

การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัวดูดซับทางเคมี



นาย วสิน กาญจนภู

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

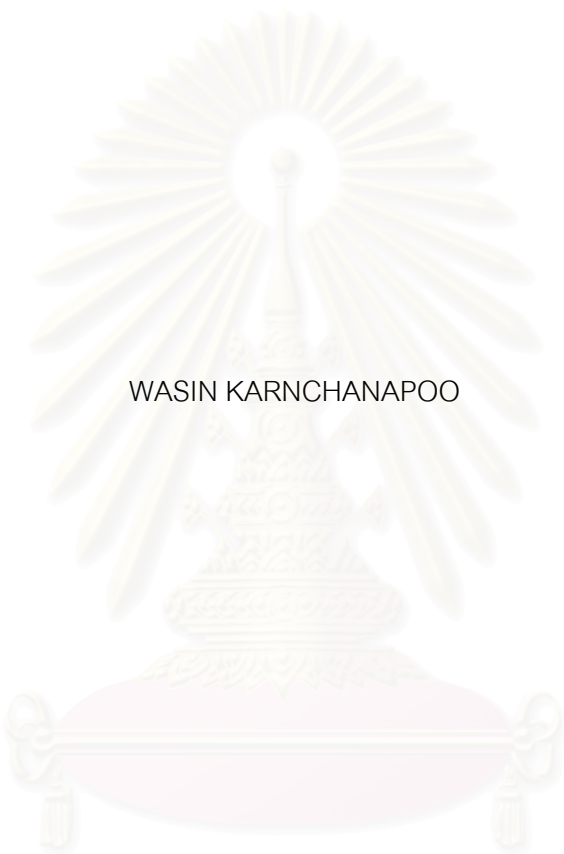
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-3129-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN PURIFICATION FROM SYNTHESIS GAS BY WATER GAS SHIFT AND CHEMISORPTION
ADSORBENT



WASIN KARNCHANAPOO

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-3129-9

วสิน กาญจนภู : การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัวดูดซับทางเคมี. (HYDROGEN PURIFICATION FROM SYNTHESIS GAS BY WATER GAS SHIFT AND CHEMISORPTION ADSORBENT) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตศานต์, 74 หน้า. ISBN 974-17-3129-9

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ปนอยู่ไม่เกิน 10 ppmv จากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำเพื่อที่จะใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยทดลองใช้ปฏิกิริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัวดูดซับทางเคมี ที่อุณหภูมิ 300- 500 องศาเซลเซียส มีเหล็กบนตัวรองรับลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการดูดซับทางเคมีนั้นทำการทดลองที่อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียสโดยมีตัวดูดซับคือเหล็กบนถ่านกัมมันต์

องค์ประกอบของแก๊สป้อนมี ไฮโดรเจนร้อยละ 60 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 30 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยเมื่อผ่านกระบวนการวอเตอร์แก๊สชิฟต์แล้วปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60 เป็น 66-68 ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเหลือประมาณร้อยละ 2-3 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์คือที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วน CO/H_2O 0.001 และอัตราการไหลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 2.57 มิลลิลิตรต่ออนาทีต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการในการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือจากวอเตอร์แก๊สชิฟต์ให้ลดลงเหลือ 10 ppmv ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทางเคมีคือที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลต่อตัวดูดซับ 1.15 มิลลิลิตรต่ออนาทีต่อกรัมสำหรับแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 6.84 ppmv ซึ่งสามารถที่จะนำแก๊สนี้ไปใช้ประโยชน์ในเซลล์เชื้อเพลิงต่อไปได้

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4372399723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: SHIFT RECTION / CHEMISORPTION / HYDROGEN / CATALYST

WASIN KARNCHANAPOO: HYDROGEN PURIFICATION FROM SYNTHESIS GAS BY WATER GAS SHIFT AND CHEMISORPTION ADSORBENT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, PhD, 74 pp. ISBN 974-17-3129-9

The objective of this research is to explore the possibility to produce hydrogen with CO impurity less than 10 ppmv from synthesis gas that is produced from methane steam reforming for use in polymer electrolyte fuel cells (PEFCs). A series of experiments including water gas shift reaction and the chemisorption of carbon monoxide were studied with simulated gas mixtures as feeds. The water gas shift reaction and chemisorption process were performed over Fe/ γ -Al₂O₃ and Fe/activated carbon as a catalyst and adsorbent at temperature of 300 – 500 °C and 100 – 250 °C respectively, in a fixed bed reactor.

The simulated gas was composed of 60% H₂, 30% CO and 10% CO₂. The composition of gas product in water gas shift reaction showed that H₂ concentration was increased from 60 to 66-68% and CO was decreased from 30 % to 2-3 %, dry basis. The suitable conditions for this step are at temperature 350 °C with mole ratio of CO/H₂O 0.001 and 2.57 ml/(min*g catalyst) feed flow rate. The chemisorption process was used to remove CO remained in order to provide a hydrogen mixture product with CO less than 10 ppmv. The suitable chemisorption conditions are at temperature 250 °C and 1.15 ml gas feed flow rate /(min*g adsorbent). The product gas from the chemisorption process has a CO content of about 6.84 ppmv. The result of this study can be applied to produce high purity H₂ which is needed in fuel cell systems.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 2. วารสารปริทัศน์..... | 3 |
| 2.1. เซลล์เชื้อเพลิง..... | 3 |
| 2.1.1. การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง..... | 3 |
| 2.1.2. องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง..... | 4 |
| 2.1.3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน..... | 6 |
| 2.2. แก๊สสังเคราะห์..... | 7 |
| 2.2.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์..... | 7 |
| 2.2.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์..... | 12 |
| 2.3. ผลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อเซลล์เชื้อเพลิง..... | 16 |
| 2.4. ปฏิกริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์..... | 18 |
| 2.5. ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี..... | 20 |
| 2.5.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 21 |
| 2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซับพอร์ต..... | 22 |
| 2.6. การดูดซับทางเคมี..... | 25 |
| 2.6.1. ประเภทการดูดซับ..... | 25 |
| 2.6.2. การดูดซับทางเคมีบนโลหะ..... | 26 |
| 2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 28 |
| 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... | 30 |
| 3.1. อุปกรณ์การทดลอง..... | 30 |
| 3.2. สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้..... | 39 |
| 3.3. วิธีการทดลอง..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... | 43 |
| 4.1. ปฏิกริยาอวเตอร้แก๊สซิปต์..... | 43 |
| 4.1.1. ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกริยาอวเตอร้แก๊สซิปต์..... | 43 |
| 4.1.2. ผลของอัตราส่วนระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้้ำต่อปฏิกริยาอวเตอร้แก๊สซิปต์..... | 47 |
| 4.1.3. ผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่อตัวเร่งปฏิกริยา..... | 50 |
| 4.1.4. การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สจากการทดลองกับค่าที่ได้เมื่อปฏิกริยาสมดุล..... | 52 |
| 4.1.5. การเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับงานวิจัยจากต่างประเทศ..... | 55 |
| 4.2. การดูดซับทางเคมี..... | 55 |
| 4.2.1. ผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการการดูดซับทางเคมี..... | 56 |
| 4.2.2. ผลของปริมาณตัวดูดซับต่ออัตราการไหลของแก๊ส..... | 58 |
| 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 61 |
| รายการอ้างอิง | 63 |
| ภาคผนวก..... | 65 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง..... | 66 |
| ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..... | 69 |
| ภาคผนวก ค แก๊สโครมาโตกราฟี..... | 72 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 74 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ..... | 8 |
| ตารางที่ 2.2 ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ Partial Oxidation | 10 |
| ตารางที่ 2.3 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี..... | 12 |
| ตารางที่ 2.4 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ..... | 15 |
| ตารางที่ 2.5 ปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนทั่วโลกในปี 2000..... | 16 |
| ตารางที่ 2.6 ปริมาณของแก๊สที่สามารถป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ..... | 18 |
| ตารางที่ 2.7 การแบ่งตัวรองรับตามจุดหลอมเหลว และความเป็นกรด-เบส..... | 24 |
| ตารางที่ 2.8 ตัวรองรับชนิดต่างๆ ตามพื้นที่ผิว..... | 24 |
| ตารางที่ 2.9 การจำแนกประเภทของโลหะตามความสามารถในการดูดซับทางเคมี..... | 27 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟท์ ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 46 |
| ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแก๊สขาออกของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟท์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม..... | 50 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ..... | 55 |
| ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 200 องศาเซลเซียสโดยมีอัตรา การไหลของแก๊สเท่ากับ 22-23 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 59 |
| ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 250 องศาเซลเซียสโดยมีอัตรา การไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 59 |
| ตาราง ก1 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟท์โดยทำการ เปลี่ยนค่าอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 350, 400, 450 และ 500 องศา เซลเซียส อัตราส่วน CO/H ₂ O ตั้งแต่ 0.001, 0.0024 และ 0.0135 ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาจาก 5 กรัม เป็น 10 และ 15 กรัม..... | 64 |
| ตารางที่ ก2 ข้อมูลการทดลองสำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมีเมื่อทำการเปลี่ยนค่า อุณหภูมิจาก 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 ถึง 30 กรัม..... | 66 |
| ตาราง ค1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส..... | 72 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง..... | 3 |
| รูปที่ 2.2 แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง..... | 6 |
| รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา Steam Reforming ที่อุณหภูมิต่างๆ ความดันคง ที่..... | 9 |
| รูปที่ 2.4 แสดงถึงกระบวนการแกซีฟายถ่านหิน..... | 11 |
| รูปที่ 2.5 แสดงผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ..... | 13 |
| รูปที่ 2.6 แสดงถึงผลกระทบของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อเซลล์เชื้อเพลิง..... | 17 |
| รูปที่ 2.7 แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟท์ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 19 |
| รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัว เร่งปฏิกิริยา..... | 21 |
| รูปที่ 2.9 แสดงถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์มาเกี่ยวข้อง..... | 22 |
| รูปที่ 2.10 การดูดซับลักษณะต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ. | 26 |
| รูปที่ 3.1 แสดงถึงลักษณะการทำงานของเครื่อง..... | 31 |
| รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์..... | 32 |
| รูปที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบทอกลวง..... | 33 |
| รูปที่ 3.4 ลักษณะเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมี..... | 34 |
| รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิกับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการดูดซับ ทางเคมี..... | 34 |
| รูปที่ 3.6 เครื่องผลิตไอน้ำ..... | 35 |
| รูปที่ 3.7 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส..... | 36 |
| รูปที่ 3.8 แสดงถึงเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ..... | 37 |
| รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟท์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา 5 กรัม อัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่ออนาที และอัตราการไหลของ แก๊ส 25 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 44 |
| รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟท์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา 10 กรัม และอัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่ออนาทีและอัตราการ ไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 45 |
| รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟท์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา 15 กรัม อัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่ออนาทีและอัตราการไหล ของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 45 |

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ต่อปฏิกิริยาออกเตอรแก๊ส ซีฟท์ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัมและอัตราการ ไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ที่ 7.5 –8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 47 |
| รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ต่อปฏิกิริยาออกเตอรแก๊ส ซีฟท์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัมและอัตราการ ไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ที่ 7.5 –8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 48 |
| รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม..... | 49 |
| รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม..... | 49 |
| รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 กรัม..... | 50 |
| รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 350 องศา เซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1494โมลต่ออนาที..... | 51 |
| รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 400 องศา เซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1494 มิลลิลิตรต่ออนาที..... | 52 |
| รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทาง เทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.1494 โมลต่ออนาทีปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม..... | 53 |
| รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทาง เทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.0617 โมลต่ออนาทีปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม..... | 54 |
| รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทาง เทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.0109 โมลต่ออนาทีปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม..... | 54 |
| รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแก๊สขาออกที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5 กรัมอัตรา การไหลของแก๊ส 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 56 |
| รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแก๊สขาออกที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 10 กรัม อัตราการไหลของแก๊ส 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 57 |

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณดูดซับกับองค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 200 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 58 |
| รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณดูดซับกับองค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 250 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่สภาวะมาตรฐาน..... | 59 |
| รูปที่ 5.1 แผนภาพองค์ประกอบของแก๊สทั้งหมดในกระบวนการ..... | 62 |
| รูปที่ ค1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD..... | 72 |
| รูปที่ ค2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID..... | 73 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานมีความสำคัญสูงมากและอาจเป็นสิ่งที่ขาดแคลนในอนาคตจึงได้เล็งเห็นที่จะหาวิธีที่จะใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ได้ประโยชน์สูงสุด และรักษาสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป ทางเลือกใหม่ทางหนึ่งในการพัฒนาดังกล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) ซึ่งเป็นระบบทางไฟฟ้าเคมี ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยา คือ



ระบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำ พลังงานความร้อนและ พลังงานไฟฟ้า ระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะมีประสิทธิภาพสูงและมีการปล่อยมลภาวะต่ำ

สำหรับแก๊สไฮโดรเจนที่จะใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้น สามารถที่จะใช้กระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเช่น Steam reforming, Partial Oxidation, Gasification, Catalyst Cracking และ Thermal Cracking โดยมีสารตั้งต้นในการผลิตต่างๆ กันได้แก่ แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน สารชีวมวล หรือ แอลกอฮอล์ เป็นต้น

กระบวนการ Steam Reforming เป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเนื่องจากได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วน 3:1 โดยมีอัตราส่วนดังนี้ แก๊สไฮโดรเจน 55%, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 6%, แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 11%, ไอน้ำ 28% (ข้อมูลเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนของไอน้ำ ต่อ มีเทน เป็น 3:1) ซึ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อโลหะ Platinum บริเวณขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง ถ้ามีปริมาณมากเกินไป (มากกว่า 10 ppmv) ดังนั้นจึงได้เกิดแนวความคิดในการทำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการการรีฟอร์มด้วยไอน้ำให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

การลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะทำโดยอาศัยปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ และกระบวนการการดูดซับทางเคมีเป็นหลักเนื่องจากการใช้ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ นั้นจะได้ผลิตภัณฑ์คือ แก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สที่ต้องการ และสามารถที่จะกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ในปริมาณมาก ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือนั้นจะทำการกำจัดโดยการใช้กระบวนการ Chemisorption ที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

1. กำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์จากการรีฟอร์มแก๊สมีเทนให้เหลืออยู่ในปริมาณไม่เกิน 10 ppmv เพื่อสามารถนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงได้
2. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์โดยวิธีการดูดซับทางเคมี และ Water Gas Shift

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์มากกว่า 99.999% และเข้าใจกลไกในการเกิดปฏิกิริยา
2. สามารถที่จะนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ได้
3. เป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตพลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไปด้วย

1.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กบนอลูมินา ($\text{Iron}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)
2. ทำการทดลองเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษามี ดังนี้
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการวอเตอร์แก๊สชิฟต์ Reaction 300-500 องศาเซลเซียส
 - อัตราส่วนของแก๊สป้อนของ $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$
 - อัตราการไหลต่อมวลของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - อุณหภูมิในการทดลองการดูดซับทางเคมี 100-200 องศาเซลเซียส
 - อัตราการไหลของแก๊สต่อตัวดูดซับ
3. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

บทที่ 2

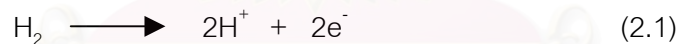
วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง^[1,2]

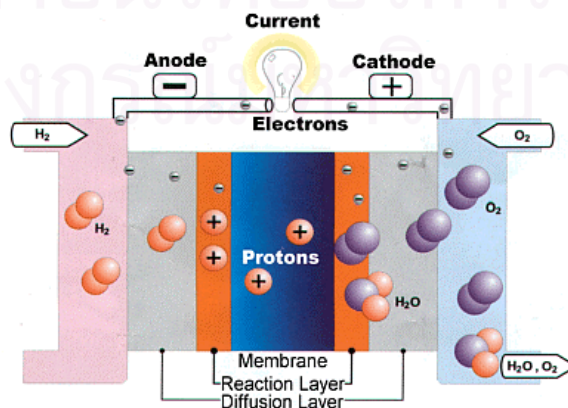
เซลล์เชื้อเพลิง หมายถึง เครื่องมือ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงแบตเตอรี่ (battery) กล่าวอีกนัยหนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง

2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน 2 ขั้ว (ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด) จุ่ม หรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวและ/ หรือของแข็ง เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ หรือไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดตามปฏิกิริยาที่ (2.1) โดยที่แก๊สเชื้อเพลิงจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งถ่ายไปที่ขั้วแคโทดผ่านตัวนำจากภายนอก และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิไดส์ไฮโดรเจน (ซึ่งก็คือไฮโดรเจนไอออน) จะแพร่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดกับแก๊สออกซิเจนตามปฏิกิริยาที่ (2.2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ



จากปฏิกิริยาทั้งสองข้างต้น จะก่อให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) โดยที่ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เสมือนแหล่งปฏิกิริยา (reaction sites) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าของเชื้อเพลิง และตัวออกซิไดส์ขึ้น โดยจะมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้วแอโนดและแคโทดที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสมบัติในการยอมให้แก๊สซึมผ่าน (permeable) และจะต้องนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ในทางตรงกันข้ามอิเล็กโทรไลต์จะต้องไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่าน และสามารถถ่ายเทโปรตอนได้ดี ในกรณีที่ต้องการให้ความต่างศักย์มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการต่อเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จะถูกเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบตรง (direct fuel cells) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ้อม (indirect fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สผสมที่มีองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนอยู่สูง โดยผ่านกระบวนการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (cracking of hydrocarbons) หรือผ่านกระบวนการปฏิรูปของแอลกอฮอล์แบบใช้ไอน้ำ กระบวนการเหล่านี้จะสำเร็จได้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในเครื่องปฏิรูป (reformer) ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนในขณะที่ปฏิกิริยาจากเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบคายความร้อน ดังนั้นความร้อนที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมาใช้กับปฏิกิริยาปฏิรูป

ปัจจุบันถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย แต่ด้วยข้อจำกัดต่างๆ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ และแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ รวมทั้งแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่มีราคาสูง อีกทั้งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สออกซิเจน หรือไฮโดรเจนแม้แต่ในปริมาณน้อยจะส่งผลเสียต่อความสามารถของแพลทินัม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการใช้งาน และการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด และมีราคาเหมาะสม

2.1.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปมีองค์ประกอบดังนี้

2.1.2.1 ขั้วไฟฟ้าหรือขั้วอิเล็กโทรด

ประกอบด้วยอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ในบางกรณีอาจมี 3 ขั้วคือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) เช่น ในการวัดแบบครึ่งเซลล์ ขั้วไฟฟ้านี้จะเป็นแหล่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยอาศัยหลักการทางจลนพลศาสตร์ และการถ่ายเทมวลมาอธิบาย ปฏิกิริยาการเกิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนผิวขั้วไฟฟ้า เช่น ค่าจำกัดศักย์ส่วนเกินค่าต่ำ และค่าสูง (low and high overpotential limits), โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (concentration Polarization), ปฏิกิริยาเคมีและความต้านทาน, ความสัมพันธ์ของ Butler-Volmer equation และอัตราการถ่ายเทประจุ ขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้ในปัจจุบันจะเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดที่ยอมให้แก๊สแพร่ผ่านได้ (gas diffusion electrode)

ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก อีออนลบ (anion) จะเคลื่อนที่เข้ามา และให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วบวก ส่วนขั้วที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ อีออนบวก (cation) จะเคลื่อนที่เข้ามา และรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ต้องมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อน เช่น แพลทินัม หรือโลหะอื่นที่เคลือบด้วยแพลทินัม , แกรไฟต์ ซึ่งพยายามให้ผิวขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับสารละลายมากที่สุด เพื่อให้ไอออนมีโอกาสเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่วนมากจะใช้ผงแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าเนื่องจากผงแกรไฟต์มีจุดหลอมเหลวสูง และเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี และมีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ภายในผลึกได้ ทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อน และนำไฟฟ้า

2.1.2.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

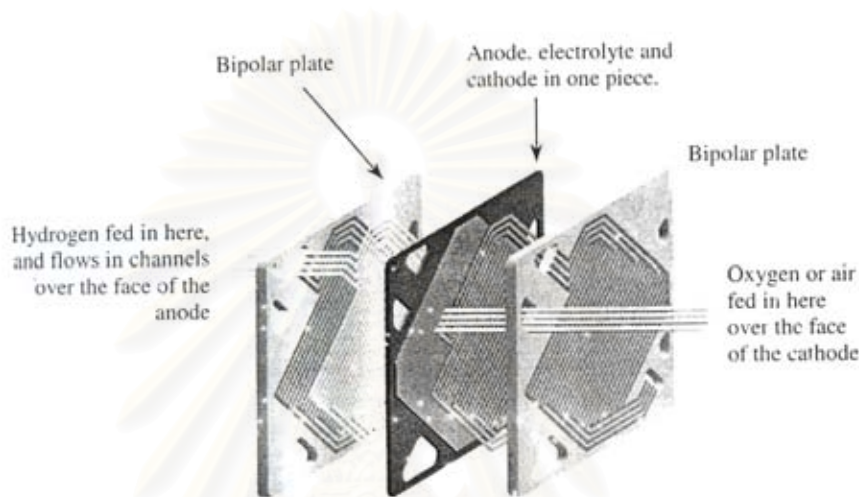
อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีบทบาทในเรื่องการถ่ายเทโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะมีทั้งแบบที่มีสถานะเป็นของแข็ง และเป็นของเหลว ตัวอย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง ลักษณะจะเป็นเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก จะมีอิเล็กโทรไลต์เป็นกรด ได้แก่กรดฟอสฟอริก เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของอิเล็กโทรไลต์คือ ต้องมีความสามารถในการถ่ายโอนประจุที่ดี และจะต้องไม่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า

2.1.2.3 แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้ว (bi-polar current collection plates)

เซลล์เชื้อเพลิงเพียงหนึ่งเซลล์จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์จริงๆ ได้มากนัก เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเพียงเซลล์เดียวมีค่าน้อยประมาณ (0.5 – 1.0 โวลต์) ดังนั้นในการใช้งานจริงเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆเซลล์จะถูกนำมาต่อกันแบบอนุกรม หรือเรียกว่าห่อเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell stack) จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการในห่อเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ต้องการ หรือกำลังไฟฟ้า (power) ซึ่งก็คือผลคูณของค่าความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นตัวกำหนดขนาดของเซลล์ เช่นพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของเซลล์

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์จะต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมโดยคั่น หรือแยกด้วยแผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้ว (bi-polar current collector plates) แผ่นสะสมกระแสอาจทำขึ้นจากแกรไฟต์ที่มีพอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม ซึ่งทำให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน นอกจากนี้ในแผ่นสะสมกระแสยังมีโลหะอยู่ ได้แก่ ไทเทเนียม (titanium) เซอร์โคเนียม (zirconium) และนิโอเบียม (niobium) ภายในแผ่นสะสมกระแสดังกล่าวจะถูกเจาะเป็นช่องเพื่อให้แก๊สไหลผ่าน และทำหน้าที่ช่วยกระจายแก๊สให้สัมผัสขั้วไฟฟ้าโดยใช้ช่องทางการไหลของแก๊สเป็นตัวนำลักษณะการไหลของแก๊ส

แผ่นสะสมกระแสดังกล่าวข้างต้นยังมีหน้าที่สำคัญอีก 2 อย่าง กล่าวคือ ทำหน้าที่เชื่อมต่อเซลล์ทางไฟฟ้าเป็นลักษณะการต่ออย่างอนุกรม อิเล็กตรอนที่ผลิตจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเซลล์จะถูกส่งต่อไปยังเซลล์ถัดไปโดยไหลผ่านแผ่นสะสมกระแส นอกจากนี้แผ่นสะสมกระแสยังทำหน้าที่แยกเซลล์ออกจากกัน นั่นคือ กันไม่ให้เกิดที่ไหลผ่านขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งผสมเข้ากับแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.2 แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

2.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ คืออยู่ในช่วง 60 – 100 °C

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วยแผ่นโพลีเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนตโพลีเอทีเรอโรเอทีอีเอ็น) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความพรุน และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มากับแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเยื่อแผ่นจะเกิดขึ้นไม่ได้หากเยื่อแผ่นไม่มี

น้ำ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เพราะจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม

2.2 แก๊สสังเคราะห์^[3,4]

แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas) คือ แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายอย่าง หรือในกระบวนการถลุงเหล็ก แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน หรือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการนำประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในกระบวนการกลั่นแยก การผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิด ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน ดังเช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน โดยวิธีการ

1. การรีฟอร์มแก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
2. การออกซิไดซ์บางส่วนน้ำมันหนัก (Partial oxidation of heavy oil , POX)
3. การแกสซิฟิเคชันถ่านหิน หรือ ถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)

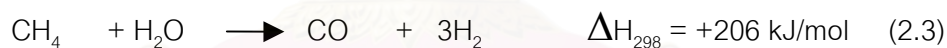
วิธีการต่างๆ ข้างต้นจะให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันไปซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ^[1]

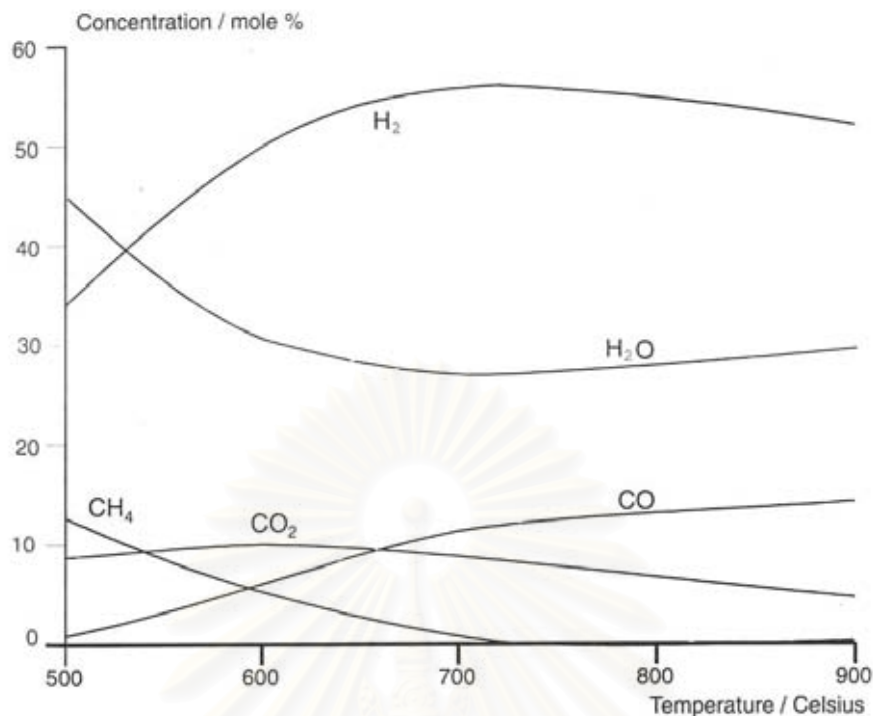
| Method of Manufactures | H ₂ /CO Ratio |
|------------------------|--------------------------|
| Oxygen-coke-steam | 0.6 |
| Air-coke-steam | 0.9 |
| Oxygen-coal-steam | 1 |
| Oxygen-fuel oil-steam | 1 |
| Propane-steam | 1.33 |
| Methane-oxygen | 1.7 |
| Methane-oxygen-steam | 2.3 |

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์

ในกรณีใช้กระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่าการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ ไฮโดรเจนเท่ากับ 1:3 โดยปริมาตร ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



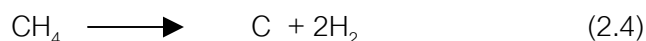
ที่อุณหภูมิ 1000-1130 เคลวิน ภายใต้ความดัน 20-40 บรรยากาศ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนอะลูมินา การรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจาก ได้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วนที่สูง(3:1) สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์นั้นอาจจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นแอมโมเนีย แต่ไม่เหมาะสมต่อการนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ไปผลิตเป็นเมทานอล และไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอัตราส่วนระหว่าง H₂/CO สูง รูปที่ 2.3 แสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา Steam Reforming ที่อุณหภูมิต่างๆ



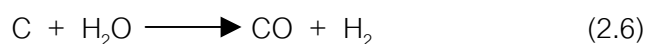
รูปที่ 2.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยา Steam Reforming ที่อุณหภูมิต่างๆ ความดันคงที่^[1]

การเลือกวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ข้างต้น ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของการนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งอาจจะใช้ในรูปแบบแก๊สสังเคราะห์รวมเพื่อผลิตสารเคมีตัวอื่นต่อไป แต่ต้องพิจารณาสัดส่วนของแก๊สทั้งสองเป็นหลักสำคัญ โดยจะเสนอรายละเอียดต่อไป หรืออาจใช้แก๊สแต่ละตัวแยกจากกันโดยนำไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีตัวอื่น เพื่อผลิตสารเคมีตัวที่ต้องการ ต้องพิจารณาที่ต้องการใช้เป็นหลัก โดยยึดความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นหลักในการพิจารณา กระบวนการดังกล่าวข้างต้น อาจขยายผลไปถึงการใช้เนฟทา(Naphtha) หรือ โทลูอิน (Toluene) เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้

สำหรับปฏิกิริยา Steam Reforming นี้ต้องระวังการเกิด Coking ของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาผ่านไปนานๆ ซึ่งการแก้ไขคือต้องมีการป้อนไอน้ำต่อมีเทน ให้มีอัตราส่วนที่สูงอยู่ตลอดเวลา โดยทั่วไปนั้นจะทำการป้อนที่อัตราส่วน 3:1 โดยการเกิด Coking นั้นปฏิกิริยาจะเป็นดังนี้



แต่ถ้ามีการป้อนอัตราส่วนไอน้ำที่สูงจะทำให้การเกิด Coke หดไปโดยจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



สำหรับกระบวนการ Partial Oxidation นั้นมีสมการในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



เป็นปฏิกิริยาในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทางหนึ่ง โดยปฏิกิริยานี้จะจำกัดปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้าให้มีปริมาณต่ำกว่าค่าที่ต้องการ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะมีอัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 2 ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังนั้นจึงต้องมีการดึงเอาความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาออกเพื่อทำให้ระบบมีอุณหภูมิคงที่ ตารางที่ 1 แสดงถึงองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการ Partial Oxidation โดยมีสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ Partial Oxidation ^[1]

| Gas Composition | Feedstocks | | | | | |
|----------------------------|------------|--------------|----------------|-------------|-----------------|-------|
| | Nat.Gas. | Light Naptha | Heavy Fuel Oil | Vac. Resid. | Propane Asphalt | Coal |
| Hydrogen | 6.18 | 52.09 | 46.74 | 44.80 | 43.69 | 34.39 |
| Carbon Monoxide | 33.75 | 42.59 | 48.14 | 49.52 | 50.09 | 44.22 |
| Carbon Dioxide | 3.10 | 4.88 | 3.80 | 4.16 | 4.45 | 18.64 |
| Methane | 1.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.38 |
| Nitrogen | 0.27 | 0.13 | 0.23 | 0.18 | 0.30 | 0.68 |
| Hydrogen Sulfide | - | 0.01 | 0.76 | 1.00 | 1.12 | 1.46 |
| COS | - | - | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.10 |
| Ammonia | - | - | - | - | - | 0.13 |
| H ₂ /CO mol/mol | 1.83 | 1.22 | 0.97 | 0.90 | 0.87 | 0.78 |

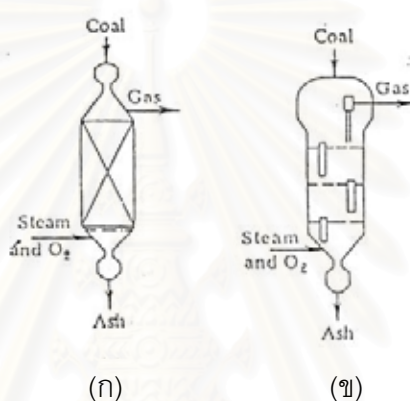
เนื่องจากปฏิกิริยา Reforming เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งต้องมีการป้อนความร้อนเข้าสู่ระบบตลอดเวลาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น ส่วนปฏิกิริยา Partial Oxidation เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งต้องมีการนำความร้อนออกจากระบบตลอดเวลาเช่นกัน ดังนั้นจึงมีผู้ทำให้ทั้งสองปฏิกิริยาเกิดพร้อมกันภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียว ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานที่จะใช้ระบบนี้เรียกว่าระบบ Autothermal Reactor โดยจะเกิดปฏิกิริยา Partial Oxidation ก่อนเพื่อนำความร้อนที่ได้นั้นมาใช้ในปฏิกิริยา Reforming

ในปัจจุบัน ถ่านหินกำลังมีบทบาทมากในการเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์เนื่องจากราคาน้ำมันดิบแพงขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า Coal

Gasification ซึ่งใช้ในการค้าโดยส่วนใหญ่ พัฒนาจากประเทศเยอรมัน โดยเฉพาะ Shell-Kopper Process ซึ่งมีรายงานโดย Volkel^[5] ว่าเป็นกระบวนการแกสซิฟิเคชันที่สมบูรณ์ที่สุดให้ผลผลิตแก๊สสังเคราะห์ประมาณ 93-98 เปอร์เซ็นต์ที่มีผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้น้อยมาก และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเหมือนกับการสังเคราะห์ทั้งสองที่กล่าวมาแล้วข้างต้นรวมกัน



โดยปฏิกิริยาแรกเหมือนกับกระบวนการรีฟอร์มด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาที่สองเหมือนกับกระบวนการ Partial Oxidation



รูปที่ 2.4 กระบวนการแกสซิฟายถ่านหิน^[6]

- ก) กระบวนการต่อเนื่องของถ่านหินที่มีขนาดเล็ก
- ข) กระบวนการฟลูอิดไอเซชันแบบหลายชั้น

เนื่องจากการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างๆ จะใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนนอกไซด์แตกต่างกันไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี^[7]

| Product | H ₂ :CO (Molar) | Wt. Retention (%) |
|------------------|----------------------------|-------------------|
| Methanol | 2:1 | 100 |
| Ethylene glycol | 1.5:1 | 100 |
| Acetic acid | 1:1 | 100 |
| Acetic anhydride | 1:1 | 85 |
| Ethyl acetate | 1.5:1 | 71 |
| Vinyl acetate | 1.5:1 | 70 |
| Ethanol | 2:1 | 72 |
| Ethylene | 2:1 | 44 |
| BTX | 1.5:1 | 42 |

ดังนั้นถ้าต้องการจะผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ ต้องใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนเท่ากับ 1 : 2 เป็นต้น ทางการค้าจะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำ หรือการผลิตกรดอะซิติก (Acetic Acid) หรือสารอะซิติก แอนไฮไดรด์ (Acetic Anhydride) นิยมใช้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการ Partial Oxidation เป็นต้น ยังมีบางกรณีที่สามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกัน เช่น การผลิตอัลดีไฮด์ (aldehyde) จากสารโอเลฟิน (Olefins) โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า ไฮโดรฟอร์มมีเลชัน (Hydroformylation) มีโคบอลต์ (Homogeneous Cobalt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ และความดันสูงๆ ซึ่งจะให้ปฏิกิริยาดังนี้

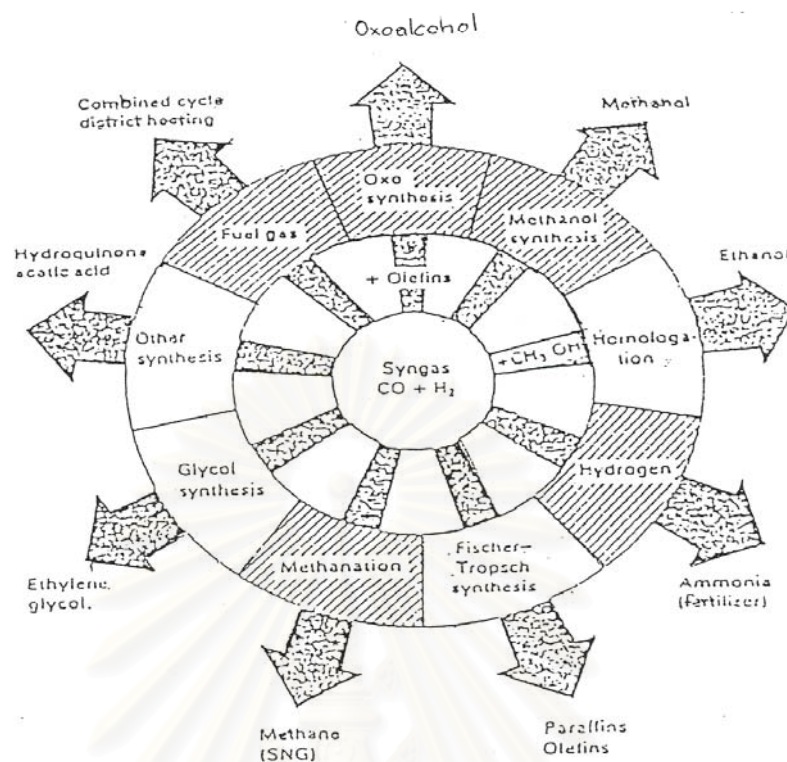


จากสมการจะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่นำมาใช้จะต้องมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเท่ากับ 1:1 ซึ่งจะต้องได้จากกระบวนการ Partial Oxidation จะเหมาะสมที่สุด

2.2.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

2.2.2.1 การใช้ประโยชน์ในรูปแบบแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ^[5]

แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่นๆ ได้อย่างมากมายซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่า แก๊สสังเคราะห์ สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดีโดยใช้ ซิงค์-โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอัลเคน (Alkanes) ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์และตัวรองรับปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นอัลเคนและแอลกอฮอล์ เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารอัลเคนที่มีโมเลกุลสูง

สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ กรดอะซิติก เมทิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของ Methyl tertiary butyl ether (MTBE)

นอกจากนี้แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า แร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์ใน

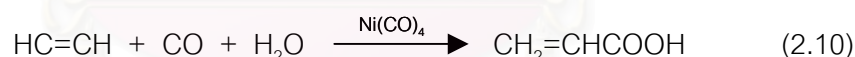
อัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

2.2.2.2 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

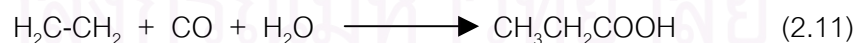
นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้วนั้น ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆ ได้อีกจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยสามารถที่จะแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว โดยมากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ คาร์บอนิเลชัน (Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชันนั้นอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปฏิกิริยาออกโซ (Oxo Reaction)

ในกระบวนการโอเลฟิน คาร์บอนิเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ แอลกอฮอล์ เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก โดยไฮไลอะกลุ่ม VIII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้อะเซทิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ Ni(CO)_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



ในการผลิตการผลิตกรดโพรพิโอนิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนต (Nickel propionate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 300 บาร์จะได้กรดโพรพิโอนิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพรพิโอนิก ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่างๆ

2.2.2.3 แก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นต่างๆกันซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆด้วยเช่น ราคาและความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่ายคือ การแยกสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Electrolysis of an aqueous solution) เช่นการแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ และในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนในอุตสาหกรรมที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นนั้นจะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิง ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ^[8]

| Method | Temp | Pressure | Catalyst | Remarks |
|---------------------------------------|--------|----------------------|---|--|
| 1. Electrolysis of Brine | - | - | - | This method is employed where 100 – 500 tons/annum of gas are required |
| 2. Reaction of steam with spongy iron | 650 °C | atmospheric pressure | - | - |
| 3. Reaction of natural gas with steam | 900 °C | - | Ni catalyst promoted by magnesia or alumina | - |

ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 2000 ทั่วโลกจะมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตแอมโมเนีย และอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนทั่วโลกในปี 2000^[9]

| End use | Demand in year 2000 | | | |
|---|---------------------|--------|-------------------|--------|
| | United states | | Rest of the world | |
| | Low | High | Low | High |
| Anhydrous ammonia | 2,460 | 4,490 | 7,200 | 12,700 |
| Petroleum refining (e.g. Hydrocracking) | 2,340 | 32,640 | 8,000 | 36,000 |
| Other uses | 1,450 | 24,660 | 2,000 | 25,000 |
| Total | 8,250 | 61,790 | 15,200 | 73,700 |

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนียนิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์(Haber Process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และจากหลักของ เลอ ชาเตอลีแยร์(Le Chatelier's Principal) พบว่าควรทำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำๆ และยังมี การใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_4) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่นๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

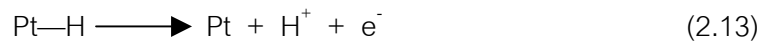
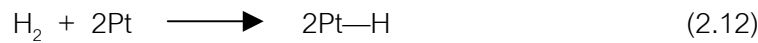
การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม จะใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่นๆ โดยใช้กระบวนการไฮโดรซัลเฟอร์ไรซิง (Hydrosulfurizing) และกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และในปัจจุบันได้มีการนำแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงไปใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งต้องมีการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 ppm

2.3 ผลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อเซลล์เชื้อเพลิง

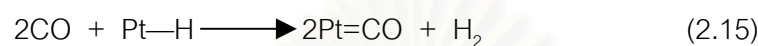
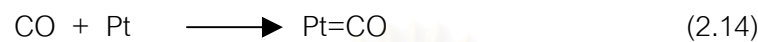
เนื่องจากภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนจะมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โลหะแพลทินัม ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนให้เป็นไฮโดรเจนอิออนนั้น ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเซลล์

เชื้อเพลิงประเภทนี้(PEMFC) คือจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะแพลทินัม ทำให้ไม่สามารถที่จะเกิดไฮโดรเจนอิสระได้ออนได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้น Bellows^[10] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าได้สมการดังนี้

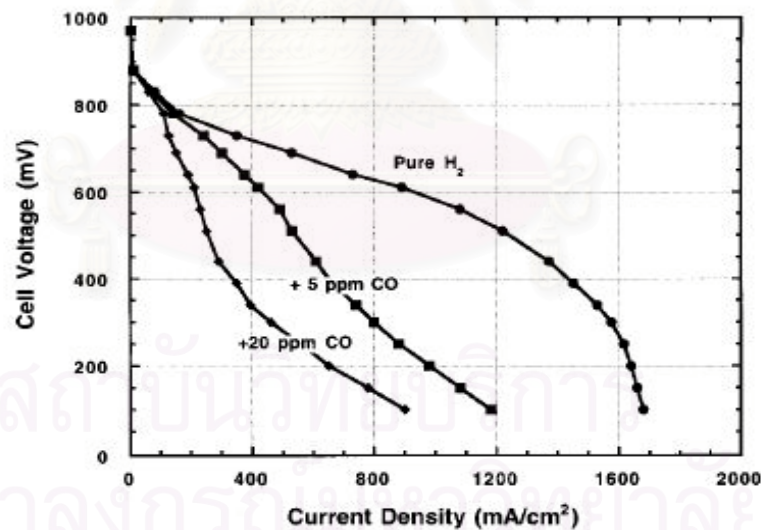
ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนอิสระบนโลหะแพลทินัม



และเมื่อมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์



กล่าวคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกดูดซับบนโลหะแพลทินัมทำให้เกิดพันธะระหว่าง Pt=CO ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงยากในการทำลาย ซึ่งมีผลทำให้เกิดการขัดขวางในการให้แก๊สไฮโดรเจนเกิดการดูดซับบนโลหะแพลทินัม จึงเกิดปริมาณไฮโดรเจนอิสระได้น้อยทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงซึ่งรูปที่ 2.6 จะแสดงถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยแสดงในเทอมของค่า Current Density และค่า Cell Voltage พบว่าเมื่อประมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นนั้นจะทำให้ระบบนั้นมีค่า Cell Voltage ลดลงเมื่อเพิ่มค่า Current Density



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อเซลล์เชื้อเพลิง^[10]

ดังนั้นแก๊สที่ป้อนเข้าในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะต้องมีการลดปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณน้อยที่สุด โดยทั่วไปปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ยอมให้มีในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนนี้คือมีปริมาณไม่เกิน 10 ส่วนในล้านส่วน(10 ppm) ตารางที่ 2.6 แสดงถึงปริมาณแก๊สต่างๆที่สามารถป้อนเข้าในเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยไม่เกิดผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.6 ปริมาณของแก๊สที่สามารถป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ^[1]

| Gas Species | PEM Fuel Cell | AFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| H ₂ | Fuel | Fuel | Fuel | Fuel | Fuel |
| CO | Poison(>10 ppm) | Poison | Poison (>5%) | Fuel ^A | Fuel ^A |
| CH ₄ | Diluent | Diluent | Diluent | Diluent ^B | Diluent ^B |
| CO ₂ and H ₂ O | Diluent | Poison ^C | Diluent | Diluent | Diluent |
| S | Few Studies. todate | Unkonwn | Poison (>50ppm) | Poison (>0.5ppm) | Poison (>1.0ppm) |

A – In reality CO reacts with H₂O producing H₂ and CO₂ via the shift reaction and CH₄ with H₂O reforms to H₂ and CO faster than reacting as a fuel at the electrode

B – A fuel in the internal reforming MCFC and SOFC

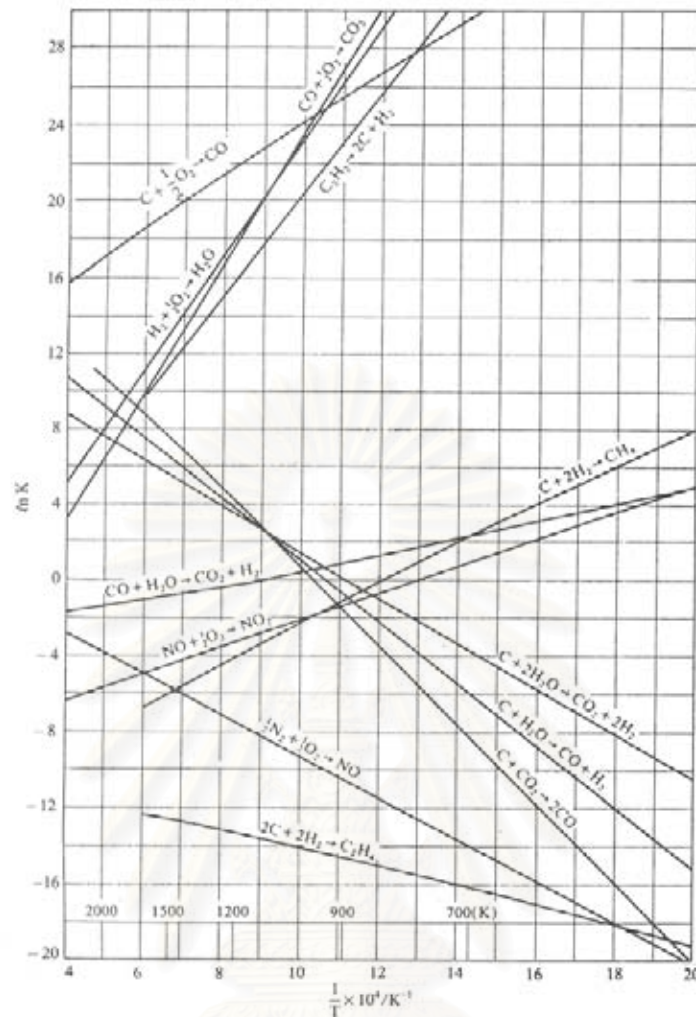
C – The Fact that CO₂ is a poison for the alkaline fuel cell more or less rules out its use with reformed fuels

2.4 ปฏิกริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์^[11]

ปฏิกริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water Gas Shift Reaction) ได้พัฒนาขึ้นมาในกระบวนการการผลิตแอมโมเนีย ถูกพัฒนาเพื่อที่จะเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกริยาในกระบวนการการสังเคราะห์แอมโมเนีย และกระบวนการไฮโดรจิเนชัน ซึ่งสมการแสดงได้ดังสมการที่ 2.16



เป็นปฏิกริยาคายความร้อน โดยในกระบวนการนี้จะใช้ปริมาณไอน้ำมากเกินไปเพื่อทำให้ปฏิกริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยที่ระบบนั้นจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุด(Maximum Conversion) ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงค่าความดันในขณะดำเนินการผลิต ตามหลักของเลอ ชาเตอลิแยร์ (Le Chartelier's Principal) และกระบวนการนี้ได้ใช้ Iron Oxide เป็นตัวเร่งปฏิกริยาโดยที่ค่าคงที่สมดุล(Equilibrium Constant) นั้นจะเปลี่ยนตามอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ที่อุณหภูมิต่างๆ^[12]

ในปฏิกิริยา Water Gas Shift นั้นในทางอุตสาหกรรมจะมีแบ่งขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.1.1 ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Water Gas Shift Reaction, H.T Shift)

จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงโดยสภาวะที่ทำการดำเนินการคือ ที่อุณหภูมิ 350-475 องศาเซลเซียส และมีเปอร์เซ็นต์การแปรสภาพแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ประมาณ 90-95% ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ Fe_3O_4 และมีการเติมโครเมียมเล็กน้อยเพื่อเป็นตัวโปรโมเตอร์ โดยองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย Fe 55% และ Cr 6% และอาจมีการเติมกำมะถัน(Sulfur) เล็กน้อยเพื่อป้องกันตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน (Impregnation) ในการเกิดปฏิกิริยานั้นจะมีการเติมน้ำด้วยปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มาก และยังป้องกันการเกิดโค้ก (Coking)

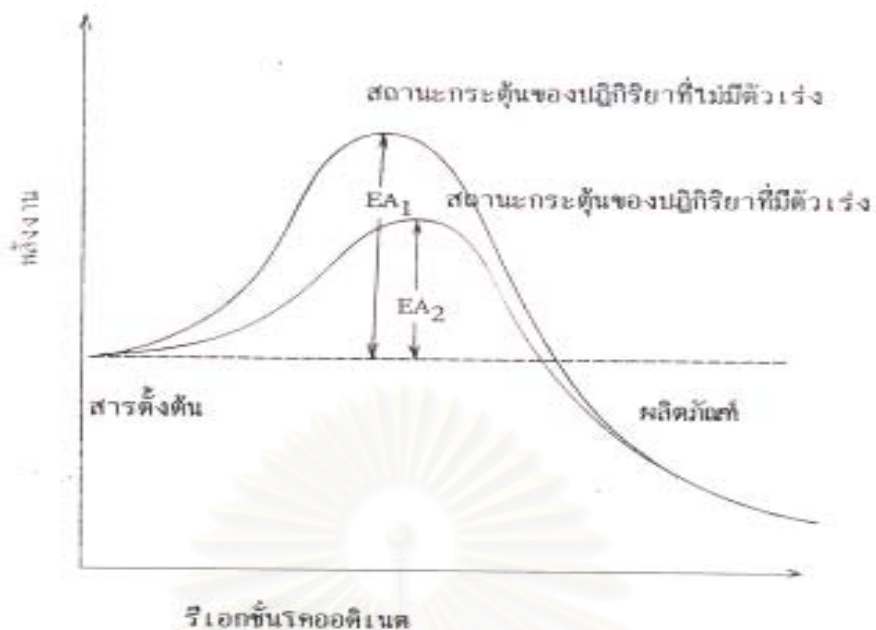
2.1.2 ปฏิกริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Water Gas Shift Reaction, L.T Shift)

ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ 200-250 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ทองแดงและซิงค์ออกไซด์ (Copper and Zinc Oxide) โดยที่ตัวที่ทองแดงจะเป็นองค์ประกอบหลักในการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนสังกะสีที่เติมไปเพื่อที่จะป้องกันการเกิด poisoning ของโลหะทองแดงจากการดูดซับกำมะถัน ที่มากับแก๊สสังเคราะห์ และซิงค์ออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ (Supporter) ให้กับโลหะทองแดงอีกด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดการหลอมตัวกัน (Sintering) ได้ง่ายกว่าเหล็กเนื่องจากทองแดงมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาให้คงที่โดยปกติไม่เกิน 250 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขายทั่วไปจะมีองค์ประกอบคือ CuO 30%, ZnO 45% และ Al₂O₃ 13% โดยเมื่อผ่านปฏิกิริยานี้แล้วจะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เหลืออยู่ประมาณ 0.2-0.4 โมลเปอร์เซ็นต์ เกิดซึ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้อย่างดี (good conversion)

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ^[3,4,11,13]

คำว่า “ ตัวเร่งปฏิกิริยา ” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่ คำว่า คะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลซีน (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (split or break) ดังนั้น “ ตัวเร่งปฏิกิริยา ” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสถานะทรานสิชัน (Transition – State – Theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลงนั่นเอง แสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.8 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา^[11]

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาหรือเศษส่วนการเปลี่ยน ซึ่งถูกควบคุมโดยอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว

2.5.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

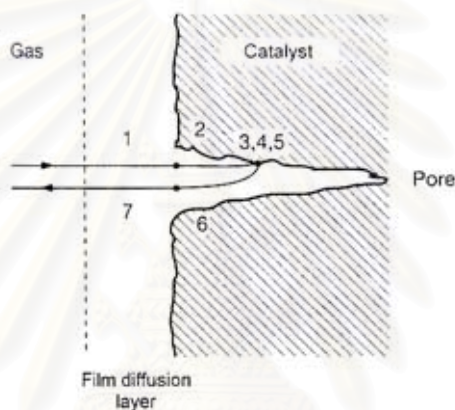
ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อผสมนี้เนื่องจากความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นผิวดังต่อปริมาณมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุ (support) ที่มีรูพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากที่ใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพลง จะต้องมีการปรับสภาพเดิมอีกเป็นระยะ ๆ เรียกว่า activation

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เคลือบบนวัสดุที่มีความพรุนสูง (high porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ และสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

1. การถ่ายเทมวลสารจากของไหลภายนอกไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Mass transfer through external boundary layer)
2. การแพร่มวลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Diffusion into pores)
3. การดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Chemisorption)
4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Reaction)
5. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลุดจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Desorption of products)
6. ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุน (Diffusion of products out of pores)
7. การถ่ายเทมวลสารของผลิตภัณฑ์ออกจากสู่ของไหล (Mass transfer back to bulk fluid)



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้อง^[13]

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ (Supported metal catalysis)

ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ความมีรูพรุน ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว ความสามารถในการต้านการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้ในปฏิกิริยาบางชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฉพาะโลหะอย่างเดียวอาจไม่สามารถทำหน้าที่ได้ดี ถึงแม้ว่าจะทำได้แต่ก็ไม่คุ้มกับการลงทุน จึงมีการนำเอาสารชนิดหนึ่งมาใช้ เรียกว่าตัวรองรับ (Support)

ข้อดี หรือข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดที่มีตัวรองรับ ได้แก่

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดการ หรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และถ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวแล้วตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังสามารถนำมาใช้ได้อีกโดยวิธีการกรอง

3. อนุภาคที่เป็นโลหะสามารถถูกแยกจากกันได้เป็นอย่างดีโดยการกรองแบบ
ซินเทอร์ริง (Sintering)

สำหรับข้อดีอื่นๆ นั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของระบบตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ ธรรมชาติ
ของโลหะ และสารที่ใช้เป็นตัวรองรับ

คุณสมบัติที่สำคัญของตัวรองรับมีดังนี้

ก. เชิงเศรษฐศาสตร์

- 1) เพื่อลดต้นทุนโดยการขยายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง

ข. เชิงกล

- 1) เพื่อให้ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength)
- 2) เพื่อปรับให้ความหนาแน่นของบัลคิตีขึ้น (Optimize bulk density)
- 3) เพื่อเป็นแหล่งความร้อน
- 4) เพื่อเจือจางบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากเกินไป

ค. เชิงลักษณะทางเรขาคณิต

- 1) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนสูงขึ้น
- 3) เพื่อปรับขนาดของผลึก และอนุภาค
- 4) เพื่อให้อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีสภาพที่เหมาะสมที่สุดในปฏิกิริยา

ง. เชิงเคมี

1) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ทั้งนี้จะได้เพิ่มความว่องไว
จำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา และลดกระบวนการซินเทอร์ริง

2) เพื่อยอมรับความเป็นไปได้ทางเคมีในการเกิดปฏิกิริยาตามกลไกของ
การหมุน

จ. การเสื่อมสภาพ

- 1) เพื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีเสถียรภาพต่อการซินเทอร์ริง
- 2) เพื่อลดความเป็นพิษลง

ตัวรองรับแต่ละชนิดที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติตามข้างต้นมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับ
ชนิดของตัวรองรับ จึงแล้วแต่ผู้ที่จะนำไปใช้ว่าจะยอมรับตัวรองรับชนิดไหนในปฏิกิริยานั้นๆ ตัวรองรับ
ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ อลูมินา ซิลิกา และถ่านกัมมันต์

สิ่งสำคัญที่สุดของตัวรองรับที่ต้องมีอยู่ คือ ความสามารถในการต้านทานสภาวะการรวม
ตัวอันเนื่องมาจากความร้อน อุณหภูมิที่โครงผลึก (Lattice) เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า อุณหภูมิ
ฮัตติง (Huttig temperature) มีค่าประมาณ 0.3 ของจุดหลอมเหลวของโลหะ อุณหภูมิแทมแมน

(Tamman's Temperature) เป็นอุณหภูมิที่ผลึกเริ่มเคลื่อน มีค่าประมาณ 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวของโลหะ

ในตารางที่ 2.7 แสดงถึงจุดหลอมเหลวของตัวรองรับชนิดต่างๆ และยังแสดงว่าตัวรองรับเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นกรด เบส หรือกลาง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกชนิดของตัวรองรับ ส่วนตารางที่ 2.8 แสดงถึงตัวรองรับชนิดต่างๆ โดยแบ่งตามพื้นที่ผิวของตัวรองรับ

ตารางที่ 2.7 การแบ่งตัวรองรับตามจุดหลอมเหลว และความเป็นกรด-เบส^[14]

| Bases | Amphoters | Neutral | Acids |
|------------|---------------------------------------|---|--|
| MgO (2800) | Al ₂ O ₃ (2015) | MgAl ₂ O ₄ (2135) | SiO ₂ (1713) |
| CaO (1975) | | CaAl ₂ O ₄ (1600) | SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ |
| ZnO (1975) | TiO ₂ (1825) | CaAl ₂ O ₄ (d 1535) | Zeolites |
| MnO (1600) | ThO ₂ (3050) | | Al phosphates |
| | Ce ₂ O ₃ (1692) | | |
| | CeO ₂ (2600) | MgSiO ₂ (1910) | Carbon |
| | Cr ₂ O ₃ (2435) | Ca ₂ SiO ₄ (2130) | |
| | | CaTiO ₃ (1975) | |
| | | CaZnO ₃ (2550) | |
| | | MgSiO ₃ (d 1557) | |
| | | Ca ₂ SiO ₃ (1540) | |
| | | Carbon | |

d = decompose

ตารางที่ 2.8 ตัวรองรับชนิดต่างๆ ตามพื้นที่ผิว^[3]

| | | |
|---|---|---|
| Low surface area $< 1 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ | Essentially Non-porous Porous | ground glass Alundum ($-\text{Al}_2\text{O}_3$) Silicon carbide kieselguhr Pumice |
| High surface area $> 1 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ | Essential Non-porous Porous | natural silica-alumina carbon black Titania Zinc oxide natural clays Synthesis silica-aluminas Alumina Magnesia Activated carbon Silica Abestos |

2.6 การดูดซับทางเคมี

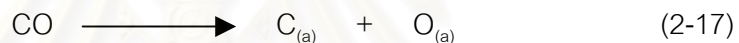
เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างตัวดูดซับ(adsorbent) และตัวถูกดูดซับ(adsorbate) โดยช่องว่างของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (Rearrangement) โดยอิเล็กตรอน

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

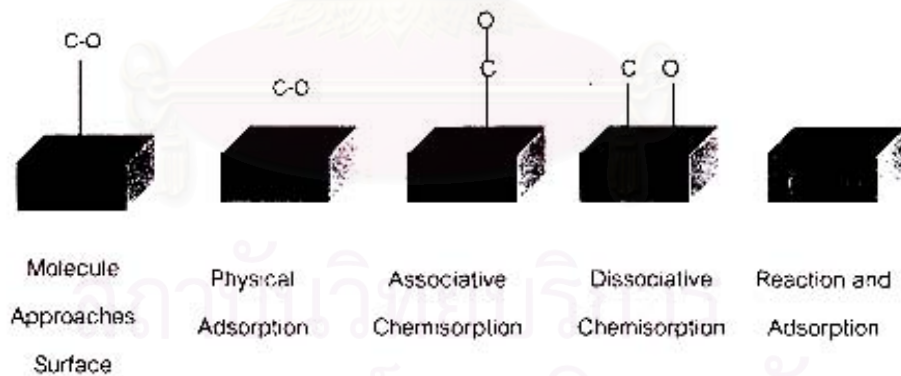
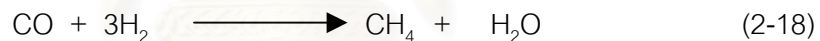
การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

1. การดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (Associative Chemisorption)
2. การดูดซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (Dissociative Chemisorption)

สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 เมื่อพิจารณาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะทองแดงบนตัวรองรับแอลฟาอะลูมินา และบนโลหะนิกเกิล พบว่าไม่เกิดพันธะเคมีขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแอลฟาอะลูมินาแต่เกิดการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากตัวรองรับอะลูมินาไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าเกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้นแทน พลังงานของการดูดซับระหว่างโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น การเกิดการดูดซับทางเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะทองแดงเป็นการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะทองแดงมีพลังงานมากกว่าพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ แต่ไม่มากพอที่จะทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ในแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในกรณีการดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะนิกเกิลอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะ นิกเกิลมากพอที่จะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกทำให้พันธะของคาร์บอนกับออกซิเจนแตกออกดังสมการ



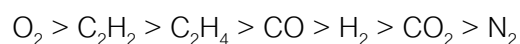
จากการเกิดการดูดซับทางเคมีแบบแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะนิกเกิล นำไปสู่การเตรียมมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการข้างล่าง



รูปที่ 2.10 การดูดซับลักษณะต่างๆ ของคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ^[11]

2.6.2 การดูดซับทางเคมีบนโลหะ (Chemisorption of Metal)^[11,13,15]

ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับทางเคมีของแก๊สต่างๆบนผิวของแข็งจะเป็นตัวบ่งบอกทำนายการเกิดปฏิกิริยา และการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอธิบายทางเคมีเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ จากการศึกษาลำดับความสามารถของการดูดซับทางเคมีของแก๊สต่างๆบนผิวของโลหะจะได้ผลดังต่อไปนี้



ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพื้นผิวโลหะ ขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของแก๊สที่ถูกดูดซับ ผิวโลหะที่มีความว่องไวในการเกิดการดูดซับสูงจะสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้ได้ทั้งหมด(ซึ่งรวมถึงแก๊สไนโตรเจนที่มีเกิดการดูดซับได้ยากเนื่องจากมีความว่องไวต่ำ) เช่นเดียวกันในทางตรงกันข้ามก็มีโลหะบางชนิดจะดูดซับเฉพาะแก๊สออกซิเจนเท่านั้น และโลหะอีกประเภทที่มีความว่องไวปานกลางก็จะดูดซับเฉพาะแก๊สบางชนิดเท่านั้น ความสามารถของโลหะในการเกิดการดูดซับทางเคมีกับโมเลกุลของแก๊สนั้นอธิบายได้โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับของแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งไม่รวมถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ออกจากผิวของโลหะของโมเลกุลที่เกิดขึ้นใหม่

โลหะชนิดต่างๆที่ได้กล่าวถึงมาแล้วนั้นสามารถที่จะจำแนกตามประเภทได้ดังตารางที่ 2.9 ซึ่งแบ่งเป็นประเภทของโลหะตามความสามารถในการดูดซับทางเคมีโดยใช้ลำดับความสามารถของการดูดซับเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.9 การจำแนกประเภทของโลหะตามความสามารถในการดูดซับทางเคมี^[13]

| ประเภทของโลหะ | แก๊ส | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----|----------------|-----------------|----------------|
| | O ₂ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | CO | H ₂ | CO ₂ | N ₂ |
| A) Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe Ru, Os | + | + | + | + | + | + | + |
| B ₁) Ni, CO | + | + | + | + | + | + | |
| B ₂) Rh, Pd, Pt, Ir | + | + | + | + | + | - | - |
| B ₃) Mn, Cu | + | + | + | + | * | - | - |
| C) Al, Au | + | + | + | + | - | - | - |
| D) Li, Na, K | + | + | - | - | - | - | - |
| E) Mg, Ag, Zn, Cd, In, Si, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi | + | - | - | - | - | - | - |

+ หมายถึง การดูดซับทางเคมีที่แข็งแรงมาก

* หมายถึง การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ช้า

- หมายถึง ไม่เกิดการดูดซับทางเคมี

จากตารางที่ 2.9 กลุ่มของโลหะนั้นจะถูกจัดขึ้นตามความสามารถของการดูดซับทางเคมีของแก๊สบางชนิดเท่านั้น หากพิจารณากลุ่มของโลหะประเภทนี้เปรียบเทียบกับกลุ่มโลหะตามตารางธาตุจะได้ว่า โลหะประเภท A เป็นโลหะที่มาจากกลุ่ม IV, V, VI, VII และ VIII ของตารางธาตุ ซึ่งกลุ่ม VIII ได้แก่ Fe, Ru และ Os สำหรับโลหะประเภท B1 เป็นโลหะกลุ่ม 9 และ 10 โดยที่กลุ่ม 9 ประกอบด้วย Co, Rh, Ir และ Ni ส่วนกลุ่ม 10 ประกอบด้วย Ni, Pd และ Pt สำหรับโลหะประเภท B₂ และโลหะประเภท B₃ เป็นโลหะโนเบิลและโลหะที่มีขนาดใหญ่สองตัวแรกของกลุ่ม VIII

ตามลำดับ สำหรับโลหะประเภท C, D และ E ต่างเป็นโลหะที่อยู่หน้าและหลังของธาตุทรานซิชันตามตารางธาตุ

การแบ่งนั้นสามารถที่จะอธิบายได้โดยใช้โครงสร้างของอิเล็กตรอนบนผิวโลหะ โดยหากพิจารณาถึงโลหะทรานซิชันจะพบว่า โลหะประเภทนี้จะมี d-orbital อิเล็กตรอนอยู่ที่อิเล็กตรอนในชั้น d นี้จะทำให้เกิดพันธะระหว่างแก๊สกับพื้นผิวของโลหะ ซึ่งโลหะทรานซิชันจะมี d-อิเล็กตรอนที่ไม่จับคู่ (Unpaired d-electron) อยู่บริเวณชั้นนอกสุดทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีได้ดี สำหรับพวกที่ไม่เป็นโลหะทรานซิชันนั้นจะมีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดอยู่ในชั้นของ s หรือ p-ออร์บิทัลเท่านั้นทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดี

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T.V. Choudhary and D.W. Goodman^[16] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต CO-Free ไฮโดรเจน เพื่อใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง โดยพบว่าขั้นตอนที่เกี่ยวข้องนั้นจะมีอยู่ 2 ขั้นตอนคือ การเปลี่ยนแก๊สมีเทนให้เป็น CO-Free Hydrogen และ Surface Carbon เป็นขั้นตอนแรก ส่วนขั้นตอนที่สองคือกระบวนการ Steam Gasification ของ Carbon Surface การทดลองนี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Ni/Zirconium (88%Ni) และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 648 องศาเซลเซียส โดย CO-Free Hydrogen ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกนั้นจะมีค่าระหว่าง 1-1.34 โมลต่อโมลของมีเทนที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งขึ้นกับสภาวะในการทดลอง และ ในขั้นตอนที่สองนั้นจะเกิดการผลิต แก๊สไฮโดรเจนอีกโดยจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สผสมระหว่าง แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการแยกแก๊สผสมนี้สามารถที่จะแยกได้โดยง่ายและสามารถที่จะนำแก๊สกลับมาใช้ใหม่ได้

Lyuke SE และคณะ^[17] ได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการ Pressure Swing Adsorption (PSA) ในการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ Sn-activated carbon เป็นตัวดูดซับเตรียมจากวิธี Impregnation ทำโดยการจุ่มถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ลงในสารละลาย SnCl₂·2H₂O ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 180 °C จากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับและการคลายการดูดซับนั้นมีอัตราที่เท่าๆกัน อาจกล่าวได้ว่าการเกิดการดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ซึ่งสามารถที่จะดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จาก 1000 ppmv เหลือ 40.2 ppmv สำหรับการใส่ Activated carbon เพียงอย่างเดียวเป็นตัวดูดซับและเหลือ 10.4 ppmv สำหรับการใส่ Sn-activated carbon เป็นตัวดูดซับ

K. Ledjeff-Hey, J.Rose, R.Wolters^[18] ได้ศึกษาถึงกระบวนการในการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จาก Synthesis Gas ที่ได้จากกระบวนการต่างๆคือ Biomass Gasification,

CH₄ Steam Reforming, Methanol Reforming โดยใช้ปฏิกิริยา Water gas shift, CO₂ Scrubbing และ Methanation ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Aspen ได้สภาวะดังนี้ใน CO₂ Scrubbing ขนาดสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ใช้สารละลาย MEA ความเข้มข้น 10 mole% ในน้ำ และ 4 โมลของเอมีนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับเอมีนเท่ากับ 3.5 ลิตรต่อชั่วโมง และสำหรับการเกิดปฏิกิริยา Methanation เครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาตร 0.05 ลิตร โดยภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โลหะนิกเกิล ทำที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทำการทดลองพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เหลืออยู่น้อยมาก (ไม่สามารถวัดได้) โดยแก๊สที่ได้จากทั้งสามกระบวนการจะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนต่างๆกันคือ 47.1, 97.8, 99.1% ตามลำดับและมีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า 80%

A.Y. Tonkovich, J.L.Zilka, M.J. LaMont, Y. Wang, R.S. Wegeng^[19] ศึกษาถึงการเกิดปฏิกิริยา Water gas shift โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ รูทีเนียม (Ru) บนตัวรองรับ 2 ประเภทคือแบบที่เป็นผงและแบบที่เป็น Monolith โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและ อัตราส่วนของไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 3:1 นั้นพบว่าแบบที่เป็นผงนั้นจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลา 25 มิลลิวินาที มีค่ามากกว่า 98 และที่เวลา 50 มิลลิวินาที นั้นจะให้ร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 99.8 โดยมีค่า %selectivity ของ CO₂ และ H₂ เท่ากับ 100 % เมื่อทำการทดลองที่เวลามากขึ้น(มากกว่า 100 มิลลิวินาที)พบว่า %selectivity ของ CO₂ และ H₂ จะลดลง แต่ %selectivity ของ CH₄จะเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 22.82% ซึ่งคำนวณโดยโปรแกรม FACT และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบ Monolith ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสนั้นร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าน้อยกว่า 10 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 องศาเซลเซียสจะได้ร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 90 ที่เวลา 10 ms และ 94% ที่เวลา 50ms โดยมี %selectivity ของ CO₂ และ H₂ เท่ากับ 100%

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

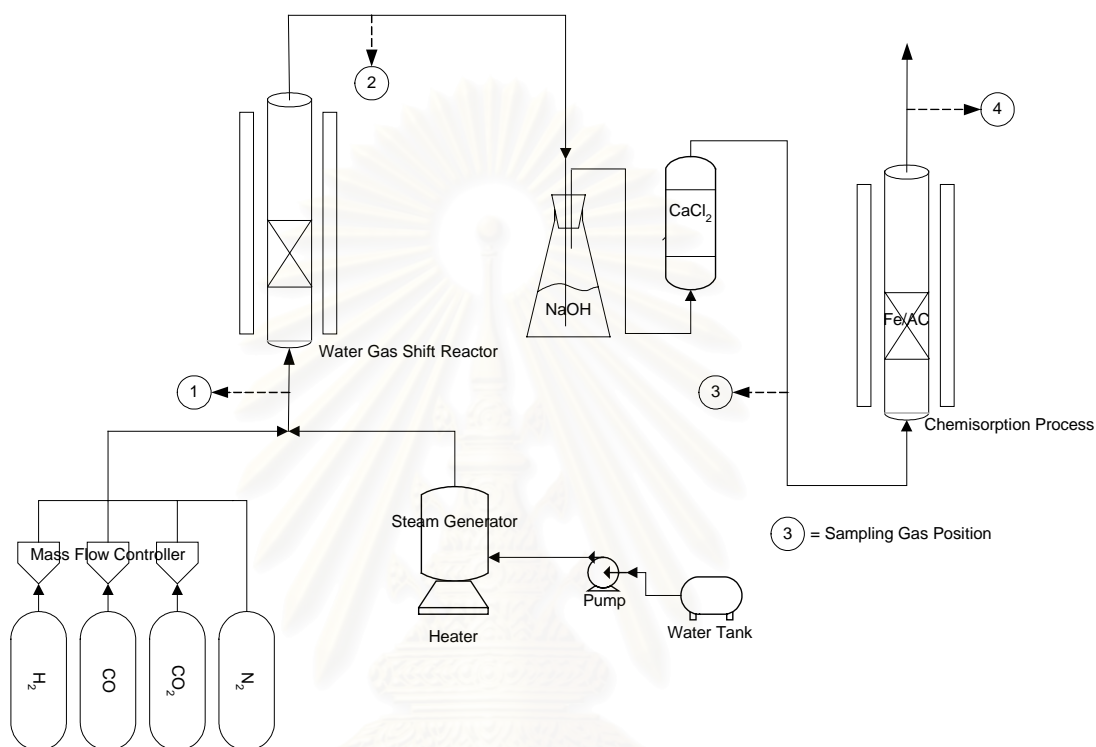
การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการในการทำแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนของปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์ และขั้นตอนการดูดซับทางเคมี โดยอุปกรณ์การทดลองนั้นจะประกอบไปด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์ แบบเบตนิ่ง
2. ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์ ประกอบไปด้วย
 - เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง (Tubular Furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น MTF 12/25/250
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) และขดลวดให้ความร้อน
 - เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผล (Recorder) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 4173
3. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับทางเคมี
4. ชุดควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับทางเคมี ประกอบไปด้วย
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater)
 - อ่างน้ำมัน (Oil Bath)
5. เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam Generator)
6. เครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ยี่ห้อ Master Flex รุ่น 77200-60
7. เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วย
 - วาล์วปรับความดัน (Regulator)
 - เครื่องควบคุมอัตราการป้อนแก๊สขาเข้า (Gas Flow Meter) ยี่ห้อ MKS รุ่น M100B

8. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
9. เครื่องแยกไอน้ำออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้
10. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph ; GC) ยี่ห้อ

Thermofinnigan รุ่น KA000023

โดยลักษณะการทำงานของเครื่องแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงถึงลักษณะการทำงานของเครื่อง

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่งสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 (Stainless Steel TYPE 316) โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร และมีความสูง 40 เซนติเมตร โดยมีการติดตั้งตระแกรงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้บริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งแก๊สจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างด้วยท่อส่งแก๊ส และแก๊สผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์

3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์

ชุดควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ โดยจะประกอบไปด้วย เตาเผาแบบท่อกลวง และเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิชนิด K

3.1.2.1 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

เตาเผาที่ใช้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยเตาเผาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ตามสภาวะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

3.1.2.2 เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นรุ่น K สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิลจะเข้าเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะขยายสัญญาณประมาณ 40 เท่า สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าของอุณหภูมิเบต ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนเครื่องบันทึกผล (Recorder)

3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการดูดซับทางเคมี

ทำจากหลอดแก้วกลวงมีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U-tube) ความสูง 26 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร โดยที่ปลายทั้งสองจะมีท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3175 เซนติเมตรสำหรับแก๊สเข้าออก แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมี

3.1.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับทางเคมี

ประกอบไปด้วยอ่างน้ำมันสำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ โดยที่มีตัวให้ความร้อนคือ เครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า ระบบจะถูกควบคุมอุณหภูมิโดยวัดอุณหภูมิของระบบผ่านเทอร์โมคัปเปิล และส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) และส่งสัญญาณกลับมาในรูปของการเปิดปิดเครื่องให้ความร้อน



รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิกับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการดูดซับทางเคมี

3.1.5 เครื่องผลิตไอน้ำ

เครื่องผลิตไอน้ำที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งควบคุมการให้ความร้อนโดยใช้เครื่องให้ความร้อน (Heater) โดยภายนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแบบใยแก้ว (Asbestos) รอบเครื่องผลิตไอน้ำเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และทำให้เปลี่ยนสถานะของน้ำที่อุณหภูมิห้องให้กลายเป็นไอน้ำได้ทันที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

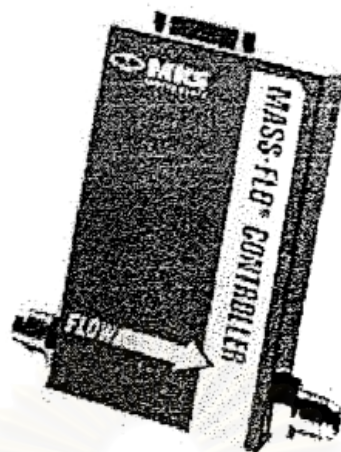
ในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการทดลองจะนำน้ำกลั่นมาป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ทางด้านล่างของเครื่องผลิตไอน้ำด้วยอัตราคงที่ น้ำกลั่นจะกลายเป็นไอน้ำภายในเครื่องผลิตไอน้ำทันที จากนั้นไอน้ำจะออกสู่ด้านบนของเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งเป็นช่องเปิดที่ต่อกับท่อทองแดงซึ่งรอบท่อจะมีการพันขดลวดให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของไอน้ำไม่ให้กลั่นตัว จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อไป



รูปที่ 3.6 เครื่องผลิตไอน้ำ

3.1.6 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนของแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

แก๊สที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน แก๊สทั้งหมดนี้จะบรรจุอยู่ในถังเก็บแก๊สรูปทรงกระบอก ซึ่งในแต่ละถังจะมีการติดตั้งวาล์วปรับความดันเพื่อปรับความดันของแก๊สที่ออกจากถัง แก๊สที่ผ่านวาล์วปรับความดันจะไหลผ่านท่อ แล้วจึงผ่านเครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนแก๊สก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส

3.1.7 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ทำจากขวดรูปชมพู่ ขนาด 4 ลิตร โดยทางด้านบนของขวดจะปิดด้วยจุกยางที่มีท่อให้แก๊สผ่านเข้าออกได้ ภายในจะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH solution) ความเข้มข้น 2 M เพื่อทำการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

3.1.8 เครื่องแยกไอน้ำออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้

เครื่องแยกไอน้ำจากผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่บรรจุแอนไฮดรัสแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 Anhydrous) เพื่อดูดซับความชื้นที่มีอยู่ในแก๊สผลิตภัณฑ์ ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส

3.1.9 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph ; GC)^[20]

Gas Chromatography (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary Phase และมีแก๊สพา (Carrier Gas) เป็น Mobile Phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็น Chromatogram โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Thermofinnigan รุ่น KA00023 ดังรูปที่ 3.8 โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier Gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow Controller)
3. ระบบการฉีด (Injector Port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)



รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญ มีดังนี้

ก) แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอที่ Injector Port ให้เข้าสู่คอลัมน์ โดยจะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่เสมอ แก๊สพาโดยทั่วไปมีคุณสมบัติดังนี้ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างมีความบริสุทธิ์ และง่ายต่อการซื้อหาและมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปแก๊สที่นิยมใช้ คือ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน และ ไฮโดรเจน แต่ในการทดลองนี้จะใช้ แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา

ข) คอลัมน์

วัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์มีหลายชนิด ในการวิเคราะห์นี้ใช้คอลัมน์บรรจุแบบ พอร์พาทเอน (Porapak N) เป็นตัวดูดซับสารต่างๆไว้ระหว่างการวิเคราะห์

ค) ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์ คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และอาจจะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์ นั้นควรมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- มี Dynamic Range ที่กว้าง
- มีเสถียรภาพ (Stability)

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ดีเทคเตอร์ 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID)

ดีเทคเตอร์แบบ TCD จะวัดสารที่ออกมาพร้อมกับแก๊สพาโดยใช้หลักการการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference Gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) ในการทดลองนี้จะใช้ TCD ในการหาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในระบบ

ดีเทคเตอร์แบบ FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจหาสารประกอบอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกจุดให้ติดไปด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater) ที่อยู่บริเวณใกล้ๆกับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปนั้นจะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ ช่วยเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และช่วยพาแก๊สที่เผาไหม้ออกไป แก๊สพาและสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง Flame jet ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังอิเล็กโตรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้เป็นโครมาโตแกรม ในการทดลองนี้จะใช้ FID ในการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ในรูปของแก๊สมีเทน

ง) เมทาไนเซอร์ (Methanizer)

เป็นเครื่องสำหรับการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปแก๊สมีเทนเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์แก๊สทั้งสองในระดับปริมาณ ppm ใน FID Detector ได้ โดยภายในจะเกิดปฏิกิริยาเมทาไนเซชัน มีโคบอลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 100 %
2. แก๊สไฮโดรเจน 99.999 %
3. แก๊สไนโตรเจน 99.99 %
4. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
5. น้ำกลั่น
6. อากาศ
7. แอนไฮดรัสแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 Anhydrous)
8. ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนตัวรองรับอลูมินา ($\text{Fe/g-Al}_2\text{O}_3$) ขนาดอนุภาค 1 มิลลิเมตร ปริมาณเหล็กร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
9. ตัวดูดซับเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (Fe/AC) ขนาด อนุภาค 1 มิลลิเมตร ปริมาณเหล็ก ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
10. สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร

3.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Fe/Al}_2\text{O}_3$ และการเตรียมตัวดูดซับ Fe/Al

ก) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Fe/Al}_2\text{O}_3$

1. ชั่งอลูมินา 20 กรัม และ $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ จำนวน 7.25 กรัม
2. รินน้ำกลั่นลงในอลูมินาที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้จนเปียกชุ่มแล้วนำไปเข้าเครื่องดูดแบบสุญญากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ละลาย $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตรจนหมด
4. เมื่อได้อากาศออกจากอลูมินาแล้วค่อยๆเติมสารละลาย $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3)$ ที่เตรียมไว้ใส่อลูมินาอย่างทั่วถึง
5. นำอลูมินาที่ถูกริมแพกนอตแล้วใส่ถ้วยกระเบื้องกวนให้แห้งที่ 70 องศาเซลเซียส
6. นำไปอบทิ้งไว้ค้างคืนที่ 120 องศาเซลเซียส
7. แคลซิเนชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
8. ก่อนใช้ต้องทำการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ข) การเตรียมเหล็กบนถ่านกัมมันต์^[21]
1. ชั่งถ่านกัมมันต์ 9.5 กรัม และ $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ จำนวน 3.62 กรัม
 2. รินรินน้ำกลั่นลงในถ่านกัมมันต์ที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้จนเปียกชุ่มแล้วนำไปเข้าเครื่องดูดแบบสุญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
 3. ละลาย $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตรจนละลายหมด
 4. เมื่อไล่อากาศออกจากถ่านกัมมันต์แล้วค่อยๆเติมสารละลาย $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3)$ ที่เตรียมไว้ใส่ถ่านกัมมันต์ กวนให้ละลายผสมกับถ่านกัมมันต์อย่างทั่วถึง ทำซ้ำอีก 4 ครั้ง จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย แล้วรินลงไปในถ่านกัมมันต์ กวนแล้วทำซ้ำอีกสองครั้ง จากนั้นให้เติมน้ำกลั่นอีก 10 มิลลิลิตร ลงในของผสมแล้วทิ้งไว้ 15 นาที แล้วจึงนำถ่านกัมมันต์ที่กำลัง impregnate ไปเข้าเครื่องดูดแบบสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 5. นำของผสมถ่านกัมมันต์และเหล็กไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนแห้งแล้วนำไปอบที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน
 6. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการ impregnate แล้ว ไปทำการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนด้วยอัตรา 120 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.2.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกเตอร่าแก๊สซิฟต์ อุณหภูมิที่ได้ทำการศึกษาคือ ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส

3.3.2.2 ศึกษาหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

3.3.2.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของ คาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไอน้ำ

โดยทำการศึกษาที่อัตราการป้อนของแก๊สเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่ออนาที ($4.89 \cdot 10^{-4}$ โมลต่ออนาที) และองค์ประกอบของแก๊สป้อนคือ ไฮโดรเจน 60% คาร์บอนมอนอกไซด์ 30% คาร์บอนไดออกไซด์ 10%^[22]

3.3.2.4 ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการเกิดการดูดซับทางเคมี ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

3.3.2.5 ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลต่อปริมาณตัวดูดซับ โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากกระบวนการวอเตอร์แก๊สชิฟต์

3.3.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สด้วยแก๊สผสมมาตรฐาน

เพื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบแก๊สได้อย่างเที่ยงตรง โดยทำการฉีดแก๊สผสมมาตรฐานยี่ห้อ Supelco catalog no 501697 ซึ่งมีองค์ประกอบที่แน่นอนคือ คาร์บอนไดออกไซด์ 5.00% คาร์บอนมอนอกไซด์ 4.97% ไฮโดรเจน 4.04% มีเทน 3.99% เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการทดลองว่ามีปริมาณเท่าใด

3.3.4 การดำเนินการทดลอง

3.3.4.1 การเตรียมสภาวะก่อนทำปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์

1. บรรจุก๊าซปฏิกิริยาตามปริมาณที่กำหนดไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วจึงปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น
2. ตั้งอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 350 องศาเซลเซียส ณ ความดันบรรยากาศ
3. ทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วจึงปิดแก๊สไฮโดรเจน
4. ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เพื่อไล่แก๊สไฮโดรเจนที่หลงเหลืออยู่ในท่อทางเดินแก๊ส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงปิดแก๊สไนโตรเจน

3.3.4.2 การปฏิบัติขณะเกิดปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์

1. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ ทำการทดลองรอให้อุณหภูมิภายในเข้าสู่ภาวะ steady state
2. ปรับค่าตัวแปรต่างๆตามแต่ละกรณีการศึกษา โดยปรับอัตราการไหลของ แก๊สที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส และปรับอัตราการไหลของไอน้ำ ที่เครื่องสูบน้ำให้ได้ค่าที่ต้องการ
3. เปิดไอน้ำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แก๊สมีเทนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ โดยมีการป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องพร้อมจับเวลาในการทดลองทันที
4. ทำการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สจนกระทั่งปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

5. ทำการวัดอัตราการไหลแก๊สขาออก
6. เมื่อทำการทดลองเสร็จ 1 ชุด ต้องปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทุกครั้ง

3.3.4.3 การปฏิบัติขณะเกิดปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมี

1. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ ทำการทดลองรอให้อุณหภูมิภายในเข้าสู่ภาวะ steady state
2. บ้อนแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยารวอเตอร์แก๊สชิฟต์เข้าระบบโดยทำการวัดปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จนปริมาณแก๊สมีค่าคงที่
3. วัดอัตราการไหลแก๊สที่ได้จากกระบวนการ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการในการเตรียมแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำ โดยการศึกษาประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ กระบวนการปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water Gas Shift Reaction) และกระบวนการการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ตัวแปรที่จะศึกษาสำหรับปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ได้แก่ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมีนั้น มีตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปรคืออุณหภูมิในการดูดซับ และ อัตราการไหลของแก๊สต่อปริมาณตัวดูดซับ โดยวัตถุประสงค์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแก๊สไฮโดรเจนที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนอยู่ไม่เกิน 10 ppm เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ต่อไป

4.1 ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์

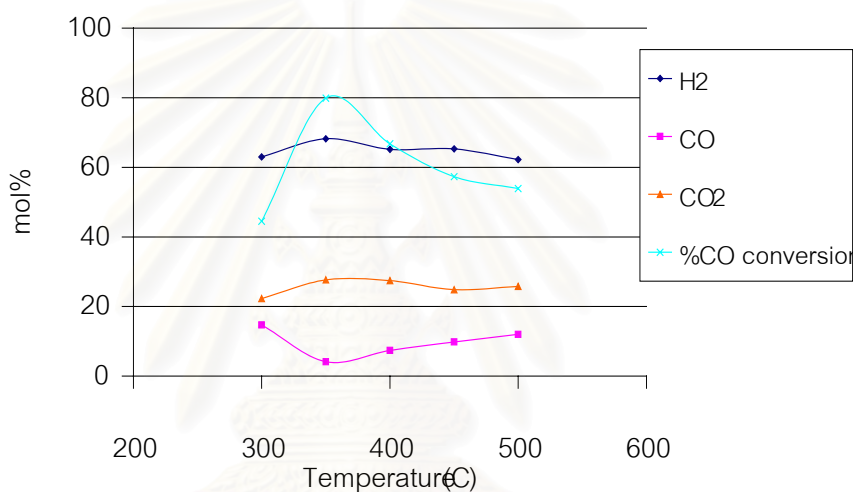
การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ โดยทำการทดลองภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง มีตัวเร่งปฏิกิริยาคือเหล็กบนตัวรองรับอลูมินา ($\text{Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ขนาด 1 มิลลิเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยามีเหล็กเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) เท่ากับ 370 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งโลหะเหล็กนี้จะเป็นตัวที่ให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มาเกาะบนผิว ส่วนอลูมินานั้นจะเป็นตัวจับไอน้ำเพื่อที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีและเร็วขึ้น

4.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์

การทดลองได้ทำที่อัตราการไหลของแก๊สเข้าเท่ากับ 25 sccm (0.0005 โมลต่อวินาที) และมีอัตราส่วนของแก๊สต่างๆคือ แก๊สไฮโดรเจน 60% แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 30% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 10% ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ได้จากกระบวนการการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำ โดยมีอัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 2.69, 1.11, 0.197 มิลลิลิตรต่อวินาที (0.1494, 0.0617, 0.0109

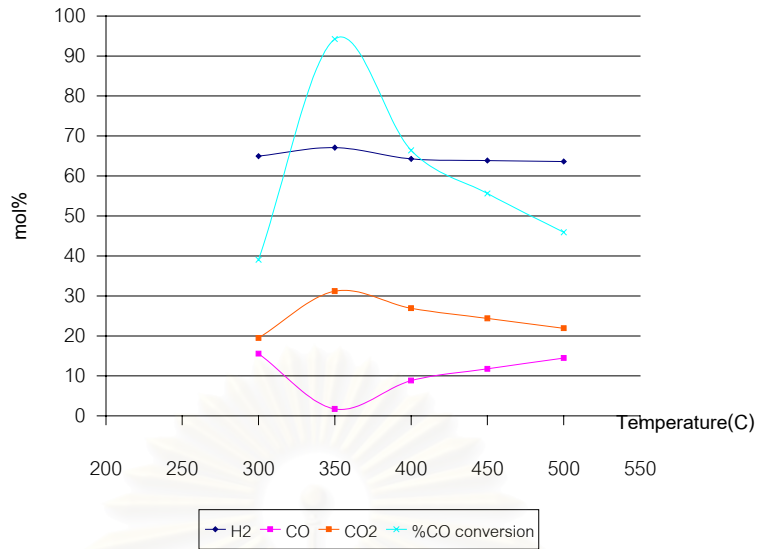
โมลต่ออนาที) โดยทำการวัดปริมาณไอน้ำจากอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งจะวัดได้จาก peristaltic pump และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5, 10 และ 15 กรัม ตามลำดับ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.3 เมื่อเปลี่ยนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จาก 5, 10 และ 15 กรัม พบว่ากราฟที่ได้นั้นมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกการทดลอง คือ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัมและมีอัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.1494 โมลต่ออนาที นั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 350 เป็น 500 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีค่าลดลงจาก 68% เป็น 62% เช่นเดียวกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะมีปริมาณลดลงจาก 27.64% เป็น 25.77% ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าที่สูงขึ้นจาก 4.16% เป็น 11.98% ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

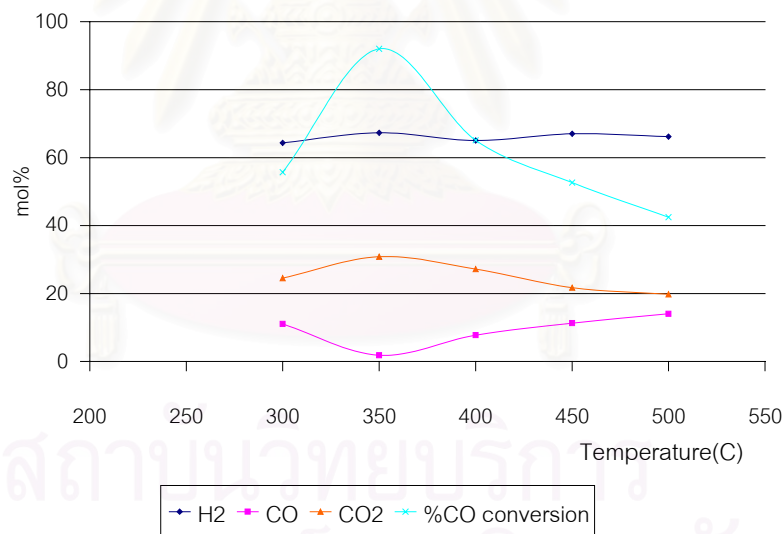


รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟต์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม อัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่ออนาที และอัตราการไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่สภาวะมาตรฐาน

ในการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัมโดยอัตราการป้อนไอน้ำเท่าเดิมที่ 0.1494 โมลต่ออนาที ผลการทดลองที่ได้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าลดลงจาก 67.1% เป็น 63.63% ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 31.18% เป็น 21.91% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นจาก 1.72% เป็น 14.45% ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 เช่นเดียวกันกับที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 กรัม และอัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.1494 โมลต่ออนาที ผลการทดลองที่ได้นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จะมีแนวโน้มที่เหมือนกับการทดลองเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 และ 10 กรัม คือไฮโดรเจนลดลงจาก 67.32% เป็น 66.19% คาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 30.84% เป็น 19.77% สำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มจาก 1.83% เป็น 14.03%



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม และอัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่อนาทีและอัตราการไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่อ นาทีที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์ ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 กรัม อัตราการไหลของไอน้ำ 0.1494 โมลต่อนาทีและอัตราการไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่อ นาทีที่ สภาวะมาตรฐาน

จากผลการทดลองทั้งหมดเมื่อพิจารณาโดยละเอียดสามารถที่จะแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงแรกคือที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเห็นว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เนื่อง

จากพลังงานที่แก๊สได้รับจากความร้อนไม่เพียงพอในการที่จะเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น(Activation Energy) เพราะว่าการทำปฏิกิริยาแต่ละครั้งนั้น โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องชนกันในทิศทางที่พอเหมาะและต้องมีพลังงานที่เพียงพอ คือ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานกระตุ้นจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสจึงมีค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าที่ 350 องศาเซลเซียส

ช่วงที่สองคือตั้งแต่อุณหภูมิ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองในช่วงนี้สามารถที่จะอธิบายได้จากสมการการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากว่าปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังสมการ



เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับปฏิกิริยานั้น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานั้นจะมีค่าลดลงแสดงได้ตามตารางที่ 4.1 ทำให้เกิดการปฏิกิริยาจะย้อนกลับไปทางด้านสารตั้งต้น เป็นผลทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลงเล็กน้อย และคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าลดลง ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

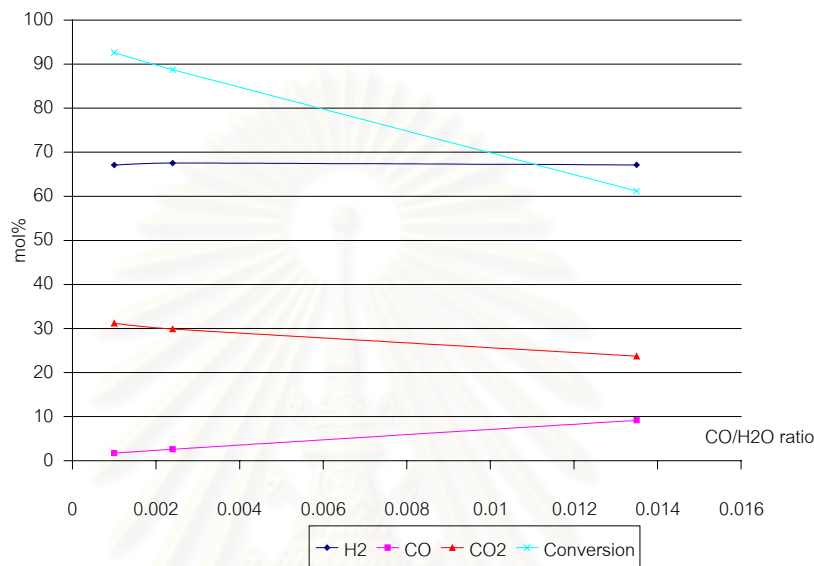
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ^[12]

| T | T (K) | ΔH | ΔS | ΔG | K_{eq} |
|-----|-------|------------|------------|------------|----------|
| 250 | 523 | -39159 | -36.97 | -19822 | 95.46 |
| 300 | 573 | -38713 | -36.16 | -17994 | 43.69 |
| 350 | 623 | -38266 | -35.41 | -16205 | 22.84 |
| 400 | 673 | -37819 | -34.72 | -14452 | 13.24 |
| 450 | 723 | -37372 | -34.08 | -12732 | 8.32 |
| 500 | 773 | -36925 | -33.48 | -11044 | 5.58 |
| 550 | 823 | -36479 | -32.92 | -9384 | 3.94 |
| 600 | 873 | -36032 | -32.40 | -7751 | 2.91 |
| 650 | 923 | -35585 | -31.90 | -6144 | 2.23 |

จากการศึกษาผลของอุณหภูมินั้นพบว่าอุณหภูมิต่ำที่เอื้ออำนวยในการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ คือที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่าให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดในทุกการทดลอง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhang Z.G.^[22] ที่ได้อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิต่ำที่เอื้ออำนวยในการเกิดปฏิกิริยาโดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 93

4.1.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไอน้ำปฏิกิริยาอวเตอรร์แก๊สซิฟต์

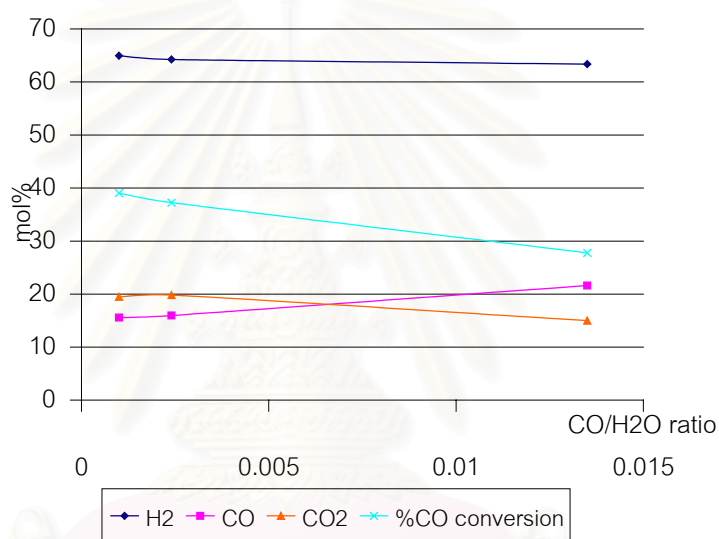
การทดลองส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วน $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ จาก 0.001, 0.0024, 0.0135 ตามลำดับ (อัตราการป้อนไอน้ำจากค่า 0.1494, 0.0617, 0.0109 โมลต่อนาที) และกำหนดค่าอัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์ไว้คงที่ที่ 7.5-8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน (sccm)



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ต่อปฏิกิริยาอวเตอรร์แก๊สซิฟต์ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม และอัตราการไหลของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ที่ 7.5-8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

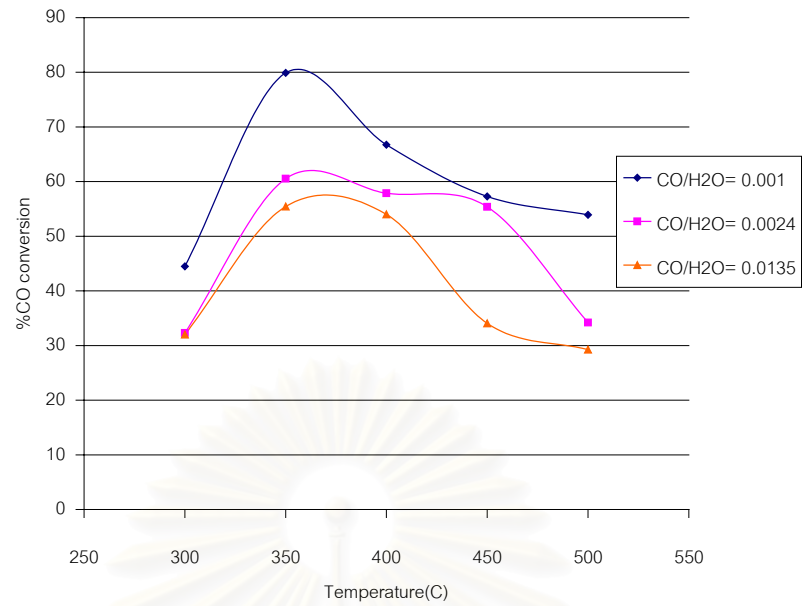
อัตราส่วนของแก๊สป้อนของ $\text{CO} / \text{H}_2\text{O}$ ในที่นี้พิจารณาได้จากอัตราการป้อนไอน้ำ (โดยที่อัตราการป้อนคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าคงที่) จากการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ จาก 0.001 เป็น 0.0024 และ 0.0135 (ปริมาณป้อนไอน้ำจาก 0.1494 โมลต่อนาทีเป็น 0.0617 และ 0.0109 โมลต่อนาทีตามลำดับ) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจาก 67.09% เป็น 67.53% และ 67.12% ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลงอย่างมาก จาก 31.18% เป็น 29.88% และ 23.72% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะเพิ่มขึ้นจาก 1.72% เป็น 2.58% และ 9.15% ตามลำดับ และค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าที่ลดลงเมื่ออัตราส่วน $\text{CO} / \text{H}_2\text{O}$ เพิ่มมากขึ้น คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{CO} / \text{H}_2\text{O}$ จาก 0.001 เป็น 0.0024 และ 0.0135 ค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าลดลงอย่างมากจาก 92.84 เป็น 89.24 และ 61.24 ตามลำดับ เนื่องจากว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำในระบบโดยที่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบมีค่าคงที่

นั้นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นจะบังคับให้มีการเพิ่มค่าการเปลี่ยนของสารตั้งต้นตัวอื่นตามหลักของ เลอ ชาเตอริแยร์ (Le Chatelier's Principle) ทำให้ค่าการเปลี่ยนสมดุลเพิ่มขึ้น โดยหลักเลอ ชาเตอริแยร์ คือ ที่สภาวะหนึ่ง (ตามปริมาณมวลสารสัมพันธ์) จะมีค่าคงที่สมดุลค่าหนึ่ง เมื่อระบบถูกรบกวนโดยการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นจะเป็นการรบกวนสมดุล ระบบจะพยายามปรับสมดุลโดยการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้นเพื่อเข้าสู่สมดุลใหม่ ทำให้ค่า Conversion เพิ่มขึ้น สำหรับรูปที่ 4.5 เป็นการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่าเดิมคือ 10 กรัม ผลการทดลองที่ได้จะมีแนวโน้มที่เหมือนกันกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

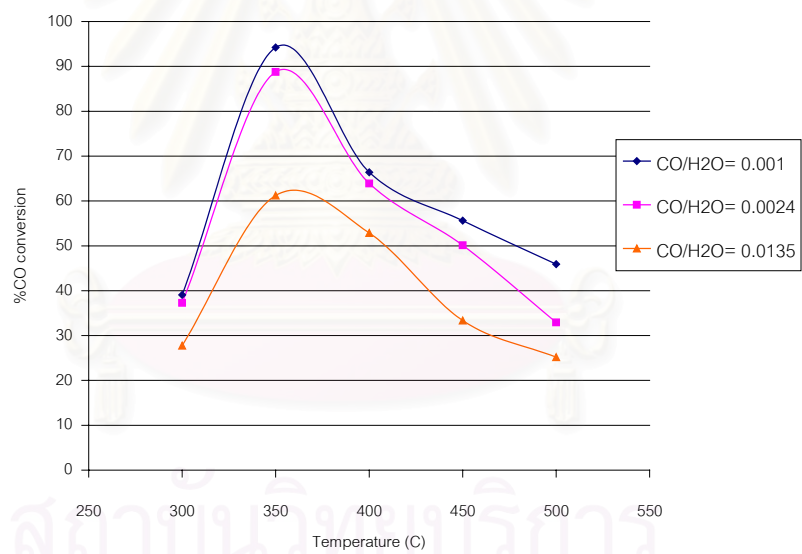


รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ต่อปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟต์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัมและอัตราการผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ที่ 7.5 –8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

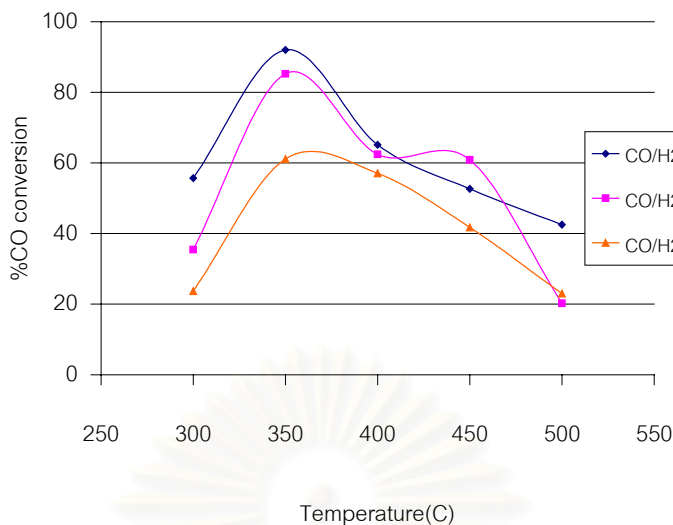
รูปที่ 4.6, 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วน CO/H₂O ที่ 0.001, 0.0024 และ 0.0135 และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียสต่อค่าการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันคือ 5 กรัม 10 กรัม และ 15 กรัม พบว่าลักษณะผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีคือการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและลดปริมาณไอน้ำที่ป้อน และพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสค่าการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 กรัม

จากการทดลองสรุปได้ว่าการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.1494 โมลต่อโมลที่อัตราส่วนของ CO/H₂O เท่ากับ 0.001 เป็นอัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สชิฟต์เพราะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.2

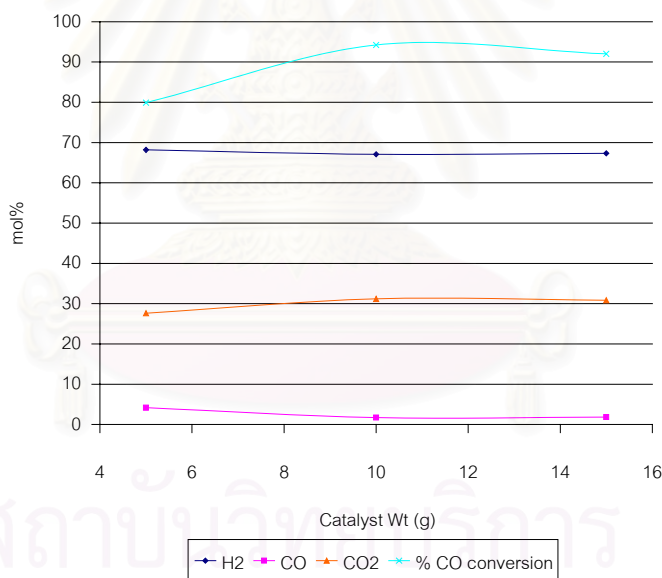
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแก๊สขาออกของปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สชิฟต์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม

| อัตราส่วน CO/H ₂ O | H ₂ | CO | CO ₂ |
|-------------------------------|----------------|------|-----------------|
| 0.001 | 67.10 | 1.72 | 31.18 |
| 0.0024 | 67.53 | 2.58 | 29.88 |
| 0.0135 | 67.13 | 9.15 | 23.72 |

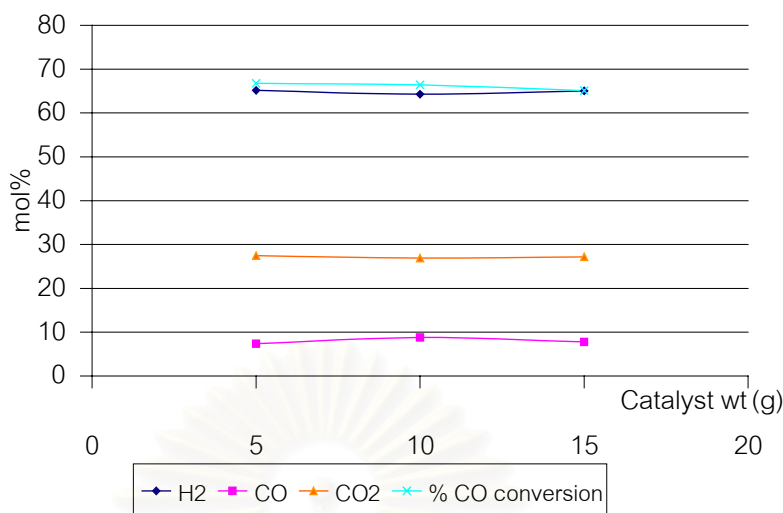
4.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อดูผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้า โดยจะทำการเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 5 กรัม เป็น 10 กรัม และ 15 กรัม ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลของแก๊สนั้นทำการควบคุมไว้ที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน (25 sccm)

ผลของอัตราการไหลต่อมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาพิจารณาได้จากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ใช้ต่ออัตราไหลของแก๊สคงที่ที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและอัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.1494 โมลต่อนาที พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์จาก 5 กรัมเป็น 10 กรัม ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าที่ลดลงจาก 4.16% เป็น 1.72% และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 15 กรัมเพิ่มเป็น 1.83% ซึ่งมีผลตรงข้ามกับแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กล่าวคือปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยโดยจะเปลี่ยนจาก 68.20% เป็น 67.09% และ 67.32% ส่วนปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจาก 27.63% เป็น 31.18% เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 5 เป็น 10 กรัมเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 15 กรัมปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าที่ลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 30.84% และเมื่อพิจารณาถึงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 10 กรัม และมีค่าที่ลดลงเล็กน้อยหรือเกือบจะคงที่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 15 กรัม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ภาวะเหมือนกับรูปที่ 4.9 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1494โมลต่อนาที



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1494 โมลต่อนาที

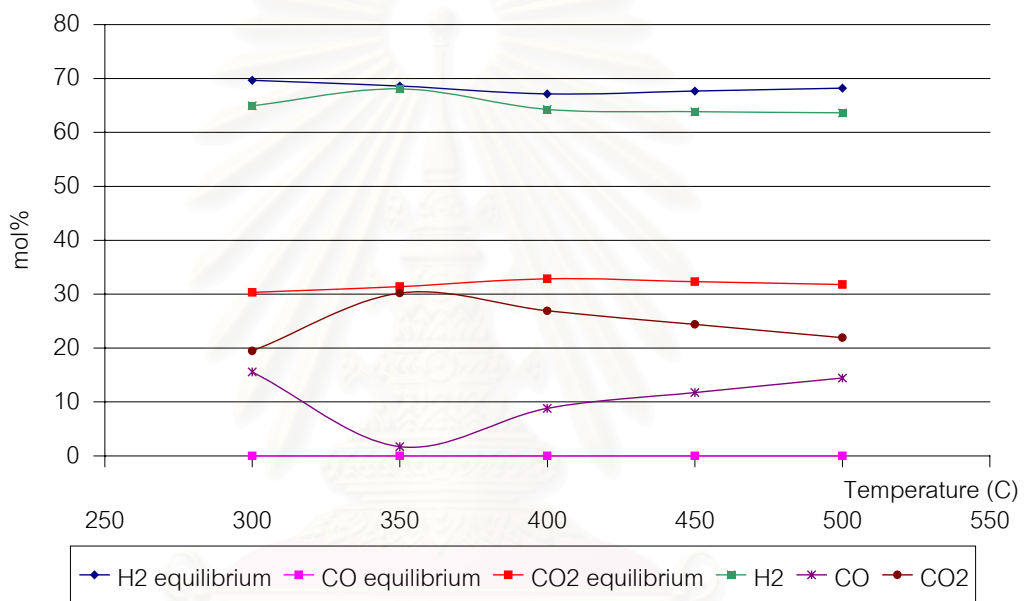
ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5 กรัม นั้นปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นมีน้อยทำให้โอกาสในการที่แก๊สจะแตกตัวเพื่อเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นไปได้ยาก ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ไม่ดีนักทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนมีค่าที่ต่ำกว่าที่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 และ 15 กรัม เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 10 กรัม นั้นพบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนจะมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมากเพราะว่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีมากขึ้น จึงสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 15 กรัม นั้นจากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นค่อนข้างคงที่ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบนั้นเข้าสู่ภาวะสมดุลการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 10 กรัมต่ออัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

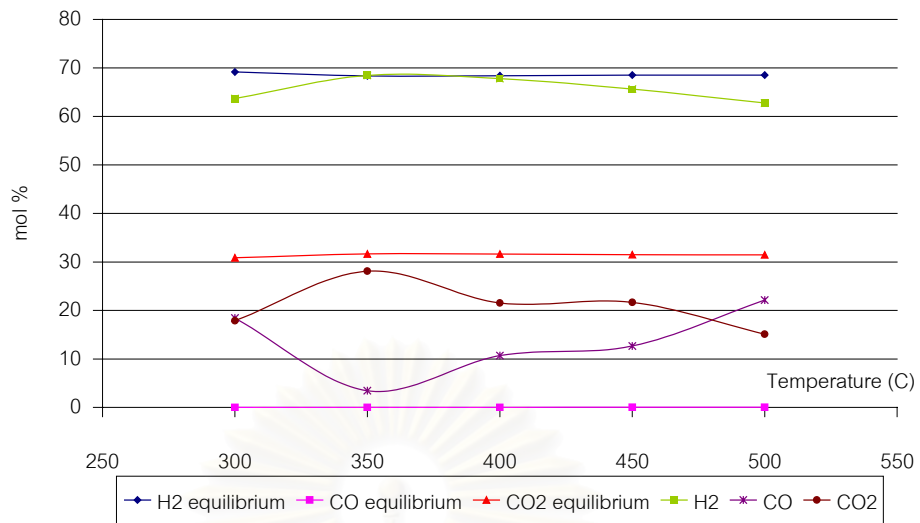
4.1.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สจากการทดลองกับค่าที่ได้จากคำนวณเมื่อปฏิกิริยาสมดุล

หัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สต่างๆที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบที่คำนวณจากสมการวอเตอร์แก๊สชิฟต์ที่ภาวะสมดุล โดยใช้สมการวอเตอร์แก๊สชิฟต์เพียงสมการเดียว การคำนวณองค์ประกอบของแก๊สจะใช้ค่าคงที่สมดุลจากตารางที่ 4.1 ผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 โดยรูปที่ 4.11 จะเป็นผลเมื่อ

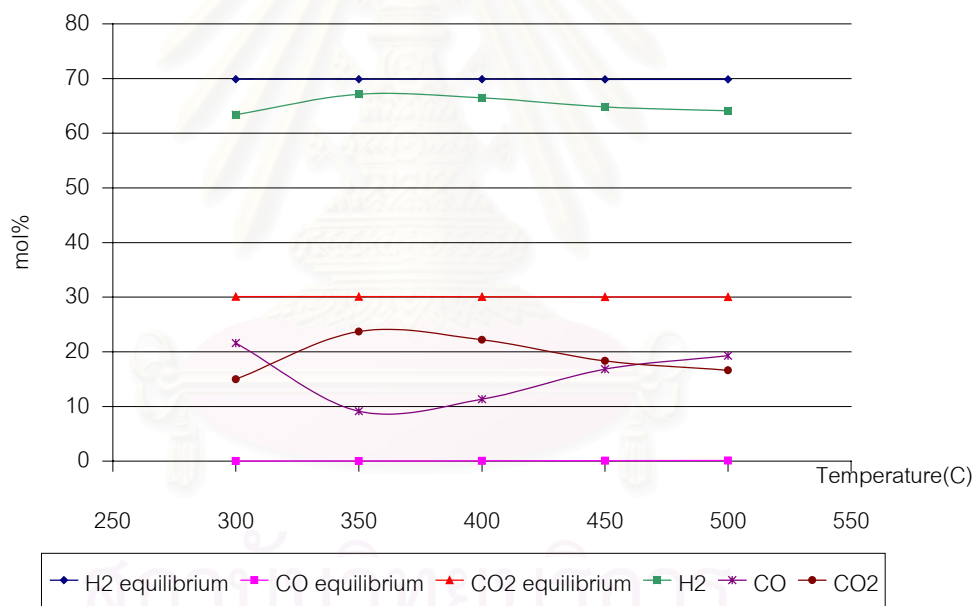
อัตราการผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 0.1494 โมลต่ออนาที (อัตราส่วน $\text{CO}/\text{H}_2\text{O} = 0.001$) จะพบว่าแนวโน้มของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าที่ลดลงส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 เป็น 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับรูปที่ 4.12 โดยเป็นผลเมื่ออัตราการผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 0.0617 โมลต่ออนาที (อัตราส่วน $\text{CO}/\text{H}_2\text{O} = 0.0024$) โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีผลที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์สามารถอธิบายเป็นสมการหลักในการเกิดปฏิกิริยาที่ให้ผลองค์ประกอบของแก๊สเป็นไปตามผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 0.1494 โมลต่ออนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม



รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.0617 โมลต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม



รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.0109 โมลต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาคือที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วน CO/H₂O 0.001 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม ที่อัตราการไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตรต่อนาที ที่สภาวะมาตรฐาน

4.1.5 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับงานวิจัยจากต่างประเทศ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟตีในงานวิจัยนี้เท่ากับ 350 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับงานของ Zhang, Andreev และ Utaka โดยจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

| | อุณหภูมิ | ตัวเร่งปฏิกิริยา | Catalyst Content | Flow rate | Space Velocity | %CO conversion |
|---------------------------|----------|--|------------------|------------|----------------------|----------------|
| Zhang ^[22] | 380 C | Cu/Fe/Cr | 2 g | 137 ml/min | - | 93 |
| Tonkovich ^[19] | 500 C | Ru/Ni (monolith) | - | - | - | 94 |
| Andreev ^[23] | 340 C | 88%Fe ₂ O ₃ 7%Cr ₂ O ₃ 5%CoO | 2-5 g | - | 2000 h ⁻¹ | 92 |
| Tanaka ^[24] | 250 C | CuMn ₂ O ₄ | - | - | 6400 h ⁻¹ | 85 |
| Utaka ^[25] | 350 C | Ru/V ₂ O ₅ | - | - | 6400 h ⁻¹ | 95 |
| งานวิจัยนี้ | 350 C | Fe/Al ₂ O ₃ | 10 g | 25 ml/min | - | 92.84 |

4.2 กระบวนการการดูดซับทางเคมี

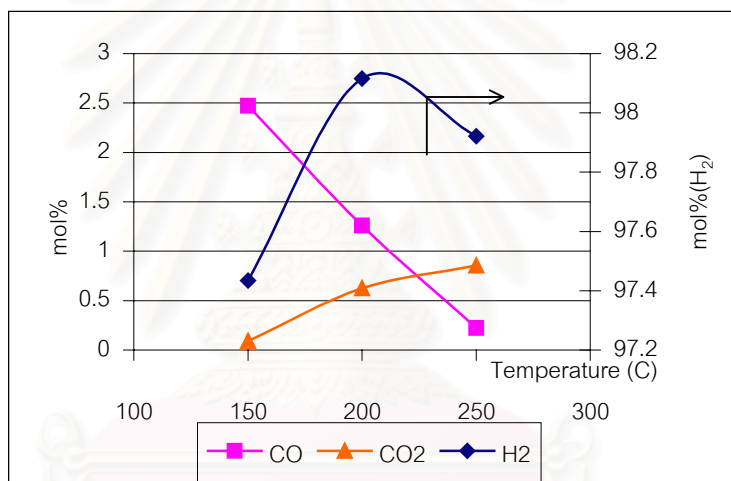
การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการการดูดซับทางเคมีไปใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ โดยจะทำการศึกษายภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยมีตัวดูดซับคือ เหล็กบนถ่านกัมมันต์(Fe/AC) โดยตัวดูดซับมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร มีปริมาณเหล็กเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 700 ตารางเมตรต่อกรัมและการทดลองนี้จะเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟตี แก๊สที่ผ่านกระบวนการออกเตอรแก๊สซิฟตีนี้จะเข้ากระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดหมดเพื่อต้องการดูการดูดซับของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยที่ไม่มีผลมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สที่มีองค์ประกอบเฉพาะไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกศึกษาการดูดซับ โดยจะถูกป้อนผ่าน

ตัวดูดซับ องค์ประกอบแก๊สขาเข้าจะมีไฮโดรเจนร้อยละ 97.5 และคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 2.5 อัตราการไหล 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

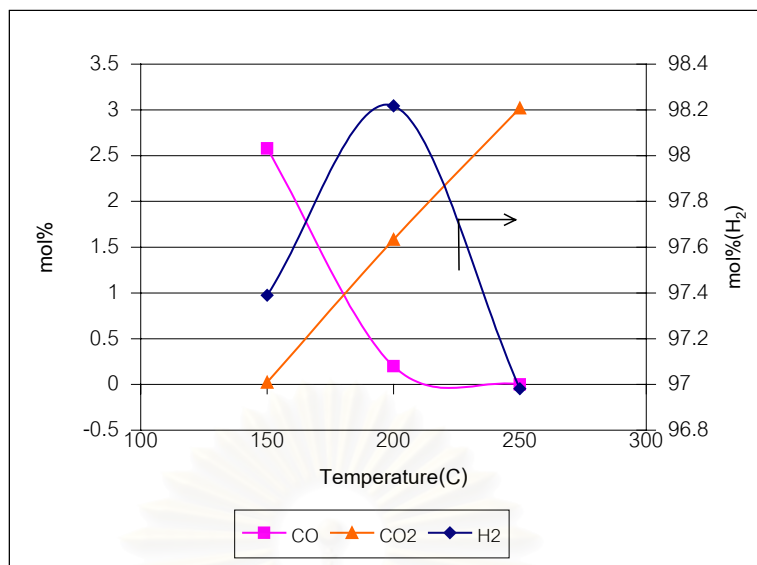
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการดูดซับทางเคมี

การทดลองนี้จะทำการทดลอง โดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการดูดซับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5, 10 และ 15 กรัมตามลำดับ โดยมีอัตราการป้อนที่ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐานผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

พบว่าที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส นั้นจะไม่เกิดการดูดซับกล่าวคือ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณแก๊สขาเข้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ส่วนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสนั้นพบว่าการดูดซับนั้นเกิดขึ้นได้ โดยพบว่าที่ 250 องศาเซลเซียสจะเกิดการดูดซับได้ดีกว่าที่ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแก๊สขาออกที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5 กรัม อัตราการไหลของแก๊ส 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

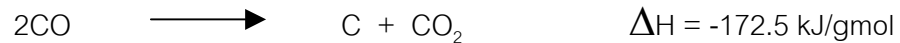


รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแก๊สขาออกที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 10 กรัม อัตราการไหลของแก๊ส 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับทางเคมีนั้นจะเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างตัวดูดซับที่เป็นโลหะกับแก๊สที่ถูกดูดซับ ซึ่งต้องมีการใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการที่จะแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อที่จะทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างแก๊สกับโลหะซึ่งที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียสนั้นพลังงานที่แก๊สได้รับอาจมีค่าไม่เพียงพอในการแตกตัวเพื่อสร้างพันธะกับโลหะ ทำให้ไม่เกิดการดูดซับเกิดขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200 และ 250 องศาเซลเซียสพบว่า จะเกิดการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานที่เพียงพอในการเกิดการดูดซับทางเคมีได้ และที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะเกิดการดูดซับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 200 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 250 °C จะมีค่าพลังงานของการดูดซับมากกว่าที่อุณหภูมิ 200 °C การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าสารที่ถูกดูดจะหลุดออกได้ยากกว่า แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับทางเคมีจะเกิดพันธะเคมีขึ้นระหว่างสารตัวถูกดูดซับกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งในการฟอร์มพันธะเคมีนั้นจะต้องมีการคายความร้อนออก หากทำการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ไม่สามารถฟอร์มพันธะได้ดี^[11] และการเพิ่มอุณหภูมินั้นยังเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับแก๊สด้วยทำให้โอกาสที่แก๊สจะหลุดออกจากผิวโลหะ และเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีได้มากขึ้นเนื่องจากแก๊สจะมีการเคลื่อนตัวมากขึ้น

และจากการทดลองพบว่าเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สผลิตภัณฑ์จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นโดยจะมีค่าที่แปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นคือเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับมีมากขึ้นจาก 200 เป็น 250 องศาเซลเซียสนั้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มจาก 0.62% เป็น 1.85% และเพิ่มจาก 1.58% เป็น 3.02% ที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 และ 10 กรัมตามลำดับ โดย

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard reaction) โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดที่ผิวของตัวดูดซับ^[26]

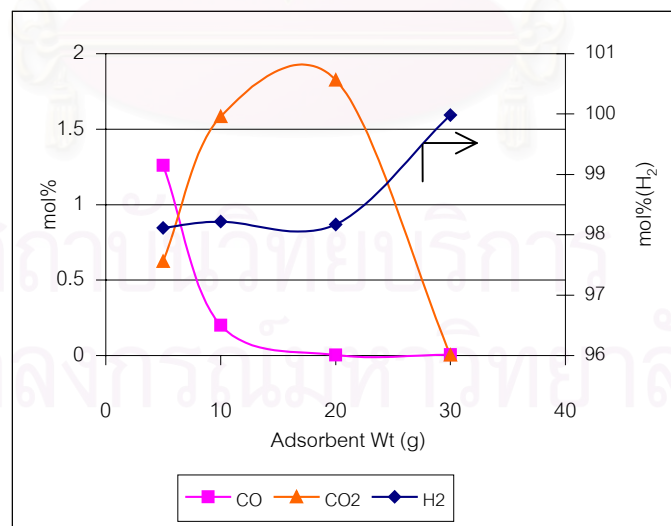


จากสมการจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมินั้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์นั้นควรจะลดลง แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สลดลงเพราะว่าเกิดการดูดซับมากขึ้นทำให้ที่พื้นผิวตัวดูดซับมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสการเกิดปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดได้มากกว่า ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่าที่ 200 องศาเซลเซียส

ดังนั้นจากการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการการดูดซับทางเคมีคือที่ 250 องศาเซลเซียสเพราะว่าเกิดการดูดซับได้มากที่สุด

4.2.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่ออัตราการไหลของแก๊ส

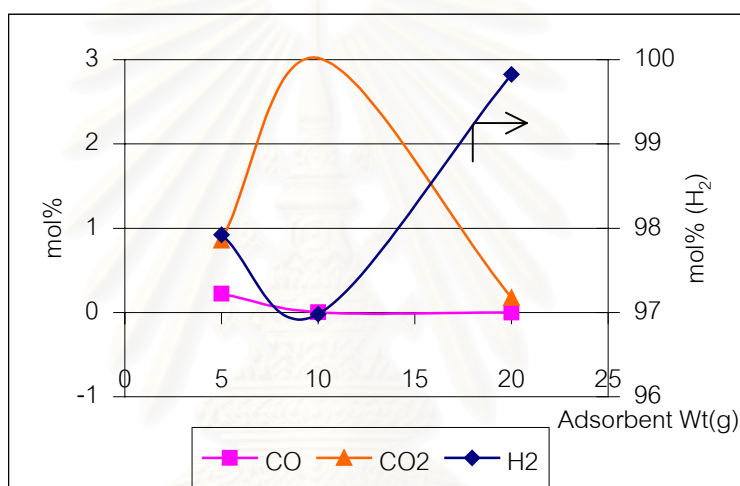
วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือเพื่อที่จะหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เหลือ 10 ppm โดยทำการทดลองที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆคือ 5, 10, 20 และ 30 กรัม ที่อัตราการไหลของแก๊สคงที่ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เจือปนออกมาจะมีค่าน้อยลง ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 และตารางที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณดูดซับกับองค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 200 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 200 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

| ปริมาณตัวดูดซับ กรัม | องค์ประกอบแก๊สขาออก % | | |
|-------------------------|-----------------------|------|-----------------|
| | H ₂ | CO | CO ₂ |
| 5 | 98.12 | 1.26 | 0.62 |
| 10 | 98.22 | 0.20 | 1.58 |
| 20 | 98.17 | 0.00 | 1.83 |
| 30 | 99.99 | 0.01 | 0.00 |



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณดูดซับกับองค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 250 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแก๊สขาออกที่อุณหภูมิในการดูดซับ 250 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน

| ปริมาณตัวดูดซับ กรัม | องค์ประกอบแก๊สขาออก | | |
|-------------------------|---------------------|---------|---------------------|
| | H ₂ (%) | CO(ppm) | CO ₂ (%) |
| 5 | 97.92 | 2250 | 0.85 |
| 10 | 96.98 | 11.97 | 3.02 |
| 20 | 99.82 | 6.84 | 0.18 |

จากกราฟที่ 4.16 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับนั้นสามารถที่จะดูดซับได้มากขึ้นคือที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ

จาก 5 กรัมเป็น 10 และ 20 กรัม นั้นสามารถที่จะลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากขึ้น โดยจะมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1.2%, 0.2%, 26 ppm ตามลำดับ เนื่องจากว่าพื้นผิวสัมผัสในการดูดซับนั้นมีมากขึ้น โอกาสที่แก๊สจะสัมผัสกับพื้นผิวดูดซับจึงมากขึ้นด้วยทำให้เกิดการดูดซับดีขึ้น โดยแนวโน้มของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้ตัวดูดซับ 20 กรัม และเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเป็น 30 กรัมพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26 ppm เป็น 52 ppm ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดลองนี้ใช้การดูดซับเป็นแบบเบดนิ่ง (fixed bed) เมื่อใช้ตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทำให้การไหลของสารเป็นไปได้อย่างขึ้น และจะเกิดปรากฏการณ์ channeling คือ แก๊สพยายามไหลไปในช่องที่สามารถไปได้ง่าย สารจะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้น นั่นคือ เวลาที่สารสัมผัสกับตัวดูดซับมีน้อยลง ทำให้การดูดซับน้อยลง

สำหรับที่การทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 5 กรัม เป็น 10 และ 20 กรัม นั้นจะให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส คือสามารถที่จะลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จาก 2.5% ในแก๊สขาเข้าเหลือ 1.85%, 12 ppm และ 6.84 ppm แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.4

ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการเตรียมแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์คือ 20 กรัม เพราะสามารถที่จะทำการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลือในแก๊สผลิตภัณฑ์เพียง 6.84 ppm ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการการดูดซับทางเคมีมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจนบริสุทธิ์สำหรับเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิง

ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการดูดซับทางเคมีคือที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับ 20 กรัมที่อัตราการไหลของแก๊ส 22 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่ภาวะมาตรฐาน (อัตราส่วนของแก๊สต่อตัวดูดซับ 1.1 มิลลิลิตรต่ออนาทีต่อกรัม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

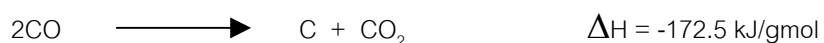
จากการวิจัยเรื่องการเตรียมแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ จากแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์และกระบวนการการดูดซับทางเคมีที่สามารถที่จะสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์

- 1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์จะเกิดได้น้อยลงทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง แต่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น
- 2 ผลของอัตราส่วนระหว่าง CO/H₂O กล่าวคือเมื่ออัตราส่วน CO/H₂O เพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์จะเกิดได้น้อยลง
- 3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นจนเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
- 4 ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์คือ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วน CO/H₂O เท่ากับ 0.001 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัมที่อัตราการไหลของแก๊สป้อนเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน
- 5 อัตราส่วนของแก๊สที่ได้คือ ไฮโดรเจน 67.10% คาร์บอนมอนอกไซด์ 1.72% และคาร์บอนไดออกไซด์ 31.18%

5.1.2 กระบวนการดูดซับทางเคมี

- 1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับนั้นจะเกิดการดูดซับได้มากขึ้น ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และจะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

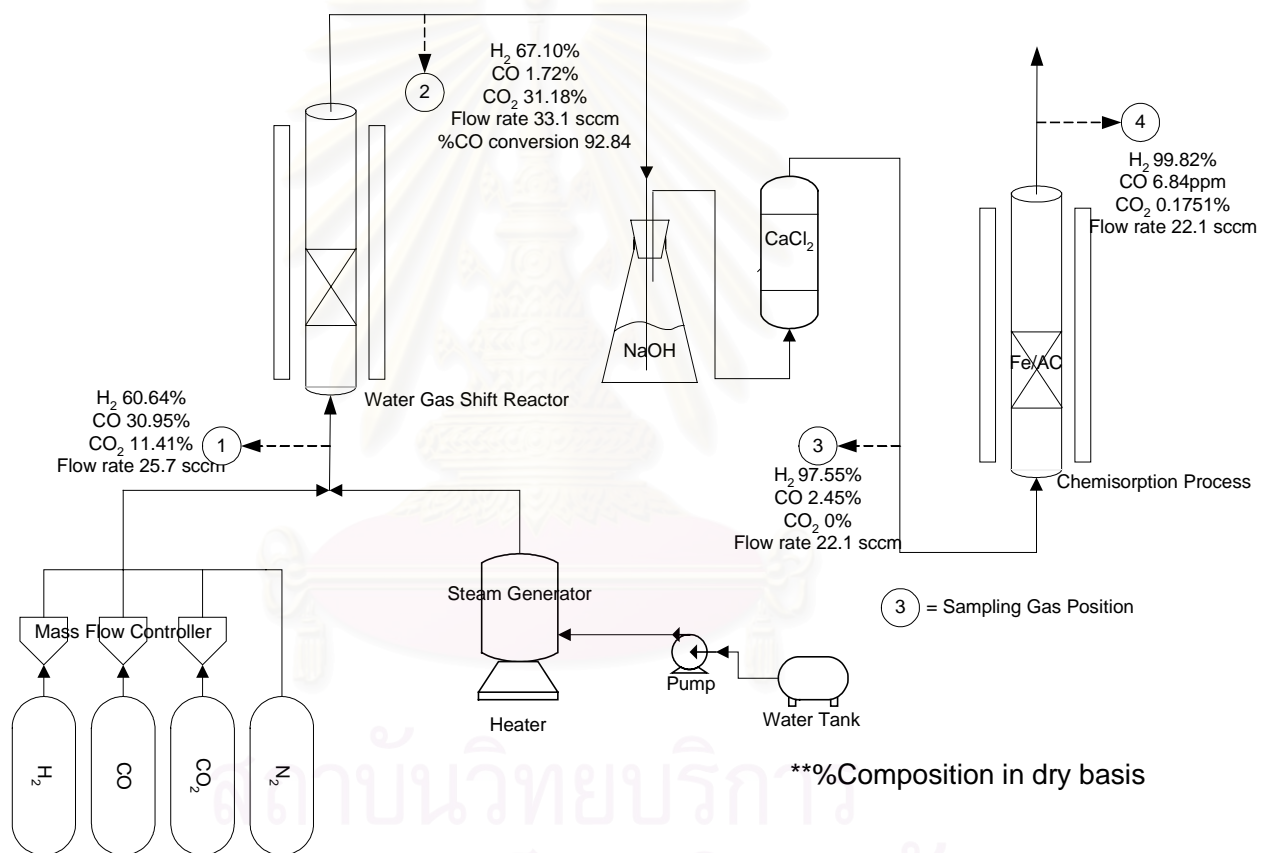


- 2 ปริมาณตัดดูดซับต่ออัตราการไหลของแก๊ส พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นจะทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้นด้วย

- 3 ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับทางเคมีคือ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับ 20 กรัมที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 22 มิลลิลิตรต่ออนาทีที่ภาวะมาตรฐาน

แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเตรียมไฮโดรเจนบริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์ โดยการใช้ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ และตัวดูดซับทางเคมีจะมีองค์ประกอบดังนี้ ไฮโดรเจน 99.8242% คาร์บอนไดออกไซด์ 0.1751% คาร์บอนมอนอกไซด์ 6.84 ppm ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้

โดยผลการทดลองสามารถที่จะเขียนสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ข้อมูลของกระบวนการที่ได้จากการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้แก๊สที่ใช้ในการทดลองเป็นการนำผลองค์ประกอบแก๊สที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำมาใช้ ดังนั้นควรจะมีการนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมีเทนด้วยไอน้ำมาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานจริง

รายการอ้างอิง

1. Larminie James and Dicks Andrew. Fuel Cell System Explained. UK: JOHN WILEY&SONS. LTD, 2000.
2. J.H. Hirschemhofer. Fuel Cell Handbook. 4th edition. USA: FECT,1998.
3. ลาวัลย์ เขียรถาวร. รีฟอร์มมิงของก๊าซ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ใต้น้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิล ออกซิเจนในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
4. ชัยวัฒน์ ธาณีรัตน์. จลนพลศาสตร์ของการรีฟอร์ม มีเทน ใต้น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์บนตัว เร่ง ปฏิกิริยานิกเกิล/ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี เทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
5. Volkel H.K.Chemical Industrial, USA:McGraw-Hill,1979.
6. Lebedev N.N. Chemistry and technology of basic organic and petrochemical synthesis. Moscow: MIR Publishers, 1981.
7. Sheldon R.A. Chemical from synthesis gas. Germany: D.Reidel Publishing,1983.
8. Shukla S.D. and Pandey G.N. A Text Book of Chemical Technology (Inorganic). New Delhi:Vikas Publishing House PUT Ltd, 1977
9. Seifrita W. Introduction to Hydrogen Energy. Caracus: IAHE fuel, 1975.
10. Bellows J. Richard, Marucchi-Soos P.Elise, Buckley D. Terence. Analysis of Reaction Kinetics for Carbon Monoxide and Carbon Dioxide on Polycrystalline Platinum Relative to Fuel Cell Operation. Ind. Eng. Chem Res, 1996 : 1235-1242
11. Satterfield C. N. Heterogeneous Catalysis in Practice. USA: McGraw-Hill, 1980
12. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
13. Jens Hagen. Industrial Catalyzt. 1st edition. New York:Wiley-VCH,2000.
14. Trim D.L. Design of Industrial Catalyzt. Amsterdam: Elsevier Science, 1980
15. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2534
16. Choudhary T.V. and Goodman D.W. Stepwise Methane Steam Reforming : a Route to CO-free Hydrogen. Catalyzt letter. 5(1999): 93-94

17. Lyuke SE, Daud WRW, Mohamad AB, Kadhum AAH, Faisal Z and Sahariff AM.
Application of Sn-actibated carbon in pressure swing adsorption for purification of H₂. Chemical Engineering Science. 5(2000): 4745-4755
18. Ledjeff-Hey K, Rose J and Wolters R. CO₂-Scrubbing and methanation as purification system for PEFC. Journal of Power Sources. 86(2000): 556-561
19. Tonkovich A.Y., Zilka J.L., La Mont M.J., Wang Y and Wegeng R.S. Microchannel reactors for fuel processing applications. I. Water gas shift reactor. Chemical Engineering Science. 54(1999): 2947-2951
20. แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
21. วิชากร จารุศิริ. กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนกับแอนทราไซต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
22. Zhang Z.G., Effendi A., Chen X., Honda K. and Yoshida T.. Hydrogen Production from Biogas Through Steam Reforming Followed by Water Gas Shift Reaction and Purification with Selective Oxidation Reaction. AISI, 2000 : 25-30
23. Andreev A., Idakiev V., Mihajlova D., Shopov D. Iron-Based Catalysts for The Water-Gas Shift Reaction Promoted by First-Row Transition Metal Oxides. Applied Catalyst, 1986 : 385-387
24. Tanaka Y., Utaka T., Kikuchi R., Sasaki K., Eguchi K. Water gas shift reaction over Cu-based mixed oxides for CO removal from the reformed fuels. Applied Catalysis A: General, 2003: 287-295
25. Utaka T., Okanishi T., Takeguchi T., Kikuchi R., Eguchi K. Water gas shift reaction of reformed fuel over supported Ru catalysts. Applied Catalysis A: General, 2003: 1-9
26. กัญจน บุณยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
27. กัญจน บุณยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับปฏิกิริยาอเตอรแก๊สซิฟต์โดยทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียสเป็น 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วน CO/H₂O ตั้งแต่ 0.001, 0.0024 และ 0.0135 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 5 กรัมเป็น 10 และ 15 กรัม

| อัตราส่วน CO/H ₂ O | ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา | อุณหภูมิ | องค์ประกอบแก๊สขาเข้า | | | อัตราการ ไหลแก๊ส ขาเข้า | องค์ประกอบแก๊สขาออก | | | อัตราการ ไหลแก๊ส ขาออก | ร้อยละ การ เปลี่ยนCO |
|----------------------------------|--------------------------------|----------|----------------------|---------|-----------------|-------------------------------|---------------------|---------|-----------------|------------------------------|----------------------------|
| | | | H ₂ | CO | CO ₂ | | H ₂ | CO | CO ₂ | | |
| | (กรัม) | (C) | | | | sccm | | | | sccm | |
| 0.001 | 5 | 300 | 58.0211 | 30.1293 | 11.8497 | 25.2 | 62.9837 | 14.7456 | 22.2706 | 28.5 | 44.6500 |
| 0.001 | 5 | 350 | 61.9030 | 24.8025 | 13.2946 | 25.0 | 68.2043 | 4.1599 | 27.6358 | 29.9 | 79.9406 |
| 0.001 | 5 | 400 | 59.1117 | 26.0614 | 14.8269 | 26.0 | 65.1710 | 7.3800 | 27.4490 | 31.0 | 66.2365 |
| 0.001 | 5 | 450 | 60.0506 | 26.5046 | 13.4448 | 25.1 | 65.3177 | 9.8256 | 24.8567 | 29.1 | 57.0209 |
| 0.001 | 5 | 500 | 56.0898 | 30.2345 | 13.6758 | 24.9 | 62.2446 | 11.9797 | 25.7757 | 28.5 | 54.6488 |
| 0.001 | 10 | 300 | 61.0744 | 28.3582 | 10.5674 | 24.8 | 64.9558 | 15.5592 | 19.4850 | 27.5 | 39.1599 |
| 0.001 | 10 | 350 | 60.6446 | 30.9473 | 11.4081 | 25.7 | 67.0981 | 1.7204 | 31.1814 | 33.1 | 92.8402 |
| 0.001 | 10 | 400 | 56.7395 | 31.7477 | 11.5129 | 25.4 | 64.2712 | 8.8100 | 26.9188 | 31.0 | 66.1318 |
| 0.001 | 10 | 450 | 57.6039 | 31.0898 | 11.3063 | 24.3 | 63.8557 | 11.7592 | 24.3851 | 27.6 | 57.0401 |
| 0.001 | 10 | 500 | 58.5423 | 30.4639 | 10.9938 | 24.8 | 63.6308 | 14.4507 | 21.9185 | 28.3 | 45.8699 |
| 0.001 | 15 | 300 | 58.5968 | 29.0323 | 12.3709 | 24.30 | 64.3602 | 11.0708 | 24.5690 | 28.2 | 55.7472 |
| 0.001 | 15 | 350 | 58.5968 | 29.0323 | 12.3709 | 24.40 | 67.3253 | 1.8301 | 30.8446 | 31.5 | 91.8621 |
| 0.001 | 15 | 400 | 59.1117 | 26.0614 | 14.8269 | 26.60 | 65.0444 | 7.7706 | 27.1851 | 31.1 | 65.1394 |
| 0.001 | 15 | 450 | 62.2833 | 27.2130 | 10.5036 | 25.20 | 67.0101 | 11.2702 | 21.7197 | 27.6 | 54.6410 |
| 0.001 | 15 | 500 | 62.2833 | 27.2130 | 10.5036 | 25.20 | 66.1920 | 14.0296 | 19.7784 | 29.3 | 40.0574 |
| 0.0024 | 5 | 300 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 25.1 | 66.4337 | 16.1846 | 17.3817 | 27.2 | 32.3212 |
| 0.0024 | 5 | 350 | 63.0343 | 28.0770 | 8.8886 | 25.1 | 68.4041 | 9.4720 | 22.1239 | 29.3 | 60.6192 |
| 0.0024 | 5 | 400 | 63.0343 | 28.0770 | 8.8886 | 25.0 | 68.2018 | 10.1730 | 21.6252 | 29.0 | 57.9704 |
| 0.0024 | 5 | 450 | 60.6490 | 26.8472 | 12.5037 | 25.3 | 65.7437 | 10.4244 | 23.8318 | 29.0 | 55.4929 |
| 0.0024 | 5 | 500 | 60.6490 | 26.8472 | 12.5037 | 25.2 | 63.9582 | 16.1802 | 19.8616 | 26.7 | 36.1449 |
| 0.0024 | 10 | 300 | 60.4928 | 28.0881 | 11.4191 | 28.1 | 64.2367 | 15.9497 | 19.8136 | 27.0 | 45.4383 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-----|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|------|---------|
| 0.0024 | 10 | 350 | 59.2152 | 28.8547 | 11.9301 | 25.4 | 67.5302 | 2.5843 | 29.8854 | 30.5 | 89.2453 |
| 0.0024 | 10 | 400 | 59.2977 | 28.7555 | 11.9467 | 25.4 | 65.6149 | 8.7721 | 25.6130 | 29.1 | 65.0504 |
| 0.0024 | 10 | 450 | 59.5640 | 28.4020 | 12.0340 | 25.0 | 64.6018 | 12.4046 | 22.9935 | 28.4 | 50.3851 |
| 0.0024 | 10 | 500 | 59.5640 | 28.4020 | 12.0340 | 25.0 | 63.0239 | 17.4154 | 19.5608 | 26.9 | 34.0226 |
| 0.0024 | 15 | 300 | 59.5661 | 31.8036 | 8.6303 | 25.2 | 63.6658 | 18.4397 | 17.8945 | 28.3 | 34.8877 |
| 0.0024 | 15 | 350 | 60.5414 | 29.3983 | 10.0603 | 24.7 | 68.4476 | 3.4710 | 28.0813 | 30.1 | 85.6119 |
| 0.0024 | 15 | 400 | 61.9771 | 28.0045 | 10.0184 | 24.8 | 67.7807 | 10.6743 | 21.5450 | 29.5 | 54.6599 |
| 0.0024 | 15 | 450 | 60.5414 | 29.3983 | 10.0603 | 25.1 | 65.6383 | 12.6837 | 21.6779 | 28.8 | 50.4957 |
| 0.0024 | 15 | 500 | 60.5414 | 29.3983 | 10.0603 | 25.1 | 62.7579 | 22.1298 | 15.1124 | 26.5 | 20.5257 |
| 0.0135 | 5 | 300 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 26.3 | 66.4086 | 16.2716 | 17.3198 | 28.5 | 31.9583 |
| 0.0135 | 5 | 350 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 26.4 | 68.1918 | 10.0990 | 21.7100 | 30.1 | 55.5679 |
| 0.0135 | 5 | 400 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 26.1 | 68.0900 | 10.4600 | 21.4500 | 28.7 | 55.6158 |
| 0.0135 | 5 | 450 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 26.3 | 66.5700 | 15.7000 | 17.7200 | 28.3 | 34.8093 |
| 0.0135 | 5 | 500 | 63.6227 | 25.9146 | 10.4627 | 26.0 | 66.1900 | 17.0400 | 16.7700 | 28.0 | 29.1875 |
| 0.0135 | 10 | 300 | 61.5798 | 27.5758 | 10.8444 | 25.1 | 63.3728 | 21.6220 | 15.0052 | 27.0 | 15.6555 |
| 0.0135 | 10 | 350 | 61.5798 | 27.5758 | 10.8444 | 25.0 | 67.1284 | 9.1513 | 23.7203 | 29.2 | 61.2389 |
| 0.0135 | 10 | 400 | 61.5798 | 27.5758 | 10.8444 | 25.0 | 66.4694 | 11.3397 | 22.1909 | 27.9 | 54.1078 |
| 0.0135 | 10 | 450 | 61.5798 | 27.5758 | 10.8444 | 25.3 | 64.8161 | 16.8293 | 18.3545 | 27.6 | 33.4225 |
| 0.0135 | 10 | 500 | 61.5798 | 27.5758 | 10.8444 | 24.8 | 64.0751 | 19.2900 | 16.6349 | 26.5 | 25.2523 |
| 0.0135 | 15 | 300 | 59.2365 | 27.1096 | 13.6539 | 24.8 | 61.6978 | 19.4346 | 18.8676 | 26.4 | 23.7147 |
| 0.0135 | 15 | 350 | 59.3045 | 30.3243 | 10.3212 | 24.9 | 65.7062 | 9.9586 | 24.3352 | 30.2 | 60.1696 |
| 0.0135 | 15 | 400 | 55.9112 | 27.7197 | 16.3691 | 25.3 | 61.9307 | 10.2819 | 27.7874 | 29.3 | 57.0432 |
| 0.0135 | 15 | 450 | 62.5605 | 29.9811 | 7.4584 | 25.5 | 66.7258 | 15.5200 | 17.7542 | 28.6 | 41.9410 |
| 0.0135 | 15 | 500 | 62.5605 | 29.9811 | 7.4584 | 25.3 | 64.9729 | 21.6057 | 13.4214 | 27.0 | 23.0933 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก2 ข้อมูลการทดลองสำหรับกระบวนการการดูดซับทางเคมีเมื่อทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิจาก 150 ถึง 250 องศาเซลเซียสที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 ถึง 30 กรัม

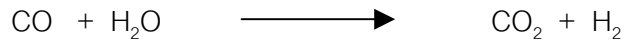
| ตัวดูดซับ กรัม | อุณหภูมิ C | แก๊สขาเข้า | | | | แก๊สขาเข้า | | | |
|-------------------|---------------|----------------|--------|-----------------|---------------------|----------------|--------|-----------------|---------------------|
| | | องค์ประกอบ | | | อัตราการไหล sccm | องค์ประกอบ | | | อัตราการไหล sccm |
| | | H ₂ | CO | CO ₂ | | H ₂ | CO | CO ₂ | |
| 5 | 150 | 97.5383 | 2.4617 | 0.0000 | 22.0 | 97.4345 | 2.4734 | 0.0921 | 20.1 |
| 5 | 200 | 97.0762 | 2.9119 | 0.0119 | 22.1 | 98.1153 | 1.2602 | 0.6244 | 19.7 |
| 5 | 250 | 97.5383 | 2.4617 | 0.0000 | 22.3 | 97.9212 | 1.8538 | 0.2250 | 19.7 |
| 10 | 150 | 97.4445 | 2.5555 | 0.0000 | 21.9 | 97.3900 | 2.5800 | 0.0220 | 20.4 |
| 10 | 200 | 97.3100 | 2.6741 | 0.0159 | 22.4 | 98.2174 | 0.1999 | 1.5827 | 20.3 |
| 10 | 250 | 97.4445 | 2.5555 | 0.0000 | 22.4 | 96.9815 | 0.0012 | 3.0173 | 20.6 |
| 20 | 200 | 97.3425 | 2.6575 | 0.0000 | 22.3 | 98.1713 | 0.0026 | 1.8261 | 19.2 |
| 20 | 250 | 97.5506 | 2.4494 | 0.0000 | 22.1 | 99.8242 | 0.0007 | 0.1751 | 19.8 |
| 30 | 200 | 97.4595 | 2.5405 | 0.0000 | 22.5 | 99.9863 | 0.0052 | 0.0041 | 19.4 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาสมดุลมวลสารของปฏิกิริยารวเตอร์แก๊สซิฟท์(สมดุลคาร์บอน)

จากสมการรวเตอร์แก๊สซิฟท์



เนื่องจากว่าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีไม่สามารถที่จะวัดปริมาณของไอน้ำที่ออกมาจากระบบได้ทำให้การทำสมดุลมวลสารโดยรวมไม่สามารถทำได้ แต่สามารถที่จะทำสมดุลมวลสารของคาร์บอนแทนได้

จากข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วน CO/H₂O = 0.001 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม

ขาเข้า

ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ = 30.9473%

คาร์บอนไดออกไซด์ = 11.4081%

อัตราการไหล 25.7 sccm

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ } 350^\circ\text{C} &= \frac{30.9473 * 273 * 25.7}{100 * (273 + 350) * 22400} \\ &= 1.5559 * 10^{-4} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ } 350^\circ\text{C} &= \frac{11.4081 * 273 * 25.7}{100 * (273 + 350) * 22400} \\ &= 5.7355 * 10^{-5} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลของคาร์บอนขาเข้า} &= 1.5559 * 10^{-4} + 5.7355 * 10^{-5} \\ &= 2.1294 * 10^{-4} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

ปริมาณคาร์บอนขาเข้าเท่ากับ = 0.002555 g/min

ขาออก

ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ = 1.7204%

คาร์บอนไดออกไซด์ = 31.1814%

อัตราการไหล 33.1 sccm

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ } 350^\circ\text{C} &= \frac{1.7204 * 273 * 33.1}{100 * (273 + 350) * 22400} \\ &= 1.11399 * 10^{-5} \text{ mol/min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ } 350\text{ }^{\circ}\text{C} &= \frac{31.1814 * 273 * 33.1}{100 * (273 + 350) * 22400} \\ &= 2.019 * 10^{-4} \text{ mol/min} \\ \text{จำนวนโมลของคาร์บอนขาออก} &= 2.13\text{E-}04 \text{ mol/min} \\ \text{ปริมาณคาร์บอนขาออกเท่ากับ} &= 0.002556 \text{ g/min} \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์

สามารถที่จะคำนวณได้จากสูตร

$$X_{CO} = 100 * \frac{(n_{CO-in} - n_{CO-out})}{n_{CO-in}}$$

โดยที่

X_{CO} = ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์

n_{CO-in} = จำนวนโมลคาร์บอนมอนอกไซด์ขาเข้า

n_{CO-out} = จำนวนโมลคาร์บอนมอนอกไซด์ขาออก

จากข้อมูลการคำนวณสมดุลที่ 350 องศาเซลเซียสอัตราส่วน $CO/H_2O = 0.001$ และปริมาณตัว
เร่งปฏิกิริยา 10 กรัม

$$n_{CO-in} = 1.5559 * 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$n_{CO-out} = 1.11399 * 10^{-5} \text{ mol/min}$$

$$X_{CO} = 100 * \frac{(1.5559 * 10^{-4} - 1.11399 * 10^{-5})}{1.5559 * 10^{-4}}$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมอนอกไซด์} = 92.84$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาองค์ประกอบของแก๊สที่ภาวะสมดุล

ข้อมูลที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 10 กรัม อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส
ปริมาณไอน้ำ 0.1494 โมลต่ออนาที

| | CO | H ₂ O | CO ₂ | H ₂ |
|------------------|---------------|------------------|-----------------|----------------|
| จำนวนโมลเริ่มต้น | 1.4961E-04 | 0.1494 | 5.5149E-05 | 2.980E-04 |
| ค่าการเปลี่ยน | x | x | x | x |
| จำนวนโมลสุดท้าย | 1.4961E-04 -x | 0.1494 -x | 5.5149E-05 + x | 2.98E-4 + x |

$$K = \frac{(5.5149E-5+x)*(2.98E-4+x)}{(1.4961E-04-x)*(0.1494-x)} = 22.8434$$

แก้สมการได้ค่า x เท่ากับ

$$1.4958E-04$$

| | CO | H ₂ O | CO ₂ | H ₂ |
|-------------------|------------|------------------|-----------------|----------------|
| แทนค่าได้จำนวนโมล | 2.6877E-08 | 1.4925E-01 | 2.0473E-04 | 4.476E-04 |

องค์ประกอบของแก๊สที่ภาวะสมดุลคือ

ไฮโดรเจน 68.6121%

คาร์บอนมอนอกไซด์ 0.0041%

คาร์บอนไดออกไซด์ 31.3838%

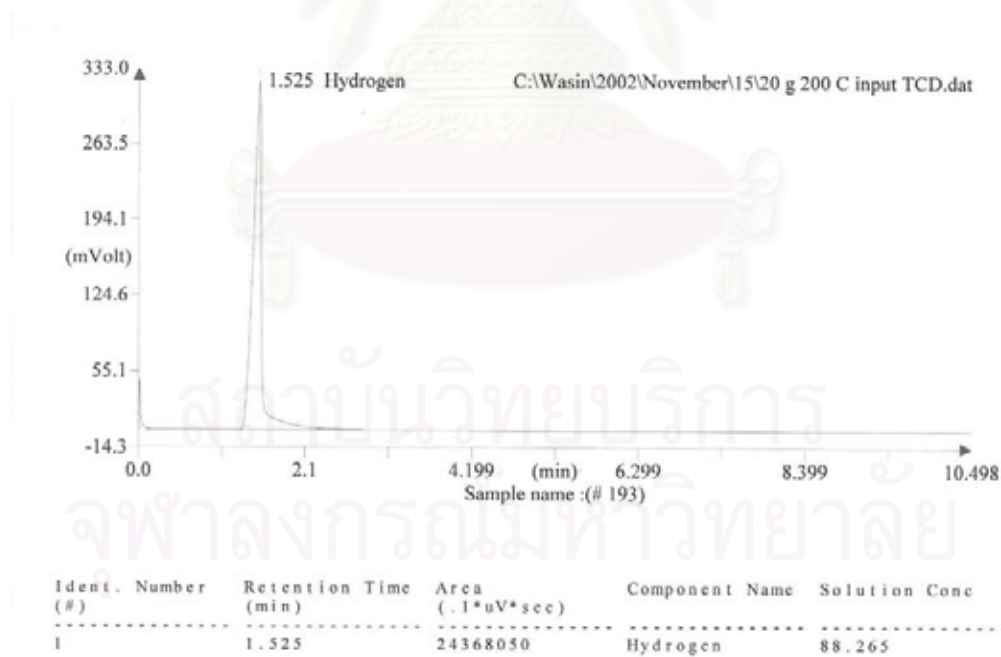
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

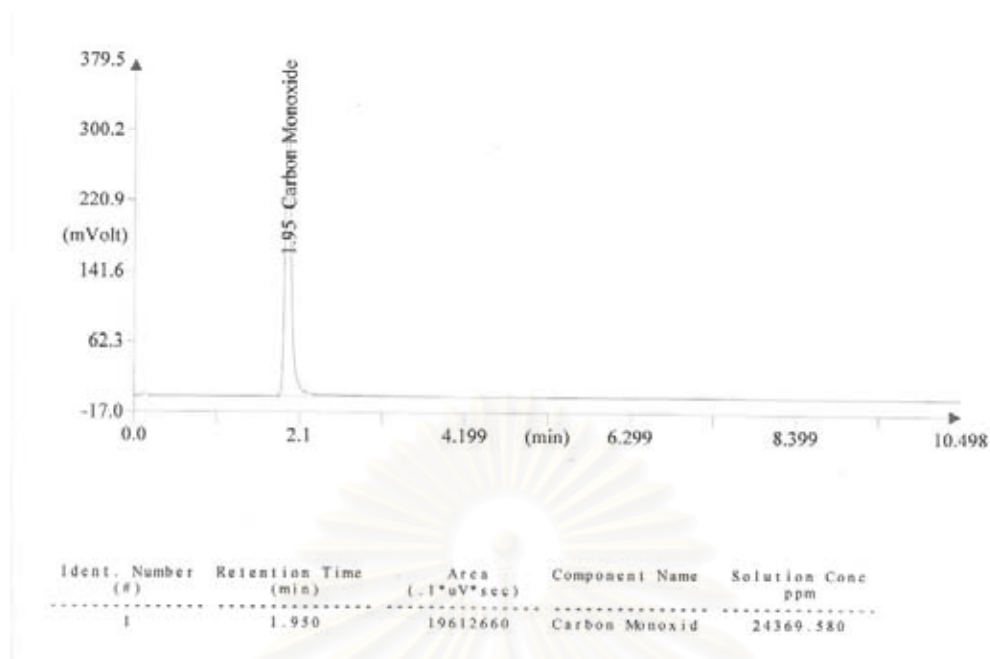
ภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค1
 ตาราง ค1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| แก๊สพา | ไนโตรเจน 99.99% |
| อุณหภูมิอินเจคเตอร์ | 70 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิคอลัมน์ | 40 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (TCD) (FID) | 150 องศาเซลเซียส 250 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิเมทาไนเซอร์ | 350 องศาเซลเซียส |
| คอลัมน์ | พอรापัก เอ็น |
| อัตราการไหลของแก๊สพา | 7 มิลลิลิตรต่อนาที |

โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณสารว่ามีความเข้มข้นเท่าไร ได้โดยซึ่ง
 ผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค1 และ ค2



รูปที่ ค1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD



รูปที่ ค2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายวสิน กาญจนภู เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พุทธศักราช 2522 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรมในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิคในปี 2539 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย