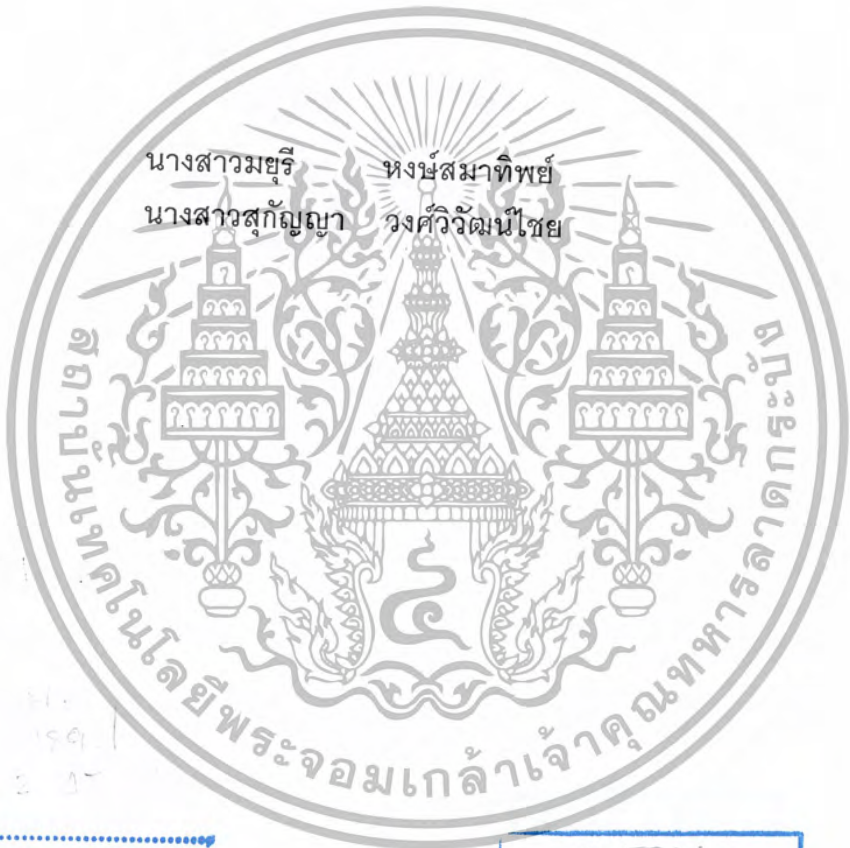


ปฏิริยาริฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำ
โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **61959**
วัน,เดือน,ปี **25 ก.ค. 2549**

b. 11558box
i.

ปฏิริยาริพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STEAM REFORMING OF ETHANOL OVER Ni/SiO_2



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

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา

จัดทำโดย นางสาวมยุรี หงษ์สมาทิพย์ เลขประจำตัว 44010798

นางสาวสุกัญญา วงศ์วิวัฒน์ไชย เลขประจำตัว 44010867

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



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

.....กรรมการ
(รศ.ดร. ประจวบ กิจไชยา)

.....กรรมการ
(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวนิชย์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีลิกา		
จัดทำโดย	นางสาวมยุรี	หงษ์สมาทิพย์	เลขประจำตัว 44010798
	นางสาวสุกัญญา	วงศ์วิวัฒน์ไชย	เลขประจำตัว 44010867
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง		
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี		
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์		
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีลิกา ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) และมีปริมาณโลหะนิกเกิลเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดบรรจุซึ่งภายในมีตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุอยู่เท่ากับ 0.01 กรัมทำงานภายใต้สภาวะความดันคงที่ที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารรวมเท่ากับ 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 และ 29.2:1 ตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณของไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากกว่าอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ และผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

Report Title Steam Reforming of Ethanol over Ni/SiO₂

By Miss Mayuree Hongmatip ID.NO. 44010798
Miss Sukanya Wongviwatchai ID.NO. 44010867

Advisor Assist. 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/SiO₂ catalyst has been investigated. The used 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, 350, 400 and 500°C with total feed rate of 210 cm³/min and molar ratio of water to ethanol equaled 3:1 and 9:1, respectively. Composition of the effluent gas was analyzed by gas chromatograph. The results showed that the reactions occurring at 400 and 500°C reached their steady state faster than the ones at 300 and 350°C. Hydrogen production was more dependent on the reaction temperature than the feed ratio of water to ethanol. The amount of other by-products (small hydrocarbon compounds such as methane, ethane, etc.) increased with the reaction temperature.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน และผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ผู้ควบคุมงานวิจัยที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนบางส่วนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท SAINT-GOBAIN NORPRO ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวรองรับซิลิกาเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนที่ทำให้กำลังใจ และสนับสนุนโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ

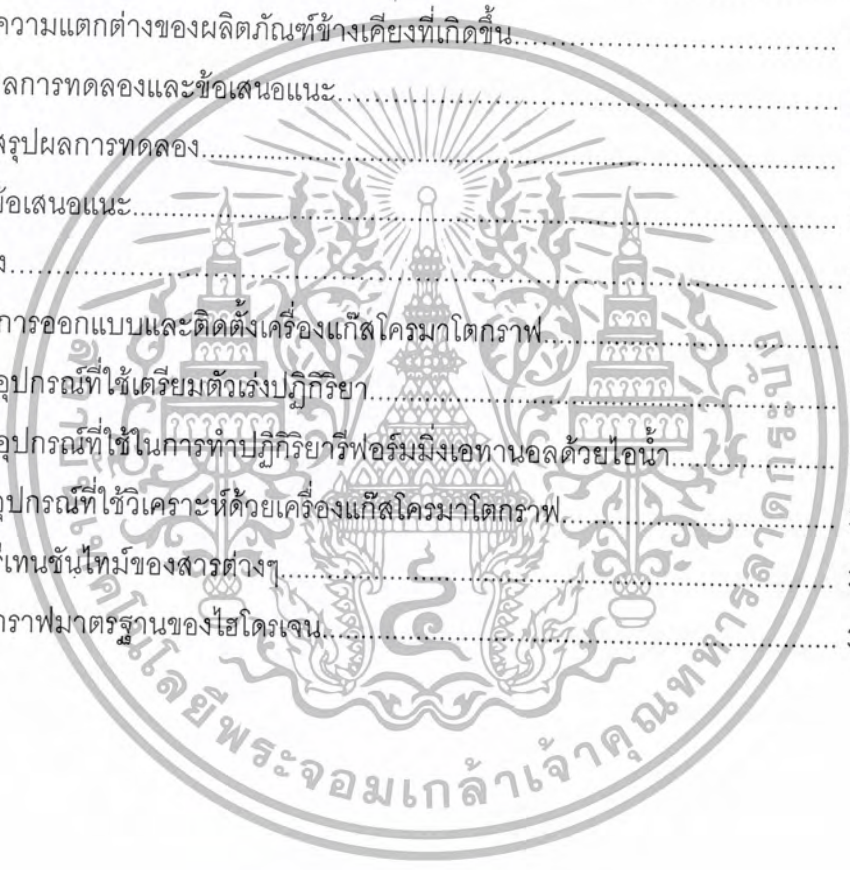
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ (ต่อ)

3.1.2 การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
3.1.3 การทำปฏิกิริยาริฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ.....	12
3.2 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ.....	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	18
4.1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เข้าสู่สภาวะคงตัว.....	18
4.2 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว.....	20
4.3 ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้น.....	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	23
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	23
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	23
เอกสารอ้างอิง.....	24
ภาคผนวก ก การออกแบบและติดตั้งเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	25
ภาคผนวก ข อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาริฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ.....	28
ภาคผนวก ง อุปกรณ์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	31
ภาคผนวก จ รีเทนชันไทม์ของสารต่างๆ.....	33
ภาคผนวก ฉ กราฟมาตรฐานของไฮโดรเจน.....	37



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	4
รูปที่ 2.2	กลไกการสลายตัวของเมทานอล.....	9
รูปที่ 3.1	แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
รูปที่ 3.2	เครื่องปฏิกรณ์เคมี.....	15
รูปที่ 3.3	แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	16
รูปที่ 3.4	แผนภาพเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ.....	17
รูปที่ 4.1(ก)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจน (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส) ที่เวลาต่างๆกัน อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 โดยโมล (3:1 โดยปริมาตร).....	18
รูปที่ 4.1(ข)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจน (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส) ที่เวลาต่างๆกัน อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 29.2:1 โดยโมล (9:1 โดยปริมาตร).....	18
รูปที่ 4.2	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจน(แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส) ที่สภาวะคงตัว.....	20
รูปที่ 4.3(ก)	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียง* อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 โดยโมล (3:1 โดยปริมาตร).....	21
รูปที่ 4.3(ข)	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียง* อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 29.2:1 โดยโมล (9:1 โดยปริมาตร).....	21

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรในปัจจุบันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงประเทศจากภาคเกษตรเป็นภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2547 ประเทศไทยมีการใช้น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล อยู่ที่ระดับ 134 พันบาร์เรลต่อวัน และ 330 พันบาร์เรลต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.7 และร้อยละ 10.5 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2546 ทำให้ต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งน้ำมันดิบและสำเร็จรูปจากต่างประเทศเป็นหลักคิดเป็นร้อยละ 85 ของปริมาณการจัดหาทั้งหมด[1] ดังนั้นหากไม่มีการหาแหล่งพลังงานภายในประเทศหรือเทคโนโลยีใหม่ขึ้นมาทดแทนก็อาจทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตและยังส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศอีกด้วย

ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในยานยนต์ทำให้เกิดมลพิษจากการสันดาปเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์เป็นหลัก สารมลพิษที่ระบายนเข้าสู่บรรยากาศที่เกิดจากการคมนาคมขนส่ง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สารตะกั่ว และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ด้วยสมบัติของไฮโดรเจนที่ว่า เมื่อไฮโดรเจนทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับออกซิเจนจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ และสามารถให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าได้ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ยุคปัจจุบันมุ่งความสนใจไปที่การนำ ไฮโดรเจนไปใช้เป็นสารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งไม่ก่อให้เกิดสารพิษใด ๆ และจัดได้ว่าไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงสะอาด พลังงานรูปแบบนี้จะไม่ทำให้เกิดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม ดังเช่นการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานจำพวกที่ได้จากฟอสซิล

การผลิตไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมทั่วไปสามารถทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของแก๊สธรรมชาติหรือแอฟทา นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ โดยใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามสารตั้งต้นของกระบวนการทั้งสองนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากปิโตรเลียมซึ่งอาจหมดไปได้เช่นกัน จากการศึกษาพบว่าประเทศไทยมีพืชที่เหลือบริโภคและเหมาะสมในการนำมาผลิตเอทานอลได้ปริมาณถึง 3 ล้านลิตรต่อวัน อีกทั้งยังมีการสนับสนุนการวิจัยพัฒนาจากภาครัฐอย่างต่อเนื่องเพื่อนำวัตถุดิบ

ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเอทานอล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิจัยและพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังสื่ออื่นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีเพื่อนำเอทานอลที่ได้ไปใช้ต่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด ซึ่งหากมีการสนับสนุนให้มีการนำเอทานอลไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่จะทำให้ปริมาณความต้องการที่จะนำวัตถุดิบทางการเกษตรไปใช้ผลิตเอทานอลมากขึ้น จะสามารถแก้ปัญหาความไม่แน่นอนของราคาพืชผลทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่งด้วย

ในงานวิจัยนี้มีความมุ่งหวังที่จะนำเอาเอทานอลที่ได้มาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการนำเอาไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลของเอทานอลอาจทำได้โดยการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีจะทำให้กระบวนการดังกล่าวมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นหลัก ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแบบมีตัวรองรับมีราคาไม่แพงอายุการใช้งานนานเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะของไวชนิดอื่น และถูกนำมาใช้เร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอยู่แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาสำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ
2. เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนสารตั้งต้นที่มีต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาสำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

วัดปริมาณของไฮโดรเจนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำโดยใช้นิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา ซึ่งเตรียมโดยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดบรรจุ ทำงานภายใต้สภาวะความดันคงที่ที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิที่ใช้คือ 300, 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นที่ใช้มีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล คือ 9.7:1 และ 29.2:1 อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นเท่ากับ 210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้
3. ประกอบและติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่สงวนลิขสิทธิ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หารี่เทนชันไทม์ (Retention time) และทำกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับความเข้มข้นของสารชนิดต่าง ๆ
6. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาโดยวิธีเคลือบฝัง
7. ทดลองเพื่อวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาภายใต้สภาวะคงตัว
8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
9. จัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา มาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาอีพอกซีมีงเอทานอลด้วยไอน้ำเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจน
2. ทราบข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา สำหรับใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลต่อไป



บทที่ 2

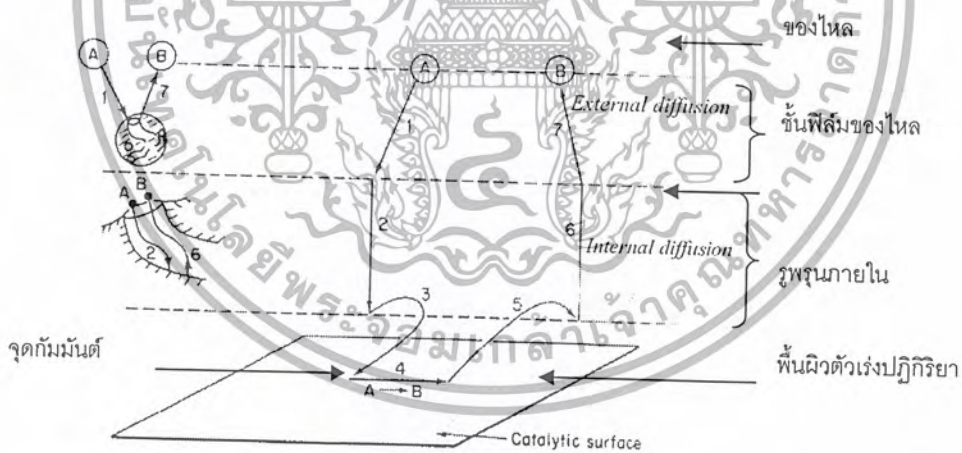
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

การเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนคือ

1. สารตั้งต้นแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังบริเวณผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. สารตั้งต้นแพร่จากผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่รูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อไปยังจุดกัมมันต์ (Active site)
3. สารตั้งต้นถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์
4. สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาบนจุดกัมมันต์
5. สารผลิตภัณฑ์ถูกคายซับออกจากจุดกัมมันต์
6. สารผลิตภัณฑ์แพร่จากรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. สารผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังของไหลภายนอก



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นแบ่งเป็น กระบวนการเชิงกายภาพ (การแพร่) และ กระบวนการเชิงเคมี (การดูดซับ การเกิดปฏิกิริยา การคายซับ) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นจะมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยถือว่าขั้นตอนที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำสุดเป็นขั้นกำหนด อัตราการเกิดปฏิกิริยารวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์

ในการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ จะต้องควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดกระบวนการเชิงกายภาพส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมโดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้คือ

1. อัตราการไหลของสารป้อน

อัตราการไหลของสารป้อน (Feed) จะมีผลต่อขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หากอัตราการไหลของสารป้อนมีค่าน้อยเกินไปจะทำให้เกิดความต้านทานในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมาก ซึ่งจะส่งผลให้มีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นภายในเฟสของไหลกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

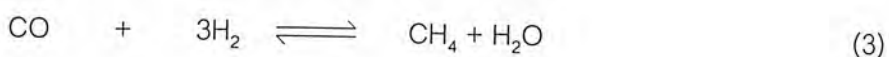
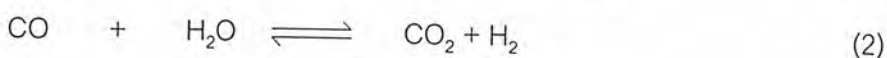
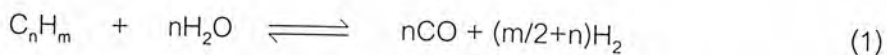
ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นจากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านรูพรุนในตัวเร่งปฏิกิริยา หากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยากับความเข้มข้นในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความเข้มข้นของสารตั้งต้นในตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าน้อยกว่าที่ผิวหน้า ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาแตกต่างจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Bulk concentration)

ดังนั้น การเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น อาจเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของสารป้อน และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในการศึกษาจึงต้องระมัดระวังในการเลือกสภาวะในการทดลอง

2.1.3 ปฏิกิริยาริฟอร์มมิงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา

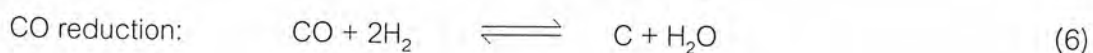
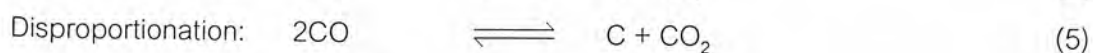
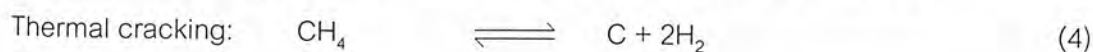
ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาริฟอร์มมิงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำสามารถเขียนเป็นรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (1) และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่อยู่ในระบบก็จะเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ขึ้นดังสมการที่ (2) ได้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยาการเติมแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogenation) ดังสมการที่ (3) ได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปปฏิกิริยารีดอกซ์ที่อุณหภูมิสูงมากจึงอาจทำให้เกิดการแตกพันธะของสารต่าง ๆ ดังสมการที่ (4) – (6) ได้ง่ายและเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการสะสมของคาร์บอนได้



จะเห็นได้ว่าแม้ว่าในปฏิกิริยารีดอกซ์ที่อุณหภูมิสูงมากจะเกิดปฏิกิริยาที่เข้ามาเกี่ยวข้องหลายปฏิกิริยาและเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันดังนั้นในการออกแบบเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการรีดอกซ์ด้วยไฮโดรเจนจึงจำเป็นต้องพิจารณาการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสำคัญ

จากข้อมูลข้างต้นทำให้พิจารณาได้ว่าในขณะที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่อุณหภูมิสูงมากจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นพร้อมกันในลักษณะที่คล้ายกันด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ที่อุณหภูมิสูงมากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับซึ่งประกอบด้วย โลหะว่องไว ตัวรองรับ และตัวส่งเสริม

โลหะที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไฮโดรเจนมีทั้งโคบอลต์ (Co) พลาตินัม (Pt) พัลลาเดียม (Pd) อิริเดียม (Ir) รูทีเนียม (Ru) โรเดียม (Rh) และนิกเกิล (Ni) แต่โดยทั่วไปนิยมใช้โลหะนิกเกิลเนื่องจากนิกเกิลมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงพอสมควร มีความคงทน และมีราคาถูกจึงคุ้มค่ากว่าเมื่อเทียบกับการใช้งานโลหะชนิดอื่นที่มีความว่องไวสูง แต่มีราคาแพงกว่ามาก

ตัวรองรับมักถูกนำมาใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไฮโดรเจนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับโลหะว่องไวซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานโลหะว่องไวได้อย่างเต็มที่ ตัวรองรับที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับปฏิกิริยานี้ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) แคลเซียมอะลูมิเนต (CaAl_2O_4) แมกนีเซียม (MgO) [2] โดยที่ตัวรองรับแต่ละตัวรองรับแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติและลักษณะเด่นแตกต่างกันไปดังนี้ คือ

- ซิลิกาเป็นตัวรองรับที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิพอสมควร แต่มีข้อเสียคืออาจรวมตัวกับไอน้ำภายในระบบและเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลงได้

- อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่มีความคงทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส

- แคลเซียมอะลูมิเนตเป็นตัวรองรับที่มีฤทธิ์เป็นกรดน้อยกว่าอะลูมินา และราคาไม่แพง

- แมกนีเซียเป็นตัวรองรับที่อาจเกิดปฏิกิริยากับน้ำภายใต้สภาวะบางสภาวะซึ่งจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลง

ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการสะสมของคาร์บอน อาจป้องกันการสะสมตัวของคาร์บอนโดยการเติมสารจำพวกโลหะอัลคาไลลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาและลดการเกิดคาร์บอน สารที่เติมลงไปนี้ไม่มีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรงแต่จะช่วยเหลือเพิ่มประสิทธิภาพ ให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเรียกว่า ตัวส่งเสริม (Promoter) โดยสารที่นิยมใช้เป็นตัวส่งเสริม คือ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำมักถูกเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง ทั้งนี้เพราะจะทำให้การกระจายตัวของโลหะของไวบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับเกิดได้ดีและทนทานกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีตกตะกอน อย่างไรก็ตามในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องกำหนด สภาวะที่ใช้ในการเตรียม ชนิดของสารเริ่มต้น (Metal precursor) ชนิดของตัวรองรับ ในการเตรียมอย่างระมัดระวัง เพราะปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ผลของตัวรองรับที่มีต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแบบมีตัวรองรับที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ

Athanasios และ Xenophon [3] ศึกษาผลของตัวรองรับที่มีต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแบบมีตัวรองรับที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ ในการศึกษาได้เลือกใช้ $\gamma-Al_2O_3$, La_2O_3 และ $La_2O_3/\gamma-Al_2O_3$ เป็นตัวรองรับ ในการทดลองเพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเอทานอลกับตัวรองรับแต่ละชนิด พบว่าเอทานอลจะเกิดปฏิสัมพันธ์อย่างรุนแรงกับตัวรองรับอะลูมินาซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการดึงน้ำออก (Dehydration) แม้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่เอทานอลจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับตัวรองรับแลนทาเนียมออกไซด์ไม่รุนแรงนัก ซึ่งทำให้เกิดทั้งปฏิกิริยาการดึงน้ำออกและปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก และนอกจากปฏิกิริยาการดึงน้ำออก และปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออกแล้วยังพบว่าบนตัวรองรับแต่ละชนิดจะเกิดปฏิกิริยาการแตก

พันธะ (Cracking) ขึ้นที่อุณหภูมิสูงปานกลางด้วย เมื่อทำการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีทั้งตัวรองรับและโลหะนิกเกิลอยู่ พบว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจะลดลงตามอุณหภูมิ การกระจายผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจะขึ้นกับการมีส่วนร่วมของหลายปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิ่ง ปฏิกิริยา Water gas shift ปฏิกิริยาการเปลี่ยนไปเป็นมีเทน (Methanation) ปฏิกิริยาการดึงน้ำออกและปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก ภายใต้สภาวะที่ทำให้ปฏิกิริยาตัวรองรับจะมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอนขึ้น โดยการเติมแลนทาเนียมออกไซด์ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา การเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สูงจะทำให้การสะสมของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.2.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ

Kaddouri และMazzocchia [4] ศึกษาผลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา Co/SiO_2 และ $\text{Co/Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบผง (IMP), Sol-Gel (SG) และวิธีเคลือบผงร่วมกับ Sol-Gel (ISG) โดยตรวจวัดการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 480 องศาเซลเซียส พบว่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับทั้งคุณสมบัติของตัวรองรับที่เลือกใช้และวิธีที่ใช้ในการเตรียม ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Co/Al}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบผงให้ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา Co/SiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบผงร่วมกับ Sol-gel ให้ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 ผลของปริมาณน้ำและอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในการสลายตัวของเมทานอล

Yongtaek และHarvey [5] ศึกษาการสลายตัวของเมทานอล ทั้งปฏิกิริยาแบบมีน้ำและแบบขาดน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือคอปเปอร์บนตัวรองรับอะลูมินาและมีซิงค์ออกไซด์เป็นตัวส่งเสริม เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 110 ถึง 360 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทานอล (Methanol) แบบขาดน้ำเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงมากที่สุดเป็นเมทิลฟอร์มเมต (Methylformate) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและมากที่สุดที่ 250 องศาเซลเซียส ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether, DME) จะเกิดมากที่สุดที่ 275 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย เมื่อทำปฏิกิริยาสลายเมทานอลแบบเติมน้ำพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปทางเคมีของเมทานอลเพิ่มมากขึ้น เมื่อมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่พบมีเทน เมื่อปริมาณน้ำในสารตั้งต้นมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่พบไดเมทิลอีเทอร์ และเมื่อปริมาณน้ำในสารตั้งต้นมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบเมทิลฟอร์มเมต จากการทดลองสามารถสรุปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายตัวของเมทานอลได้ดังรูปที่ 2.2 ที่อุณหภูมิต่ำจะไม่พบไดเมทิลอีเทอร์มีผลทำให้เพิ่มปริมาณเมทิลฟอร์มเมต จากนั้นเมทิลฟอร์มเมตจะสลายตัวเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน เมื่ออุณหภูมิสูงจะพบไดเมทิลอีเทอร์ และไฮโดรเจนที่ได้จากการสลายตัวของเมทานอล (Methanol) และลดปริมาณการเกิดเมทิลฟอร์มเมต

จากการพิจารณาข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบว่าอุณหภูมิก็มีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำจึงจำเป็นต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิตัวอย่างเช่นกัน



รูปที่ 2.2 กลไกการสลายตัวของเมทานอล

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การทำปฏิกิริยารีดอกซ์ของนิกเกิลด้วยไฮดรอกไซด์

3.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง (Impregnation)

สารเคมี

1. นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดสำหรับใช้ในห้องทดลองของบริษัท UNILAB
2. ซิลิกา (SiO_2) SS 61137 ขนาด 1/8 นิ้ว แบบ Pellets ของบริษัท SAINT- GOBAIN NORPRO
3. น้ำ (H_2O) เกรด HPLC ของบริษัท LAB-SCAN
4. ไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center
5. ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

อุปกรณ์

1. ครกบดสารเคมี
2. ตะแกรงคัดขนาด (Sieve)
3. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
4. Magnetic stirrer
5. บิวเรต

ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง

1. บดซิลิกา (SiO_2) โดยใช้ครกบดสารเคมี
2. ใช้ตะแกรง คัดขนาดซิลิกาที่บดแล้ว ให้ได้ขนาด 60-80 เมช
3. อบซิลิกา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
4. นำซิลิกาปริมาณ 1.8094 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์
5. เติมน้ำให้ท่วมซิลิกา จนสามารถกวนได้ด้วย Magnetic stirrer
6. หยดสารละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 0.0685 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมทั้งกวน และให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ของแข็งที่ได้นำไปทำให้แห้งในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้งเป็นผง
8. หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง และนำไปแคลไซน์ (Calcine) ต่อที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีอากาศไหลผ่านตลอด เป็นเวลาอีก 6 ชั่วโมง
9. อัดผงที่ได้ให้เป็นเม็ด ก่อนที่จะบด และคัดขนาดให้ได้ 60-80 เมช อีกครั้ง
10. นำไปรีดิวซ์ (Reduce) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยใช้ ไนโตรเจนผสมกับไฮโดรเจน เพื่อให้ได้ไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.1.2 การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมี

1. ไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center
2. ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (รูปที่ 3.1) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3

ส่วนคือ

1. ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส (Flow Controller)
การควบคุมอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ จะใช้มีเตอร์ริงวาล์ว (Metering valve)
2. เครื่องปฏิกรณ์เคมี (Reactor)
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 เซนติเมตร ทำด้วยแก้วควอทซ์ (รูปที่ 3.2)
3. เตาเผาแบบไฟฟ้า (Heater)
เตาเผาแบบไฟฟ้าที่ใช้จะต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ได้ในช่วง 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส และมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

เริ่มจากเปิดไนโตรเจนไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เป็น 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 550 องศาเซลเซียส แล้วเริ่มขั้นตอนการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา โดย

1. เปิดไนโตรเจนผสมกับไฮโดรเจน เพื่อให้ได้ไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง
2. ปิดไนโตรเจนเพื่อให้ได้ไฮโดรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นาน 30 นาที หลังจากปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา จึงลดอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เคมีเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ (300, 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส)

สภาวะที่ใช้การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้	550	องศาเซลเซียส
อัตราการไหล		
ไนโตรเจน	1.5×10^{-6}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
ไฮโดรเจน	1.67×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

3.1.3 การทำปฏิกิริยาอีพอกซิด้วยไอน้ำ

สารเคมี

1. เอทานอล (C_2H_5OH) บริสุทธิ์ 95% ของบริษัท LAB-SCAN
2. น้ำ (H_2O) เกรด HPLC ของบริษัท LAB-SCAN

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (รูปที่ 3.3) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ชุดควบคุมการไหล (Flow Controller)

การควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้นจะใช้ปั๊ม (Tubing pump: รุ่น Dual-channel pump #77120-30 ของบริษัท Cole-Parmer) ที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ในช่วงระหว่าง 0.036-0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้วาล์วสามทาง (3-way valve) ในการกำหนดทิศทางการไหล ส่วนการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ จะใช้มีเตอร์วาล์ว

2. เครื่องปฏิกรณ์เคมี (Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร ทำด้วยแก้วควอตซ์ (รูปที่ 3.2)

3. เตาเผาแบบไฟฟ้า (Heater)

เตาเผาแบบไฟฟ้าที่ใช้จะต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ได้ในช่วง 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส และมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ

การทดลอง

1. ผสมสารตั้งต้น อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอล 9.7:1 และ 29.2:1 โดยโมล (อัตราส่วน 3:1 และ 9:1 โดยปริมาตร ตามลำดับ)
2. วัดอัตราการไหลของสารป้อนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์
3. ปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ลดอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง
5. ป้อนสารตั้งต้นผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยา
6. หลังจากสารตั้งต้นผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 10 นาที จึงเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเข้าชุดวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ และทำเช่นนี้ทุก 60 นาที จนกว่าจะเข้าสู่สภาวะคงตัว
7. หยุดป้อนสารตั้งต้น ลดอุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยาลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยเปิดไนโตรเจนไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph)

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. ไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

อุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟที่ใช้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ (รูปที่ 3.4) คือ

1. ตัวตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Analog ที่วัดได้จาก TCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวอย่างที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วง 30 ถึง 80 องศาเซลเซียส
4. คอลัมน์ที่ใช้แยกสาร 2 คอลัมน์ ได้แก่
 - 4.1 ท่อสแตนเลสขนาด 1/8 นิ้ว ภายในบรรจุ Porapak Q เพื่อใช้แยก คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เอทิลีน อีเทน น้ำ อะเซทิลดีไฮด์ และ เอทานอล
 - 4.2 ท่อสแตนเลสขนาด 1/8 นิ้ว ภายในบรรจุ Molecular Sieve 5A เพื่อใช้แยก ไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์

การทดลอง

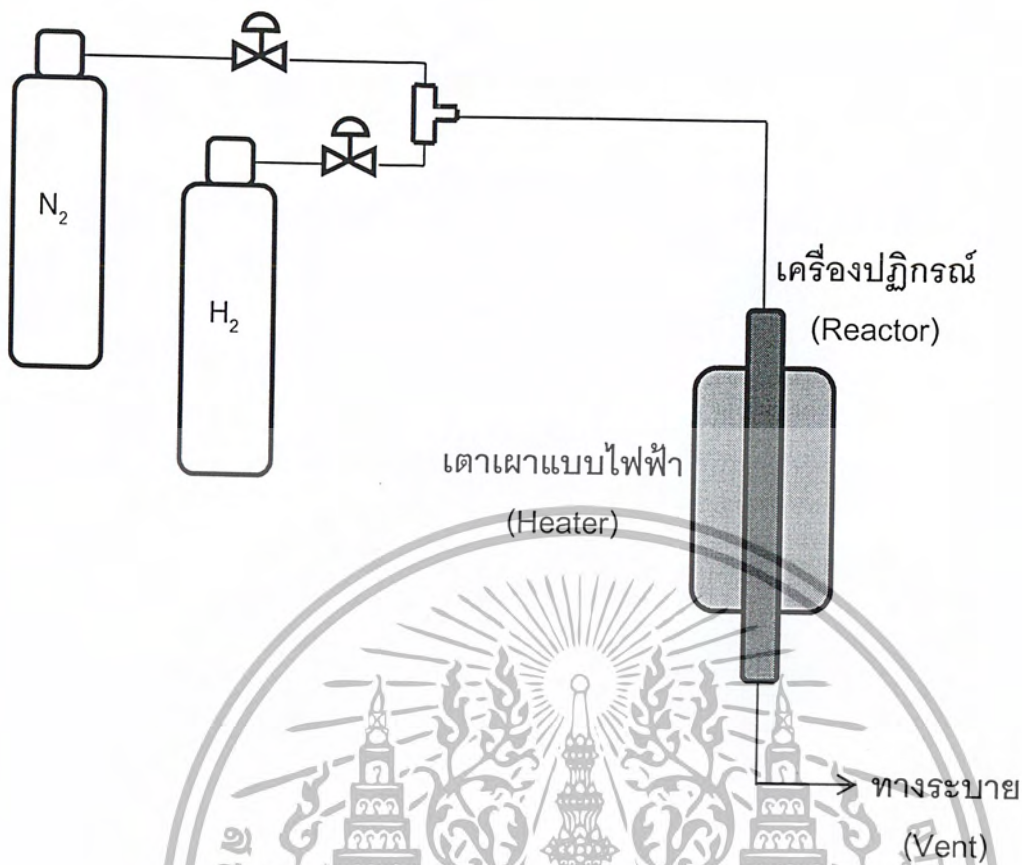
การหา retention time (Retention time) ของแก๊สต่างๆ

1. เก็บตัวอย่าง (Sampling) แก๊สแต่ละชนิด (น้ำ อะเซทิลดีไฮด์ เอทานอล อะซิโตน และไฮโดรเจน)
2. วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ
3. หาเวลาการเกิดพีคของสารแต่ละชนิด

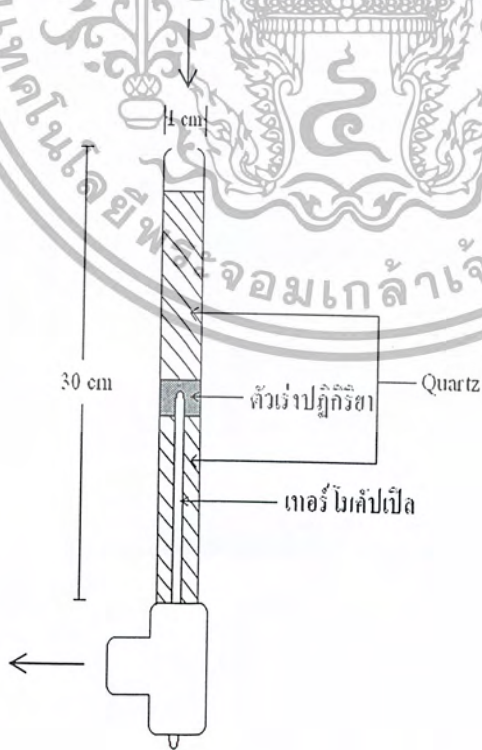
การทำกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนกับพื้นที่ใต้กราฟ



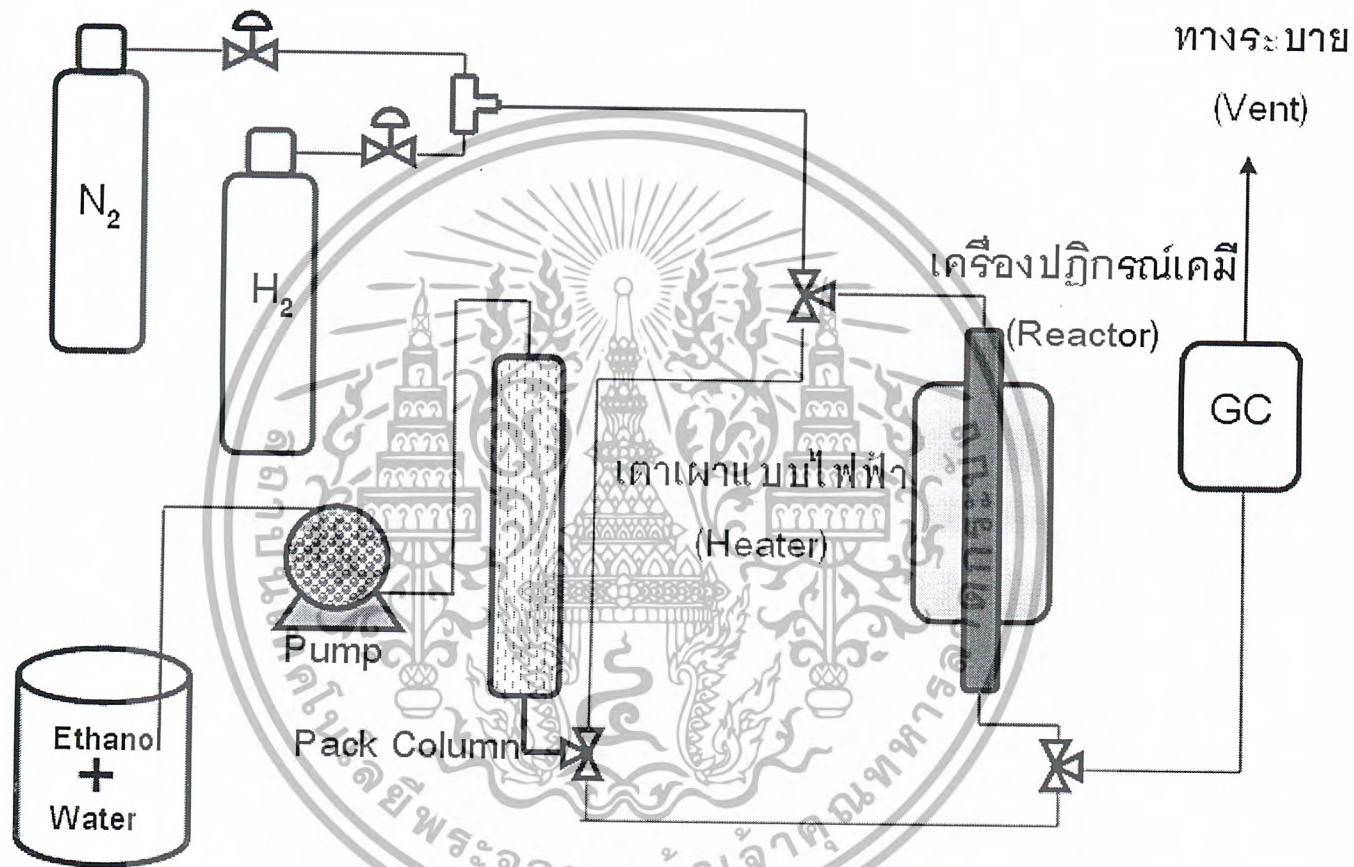


รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา



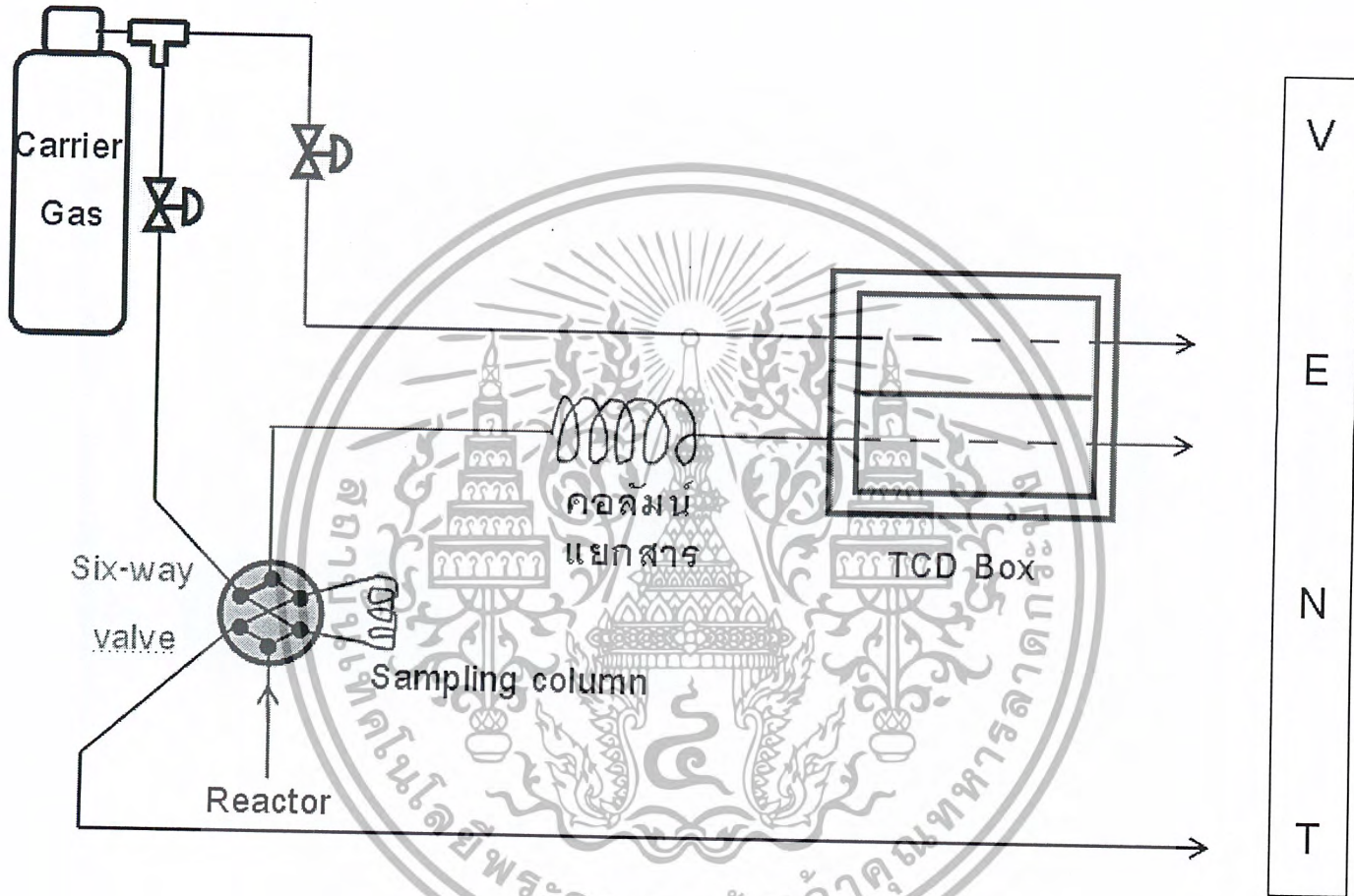
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

61959

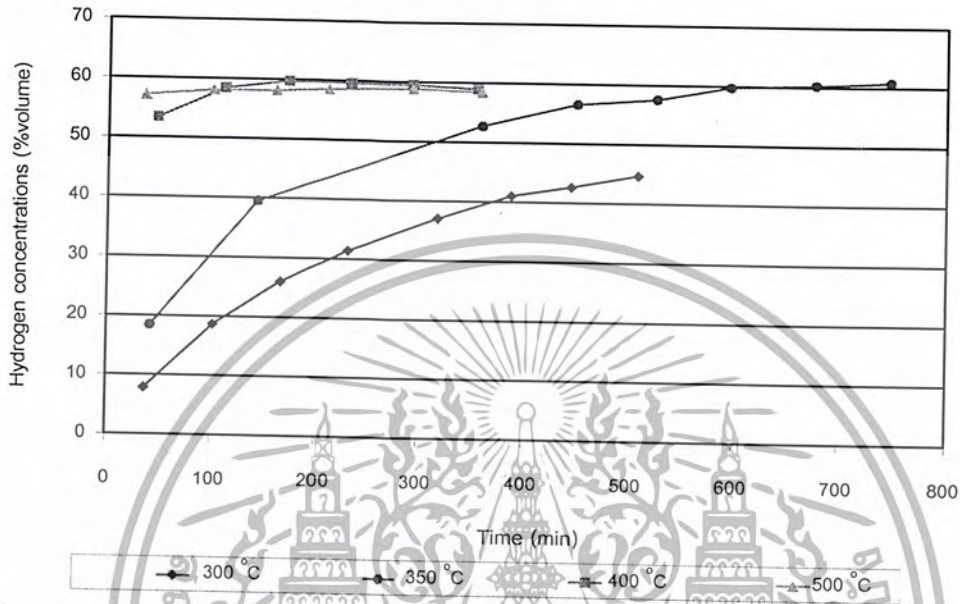


รูปที่ 3.4 แผนภาพเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

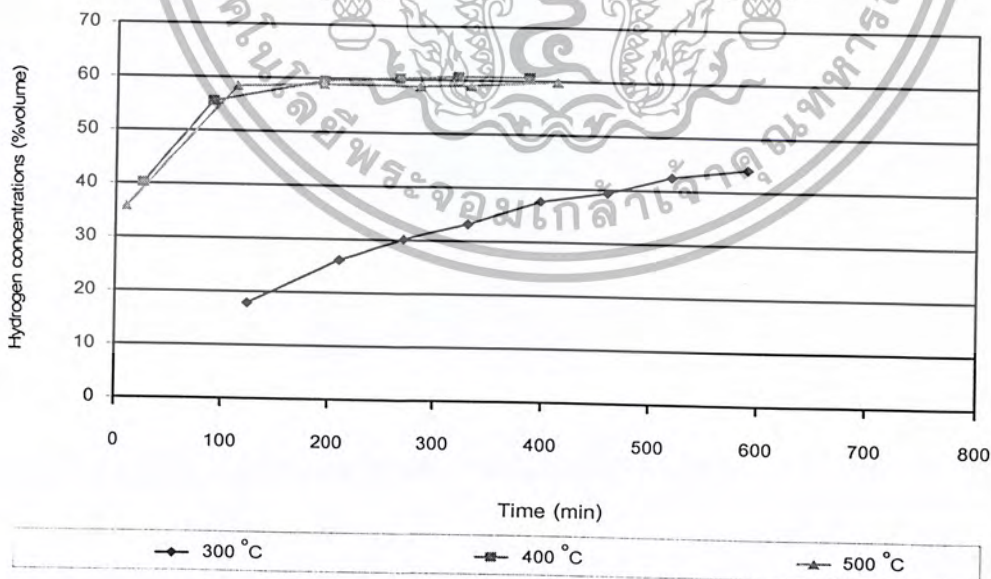
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 4.1(ก) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจน (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส) ที่เวลาต่าง ๆ กัน อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 โดยโมล (3:1 โดยปริมาตร)



รูปที่ 4.1(ข) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮโดรเจน (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หนึ่ง) ที่เวลาต่าง ๆ กัน

อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 29.2:1 โดยโมล (9:1 โดยปริมาตร)

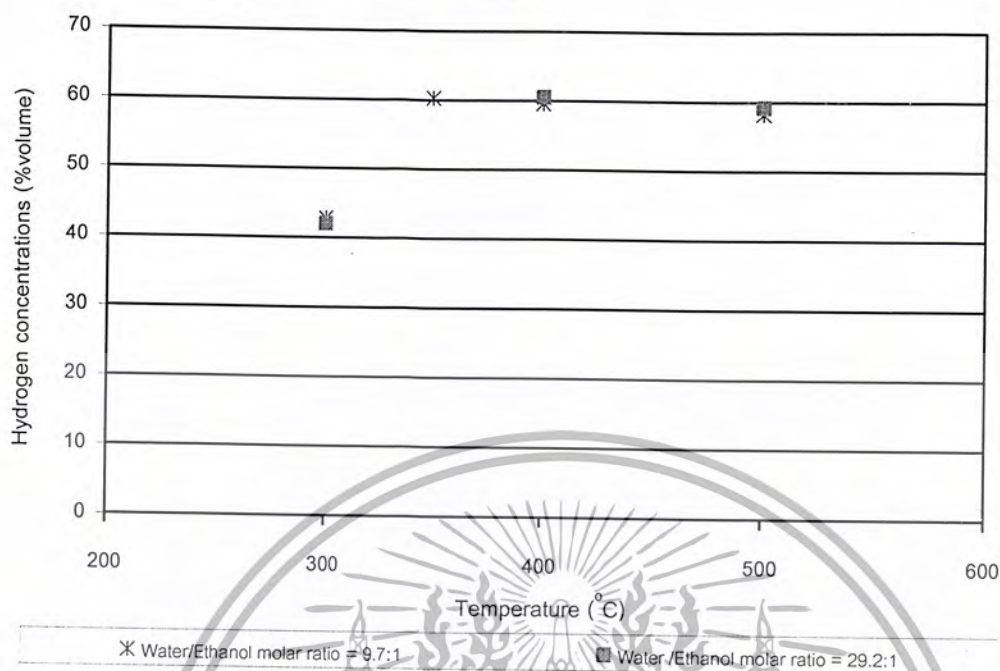
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1(ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส กว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ใช้เวลานานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว

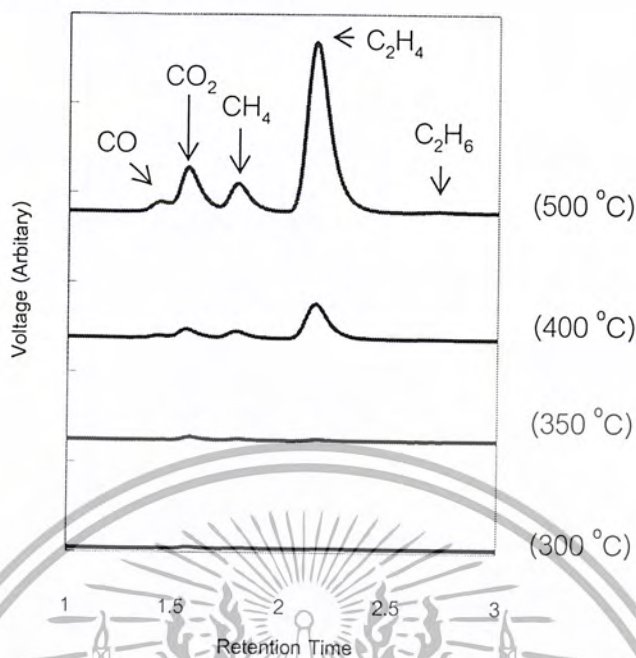


รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจน(แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส) ที่สภาวะคงตัว

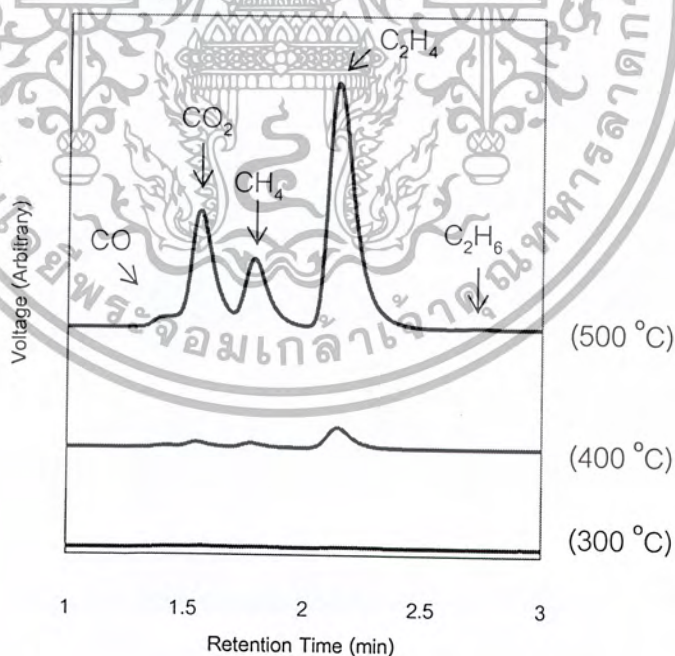
จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 โดยโมล (3:1 โดยปริมาตร) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำกว่าที่ 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 29.2:1 โดยโมล (9:1 โดยปริมาตร) มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำกว่าที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีความใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3 ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.3(ก) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียง* อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 9.7:1 โดยโมล (3:1 โดยปริมาตร)



รูปที่ 4.3(ข) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้างเคียง* อัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 29.2:1 โดยโมล (9:1 โดยปริมาตร)

จากรูปที่ 4.3(ก) และ (ข) เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสไม่พบคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค่ารีเทนชันโทม 1.4 นาที) และอีเทน (ค่ารีเทนชันโทม 2.7 นาที) แต่พบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การจากศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา พบว่าที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียสจะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส

ปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวจะขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิมากกว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อเอทานอล อุณหภูมิที่ให้ปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุดคือ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไฮโดรเจนคือ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

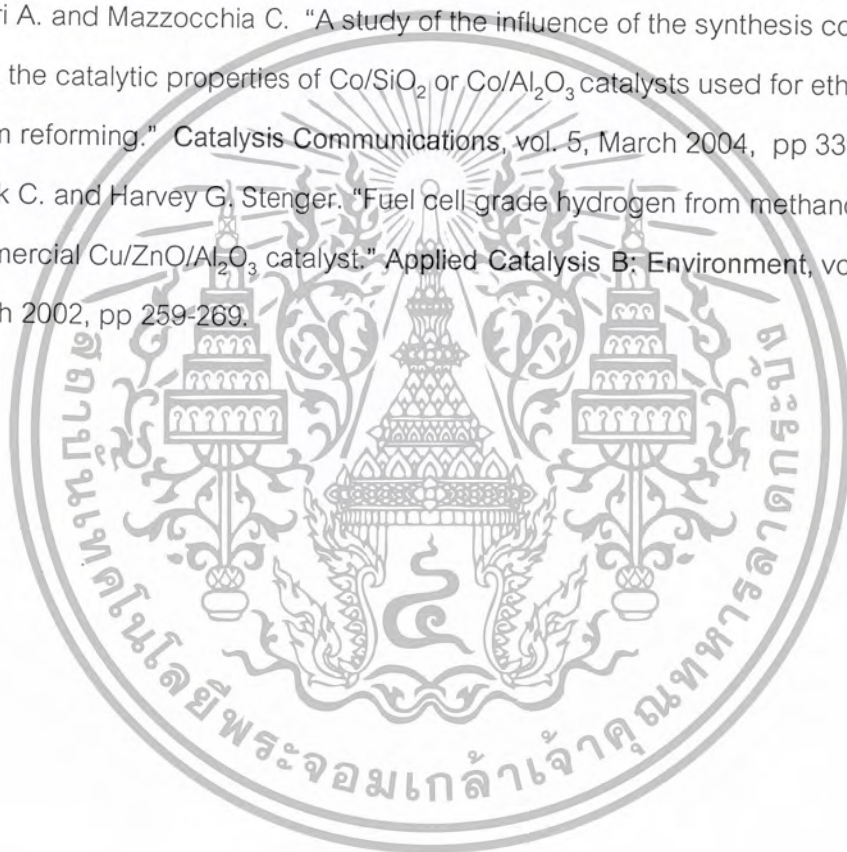
การเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงจะเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าบางข้อมูลได้มีฟีกที่ติดกันทำให้ไม่สามารถแยกออกมาได้ จึงควรเพิ่มความยาวของคอลัมน์แยกสารเพื่อจะได้ฟีกที่ห่างกันมากขึ้น
- หาค่ารีเทนชันไทม์แก๊สมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เพื่อใช้ระบุชนิดของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้
- อุปกรณ์ที่ใช้แยกของเหลวที่อุณหภูมิห้องมีขนาดเล็กเกินไปทำให้ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ระหว่างการทดลอง ส่งผลให้ต้องเสียเวลาตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเต็มอุปกรณ์นั้น
- หาสภาวะฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อที่จะไม่ต้องเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบาย และแผนพลังงาน. 2547. "สถานการณ์พลังงานของไทยในช่วง 9 เดือนของปี 2547." *วารสารนโยบายพลังงาน*. (66). : 39-42.
- [2] Martyn V.T. 1996. *Catalyst Handbook*. United Kingdom : Manson Publishing.
- [3] Athanasios N. Fatsikostas and Xenophon E. Verykios. "Reaction network of steam reforming of ethanol over Ni-based catalysts." *Journal of Catalysis*, vol. 225, July 2004, pp 439-452.
- [4] Kaddouri A. and Mazzocchia C. "A study of the influence of the synthesis conditions upon the catalytic properties of Co/SiO₂ or Co/Al₂O₃ catalysts used for ethanol steam reforming." *Catalysis Communications*, vol. 5, March 2004, pp 339-345.
- [5] Yongtaek C. and Harvey G. Stenger. "Fuel cell grade hydrogen from methanol on a commercial Cu/ZnO/Al₂O₃ catalyst." *Applied Catalysis B: Environment*, vol. 38, March 2002, pp 259-269.



ภาคผนวก ก.

การออกแบบและติดตั้งแก๊สโครมาโตกราฟ

ส่วนของคอลัมน์ Molecular Sieve 5A

1. บรรจุ Molecular Sieve 5A ลงในท่อสแตนเลสขนาด 1/8 นิ้ว ยาว 3 เมตร
2. ปรับสภาพสารบรรจุที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสโดยผ่านฮีเลียม นาน 12 ชั่วโมง
3. ติดตั้งคอลัมน์สารตัวอย่างเพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง
4. ติดตั้งเตาอบเพื่อให้ความร้อนกับคอลัมน์ และเครื่องตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector
5. การศึกษาและทดลองพบว่าคอลัมน์ Molecular Sieve 5A สามารถแยกผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะ

อุณหภูมิคอลัมน์แยกสาร	65	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด (TCD)	110	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนฝั่งสารตัวอย่าง	2.4×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนฝั่งสารอ้างอิง	4.75×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
ปริมาตรของคอลัมน์สารตัวอย่าง	2×10^{-6}	ลูกบาศก์เมตร

ส่วนของคอลัมน์ Porapak Q

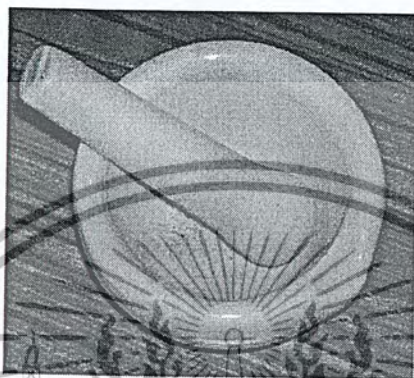
1. บรรจุ Porapak Q ลงในท่อสแตนเลสขนาด 1/8 นิ้ว ยาว 4 เมตร
2. ปรับสภาพสารบรรจุที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสโดยผ่านฮีเลียม นาน 12 ชั่วโมง
3. ติดตั้งคอลัมน์สารตัวอย่างเพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการวิเคราะห์บางชนิดเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องจึงต้องให้ความร้อนกับส่วนนี้
4. ติดตั้งแถบให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนกับคอลัมน์ และเครื่องตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
5. การศึกษาและทดลองพบว่าคอลัมน์ Porapak Q สามารถแยกผลิตภัณฑ์สภาวะ

อุณหภูมิคอลัมน์แยกสาร	130	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์สารตัวอย่าง	120	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด (TCD)	140	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมฝั่งตัวอย่าง	1.63×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมฝั่งสารอ้างอิง	2.69×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
ปริมาตรของคอลัมน์สารตัวอย่าง	3.7×10^{-7}	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

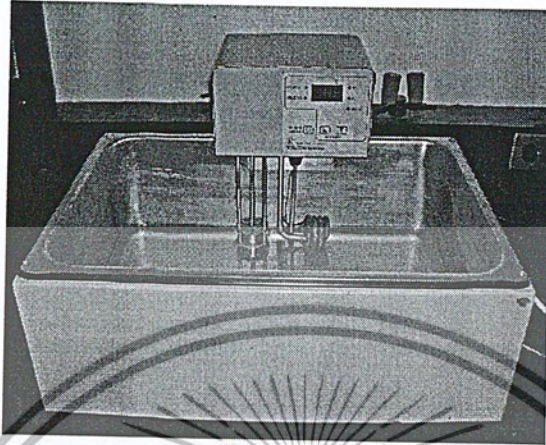


รูปที่ ข-1 ครกบดสารเคมี



รูปที่ ข-2 ตะแกรงคัดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



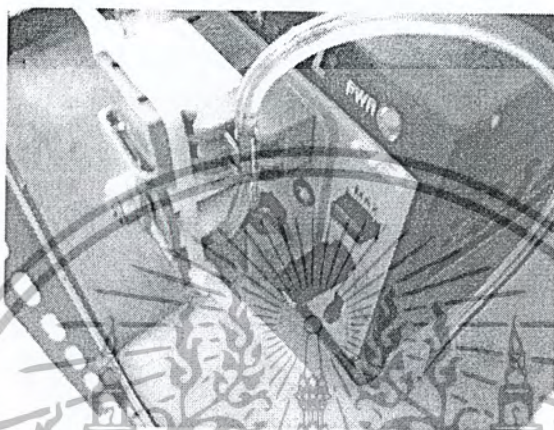
รูปที่ ข-3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำ

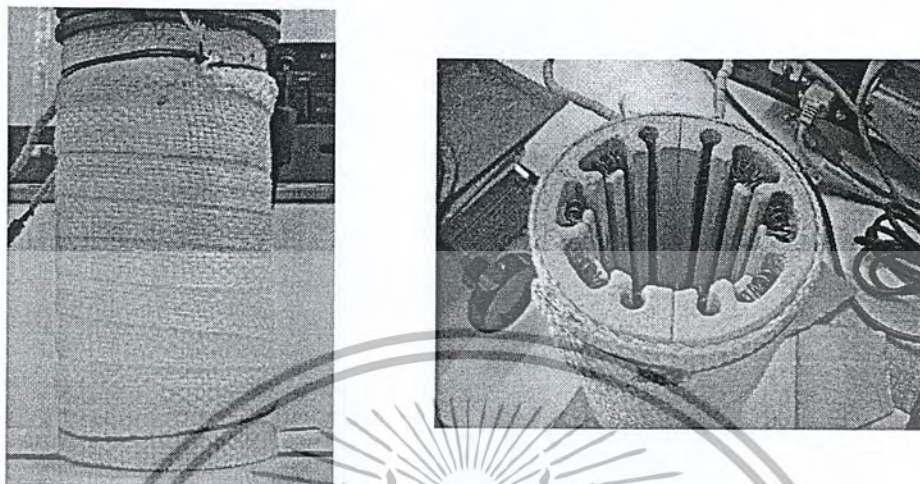


รูปที่ ค-1 ปั๊ม (Tubing pump: รุ่น Dual-channel pump)

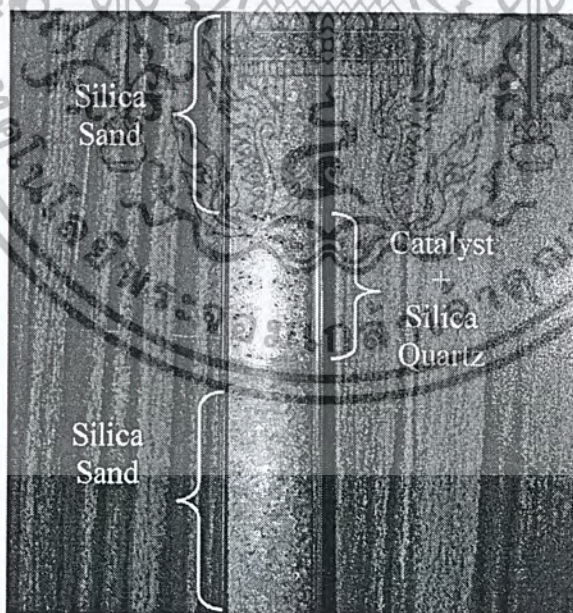


รูปที่ ค-2 Packed column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

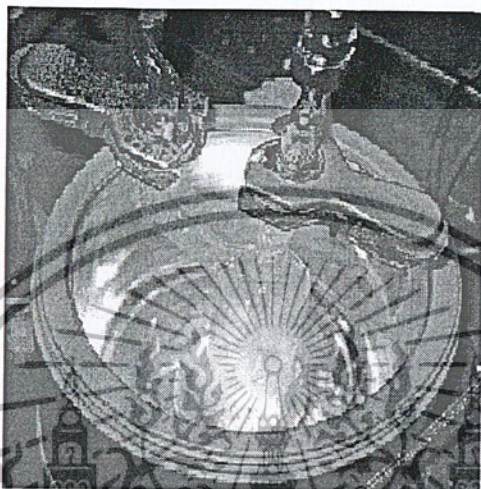


รูปที่ ค-3 เตาเผาแบบไฟฟ้า



รูปที่ ค-4 การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

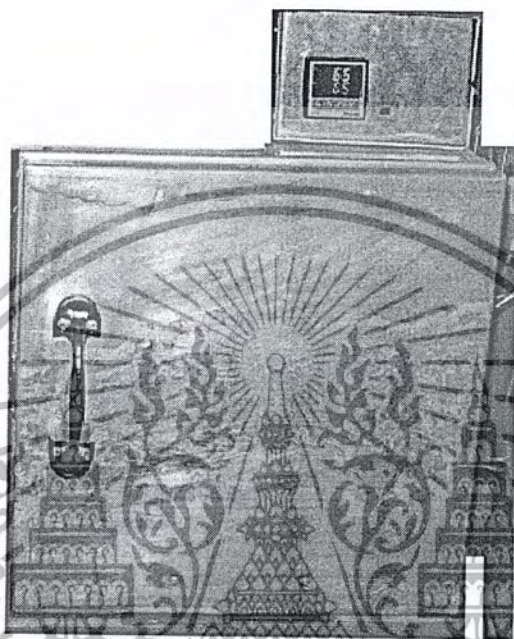


รูปที่ ค-5 อุปกรณ์แยกของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

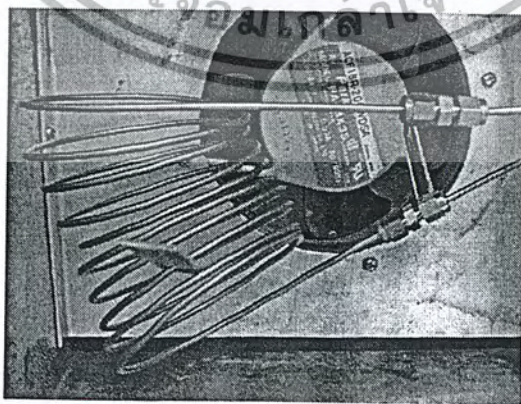
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

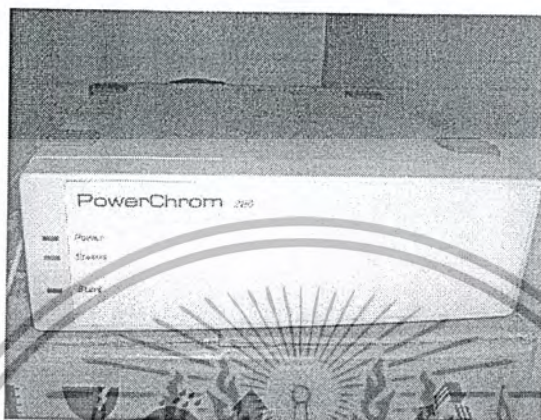


รูปที่ ง-1 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

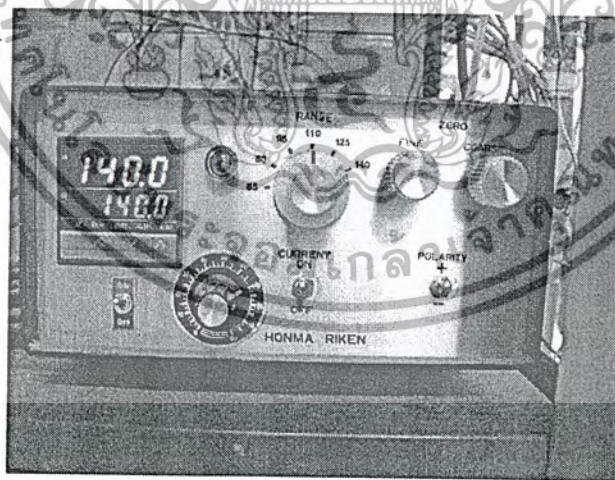


รูปที่ ง-2 คอลัมน์ที่ใช้แยกสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-3 เครื่องแปลงสัญญาณ Analog ที่วัดได้



รูปที่ ง-4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ กระแส และขยายสัญญาณ Analog ที่วัดได้จาก TCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

รีเทนชันไทม์ของสารต่าง ๆ

โครมาโตแกรมของคอลัมน์ Porapak Q

3.623



รูปที่ จ-2 โครมาโตแกรมของอะเซทดีไฮด์

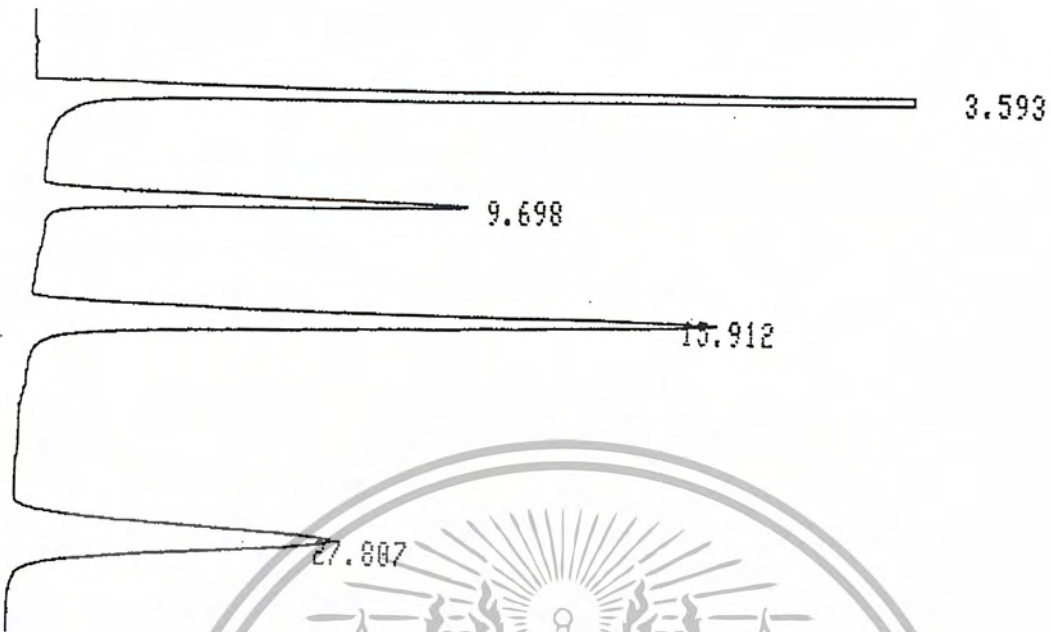
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.295



รูปที่ ๑-4 โครมาโตแกรมของอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑-5 โครมาโตแกรมของสารผสม (น้ำ อะเซทิลดีไฮด์ เอทานอล และอะซิโตน ตามลำดับ)

โครมาโตแกรมของคอลัมน์ Molecular Sieve 5A



รูปที่ ๑-6 โครมาโตแกรมของไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีเทนชันไทม์ของสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

ชนิดคอลัมน์แยกสาร	ชนิดของสารตัวอย่าง	รีเทนชันไทม์ (นาที)
Porapak Q	น้ำ	3.6
	อะเซทิลดีไฮด์	9.8
	เอทานอล	15.3
	อะซิโตน	26.8
Molecular Sieve 5A	ไฮโดรเจน	3.3

รีเทนชันไทม์จากที่มีผู้ศึกษาไว้แล้ว

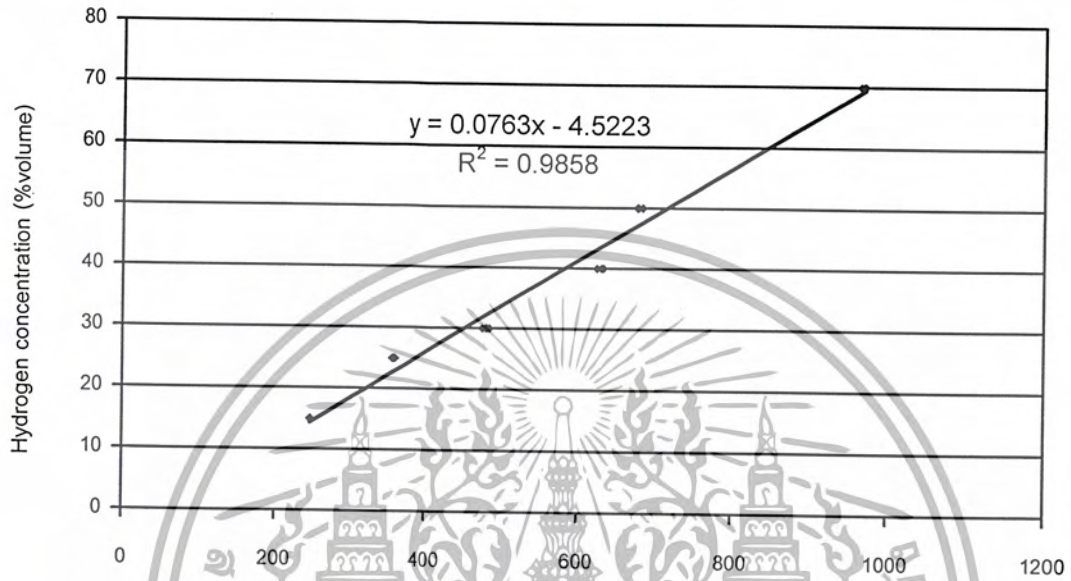
บรรจุ Porapak Q ในทอสแตนแลด เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราการไหลของแก๊สพา 25 มิลลิลิตรต่อนาที

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 จ

กราฟมาตรฐานของไฮโดรเจน



รูปที่ จ-1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไฮโดรเจน