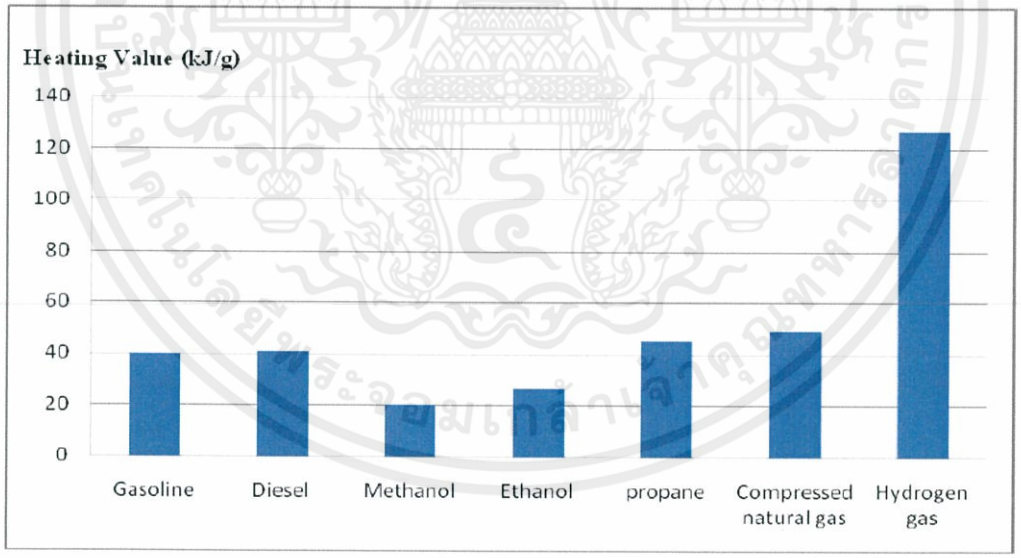
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจน

2.1.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจน [1,2]

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและเป็นองค์ประกอบของน้ำซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลก เป็นโมเลกุลที่สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยบรรยากาศของโลกมีแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน แก๊สไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้า จากรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงต่างๆ ต่อปริมาณ 1 กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนมีพลังงานความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนั้นการเผาไหม้ไฮโดรเจนจะไม่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้การนำแก๊สไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะช่วยลดสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันได้



รูปที่ 2.1 ปริมาณพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงต่างๆ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ประโยชน์ของไฮโดรเจน [1-4]

ไฮโดรเจนถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากเมื่อนำไฮโดรเจนไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือกระบวนการเผาไหม้ จะทำให้เกิดผลพลอยเป็นไอน้ำจึงไม่เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม แตกต่างจากเชื้อเพลิงอื่นๆ ซึ่งเมื่อเผาไหม้จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) ส่งผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming effect)

ในปัจจุบันไฮโดรเจนนั้นมีความสำคัญต่อหลายอุตสาหกรรม ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมหรือปิโตรเคมี ไฮโดรเจนจะถูกใช้ในการกำจัดสารซัลเฟอร์ในน้ำมันเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และแก๊สธรรมชาติ กระบวนการนี้เรียกว่าไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องจากซัลเฟอร์เป็นสารก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อุตสาหกรรมอาหารใช้ไฮโดรเจนเป็นสารเติมแต่ง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัว สำหรับผลิตเนยขาว เนยเทียม เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการใช้ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ในการผลิตสารประกอบแอมโมเนีย และเมทานอล ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation)

ในปัจจุบันไฮโดรเจนกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาผลิตไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านและยังมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือ มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จัดเป็นพลังงานสะอาด เนื่องจากผลพลอยที่ได้จากปฏิกิริยาคือน้ำ ดังนั้นไฮโดรเจนจึงจัดเป็นพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพสูงในการทดแทนแหล่งพลังงานจากปิโตรเลียม

2.2 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน [1-4]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลักคือ กระบวนการทางความร้อน (Thermal process) กระบวนการทางไฟฟ้า (Electrolytic process) และกระบวนการทางแสง (Photolytic process) โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีที่นิยมคือ กระบวนการทางความร้อนเนื่องจากกระบวนการทางไฟฟ้าและแสงยังอยู่ในขั้นวิจัยและมีประสิทธิภาพในการผลิตที่ต่ำกว่ากระบวนการทางความร้อน สำหรับกระบวนการทางความร้อนมี 3 แบบคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal refroming) โดยรายละเอียดของแต่ละกระบวนการมีดังนี้

1) กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่นิยมใช้มากที่สุดในเชิงพาณิชย์เนื่องจากให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ โดยสารตั้งต้นที่ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น มีเทน ซึ่งพบได้ในแก๊สธรรมชาติ เอทานอล จากกระบวนการหมัก เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับ

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย 1) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูงๆ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน 2) ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพต์ (Water-gas shift) โดยไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$C_nH_m + nH_2O \rightleftharpoons nCO + \left(\frac{m}{2} + n\right)H_2 \qquad (2.1)$$

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \qquad (2.2)$$

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (สมการที่ (2.1)) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและเนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบผันกลับได้ ซึ่งถูกควบคุมด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics equilibrium) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงจึงต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 700 –1,100 องศาเซลเซียส) ทำให้ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนนั้นสูงตามไปด้วย ส่วนปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพ (สมการที่ (2.2)) นั้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จึงสามารถเกิดได้ดีในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นไปพร้อมๆ กันในเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียกว่า รีฟอร์มเมอร์ โดยเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นหลักและควบคู่กับปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพ

2) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนหรือบางครั้งเรียกว่าแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อนในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน สารตั้งต้นที่นิยมใช้มักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊สมีเทน หรือเอทานอล เป็นต้น โดยทั่วไปปฏิกิริยานี้จะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนจะได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนแบบปานกลาง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพเท่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เนื่องจากได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้น้อยกว่า

$$C_nH_m + \left(\frac{n}{2}\right)O_2 \rightleftharpoons nCO + \left(\frac{m}{2}\right)H_2 \qquad (2.3)$$

สมการที่ (2.3) แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนโดยจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่าต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ใช้ให้เหมาะสม ถ้าไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ ทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.4)

$$C_nH_m + \left(n+\frac{m}{4}\right)O_2 \rightleftharpoons nCO_2 + \left(\frac{m}{2}\right)H_2O \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming)

เป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและออกซิเดชันบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการใหม่ที่นำข้อดีของแต่ละกระบวนการมารวมไว้ด้วยกัน โดยการใช้ทั้งไอน้ำและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนเป็นแบบคายความร้อนจึงช่วยลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันกระบวนการนี้ยังไม่เป็นแพร่หลายและยังอยู่ในขั้นวิจัย ปฏิกิริยาออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงแสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$C_nH_m + \frac{n}{2}H_2O + \frac{n}{4}O_2 \rightleftharpoons nCO + \frac{(m+n)}{2}H_2 \qquad (2.5)$$

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนในแต่ละกระบวนการ [2-4]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)	• ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูง • ใช้อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์	• ต้องใช้พลังงานสูงในการทำปฏิกิริยา • เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก
ออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation)	• ปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้อย่างรวดเร็ว • ปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน	• ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้น้อย • ต้องควบคุมปริมาณอากาศให้มีความพอดี
ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming)	• อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่ำกว่าการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ • ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากกว่าการออกซิเดชันบางส่วน	• กระบวนการอยู่ในขั้นวิจัย

2.3 มีเทน (Methane) [2,15]

มีเทนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลเคน (Alkane) มีสูตรทางเคมีคือ CH_4 ที่อุณหภูมิห้องมีสภาวะเป็นแก๊สไม่มีสีและกลิ่น สามารถติดไฟได้ แก๊สมีเทนพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในแก๊สธรรมชาติ นอกจากนั้นมีเทนยังสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ซึ่งเรียกว่า แก๊สชีวภาพ (Biogas)

เนื่องจากสามารถหามีเทนได้ง่ายและผลิตได้จากการหมักของสารอินทรีย์ จึงถือเป็นพลังงานหมุนเวียน เป็นสาเหตุให้กระบวนการรีฟอร์มมิงส่วนใหญ่จึงนิยมใช้มีเทนเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงสนใจการศึกษากระบวนรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา [5-9,14]

ปัจจุบันกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) เนื่องจากได้ปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุด นอกจากนั้นสารตั้งต้นที่ใช้มีความหลากหลายและสามารถหาได้ง่าย เช่น มีเทน โพรเพน เมทานอล เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ เพราะมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติ อย่างไรก็ตามกระบวนการรีฟอร์มมิงยังมีข้อจำกัด เป็นผลมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพถูกจำกัดด้วยผลของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics equilibrium) ทำให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนจำกัด โดยแก๊สผสมที่ออกจากรีฟอร์มเมอร์ประกอบด้วยไฮโดรเจนร้อยละ 76 มีเทนร้อยละ 13 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 12 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 (dry basis) และเพื่อให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มาก ต้องใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง ส่งผลให้กระบวนการนี้ต้องการพลังงานมากและเครื่องรีฟอร์มเมอร์ต้องใช้เหล็กอัลลอยด์ (Metal alloy) ซึ่งทนความร้อนสูง ทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อรองรับความต้องการในการใช้ไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นในอนาคต จึงควรมีการปรับปรุงกระบวนรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้ โดยทั่วไปมีคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบอยู่ด้วยประมาณร้อยละ 10 โดยโมล (dry basis) [3] การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาจะเป็นการรบกวนสมดุล ทำให้สมดุลเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ เพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ตามหลักของเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier's principle) นอกจากนั้นการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาจะเป็นการรวมกระบวนการผลิตและทำให้มีความบริสุทธิ์ไว้ในกระบวนการเดียวกัน ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้

2.5 การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [4-6,11]

การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจะมีผลพลอยได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (สมการที่ (2.2)) การนำไฮโดรเจนนี้ไปใช้ต่อ เช่น การนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจำเป็นต้องมีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์นี้บริสุทธิ์ ในปัจจุบันการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลายวิธี เช่น การดูดซึมด้วยสารเคมี (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) วิธีไครโอจีนิค (Cyrogenics) และการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (Selective permeable membrane) สำหรับการเลือกใช้วิธีแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะพิจารณาจากลักษณะของแก๊สผสมที่เกิดขึ้น โดยปกติกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการต่อจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนหรือรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ซึ่งกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมประยุกต์ใช้กับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) กระบวนการดูดซึมทางเคมี สำหรับสารเคมีที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์คือโมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine, MEA) ข้อดีของกระบวนการดูดซึมคือ ความสามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ระบบมีขนาดใหญ่และต้องใช้พลังงานสูงในการดำเนินการ

2) กระบวนการดูดซับ เช่น กระบวนการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing adsorption, PSA) สามารถทำให้ไฮโดรเจนมีความบริสุทธิ์สูง ข้อดีของกระบวนการคือ ดำเนินการได้ง่าย ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่มีข้อเสียคือ ตัวดูดซับจะเสื่อมประสิทธิภาพเมื่อผ่านการใช้งานหลายครั้ง เนื่องจากตัวดูดซับต้องผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

ในปริญญานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้วิธีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถดำเนินการพร้อมกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจนได้

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำมีอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูง ซึ่งจากการทบทวนงานวิจัยพบว่าวิธีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถนำมาใช้ประกอบกับการผลิตไฮโดรเจนคือ 1) การดูดซับด้วยตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเติมตัวดูดซับเข้าไปบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา 2) การเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรนเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา สำหรับปริญญานิพนธ์นี้สนใจการใช้วิธีการดูดซับในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorption-enhanced steam reforming)

2.6 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ [5,6,11]

สำหรับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำทำได้โดยการเติมตัวดูดซับเข้าไปบริเวณที่มีการทำปฏิกิริยาหรือภายในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงตัวดูดซับที่สามารถนำมาใช้ประกอบกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในช่วงอุณหภูมิ 450 – 650 องศาเซลเซียส
- มีค่าการเลือก (Selectivity) ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง
- สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณที่มาก
- มีความเสถียรเมื่อผ่านการใช้งานและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)
- มีราคาถูก
- มีความทนทานและแข็งแรงในการใช้งาน
- ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดและคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อย

สำหรับตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติดังกล่าวประกอบไปด้วยตัวดูดซับที่พบได้ตามธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการใช้พร้อมกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ [5]

	ชนิดของตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับ (g CO_2 / g ตัวดูดซับ)	อุณหภูมิที่ใช้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ (องศาเซลเซียส)
ตัวดูดซับที่พบได้ตามธรรมชาติ	Calcium carbonate ($CaCO_3$)	0.79	900
	Dolomyte ($CaCO_3$ x $MgCO_3$)	0.46	900
	Huntite ($CaCO_3$ x $3MgCO_3$)	0.25	900
	Hidrotalcite, promoted K_2CO_3 / Hydrotalcite	0.029	400
ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น	Lithium orthosilicate (Li_4SiO_4)	0.37	750
	Lithium zirconate (Li_2ZrO_3)	0.29	690
	Sodium zirconate (Na_2ZrO_3)	0.24	790

2.7 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) [5,6,11-13]

แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่พบได้ตามธรรมชาติ และสามารถผลิตได้จากการเผาหินปูน (Limestone) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสจะได้เป็นแคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว (Lime) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (2.5)

$$CaCO_{3(s)} \xrightarrow{900^{\circ}C} CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \qquad (2.6)$$

ข้อดีของแคลเซียมออกไซด์คือ มีราคาไม่แพง หาได้ง่ายและสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง นอกจากนั้นปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดได้ดีขึ้นและช่วยลดพลังงานที่ต้องให้กับเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิได้ ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons CaCO_{3(s)} \qquad \Delta H^{0}_{298} = -178 \text{ kJ/mol} \qquad (2.7)$$

2.8 การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาองค์ประกอบของสารที่สภาวะสมดุล [7,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใช้การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยการคำนวณหาองค์ประกอบของสารต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์นี้สามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์แบบ Stoichiometric เป็นการ

แก้สมการปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ของระบบ ซึ่งต้องมีการกำหนดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วคำนวณหาองค์ประกอบของสารโดยใช้สมดุลทางเคมี 2) การวิเคราะห์แบบ Non-stoichiometric เป็นการวิเคราะห์โดยทำให้ปริมาณพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) ของระบบมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะได้ปริมาณองค์ประกอบของสารต่างๆ ที่สภาวะสมดุลนี้ออกมา การใช้วิธีนี้ต้องมีการกำหนดองค์ประกอบของสาร

สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ใช้วิธีแบบ Non-stoichiometric หรือการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุด (Minimization of Gibbs free energy) ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารที่สมดุล เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยา การใช้วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องกำหนดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่ต้องระบุองค์ประกอบของสารในระบบให้ครบถ้วนเพื่อความถูกต้องของการวิเคราะห์

สำหรับพลังงานอิสระกิบส์ทั้งหมดของระบบ (G) จะมีปริมาณขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ความดัน (P) และปริมาณเชิงโมลขององค์ประกอบทั้งหมด (n) ในระบบ ดังสมการที่ (2.8)

$$G = G(T, P, n) \tag{2.8}$$

จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานอิสระกิบส์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ตามสมการที่ (2.9)

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{i=1}^{N} \mu_i dn_i \tag{2.9}$$

โดย S คือ เอนโทรปี, V คือ ปริมาตร, n_i คือ จำนวนโมลขององค์ประกอบ i ในระบบและ μ_i คือ ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ i ถ้าในระบบมีความดันและอุณหภูมิที่คงที่ จะได้ว่า

$$dG = \sum_{i=1}^{N} \mu_i dn_i \tag{2.10}$$

จากสมการที่ (2.10) ค่าพลังงานอิสระกิบส์ทั้งหมดของระบบจะเท่ากับ

$$G = \sum_{i=1}^{N} \mu_i n_i \tag{2.11}$$

ในการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุด จะต้องมีการเพิ่มเงื่อนไขจากการดุลธาตุในระบบ ดังสมการที่ (2.12)

$$\sum_{i=1}^{N} a_{ji} n_i = b_j, \quad j = 1, \ldots, M \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a_{ji} คือจำนวนอะตอมของธาตุ j ในองค์ประกอบ i และ b_j คือจำนวนอะตอมของธาตุ j ในสารตั้งต้น และจากการเพิ่มตัวคูณลากรองจ์ (Lagrangian multipliers) λ_j จะได้ฟังก์ชันใหม่ G' เป็น

$$G' = \sum_{i=1}^{N} \mu_i n_i + \sum_{j=1}^{M} \lambda_j \left(\sum_{i=1}^{N} a_{ji} n_i - b_j \right) \tag{2.13}$$

การหาปริมาณองค์ประกอบที่ทำให้ค่า G' มีค่าน้อยที่สุด สามารถทำได้โดยกำหนดให้ค่าอนุพันธ์ของ G' เทียบกับ n_i มีค่าเท่ากับ 0 จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial G'}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j \neq i} = \mu_i + \sum_{j=1}^{M} \lambda_i a_{ji} = 0, \quad i = 1,...,N \tag{2.14}$$

สำหรับระบบที่เป็นแก๊ส สมการที่ (2.14) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\Delta G_i^f + RT \ln y_i P + RT \ln \hat{\phi}_i + \sum_{j=1}^{M} \lambda_i a_{ji} = 0, \quad i = 1,...,N \tag{2.15}$$

หรือ

$$\Delta G_i^f / RT + \ln \left(\frac{n_i}{n_T} \right) + \ln P + \ln \hat{\phi}_i + \sum_{j=1}^{M} \lambda_i a_{ji} / RT = 0, \quad i = 1,...,N \tag{2.16}$$

โดย $\hat{\phi}$ คือสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตี้ของแก๊สผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการสภาวะ, y_i คือ เศษส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ i, ΔG_i^f คือ Standard Gibbs free energy of formation โดยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ, R คือค่าคงที่ของแก๊สและ n_T คือจำนวนโมลทั้งหมดขององค์ประกอบในระบบ คำนวณได้จากสมการที่ (2.17)

$$n_T = \sum_{i=1}^{N} n_i, \quad i = 1,...,N \tag{2.17}$$

สมการที่ (2.12), (2.16) และ (2.17) แทนสมการแบบ Non-linear จำนวน $(N+M+1)$ สมการ ซึ่งสามารถแก้สมการเพื่อคำนวณหาค่า y_i, λ_i และ n_i ที่สภาวะสมดุลของระบบ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. Balasubramanian และคณะ (1999) [14] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการเพิ่มตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบ โดยทำการทดลองด้วยชุดเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องทดลองและตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้คือแคลเซียมออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราส่วนไอน้ำต่อมีเทนที่ป้อนและปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซับที่ใส่ ซึ่งผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วงที่ไม่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะแคลเซียมออกไซด์อิ่มตัวทำให้ไม่สามารถดูดซับได้อีกต่อไป ผลการทดลองพบว่าแคลเซียมออกไซด์จะช่วยดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งส่งผลทำให้ไฮโดรเจนเกิดมากกว่าในช่วงที่ไม่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 30 โดยโมล เมื่อเทียบกับช่วงที่ไม่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

L. Barelli และคณะ (2007) [5] ได้ทำการรวบรวมและทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้เมมเบรน โดยในงานวิจัยประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำและแนวทางการพัฒนากระบวนการนี้ เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำของมีเทนยังมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เช่น กระบวนการนั้นต้องใช้อุณหภูมิสูงทำให้ต้องใช้ท่อเหล็กอัลลอยด์สำหรับเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งมีราคาแพง เป็นต้น แนวทางการปรับปรุงกระบวนการที่งานวิจัยนี้ได้นำเสมอนั้นประกอบด้วย 2 แนวทางคือ การใช้เมมเบรนในการแยกผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาและการใส่ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา ซึ่งทั้งสองแนวทางนี้ใช้หลักการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา โดยการแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกไป เพื่อให้สมดุลปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวดูดซับที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ คือ แคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในอุณหภูมิที่สูงและมีราคาถูก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการใส่แคลเซียมออกไซด์เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

H. Chen และคณะ (2009) [7] ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา โดยได้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ประกอบด้วย ความดัน อุณหภูมิ อัตราส่วนของไอน้ำที่ป้อนต่อกลีเซอรอล และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกออก ในการวิเคราะห์นั้นใช้วิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้หลักการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาช่วยเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการดึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดนั้นอยู่ในช่วง 800 – 850 เคลวิน ซึ่งน้อยกว่ากระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ไม่มีการดึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 100 เคลวิน ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคือ ช่วงความดันต่ำ และในส่วนของอัตราการป้อนไอน้ำต่อกลีเซอรอลที่เหมาะสมประมาณ 9.0

X. Wang และคณะ (2010) [9] ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีและไม่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สารตั้งต้นที่ใช้คือ โพรเพน (Propane) และตัวดูดซับที่ใช้คือ แคลเซียมออกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนประกอบด้วย อุณหภูมิ (700 – 1,100 เคลวิน) ความดัน (1 – 5 บรรยากาศ) และอัตราส่วนไอน้ำที่ป้อนต่อโพรเพน (1 – 18) การวิเคราะห์ใช้วิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้หลักการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์พบว่าความดันต่ำเหมาะสมต่อกระบวนการทั้งสอง อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อโพรเพนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทั้งสองแบบคือ 12 สำหรับกระบวนการที่ไม่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 950 เคลวิน ซึ่งสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 9.1 โมลจากโพรเพน 1 โมล ในส่วนของกระบวนการที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 825 เคลวิน (น้อยกว่ากระบวนการที่ไม่มีการดูดซับ 125 เคลวิน) โดยที่สภาวะนี้สามารถผลิตไฮโดรเจนได้เกือบ 10 โมล ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดตามทฤษฎี นอกจากนั้นไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยโมล (dry basis) เมื่อเทียบกับไฮโดรเจนจากกระบวนการที่ไม่มีการดูดซับซึ่งมีความบริสุทธิ์เพียงร้อยละ 74 โดยโมล (dry basis)

D. Saebea และคณะ (2011) [8] ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเอทานอล (Ethanol) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนการป้อนของไอน้ำต่อเอทานอล และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกออก การวิเคราะห์กระบวนการใช้หลักเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อคำนวณองค์ประกอบต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับกระบวนการที่ไม่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ออกจะได้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 673 – 973 เคลวิน และได้ปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน ผลของความดันพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้ลดลง ดังนั้นความดันที่เหมาะสมคือช่วงความดันที่ต่ำ สำหรับอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อเอทานอลที่เหมาะสมนั้นอยู่ประมาณ 3.0 สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยาพบว่าเมื่อปริมาณการแยกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อปริมาณการแยกคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 80 จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เท่ากับ 3.7 โมลต่อวินาที เพิ่มจาก 3.4 โมลต่อวินาทีซึ่งเป็นปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการที่ไม่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (สภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนไอน้ำต่อเอทานอลที่ป้อน 3.0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

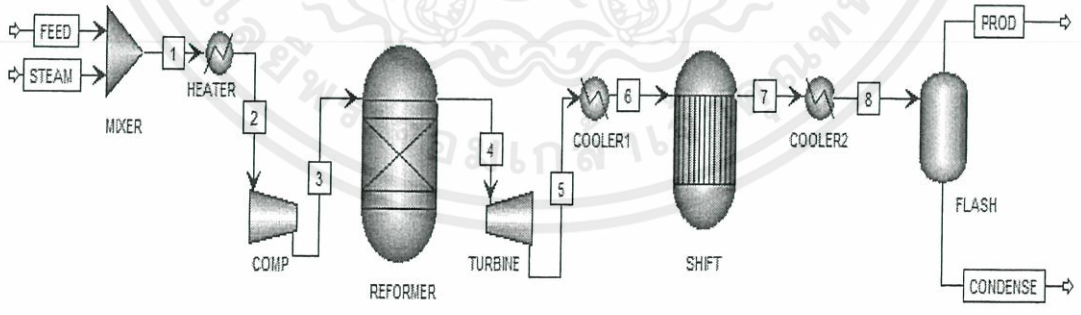
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้สนใจออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับการทำปฏิกิริยาโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการ AspenPlus™ เพื่อศึกษากระบวนการ วิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆ และหาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง ขั้นตอนในการดำเนินงานเริ่มจากการออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการที่ออกแบบมี 2 แบบ ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (หัวข้อที่ 3.1) และกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (หัวข้อที่ 3.2) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบจะใช้เปรียบเทียบระหว่าง 2 กระบวนการ เพื่อวิเคราะห์หากระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการผลิตไฮโดรเจน

3.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ

สำหรับกระบวนการที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในการศึกษาจะประกอบไปด้วยเครื่องปฏิกรณ์ 2 ตัว ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำเป็นหลักหรือเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) และเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟเป็นหลักหรือเครื่องชิฟ (Shift reactor) กระบวนการสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทนแบบปกติ

จากแผนภาพกระบวนการรูปที่ 3.1 สารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยมีเทนและไอน้ำจะถูกเพิ่มอุณหภูมิและความดันโดยเครื่อง HEATER และเครื่อง COMP ตามลำดับ เพื่อให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาในเครื่อง REFORMER และต่อจากนั้นจะถูกลดความดันและอุณหภูมิก่อนเข้าทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาต่อในเครื่อง SHIFT ซึ่งต้องการอุณหภูมิที่ต่ำในดำเนินการ และสุดท้ายจึงได้ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ รายละเอียดของกระบวนการมีดังต่อไปนี้

3.1.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำจะประกอบไปด้วย มีเทนและไอน้ำ โดยทั่วไปมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติ (มากกว่าร้อยละ 95 โดยโมล) แต่ในปริญญานิพนธ์นี้สมมติให้มีเทนมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 หรือประกอบไปด้วยมีเทนอย่างเดียว สำหรับสภาวะเริ่มต้นของมีเทนประกอบด้วย อัตราการป้อน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ สำหรับไอน้ำที่ใช้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 อัตราการป้อน 3 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 102.1 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 สำหรับสภาวะการจำลองกระบวนการเริ่มต้น สารตั้งต้นทั้งสองจะป้อนเข้าสู่ MIXER เพื่อผสม จากนั้นจะถูกเพิ่มอุณหภูมิและความดันใน HEATER และ COMP ตามลำดับ ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ Reformer

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ REFORMER

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ Reformer จะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทน $$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \quad (3.1)$$

ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ $$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \quad (3.2)$$

ปฏิกิริยารวม $$CH_4 + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 4H_2 \quad (3.3)$$

ใน REFORMER มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยา ดังนั้นในการจำลองกระบวนการจึงเลือกใช้แบบจำลองเป็น RGibbs สภาวะเริ่มต้นของเครื่อง REFORMER ประกอบด้วยอุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์ และช่วงของอุณหภูมิและความดันที่ปรับเปลี่ยนจะเป็น 700 – 1,200 เคลวิน และ 1 – 21 บาร์ ตามลำดับ

3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ SHIFT

สารที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่เครื่อง REFORMER จะถูกลดความดันและอุณหภูมิลงที่เครื่อง TURBINE และ COOLER ตามลำดับ ให้เหลือความดัน 1 บาร์ และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อทำปฏิกิริยาต่อที่เครื่อง SHIFT ซึ่งเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (สมการที่ 3.2) เพียงอย่างเดียว แบบจำลองที่ในการจำลองกระบวนการคือ REquil ในการจำลองกระบวนการมีสภาวะคือ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

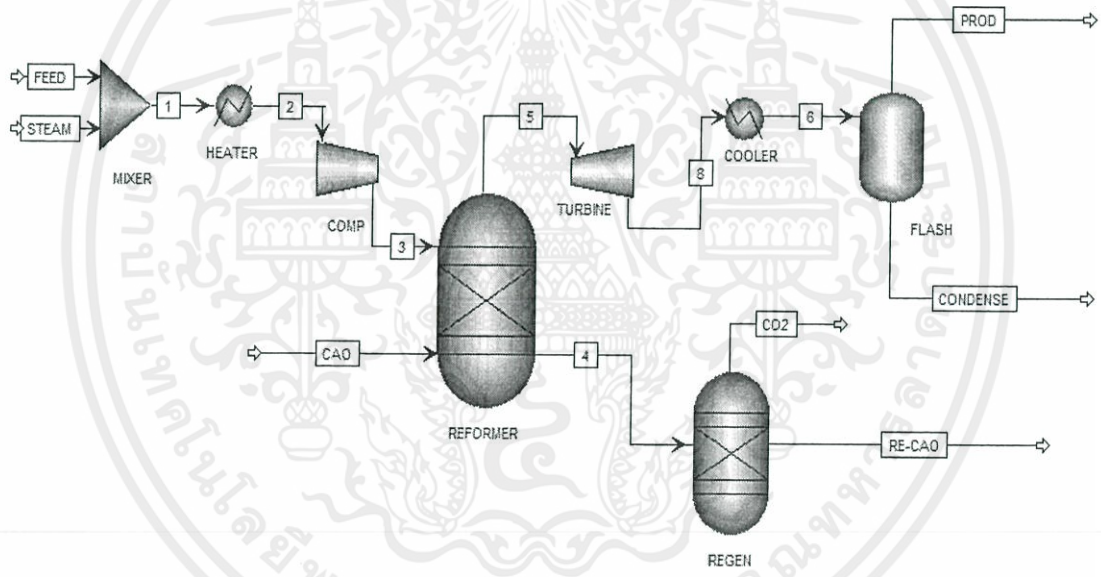
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 เครื่องแยกระหว่างของเหลวและแก๊ส (FLASH)

สารที่ออกจากเครื่อง SHIFT จะถูกลดอุณหภูมิที่ COOLER เพื่อให้ไอน้ำควบแน่นเป็นของเหลว และเกิดการแยกที่แฟลชดรัมหรือ FLASH ซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บาร์

3.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการในส่วนนี้จะมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ คือ มีเครื่องปฏิกรณ์หลักคือเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ซึ่งที่เครื่องปฏิกรณ์นี้มีความแตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์รีฟอร์มเมอร์แบบปกติคือ มีการเพิ่มตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิง นอกจากนั้นกระบวนการนี้ไม่มีเครื่องปฏิกรณ์วอเตอร์แก๊สชิพ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา โดยแผนภาพกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทนที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 3.2 สารตั้งต้นคือ มีเทนและไอน้ำจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการ ผ่านการเพิ่มอุณหภูมิและความดันให้มีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาที่เครื่อง REFORMER โดยที่เครื่องรีฟอร์มเมอร์จะมีการป้อนตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์เข้ามา และได้ผลิตภัณฑ์จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ แคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่หน่วยฟื้นฟูหรือเครื่อง REGEN เพื่อนำแคลเซียมออกไซด์กลับมาใช้ในการดูดซับต่อไป รายละเอียดกระบวนการมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 สารตั้งต้น

เช่นเดียวกับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ สารตั้งต้นที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเหมือนกันคือ มีเทนและไอน้ำ สภาวะเริ่มต้นที่ใช้เหมือนกันสำหรับมีเทน แต่สำหรับไอน้ำในกระบวนการนี้ใช้อัตราการป้อนเป็น 3 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงเป็นการกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 เป็นสภาวะเริ่มต้น

3.2.2 ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในการจำลองกระบวนการนี้ ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะป้อนเข้าสู่กระบวนการที่เครื่อง REFROMER สภาวะเริ่มต้นของตัวดูดซับที่ป้อนคือ อัตราการป้อน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิและความดันเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสและ 1 บาร์ตามลำดับ

3.2.3 เครื่อง REFORMER

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่อง REFORMER นี้ประกอบด้วย

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$ (3.1)

ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ (3.2)

ปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ $CaO + CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3$ (3.4)

ปฏิกิริยารวม $CH_4 + 2H_2O + CaO \rightleftharpoons CaCO_3 + 4H_2$ (3.5)

แบบจำลองที่เลือกใช้ในการจำลองกระบวนการเป็น RGibbs และสภาวะเริ่มต้นของการจำลองกระบวนการประกอบด้วยอุณหภูมิ 900 เคลวินและความดัน 1 บาร์ ช่วงอุณหภูมิและความดันที่ปรับเปลี่ยนคือ 700 – 1,200 เคลวินและ 1 – 21 บาร์

3.2.4 เครื่อง REGEN

เครื่อง REGEN ทำหน้าที่นำแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะอยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต กลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยผ่านการให้ความร้อน แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเป็น RGibbs สำหรับสภาวะที่ดำเนินการของเครื่อง REGEN ประกอบด้วยอุณหภูมิ 1,150 เคลวินและความดัน 1 บาร์

3.2.5 เครื่องแยกระหว่างแก๊สและของเหลว (FLASH)

สารที่ออกจากเครื่อง REFORMER จะถูกลดอุณหภูมิและความดันลงเพื่อแยกน้ำออกจากแก๊สผสมเหมือนกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติ เครื่อง FLASH จะดำเนินการที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจำลองกระบวนการ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการจำลองกระบวนการทั้ง 2 แบบคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์จากการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วยอุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนไอน้ำต่อมีเทนที่ป้อน ซึ่งส่งผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ วิธีการวิเคราะห์จะใช้วิธีการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณปริมาณสารต่างๆ จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แบบจำลองและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

ชื่อหน่วย	แบบจำลองที่ใช้	สภาวะเริ่มต้น	ช่วงสภาวะที่ปรับเปลี่ยน
MIXER	Mixer	-	-
HEATER	Heater	อุณหภูมิ 900 เคลวิน	อุณหภูมิ 700 – 1,200 เคลวิน
COMP	Compr	ความดัน 1 บาร์	ความดัน 1 – 21 บาร์
REFORMER	RGibbs	อุณหภูมิ 900 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	อุณหภูมิ 700 – 1,200 เคลวิน ความดัน 1 – 21 บาร์
TURBINE	Compr	ความดัน 1 บาร์	-
COOLER1	Heater	อุณหภูมิ 523.15 เคลวิน	-
SHIFT	REquil	อุณหภูมิ 523.15 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	-
COOLER2	Heater	อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน	
FLASH	Flash2	อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

ชื่อหน่วย	แบบจำลองที่ใช้	สภาวะเริ่มต้น	ช่วงสภาวะที่ปรับเปลี่ยน
MIXER	Mixer	-	-
HEATER	Heater	อุณหภูมิ 900 เคลวิน	อุณหภูมิ 700 – 1,200 เคลวิน
COMP	Compr	ความดัน 1 บาร์	ความดัน 1 – 21 บาร์
REFORMER	RGibbs	อุณหภูมิ 900 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	อุณหภูมิ 700 – 1,200 เคลวิน ความดัน 1 – 21 บาร์
REGEN	RGibbs	อุณหภูมิ 1,150 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	-
TURBINE	Compr	ความดัน 1 บาร์	-
COOLER	Heater	อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน	-
FLASH	Flash2	อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ความดัน 1 บาร์	-

ในการศึกษาปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ของแต่ละกระบวนการจะพิจารณาเฉพาะข้อมูลเส้นที่ออกจากเครื่อง REFORMER เท่านั้น คือ ข้อมูลเส้นที่ 4 (Stream 4) สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ และข้อมูลเส้นที่ 5 (Stream 5) สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

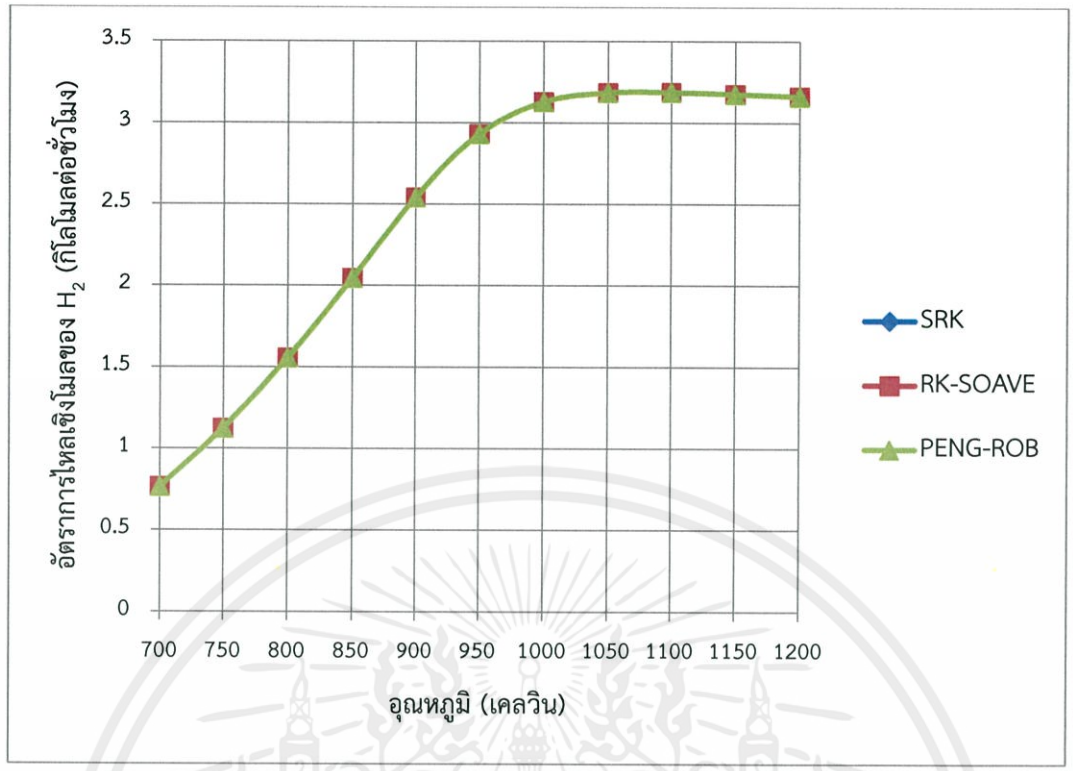
4.1 การเลือก Physical property methods สำหรับการจำลองกระบวนการ [17-19]

สำหรับการจำลองกระบวนการ การเลือกใช้ Physical property methods ให้เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำของผลการจำลองกระบวนการที่ได้ การเลือก Physical property methods จะพิจารณาจากองค์ประกอบของสารในกระบวนการเป็นหลัก

กระบวนการที่จำลองในปริญญานิพนธ์นี้เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจน โดยองค์ประกอบของสารในกระบวนการเป็นแก๊สผสมโดยส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วย มีเทน ไอน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ในส่วนกระบวนการที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จะเพิ่มแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ามาในกระบวนการ สำหรับ Physical property methods ที่มีความเหมาะสมต่อการจำลองกระบวนการมีทั้งหมด 3 วิธีคือ 1) SRK 2) RK-SOAVE และ 3) PENG-ROB เนื่องจากแก๊สในกระบวนการเป็นไฮโดรคาร์บอนและแก๊สเบาที่มีขั้วเล็กน้อย

การจำลองกระบวนการเบื้องต้นของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (หัวข้อที่ 3.1) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยเป็นการจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ Physical property methods ที่แตกต่างกันสามแบบ ข้อมูลที่นำใช้เปรียบเทียบเป็นอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนในข้อมูลเส้นที่ 4 (Stream 4) ผลการจำลองกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ได้ผลิตได้จาก Physical property methods กับอุณหภูมิ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 2

จากรูปที่ 4.1 ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในช่วงอุณหภูมิที่ปรับเปลี่ยนของแต่ละ Physical property methods ที่เลือกใช้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสามแบบสำหรับการจำลองกระบวนการ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้เลือกใช้ Physical property methods แบบ SRK ในการจำลองกระบวนการ

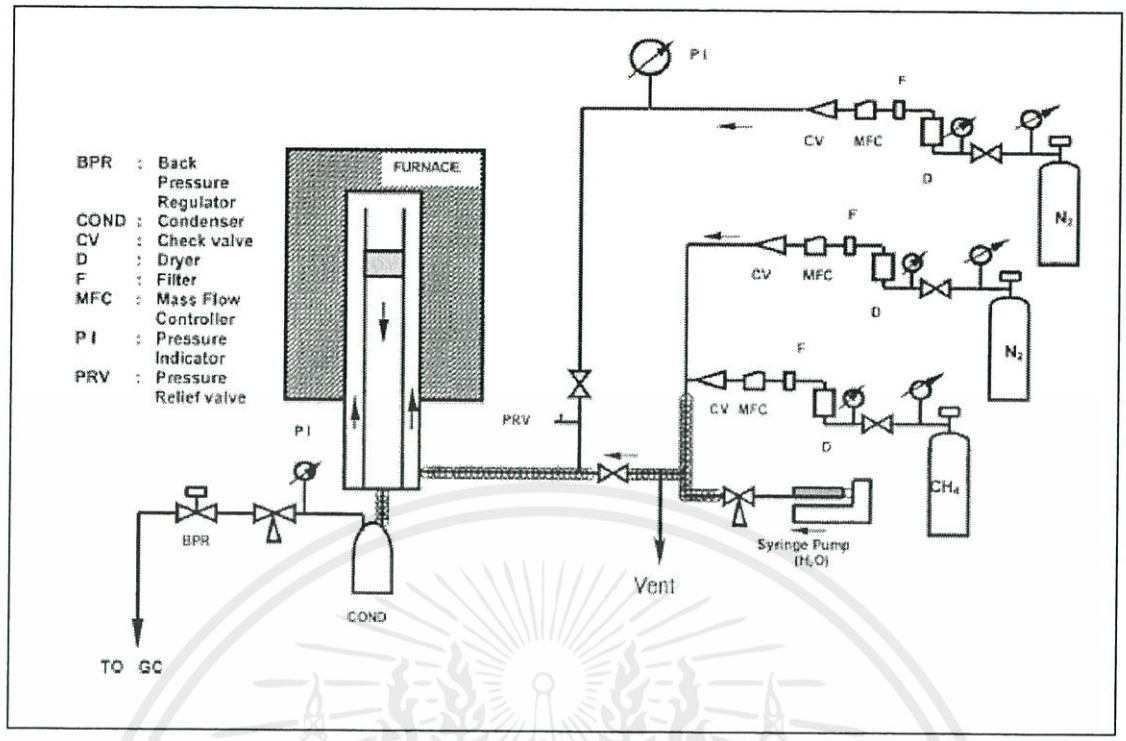
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ

เพื่อสำรวจความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นด้วยซอฟแวร์ AspenPlus™ ในปริญญานิพนธ์นี้จึงดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการที่ได้กับผลการทดลองของ B. Balasubramanian และคณะ (1999) [14] ซึ่งการดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 รายละเอียดการทดลองและผลการทดลอง

B. Balasubramanian และคณะ ได้ทำการทดลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ระดับการทดลอง โดยในเครื่องปฏิกรณ์ได้ใส่แคลเซียมออกไซด์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่ว่าการนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

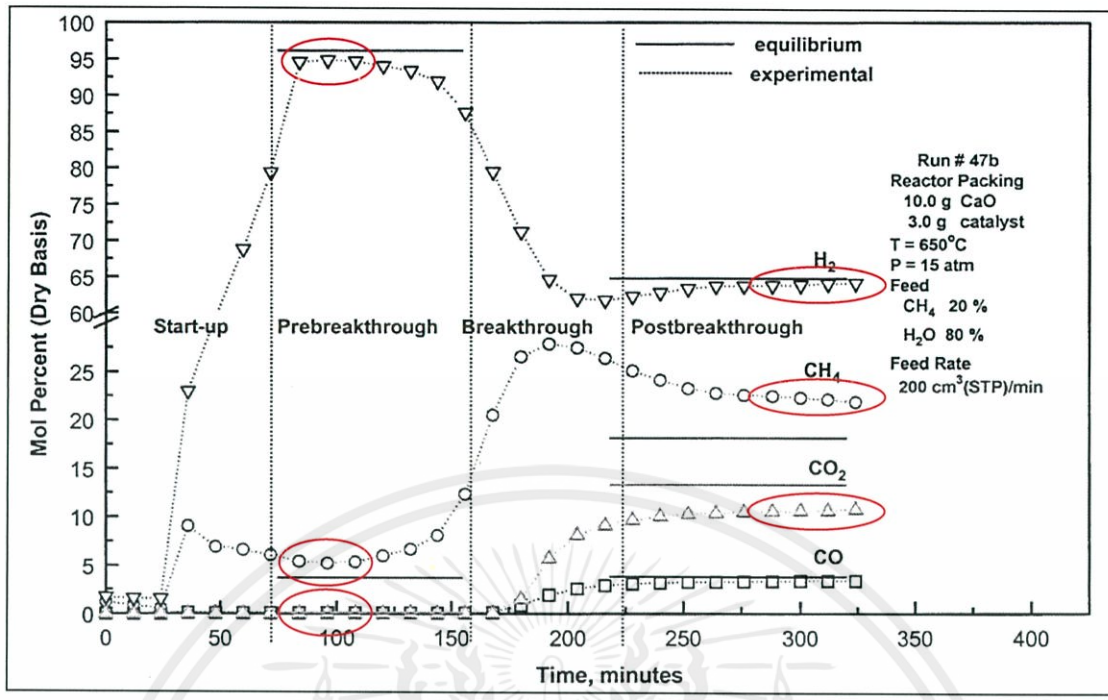


รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง [14]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองคือ แก๊สมีเทนและไอน้ำ ส่วนแก๊สไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นแก๊สช่วยพา (Carrier gas) เพื่อให้แก๊สมีเทนและไอน้ำไหลไปเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยจากรูปที่ 4.2 แก๊สมีเทนและไนโตรเจนจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยผ่านชุดของวาล์วและตัวปรับความดัน ส่วนไอน้ำจะป้อนผ่าน Syringe pump แก๊สผสมเมื่อออกจากเครื่องปฏิกรณ์ จะผ่านเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อควบแน่นไอน้ำ จากนั้นจะตรวจสอบองค์ประกอบของแก๊สผสมผ่านเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เมื่อทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดัน 15 บรรยากาศและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 4 จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟแสดงสัดส่วนโดยโมล (dry basis) ของแต่ละองค์ประกอบในแก๊สผสมต่อเวลาที่ทำการทดลอง ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองจากเครื่องปฏิกรณ์ [14]

จากกราฟรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในการทดลองจะมีช่วงระยะเวลาที่แตกต่างซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วงคือ Start-up, Prebreakthrough, Breakthrough และ Postbreakthrough ในช่วง Start-up จะเป็นช่วงแรกตั้งแต่เครื่องปฏิกรณ์เริ่มทำงานและมีปฏิกิริยาเริ่มเกิดขึ้น โดยสังเกตได้ว่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาทำได้ให้ไฮโดรเจน

ช่วง Prebreakthrough นั้นเป็นช่วงที่สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนมีค่ามากที่สุด ซึ่งในช่วงนี้มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแคลเซียมออกไซด์ จะเห็นได้ว่าสัดส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมมีค่าน้อย ซึ่งแสดงถึงการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

ช่วง Breakthrough นั้นเป็นช่วงที่แคลเซียมออกไซด์เริ่มอิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ เพิ่มขึ้น และช่วงสุดท้ายคือ ช่วง Postbreakthrough ซึ่งในช่วงนี้แคลเซียมออกไซด์อิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกต่อ ทำให้การดูดซับนั้นไม่เกิดขึ้น กระบวนการนี้จึงเป็นแบบกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบปกติที่ไม่มีการดูดซับ สังเกตได้ว่าสัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนในช่วงนี้น้อยกว่าในช่วง Prebreakthrough แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มตัวดูดซับเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมากขึ้นเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การนำผลการทดลองมาใช้ในการตรวจสอบแบบจำลอง

แบบจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นจะใช้วิธีการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณหาองค์ประกอบของสารที่สมดุล ดังนั้นผลการทดลองที่จะนำมาใช้เพื่อเปรียบจะเป็นผลที่อยู่ช่วงที่ปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สมดุลหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งในการทดลองจะมี 2 ช่วงที่จะนำผลการทดลองมาใช้ในการเปรียบเทียบคือ ช่วง Prebreakthrough และ Postbreakthrough

ช่วง Prebreakthrough จะเป็นช่วงที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผลการทดลองในช่วงนี้จะใช้เปรียบกับผลการจำลองจากแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทนที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (หัวข้อที่ 3.2) และสำหรับผลการทดลองในช่วง Postbreakthrough จะใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (หัวข้อที่ 3.1)

ผลการทดลองที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบจะเป็นองค์ประกอบของแก๊สผสม ซึ่งประกอบด้วยสัดส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ (dry basis) แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ B. Balasubramanian และคณะ [14]

สารองค์ประกอบ	ร้อยละโดยโมล (dry basis)	
	ช่วง Prebreakthrough	ช่วง Postbreakthrough
ไฮโดรเจน (H_2)	94	63
มีเทน (CH_4)	5	22.5
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	-	10

4.2.3 การจำลองกระบวนการและผลการจำลองกระบวนการเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากการทดลองมีสภาวะดังนี้คือ อัตราส่วนมีเทนต่อไอน้ำที่ป้อนเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และความดัน 15 บรรยากาศ ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปกำหนดเป็นสภาวะของเครื่อง REFORMER ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นทั้ง 2 แบบ ผลการจำลองกระบวนการที่ได้จะนำมาจากข้อมูลเส้นที่ 4 (Stream 4) สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (หัวข้อที่ 3.1) และนำมาจากข้อมูลเส้นที่ 5 (Stream 5) สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (หัวข้อที่ 3.2) ผลการจำลองกระบวนการเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ B. Balasubramanian และคณะ [14]

สารองค์ประกอบ	ร้อยละโดยโมล (dry basis)	
	ช่วง Prebreakthrough	ช่วง Postbreakthrough
ไฮโดรเจน (H_2)	95	64.8
มีเทน (CH_4)	4.7	18
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	-	13.3

4.2.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองกระบวนการ

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและที่ได้จากการจำลองกระบวนการในช่วง Prebreakthrough และ Postbreakthrough ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองกระบวนการและผลการทดลองช่วง Prebreakthrough ของ B. Balasubramanian และคณะ [14]

สารองค์ประกอบ	ร้อยละโดยโมล (dry basis)		ร้อยละความแตกต่าง
	ผลการทดลอง	ผลการจำลองกระบวนการ	
ไฮโดรเจน (H_2)	94	95	1.1
มีเทน (CH_4)	5	4.7	6
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	-	-	-

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองกระบวนการและผลการทดลองช่วง Postbreakthrough ของ B. Balasubramanian และคณะ [14]

สารองค์ประกอบ	ร้อยละโดยโมล (dry basis)		ร้อยละความแตกต่าง
	ผลการทดลอง	ผลการจำลองกระบวนการ	
ไฮโดรเจน (H_2)	63	64.8	2.86
มีเทน (CH_4)	22.5	18	20
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	10	13.3	33

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองกระบวนการและผลการทดลองจริงในช่วง Prebreakthrough มีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะค่าร้อยละโดยโมลของไฮโดรเจนในแก๊สผสม ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและผลการทดลองจริงประมาณร้อยละ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้

เอกสารนี้เป็นการเผยแพร่ผลงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การอ้างอิงควรอ้างอิงถึงต้นฉบับเท่านั้น

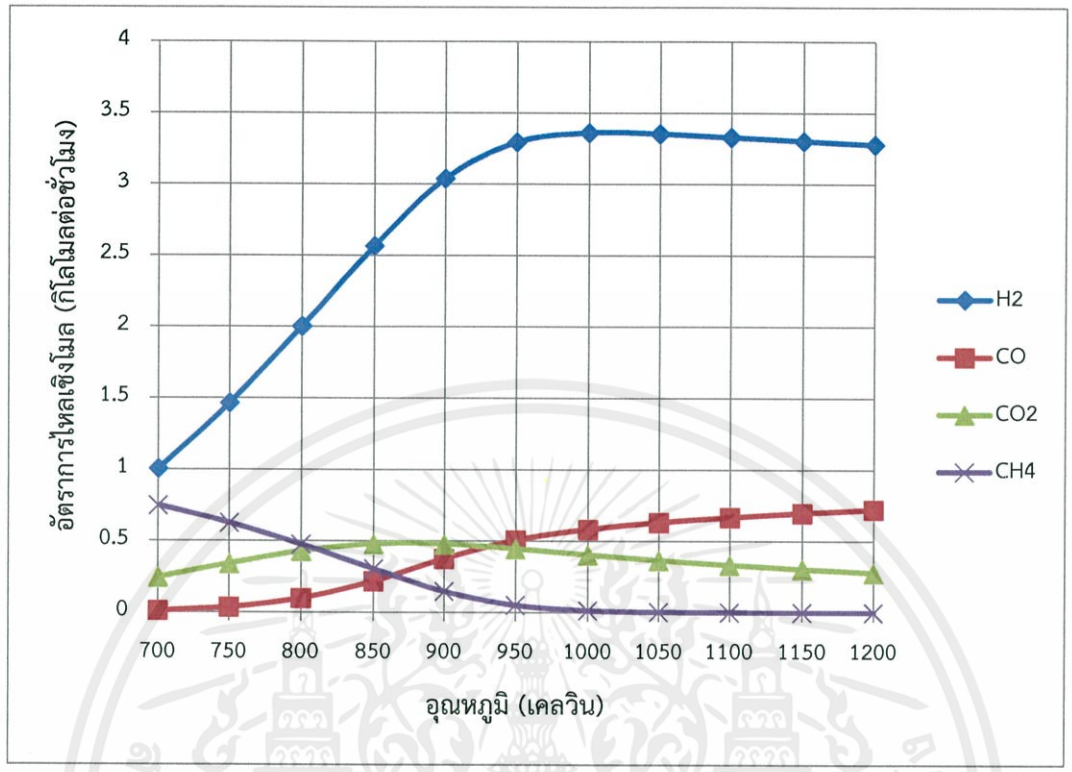
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในช่วง Postbreakthrough ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมีความแตกต่างจากผลการทดลอง จะเห็นได้จากค่าร้อยละโดยโมลของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งสาเหตุนั้นอาจจะมาจากการที่ก๊าซมีเทนไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึงในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้มีปริมาณมีเทนเหลือเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นลดลง และนอกจากนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นใช้วิธีการทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณองค์ประกอบที่สมดุล จึงย่อมมีความแตกต่างจากกระบวนการจริง แต่สำหรับค่าร้อยละโดยโมลของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สนใจมากที่สุด ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถที่จะนำมาใช้การศึกษาหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการนี้ต่อไปได้

4.3 การศึกษาหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (Steam methane reforming, SMR)

การจำลองกระบวนการในส่วนนี้จะเป็นการจำลองกระบวนกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรสภาวะการดำเนินการประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน ต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของกระบวนการนี้ สารตั้งต้นของกระบวนการประกอบด้วยมีเทนและไอน้ำ ในการจำลองกระบวนการขั้นต้นกำหนดให้ อัตราการป้อนมีเทนเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 3 กิโลโมลต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 อุณหภูมิและความดันของเครื่อง REFORMER เท่ากับ 900 เคลวินและ 1 บาร์ตามลำดับ โดยผลการจำลองที่จะนำมาวิเคราะห์คือ ข้อมูลของเส้น 4 (Stream 4) ซึ่งเป็นเส้นที่ออกจากเครื่อง REFORMER ผลการจำลองกระบวนการและผลของตัวแปรต่างๆ มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ

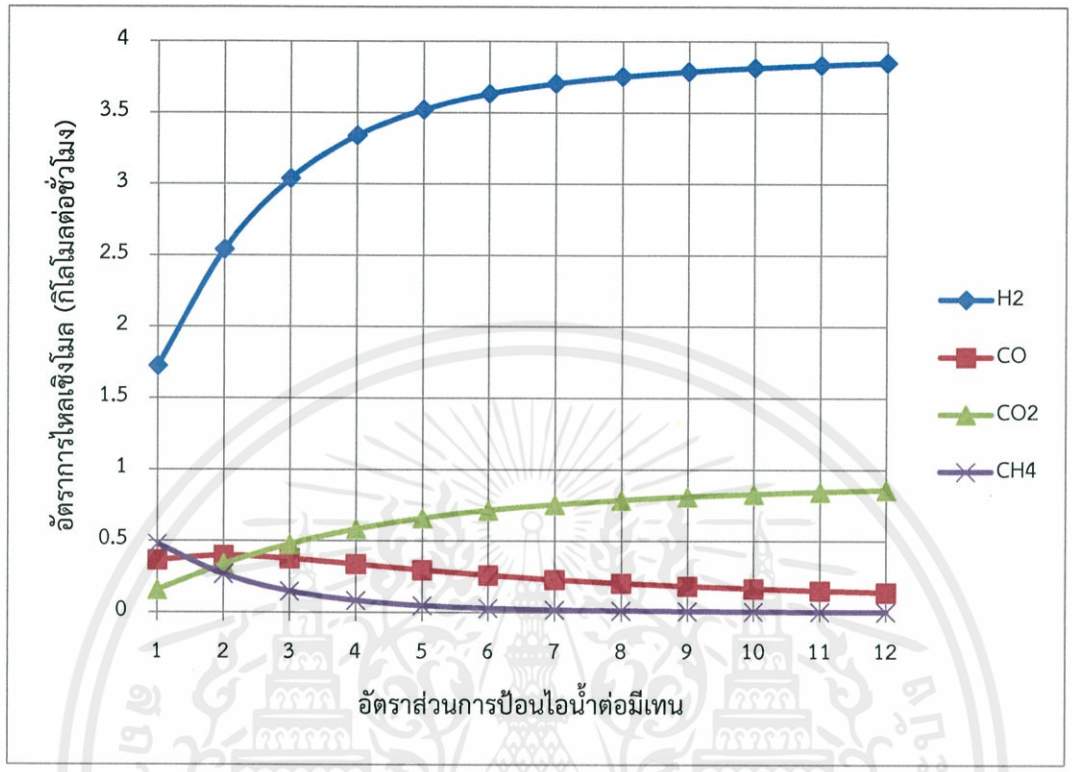


รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

ที่สภาวะเริ่มต้นในการจำลองกระบวนการพบว่ามีเทนได้ทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการจำลองกระบวนการที่แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อุณหภูมิของเครื่อง REFORMER เท่ากับ 900 เคลวิน ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 3.04 กิโลโมลต่อชั่วโมง เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 0.38 และ 0.48 กิโลโมลต่อชั่วโมง ตามลำดับ และมีเทนที่เหลือในระบบมีอัตราการไหล 0.14 กิโลโมลต่อชั่วโมง และจากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่อง REFORMER จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น เนื่องการปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง การเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 700 – 1,000 เคลวิน จะทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.36 กิโลโมลต่อชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 1,000 เคลวิน อย่างไรก็ตามจากการจำลองกระบวนการพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 เคลวิน จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงเกินไปไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบเพิ่มขึ้นและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟที่น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน (Steam to methane ratio, S/M) ต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ

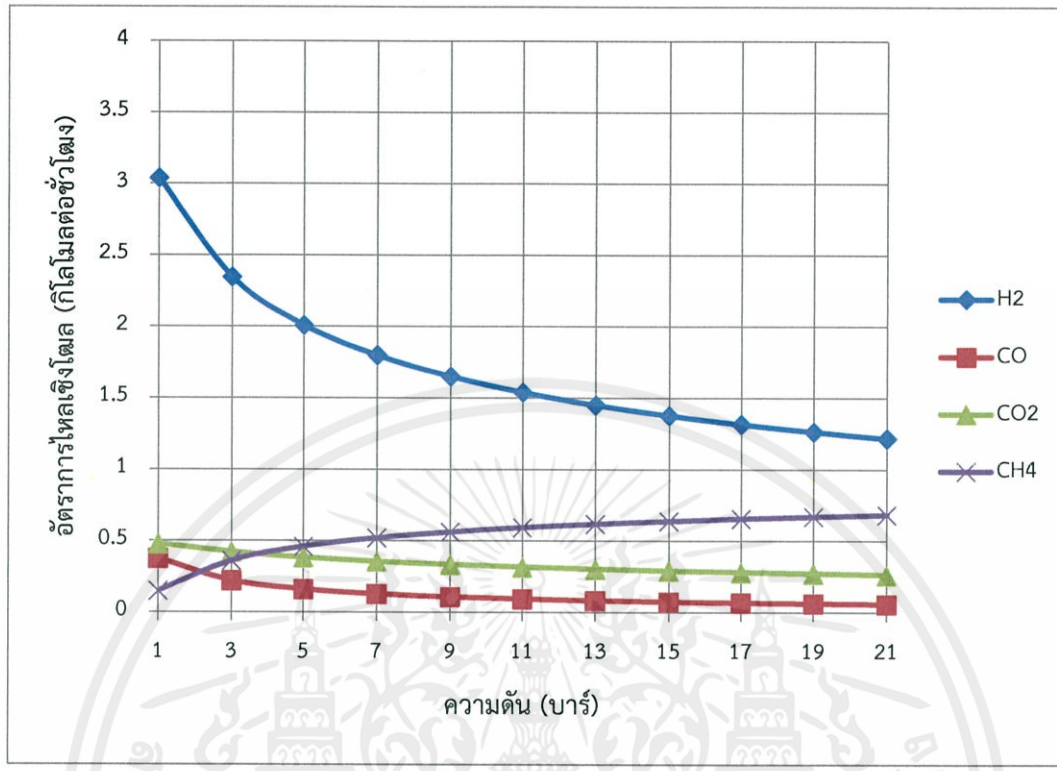


รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

รูปที่ 4.5 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ในระบบ โดยการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเป็นการเพิ่มปริมาณไอน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ส่งผลให้สมดุลเคมีถูกรบกวนและเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและวอเตอร์แก๊สชิพและเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ จากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่า การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนในช่วง 1 – 6 จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แต่การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนมากกว่า 6 จะทำให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นเพียงเป็นปริมาณที่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มในช่วง 1 – 6 โดยการใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มต้นทุนของกระบวนการผลิต เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเป็นการเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้น จึงเป็นการเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ และนอกจากนั้นกระบวนการยังจะต้องการพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นในการให้ความร้อนกับไอน้ำที่ถูกป้อนเข้ามาด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เหมาะสมคือ 6 สำหรับกระบวนรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ



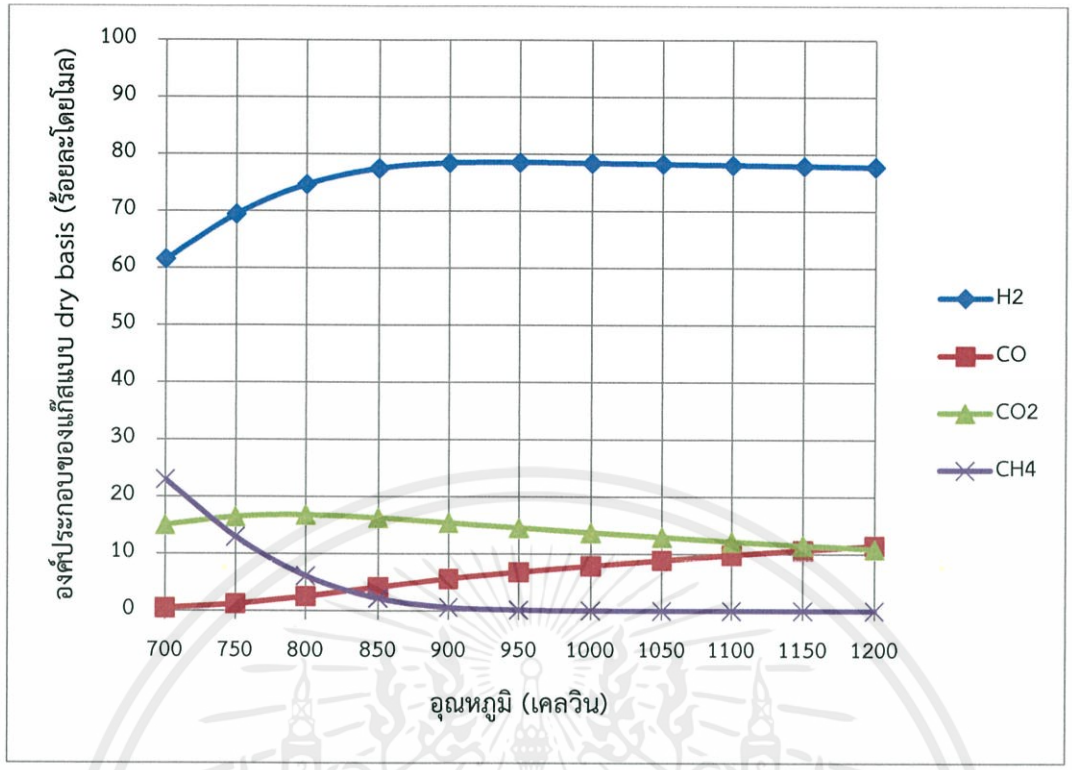
รูปที่ 4.6 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวินและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6 ทำให้ทราบว่าการเพิ่มความดันในระบบจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง เนื่องจากสมการรวมของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและวอเตอร์แก๊สชิพแสดงให้เห็นว่าจำนวนโมลของทางด้านผลิตภัณฑ์มีมากกว่า การเพิ่มความดันจะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางด้านสารตั้งต้น ซึ่งเป็นการยับยั้งการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำควรดำเนินการที่ความดันต่ำๆ

4.3.4 ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ

เนื่องจากไฮโดรเจนกำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ดังนั้นไฮโดรเจนที่ผลิตได้จึงต้องมีความบริสุทธิ์เพียงพอต่อการนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงได้ โดยรูปที่ 4.7 แสดงความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (ร้อยละโดยโมลแบบ dry basis) ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6

จากสภาวะที่เหมาะสมคือ ความดัน 1 บาร์และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตสูงที่สุดของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติมีค่าร้อยละ 78 โดยโมล (dry basis) ที่อุณหภูมิ 950 เคลวิน โดยประกอบไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 7 โดยโมล (dry basis) และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 โดยโมล (dry basis) ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนทำให้ไม่สามารถนำไปใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงได้จะต้องมีกระบวนการทำให้ไฮโดรเจนนี้มีความบริสุทธิ์ที่มากกว่านี้ก่อนจะนำไปใช้ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตเนื่องจากต้องมีการเพิ่มหน่วยเพิ่มความบริสุทธิ์เข้าไปในกระบวนการ

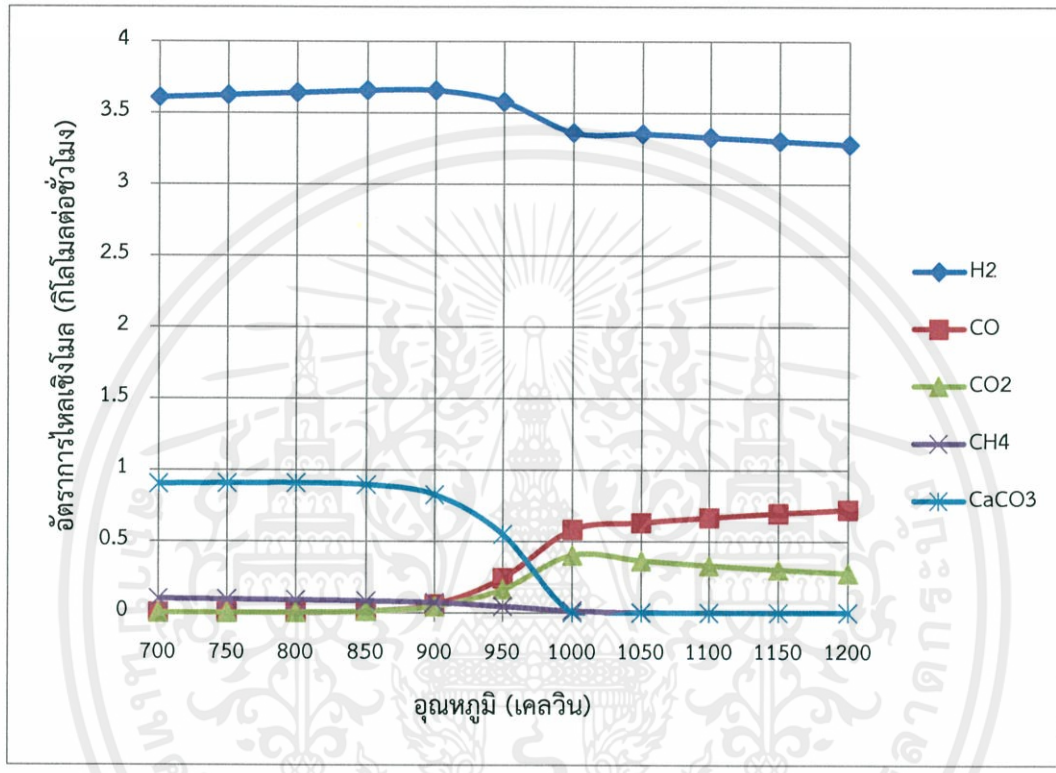
4.4 การศึกษาหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorption-enhanced steam methane reforming, SESMR)

ในกระบวนการส่วนนี้ ได้มีการเพิ่มตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คือ แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) เข้ามาในระบบ ซึ่งแคลเซียมอกไซด์จะทำการดูดซับและแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป (ดังสมการที่ (3.4)) พร้อมกับการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ ในการจำลองกระบวนการได้ศึกษาตัวแปรสภาวะที่มีผลต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่ป้อน และอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ และสำหรับสภาวะของการจำลองกระบวนการขั้นต้นกำหนดให้อัตราการป้อนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเทนเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นเป็น 900 เคลวิน และ 1 บาร์ ตามลำดับ ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์คือข้อมูลของเส้นที่ 5 (Stream 5) ซึ่งเป็นแก๊สผสมที่ออกจากเครื่อง REFORMER

4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ



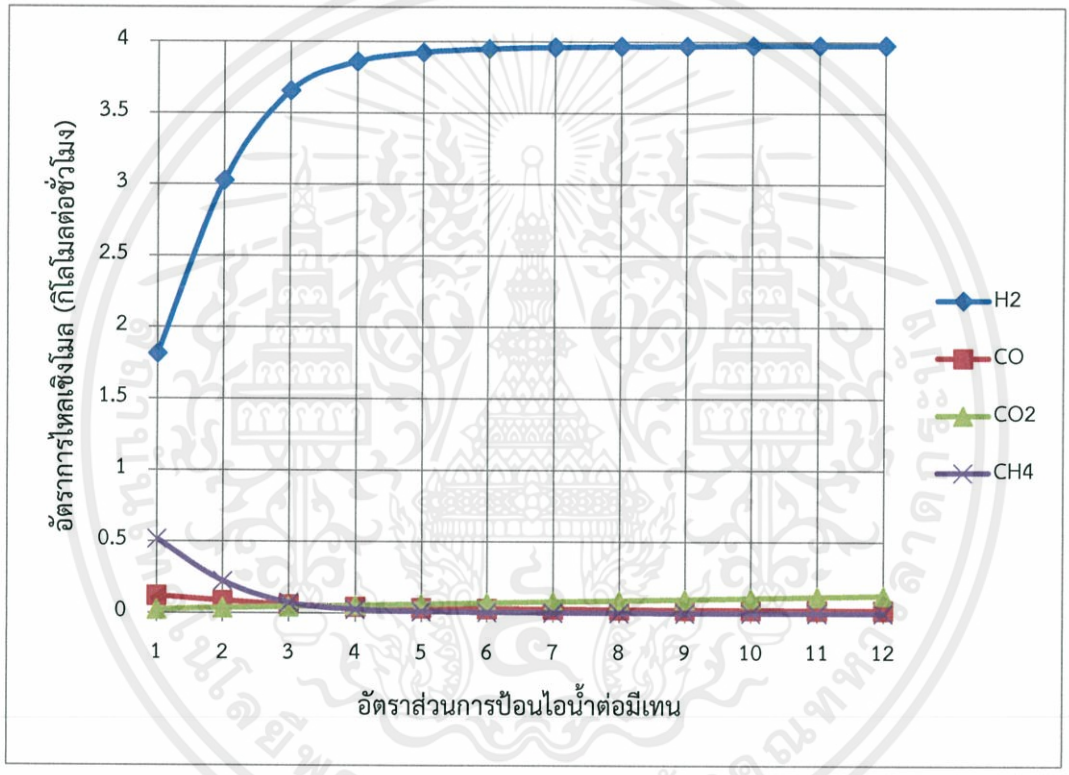
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

จากสภาวะเริ่มต้นของการจำลองกระบวนการพบว่ามีเทนได้ทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เกิดสารประกอบระหว่างไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ และในกระบวนการส่วนนี้ได้มีการเพิ่มแคลเซียมออกไซด์เพื่อเป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาในระบบ จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ จะเห็นได้ว่าในระบบมีแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ ที่สภาวะเริ่มต้นคืออุณหภูมิ 900 เคลวิน ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เท่ากับ 3.65 กิโลโมลต่อชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับไปเป็นการรบกวนสมดุลปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพ ทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลือน้อยเช่นกัน และปริมาณมีเทนที่เหลือเท่ากับ 0.08 กิโลโมลต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบต่อไปในช่วง 700 – 850 เคลวิน จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลเดียวกับกระบวนรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ คือปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุดเท่ากับ 3.66 กิโลโมลต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 850 เคลวิน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปมากกว่า 850 เคลวิน จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากแคลเซียมออกไซด์ไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ณ อุณหภูมิที่สูง สังเกตได้จากปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ลดลง และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในระบบ

4.4.2 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ



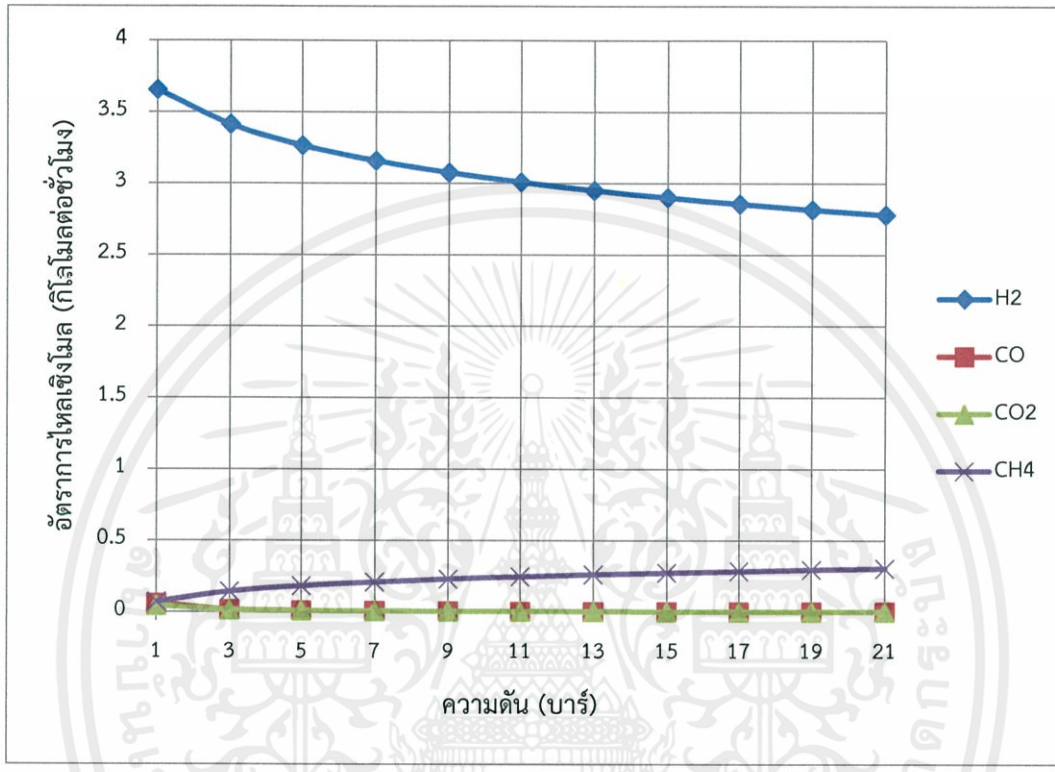
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวินและความดัน 1 บาร์

เช่นเดียวกับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนจะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเคมีเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ ทำให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนในช่วง 1 – 5 จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่อไปยังคงทำให้ปริมาณไฮโดรเจนนั้นเพิ่มขึ้นแต่เล็กน้อย ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 12 ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับ 4 กิโลโมลต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดตามทฤษฎี

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนควรพิจารณาถึงปัจจัยด้านอื่น ดังที่ได้กล่าวไว้ในกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ (หัวข้อที่ 4.3.2) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาแต่ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เหมาะสมจึงเท่ากับ 5

4.4.3 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ

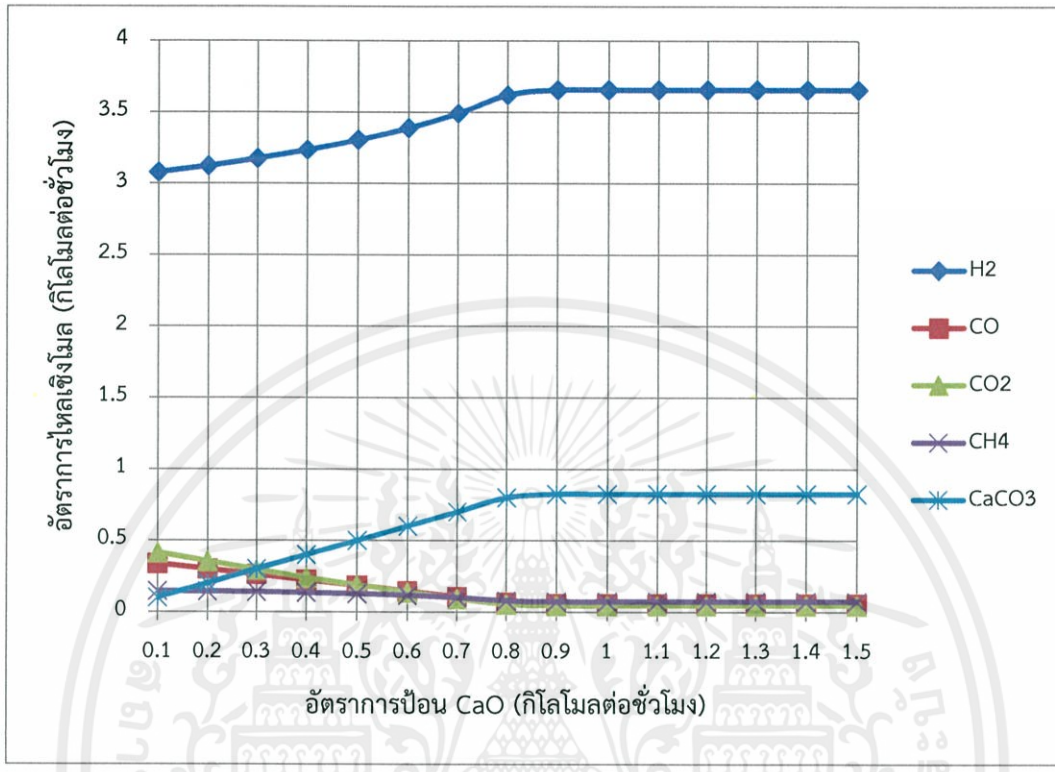


รูปที่ 4.10 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวินและอัตราส่วนการการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

ผลการจำลองกระบวนการในรูปที่ 4.10 มีลักษณะเหมือนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติคือ เมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง เนื่องจากจำนวนโมลรวมทางด้านผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารวมมากกว่าสารตั้งต้น (สมการที่ (3.5)) การเพิ่มความความดันจึงทำให้สมดุลเลื่อนกลับมาทางสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนจึงลดลง ดังนั้นความดันต่ำจึงเหมาะสมกับกระบวนการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลของอัตราป้อนแคลเซียมออกไซด์ต่ออัตราการไหลเชิงโมลขององค์ประกอบต่างๆ

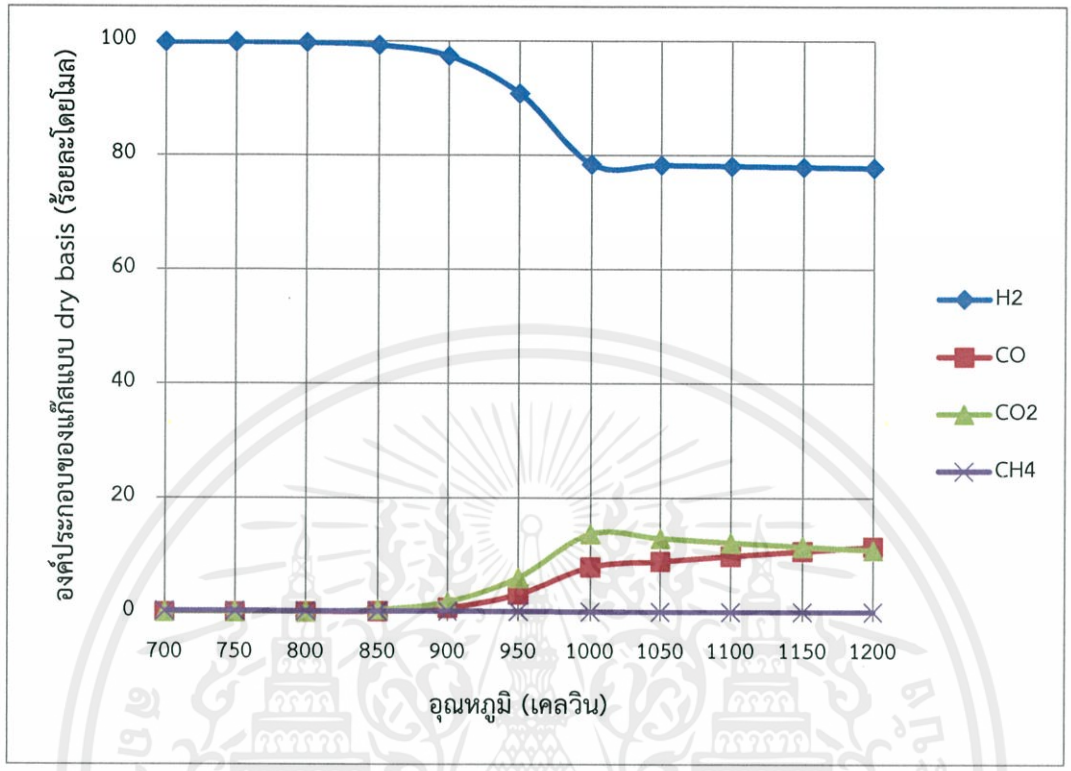


รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ โดยอุณหภูมิ 900 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

จากสภาวะเริ่มต้น กำหนดให้อัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นค่าที่ถูกกำหนดตามปฏิกิริยาจากสมการที่ (3.2) และ (3.4) ซึ่งเมื่อเปลี่ยนอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 คือ การเพิ่มอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงที่สุดเมื่ออัตราการป้อนมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง การเพิ่มอัตราการป้อนมากกว่านี้จะไม่ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้นั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหลือสำหรับการดูดซับ ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่คงที่ในช่วงอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 1 – 1.5 กิโลโมลต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิต่อความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นสิ่งเจือปนส่วนมากในไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ดังนั้นการเพิ่มตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบจะช่วยทำให้ไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยโมล (dry basis) ณ อุณหภูมิ 700 – 850 เคลวิน ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติที่ต้องการหน่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไฮโดรเจน ดังนั้นจึงเป็นการลดต้นทุนให้กับกระบวนการผลิต

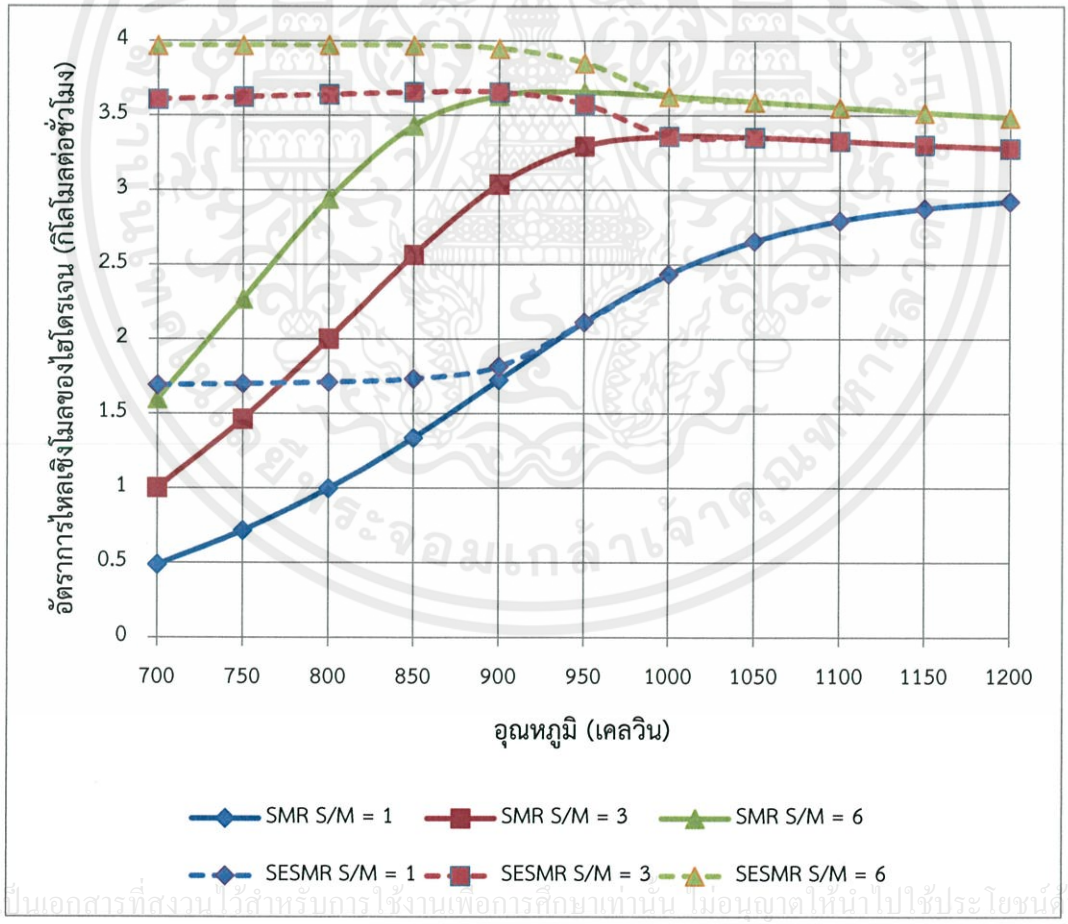
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการวิเคราะห์ผลของตัวแปรสภาวะการดำเนินการต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ของแต่ละกระบวนการ สำหรับการหาสภาวะการดำเนินที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างสองกระบวนการ เพื่อสรุปว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับการทำปฏิกิริยาสามารถปรับปรุงกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำได้ โดยหัวข้อการวิเคราะห์ระหว่างสองกระบวนการมีดังนี้

4.5.1 ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้

ผลการจำลองกระบวนการระหว่างสองกระบวนการสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งในการเปรียบเทียบนี้ ตัวแปรที่จะนำมาใช้การศึกษาจะประกอบไปด้วยอุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน เนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีผลมากต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ส่วนความดันสำหรับกระบวนการทั้งสองถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 บาร์ เพราะความดันต่ำนั้นเหมาะสมกับทั้งสองกระบวนการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการทั้งสองแบบที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนแตกต่างกันและความดัน 1 บาร์

จากผลการจำลองกระบวนการพบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีช่วงอุณหภูมิหนึ่งที่ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีจำนวนที่มากกว่า โดยที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 ในช่วงอุณหภูมิ 700 – 1,000 เคลวิน พบว่ากระบวนการที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าและใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน เช่นที่อุณหภูมิเท่ากับ 700 เคลวินกระบวนการแบบปกติสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ประมาณ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ในขณะที่กระบวนการที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผลิตได้ประมาณ 3.6 กิโลโมลต่อชั่วโมง ซึ่งแตกต่างกันอย่างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปมากกว่า 1,000 เคลวิน จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการนั้นมีค่าเท่ากัน เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิสูง กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีลักษณะเป็นเหมือนกระบวนการปกติ ดังแสดงตามรูปที่ 4.13

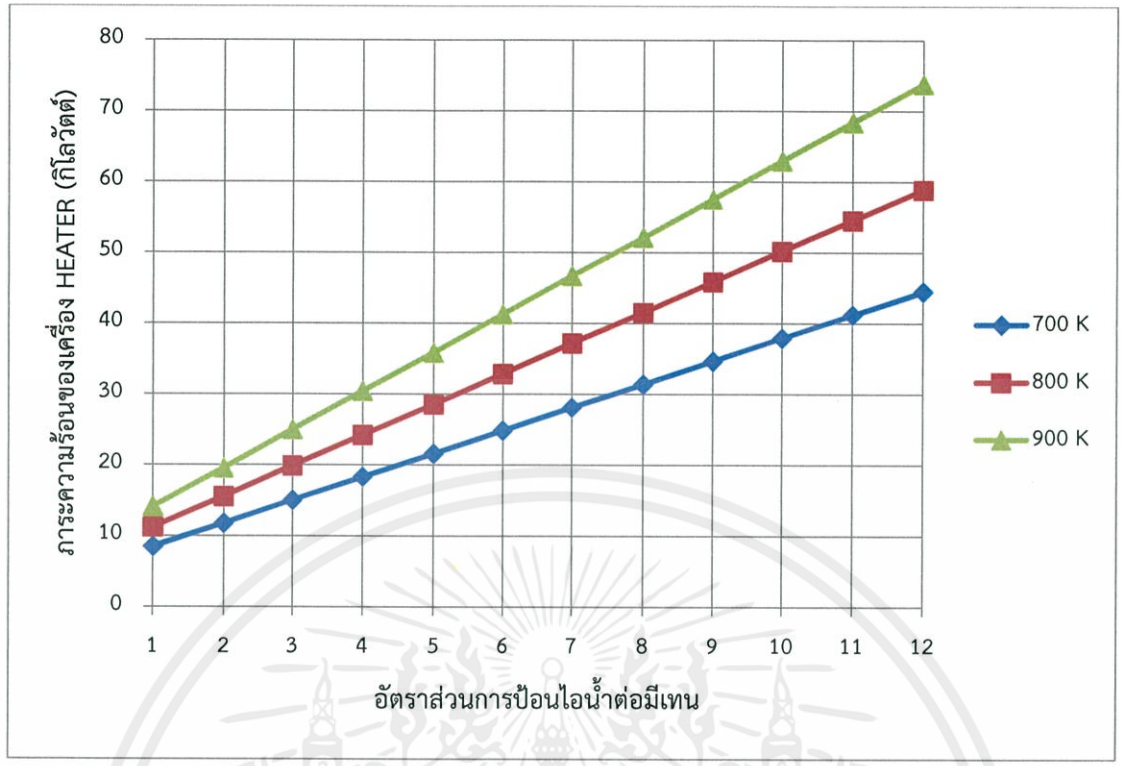
4.5.2 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ

พลังงานเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการทั้งสองและสรุปว่ากระบวนการใดมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่จะมาจากการให้เพิ่มอุณหภูมิให้กับสารตั้งต้น (มีเทนและไอน้ำ) ก่อนทำปฏิกิริยา และพลังงานที่ใช้ในเครื่อง REFORMER ดังนั้นผลการจำลองกระบวนการที่จะนำมาวิเคราะห์จะประกอบด้วย ภาระความร้อน (Heat duty) ของเครื่อง HEATER และ REORMER ผลการจำลองกระบวนมีดังนี้

4.5.2.1 ภาวะความร้อนของเครื่อง HEATER

เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำทั้งแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมาจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารตั้งต้นคือ มีเทนและไอน้ำ เพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา (700 – 1,200 เคลวิน) ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลอย่างมากต่อค่าภาระความร้อนของเครื่อง HEATER คือ อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่ใช้ การจำลองกระบวนการเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าภาระความร้อนต่อตัวแปรทั้งสอง จะทำให้สามารถระบุสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมได้ ซึ่งผลการจำลองกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



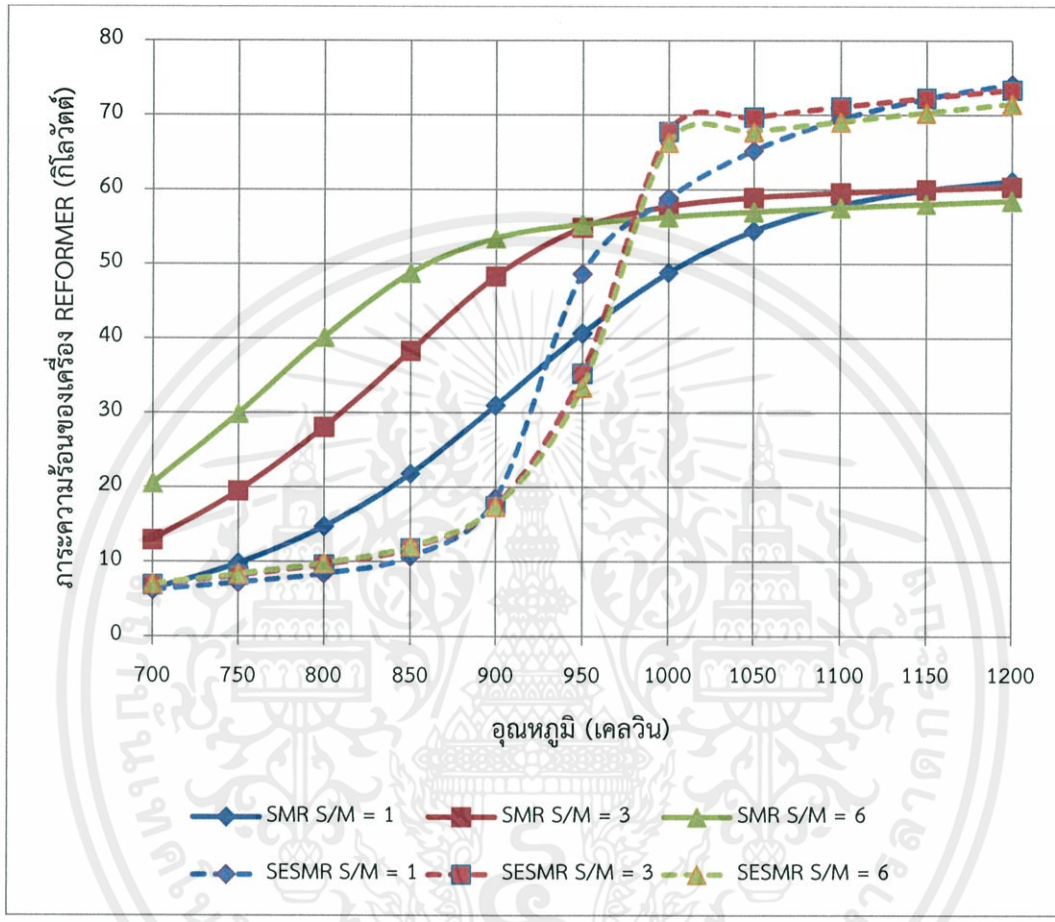
รูปที่ 4.14 ภาระความร้อนของเครื่อง HEATER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์

จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าค่าภาระความร้อนของเครื่อง HEATER มีลักษณะแปรผันตรงกับอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่ใช้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ดำเนินการ จากการวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนกับปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (หัวข้อที่ 4.3.2 และ 4.4.2) พบว่าอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติคือ 6 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนไปมากกว่านี้ จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อย และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ 5 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับที่ได้วิเคราะห์ไว้สำหรับกระบวนการแบบปกติ เมื่อเทียบปริมาณภาระความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำที่มากขึ้นขึ้นมาประกอบในการวิเคราะห์หาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมคือ 6 และ 5 สำหรับกระบวนการแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อเทียบต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นแล้วพบว่าไม่คุ้มกับพลังงานที่เพิ่มมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.2 ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER

ผลการจำลองกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 โดยตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบประกอบด้วยอุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน เนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีผลมากต่อภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER



รูปที่ 4.15 ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์

สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติ ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่สูง จะต้องใช้พลังงานมากสำหรับการทำให้สารตั้งต้นมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ของกระบวนการ และเป็นผลมาจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ทำให้ต้องใช้ภาระความร้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 950 เคลวิน สำหรับอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะทำให้ภาระความร้อนที่ใช้นั้นน้อยกว่าการใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 ผลมาจากการใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เท่ากับ 6 จะทำให้ปฏิกิริยาวอเตอร์ชิพนั้นเกิดได้มากขึ้น เพราะเป็นการเลื่อนสมดุลไปทางผลิตภัณฑ์ ความร้อนที่คายจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพจะช่วยลดภาระความร้อนของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFORMER ลง อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่สูงๆ จะต้องคำนึงถึงภาระความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนน้ำให้ไปเป็นไอน้ำด้วยเช่นกัน

ส่วนกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากรูปที่ 4.15 ในช่วงอุณหภูมิ 700 – 900 เคลวิน ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER อยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการแบบปกติ เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้นี้จะช่วยลดภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปมากกว่า 900 เคลวิน ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะที่อุณหภูมิสูงนั้นไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ในระบบไม่มีการคายความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ ดังนั้นระบบจึงต้องการภาระทางความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

จากการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับการทำปฏิกิริยา ผลการจำลองกระบวนการพบว่า ช่วงอุณหภูมิที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ปริมาณสูงจะอยู่ระหว่าง 700 – 900 เคลวิน โดยอุณหภูมิที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงที่สุดคือ 850 เคลวิน ซึ่งน้อยกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติ (1,000 เคลวิน) อยู่ 150 เคลวิน อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงกว่า 900 เคลวิน ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้จะลดลง เนื่องจากตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์ ไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 เคลวิน ส่งผลให้กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผลิตไฮโดรเจนได้เท่ากับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบปกติ ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 900 เคลวิน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาสมสำหรับกระบวนการนี้อยู่ในช่วง 700 – 900 เคลวิน

สำหรับผลของความดัน จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า ความดันที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองกระบวนการคือ ความดันต่ำ เนื่องจากจำนวนโมลรวมของสารตั้งต้นมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งตามหลักของเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier's priciple) การเพิ่มความดันจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่ใช้ ผลการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนส่งผลมากต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ เนื่องจากเป็นการทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางด้านผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่เหมาะสมคือ 6 และ 5 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อไปจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นในปริมาณที่เล็กน้อย ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นในกระบวนการแล้วถือว่าไม่มีประสิทธิภาพ

ข้อได้เปรียบของกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่ผลิตได้ จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยโมล (dry basis) และสามารถผลิตได้ ณ อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

700 – 900 เคลวิน โดยมีความบริสุทธิ์สูง เมื่อเทียบกับไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ ซึ่งเท่ากับร้อยละ 78 โดยโมล (dry basis) และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิ 950 เคลวิน จะเห็นได้ว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถผลิตไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าและใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าในการผลิต และจากการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานในส่วนของภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 700 – 900 เคลวิน ภาระความร้อนของเครื่องในกระบวนการที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าน้อยกว่าเครื่องในกระบวนการแบบปกติ เนื่องจากการคายความร้อนของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์จะช่วยลดภาระความร้อนที่ต้องให้กับเครื่องรีฟอร์มเมอร์

จากผลการจำลองกระบวนการและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่มากกว่ากระบวนการแบบปกติ ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่าและใช้อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้ นอกจากนั้นความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่ามาก และใช้พลังงานในการดำเนินการน้อยกว่าในกระบวนการแบบปกติดังแสดงในตารางที่ 5.1 ดังนั้นสามารถสรุปได้กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตได้

ตารางที่ 5.1 สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการ และผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมดังกล่าว

	กระบวนการแบบปกติ	กระบวนการที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสม		
อุณหภูมิ	1,000 เคลวิน	850 เคลวิน
อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน	6	5
ความดัน	1 บาร์	1 บาร์
อัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์	-	1 กิโลโมลต่อชั่วโมง
ผลการจำลองกระบวนการ		
ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้	3.63 กิโลโมลต่อชั่วโมง	3.95 กิโลโมลต่อชั่วโมง
ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจน (dry basis)	ร้อยละ 78 โดยโมล	มากกว่าร้อยละ 99 โดยโมล
ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER	56.29 กิโลวัตต์	12 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการคำนวณเรื่องต้นทุนในการผลิตของกระบวนการ เพื่อสามารถวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้ และเป็นแนวทางในการผลิตไฮโดรเจนในอนาคต

2) เนื่องจากกระบวนการมีการหน่วยปฏิบัติการที่ต้องให้และคายพลังงานความร้อน ดังนั้นจึงควรมีการสร้าง Heat exchanger network เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานในระบบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

3) ควรมีการจำลองกระบวนที่สภาวะเหมือนกับกระบวนการจริงซึ่งใช้ความดันสูงในการดำเนินการ เพื่อสามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ละอองดาว แสงหล้า, วีระศักดิ์ เทพจันทร์, ธวัชชัย ศุภดิษฐ์. **"ไฮโดรเจน : เชื้อเพลงแห่งอนาคตที่ไม่มีวันสูญสิ้น"** [Online]. Available:http://ssde.nida.ac.th/ojs/index.php/jem/article/viewFile/73/63

[2] รัชนีกร วันจันทึก. 2554. "ก๊าซไฮโดรเจน : ความคาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน." วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 16(1) : 131-140

[3] อุณาโลม เวทย์วัฒนะ ฮาร์ทลี่. 2556. "ไฮโดรเจน-การผลิตและการประยุกต์ใช้." วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 9(2) : 116-126

[4] George T. Austin. 1984. Shreve's Chemical Process Industries. 5th ed. Singapore : McGraw-Hill

[5] Barelli L., Bidini G., Gallorini L., Servili S., 2008, Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review, Energy 33, 554-570.

[6] Chen Z., Po F., Grace J.R., Lim C.J., Elnasshanie S., Mahecha-Botero A., Rakib M., Shirasaki Y., Yasuda I., 2008, Sorbent-enhanced/membrane assisted steam methane reforming, Chemical Engineering Science 63, 170-182.

[7] Chen H., Zhang T., Dou B., Dupont V., Williams P., Ghadiri M., Ding Y., 2009, Thermodynamic analyses of adsorption-enhanced steam reforming of glycerol for hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy 34, 7208-7222.

[8] Saebea D., Arpornwichanop A., Patcharavorachot Y., Assabumrungrat S., 2011, Adsorption-membrane hybrid system for ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis, International Journal of Hydrogen Energy, 36, 14428-14434.

[9] Wang X., Wang N., Wang L., 2011, Hydrogen production by sorption enhanced steam reforming of propane: A thermodynamic investigation, International Journal of Hydrogen Energy 36, 466-472.

[10] Ye G., Xie D., Qiao W., Grace J.R., Lim J., 2009, Modeling of fluidized bed membrane reactors for hydrogen production from methane steam reforming with Aspen Plus, International Journal of Hydrogen Energy 34, 4755-4762

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Yong Z., Mata V., Rodrigues A.E., 2002, Adsorption of carbon dioxide at high temperature-a review, Separation and Purification Technology 26, 195-205.

[12] Stevens Jr.R.W., Shamsi A., Carpenter S., Siriwardane R., 2010, Sorption-enhanced water gas shift reaction by sodium-promoted calcium oxides, Fuel 89, 1280-1286.

[13] Xie M., Zhou Z., Qi Y., Cheng Z., Yuan W., 2012, Sorption enhanced steam methane reforming by in situ CO_2 capture on a CaO-$Ca_9Al_6O_{18}$ sorbent, Chemical Engineering Journal 207-208, 142-150.

[14] Balasubramanian B., Lopez Ortiz A., Kaytakoglu S., Harrison D.P., 1999, Hydrogen from methane in a single-step process, Chemical Engineering Science 54, 3543-3552.

[15] Chemical of the Week, **"Methane"**, [Online]. Available:

[16] J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott. 2005. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 7th ed. Singapore : McGraw-Hill

[17] Eric C. Carlson. **"Don't Gamble With Physical Properties For Simulations"** [Online]. Available:http://www.engineering.uiowa.edu/~cbe_103/Misc/Don%20t%20Gamble%20Article.pdf. 2014

[18] Aspen Technology Inc., **"Aspen Physical Property System : Physical Property Methods"** [Online]. Availble: http://www.chemeng.lth.se/ket050/Arkiv/AspenPhysPropMethodsV7_2-Ref.pdf. 2014

[19] Aspen Technology Inc., "Aspen Physical Property System : Physical Property Data 11.1" [Online]. Available: http://web.ist.utl.pt/~ist11061/de/ASPEN/Physical_Property_Data_Aspen.pdf. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติ

(Steam methane reforming)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะเริ่มต้นอุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 และความดัน 1 บาร์

Stream	FEED	STEAM	1	2	3	4	5	6	7	8	PROD	CONDENSE
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.000	102.083	97.904	626.850	626.850	626.850	626.850	250.000	250.000	25.000	25.000	25.000
ความดัน (บาร์)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
อัตราส่วนไอน้ำ	1.000	1.000	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.559	1.000	0.000
อัตราการไหลเชิงโมลรวม (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	1.000	6.000	7.000	7.000	7.000	8.946	8.946	8.946	8.946	8.946	4.999	3.947
อัตราการไหลเชิงมวลรวม (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	16.043	108.092	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	53.034	71.101
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	24.747	184.372	223.365	523.624	523.624	669.319	669.319	388.522	388.560	213.421	213.354	0.071
อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละสาร (กิโลโมลต่อชั่วโมง)												
CH_4	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.000
H_2O	0.000	6.000	6.000	6.000	6.000	4.314	4.314	4.314	4.065	4.065	0.118	3.947
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.260	0.260	0.260	0.010	0.010	0.010	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.713	0.713	0.713	0.963	0.963	0.963	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.631	3.631	3.631	3.881	3.881	3.881	0.000
เศษส่วนโดยโมล												
CH_4	1.000	0.000	0.143	0.143	0.143	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.000
H_2O	0.000	1.000	0.857	0.857	0.857	0.482	0.482	0.482	0.454	0.454	0.024	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.029	0.029	0.001	0.001	0.002	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.080	0.080	0.080	0.108	0.108	0.193	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.406	0.406	0.406	0.434	0.434	0.776	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ก.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

อุณหภูมิ (เคลวิน)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
700	1.004	0.010	0.243	0.747
750	1.464	0.035	0.340	0.625
800	2.002	0.098	0.427	0.475
850	2.565	0.218	0.477	0.304
900	3.038	0.376	0.477	0.147
950	3.293	0.506	0.444	0.050
1,000	3.359	0.583	0.403	0.014
1,050	3.352	0.631	0.365	0.004
1,100	3.328	0.667	0.331	0.001
1,150	3.301	0.697	0.303	0.000
1,200	3.277	0.722	0.277	0.000

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 4 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
1	1.725	0.366	0.157	0.477
2	2.540	0.398	0.336	0.265
3	3.038	0.376	0.477	0.147
4	3.339	0.337	0.582	0.081
5	3.520	0.296	0.658	0.046
6	3.631	0.260	0.713	0.027
7	3.703	0.229	0.754	0.017
8	3.752	0.205	0.785	0.011
9	3.787	0.184	0.809	0.007
10	3.813	0.167	0.828	0.005
11	3.833	0.153	0.844	0.004
12	3.849	0.141	0.857	0.003

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 4 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
1	3.038	0.376	0.477	0.147
3	2.345	0.221	0.421	0.359
5	2.007	0.160	0.382	0.458
7	1.798	0.127	0.354	0.519
9	1.650	0.107	0.332	0.561
11	1.538	0.093	0.315	0.592
13	1.449	0.082	0.301	0.617
15	1.376	0.074	0.289	0.638
17	1.315	0.067	0.278	0.655
19	1.262	0.062	0.269	0.669
21	1.216	0.057	0.261	0.682

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 4 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละโดยโมลของสารต่างๆ (dry basis) ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 และความดัน 1 บาร์

อุณหภูมิ (เคลวิน)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
700	61.537	0.488	15.018	22.956
750	69.404	1.240	16.421	12.935
800	74.620	2.536	16.753	6.091
850	77.437	4.152	16.245	2.166
900	78.408	5.608	15.396	0.588
950	78.519	6.811	14.521	0.148
1,000	78.391	7.885	13.684	0.040
1,050	78.214	8.881	12.893	0.012
1,100	78.035	9.808	12.153	0.004
1,150	77.866	10.666	11.467	0.001
1,200	77.708	11.456	10.835	0.001

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 4 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสมอุณหภูมิ 1,000 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 6 และความดัน 1 บาร์

Stream	FEED	STEAM	1	2	3	4	5	6	7	8	PROD	CONDENSE
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.000	102.083	97.904	726.850	726.850	726.850	726.850	250.000	250.000	25.000	25.000	25.000
ความดัน (บาร์)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
อัตราส่วนไอน้ำ	1.000	1.000	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.567	1.000	0.000
อัตราการไหลเชิงโมลรวม (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	1.000	6.000	7.000	7.000	7.000	8.996	8.996	8.996	8.996	8.996	5.102	3.894
อัตราการไหลเชิงมวลรวม (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	16.043	108.092	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	124.134	53.980	70.155
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	24.747	184.372	223.365	581.883	581.883	747.955	747.955	390.722	390.776	217.832	217.762	0.070
อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละสาร (กิโลโมลต่อชั่วโมง)												
CH_4	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000
H_2O	0.000	6.000	6.000	6.000	6.000	4.369	4.369	4.369	4.015	4.015	0.121	3.894
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.365	0.365	0.365	0.011	0.011	0.011	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.633	0.633	0.633	0.987	0.987	0.987	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.628	3.628	3.628	3.982	3.982	3.982	0.000
เศษส่วนโดยโมล												
CH_4	1.000	0.000	0.143	0.143	0.143	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H_2O	0.000	1.000	0.857	0.857	0.857	0.486	0.486	0.486	0.446	0.446	0.024	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041	0.041	0.041	0.001	0.001	0.002	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.070	0.070	0.070	0.110	0.110	0.193	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.403	0.403	0.403	0.443	0.443	0.780	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวก ข

ผลการจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ ที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Sorption-enhanced steam methane reforming)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะเริ่มต้นอุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง

Stream	FEED	STEAM	CAO	1	2	3	4	5	6	7	PROD	CONDENSE	CO2	RE-CAO
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.000	102.083	25.000	94.331	626.850	626.850	626.850	626.850	626.850	25.000	25.000	25.000	876.850	876.850
ความดัน (บาร์)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
อัตราส่วนไอน้ำ	1.000	1.000	0.000	0.989	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.780	1.000	0.000	1.000	0.000
อัตราการไหลเชิงโมลรวม (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	1.000	3.000	1.000	4.000	4.000	4.000	1.000	5.032	5.032	5.032	3.923	1.109	0.825	1.000
อัตราการไหลเชิงมวลรวม (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	16.043	54.046	56.077	70.089	70.089	70.089	92.377	33.789	33.789	33.789	13.803	19.986	36.299	56.077
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	24.747	92.186	0.017	138.501	299.239	299.239	0.034	376.579	376.579	167.297	167.277	0.020	78.886	0.017
อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละสาร (กิโลโมลต่อชั่วโมง)														
CH_4	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.071	0.071	0.071	0.071	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

H_2O	0.000	3.000	0.000	3.000	3.000	3.000	0.000	1.202	1.202	1.202	0.092	1.109	0.000	0.000
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.059	0.059	0.059	0.000	0.000	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.045	0.045	0.045	0.000	0.825	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.655	3.655	3.655	3.655	0.000	0.000	0.000
CaO	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.175	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
$CaCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.825	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
เศษส่วนโดยโมล														
CH_4	1.000	0.000	0.000	0.250	0.250	0.250	0.000	0.014	0.014	0.014	0.018	0.000	0.000	0.000
H_2O	0.000	1.000	0.000	0.750	0.750	0.750	0.000	0.239	0.239	0.239	0.024	1.000	0.000	0.000
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.012	0.012	0.015	0.000	0.000	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	0.009	0.011	0.000	1.000	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.726	0.726	0.726	0.932	0.000	0.000	0.000
CaO	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.175	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
$CaCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.825	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

อุณหภูมิ (เคลวิน)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)				
	H_2	CO	CO_2	CH_4	$CaCO_3$
700	3.608	0.000	0.000	0.098	0.902
750	3.623	0.000	0.000	0.094	0.905
800	3.640	0.002	0.002	0.089	0.907
850	3.656	0.011	0.011	0.083	0.894
900	3.655	0.059	0.045	0.071	0.825
950	3.576	0.243	0.163	0.045	0.548
1,000	3.359	0.583	0.403	0.014	0.000
1,050	3.352	0.631	0.365	0.004	0.000
1,100	3.328	0.667	0.331	0.001	0.000
1,150	3.301	0.697	0.303	0.000	0.000
1,200	3.277	0.722	0.277	0.000	0.000

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 5 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
1	1.815	0.120	0.023	0.516
2	3.025	0.086	0.035	0.222
3	3.655	0.059	0.045	0.071
4	3.860	0.043	0.054	0.024
5	3.923	0.035	0.063	0.010
6	3.948	0.030	0.072	0.005
7	3.960	0.028	0.081	0.003
8	3.967	0.026	0.090	0.002
9	3.971	0.024	0.099	0.001
10	3.973	0.023	0.108	0.001
11	3.975	0.022	0.117	0.001
12	3.976	0.022	0.126	0.001

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 5 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
1	3.655	0.059	0.045	0.071
3	3.412	0.016	0.014	0.143
5	3.264	0.009	0.009	0.182
7	3.158	0.006	0.006	0.209
9	3.075	0.004	0.005	0.230
11	3.007	0.003	0.004	0.247
13	2.950	0.003	0.003	0.262
15	2.899	0.002	0.003	0.275
17	2.855	0.002	0.002	0.286
19	2.815	0.002	0.002	0.296
21	2.779	0.001	0.002	0.305

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 5 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ต่ออัตราการไหลเชิงโมลของสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 3 และความดัน 1 บาร์

อัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
0.1	3.078	0.339	0.415	0.146
0.2	3.123	0.302	0.355	0.144
0.3	3.175	0.263	0.296	0.140
0.4	3.234	0.225	0.240	0.135
0.5	3.304	0.186	0.187	0.128
0.6	3.388	0.146	0.137	0.117
0.7	3.490	0.107	0.092	0.101
0.8	3.618	0.068	0.053	0.078
0.9	3.655	0.059	0.045	0.071
1.0	3.655	0.059	0.045	0.071
1.1	3.655	0.059	0.045	0.071
1.2	3.655	0.059	0.045	0.071
1.3	3.655	0.059	0.045	0.071
.1.4	3.655	0.059	0.045	0.071
1.5	3.655	0.059	0.045	0.071

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 5 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละโดยโมลของสารต่างๆ (dry basis) ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 5 และความดัน 1 บาร์

อุณหภูมิ (เคลวิน)	อัตราการไหลเชิงโมล (กิโลโมลต่อชั่วโมง)			
	H_2	CO	CO_2	CH_4
700	99.612	0.000	0.002	0.386
750	99.622	0.003	0.014	0.361
800	99.558	0.026	0.083	0.334
850	99.136	0.167	0.395	0.302
900	97.307	0.869	1.565	0.258
950	90.892	3.583	5.344	0.181
1,000	78.112	9.155	12.662	0.072
1,050	77.942	10.206	11.831	0.021
1,100	77.762	11.162	11.069	0.007
1,150	77.591	12.033	10.373	0.002
1,200	77.435	12.824	9.741	0.001

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจาก Stream 5 ของการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะที่เหมาะสมอุณหภูมิ 850 เคลวิน อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 5 ความดัน 1 บาร์ และอัตราการป้อนแคลเซียมออกไซด์ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง

Stream	FEED	STEAM	CAO	1	2	3	4	5	6	7	PROD	CONDENSE	CO2	RE-CAO
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.000	102.083	25.000	97.146	576.850	576.850	576.850	576.850	576.850	25.000	25.000	25.000	876.850	876.850
ความดัน (บาร์)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
อัตราส่วนไอน้ำ	1.000	1.000	0.000	0.992	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.581	1.000	0.000	1.000	0.000
อัตราการไหลเชิงโมลรวม (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	1.000	5.000	1.000	6.000	6.000	6.000	1.000	7.010	7.010	7.010	4.076	2.935	0.966	1.000
อัตราการไหลเชิงมวลรวม (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	16.043	90.076	56.077	106.119	106.119	106.119	98.574	63.623	63.623	63.623	10.753	52.870	42.496	56.077
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	24.747	153.643	0.017	195.131	423.853	423.853	0.037	495.368	495.368	173.815	173.762	0.053	92.354	0.017
อัตราการไหลเชิงโมลของแต่ละสาร (กิโลโมลต่อชั่วโมง)														
CH_4	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.012	0.012	0.012	0.012	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

H_2O	0.000	5.000	0.000	5.000	5.000	5.000	0.000	3.031	3.031	3.031	0.096	2.935	0.000	0.000
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007	0.000	0.000	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0.016	0.016	0.000	0.966	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.945	3.945	3.945	3.945	0.000	0.000	0.000
CaO	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
$CaCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.966	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
เศษส่วนโดยโมล														
CH_4	1.000	0.000	0.000	0.167	0.167	0.167	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000
H_2O	0.000	1.000	0.000	0.833	0.833	0.833	0.000	0.432	0.432	0.432	0.024	1.000	0.000	0.000
CO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
CO_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.004	0.000	1.000	0.000
H_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.563	0.563	0.563	0.968	0.000	0.000	0.000
CaO	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
$CaCO_3$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.966	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภาคผนวก ค

ผลการจำลองกระบวนการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำแบบปกติและที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์

อุณหภูมิ (เคลวิน)	อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)					
	กระบวนการแบบปกติ			กระบวนการที่มีการดูดซับ		
	S/M = 1	S/M = 3	S/M = 6	S/M = 1	S/M = 3	S/M = 6
700	0.489	1.004	1.600	1.692	3.608	3.969
750	0.717	1.464	2.268	1.699	3.623	3.971
800	0.998	2.002	2.940	1.710	3.640	3.972
850	1.337	2.565	3.432	1.733	3.656	3.970
900	1.725	3.038	3.631	1.815	3.655	3.948
950	2.113	3.293	3.655	2.111	3.576	3.852
1,000	2.434	3.359	3.628	2.434	3.359	3.628
1,050	2.656	3.352	3.590	2.656	3.352	3.590
1,100	2.793	3.328	3.553	2.793	3.328	3.553
1,150	2.874	3.301	3.518	2.874	3.301	3.518
1,200	2.921	3.277	3.486	2.921	3.277	3.486

หมายเหตุ S/M คือ อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ภาระความร้อนของเครื่อง HEATER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทนและอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดัน 1 บาร์

อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อมีเทน	ภาระความร้อนของเครื่อง HEATER (กิโลวัตต์)		
	อุณหภูมิ 700 เคลวิน	อุณหภูมิ 800 เคลวิน	อุณหภูมิ 900 เคลวิน
1	14.150	8.473	11.224
2	19.574	11.744	15.555
3	24.998	15.014	19.885
4	30.422	18.284	24.216
5	35.846	21.554	28.546
6	41.270	24.825	32.877
7	46.695	28.095	37.208
8	52.119	31.365	41.538
9	57.543	34.636	45.869
10	62.967	37.906	50.199
11	68.391	41.176	54.530
12	73.815	44.446	58.860

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจากเครื่อง HEATER ในทั้งสองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ภาระของเครื่อง REFORMER ในกระบวนการทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนไอน้ำต่อมีเทนที่แตกต่างกัน ที่ความดัน 1 บาร์

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ภาระความร้อนของเครื่อง REFORMER (กิโลวัตต์)					
	กระบวนการแบบปกติ			กระบวนการที่มีการดูดซับ		
	S/M = 1	S/M = 3	S/M = 6	S/M = 1	S/M = 3	S/M = 6
700	6.376	12.954	20.562	6.247	6.933	7.063
750	9.812	19.532	29.928	7.240	8.201	8.381
800	14.748	28.069	40.185	8.417	9.614	9.848
850	21.804	38.327	48.782	10.702	11.824	12.079
900	30.952	48.340	53.417	18.471	17.500	17.395
950	40.663	54.882	55.319	48.645	35.280	33.426
1,000	48.803	57.730	56.292	58.826	67.752	66.314
1,050	54.420	58.914	56.980	65.188	69.682	67.748
1,100	57.871	59.556	57.545	69.387	71.072	69.061
1,150	59.892	59.997	58.027	72.160	72.266	70.296
1,200	61.068	60.337	58.443	74.093	73.362	71.468

หมายเหตุ ผลการจำลองกระบวนการนำมาจากเครื่อง REFORMER ในแต่ละกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้