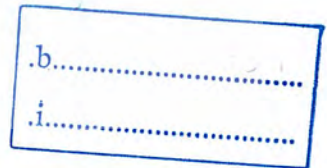


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปฏิญญาสิทธิบัตรของเอทานอลด้วยไอน้ำ  
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62099  
วัน,เดือน,ปี 31 ก.ค. 2549



ปฏิญญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STEAM REFORMING OF ETHANOL OVER Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>




A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR IN ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2004


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

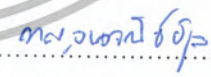
ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาปฏิกริยาริฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำ  
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา  
จัดทำโดย นายธีระพงษ์ จิตรเกื้อกุล เลขประจำตัว 44010728  
นายสิทธิชัย เรืองโรจนวิริยา เลขประจำตัว 44010865  
นางสาวอรรรณ จารุมงคลกุล เลขประจำตัว 44010889  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง)

  
.....กรรมการ  
(รศ.ดร. ประกอบกิจไชยา)

  
.....กรรมการ  
(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	ปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา		
จัดทำโดย	นายธีระพงษ์	จิตรเกื้อกุล	เลขประจำตัว 44010728
	นายสิทธิชัย	เรืองโรจนวิริยา	เลขประจำตัว 44010865
	นางสาวอรรรณ	จารุมงคลกุล	เลขประจำตัว 44010889
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง		
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลด้วยปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) และมีปริมาณโลหะนิกเกิลเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดบรรจุ ซึ่งภายในมีตัวเร่งปฏิกริยาบรรจุอยู่เท่ากับ 0.01 กรัม ทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่ ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการป้อนสารตั้งต้นรวมเป็น 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1 และ 29.2:1 พบว่าสภาวะที่ทำการทดลองมีผลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส และผลพลอยได้อื่น ๆ ที่เกิดขึ้น เป็นต้นี้คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรืออัตราส่วนของน้ำต่อเอทานอลเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวมีแนวโน้มลดลง ส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อเอทานอลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Steam Reforming of Ethanol over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

By Mr. Thiraphong Jitkuakool ID.NO. 44010728  
Mr. Sittichai Ruengrotviriya ID.NO. 44010865  
Miss Orawan Jarumongkhonkun ID.NO. 44010889

Advisor Asst.Prof.Dr. Duangkamol Na-Ranong

Report for Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)  
Department of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



### Abstract

The steam reforming of ethanol over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst has been investigated. The catalyst was prepared by impregnation method and had nickel content of 10 wt%. Experiments were conducted using a conventional reactor packed with 0.01 g of the catalyst. The reaction was performed under atmospheric pressure, temperature of 300, 400 and 500 °C with total feed rate of 210 cm<sup>3</sup>/min and the molar ratio of water to ethanol equaled 9.7 and 29.2, respectively. The results show that the steady state concentration of hydrogen decreased with the increase of reaction temperature or the increase of molar ratio of water to ethanol. The concentration of by-products increased with the reaction temperature but decreased with the molar ratio of water to ethanol.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.ดวงกมล ฤนง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ดูแลเอาใจใส่และให้การสนับสนุนตลอดมา

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนบางส่วนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท SAINT-GOBAIN NORPRO ที่ให้ตัวรองรับอะลูมินา ที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ

คุณค่าและประโยชน์จากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.1 การผลิตแก๊สไฮโดรเจน.....	4
2.1.2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์.....	5
2.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	7
2.1.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง.....	9
2.1.5 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	10
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.1 การเลือกโลหะรองไวและตัวรองรับในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ.....	12
2.2.2 ผลของสภาวะการทดลองที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	12
บทที่ 3 การทดลอง.....	15
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง.....	15
3.2 การทำปฏิกิริยา.....	16
3.3 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC).....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	22
4.1 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจน ที่สภาวะคงตัว.....	22
4.2 ผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้น (น้ำต่อเอทานอล) ที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว.....	23
4.3 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนของ สารตั้งต้น (น้ำต่อเอทานอล) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียง.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	27
เอกสารอ้างอิง.....	28
ภาคผนวก ก รีเทนชันไทม์ของสารต่าง ๆ.....	29
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไฮโดรเจน.....	33
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น.....	34



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์.....	6
รูปที่ 2.2 การเกิดคาร์บอนของเนฟทา.....	10
รูปที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล ที่มีต่อการเปลี่ยนรูป ของสารตั้งต้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	13
รูปที่ 2.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล ที่มีต่อการเปลี่ยนรูป ของสารตั้งต้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์.....	13
รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	20
รูปที่ 3.3 แผนภาพเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี.....	21
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจน ที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว.....	22
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนสารตั้งต้น(น้ำต่อเอทานอล) ที่มีต่อความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว.....	23
รูปที่ 4.3 (ก) ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ที่อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1.....	24
รูปที่ 4.3 (ข) ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดเอทิลีนและอีเทน ที่อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1.....	24
รูปที่ 4.3 (ค) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อการเกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส.....	25
รูปที่ 4.3 (ง) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อการเกิด เอทิลีนและอีเทนที่ อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส.....	25

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น แต่น้ำมันดิบซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญมีปริมาณจำกัดและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่งผลทำให้ปริมาณพลังงานสำรองของโลกลดลง และอาจเกิดปัญหาขาดการขาดแคลนพลังงานขึ้นในอนาคต พลังงานที่นำมาใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะได้จากการเผาไหม้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงซึ่งกระบวนการผลิตพลังงานดังกล่าว จะก่อให้เกิดแก๊สพิษชนิดต่าง ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์ และสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน รวมทั้งยังทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต้นเหตุสำคัญของปรากฏการณ์เรือนกระจกอีกด้วย จึงจัดได้ว่ากระบวนการเผาไหม้เพื่อกำเนิดพลังงาน เป็นแหล่งมลพิษทางอากาศที่สำคัญที่สุด ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาพลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงเป็นสิ่งจำเป็น พลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบด้วยกันคือ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล

ไฮโดรเจน เป็นพลังงานชีวมวลชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาและคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานในอนาคต ซึ่งไฮโดรเจนจะอยู่ในรูปของ สารประกอบของสารต่าง ๆ เช่น น้ำ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และปิโตรเลียม ดังนั้นการนำไฮโดรเจนมาใช้จะต้องมีกระบวนการที่เหมาะสม ในการแยกเอาไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลของสารประกอบเหล่านั้น นอกจากนี้การเลือกว่าจะนำเอาไฮโดรเจนจากสารประกอบใดมาใช้ นั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ เช่น ต้นทุนการผลิต ปริมาณของสารตั้งต้นที่มีอยู่ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ไฮโดรเจนที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สธรรมชาติหรือแอฟทาด้วยไอน้ำ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ต้องอาศัยแก๊สธรรมชาติหรือแอฟทาเป็นสารตั้งต้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เอทานอลเป็นวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจน ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำดังสมการ



จะพบว่า 1 โมลของเอทานอลจะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ถึง 6 โมล ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งมีวัตถุดิบทางการเกษตรมากมาย ที่จะสามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็น "เอทานอลชีวภาพ" อีกทั้งเอทานอลเป็นสารที่ไม่อันตราย สะดวกในการเก็บรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนย้าย ดังนั้นเอทานอลชีวภาพ จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดที่จะเป็นแหล่งไฮโดรเจนภายในประเทศ

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ถูกนำมาใช้ สำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังมีราคาถูก ทน และสามารถผลิตได้ง่าย จึงน่าจะเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำด้วย แต่เนื่องจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นพร้อมกันหลายปฏิกิริยา ทั้งนี้ในการที่จะทราบถึงทิศทางการเกิดปฏิกิริยา และการทำนายปฏิกิริยาหลักและปฏิกิริยาข้างเคียงนั้นจำเป็นต้องทราบ ปัจจัยต่างๆ เช่น สภาวะที่ใช้ในการทดลอง (อุณหภูมิ อัตราส่วนของสารตั้งต้น และอัตราการทำปฏิกิริยาตั้งต้น) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (โลหะ ตัวรองรับ และตัวส่งเสริม) และสภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา ว่ามีผลต่อการกระจายและผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดขึ้นอย่างไร

ในการวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ที่มีต่อปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ เพื่อเก็บข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา สำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนสารตั้งต้นที่มีต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจนและการกระจายของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา สำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

วัดปริมาณของไฮโดรเจนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ นิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดบรรจุ ทำงานภายใต้สภาวะความดันคงที่ที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิที่ใช้คือ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นที่ใช้มีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1 และ 29.2:1 โดยมีอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นเท่ากับ 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. ติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
4. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินาด้วยวิธีเคลือบฝัง
5. ทำการทดลองเพื่อวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาภายใต้สภาวะคงตัว
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินามาใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจน
2. ทราบข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา สำหรับใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลต่อไป



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ทฤษฎี

### 2.1.1 การผลิตไฮโดรเจน

การผลิตไฮโดรเจนสามารถผลิตได้ด้วยวิธีการ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

#### 1. Thermochemical Method

เป็นวิธีผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ความร้อนและปฏิกิริยาเคมีในการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไปเป็นไฮโดรเจน เช่น

กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming) [1]

เป็นกระบวนการที่อาศัยไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับแก๊สธรรมชาติ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น เช่น แนฟทา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเป็นสารผสมของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินา เพราะนิกเกิลมีราคาไม่แพงและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Activity) ที่พอเพียง ซึ่งเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าก็จริง แต่โลหะเหล่านั้นมีราคาแพงกว่ามาก ส่วนตัวรองรับอะลูมินาที่ใช้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี ทนต่ออุณหภูมิถึง 1500 องศาเซลเซียส ใช้งานได้นาน มีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ



ปฏิกิริยาที่ 2 เป็นปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนอย่างรุนแรง ต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 980-760 องศาเซลเซียส ความดันต่ำประมาณ 20 บรรยากาศ และต้องมี ไอน้ำมากเกินพอเพื่อป้องกันการเกิดคาร์บอน (Carbon formation) ปฏิกิริยาที่ 3 เป็นปฏิกิริยา Water gas shift ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนต้องทำที่อุณหภูมิต่ำ และมีไอน้ำมากเกินพอ วิธีนี้สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมด

Partial Oxidation Processes [2]

เป็นกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายเช่นแก๊สธรรมชาติหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวเช่นพวกน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาโมเลกุลหนัก (Heavy fuel oil) โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ

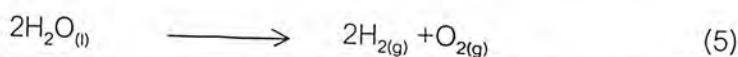


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ต้องทำที่อุณหภูมิระหว่าง 1300 - 1500 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ขึ้นกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนในสารป้อน ความดันไม่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยปกติจะทำการที่ความดันประมาณ 20 – 40 บรรยากาศ

## 2. Electrolytic Method

เป็นการผลิตไฮโดรเจนที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงในสารละลายต่างเพื่อแยกน้ำดังสมการ



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ตามทฤษฎีต้องใช้ความต่างศักย์ 1.23 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ในความเป็นจริงต้อง 2.0 – 2.25 โวลต์ เพราะเกิดแรงดันเกิน (Over voltage) ของไฮโดรเจนที่ขั้วอิเล็กโทรด และเกิดความต้านทานภายในเซลล์ ในทางการค้าสารละลายที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ ใช้เหล็กเป็นขั้วแคโทด และ ใช้เหล็กชุบนิกเกิลเป็นขั้วแอโนด โดยมีแผ่นใยหินบางๆ (Asbestos diaphragm) เป็นตัวกั้น ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 - 70 องศาเซลเซียส ความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ได้ประมาณ 99.7 เปอร์เซ็นต์

## 3. Photolytic Method

เป็นการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

3.1 Photoelectrolysis คือกระบวนการที่แสงอาทิตย์ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เพื่อแยกน้ำทำให้เกิดไฮโดรเจนและออกซิเจน ในปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวมีเพียงเล็กน้อย

3.2 Photobiological คือกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ให้ผลผลิตไฮโดรเจนในกิจกรรมเมตาบอลิซึม (Metabolic) โดยใช้พลังงานแสง

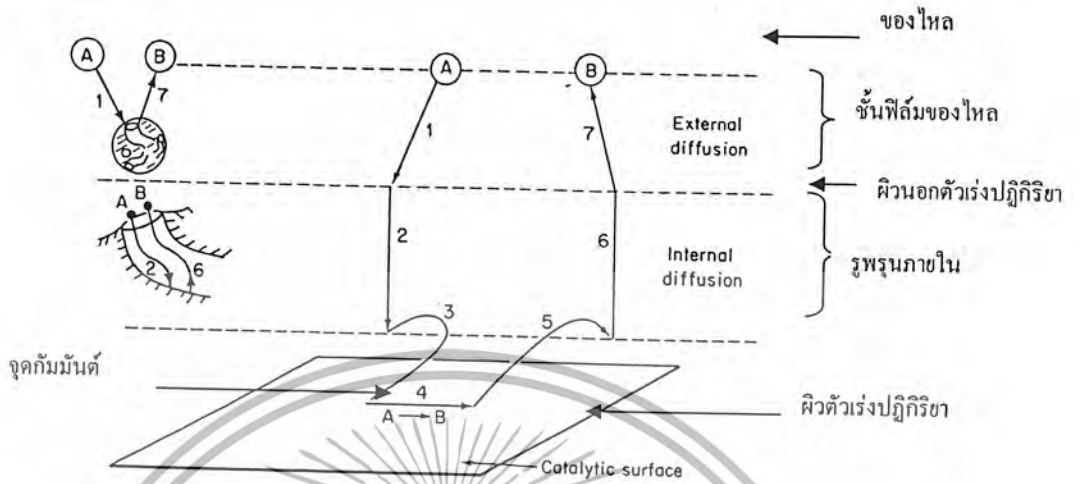
### 2.1.2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ [3]

ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นจำเป็นต้องทราบถึงผลของกระบวนการแพร่ภายในและภายนอกที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน คือ

1. สารตั้งต้นแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังบริเวณผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. สารตั้งต้นแพร่ผ่านรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา
3. สารตั้งต้นถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์ (Active site)
4. สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาบนจุดกัมมันต์
5. สารผลิตภัณฑ์ถูกคายซับออกจากจุดกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6. สารผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 7. สารผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังของไหลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

กระบวนการข้างต้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ขั้นตอนการแพร่ (1, 2, 6 และ 7) ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา (3, 4 และ 5) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี [4] จากการศึกษาที่สารตั้งต้นจะต้องมีการแพร่จากภายนอกไปยังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะต้องอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และภายนอกชั้นฟิล์มของไหล หากอัตราการไหลของสารป้อนเข้าจะทำให้เกิดความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นมาก สารตั้งต้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มไปยังผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่พื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงไม่สามารถศึกษาการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา และการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยาที่แท้จริงได้ ดังนั้นอัตราการไหลของสารป้อนต้องเร็วพอที่จะทำให้ชั้นฟิล์มดังกล่าวบางและเพื่อให้ ความเข้มข้นที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับความเข้มข้นภายในภูมิภาคของไหล และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวจะเป็นขั้นควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม (Reaction Controlling)

ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุน สารตั้งต้นจะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุน และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาไปพร้อมกับการแพร่นั้น ถ้าสารนั้นมีโมเลกุลขนาดค่อนข้างใหญ่หรือรูพรุนมีขนาดค่อนข้างเล็ก ก็จะทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ไปถึงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยากขึ้นซึ่งจะมีผลให้ความเข้มข้นของสารภายในรูพรุนนั้นน้อยกว่าความเข้มข้นสารภายนอก นอกจากนี้ถ้าปฏิกิริยา

เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะยิ่งทำให้ความเข้มข้นของสารภายในรูพรุนต่างจากภายนอกมากขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถหาผลที่แท้จริงของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ และการลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนสามารถทำได้โดยการลดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้หรืออาจใช้การออกแบบรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วย เช่น ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นวงแหวนหรือกลีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

### 2.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [5]

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. โลหะว่องไว ซึ่งบริเวณพื้นผิวของผลึกโลหะจะทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาโลหะว่องไวที่ใช้ ได้แก่ โลหะ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ และสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะ ซึ่งจะกระจายตัวภายในรูพรุนบนตัวรองรับในรูปผลึกขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-50 นาโนเมตร
2. ตัวรองรับ ซึ่งเป็นสารที่มีพื้นที่ผิวมากและมีรูพรุนทำให้โลหะว่องไวสามารถกระจายตัวได้ดีโดยมีพื้นที่ผิวระหว่าง 1.5 ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.4 ถึง 1 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 2000 นาโนเมตร เช่น ซีโอไลท์ (Zeolites) ซิลิกา (Silica) และ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เป็นต้น โดยอะลูมินาเป็นตัวรองรับที่นิยมใช้ในทางการค้ามากที่สุดเพราะมีความเสถียรต่ออุณหภูมิ มีคุณสมบัติเชิงเคมี คุณสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงเร่งที่หลากหลาย โดยอะลูมินาต่างชนิดกันจะมีพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายของรูพรุนและความเป็นกรดที่แตกต่างกัน โดยแกมมา-อะลูมินา เป็นตัวรองรับที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีความเสถียรทางอุณหภูมิ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีความเป็นกรดไม่สูงนักจึงเหมาะสำหรับปฏิกิริยาที่ต้องการตำแหน่งที่มีความเป็นกรด เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (Catalytic reforming) แครกกิง (Catalytic cracking) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation)

3. ตัวส่งเสริม ทำหน้าที่เพิ่มความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา เพิ่มค่าการเลือกเกิดให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และรักษาการกระจายตัวของโลหะให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอเมื่อทำปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ และสารประกอบออกไซด์ของโลหะ

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะต้องสามารถทำหน้าที่ 2 อย่างคือ

1. ส่วนที่เป็นตำแหน่งว่องไวบนโลหะจะต้องดูดซับและแตกพันธะภายในโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้

2. ส่วนที่เป็นออกไซด์จะต้องดูดซับและแตกพันธะภายในโมเลกุลน้ำได้

เนื่องจากโดยทั่วไปมักจะทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จึงควรมีความเสถียรต่อความร้อนได้ดีและอาจเลือกตัวรองรับ

และตัวส่งเสริมซึ่งสามารถสนับสนุนปฏิกิริยาการเปลี่ยนคาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซ (gasification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้เผยแพร่หรือผู้รับผิดชอบด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

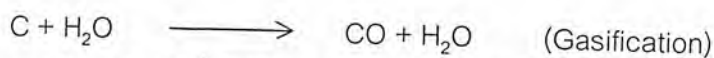
เพื่อลดการสะสมของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะและโลหะผสมที่สามารถนำมาใช้เร่งปฏิกิริยานี้ได้ มีหลายชนิด เช่น โรเดียม (Rh) รูบิเดียม (Ru) แพลลาเดียม (Pd) พลาตินัม (Pt) เอริเดียม (Ir) นิกเกิล (Ni) รีเนียม (Re) ออสเมียม (Os) โลหะผสมนิกเกิล-โคบอลต์ (Ni-Co) และนิกเกิล-คอปเปอร์ (Ni-Cu) ซึ่งพวกโลหะมีตระกูลจะทนต่อการสะสมของคาร์บอน และทนต่อการเป็นพิษ (Poisoning) ซึ่งเกิดจากซัลเฟอร์ได้ดีกว่าโลหะนิกเกิล แต่เนื่องจากโลหะนิกเกิลมีราคาถูกและหาได้ง่ายจึงเป็นโลหะที่นิยมใช้เร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำทางการค้ามากที่สุด

ตัวรองรับที่เลือกใช้จะต้องทนความร้อนได้ดีเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจาก sintering และต้องมีความเป็นกรดน้อยเพื่อป้องกันการเกิดคาร์บอน (Carbon Formation) ความเป็นกรดของตัวรองรับเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับได้ดังนี้

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2\text{-MgO} > \text{SiO}_2 > \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2 > \text{ZrO}_2 > \text{MgAl}_2\text{O}_4 > \text{UO}_2 > \text{CaO, MgO}$   
ความเสถียรทางอุณหภูมิเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้

$\text{ThO}_2 > \text{ZrO}_2 > \text{CrO}_2 > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{BaO} > \text{UO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{MgO}_2 > \text{WO}_2$

ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง โดยพิจารณาจากจุดหลอมเหลว สารที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะมีความแข็งและแข็งแรงกว่าสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มีความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) นั้นควรหลีกเลี่ยงเพราะมีความเป็นกรดสูงโดยเฉพาะในกรณีที่ไปผสมกับตัวรองรับอื่นและมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นไอได้ง่ายเมื่อสัมผัสไอน้ำ ส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกับน้ำได้ง่ายแม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส แม้ว่าตัวรองรับที่เป็นสารประกอบออกไซด์ข้างต้นบางตัว อาจไม่สามารถเตรียมให้มีพื้นที่ผิวมาก ๆ ได้ แต่ก็สามารถนำไปใช้เป็นตัวส่งเสริม (Promoters) เช่น  $\text{UO}_2$ ,  $\text{Pr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_2$ , Alkali metal oxides และ Alkaline earth oxides ได้ทั้งนี้เพราะมีความเป็นด่างสูง สารประกอบของโพแทสเซียม (Potassium) จะมีประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรดของตัวรองรับและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนคาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซของคาร์บอนด้วยไอน้ำ จึงสามารถลดการเกิดคาร์บอน ได้ดังสมการ



จากข้อมูลดังกล่าวมา โลหะว่องไวที่ใช้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำที่ดีที่สุดคือพวกโลหะมีตระกูล และโลหะนิกเกิล ส่วนตัวรองรับที่ดีที่สุดคือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แมกนีเซียมอะลูมิเนต ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), แคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) และ แอลฟา-อะลูมินา ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )

## 2.1.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง [6]

วิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับสามารถแบ่งได้ 3 วิธีดังนี้ คือ วิธีตกตะกอน (Precipitation) วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) และวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) โดยวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธีเคลือบฝัง เพราะสามารถทำได้ง่าย และใช้เวลาสั้น

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังประกอบด้วยกระบวนการหลายขั้นตอน และสถานะที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนจะเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องทำภายใต้สภาวะที่กำหนดขึ้นและควบคุมอย่างระมัดระวัง เพื่อให้โลหะว่องไวมีการกระจายตัวคืออาจเลือกใช้สารที่มีความเป็นรูพรุนมากเป็นตัวรองรับ นอกจากนี้สิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้นสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาก็อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งความว่องไว การเลือกเกิดและอายุการใช้งานด้วย

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

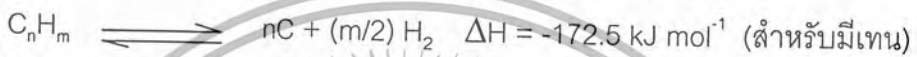
1. Impregnation เป็นการทำให้สารละลายเกลือของโลหะว่องไวเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน โดยหยดสารละลายเกลือลงบนตัวรองรับอย่างช้าๆ ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ความเข้มข้นของสารละลาย การผสม อุณหภูมิ และเวลา สารละลายของโลหะว่องไวที่ใช้มักจะเป็นสารละลายที่มีประจุลบเช่นไนเตรต ซึ่งมักไม่เสถียรเมื่อโดนความร้อนและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ หากใช้สารละลายโลหะที่มีความเข้มข้นสูงแนวโน้มจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งใหญ่กว่าได้โลหะที่เป็นสารละลายเจือจาง พื้นที่ผิวของรูพรุนซึ่งเป็นพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของรูพรุนซึ่งปริมาตรของแต่ละรูพรุนมักมีขนาดไม่เท่ากัน
2. Drying เป็นการทำให้โลหะว่องไวฝังตัวลงบนตัวรองรับโดยการให้ความร้อน ในระหว่างนี้สารละลายตั้งต้น (precursor) จะเกาะลงบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวรองรับ อัตราการทำให้แห้งมีผลต่อการกระจายตัวของสารละลายตั้งต้น โดยหากอัตราการทำให้แห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดเกลือของโลหะถูกเคลื่อนย้ายมาอยู่บริเวณปากของรูพรุน ซึ่งทำให้การกระจายตัวของโลหะบนตัวรองรับไม่สม่ำเสมอ
3. Calcination เป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เพื่อให้เกลือของโลหะว่องไวสลายตัวกลายเป็นสารประกอบออกไซด์
4. Activation เป็นกระบวนการกระตุ้นภายใต้บรรยากาศที่มีแก๊สซึ่งมีสมบัติเป็น reducing agent เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีความว่องไว มักทำโดยใช้ไฮโดรเจน (อาจเจือจางด้วยไนโตรเจน) คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ mild reducing agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.5 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งด้วยไอน้ำ

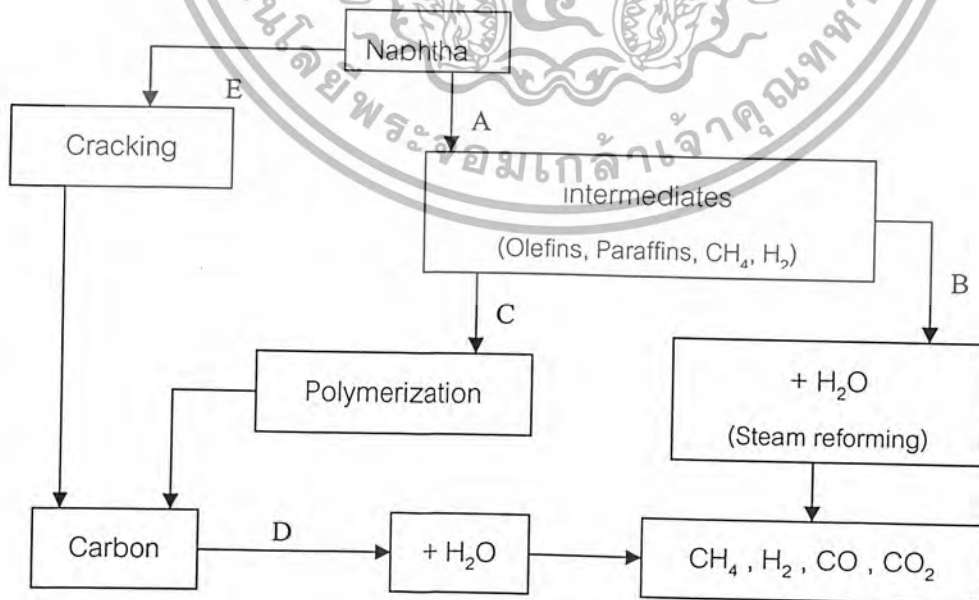
การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งด้วยไอน้ำเกิดจาก การเกิดคาร์บอน การเป็นพิษและการเกิด Sintering

1. การเกิดคาร์บอนจะไปอุดตันรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอนนั้นมีสาเหตุจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ บนผิวของโลหะนิกเกิลและปฏิกิริยา Pyrolysis ที่เกิดขึ้นโดยปราศจากการเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยทั้งสองสาเหตุนี้มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนทั้งสองที่สมดุล



หากสารตั้งต้นนั้นเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่กว่ามีเทน จะมีแนวโน้มที่จะเกิดคาร์บอนมากกว่า จากรูปที่ 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะไปเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของสารตั้งต้น (A) และเร่งปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับ สารตัวกลางที่เป็นโอเลฟินส์ (B) นอกจากนี้ยังไปช่วยเร่งปฏิกิริยา Cracking (E) และ Polymerization (C) ด้วย ความเป็นกรดของตัวรองรับจะไปช่วยเร่งให้ปฏิกิริยา (A) เกิดง่ายขึ้น แต่ก็ช่วยเร่งปฏิกิริยา (E) และ (C) ด้วย ซึ่งก่อให้เกิดคาร์บอนทั้งสิ้น

สามารถลดการเกิดคาร์บอนได้โดยเติมสารจำพวกสารอัลคาไลน์ ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะสามารถไปเร่งปฏิกิริยา (D) ได้ ในขณะเดียวกันจะไปลดความเป็นกรดของตัวรองรับ ทำให้ปฏิกิริยา (E) และ (C) เกิดช้าลง



รูปที่ 2.2 การเกิดคาร์บอนของแนฟทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ การเกิดก้อนคาร์บอนขนาดใหญ่สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยเลือกสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อคาร์บอนสูง และลดความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวรองรับหรือตัวส่งเสริมที่เป็นด่าง เช่น โพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากคาร์บอน สามารถทำได้โดยใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส หรืออาจเติมออกซิเจนลงไปเล็กน้อยเพื่อให้เกิดการเผาไหม้กับคาร์บอน

2. การเป็นพิษจากซัลเฟอร์ และอาร์เซนิก โดยสารประกอบซัลเฟอร์ที่มีปริมาณ 25-10000 ppm ที่มาจกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสารประกอบซัลเฟอร์สามารถดูดซับที่ตำแหน่งบนโลหะว่องไวได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องลดปริมาณสารประกอบเหล่านี้ให้เหลือน้อยกว่า 0.01 ppm โดยจะทำให้เพิ่มอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1 - 2 ปี

3. การเกิด Sintering จากสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการ Sintering ซึ่งเป็นการรวมตัวของโลหะว่องไวจนเกิดเป็นผลึกและการยุบตัวของตัวรองรับ ทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะยาวได้



## 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

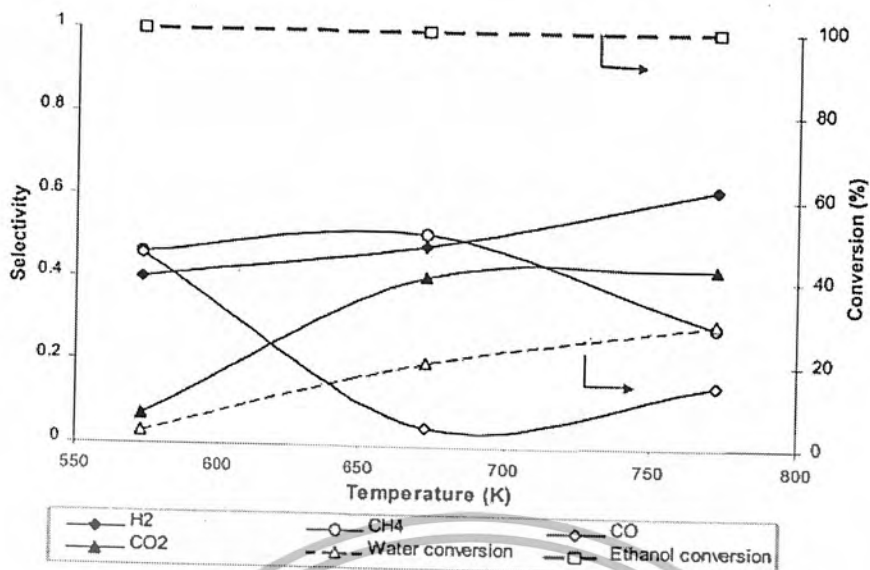
ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและความร้อน ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตและการกระจายของผลิตภัณฑ์ ขึ้นกับสถานะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งชนิดของโลหะว่องไวและตัวรองรับที่ใช้

### 2.2.1 การเลือกโลหะว่องไวและตัวรองรับในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำ [7]

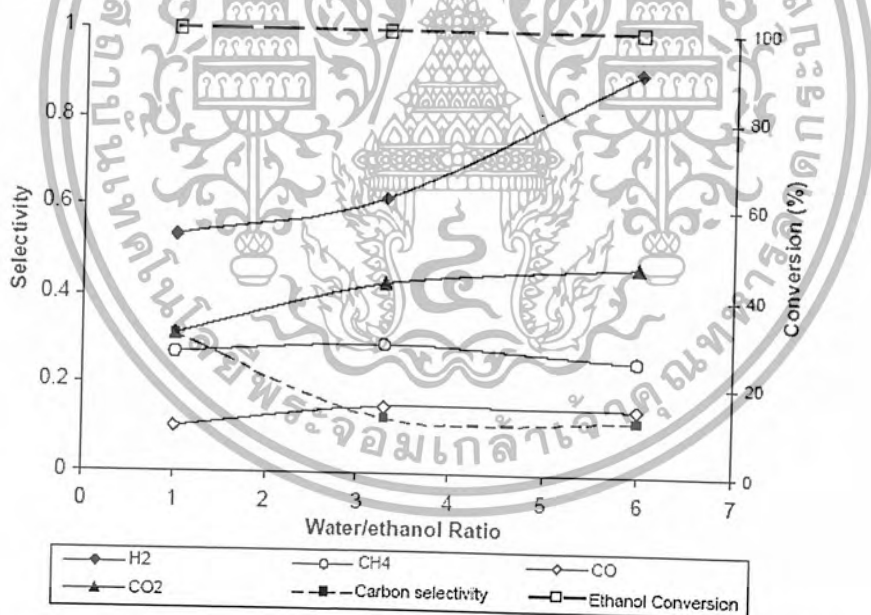
จากการศึกษาของ Fabien Aupretre และคณะ สำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะว่องไว และตัวรองรับต่างชนิดกัน โดยในการศึกษาได้เลือกใช้ Rh, Pt, Pd, Ru, Ni, Cu, Zn และ Fe เป็นโลหะว่องไว และ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $12\text{CeO}_2\text{-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Ce}_{0.63}\text{Zr}_{0.37}\text{O}_2$  เป็นตัวรองรับ ทำการทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศและที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลน้ำต่อเอทานอลเป็น 3:1 พบว่าชนิดของโลหะว่องไวและตัวรองรับที่เลือกใช้ทำให้อัตราการเกิดไฮโดรเจน ค่าการเลือกเกิดของคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระจายของผลิตภัณฑ์ ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีเคลือบฝังของโลหะต่างชนิดบนตัวรองรับเกมมาอะลูมินา พบว่าโลหะนิกเกิลสามารถทำให้เกิดไฮโดรเจนและมีค่าการเลือกเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยปฏิกิริยา Water gas shift มากเป็นอันดับสองรองจากโลหะโรเดียม แต่มีผลผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด และจากการศึกษาอิทธิพลของตัวรองรับโดยใช้โลหะนิกเกิลและโลหะโรเดียมบนตัวรองรับต่างชนิดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบว่า สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลเป็นโลหะว่องไว ตัวรองรับเกมมาอะลูมินาจะให้ค่าการเกิดไฮโดรเจนและค่าการเลือกเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด แต่มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนต่ำคือเพียง 0.6 กรัมต่อชั่วโมงต่อน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับตัวรองรับชนิดอื่นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 4.4

### 2.2.2 ผลของสภาวะการทดลองที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์ [8]

จากการศึกษาของ Jose Comas และคณะ ถึงผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนสารตั้งต้นที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไฮโดรเจน ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินาที่มีปริมาณนิกเกิล 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังรูป



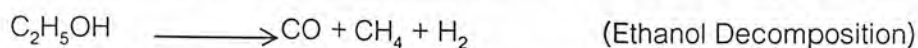
รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนรูปของสารตั้งต้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์ ค่าความเร็วสเปซ (Space time) เป็น 1 มิลลิลิตร·นาที่·มิลลิลิตร<sup>-1</sup> อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 3.3 และอุณหภูมิที่ใช้คือ 773 องศาเซลเซียส



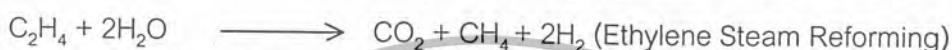
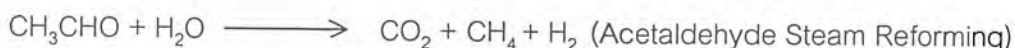
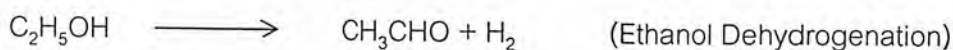
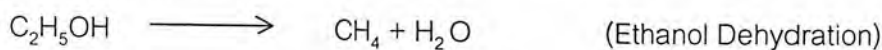
รูปที่ 2.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล ที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของสารตั้งต้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์ ค่าความเร็วสเปซ (Space time) เป็น 1 มิลลิลิตร·นาที่·มิลลิลิตร<sup>-1</sup> และอุณหภูมิที่ใช้คือ 723 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลวิน มีค่าการเลือกเกิดมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากัน ทำให้ทราบได้ว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของเอทานอล ( Ethanol Decomposition)



เป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น โดยมี อะซีทัลดีไฮด์ ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) และเอทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) เป็นสารตัวกลาง (Intermediates) ดังสมการ



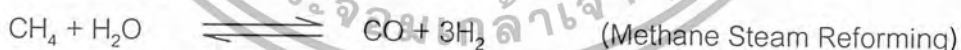
ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นในปริมาณน้อยน่าจะเกิดจากปฏิกิริยา



เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 673 องศาเซลวิน พบว่าค่าการเลือกเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และการเปลี่ยนรูปทางเคมีของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ค่าการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แสดงว่าปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น คือปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ (Ethanol Steam Reforming) และคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดขึ้นในปริมาณน้อยนั้นมาจากปฏิกิริยาการสลายตัวของเอทานอล



และสุดท้ายคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 773 องศาเซลวิน ค่าการเลือกเกิดของมีเทนลดลง ส่วนค่าการเลือกเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงที่ ในขณะที่ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นแสดงว่า  $\text{CO}$  ที่เกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (Methane Steam Reforming) เป็นปฏิกิริยาหลัก



ผลที่เกิดแสดงว่าเอทานอล อะซีทัลดีไฮด์ และอีเทน เปลี่ยนเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน ( $\text{C}_x$ ) อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีเพียงออกไซด์ของคาร์บอน มีเทน และไฮโดรเจน และมีความเป็นไปได้ที่ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ

สำหรับผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มให้มากกว่า 3.3 ค่าการเลือกเกิดคาร์บอนจะคงที่ และหากเพิ่มจาก 3.3 ถึง 6 ค่าการเลือกเกิดมีเทนจะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนมีถึง 91 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราส่วนสารตั้งต้นประมาณ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาปฏิกิริยารีดอกซ์ของไอออนของเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่เตรียมได้ด้วยวิธีเคลือบผง ซึ่งจะต้องทำการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทุกครั้งก่อนทำปฏิกิริยา และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

#### 3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบผง

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้

1. นิกเกิลไนเตรท ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดสำหรับใช้ในห้องทดลอง บริษัท UNILAB
2. อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แบบ Pellets (SA 6173 ขนาด 1/8 นิ้ว) ของบริษัท SAINT-GOBAIN NORPRO
3. น้ำบริสุทธิ์ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เกรด HPLC บริษัท LAB-SCAN

##### 3.1.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบผง

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

บดอะลูมินาแล้วแยกขนาดด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาด 60-80 ไมครอน

อบอะลูมินาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

ปีปเตสสารละลายนิกเกิลไนเตรทที่เตรียมได้ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

มา 2.493 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร

(เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินาเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ใส่อะลูมินาลงในปีกเกอร์ เติมน้ำให้ท่วมอะลูมินาจนสามารถกวนได้

ค่อย ๆ หยดสารละลายนิกเกิลไนเตรทลงในอะลูมินา

พร้อมทั้งกวนและให้ความร้อนไปด้วย (50 องศาเซลเซียส)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กวนไปจนน้ำในสารละลายระเหยออกไปส่วนหนึ่ง  
และทำให้แห้งต่อในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้ง

อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง

ทำแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง

ทำการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 30 นาที  
ด้วย 10 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน ในแก๊สผสมไนโตรเจน  
(อัตราการไหลรวม 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

## 3.2 การทำปฏิกิริยา

### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ( $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่เตรียมได้
3. ซิลิกาควอทซ์ (Silica quartz) ใช้เป็นสารเฉื่อย (inert) ที่ผสมในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ซิลิกาแซนด์ (Silica sand) ใช้รองและปิดทับชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการบรรจุใส่เครื่องปฏิกรณ์
5. เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ความบริสุทธิ์ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์
6. น้ำกลั่น ( $\text{H}_2\text{O}$ )

### 3.2.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (รูปที่ 3.1) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ชุดควบคุมการไหล (Flow Controller)

การควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้นจะใช้ปั๊ม (Tubing pump : 77120-30, Cole-Parmer's) ที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 0.036 - 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้วาล์วสามทาง (3-way valve) ในการกำหนดทิศทางการไหล ส่วนการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สจะใช้มีเตอร์ริงวาล์ว (Metering valve)

2. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 เซนติเมตร ทำด้วยแก้วควอทซ์ (รูปที่

3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) และเครื่องทำความร้อน (Heater) เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เป็นแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ให้คงที่ได้ในช่วง 30 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยมีเครื่องทำความร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนที่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 3000 วัตต์ และมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ

### 3.2.3 การทดลอง

1. เตรียมสารตั้งต้น น้ำต่อเอทานอลตามอัตราส่วนที่ต้องการ 9.7:1 และ 29.2:1 โดยโมล (3:1 และ 9:1 โดยปริมาตร)
2. วัดอัตราการไหลของสารป้อนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยปรับให้ได้อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นในสถานะแก๊สเป็น 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
3. ปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ลดอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง
5. ป้อนสารตั้งต้นผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยา
6. หลังจากสารตั้งต้นผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 10 นาที จึงเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเข้าสู่ควิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี และทำเช่นนี้ทุก 60 นาที จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state)
7. หยุดป้อนสารตั้งต้น ลดอุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยาลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยเปิดไนโตรเจนไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.2.4 การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาวะที่ใช้การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้  $550^{\circ}\text{C}$

อัตราการไหล

- |  |   |
|--|---|
| 1. 10 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนในแก๊สผสมไนโตรเจน | $1.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| 2. 100 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน                 | $1.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |

การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำทุกครั้งก่อนการทำปฏิกิริยา (ในเส้นประรูปที่ 3.1)

โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดไนโตรเจนไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์
2. เพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เป็น 550 องศาเซลเซียส
3. เปลี่ยนให้ 10 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนในแก๊สผสมไนโตรเจน ไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. เปลี่ยนให้ 100 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 30 นาที

### 3.3 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

#### 3.3.1 สารเคมี

1. Porapak Q (80-100 เมช) ของบริษัท GL Science
2. Molecular Sieve 5A (60-80 เมช) ของบริษัท Water Corporation
3. ฮีเลียมบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center
4. ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

#### 3.3.2 อุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ (รูปที่ 3.3) คือ

1. ตัวตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Analog ที่วัดได้จาก FCD
3. ตู้อบที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วง 30-80 องศาเซลเซียส
4. คอลัมน์ที่ใช้แยกสาร 2 คอลัมน์ ได้แก่
  - 4.1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขนาด 1/8 นิ้ว ภายในบรรจุ Porapak Q เพื่อใช้แยกคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีน อีเทน อะเซทิลดีไฮด์ น้ำ และเอทานอล
  - 4.2 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขนาด 1/8 นิ้ว ภายในบรรจุ Molecular Sieve 5A เพื่อใช้แยกไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน

#### 3.3.3 การทดลอง

##### 3.3.3.1 การหา retention time (Retention time) ของแก๊สต่างๆ

1. เก็บตัวอย่าง (Sampling) แก๊สแต่ละชนิด (เอทานอล น้ำ อะเซทิลดีไฮด์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์)
2. วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี
3. หาเวลาการเกิดพีค (peak) ของสารแต่ละชนิด

##### 3.3.3.2 การทำกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจน น้ำ และเอทานอล กับพื้นที่ใต้

กราฟ

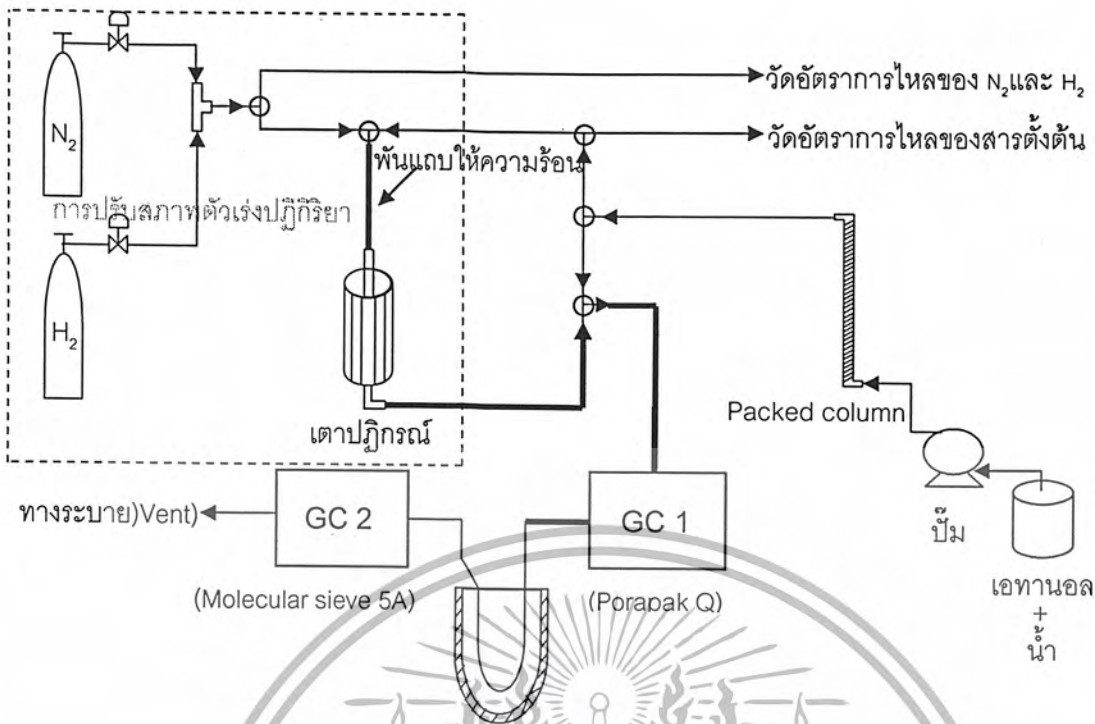
### 3.3.4 ภาวะที่ใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

#### คอลัมน์ Porapak Q

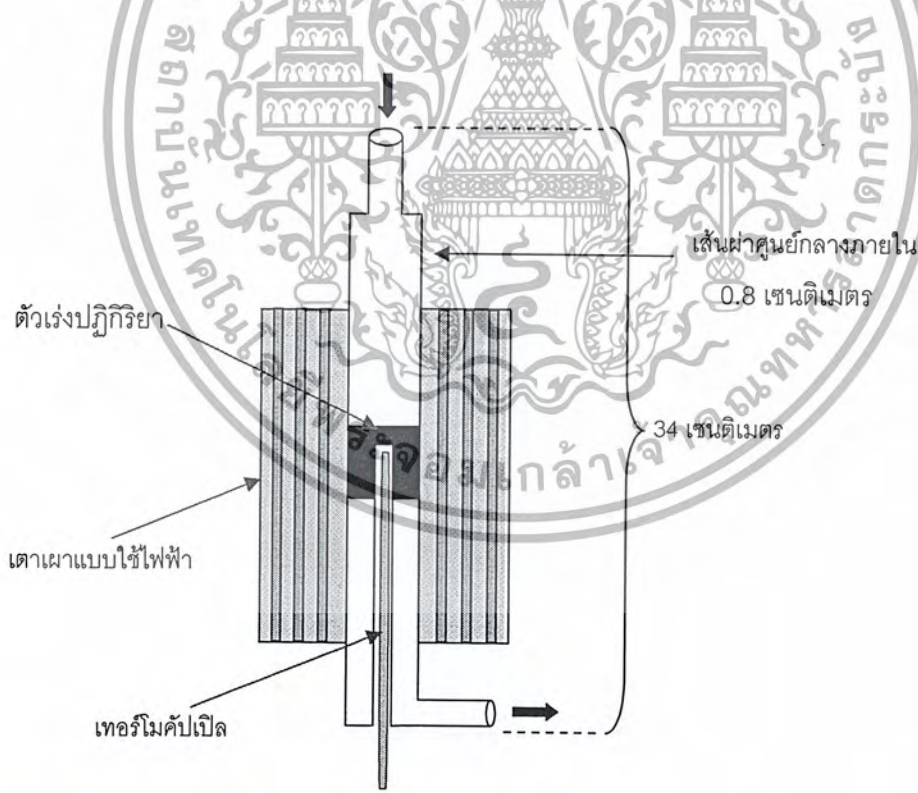
ชนิดของแก๊สพา	ฮีเลียม
อุณหภูมิคอลัมน์แยกสาร	130 °C
อุณหภูมิคอลัมน์สารตัวอย่าง	140 °C
อุณหภูมิเครื่องตรวจจับแบบ TCD	140 °C
อัตราการไหลของฮีเลียมฝั่งสารตัวอย่าง	$1.63 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
อัตราการไหลของฮีเลียมฝั่งสารอ้างอิง	$2.69 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
ปริมาตรของสารตัวอย่าง	$3.7 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

#### คอลัมน์ Molecular Sieve 5A

ชนิดของแก๊สพา	ไนโตรเจน
อุณหภูมิคอลัมน์แยกสาร	65 °C
อุณหภูมิเครื่องตรวจจับแบบ TCD	110 °C
อัตราการไหลของไนโตรเจนฝั่งสารตัวอย่าง	$2.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
อัตราการไหลของไนโตรเจนฝั่งสารอ้างอิง	$4.75 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
ปริมาตรของสารตัวอย่าง	$2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

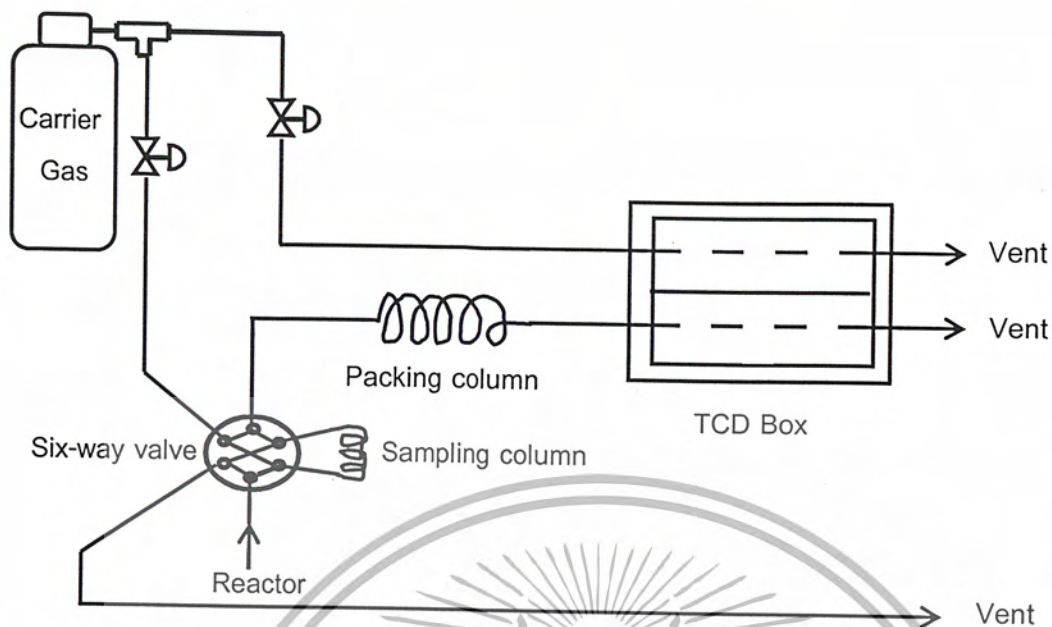


รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

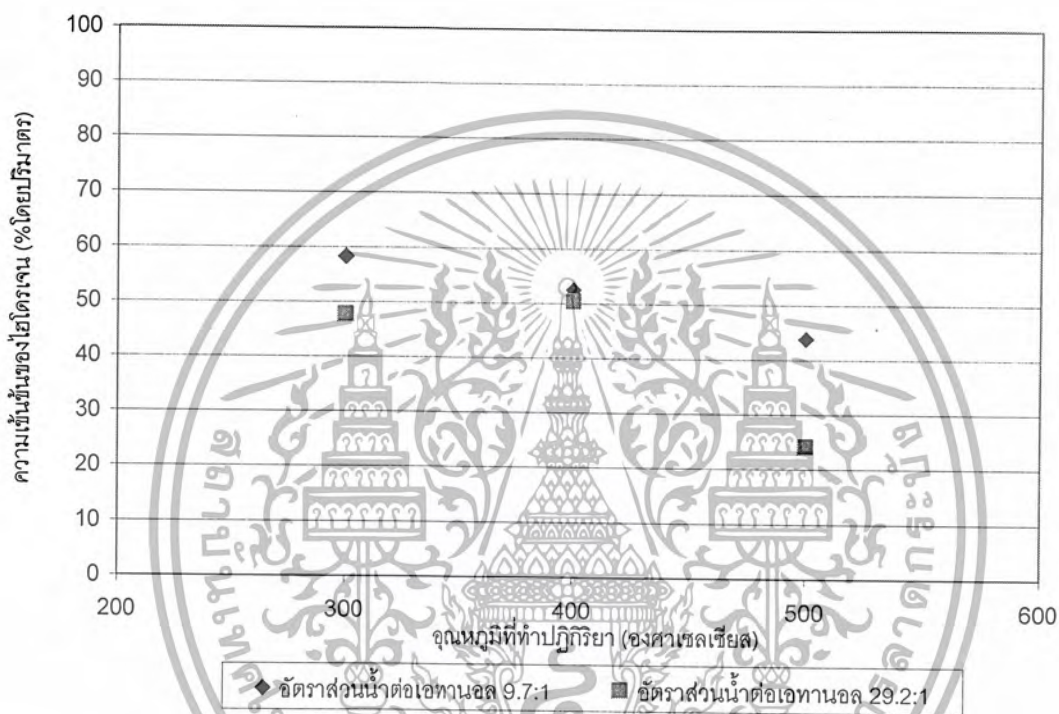


รูปที่ 3.3 แผนภาพเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

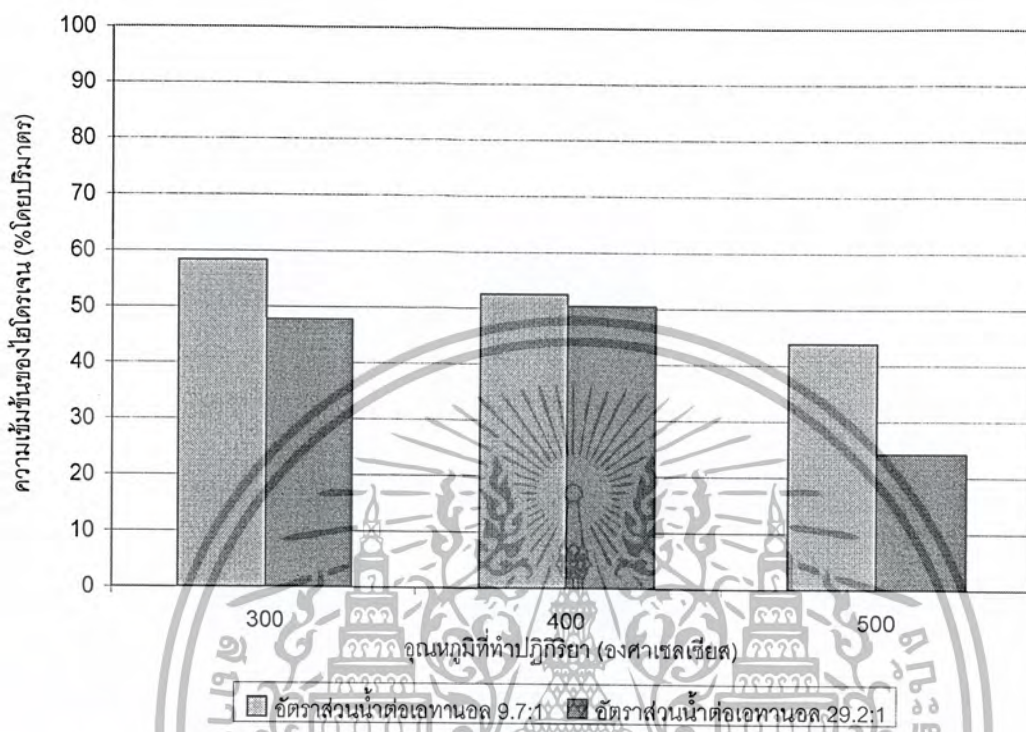
#### 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว เทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่า สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 29.2:1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส รองลงมาเป็นที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

#### 4.2 ผลของอัตราส่วนสารตั้งต้น(น้ำต่อเอทานอล)ที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว

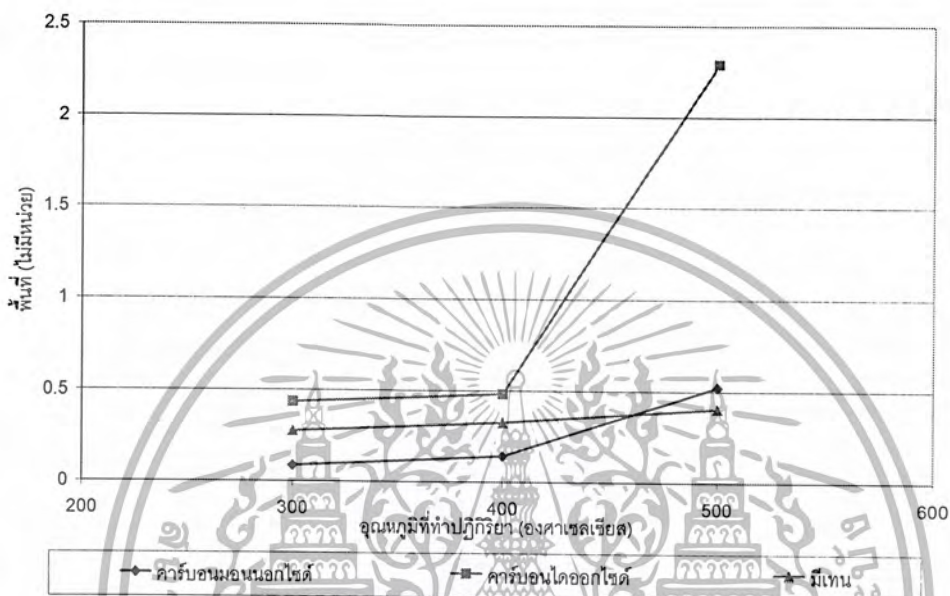


รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนสารตั้งต้น(น้ำต่อเอทานอล) ที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว

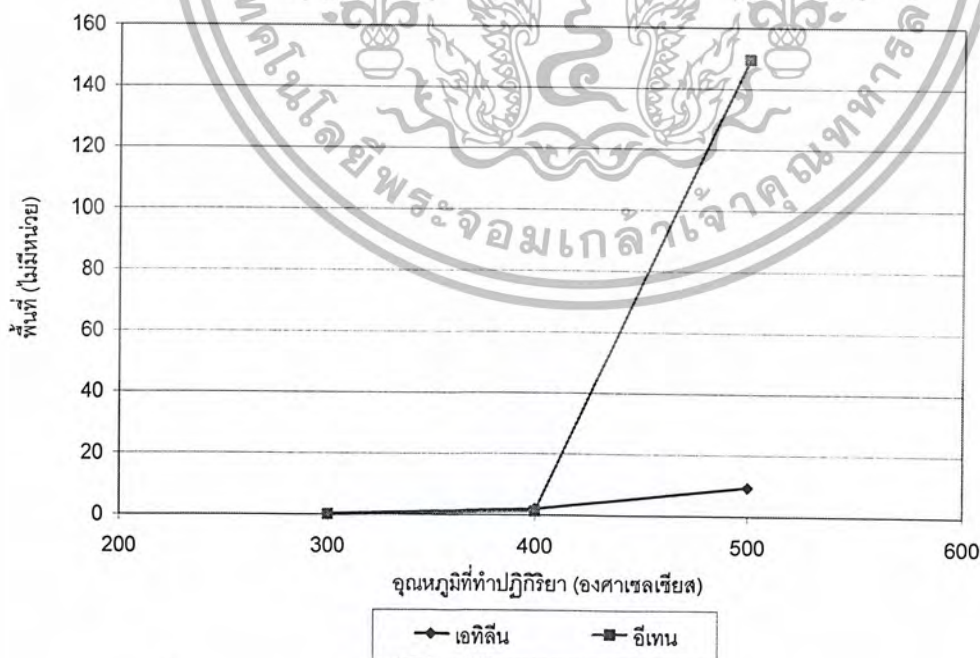
รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง สำหรับทุกอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

### 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนสารตั้งต้น(น้ำต่อเอทานอล) ที่มีต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบว่าผลิตภัณฑ์หลายชนิดขึ้นกับสภาวะการทดลองโดยผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่พบในการทดลอง มีดังนี้ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีนและอีเทน\*



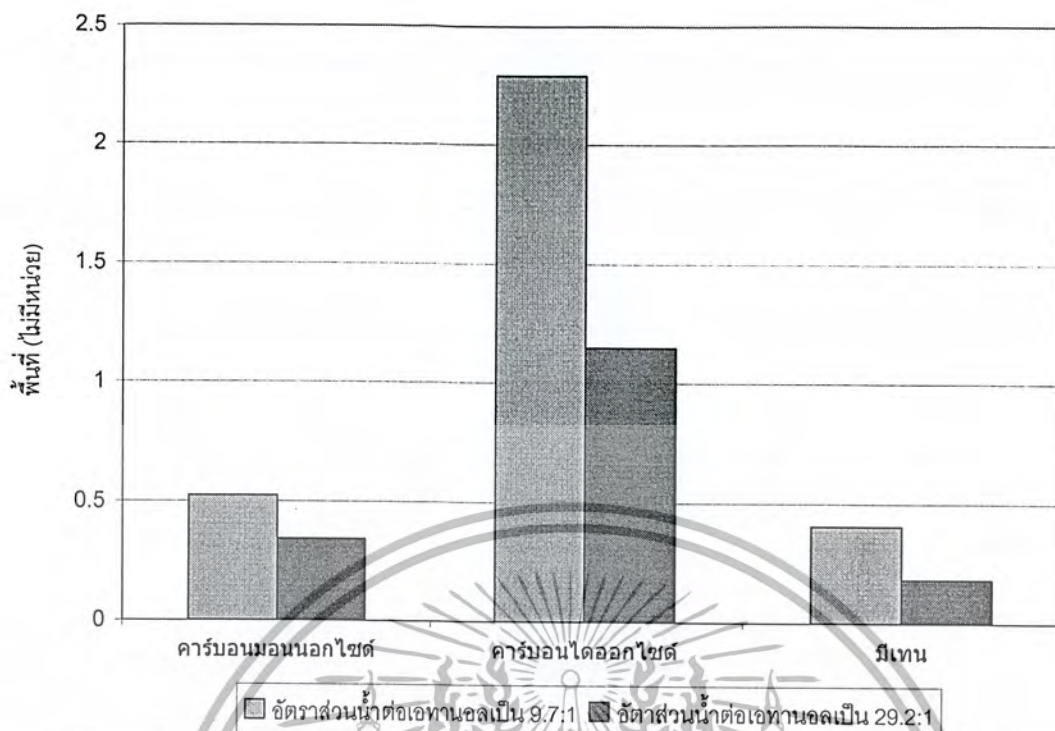
รูปที่ 4.3 (ก) ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ที่อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1



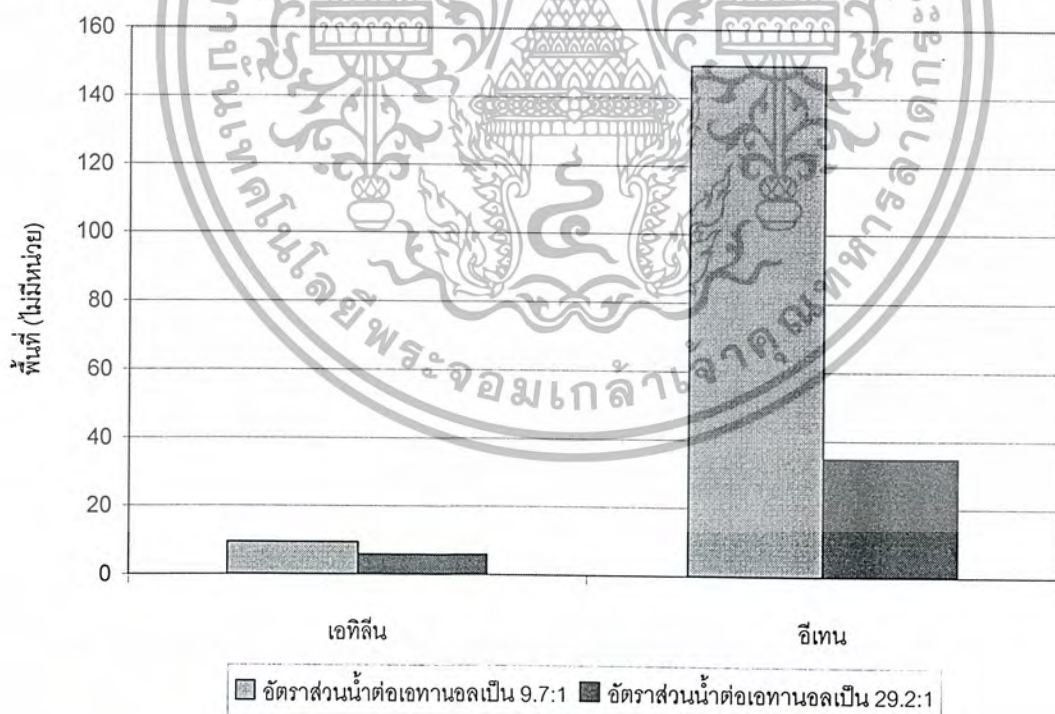
รูปที่ 4.3 (ข) ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดเอทิลีนและอีเทน

ที่อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเป็น 9.7:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (ค) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อการเกิด คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 (ง) ผลของอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อการเกิด เอทิลีนและอีเทน ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.3 (ก) และ 4.3 (ข) จะเห็นได้ว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และอีเทน เกิดขึ้นน้อยที่อุณหภูมิต่ำและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 500 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นปริมาณมาก ส่วนมีเทนและเอทิลีน จะเกิดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ไม่ค่อยมีผลมากนัก

รูปที่ 4.3 (ค) และ 4.3 (ง) แสดงให้เห็นว่าการเกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีนและอีเทน จะเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น

หมายเหตุ (\*) เปรียบเทียบปริมาตรชิ้นไหมที่อุณหภูมิคอลัมน์แยกสาร 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลฮีเลียม 25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากข้อมูลที่มีผู้ศึกษาไว้แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของผลของอุณหภูมิ และอัตราส่วนสารตั้งต้นที่มีต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน และการกระจายของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลอง คือ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นที่ใช้มีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล เป็น 9.7:1 และ 29.2:1 และอัตราการผลิตรวมของสารตั้งต้นเท่ากับ 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที

พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีน และอีเทน โดยจะเกิดมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำลดลง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพื่อเติม ควรศึกษาถึงผลของปริมาณน้ำในสารตั้งต้นและตัวรองรับที่ใช้ว่ามีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นอย่างไร โดยทำการทดลองที่สภาวะ สารตั้งต้นเป็นเอทานอลบริสุทธิ์ และทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวรองรับอะลูมินา โดยปราศจากโลหะว่องไว

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Martyn V. Twigg, *Catalyst Handbook*, Manson Publishing. 1996.
- [2] George T. Austin, *Shreve's Chemical Process Industries*, 5<sup>th</sup> edition. McGraw-Hill Book Company.
- [3] H. Scott Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall International Series. 1992.
- [4] ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง. สำนักพิมพ์ ท้อป จำกัด 2546.
- [5] Robert J. Farrauto and Calvin H. Bartholomew. *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes*. Blackie Academic professional.
- [6] รศ.ดร.วิทยา เวียงพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่ง (เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี) พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น) 2547.
- [7] Fabien Aupretre, Claude Descorme, Daniel Duprez, "Bio-ethanol catalytic steam reforming over supported metal catalysts.", *Catalysis Communications.*, vol 3, 2002. pp. 263-267.
- [8] Jose Comas, Fernando Marino, Miguel Laborde, Norma Amadeo. "Bio-ethanol steam reforming on Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst.", *Chemical Engineering Journal.*, vol 98, 2004. pp. 61-68.

ภาคผนวก ก  
รีเทนชันไท์มของสารต่าง ๆ

โครมาโตแกรมของคอลัมน์ Porapak Q

3.623



รูปที่ ก 1-โครมาโตแกรมของน้ำ

รูปที่ ก 2-โครมาโตแกรมของอะเซทัลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

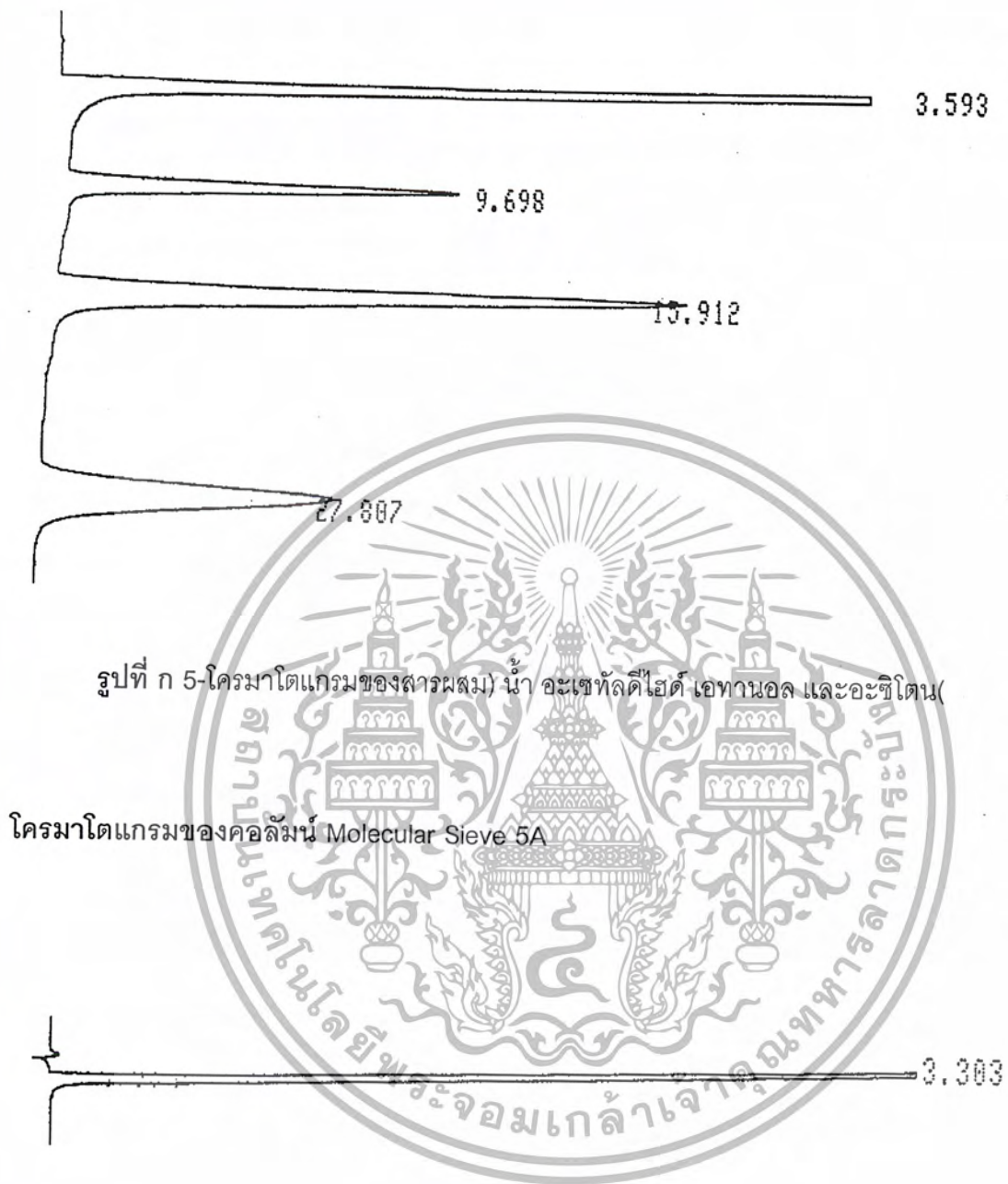
15.295



26.823

รูปที่ ก-4 โครมาโตแกรมของอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก 6-โครมาโตแกรมของไฮโดรเจน

รีเทนชันไทม์ของสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

ชนิดคอลัมน์แยกสาร	ชนิดของสารตัวอย่าง	รีเทนชันไทม์ (นาที)
Porapak Q	น้ำ	3.6
	อะเซทิลดีไฮด์	9.8
	เอทานอล	15.8
	อะซิโตน	26.8
Molecular Sieve 5A	ไฮโดรเจน	3.3

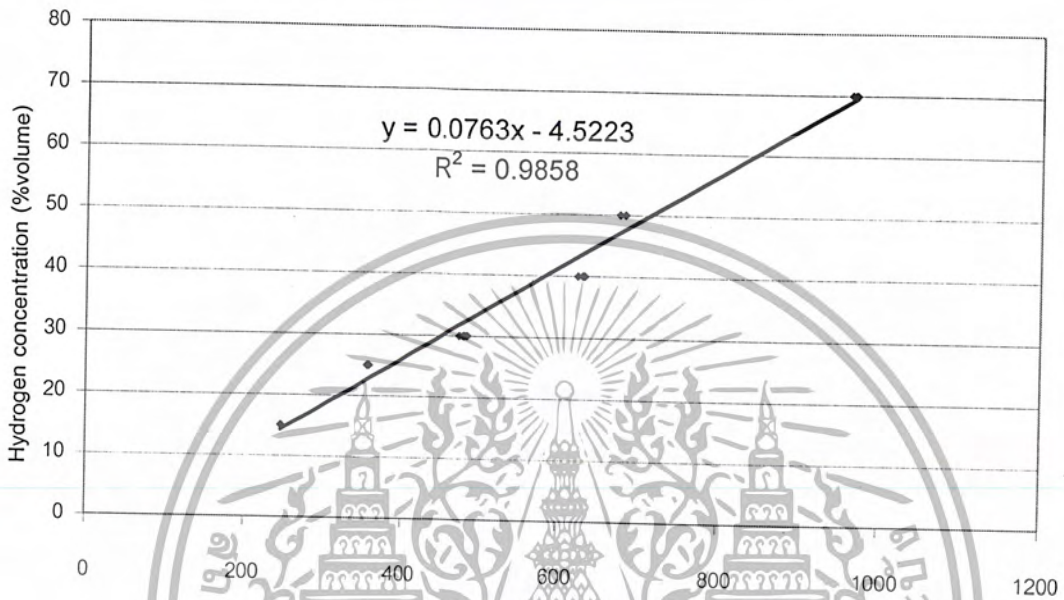
รีเทนชันไทม์จากที่มีผู้ศึกษาไว้แล้ว

บรรจุ Porapak Q ในท่อสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราการไหลของแก๊สพา 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ชนิดของสาร	รีเทนชันไทม์ (นาที)
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.24
คาร์บอนไดออกไซด์	0.65
มีเทน	0.35
เอทิลีน	1.15
อีเทน	1.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

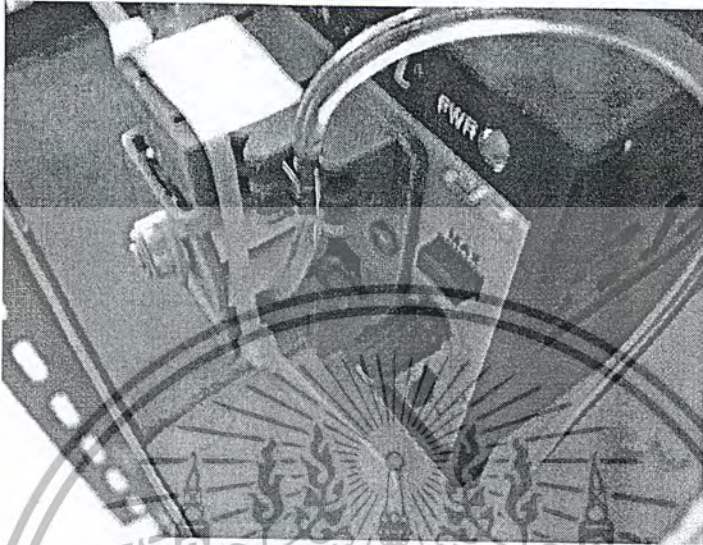
ภาคผนวก ข  
 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไฮโดรเจน



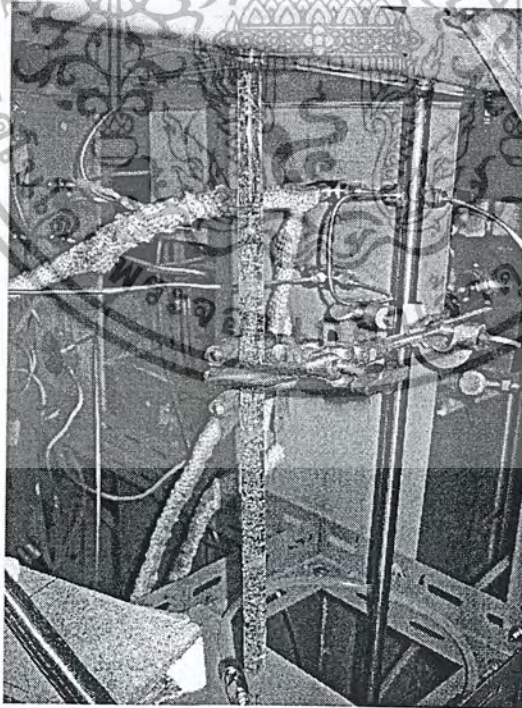
รูปที่ ข- 1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นไฮโดรเจน

## ภาคผนวก ค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

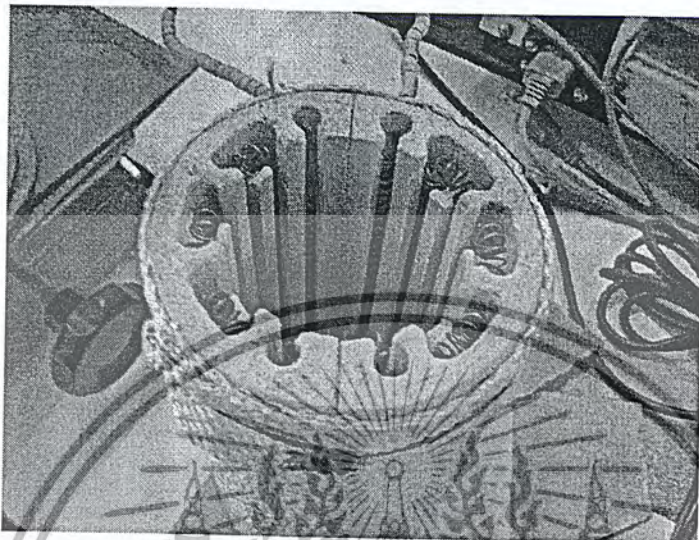


รูปที่ ค-1 ปั๊ม (Tubing pump : 77120-30, Cole-Parmer's)

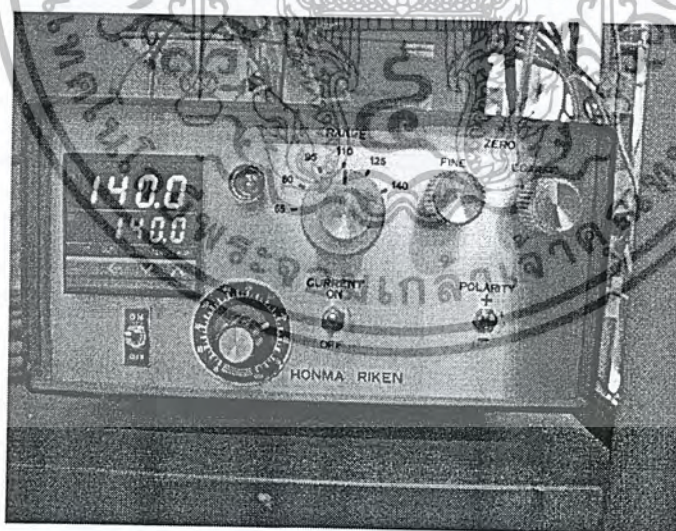


รูปที่ ค-2 Packed column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

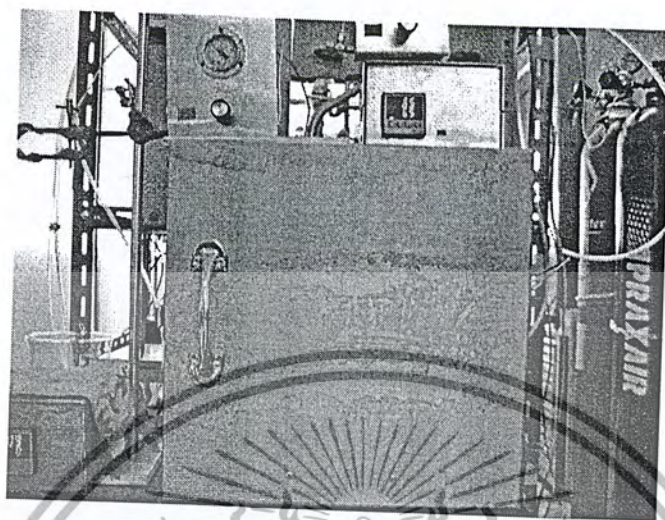


รูปที่ ค-3 เตาปฏิกรณ์แบบใช้ไฟฟ้า



รูปที่ ค-4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและกระแสของ TCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-5 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้คงที่ได้ในช่วง 30-80 °C

