



โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเพิ่มประสบการณ์

การผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอลด้วยกระบวนการเคมีคอลลูปิงรีฟอร์มมิง
(Chemical looping reforming of ethanol for hydrogen production)

โดย

นางสาวฉัตรแก้ว	เพ็งทา	รหัสนิสิต	5932910623
นายเอกบุรุษ	ยวงทอง	รหัสนิสิต	5932984023

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา 2306499 Senior Project
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อนิสิตผู้ทำโครงการ นางสาวฉัตรแก้ว เพ็งทา
นายเอกบุรุษ ยวงทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่มีความสำคัญและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคมได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอล โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้นิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน ซึ่งทำการเตรียมโดยวิธีอิมเพกเนชัน เพื่อศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิสำหรับการแคลไซน์ที่เหมาะสม อัตราส่วนการผสมทางกายภาพ และประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิสำหรับแคลไซน์เหล็กออกไซด์ที่ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เป็น 1:2 จะให้ร้อยละผลได้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.00349 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเท่ากับ 25.58

คำสำคัญ : เคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง, การผลิตไฮโดรเจน, เอทานอล, นิกเกิลออกไซด์, เหล็กออกไซด์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต.....*ฉัตรแก้ว เพ็งทา*.....

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อนิสิต.....*เอกบุรุษ ยวงทอง*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*[ลายมือ]*.....

Title Chemical looping reforming of ethanol for hydrogen production

Student name Ms. Chatkaew Pengtha

Mr. Aekburut Yuangthong

Advisor Assoc. Prof. Dr. Prapan Kuchonthara

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Academic Year 2019

ABSTRACT

Hydrogen is one of the most important alternative energy sources which has been widely applied as a clean energy source for electrical power generation and transportation fuel. This work was focused on finding the suitable catalyst for chemical looping reforming which is a promising process for producing hydrogen from ethanol. Experiments were carried out in a fixed bed reactor at a constant pressure of 1 atm, temperature of 650 °C and using NiO and Fe₂O₃ supported on Al₂O₃ as the oxygen carrier which was prepared by an impregnation method. The effects of various variables such as catalyst type, calcination temperature and proportion of catalyst were investigated. From the experiment, temperature for calcination is 900 °C and proportion is 1:2 were produced H₂ yield to 0.00349 and carbon conversion was up to 25.58%.

Keyword Chemical looping reforming, Hydrogen production, Ethanol, NiO, Fe₂O₃

Department of Chemical Technology

Student's signature.....*Chatkaew Pengtha*..

Major Chemical Engineering

Student's signature....*Aekburut Yuangthong*..

Advisor's signature *Prapan Kuchonthara*.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ และคำปรึกษา ตลอดจนแนะนำในการปรับปรุง ทำให้การวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้มอบคำแนะนำ คำติชม และความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการซ่อมแซมเครื่องมือที่ชำรุด ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายนิพิฐพนธ์ ปะนามะสา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ จัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย รวมทั้งช่วยประกอบเครื่องมือ และซ่อมแซมแก้ไข ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยเสมอมา และขอขอบพระคุณเพื่อนๆและพี่ๆที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและสนับสนุนในด้านต่างๆจนงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบความดีทั้งหลายของงานวิจัยนี้ให้แก่ทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นและผู้ที่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ช
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีดำเนินงาน	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เอทานอล	4
2.2 เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	5
2.3 การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	5
2.4 หลักการของกระบวนการเคมีคอลลูบปีง	
2.4.1 กระบวนการเคมีคอลลูบปีง สำหรับปฏิกิริยาเผาไหม้	6
2.4.2 กระบวนการเคมีคอลลูบปีงสำหรับปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซ	7
2.4.3 กระบวนการเคมีคอลลูบปีงสำหรับปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน	8
2.5 ตัวพาออกซิเจน	9
2.6 นิกเกิลออกไซด์	9
2.7 เหล็กออกไซด์	9
2.8 แกมมาอะลูมินา	10
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3. วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	12
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	12
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	13

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	14
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง	
3.4.1 การเตรียมชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย	15
3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	16
3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง	16
3.5 สภาพที่ใช้ในการทดลอง	
3.5.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์	17
3.5.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์	18
3.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในกระบวนการ เคมีคอลลูบปิงรีฟอร์มมิง	18
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์	19
4.2 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์	21
4.3 ผลประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในกระบวนการ เคมีคอลลูบปิงรีฟอร์มมิง	24
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์	26
5.2 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์	26
5.3 ผลประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในกระบวนการ เคมีคอลลูบปิงรีฟอร์มมิง	27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง	31
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ	36

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอล	4
3.1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	14
3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์	17
3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	18
3.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง	18

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างเอทานอล	4
2.2 กระบวนการเคมีคอลลูบปีง สำหรับปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน	8
3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสำหรับงานวิจัย	13
3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	14
3.3 แผนผังจำลองชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย	15
4.1 ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ของการทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ แคลไซน์แตกต่างกัน	19
4.2 ร้อยละผลได้ของไฮโดรเจนของการทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ แตกต่างกัน	20
4.3 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจน	21
4.4 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์	22
4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลเป็นแก๊ส	23
4.6 ปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ตลอดกระบวนการเคมีคอลลูบปีง	24
4.7 ร้อยละผลได้ไฮโดรเจนตลอดกระบวนการเคมีคอลลูบปีง	24
4.8 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันพลังงานทางเลือกกำลังได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีปริมาณลดลงและการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาอีกมากมาย จึงมีการพัฒนาพลังงานทางเลือกมากขึ้น หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจคือ พลังงานจากไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถลดการปล่อยมลภาวะสู่อากาศ อีกทั้งยังสามารถผลิตได้ง่ายจากหลายแหล่ง เช่น แก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติ เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกำลังได้รับความนิยมเพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น ใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่สนใจจะศึกษาในครั้งนี้คือกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง โดยปกติแล้วปฏิกิริยาเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกแก๊สธรรมชาติร่วมกับไอน้ำจะมีแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการแบบเดิมนั้นมีการปล่อยแก๊สออกซิเจนในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนสำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงที่เป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตไฮโดรเจนจากสารไฮโดรคาร์บอนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีไนโตรเจนปะปนอยู่ในสัดส่วนที่มาก ส่งผลต่อการกำจัดไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้มีการคิดวิธีใหม่ คือ การใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนแทนการใช้แก๊สออกไซด์และการประยุกต์ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูบปีงซึ่งสามารถช่วยส่งเสริมกระบวนการลดคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการผลิตไฮโดรเจนอีกด้วย

เชื้อเพลิงไฮโดรเจน เป็นอีกหนึ่งเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเพราะมีข้อดีหลายประการ คือ สามารถใช้งานควบคู่กับเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้ อีกทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษใดๆ รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นต้นเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน [1]

กระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนรูปแบบใหม่ที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูง และแตกต่างจากกระบวนการสตรีมรีฟอร์มมิง เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ และไม่มีไนโตรเจนเจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่ได้มีความเข้มข้นมาก ส่งผลให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดไนโตรเจน [2] หลักการของเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนเข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน โดยโลหะออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารไฮโดรคาร์บอน ทำให้โลหะออกไซด์สูญเสียออกซิเจนไป และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งโลหะออกไซด์ที่สูญเสียออกซิเจนไปนั้นสามารถวนกลับมาใช้ได้ใหม่ โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศที่ป้อนเข้าไป ทำให้โลหะออกไซด์ที่สูญเสียออกซิเจนไปกลับมาปริมาณออกซิเจนเท่าเดิม และสามารถไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารไฮโดรคาร์บอนได้ใหม่ และวนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ [3]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิงเพื่อผลิตไฮโดรเจนควรมีสสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้หลายครั้ง นอกจากนี้ควรมีความสามารถในการขนส่งออกซิเจนได้ดีซึ่งปกติแล้วนิยมใช้นิกเกิลออกไซด์ ส่วนตัวรองรับควรใช้สารที่มีปริมาณออกซิเจนที่สามารถถ่ายเทได้สูง เพราะจะช่วยให้การทำปฏิกิริยานอกเหนือจากออกซิเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะอ้างอิงจากงานวิจัยที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้ว [4] และนอกจากนี้ยังได้มีการใช้เหล็กออกไซด์เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ดี และการใช้โลหะออกไซด์ผสมจะทำให้ตัวพาออกซิเจนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาดีขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์ต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง เพื่อหาอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อพัฒนาต่อยอดในกระบวนการต่างๆต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิงและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาและเหล็กบนตัวรองรับอะลูมินาไว้กลางเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอุณหภูมิการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาและผลของตัวแปรชนิดต่างๆของภาวะการทดลองที่มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูบปีง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง

มีความรู้ ความเข้าใจในขั้นตอนและผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิงด้วยเอทานอล สามารถสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้ เพื่อนำมาวางแผนดำเนินงานอย่างเป็นระบบ และสามารถหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองพร้อมอภิปรายผลที่เกิดขึ้นได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล นอกจากนี้ยังได้ใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งก่อให้เกิดทักษะการใช้งานและยังเป็นการฝึกความรับผิดชอบอีกด้วย

ข. ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อม

มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณของร้อยละการเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิงด้วยเอทานอล ซึ่งเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ความดัน 1 บรรยากาศ เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์วิธีการผลิตไฮโดรเจนให้ได้ประสิทธิภาพและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

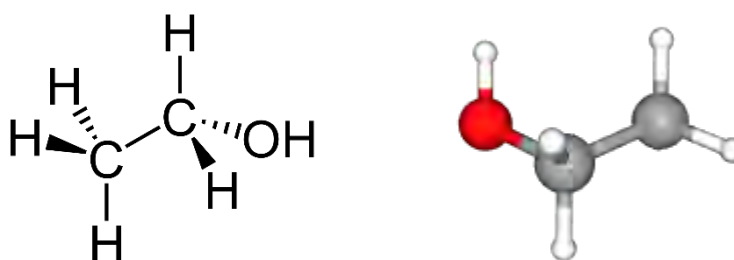
1. ค้นคว้า ศึกษาและทบทวนบทความวิจัย รวมทั้งเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. เตรียมเอทานอลและเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา NiO และ Fe₂O₃
3. จัดสร้างและปรับแต่งชุดการทดลองการผลิตไฮโดรเจน
4. ผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอล
 - a. ผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิง
 - ก. ตัวเร่งปฏิกิริยา : NiO และ Fe₂O₃
 - ข. อัตราการไหลของเอทานอลเข้า : 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ค. ความดันที่ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิง : 1 บรรยากาศ
 - ง. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิง : 650 องศาเซลเซียส
 - b. วิเคราะห์ผลที่ได้จากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนในด้าน
 - ก. ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเอทานอลเป็นแก๊ส
 - ข. ร้อยละผลได้ไฮโดรเจน
 - ค. ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์
5. ศึกษาผลของอุณหภูมิของการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์ต่อปริมาณการผลิตไฮโดรเจน
6. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ต่อการผลิตไฮโดรเจน
7. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิง
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการศึกษา และจัดทำรายงานการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอทานอล

เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือ เอทานอล (Ethanol) เป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_5OH ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นไฮดรอกซิลดิรีเวทีฟของไฮโดรคาร์บอน เกิดจากการแทนที่ ไฮโดรเจนอะตอมด้วย hydroxyl group (OH) ต่ออยู่กับสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน สามารถผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และกระบวนการหมักวัตถุดิบจำพวกแป้งและน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตสารเคมีอื่นๆหรือนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น ใช้เป็นตัวทำละลาย เครื่องดื่ม และเชื้อเพลิง เป็นต้น [5]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของเอทานอล [6]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอล

สมบัติทางกายภาพและเคมี	ข้อมูล
สถานะ	ของเหลว ใส ไม่มีสี ระเหยง่าย และมีกลิ่นเฉพาะตัว
น้ำหนักโมเลกุล	46.07 กรัม/โมล
จุดเยือกแข็ง	-114.1 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	78.32 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ	14 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิวิกฤต	243.1 องศาเซลเซียส
ความดันวิกฤต	6383.48 กิโลพาสคาล
ความหนาแน่น	0.7893 กรัม/มิลลิลิตร
การละลายน้ำ	ละลายได้ดีมาก และสามารถละลายเข้ากันได้ดีกับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆเช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เมทิลแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง :	pH = 5-7

2.2 เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและเป็นองค์ประกอบของน้ำ (H_2O) ที่มีมากที่สุดบนโลก นอกจากนี้ยังเป็นธาตุที่รวมอยู่ในโมเลกุลของสารประกอบอื่นๆ เช่น สารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน (HC) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปิโตรเลียมที่มีความสำคัญสำหรับการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศ คุณสมบัติทั่วไปของไฮโดรเจน คือไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย มีความสะอาดสูง ไม่เป็นพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประโยชน์ของการนำแก๊สไฮโดรเจนมาใช้งานคือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้และให้ความร้อนออกมาหรือใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงโดย ปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในการขับเคลื่อนรถยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและอื่นๆ [7]

เชื้อเพลิงไฮโดรเจน เป็นอีกหนึ่งเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเพราะมีข้อดีหลายประการคือ สามารถใช้งานควบคู่กับเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้ อีกทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษใดๆ รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นต้นเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน

การผลิตไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายเทคโนโลยี เช่น การแปรรูปถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Coal gasification) การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) การพลาสมารีฟอร์มมิง (Plasma reforming) การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis of water) การแตกสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำ (Thermal decomposition of water) และกระบวนการหมัก (Fermentation process)

2.3 การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) [8]

การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas, syngas) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ จากแก๊สธรรมชาติ (มีเทน อีเทน โพรเพน และบิวเทน) เมทานอล เอทานอล โพรพานอล ก๊าซหุงต้ม หรือสารกลุ่มแนฟทา (แก๊สโซลีน ดีเซล และน้ำมันก๊าด) ซึ่ง กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 750 - 800 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 1 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สสังเคราะห์และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water gas shift reaction, WGS) ดังสมการที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งในปัจจุบันวิธีการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นวิธีที่นิยมในการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สธรรมชาติที่ได้จากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบ

สมการแสดงปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิง



2.4 หลักการของกระบวนการเคมีคอลลูบปีง [9]

เคมีคอลลูบปีง เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการทางเคมีที่สามารถใช้ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ กรณีที่มีออกซิเจน (oxygen) และกรณีที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ถูกส่งผ่านในกระบวนการ แต่ส่วนใหญ่การประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะเป็นกรณีที่สารส่งผ่านเป็นออกซิเจน เปรียบเทียบกระบวนการกับสิ่งที่พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันของมนุษย์ กระบวนการนี้จะมีหลักการคล้ายกับ วัฏจักรของน้ำ (water cycle) นั่นคือ น้ำมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะหนึ่งไป ยังอีกสถานะหนึ่งอย่างต่อเนื่องเมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน จากน้ำในสถานะของเหลวจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำหรือน้ำในสถานะก๊าซเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจากไอน้ำจะเกิดการควบแน่นตกกลับมาเป็นน้ำในสถานะของเหลวอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง แล้วเกิดการวนซ้ำเป็นวงจรอย่างไม่มีสิ้นสุด กระบวนการ “เคมีคอลลูบปีง” มีหลักการเช่นเดียวกัน คือ กระบวนการจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก เหมือนกับสองสถานะที่แตกต่างกันของน้ำ และจะมีวัสดุของแข็งในกระบวนการที่มีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบหรือโครงสร้างของตัวเองได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยวัสดุของแข็งนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารที่ถูกส่งผ่าน (carrier) เพื่อคอยป้อนออกซิเจนที่มีปริมาณเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง หรือคอยรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในกระบวนการส่วนที่หนึ่ง จากนั้นวัสดุของแข็งจะถูกส่งเข้าไปในกระบวนการส่วนที่สอง ซึ่งเป็นส่วนของการเติมสารที่ถูกส่งผ่านกลับเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุของแข็ง หรือคายสารที่ถูกส่งผ่านออกจากโครงสร้างของวัสดุของแข็ง ก่อนที่จะวนวัสดุของแข็งกลับเข้าไปในกระบวนการส่วนที่หนึ่งต่อไป โดยการผลิตพลังงานด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลผ่านกระบวนการเคมีคอลลูบปีงนี้ จะสามารถเกิดขึ้นโดยผ่านปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซ หรือแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H₂ production)

2.4.1 กระบวนการเคมีคอลลูบปีง สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ตามความหมายโดยทั่วไป จะเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซตั้งต้น ซึ่งในที่นี้คือ เชื้อเพลิงฟอสซิลกับแก๊สออกซิเจน (O₂) จากอากาศ ได้ผลิตภัณฑ์หลักออกมาเป็นไอน้ำ (H₂O) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งจะมีการคายความร้อน หรือพลังงานออกมาจากกระบวนการ ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีง ในขั้นตอนแรก เชื้อเพลิงฟอสซิลจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนที่ได้มาจากวัสดุของแข็งในกระบวนการ ที่เป็นพวกออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็น

องค์ประกอบ (Me_xO_y) เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว วัสดุของแข็งจะเปลี่ยนรูปกลายเป็นโลหะบริสุทธิ์ (Me) หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณของออกซิเจนลดลง (Me_xO_{y-1}) โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจะยังคงเป็นไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดิม ไอน้ำเกิดขึ้นจะเกิดการควบแน่นตามธรรมชาติ และแยกตัวออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง และพร้อมจะส่งต่อไปเก็บหรือผลิตเป็นสารเคมีตัวอื่นต่อไป ประเด็นนี้ถือเป็น ข้อดีของกระบวนการนี้ที่เหนือกระบวนการอื่นที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน กล่าวคือ เป็นการหลีกเลี่ยงการสัมผัสกันโดยตรงของเชื้อเพลิงกับอากาศที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้รับลดลง และเป็นการเผาไหม้ที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก โดยกลไกภายในกระบวนการเอง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการแยกแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ จากนั้นขั้นตอนต่อมา โลหะบริสุทธิ์หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลงถูกนำเข้าสู่ปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนด้วยอากาศได้ออกไซด์ของโลหะเดิมที่พร้อมจะนำไปป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการในรอบต่อไป ส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นไนโตรเจนและออกซิเจนที่ยังไม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อทำการพิจารณาถึงปฏิกิริยาเคมีรวมของทั้งกระบวนการ พบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ยังเหมือนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรงด้วยอากาศ ความร้อนที่ได้รับจะยังมีปริมาณเท่ากับความร้อนที่ได้จากกระบวนการปกติ แต่จะไม่มี การสูญเสียความร้อนเนื่องจากไนโตรเจนที่ป้อนเข้าไปกับอากาศในกระบวนการ ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงสูงตามไปด้วย

2.4.2 กระบวนการเคมีคอลลูบปีงสำหรับปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซ

ปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงของแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงก๊าซด้วยอากาศ/ก๊าซออกซิเจนร่วมกับไอน้ำเกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเป็นก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนมอนออกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไอน้ำ โดยเชื้อเพลิงของแข็งที่กำลังได้รับความสนใจนำมาแปรสภาพเป็นก๊าซ นอกจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกถ่านหินแล้ว ขยะของแข็ง รวมไปถึงชีวมวลก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงได้ เช่นกัน นอกจากนี้ข้อดีของกระบวนการที่กล่าวไปข้างต้น ยังจะเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ รวมในชั้นบรรยากาศ การเกิดปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซในกระบวนการเคมีคอลลูบปีง จะแบ่งออกได้เป็นสองกรณี

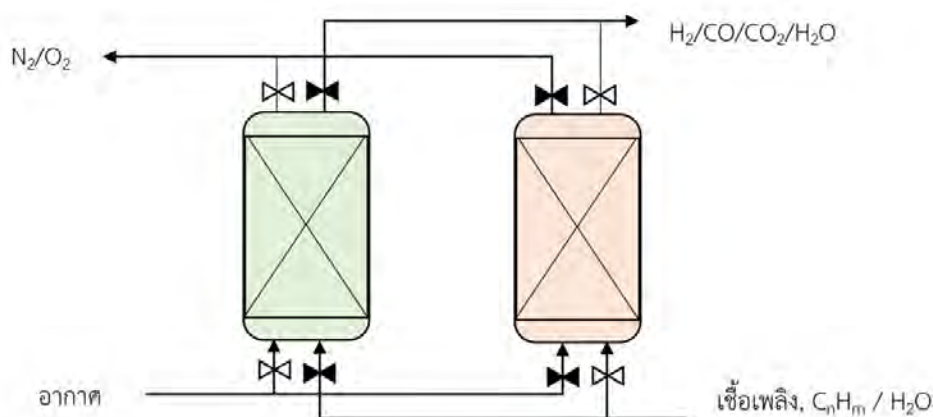
กรณีที่หนึ่ง เชื้อเพลิงของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซในกระบวนการอื่นมาก่อน บางส่วนจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซผสมของคาร์บอนมอนออกไซด์และไฮโดรเจน แล้วจึงนำมาป้อนเข้าในกระบวนการเคมีคอลลูบปีง ซึ่งก็จะมีขั้นตอนเช่นเดียวกับกระบวนการสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้

กรณีที่สอง จะเป็นการป้อนเชื้อเพลิงของแข็งเข้าไปในกระบวนการโดยตรง กรณีนี้เชื้อเพลิงของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นก๊าซร่วมกับก๊าซตั้งต้น คือ ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้มาจากการนำก๊าซผลิตภัณฑ์ของกระบวนการมาป้อนกลับเข้าในกระบวนการใหม่ (recycle) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงต้นของกระบวนการจึงเปลี่ยนไป เชื้อเพลิงของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาการระเหยน้ำ และการแปรสภาพเป็นก๊าซก่อน

แล้วจึงค่อยเกิดปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุของแข็งเกิดเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ของกระบวนการต่อไปเช่นเดียวกับกรณี
หนึ่ง

2.4.3 กระบวนการเคมีคอลลูบปีงสำหรับปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน

นอกจากการนำกระบวนการเคมีคอลลูบปีงไปใช้ในการผลิตเป็นพลังงานโดยตรงแล้ว กระบวนการนี้
ยังสามารถประยุกต์กับการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งถือเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคมขนส่งในอนาคต เช่นนำไปใช้
ในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น เมทานอล
(Methanol) เพื่อสังเคราะห์ต่อไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ หรือ ดีเอ็มอี (Dimethyl Ether) ปัจจุบันกระบวนการ
ผลิตไฮโดรเจนที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป เกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพหรือรีฟอร์มมิง (reforming) ของ
เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกก๊าซธรรมชาติร่วมกับไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (tubular reactor) โดยก๊าซ
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ก๊าซดังกล่าวถูกแยกด้วยกระบวนการที่ใช้เทคนิค
ขั้นสูงและมีราคาแพงอีกทั้งปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบดูดความร้อนที่จะนำความร้อนมา
จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ ที่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นเป็นจำนวนมาก
ดังนั้น จึงได้มีการใช้กระบวนการเคมีคอลลูบปีง ประยุกต์กับปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แผนภาพ
ของกระบวนการนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเดิมจะถูกรวมเข้าไปในกระบวนการเคมีคอล
ลูบปีง บริเวณฝั่งที่ป้อนก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบวนการ สำหรับขั้นตอนของกระบวนการที่เกิดขึ้นจะ
เหมือนกับกระบวนการสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ แต่กระบวนการจะต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจน
เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์หลักที่
ต้องการ กระบวนการนี้จะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการแบบเดิม ยกตัวอย่างเช่น จะเป็น
กระบวนการที่ไม่ต้องการความร้อนจากภายนอกป้อนเข้าไปในกระบวนการ และถ้ามีการควบคุมปริมาณ
ออกซิเจนที่เหมาะสมก็จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการแยกก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 กระบวนการเคมีคอลลูบปีง สำหรับปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน

2.5 ตัวพาออกซิเจน

ตัวพาออกซิเจนเป็นหนึ่งในสิ่งสำคัญในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงอย่างมาก ตัวพาออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปิง ควรมีคุณสมบัติคือ มีความสามารถในการพาออกซิเจนสูง, มีความแข็งแรงเชิงกลสูง, เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาต่ำ ซึ่งปกติแล้วนิยมใช้นิกเกิลออกไซด์ เนื่องจากโลหะนิกเกิลมีตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) ในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงและราคาถูก ซึ่งนิกเกิลออกไซด์ที่บริสุทธิ์จะมีประสิทธิภาพไม่ดีสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันหลายๆครั้ง จึงต้องมีการใช้ตัวรองรับซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเกาะ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากที่สุด เพื่อให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ เพื่อการควบคุมขนาดอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์และเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค [10]

2.6 นิกเกิลออกไซด์

นิกเกิลออกไซด์ มีข้อดีในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ มีความต้านทานต่อการเกิดคาร์บอนที่ผิวและการเสื่อมสภาพจากสารปนเปื้อนบางชนิด และยังมีเสถียรภาพที่ดี แม้จะถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง (High Thermal Stability) มีความคงทนต่อการเสียดสี นิกเกิลออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำพวกออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำจากภายนอก (Intrinsic semiconductor) เช่นเดียวกับคอปเปอร์ออกไซด์ ชนิดพี (p-type) ในกรณีของชนิดพี สารที่เติมลงไปสามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ได้ ดังนั้นในการใช้นิกเกิลออกไซด์เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา จะเป็นการช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์ จะช่วยทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสอิเล็กตรอนและเป็นผลดีอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ลักษณะทางกายภาพของนิกเกิลออกไซด์คือ เป็นของแข็งละลายในน้ำเย็น ไม่มีกลิ่น มีความอันตรายต่อสุขภาพอนามัยหากสูดดมในระยะยาวเป็นอันตรายต่อปอดทำให้เกิดแผลและในบางกรณีอาจเป็นโรคมะเร็ง หากมีการสัมผัสทางผิวหนังและตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง [11]

2.7 เหล็กออกไซด์

เหล็กออกไซด์ เป็นสารอนินทรีย์ สีแดงที่มีสูตรโมเลกุลคือ Fe_2O_3 นอกจากนั้นองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์สามารถเกิดได้เป็นรูปของ FeO หรือ Fe_3O_4 เหล็กออกไซด์มีความอ่อนแอต่อกรด เกิดสนิมได้ง่าย มีลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาที่หลากหลายซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในลักษณะแอลฟาและแกมมา ซึ่งในแต่ละเฟสมีการจัดเรียงโครงสร้างที่ต่างกันไปลักษณะออกตะฮีดรัล ซึ่งมีแกนกลางเป็นอะตอมของเหล็กที่ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 6 อะตอม มีความเป็นพิษต่อสุขภาพต่ำ ไม่ติดไฟ ไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถหาได้ในธรรมชาติและราคาไม่แพง มีความหนาแน่น 5.242 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวที่ 1,552 องศาเซลเซียส น้ำหนักโมเลกุล 159.69 กรัมต่อโมล นอกจากนั้น

ภายในโครงสร้างของเหล็กออกไซด์มีองค์ประกอบของออกซิเจน 3 อะตอม มีน้ำหนักถึง 48 กรัมต่อโมล ซึ่งจะมีค่าถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในกรณีที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้อย่างสมบูรณ์ [12]

2.8 แกมมาอะลูมินา

อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง โครงสร้างที่สำคัญของอะลูมินาที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟสแกมมาอะลูมินา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง และมีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง มีปฏิกิริยาบางอย่างที่ต้องการสภาพที่เป็นกรดของตัวรองรับในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยารีดอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งปฏิกิริยาเริ่มแรกจะเกิดขึ้นบนโลหะ จากนั้นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนตัวมาทำปฏิกิริยาต่อบนพื้นผิวของตัวรองรับที่มีความเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จึงเรียกว่า bi-functional catalyst หมายถึง ตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาด้วย ปัจจุบันการเพิ่มความเป็นกรดของแกมมาอะลูมินา ทำโดยการเติมไอออนเช่น คลอไรด์ หรือฟลูออไรด์เข้าไปในโครงสร้าง แกมมาอะลูมินาเป็นโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูง (ส่วนมากอยู่ในช่วง 250 -300 m^2/g) แต่ถ้าได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบเบต้า และที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1100 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบอีต้า และกลายเป็นรูปแบบแอลฟาในที่สุด ซึ่งในระหว่างนี้โครงสร้างจะเกิดการพังตัว เปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีรูพรุนกลายเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น และมีพื้นที่ผิวดลดลง สำหรับปฏิกิริยาทั่วไปอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยามักจะอยู่ในช่วง 500 – 600 องศาเซลเซียส [13]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bo Jiang และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเคมีคอลลูปิงโดยใช้ไอน้ำรีฟอร์มมิง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งใช้วิธีการตกตะกอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปนิกเกิลอะลูมินา การทดลองใช้น้ำผสมกับกลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นที่อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน เท่ากับ 1.5 และใช้อุณหภูมิการดำเนินการทดลองในช่วง 450 – 600 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดำเนินการทดลองสูงขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของกรีเซอรอลมากขึ้น และมีประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนที่มากขึ้น และมีความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดที่ร้อยละ 90 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

Ping Chiu Chu และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา เพื่อประเมินความเป็นไปได้สำหรับการใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีง โดยการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ทำการเตรียมเหล็กออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการแคลไซน์ที่ 1300 องศาเซลเซียส กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางความร้อนและมีการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค XRD ทำการทดลองโดยการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงผสมและมีเทนโดยใช้อุณหภูมิ 500 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วจึงวิเคราะห์ความแข็งแรงของอนุภาคและสมบัติทางความร้อนของอนุภาคเหล็กออกไซด์ พบว่า อนุภาคเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา มีความแข็งแรงเหมาะสมและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเป็นตัวพาออกซิเจนที่ใช้สำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปีง

Pablo alvarez และคณะ [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เตรียมโดยวิธีอิมเพกชัน ซึ่งเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบผลโดยการทำที่อุณหภูมิการแคลไซน์ที่แตกต่างกัน คือ 650 และ 900 องศาเซลเซียส โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไปใช้ในปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สไนตรัสออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิการดำเนินการที่ 600 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการศึกษาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากเมื่อถูกเตรียมที่อุณหภูมิการแคลไซน์ปานกลาง คือที่ 650 องศาเซลเซียส และความว่องไวขึ้นอยู่กับการไหลของแก๊สปริมาณที่เหมาะสม คือที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะช่วยให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่ร้อยละ 97 ส่วนเหล็กออกไซด์ที่ถูกแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง คือที่ 900 องศาเซลเซียส จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ซึ่งการลดลงนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลของแก๊สด้วย โดยการใช้ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นที่ร้อยละ 50 นั้น เมื่อใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 650 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 89 และเมื่อใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเป็น 77

Paul Cho และคณะ [17] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงสำหรับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบตัวพาออกซิเจนที่เป็น เหล็กออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ โดยใช้อะลูมินาเป็นตัวรองรับ จากการทดลองพบว่าการใช้ นิกเกิลออกไซด์และทองแดงออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ในขณะที่เหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำเช่นกัน แต่เหล็กออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์เกิดการรวมตัวกันและจับกลุ่มเป็นก้อน โดยนิกเกิลออกไซด์มีอัตราการรีดักชันสูงสุดแต่มีความแข็งแรงจำกัด ซึ่งหากเพิ่มความแข็งแรงของอนุภาคได้นิกเกิลออกไซด์มีแนวโน้มที่จะเป็นตัวพาออกซิเจนที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1. สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) สารละลายเอทานอล 99.99% (Ethanol)
- 2) นิเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel (II) nitrate hexahydrate)
- 3) ไอรอนไนเตรตโนนาไฮเดรต (Iron (III) nitrate nonahydrate)
- 4) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)
- 5) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 6) สารดูดความชื้น (Silica gel)
- 7) แก๊สอ้างอิง (Standard gas)
 - ไฮโดรเจน ร้อยละ 1
 - คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 1
 - คาร์บอนมอนอกไซด์ ร้อยละ 1
 - อีเทน ร้อยละ 1
 - เอทิลีน ร้อยละ 1
 - มีเทน ร้อยละ 1
 - ไนโตรเจน ร้อยละ 94

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- | | | |
|--|---|---------|
| 1) เส้นใยควอทซ์ (Quartz wool) | 1 | ขวด |
| 2) ปีกเกอร์ 50 mL | 1 | ใบ |
| 3) ปีกเกอร์ 100 mL | 2 | ใบ |
| 4) กระจกบอทวง 25 mL | 1 | ใบ |
| 5) แท่งคนสาร | 1 | แท่ง |
| 6) ถังเก็บแก๊ส 1000 mL | 6 | ถัง |
| 7) ขวดน้ำกลั่น | 1 | ขวด |
| 8) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar) | 1 | แท่ง |
| 9) เครื่องกวนสารละลายให้ความร้อน (Hot Stirrer) | 1 | เครื่อง |

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้คือ ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสำหรับงานวิจัย แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งสำหรับงานวิจัย

ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1) ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ สำหรับบรรจุเอทานอลและน้ำ
- 2) HPLC Pump จำนวน 2 เครื่อง ทำหน้าที่ดูดจ่ายเอทานอลและน้ำ โดยควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
- 3) วาล์วกันกลับ (Check Valve) สำหรับป้องกันการไหลย้อนกลับของสารป้อน
- 4) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed Reactor) ทำจากท่อสแตนเลสขนาด 1/2 นิ้ว และต่อยาวกับท่อขนาด 1/8 นิ้ว ซึ่งภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตำแหน่งกลางของท่อ
- 5) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปิริงฟอร์มมิง
- 6) ระบบการควบแน่น (Condensing System) เพื่อใช้ในการควบแน่นสารละลายเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
- 7) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) เพื่อวัดความดันภายในระบบ
- 8) อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Regulator) เพื่อควบคุมความดันภายในระบบ

- 9) วาล์วแบบลูกทรงกลม (Ball Valve) ใช้ในการปล่อยความดันของระบบให้เป็นความดันบรรยากาศเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง
- 10) เครื่องแยกแก๊สและของเหลว (Gas-liquid Separator) เพื่อใช้แยกผลิตภัณฑ์แก๊สกับสารละลายเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
- 11) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส (Bubble Flow) เพื่อวัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แก๊ส
- 12) อุปกรณ์วัดความชื้น เพื่อวัดความชื้นในผลิตภัณฑ์แก๊สโดยภายในบรรจุซิลิกาเจล
- 13) ถังเก็บตัวอย่างแก๊ส

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ดังรูปที่ 3.2 ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยสถานะที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 แสดงสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

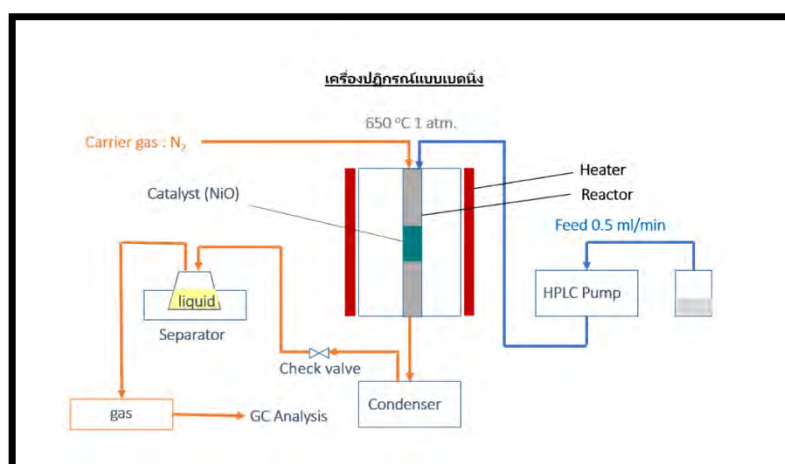
การฉีด (Injection Port)	
อุณหภูมิ	120 องศาเซลเซียส
แก๊สพา (Carrier Gas)	อาร์กอน (Ar)
ข้อมูลคอลัมน์ (Column Information)	
ชนิดของคอลัมน์	Unibeads C packed column

อุณหภูมิเริ่มต้น	50 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสุดท้าย	180 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	30 องศาเซลเซียสต่อนาที
เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์	9.33 นาที
ระบบตรวจวัด (Detector)	
ชนิดระบบตรวจวัด	Thermal Conductivity Detector (TCD)
อุณหภูมิ	180 องศาเซลเซียส
อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate)	40 มิลลิวินาที

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งและเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อวิเคราะห์ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยแสดงแผนผังจำลองชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย ดังรูปที่...



รูปที่ 3.3 แผนผังจำลองชุดเครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัย

- 1) เตรียมปั๊มสำหรับใช้ในการป้อนเอทานอลและน้ำ
- 2) ตัดท่อขนาด 1/16 นิ้ว เพื่อนำไปประกอบกับปั๊ม
- 3) นำท่อขนาด 1/2 นิ้ว ซึ่งมีต่อกับท่อลดขนาดให้เหลือเพียง 1/8 นิ้ว แล้วนำมาต่อที่จุดเชื่อมเพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ผ่านเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อไปยังเครื่องควบแน่น
- 4) เครื่องควบแน่น (Condenser) ในอ่างโฟม ภายในอ่างทำการบรรจุน้ำแข็งไว้ เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องควบแน่น
- 5) ต่อกิ่งที่ออกจากเครื่องควบแน่นเข้ากับตัวควบคุมความดัน แล้วต่อผ่านจุกยางเพื่อนำไปประกอบกับขวดรูปชมพู่สำหรับการใช้ในการแยกของเหลวออกจากแก๊ส

- 6) นำท่อขนาด 1/8 นิ้ว ต่อเข้ากับจุกยางเพื่อใช้เป็นท่อที่แก๊สที่ออกจากขวดรูปชมพู่ผ่านสารดูดความชื้น ก่อนจะทำการเก็บตัวอย่างด้วยถุงเก็บแก๊ส

3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- นิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
 1. นำนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 4.95 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากัน
 2. ชั่งตัวรองรับอะลูมินา 10 กรัม แล้วนำไปผสมกับกับสารละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต
 3. นำเม็ดอะลูมินาในสารละลายนิกเกิลไนเตรตไปปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 4. นำสารที่เตรียมไว้ไปอบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
 5. นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงได้นิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- เหล็กบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
 1. นำไอรอนไนเตรตโนนาไฮเดรต 7.23 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากัน
 2. ชั่งตัวรองรับอะลูมินา 10 กรัม แล้วนำไปผสมกับกับสารละลายไอรอนไนเตรตโนนาไฮเดรต
 3. นำเม็ดอะลูมินาในสารละลายไอรอนไนเตรตโนนาไฮเดรต ไปปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 4. นำสารที่เตรียมไว้ไปอบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
 5. นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงได้เหล็กบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
 6. ทำตามข้อ 1 ถึง 5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการแคลไซน์เป็น 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วน (โดยอัตราส่วนที่ใช้จะเป็นอัตราส่วนทางกายภาพ กล่าวคือ อัตราส่วน 1:1 จะเป็นการผสมกันของนิกเกิลและเหล็กอย่างละ 2.5 กรัม) ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งโดยให้อยู่บริเวณตรงกลางของท่อ จากนั้นจึงทำการประกอบชุดการทดลอง
2. ทำการวัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (แก๊สตัวพา)

3. เมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนคงที่จึงทำการเปิดเครื่องให้ความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดในการทำปฏิกิริยา โดยในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส
4. หลังจากนั้นเมื่อได้อุณหภูมิที่กำหนดให้ทำการป้อนเอทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตามอัตราการไหลที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้ใช้อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
5. ทำการสุ่มตัวอย่างของแก๊สและวัดอัตราการไหลของแก๊สทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 90 นาที หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
6. ปิด HPLC pump ของเอทานอลและเปิด HPLC pump ของน้ำ โดยใช้อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างแก๊สและวัดอัตราการไหลของแก๊สทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 60 นาที แล้วจึงสลับกลับไปป้อนเอทานอลอีกครั้งพร้อมเก็บข้อมูลอีกครั้งเพื่อศึกษาการผลิตไฮโดรเจนแบบวนลูป
7. เมื่อเก็บตัวอย่างได้ครบตามที่ต้องการจึงทำการปิดแก๊สไนโตรเจน และเครื่องควบคุมอุณหภูมิตามลำดับ

3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์

การทดลองที่	สารที่ใช้	ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล:เหล็ก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	แก๊สตัวพา
1	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:1	650	1	ไนโตรเจน
2	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:2	650	1	ไนโตรเจน
3	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:1	650	1	ไนโตรเจน
4	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:2	650	1	ไนโตรเจน

3.5.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองที่	สารที่ใช้	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล:เหล็ก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	แก๊สตัวพา
1	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:1	650	1	ไนโตรเจน
2	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:2	650	1	ไนโตรเจน
3	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:1	650	1	ไนโตรเจน
4	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:2	650	1	ไนโตรเจน
5	เอทานอล	NiO	-	1:0	650	1	ไนโตรเจน

3.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงรีฟอร์มมิง

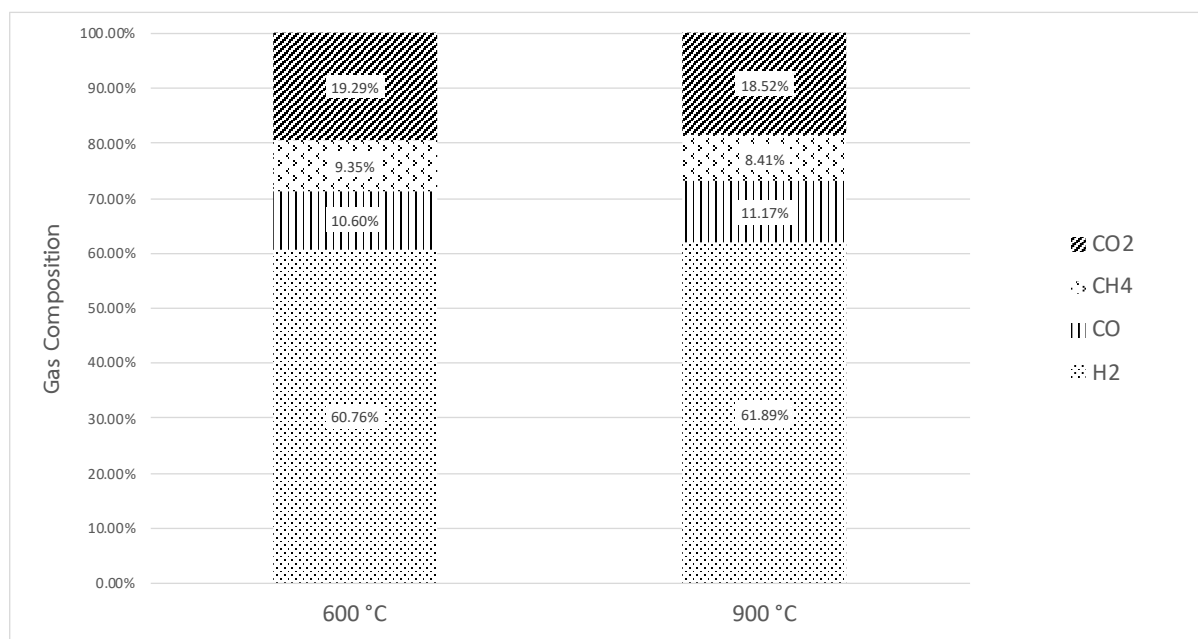
การทดลองที่	สารที่ใช้	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์เหล็กออกไซด์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล:เหล็ก)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	แก๊สตัวพา
1	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:1	90	650	1	ไนโตรเจน
	น้ำ	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:1	60	650	1	ไนโตรเจน
	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:1	90	650	1	ไนโตรเจน
2	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:2	90	650	1	ไนโตรเจน
	น้ำ	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:2	60	650	1	ไนโตรเจน
	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	600	1:2	90	650	1	ไนโตรเจน
3	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:1	90	650	1	ไนโตรเจน
	น้ำ	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:1	60	650	1	ไนโตรเจน
	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:1	90	650	1	ไนโตรเจน
4	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:2	90	650	1	ไนโตรเจน
	น้ำ	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:2	60	650	1	ไนโตรเจน
	เอทานอล	NiO/Fe ₂ O ₃	900	1:2	90	650	1	ไนโตรเจน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิการแคลไซน์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนการผสม และประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเคมีคอลูปิงรีฟอร์มมิงเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการแคลไซน์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา

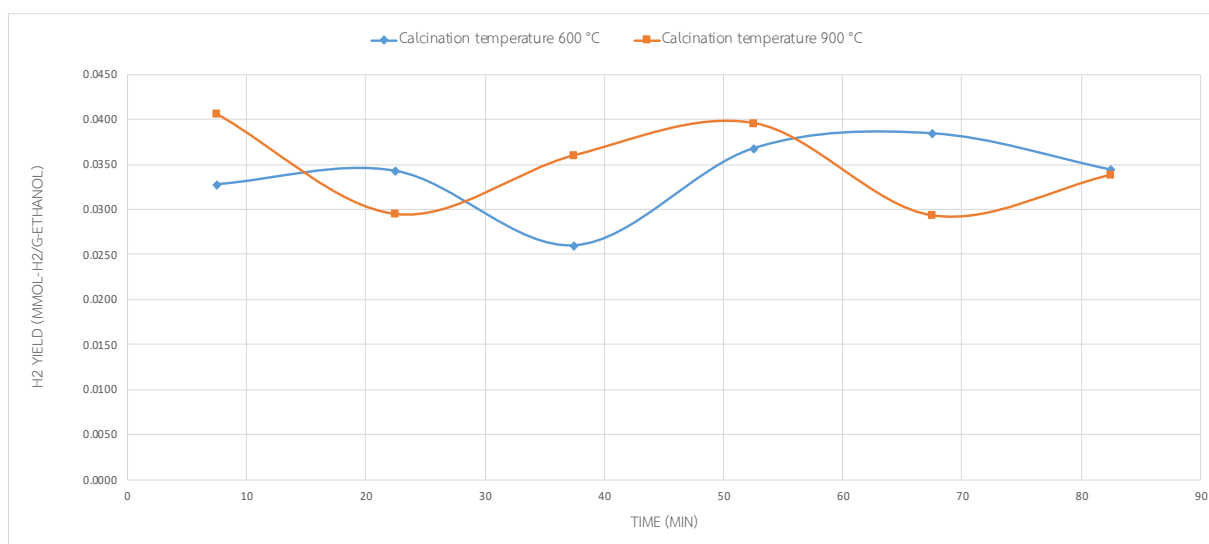
4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ของการทดลองโดยใช้เหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิแคลไซน์แตกต่างกัน

รูปที่ 4.1 แสดงร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 โดยเป็นอัตราส่วนการผสมทางกายภาพ นิกเกิลออกไซด์มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและใช้อุณหภูมิการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ส่วนเหล็กออกไซด์มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 600 และ 900 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลของเอทานอลเท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิการทดลองเท่ากับ 650

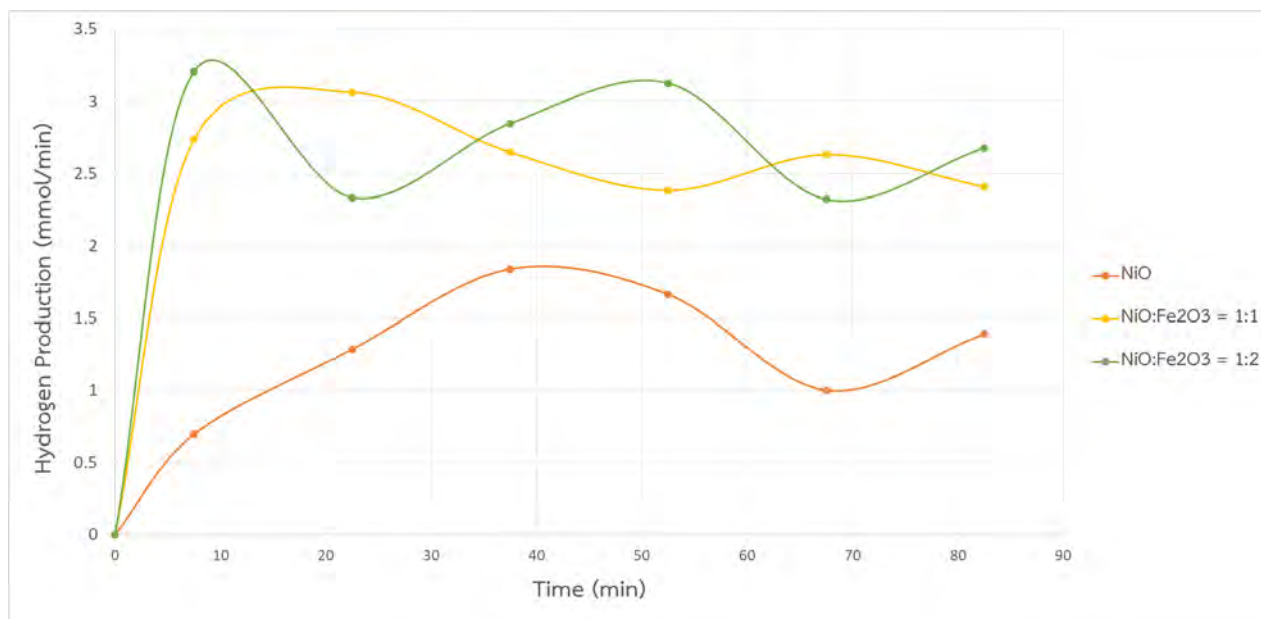
องศาเซลเซียส พบว่า การทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีร้อยละองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 60.76 รองลงมา คือคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ย 19.29 และพบมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงเล็กน้อย สำหรับการทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีร้อยละองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากที่สุดเช่นกัน และมีค่าเฉลี่ย 61.89 ซึ่งมีความมากกว่าที่อุณหภูมิ 600 เล็กน้อย ในขณะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 18.52 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 600



รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้ของไฮโดรเจนของการทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่ใช้อุณหภูมิแคลไซน์แตกต่างกัน

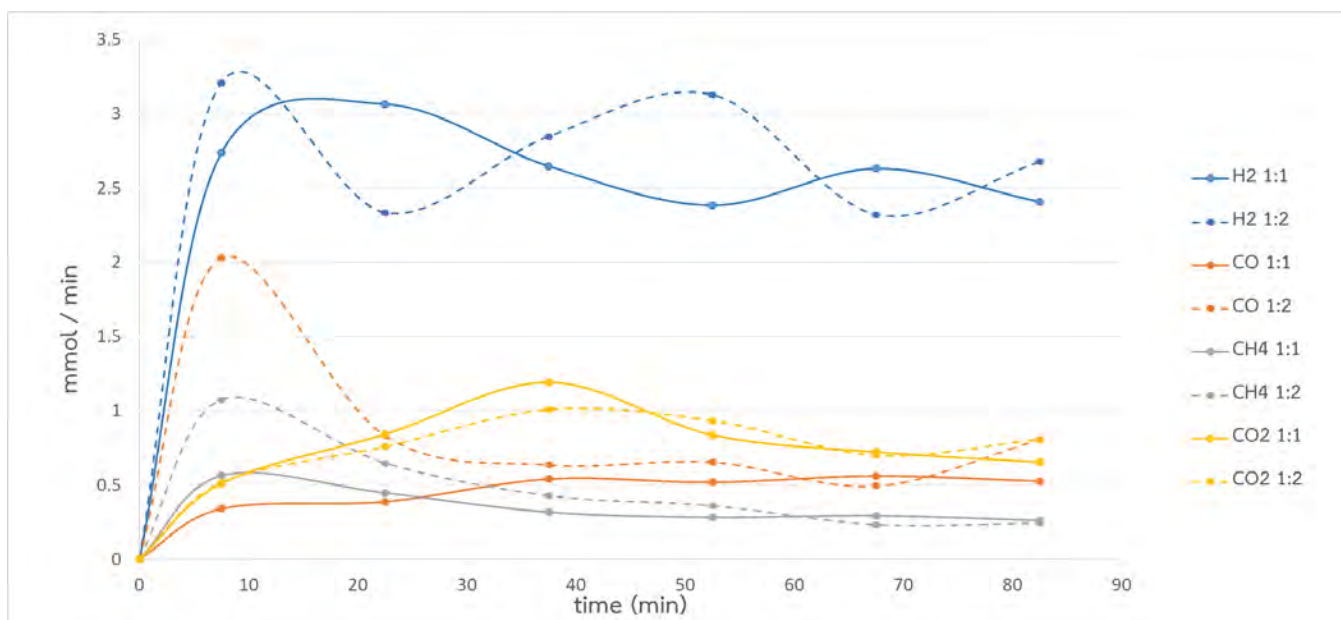
รูปที่ 4.2 แสดงร้อยละผลได้ของไฮโดรเจนจากการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์กับเหล็กออกไซด์โดยการผสมทางกายภาพที่อัตราส่วน 1:2 โดยเป็นการเปรียบเทียบผลจากการทดลองที่ใช้เหล็กออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่แตกต่างกัน คือ 600 และ 900 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลเอทานอล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้อุณหภูมิการทดลอง 650 องศาเซลเซียสและทำที่ความดันบรรยากาศ พบว่า ร้อยละผลได้ไฮโดรเจนเมื่อใช้เหล็กออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ 600 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0338 ในขณะที่ร้อยละผลได้ไฮโดรเจนเมื่อใช้เหล็กออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ 900 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0349 ซึ่งมีความมากกว่าที่ 600 องศาเซลเซียสเล็กน้อย มีแนวโน้มสอดคล้องกับร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงให้เห็นว่าการใช้เหล็กออกไซด์ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสให้ผลที่ดีกว่า

4.2 ผลของอัตราส่วนการผสมทางกายภาพระหว่างนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์



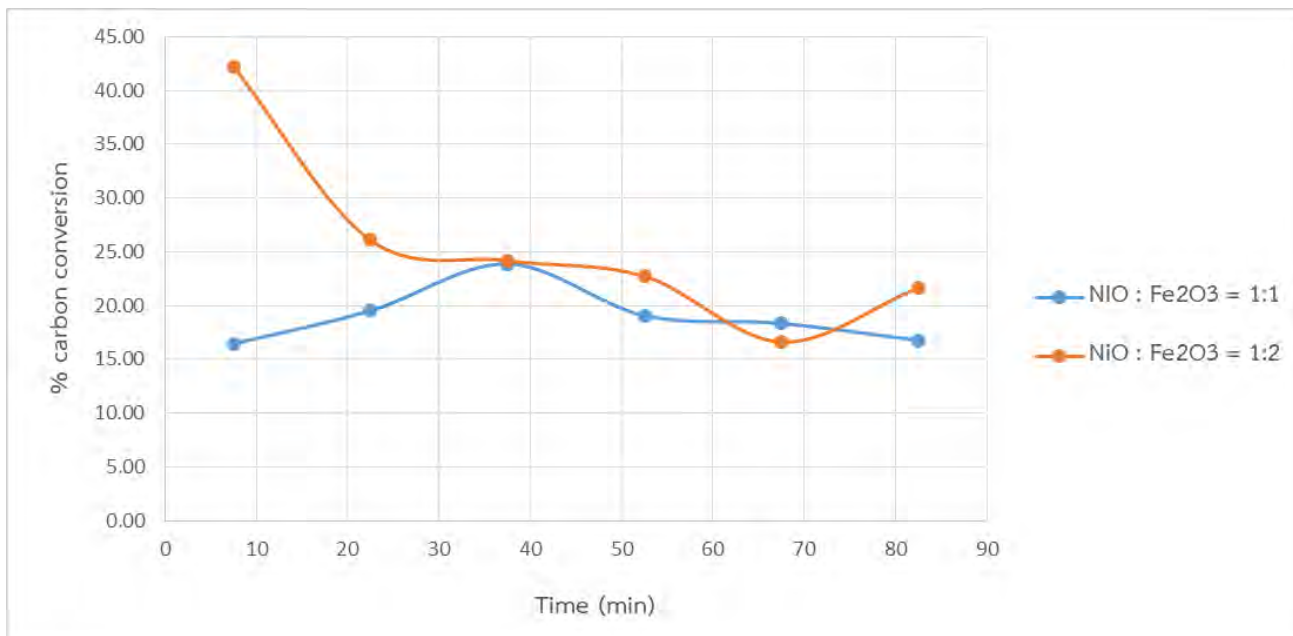
รูปที่ 4.3 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจน

รูปที่ 4.3 แสดงการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในช่วงเวลา 90 นาที เมื่อทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิการทดลอง 650 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ อัตราการไหลของเอทานอลเท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน กรณีแรกเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์เพียงอย่างเดียว ปริมาณ 5 กรัม ที่ทำการเตรียมโดยวิธีอิมเพรกเนชัน และใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 1.12 มิลลิโมลต่อนาที เมื่อใช้นิกเกิลออกไซด์ผสมกับเหล็กออกไซด์ที่ทำการเตรียมโดยวิธีอิมเพรกเนชันและใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5 กรัมเช่นเดิม และอัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เท่ากับ 1:1 พบว่ามีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.27 มิลลิโมลต่อนาที และเมื่อใช้อัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เท่ากับ 1:2 อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.36 มิลลิโมลต่อนาที แสดงให้เห็นว่าการใช้เหล็กออกไซด์สามารถเพิ่มอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้



รูปที่ 4.4 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงเวลาการทดลองเท่ากับ 90 นาที โดยการใช้อัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่ต่างกัน นิกเกิลออกไซด์เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส และเหล็กออกไซด์เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิการทดลองเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของเอทานอล เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เท่ากับ 1:1 จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.27 มิลลิโมลต่อนาที รองลงมาคือคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเฉลี่ย 0.68 มิลลิโมลต่อนาที คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 0.41 และ 0.31 มิลลิโมลต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่ เมื่อใช้อัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เท่ากับ 1:2 จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.36 มิลลิโมลต่อนาที และคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเฉลี่ย 0.66 มิลลิโมลต่อนาที ซึ่งจะพบว่าได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือแก๊สไฮโดรเจนมากกว่า และได้แก๊สที่ไม่ต้องการต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์เท่ากับ 1:2 ให้ผลที่ดีกว่า

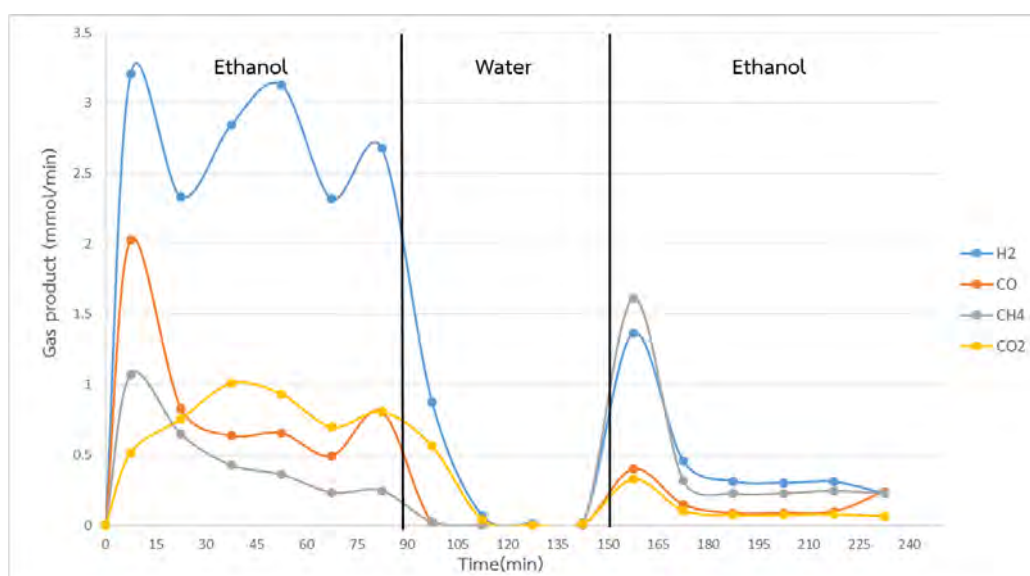


รูปที่ 4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลเป็นแก๊ส

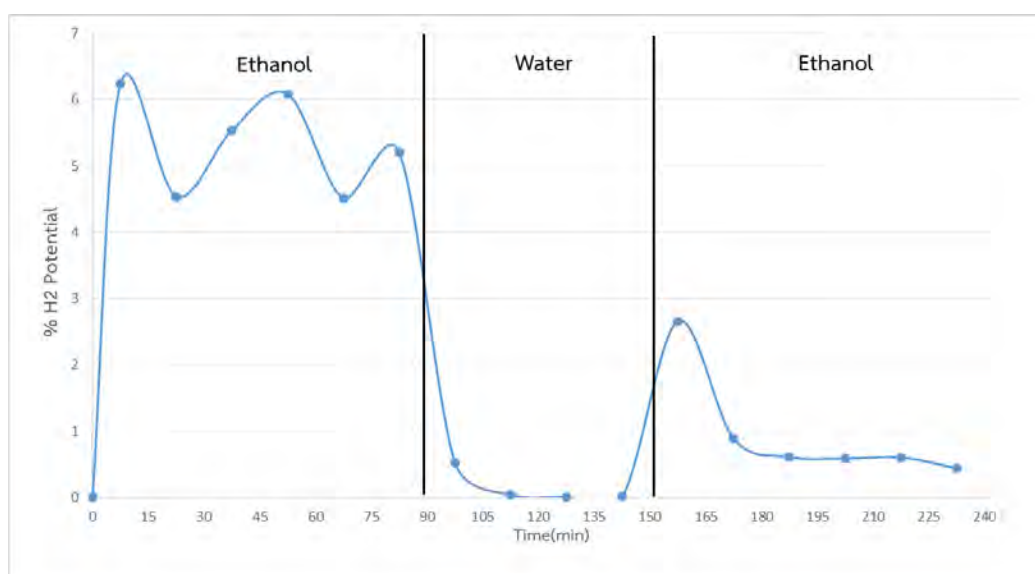
รูปที่ 4.5 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลเป็นแก๊ส ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนผสมทางกายภาพ เท่ากับ 1:1 และ 1:2 โดยนิกเกิลออกไซด์เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส และเหล็กออกไซด์เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส ทำการทดลองในช่วงเวลา 90 นาที ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิการทดลองเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของเอทานอล เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลเป็นแก๊สของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.01 และ 25.58 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:2 สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าและจะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้และมีปริมาณลดลง

4.3 ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบิงรีฟอร์มมิง

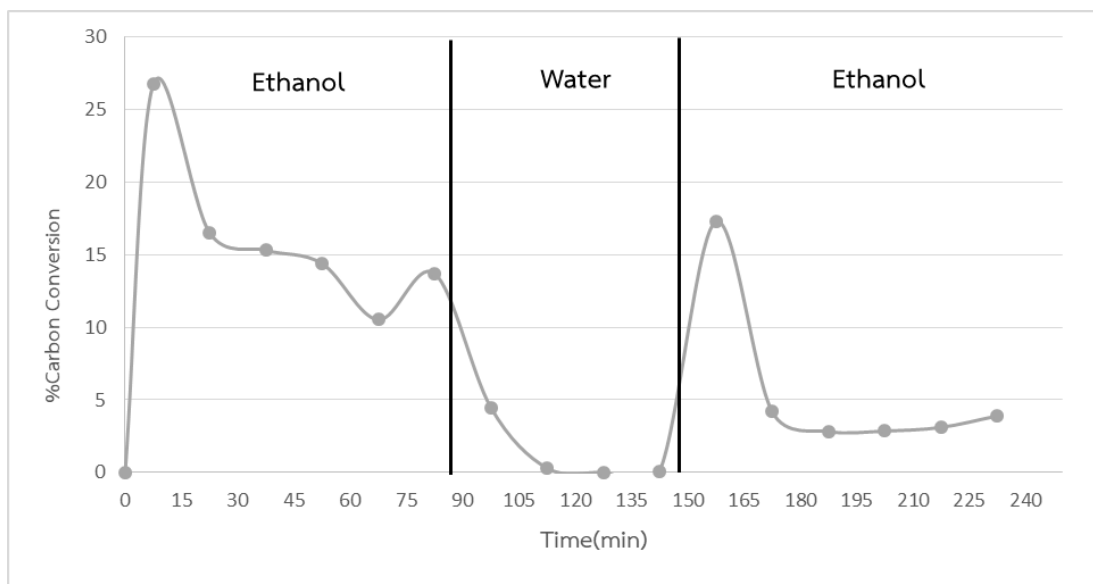
ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ผสมทางกายภาพในอัตราส่วน 1:2 ปริมาณ 5 กรัม ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง รวมระยะเวลาทั้งหมด 240 นาที โดยในช่วง 90 นาทีแรกของการทดลอง ทำการป้อนเอทานอลที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ในช่วง 60 นาที ต่อมา ทำการป้อนน้ำที่อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และในช่วง 90 นาทีสุดท้าย ทำการป้อนเอทานอลอัตราการไหลเท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที อีกครั้ง



รูปที่ 4.6 ปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ตลอดกระบวนการเคมีคอลลูบิง



รูปที่ 4.7 ร้อยละผลได้ไฮโดรเจนตลอดกระบวนการเคมีคอลลูบิง



รูปที่ 4.8 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

ปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเคมีคอลูบปีง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าในช่วงการป้อนเอทานอลครั้งแรก ปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมากที่สุด หลังจากนั้นปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง ในช่วงต่อมาที่ทำการป้อนน้ำพบว่าเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อยและแทบไม่เกิดขึ้นอีกเลยเมื่อทำการป้อนน้ำไปจนจบช่วง และในช่วงสุดท้ายที่ทำการป้อนเอทานอลอีกครั้ง พบว่าเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ขึ้นอีกแต่เกิดในอัตราที่ช้ากว่าการป้อนเอทานอลรอบแรกและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ และมีแนวโน้มสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของไฮโดรเจน (รูปที่ 4.8) และร้อยละการเปลี่ยนแปลงเอทานอลเป็นแก๊ส (รูปที่ 4.8)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ อัตราส่วนการผสมทางกายภาพระหว่างนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ และประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกระบวนการเคมีคอลลูบิงรีฟอร์มมิงจากเอทานอล เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการแคลไซน์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ โดยเหล็กออกไซด์ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส จะให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากกว่า และมีร้อยละผลได้ไฮโดรเจนมากกว่าการใช้เหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การใช้เหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส ยังเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเหล็กออกไซด์ที่ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ทั้ง 600 และ 900 องศาเซลเซียส มีคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนออกไซด์เกิดขึ้นรวมกันในปริมาณใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการแคลไซน์เหล็กออกไซด์ที่ทั้งสองอุณหภูมิ ทำให้เหล็กออกไซด์มีความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนได้ไม่ต่างกัน แต่การใช้เหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียสทำให้สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่มากกว่า

5.2 ผลของอัตราส่วนการผสมทางกายภาพระหว่างนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดไฮโดรเจนของการทดลองที่ใช้นิกเกิลออกไซด์เพียงชนิดเดียวกับการใช้นิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่ผสมกันทางกายภาพ เมื่อบรรจุในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า การใช้นิกเกิลออกไซด์เพียงชนิดเดียวจะมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเหล็กออกไซด์ผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่าเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเพิ่มการผลิตไฮโดรเจนได้ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์ พบว่า การใช้อัตราส่วน 1:2 จะมีอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ต้องการมากกว่า และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการใช้อัตราส่วน 1:1 และอัตราส่วน 1:2 ยังมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเอทานอลไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์มากกว่า ดังนั้น การใช้นิกเกิลออกไซด์ต่อเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:2 จึงมีความเหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนมากกว่า

5.3 ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบิงรีฟอร์มมิง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า ในช่วงแรกของกระบวนการอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถทำงานได้ดี จากนั้นอัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์มีการลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยารัดกั้นทำให้มีการสูญเสียออกซิเดชัน ในช่วงต่อมาเป็นการป้อนน้ำในเวลา พบว่ามีแก๊สผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย และไม่พบแก๊สผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นอีกในช่วงการป้อนน้ำ ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกอาจเกิดมาจากเอทานอลที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ป้อนเข้าไป และในช่วง 90 นาทีสุดท้ายทำการป้อนเอทานอลอีกรอบ พบว่าเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ขึ้นอีกครั้งแต่มีอัตราการเกิดที่ต่ำกว่าการป้อนเอทานอลในช่วงแรก สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ที่ผสมกับเหล็กออกไซด์ สามารถใช้ได้ ในกระบวนการเคมีคอลลูบิงรีฟอร์มมิง แต่ปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จะเกิดได้ไม่ดีเท่ากับลูบแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในลูบต่อไปจะมีประสิทธิภาพต่ำลง

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรตรวจสอบท่อที่ใช้ในการป้อนสารให้มีสารเต็มท่อและไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นก่อนการป้อนสารเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
2. ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นพร้อมกัน และไม่ควรเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาไว้นานเกินไปก่อนทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. N. Khan, T. Shamim. Exergoeconomic analysis of a chemical looping reforming plant for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2007): 4951-4965
- [2] Z. I. Adiya, V. Dupont, T. Mahmud, Steam reforming of shale gas in a packed bed reactor with and without chemical looping using nickel based oxygen carrier, *International journal of Hydrogen Energy* 43 (2018): 6904-6917
- [3] L. F. Diego, M. Ortiz, F.G. Labiano, J. Adanez, A. Abad, P. Gayan, Hydrogen production by chemical-looping reforming in a circulating fluidized bed reactor using Ni-based oxygen carriers, *Journal of Power Sources* 192 (2009): 27-34.
- [4] B. Jiang, B. Dou, Y. Song, C. Zhang, Hydrogen production from chemical looping steam reforming of glycerol by Ni-base oxygen carrier in fixed-bed reactor, *Chemical Engineering Journal* 280 (2015): 459-467.
- [5] Siam Chemical. Ethanol Property. Available from <https://www.siamchemi.com/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5/> .(March,1 2020)
- [6] National Center for Biotechnology Information. Ethanol Structure. Available from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethanol#section=Crystal-Structures>. (March,1 2020)
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. คู่มือความรู้ด้านพลังงานไฮโดรเจน Available from <http://www2.dede.go.th/kmmf/download/pdf>. (March,6 2020)
- [8] อุณาโลม เวทย์วัฒนะฮาร์ทลี. ไฮโดรเจน –การผลิตและการประยุกต์ใช้. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 2(2556)
- [9] ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. Chemical looping ทางเลือกใหม่ในการผลิตพลังงานที่ยั่งยืน. *Technology Energy & Environment* 38 (2012): 49-52

- [10] B. Dou, H. Zhang, G. Cui, Z. Wang, B. Jiang, K. Wang, Hydrogen production and reduction of Ni-based oxygen carriers during chemical looping steam reforming of ethanol in a fixed-bed reactor, *International Journal of hydrogen energy* (2017): 26217-26230.
- [11] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์ . โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 254
- [12] Kurt J. Lesker Company. Iron Oxide Safety Data Sheet. Available from <https://www.lesker.com/msds/pdfs/cd72f997d54d3bc42d09a34d6bdca56ebf2ea7fd3a31f08843ec5bd413.pdf>. (March,6 2020)
- [13] B. Barnali, C. Narayan, Production of hydrogen by steam reforming of methane over alumina supported nano-NiO/SiO₂ catalyst. *Catalysis Today* (2012): 1-8
- [14] B. Jiang, B. Dou, Y. Song, C. Zhang, Hydrogen production from chemical looping steam reforming of glycerol by Ni-base oxygen carrier in fixed-bed reactor, *Chemical Engineering Journal* 280 (2015): 459-467.
- [15] P. C. Chiu, Characterization and Evaluation of Prepared Fe₂O₃/Al₂O₃ Oxygen Carriers for Chemical Looping Process. *Aerosol and Air Quality Research* (2014)
- [16] P. Alvarez, P. Araya, R. Rojas, S. Guerrero, G. Aguila . Activity of alumina supported Fe catalysts for N₂O decomposition: effects of the iron content and thermal treatment, *Journal of the Chilean Chemical Society* 62 (2017)
- [17] P. Cho, T. Mattisson, and A. Lyngfelt, Comparison of iron-, nickel-, copper- and manganese-based oxygen carriers for chemical-looping combustion *Fuel*,9 (2004) : 1215-1225

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

การทดลองที่ 1

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ที่ทำการเตรียมโดยใช้อุณหภูมิเคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง : ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลป้อนเข้า 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 1st Ethanol loop การทดลองที่ 1

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.083	1513726.3	1.091	1655031.9	1.091	1662011.2	1.082	1493946	1.085	1523387.4	1.075	1350482
N2	2.473	104156.7	2.478	61087.7	2.478	52606.8	2.477	66517.6	2.479	50827.3	2.477	67821.8
CO	3.023	11789.9	3.018	64547.3	3.018	52731.4	3.019	58232.4	3.02	65100.1	3.019	45742.2
CH4	4.958	24689.4	4.946	87910.3	4.946	70216.2	4.952	61978.9	4.954	69790.6	4.953	45644.6
CO2	6.812	28677.4	6.814	20058.7	6.816	18809.9	6.816	19014.1	6.817	24659.3	6.816	19424.6

ตาราง ก2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ Water loop การทดลองที่ 1

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.096	1758184.2	1.089	1626522.4	1.07	1289148.5	1.058	1102460.2
N2	2.48	48657.9	2.477	73569.9	2.473	109630.8	2.471	135738.9
CO	3.025	10047.1	3.028	3697.7	3.03	1773	3.031	1351.5
CH4	4.954	49284.6	4.965	4579.8	5.539	1206	6.796	39241.7
CO2	6.792	56486.4	5.542	1039.3	6.785	48980.6	9.076	4230.9

ตาราง ก3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 2nd Ethanol loop การทดลองที่ 1

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.07	1262038	1.077	1400184.3	1.075	1356845.7	1.079	1405976.9	1.075	1343919.9	1.07	1250310.1
N2	2.477	61275.5	2.479	46888	2.479	54280.5	2.48	38508.6	2.479	42843.6	2.48	44685.7
CO	3.022	13694.1	3.019	61931.9	3.02	59532.1	3.021	63663.7	3.021	59700.8	3.023	14109.7
CH4	4.919	171937.7	4.915	206514.8	4.931	145046.4	4.939	125289.6	4.945	95786.4	4.954	51576.6
CO2	6.807	27052.3	6.815	21009.9	6.814	20298.8	6.813	34124.2	6.812	25927.9	6.8816	33070.4

การทดลองที่ 2

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลออกไซด์ (NiO) : เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) อัตราส่วน 1:1

โดย Fe₂O₃ เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง : ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลป้อนเข้า 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก4 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 1st Ethanol loop การทดลองที่ 2

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.075	1376029.7	1.075	1350684.2	1.066	1186123.2	1.068	1212665.2	1.071	1243178.1	1.064	1132800.3
N2	2.474	83604.6	2.477	56778.3	2.477	61478.6	2.478	52429.1	2.479	42745.4	2.476	53976.6
CO	3.02	14354.4	3.021	13815.5	3.022	10169.8	3.023	9775.5	3.023	10068.8	3.022	10013
CH4	4.94	82055.4	4.95	44884.9	4.955	29809	4.957	26954	4.957	26516.4	4.958	23841.3
CO2	6.818	20818.1	6.807	25275.0	6.81	25622.4	6.811	29984	6.809	33605	6.806	22369

ตาราง ก5 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ Water loop การทดลองที่ 2

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.085	1554812.9	1.072	1315745.7	1.045	879038.2	1.019	541838
N2	2.478	70672.3	2.472	103919.6	2.468	151960	2.463	192356.3
CO	3.026	5613.8	3.026	2722.3	3.029	1426.8	-	-
CH4	4.963	8901.1	4.961	1326.5	-	-	-	-
CO2	6.782	49514.6	6.782	51166.5	6.794	38016.6	6.804	25044.9

ตาราง ก3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 2nd Ethanol loop การทดลองที่ 2

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.074	1344110.4	1.078	1396206.7	1.07	1244538.5	1.072	1283596.9	1.068	1209388	1.065	1617769.5
N2	2.475	73844.9	2.478	42635.4	2.478	53466.8	2.479	38010.6	2.478	48535.8	2.478	55604
CO	3.02	16998.9	3.019	20135.1	3.022	43428.8	3.023	13731.8	3.022	12996.2	3.022	11529
CH4	4.929	135811.7	4.939	93149.3	4.95	56540.9	4.956	38575.4	4.957	28407.9	4.96	22435.9
CO2	6.816	16779.7	6.813	18901.3	6.812	26307.7	6.811	30221	6.81	22888.9	6.812	7696.5

การทดลองที่ 3

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลออกไซด์ (NiO) : เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) อัตราส่วน 1:2

โดย Fe₂O₃ เตรียมโดยใช้อุณหภูมิกัลไนท์ที่ 600 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง : ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลป้อนเข้า 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก7 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 1st Ethanol loop การทดลองที่ 3

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.079	1433113.3	1.077	1360868.8	1.072	1254541.5	1.063	1126382.9	1.064	1138959.2	1.07	1217898.4
N2	2.476	68352.9	2.48	37598.1	2.478	42572	2.477	60283	2.477	55665.4	2.48	36755.7
CO	3.02	16088.6	3.025	11453.9	3.023	48678.9	3.023	6979.8	3.023	6965	3.025	7662.2
CH4	4.945	68668.7	4.957	34905.6	4.957	38084.3	4.958	18145.7	4.958	17433.7	4.96	18458.6
CO2	6.815	17110.1	6.81	30422.5	6.805	25439.8	6.807	22018.3	6.808	22144.3	6.809	34633.3

ตาราง ก8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ Water loop การทดลองที่ 3

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.077	1402685	1.051	975369.3	1.027	641197.5	1	333549.2
N2	2.476	79365.7	2.468	138518.1	2.464	177317	2.459	211262.7
CO	3.028	3491.8	3.026	1424.1	-	-	-	-
CH4	4.965	5102.4	6.791	40764.2	6.801	29115.3	6.813	17119.5
CO2	6.79	52752	8.753	14972.2	8.779	13701.7	8.78	13593.7

ตาราง ก9 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 2nd Ethanol loop การทดลองที่ 3

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.081	1459300.8	1.065	1162654.2	1.061	1088867.2	1.054	990496.9	1.047	895182.9	1.061	1083132.7
N2	2.477	48185.5	2.479	45770.7	2.478	53808.5	2.478	72240.6	2.476	90779.9	2.479	50404.2
CO	3.02	15915.3	3.024	8967.2	3.025	7415.8	3.025	6523.5	3.025	5699.9	3.025	7187.6
CH4	4.93	124717	4.954	43698.6	4.959	25420.7	4.961	18134.9	4.963	14361.5	4.961	19480.2
CO2	6.81	19177.5	6.811	24034.5	6.81	30318.4	6.809	28685.1	6.812	25936.3	6.812	29222.3

การทดลองที่ 4

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลออกไซด์ (NiO) : เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) อัตราส่วน 1:1

โดย Fe₂O₃ เตรียมโดยใช้อุณหภูมิกัลไนท์ที่ 900 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง : ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลป้อนเข้า 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก10 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 1st Ethanol loop การทดลองที่ 4

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.081	1461572.5	1.079	1395416.4	1.075	1331003.7	1.068	1216800.4	1.068	1208841.6	1.079	1379339.4
N2	2.48	66617.7	2.48	37613.1	2.479	43583.2	2.477	66585	2.477	67113.4	2.479	33325.4
CO	3.023	16906.9	3.022	13715.6	3.022	13006.3	3.021	12665.7	3.02	12344.3	3.021	14421.8
CH4	4.952	58440.9	4.954	39493.4	4.956	30963.7	4.956	27932.4	4.956	26136.5	4.955	28978.6
CO2	6.815	16276.2	6.807	22921.8	6.808	35850.1	6.809	25571.2	6.807	19824.8	6.804	22417.6

ตาราง ก11 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ Water loop การทดลองที่ 4

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.08	1452202.2	1.041	833828.9	1.019	544650.8	0.999	322190.1
N2	2.474	84245.7	2.466	158983.7	2.462	191159.8	2.46	218182.7
CO	3.024	4771.6	3.026	1586.9	-	-	-	-
CH4	4.962	5231.1	6.794	34407.1	-	-	-	-
CO2	6.78	51800.4	9.065	4136.6	6.803	3950	6.815	14083.4

ตาราง ก12 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 2nd Ethanol loop การทดลองที่ 4

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.073	1334217.1	1.073	1335875.7	1.079	1439648.3	1.083	1502161.4	1.072	1323672.5	1.072	1301978.5
N2	2.475	63098.9	2.476	60433.2	2.477	49640.2	2.478	36922.3	2.477	63036	2.477	61008.4
CO	3.018	19654.9	3.014	63763.8	3.015	64121.9	3.016	69410.7	3.017	60988	3.018	61223.9
CH4	4.925	140011.7	4.926	142879.6	4.939	102082.4	4.945	91704.2	4.95	70414.7	4.952	66100.3
CO2	6.808	21439	6.813	14697.5	6.816	11961.6	6.817	17538.9	6.822	15823.4	6.826	8036.1

การทดลองที่ 5

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา : นิกเกิลออกไซด์ (NiO) : เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) อัตราส่วน 1:2

โดย Fe₂O₃ เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส

สภาวะการทดลอง : ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลป้อนเข้า 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก13 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 1st Ethanol loop การทดลองที่ 5

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.076	1390508.1	1.079	1421887.9	1.069	1260782.3	1.069	1244844.8	1.069	1241825.5	1.075	1331727
N2	2.475	60927.1	2.475	38460.4	2.474	49672.4	2.474	47738.3	2.473	47977.1	2.475	29979.9
CO	3.015	21433	3.016	61587.4	3.016	13757.7	3.016	12721.4	3.015	12886.1	3.017	12644.1
CH4	4.931	101836.3	4.939	86290.1	4.945	41489.2	4.947	31415.9	4.947	27294.9	4.949	26620.7
CO2	6.808	14685.5	6.8	30314.8	6.801	29334.3	6.797	24411.3	6.796	24546.4	6.795	26365.6

ตาราง ก14 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ Water loop การทดลองที่ 5

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.084	1537851.9	1.06	1139494	1.03	690538.9	1.006	399732.5
N2	2.471	67264.1	2.465	121030.9	2.459	173404.3	2.456	204782.3
CO	3.018	6947.8	3.02	2378.3	-	-	-	-
CH4	4.952	8986	4.953	1336.4	-	-	-	-
CO2	6.766	64889.9	6.777	43329.2	6.789	12322.6	6.8	18756.8

ตาราง ก15 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีของ 2nd Ethanol loop การทดลองที่ 5

Comp	0-15 min		15-30 min		30-45 min		45-60 min		60-75 min		75-90 min	
	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area	Ret.time	Area
H2	1.067	1233689	1.076	1383029.1	1.061	1149533	1.075	1360522	1.075	1363528.2	1.073	1308046.9
N2	2.47	65873.8	2.473	30054.6	2.471	71586.3	2.475	28194.1	2.474	21707.4	2.474	15762.9
CO	3.013	17664.4	3.012	21935.7	3.013	15497.2	3.013	19195.3	3.011	21192.9	3.01	67238.5
CH4	4.912	159034.6	4.898	209737.3	4.907	180478.3	4.896	223537.5	4.891	235764.6	4.885	282848.6
CO2	6.8	19435.6	6.799	20600.3	6.803	17440.7	6.799	21648.1	6.796	22299.8	6.795	24266.4

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

1. จำนวนโมลของเอทานอลที่ป้อนเข้าระบบ

$$\frac{0.5 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{0.789 \text{ g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{46.07 \text{ g}} = 0.0086 \text{ mol /min}$$

2. จำนวนโมลของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ

$$\frac{0.5 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{18 \text{ g}} = 0.0278 \text{ mol /min}$$

3. การคำนวณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

การคำนวณหา Respond factor (RF) ของสารประกอบต่างๆในแก๊สอ้างอิง

$$SC_i = RF_i \times SA_i$$

โดยที่ SC_i คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในแก๊สอ้างอิง
 RF_i คือ Respond factor (RF) ขององค์ประกอบ i
 SA_i คือ พื้นที่ใต้กราฟของพีคขององค์ประกอบ i

ตาราง ข1 แสดงค่า Retention time และ area ขององค์ประกอบต่างๆ ในแก๊สอ้างอิง

Peak	Compound	Ret.time	Area	%Vol
1	H ₂	0.972	36305.3	1
2	N ₂	2.456	251850.6	94
3	CO	3.021	1795.5	1
4	CH ₄	4.961	7351.9	1
5	CO ₂	6.831	2408.7	1
6	other	7.207	6716.1	1

การคำนวณ Respond factor (RF) ของไฮโดรเจนในแก๊สอ้างอิง

$$RF (H_2) = \frac{1}{36305.3} = 2.75 \times 10^{-5}$$

ตาราง ข2 แสดงค่า Respond factor ขององค์ประกอบต่างๆ ในแก๊สอ้างอิง

Peak	Compound	Ret.time	Response factor
1	H ₂	0.972	2.75 × 10 ⁻⁵
2	N ₂	2.456	3.73 × 10 ⁻⁴
3	CO	3.021	5.57 × 10 ⁻⁴
4	CH ₄	4.961	1.36 × 10 ⁻⁴
5	CO ₂	6.831	4.15 × 10 ⁻⁴
6	other	7.207	1.49 × 10 ⁻⁴

การคำนวณหาองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ค3 แสดงค่า area ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์แก๊สที่เวลา 15 นาที

Compound	Ret.time	Area
H ₂	1.083	1513726.3
N ₂	2.473	104156.7
CO	3.023	11789.9
CH ₄	4.958	24689.4
CO ₂	6.812	28677.4

การคำนวณร้อยละความเข้มข้นของไฮโดรเจนในแก๊สผลิตภัณฑ์

$$\text{Vol\%}(H_2) = (2.75 \times 10^{-5})(1513726.3) = 41.6944$$

ตารางที่ ค4 แสดงค่าร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เวลา 15 นาที

Compound	Ret.time	Response factor	vol	%vol=%mol	%mol w/o N2
H ₂	0.972	2.75 x 10 ⁻⁵	41.6944	40.7172	65.63
N ₂	2.456	3.73 x 10 ⁻⁴	38.8751	37.9641	0.00
CO	3.021	5.57 x 10 ⁻⁴	6.5664	6.4125	10.34
CH ₄	4.961	1.36 x 10 ⁻⁴	3.3582	3.2795	5.29
CO ₂	6.831	4.15 x 10 ⁻⁴	11.9058	11.6267	18.74
total	7.207	1.49 x 10 ⁻⁴	102.3999	100.0000	100.00

4. การคำนวณจำนวนโมลแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

จากกฎของแก๊สอุดมคติ ; PV = nRT

จำนวนโมลสามารถหาได้จาก n = PV/RT

ที่เวลา 15 นาที อัตราการไหลของแก๊สเฉลี่ย = 80.17 mL/min

$$n = \frac{1 \text{ atm}}{(650+273.5)\text{K}} \times \frac{80.17 \text{ mL}}{\text{min}} \times \frac{\text{K mol}}{8.314 \text{ m}^3\text{Pa}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ mL}} \times \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}}$$

$$n = 0.0010584 \text{ mol/min}$$

โมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น = 0.0010584(0.6563) = 0.0006947

ตารางที่ ค5 แสดงจำนวนโมลขององค์ประกอบต่างๆในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เวลา 15 นาที

Flow (mL/min)	Total gas	mol/min			
		H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
80.1704786	0.0010584	0.0006947	0.0003805	0.0000560	0.0001984

5. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

$$\% \text{ Carbon conversion} = \frac{\text{โมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มี C เป็นองค์ประกอบ}}{\text{โมลของคาร์บอนในสารป้อนเข้า}} \times 100$$

$$\% \text{ Carbon conversion} = \frac{0.0003805 + 0.000056 + 0.0001984}{0.0135} \times 100 = 26.74 \%$$