

กระบวนการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์
โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา

BIOGAS REFORMING PROCESS TO PRODUCE
SYNGAS OVER Ni-SiO₂ CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS REFORMING PROCESS TO PRODUCE SYNGAS OVER Ni-SiO₂ CATALYST



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

กระบวนการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา
Biogas Reforming Process to Produce Syngas over Ni-SiO₂ Catalyst

ชื่อนักศึกษา

นางสาวดาวนภา พายุ รหัสนักศึกษา 59050406
นางสาวธีราภรณ์ ศรีวิชัย รหัสนักศึกษา 59050426

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี


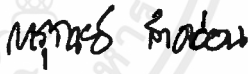

ปีการศึกษา

2562

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กระบวนการเปลี่ยนรูประบบแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวดาวณา พายุ	รหัสนักศึกษา	59050406
	นางสาวธีราภรณ์ ศรีวิชัย	รหัสนักศึกษา	59050426
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2562		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา (Ni-SiO_2) เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) และศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดแก๊สสังเคราะห์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนแบบจุ่มชุบ (Incipient wetness impregnation) โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 1, 3 และ 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกาเจล 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาชนิดเม็ด สำเร็จรูป (Pellet) และ ซิลิกาชนิดผง (Powder) ที่ได้จากการระเหย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้หลังจากการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปของ NiO-SiO_2 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมาทำการตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM) การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (FT-IR) เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทดสอบประสิทธิภาพด้วยปฏิกิริยา Dry reforming of methane เพื่อให้ได้แก๊สสังเคราะห์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 650°C ความดัน 1 atm อัตราการไหลของแก๊ส 20 mL/min ($\text{CH}_4 : \text{CO}_2 : \text{Ar} = 50 : 40 : 10 \text{ mol}\%$) โดยผ่านเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) พบว่า ซิลิกาชนิดเม็ด (Pellet) ที่ 1 %wt Ni-SiO_2 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงที่สุด เนื่องจากให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนไปของแก๊สมีเทนสูงถึง 79.40 % ให้ค่าร้อยละความจำเพาะในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของ H_2 1.48 % และ CO 98.52 % ให้ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาของ H_2 1.17 % และ CO 78.21 %

คำสำคัญ : ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ตัวรองรับซิลิกา แก๊สสังเคราะห์ การเปลี่ยนรูประบบแก๊สแบบแห้ง การตกตะกอนแบบจุ่มชุบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biogas Reforming Process to Produce Syngas over Ni-SiO ₂ Catalyst		
Students	Miss Daonapa Papu	Student ID	59050406
	Miss Teeraporn Sriwichai	Student ID	59050426
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2019		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Montree Thongkam		

Abstract

This special project was studied the effect of Nickel catalysts on Silica support (Ni-SiO₂) for the synthesis of synthesis gas (Syngas). Ni-SiO₂ catalysts were synthesized by Incipient wetness impregnation method. The catalysts with different Nickel amount which are 0, 1, 3 and 5 %wt on the Silica gel support (Commercial) 2 types are Pellet and Powder. After synthesis, The catalysts were prepared in form of NiO-SiO₂. Then all catalysts were examined to prove the identity of the catalyst with various techniques including X-ray diffraction (XRD), Microstructure morphology analysis (SEM), Energydispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR). The catalysts were tested for efficiency with Dry reforming of methane reaction to obtain synthetic gas through a fixed-bed reactor, using the optimum conditions are 650 °C, pressure 1 atmosphere, gas flow rate 20 mL/min (ratio CH₄ : CO₂ : Ar = 50 : 40 : 10 mol%). It was found that Silica (Pellet) at 1 %wt Ni-SiO₂ was the highest catalytic efficiency because it given a high percentage of methane conversion up to 79.40 % , selectivity of H₂ 1.48 % , CO 98.52 % and yield product of H₂ 1.17 % , CO 78.21 %.

Keywords : Nickel catalyst, Silica supporter, Synthesis gas, Dry reforming of methane, Incipient wetness impregnation.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาจากคณะอาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ทองคำ อาจารย์ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ช่วยแนะนำ และให้คำปรึกษา รวมถึงเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา ตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ในการทำงานของท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ การวางแผนในโครงการนี้ โดยให้คำปรึกษาตั้งแต่การค้นหาคำมูลจนการดำเนินการทำวิจัยสำเร็จ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้ออกมาสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร และ ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบแก้ไขโครงการให้เล่มนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษนี้ได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และบุคลากร คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ทำให้การดำเนินการทำโครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความช่วยเหลือเข้าใจ และกำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ และได้ให้การสนับสนุนมาจนสำเร็จการศึกษา

ดาวนภา พายุ

ธีราภรณ์ ศรีวิชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลังงานแก๊สชีวภาพ.....	4
2.1.1 หลักการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	4
2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ.....	4
2.1.3 รูปแบบการนำแก๊สชีวภาพมาผลิตเป็นพลังงาน.....	5
2.1.4 ศักยภาพสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	5
2.2 แก๊สสังเคราะห์.....	5
2.2.1 การสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์.....	6
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	7
2.3.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.3.2 การดูดซับ และการคายซับ.....	9
2.3.3 กลไกการดูดซับของปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	10
2.3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.4 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์.....	11
2.4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง.....	11
2.4.2 การใช้งานแก๊สสังเคราะห์ในด้านต่าง ๆ.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ซิลิกาออกไซด์.....	12
2.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิกอนไดออกไซด์.....	12
2.5.2 ซิลิกาอสัณฐาน.....	13
2.5.3 ประโยชน์ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica).....	14
2.6 นิกเกิล (II) ไนเตรต.....	15
2.6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนิกเกิล.....	15
2.7 เทคนิคสำหรับการตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	15
2.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	15
2.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวและปริมาณของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS).....	16
2.7.3 พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR).....	18
2.7.4 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (GC).....	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	23
3.2 เครื่องมือใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และเครื่องมือวิเคราะห์สาร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา.....	24
3.3 แก๊สและสารเคมี.....	24
3.4 วิธีการทดลอง.....	25
3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO ₂ (Pellet) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ.....	25
3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO ₂ (Pellet) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ.....	25
3.4.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0%wt Ni บนตัวรองรับ SiO ₂ (Powder) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ.....	27
3.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3 และ 5%wt Ni บนตัวรองรับ SiO ₂ (Powder) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ.....	27
3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ Biogas ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Ni บนตัวรองรับ SiO ₂	28
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ ลงใน Reactor.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.2 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์.....	29
3.5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้.....	31
3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	32
3.6.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....	32
3.6.2 การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะพื้นผิว.....	33
3.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัว.....	33
3.6.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสาร.....	34
3.6.5 การวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม	34
3.7 กระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	37
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
4.1.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO ₂	37
4.2 การศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกและออสัณฐาน (XRD).....	41
4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM)	45
4.2.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)	54
4.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR).....	64
4.3 การศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก แผนการดำเนินงานวิจัย	81
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	82
ภาคผนวก ค ข้อมูลการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สชีวภาพ.....	88
ภาคผนวก ง การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงแก๊สชีวภาพ	101
ภาคผนวก จ การคำนวณร้อยละความจำเพาะการเกิดผลิตภัณฑ์.....	103
ภาคผนวก ฉ การคำนวณร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของซิลิกาเจลสำเร็จรูปที่นำมาใช้เป็นตัวรองรับ.....	14
2.2 คุณสมบัติของซิลิกาเจลที่ผ่านการระเหยและนำมาใช้เป็นตัวรองรับ.....	14
4.1 น้ำหนักทางทฤษฎี น้ำหนักหลังเผาสาร และร้อยละการสังเคราะห์ของ Ni-SiO ₂ (Pellet)..	40
4.2 น้ำหนักทางทฤษฎี น้ำหนักหลังเผาสาร และร้อยละการสังเคราะห์ของ Ni-SiO ₂ (Powder).	41
4.3 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO ₂ (Pellet).....	44
4.4 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO ₂ (Pellet).....	44
4.5 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO ₂ (Powder).....	45
4.6 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO ₂ (Powder).....	45
4.7 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 0 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet).....	55
4.8 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 1 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet).....	56
4.9 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 3 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet).....	58
4.10 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 5 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet).....	59
4.11 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 0 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	60
4.12 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 1 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	61
4.13 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 3 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	62
4.14 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 5 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	63
4.15 ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ และร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet).....	69
4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ และร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder).....	71
4.17 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ จากงานวิจัยฉบับอื่น.....	72
4.18 การเปรียบเทียบระหว่าง 1 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet) และ 3 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	73
4.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยากับงานวิจัยฉบับอื่น.....	74
ข.1 ข้อมูลในการหาขนาดผลึกของ NiO บน SiO ₂ (Pellet)	84
ข.2 ข้อมูลในการหาขนาดผลึกของ NiO บน SiO ₂ (Powder).....	85
ข.3 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO ₂ (Pellet).....	85
ข.4 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO ₂ (Powder).....	85
ข.5 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดลอง.....	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	88
ค.2 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	89
ค.3 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	90
ค.4 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	90
ค.5 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	91
ค.6 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	92
ค.7 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	92
ค.8 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	93
ค.9 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	94
ค.10 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	94
ค.11 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	94
ค.12 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni- SiO ₂ (Pellet).....	95
ค.13 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	95
ค.14 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni- SiO ₂ (Powder).....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.15 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni- SiO ₂ (Powder)	96
ค.16 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO ₂ (Powder).....	96
ค.17 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ CO ในแต่ละชั่วโมง ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet).....	96
ค.18 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ H ₂ ในแต่ละชั่วโมง ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet).....	97
ค.19 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ CO ในแต่ละชั่วโมง ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder).....	97
ค.20 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ H ₂ ในแต่ละชั่วโมง ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder).....	97

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง (Fixed-bed Reactor).....	12
2.2 (ก) ซิลิกาเจล ของแข็ง สำเร็จรูป (ข) ซิลิกาเจล จากสถานะของเหลวที่ผ่านการระเหย.....	13
2.3 นิกเกิล (II) ไนเตรต	15
2.4 เครื่อง X-ray Diffractometer และลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	16
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	17
2.6 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	19
2.7 ส่วนประกอบของเครื่อง Gas Chromatography	20
3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนแบบซูป	26
3.2 ขั้นตอนการแพ็คตัวเร่งปฏิกิริยาลงในรีแอกเตอร์.....	29
3.3 (ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิและทิศทางการไหลในท่อ (ข) ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed Reactor).....	29
3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	30
3.5 ตัวอย่าง XRD pattern	32
3.6 (ก) เครื่องมือสำหรับเคลือบทองบนสารตัวอย่าง (ข) ตัวอย่างภาพ 3 มิติที่ได้ (ค) การเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ SEM	33
3.7 ตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ Element mapping	34
3.8 การเตรียมสารตัวอย่างและการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (FT-IR).....	34
3.9 ตัวอย่างการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatography.....	35
3.10 แผนผังกระบวนการในการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา	36
4.1 แสดงลักษณะก่อนการเผาสารของ SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni ต่าง ๆ (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt (ง) 5 %wt.....	38
4.2 แสดงลักษณะหลังการเผาสารของ SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni ต่าง ๆ (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt (ง) 5 %wt.....	39
4.3 แสดงลักษณะก่อนการเผาสารของ SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni ต่าง ๆ (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt (ง) 5 %wt.....	39
4.4 แสดงลักษณะหลังการเผาสารของ SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni ต่าง ๆ (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt (ง) 5 %wt.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณนิกเกิลต่าง ๆ และเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐาน.....	42
4.6 กราฟแสดงความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณนิกเกิลต่าง ๆ และเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐาน.....	43
4.7 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	46
4.8 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	47
4.9 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	48
4.10 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	49
4.11 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	50
4.12 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	51
4.13 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	52
4.14 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	53
4.15 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	54
4.16 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	56
4.17 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	57
4.18 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Pellet).....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Powder).....	59
4.20 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Powder).....	61
4.21 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Powder).....	62
4.22 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (Powder).....	63
4.23 กราฟแสดง Infrared spectra ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO บนตัวรองรับ SiO ₂ (Pellet) ปริมาณ Ni แตกต่างกัน	64
4.24 กราฟแสดง Infrared spectra ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO บนตัวรองรับ SiO ₂ (Powder) ปริมาณ Ni แตกต่างกัน	65
4.25 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet)	66
4.26 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder).....	67
4.27 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	67
4.28 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	68
4.29 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	68
4.30 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	69
4.31 ร้อยละการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์ แก๊สสังเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂	87
ค.1 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet).....	98
ค.2 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder).....	98
ค.3 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน	99
ค.4 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน	99
ค.5 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	100
ค.6 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H ₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO ₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน	100

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Ni-SiO ₂	นิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา
IWI	การตกตะกอนแบบจุ่มชุบ (Incipient wetness impregnation)
SiO ₂	ซิลิกา
Ni	นิกเกิล
%wt	ร้อยละโดยมวล
DRM	Dry reforming of methane
Syngas	Synthesis gas
XRD	X-ray Diffractometer
SEM	Scanning Electron Microscopy
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
GC	Gas Chromatography
TCD	Thermal Conductivity Detector
FID	Flame Ionization Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกกำลังเผชิญวิกฤติปัญหาสิ่งแวดล้อมและวิกฤติพลังงาน จึงสนใจศึกษาแก๊สชีวภาพ (Biogas) ที่มีความสำคัญเพิ่มขึ้น เนื่องจากการช่วยลดวิกฤติทั้งสองปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น แก๊สชีวภาพเป็นแหล่งสำคัญของพลังงานทดแทนและพลังงานที่ยั่งยืน เกิดขึ้นจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีววิทยา (Biological Treatment) ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Condition) องค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพ ได้แก่ มีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70 % คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28-38 % และแก๊สอื่น ๆ ประมาณ 2 % เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ เป็นต้น (พิชญ, 2554) แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas, Syngas) เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสม โดยมีส่วนผสมหลักประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สสังเคราะห์ยังเป็นตัวกลางในการผลิตแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ (Synthetic natural gas, SNG) นอกจากนี้ ยังมีการผลิตปิโตรเลียมสังเคราะห์เพื่อใช้ในด้านเชื้อเพลิง ดังเช่นในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการเปลี่ยนรูปแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สชีวภาพ เพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Osarieme *et al.*, 2017) ดังนั้น การดำเนินการศึกษางานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่ต้องการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยการใชตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ที่ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับซิลิกาเจลอสัณฐาน (Amorphous SiO_2) 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเจล ที่มีลักษณะแข็ง สำเร็จรูป (SiO_2 -Pellet) และซิลิกาเจล ที่ผ่านการระเหยน้ำออก (SiO_2 -Colloid) โดยขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้วิธีการจุ่มชุบ (Incipient wetness impregnation, IWI) ซึ่งเป็นการแพร่ซึมของโมเลกุลเข้าไปยังอนุภาค หลังจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา นิกเกิลจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติ (Characterization) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี รวมถึงการวิเคราะห์ทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ทำการสังเคราะห์ได้ และนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพ (Biogas) ไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) โดยผ่านปฏิกิริยา Dry reforming of methane

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา (NiO-SiO_2) โดยวิธีการจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation, IWI)

1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยผ่านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ SEM, EDS, XRD และ FT-IR

1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ที่ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับซิลิกาเจลอสัณฐาน 2 ชนิด ที่มีรูปร่างลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

1.2.4 ศึกษาปริมาณแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ที่ได้จากปฏิกิริยา Dry reforming of methane

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา (NiO-SiO_2) โดยวิธีการจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation, IWI)

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

1.3.2.1 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.3.2.2 ตรวจสอบวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (Energy dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)

1.3.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

1.3.2.4 ตรวจสอบการสั่นของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

1.3.3 ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 1, 3 และ 5 %wt

1.3.4 ศึกษาผลของตัวรองรับซิลิกาเจลอสัณฐานเกรดการค้า (Commercial) 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเจล ที่มีลักษณะแข็ง สำเร็จรูป SiO_2 (Pellet) และซิลิกาเจล จากสถานะของเหลว ที่ผ่านการระเหยน้ำออก จนเกิดเป็นผงสีขาว SiO_2 (Powder)

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้โดยผ่านปฏิกิริยา Dry reforming of methane

1.3.6 ศึกษาปริมาณสารผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

1.3.7 ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดผลึก (Crystallite size) ของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ขนาดรูพรุน (Pore diameter) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO₂) ทั้ง 2 ชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา (NiO-SiO₂) ด้วยวิธีจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation, IWI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแก๊สมีเทน (CH₄) ไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) โดยผ่านปฏิกิริยา Dry reforming of methane

1.4.2 สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา (NiO-SiO₂) ที่สังเคราะห์ได้ โดยให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับผลการทดลอง

1.4.3 สามารถเปรียบเทียบและได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับที่ดี

1.4.4 ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพและมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.5 สามารถสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ได้ในปริมาณที่สูง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิง พลังงานทดแทนในส่วนต่าง ๆ และช่วยลดแก๊สมีเทน (CH₄) เข้าสู่สิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานแก๊สชีวภาพ (บริษัท เอ็นเนอร์ยี วิชั่น จำกัด, 2563)

แก๊สชีวภาพ (Biogas หรือ Digester gas) หรือ ไบโอดีแก๊ส คือ แก๊สที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปจะหมายถึง แก๊สมีเทน (CH_4) ที่เกิดจากการหมัก (Fermentation) ของอินทรีย์วัตถุ ซึ่งประกอบด้วย ปุ๋ยคอก โคลนจากน้ำเสียขยะประเภทของแข็งจากเมือง หรือ ของเสียชีวภาพจากอาหารสัตว์ภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ

2.1.1 หลักการผลิตแก๊สชีวภาพ

หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ คือ สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยกลุ่มจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (ไร้ออกซิเจน) โดยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น กลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติกจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจน และขั้นตอนสุดท้ายกลุ่มแบคทีเรียจะสร้างมีเทนโดยเปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจนให้กลายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (หรือแก๊สชีวภาพ) ซึ่งแก๊สดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้น เหนือผิวน้ำ และจะถูกรวบรวมนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทนต่อไป

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน จะให้องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ที่ประกอบไปด้วย แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50% แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำเล็กน้อย ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยปกติการกำจัดค่า Chemical Oxygen Demand (COD) 1 กิโลกรัม จะสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 0.3-0.5 ลบ.ม. ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท โดยแก๊สมีเทนจะมีค่าความร้อนประมาณ 39.4 เมกะจูล/ลบ.ม. สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 9.7 kWh

2.1.3 รูปแบบการนำแก๊สชีวภาพมาผลิตเป็นพลังงาน

1. การนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เป็นรูปแบบการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์โดยการเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้กับหัวกกลูกสุกร ใช้ในครัวเรือน ฯลฯ
2. การใช้แก๊สชีวภาพในการผลิตพลังงานกลหรือไฟฟ้า เป็นรูปแบบการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ โดยการนำไปผลิตเป็นพลังงานกล/ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้ว สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก
3. การผลิตพลังงานร่วมเป็นการผลิตพลังงานกลไฟฟ้าและความร้อนร่วมกัน ซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อนเพียงอย่างเดียว

2.1.4 ศักยภาพสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ

1. วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ ได้แก่
 - เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย
 - มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง
 - มีปริมาณความชื้นสูง
 - มีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ
2. แหล่งวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ
 - ขยะชุมชน ได้แก่ ขยะชุมชนในส่วนของขยะอินทรีย์
 - ของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานเป็ยร์
 - ของเสียที่เป็นกากตะกอนที่เป็นส่วนของสารอินทรีย์
 - ของเสียจากการเกษตร ได้แก่ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น หมู วัว ไก่ เป็นต้น

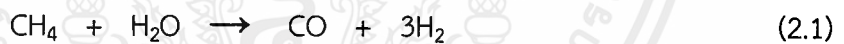
2.2 แก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) หรือที่เรียกว่า Syngas เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสม ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ใช้ในการผลิต Synthetic Natural Gas (SNG) และแอมโมเนีย หรือเมทานอล นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตั้งต้นในการ

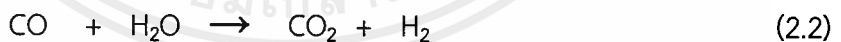
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตไดเมทิลอีเทอร์ แก๊สสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติเผาไหม้ได้ดีจึงนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน วิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์ คือ การใช้ขบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) ของมวลชีวภาพ ถ่านหิน หรือขบวนการเปลี่ยนสถานะจากพลังงานเหลือใช้ โดยใช้ขบวนการเปลี่ยนรูปไอน้ำของแก๊สธรรมชาติ หรือสารไฮโดรคาร์บอนเหลวให้เป็นแก๊สไฮโดรเจน ขบวนการที่สำคัญในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming) โดยปฏิกิริยาแรกเป็นการดูดกลืนความร้อนระหว่างไอน้ำกับถ่านโค้กร้อน ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เมื่อถ่านโค้กเย็นลงจนการดูดกลืนความร้อนจบลงจะมีอากาศเย็นเข้ามาแทนที่ไอน้ำ ซินแก๊ส (syngas) หรือ synthesis gas สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอื่น ๆ ดังนั้น ขยะชุมชนหรือของเสียจะไม่ใช่ของไร้ประโยชน์อีกต่อไป แต่จะกลายเป็นวัตถุดิบตั้งต้น (feedstocks) สำหรับแก๊สซิไฟเออร์ (gasifier) (Partho, et al. 2018)

ปฏิกิริยาที่สองและที่สามเป็นขบวนการคายความร้อน โดยป้อนคาร์บอนไดออกไซด์จนถ่านโค้กร้อน แล้วจึงเริ่มขบวนการดูดกลืนความร้อนอีกครั้ง ได้คาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สผู้ผลิต (Producer Gas) จากนั้นเริ่มขบวนการดูดและคายความร้อน เมื่อถ่านโค้กเริ่มเสื่อมสภาพจึงใช้ออกซิเจนแทนอากาศ เพื่อลดปัญหาค่าพลังงานแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงในขบวนการผลิต แอมโมเนียในสเกลที่ใหญ่ขึ้น จึงมีความต้องการไฮโดรเจนสังเคราะห์จากแก๊สธรรมชาติตั้งในสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2 (Zhenghong and Fei, 2018)



หากต้องการไฮโดรเจนสูงขึ้น ต้องใช้ไอน้ำมากขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



2.2.1 การสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ (นวดล, 2555)

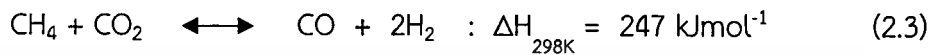
เชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้เพื่อผลิต แก๊สสังเคราะห์ มีหลากหลายชนิด ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน หรือ สารชีวมวล โดยมีวิธีการผลิตคือวิธีการเปลี่ยนรูปโดยปราศจากน้ำ (Dry Reforming, DR) กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Reforming) หรือการเปลี่ยนรูปโดยปราศจากน้ำ (Dry Reforming, DR) เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ แต่จะต่างกันตรงที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้น ข้อดีของกระบวนการนี้คือช่วยลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนแต่มีข้อเสียคือสัดส่วนของไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการนี้จะต่ำกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าเนื่องจากจะมีอนุภาคคาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ไปเกาะอยู่ที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

แก๊สชีวภาพเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยแสดงได้ดังสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ (L. Zhang, et al. 2019)

- Dry Reforming of Methane (DRM)



- Direct Methane Decomposition (DMD)



- Boudouard reaction



2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (การะเกด, 2556)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เร่งอัตราเร็วในการเกิดหรือแตกออก ของพันธะเคมี เพื่อเพิ่มปริมาณและควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์เฉพาะตามต้องการ การเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อคุณภาพชีวิต เช่น การลดลงของแก๊สพิษที่ปล่อยจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ อาหารและผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย และยาใหม่ๆ ที่ส่งเสริมสุขภาพที่ดี สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นได้จากการควบคุมของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อธุรกิจด้านสุขภาพ ความงาม รวมทั้งอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมีซึ่งมีมูลค่ามหาศาล อย่างไรก็ตามทุกวันนี้มนุษย์เผชิญกับความท้าทายในการแก้ไขปัญหาขาดแคลนพลังงาน การลดปริมาณผลพลอยได้ที่อันตรายจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม การบำบัดสิ่งแวดล้อมให้ปราศจากมลพิษ ตลอดจนการป้องกันมลพิษและการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและมีความจำเพาะสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้ คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (phase) เดียวกับสารตั้งต้น (reactant) และผลิตภัณฑ์ (product) ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารตั้งต้น

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาอวิวิธพันธ์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น และ ผลผลิตมักเป็นของแข็ง ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอวิวิธพันธ์ เช่น โลหะ และซีโอไลต์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ใช้กลไกการดูดซับ (adsorption) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคายซับ (desorption) ตัวทำปฏิกิริยาจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณตำแหน่งกัมมันต์ (active site) และเกิดปฏิกิริยาผลผลิตที่เกิดขึ้นถูกคายออก จากตำแหน่งกัมมันต์ เพื่อให้ตัวทำปฏิกิริยาเข้ามาดูดซับบนพื้นผิวแล้ว เกิดปฏิกิริยาต่อไป

ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวมีข้อได้เปรียบกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม คือ มีความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยาร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงกว่า แต่อุปสรรคที่สำคัญของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ คือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก ทั้งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีมากมายและยังมีความหลากหลายในการนำมาประยุกต์ใช้ แต่กระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาทางออกที่ดีที่สุด คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธ์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็น ของแข็ง มีพื้นที่ผิวและการกระจายตัวของอนุภาคสูง อยู่บนตัวรองรับ ที่มีความเสถียรสูง ทนต่อสารเคมีและความร้อน

2.3.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร, 2541)

1. ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Efficiency) ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยตรงจากค่าความถี่ผันเวียน (Turnover Frequency) ซึ่งแสดงโดยค่าคงที่ปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งกัมมันต์ (Turnover Number) นั่นคือจำนวนวัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยเวลา

2. วัฏจักรของการตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cycle) วัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยกลไกปฏิกิริยา (Reaction Mechanism) ที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediates) และสารผลิตภัณฑ์ โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อวัฏจักรของการเร่งปฏิกิริยาครบรอบแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมา และสามารถหากฎอัตราของปฏิกิริยารวมได้จากกลไกของปฏิกิริยา ในการหากกลไกปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา เอกพันธ์หาได้จากสมมูลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ ส่วนการหากกลไกปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธ์หาได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับบนโลหะ

3. การเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Energetics) ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มความเร็วของปฏิกิริยาได้โดยเปลี่ยนแปลงวิถีของปฏิกิริยา โดยมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกิบส์ลดลงแต่ไม่ต่ำกว่าค่าของสารผลิตภัณฑ์ ถ้ามีค่าต่ำกว่าเดิมมากจะทำให้วัฏจักรของปฏิกิริยาถูกทำลาย และเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

4. กัมมันตภาพ (Activity) คือ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุล เป็นการวัดเชิงปริมาณว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์มากน้อยเพียงใด การหาค่าร้อยละของกัมมันตภาพแบบที่ง่ายที่สุดหาได้ ดังสมการที่ 2.6

$$\%Activity = \frac{(\text{Input reactant} - \text{Output reactant})}{\text{Input reactant}} \times 100 \quad (2.6)$$

5. สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (Selectivity) คือ ความสามารถในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการโดยเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reactions) น้อยที่สุด การหาสัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยาหาจากสัดส่วนของปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด (Desired Reaction) หารด้วยปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด (All Reactions) ดังสมการที่ 2.7

$$\%Selectivity = \frac{(\text{Desired reaction})}{\text{All reactions}} \times 100 \quad (2.7)$$

6. อายุการใช้งาน (Life Time) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาต้องคำนึงเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเปลี่ยนไปเป็นอยู่ในรูปที่ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้อีก คือ เปลี่ยนเป็นสารกัมมันต์ (Inactive) หรือเสื่อมสภาพ (Deactivated)

7. การทำให้คืนสภาพ (Regeneration) การนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพแล้ว หลังจากการใช้งานมาทำให้อยู่ในสภาพที่ว่องไวและการทำงานได้ดังเดิม

8. ตัวยับยั้ง (Inhibitor) คือ สารที่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดช้าลง และทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เรียกว่า เกิดพอยซัน (Poison)

9. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deterioration of the catalyst) การเกิดภาวะพิษบนตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการเกาะตัวของเขม่าบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดกระบวนการความร้อนของปฏิกิริยากระบวนการเผาผนึก (Sintering process) ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไว

2.3.2 การดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

สำหรับขั้นตอนการดูดซับและการคายซับเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ การดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ การเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) กับตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (Active Site)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไป เช่นเดียวกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์กล่าว คือ มีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

การคายซับของโมเลกุลในตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธีพินธุ์ คือ การแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา ซึ่งจะเหมือนกับปฏิกิริยาการแตกตัว (Dissociation) ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้ สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น ของเหลวกับของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับแบบนี้ สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนๆ และไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) มักจะเกิดในสถานะอุณหภูมิต่ำและมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้ การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้าง ของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ หลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer)

2.3.3 กลไกการดูดซับของปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (สันทัด, 2549)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวมายังของแข็ง หรือของเหลวเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของตัวดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน

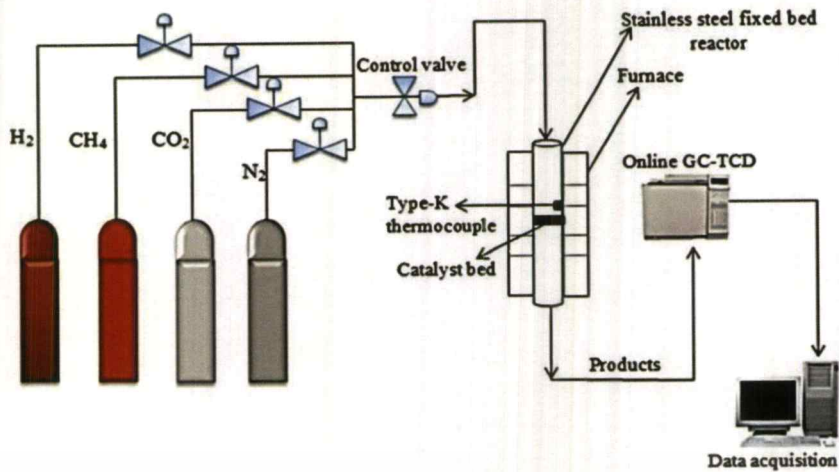
2.3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (W. Lamai et al, 2019)

1. การตกตะกอนแบบจุ่มชุบ (Incipient wetness impregnation) ซึ่งซิลิกาในขามระเหยและละลายนิกเกิลในกรดด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายนิกเกิลในกรดลงในซิลิกาทำการทดลองใน sonication bath โดยมีหลักการคือปริมาณสารละลายที่หยดจะพอดีกับ pore volume ของตัวรองรับ คลื่นเสียงช่วยให้สารละลายนิกเกิลในกรดแทรกเข้าไปตามรูพรุนของตัวรองรับได้

2.4 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์

2.4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์ (Fluidized-Bed Reactor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานง่ายและราคาถูก จึงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการหรือในระดับนำร่อง โดยในระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดการแพร่ระหว่างเฟสถูกกำจัดโดย Gas-Solid Contractor การใช้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งเป็นทางเลือกที่ทำให้อุณหภูมิตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ทางเข้าจนถึงทางออกมีความเหมาะสม เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกออกแบบอย่างง่าย โดยให้มีการบรรจุสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องแบบคงที่ ดังนั้นสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ขณะที่มีการให้ความร้อน จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์จึงไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง เมื่อเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ แล้วจึงใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่เพื่อทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ต่อไป เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-Bed Reactor) (Mohammed Anwar Hossain, 2017)

2.4.2 การใช้งานแก๊สสังเคราะห์ในด้านต่าง ๆ

ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี การกลั่น การผลิตปุ๋ย และมากกว่า 35 ปี ในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า และอื่น ๆ โดยสังเคราะห์ผ่าน กระบวนการฟิชเชอร์-โทรปช์ (Fischer-Tropsch) โดยปัจจุบันถือว่ามียุทธศาสตร์สำคัญทั่วโลกในเรื่องของความต้องการด้านพลังงาน โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นประเภทถ่านหิน ปิโตรเลียมโค้ก และชีวมวล แก๊สซิฟิเคชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงกลาง เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการจัดขยะ และการสกัดพลังงานที่มีค่าจากของเสีย ดังนั้นแก๊สสังเคราะห์จึงมีประโยชน์อย่างมาก และยังเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืน (KANG YONG GROUP, 2016)

2.5 ซิลิกอนไดออกไซด์

2.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิกา (สยามเคมี, 2557)

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารประกอบของซิลิกอน และออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น และรส สูตรโมเลกุล คือ SiO_2 น้ำหนักโมเลกุล : 60.1 จุดเดือดมากกว่า $2,200^\circ\text{C}$ จุดหลอมเหลว $1,713^\circ\text{C}$ เป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน มีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยซิลิกาชนิดอสัณฐานจะไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาชนิดผลึก เพราะซิลิกาอสัณฐานมีพื้นผิวมากกว่า และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น เป็นสารดูดซับความชื้น เป็นสารเพิ่มความเงา เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ และสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ซิลิกาอสัณฐาน (สยามเคมี, 2557)

เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) และสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปไม่แน่นอน ไม่เป็นผลึก มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือ แอนไฮเดรต (Anhydrate) มีพันธะหลายรูปแบบ เช่น Siloxane (-Si-O-Si-), Silanol (-Si-O-H-), Silane (-Si-H), Organic silicon (-Si-O-R- หรือ -Si-C-R-) การสังเคราะห์จะสามารถสังเคราะห์ได้จากการให้ความร้อนจนมีสถานะเป็นไอ และการตกตะกอนสารละลายแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ได้แก่

1. วิเทรียสซิลิกา (Vitreous silica) หรือ ซิลิกาแก้ว (silica glass) เป็นของแข็ง ไม่มีรูพรุน ผลิตได้จากการหลอมเหลวผลึกซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้เย็นตัว

2. ซิลิกาเจล (Silica gel) ได้แก่ ซิลิกาเจล (SiO₂-Pellet) ดังรูปที่ 2.2(ก) ที่อยู่ในสถานะของแข็งสำเร็จรูปที่มีรูพรุน รูปร่างทรงกลม มีพื้นที่ผิว ถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานพิเศษนี้ เป็นชนิด Q-10 ผลิตโดยบริษัท FUJI SILYSIA CHEMICAL., LTD. ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1 และซิลิกาเจลที่อยู่ในสถานะของเหลว ดังรูปที่ 2.2(ข) โดยกำจัดน้ำออกด้วยการระเหย (Evaporation) จนเกิดเป็นผงสีขาว (SiO₂-Powder) ซึ่งนำมาใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานพิเศษนี้เป็นซิลิกาที่มีความเข้มข้น 30 wt. % ที่ลอยตัวในน้ำ (H₂O) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd. ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) ซิลิกาเจล ของแข็ง สำเร็จรูป (ข) ซิลิกาเจล จากสถานะของเหลวที่ผ่านการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของซิลิกาเจลสำเร็จรูปที่นำมาใช้เป็นตัวรองรับ

ซิลิกาเจล สถานะของแข็ง สำเร็จรูป SiO ₂ (Pellet)	
ขนาดรูพรุน (Average pore diameter)	~10 nm (Mesoporous)
ปริมาตรรูพรุน (Average Pore volume)	1.00 ml/g
พื้นที่ผิว (Surface area)	300 m ² /g
ราคา (Price)	5,600 บาท/ลิตร

(Fujisilysia.com)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของซิลิกาเจลที่ผ่านการระเหยและนำมาใช้เป็นตัวรองรับ

ซิลิกาเจล จากสถานะของเหลวที่ผ่านการระเหยน้ำ SiO ₂ (Powder)	
ขนาดรูพรุน (Average Pore diameter)	~10 nm (Mesoporous)
ปริมาตรรูพรุน (Pore volume)	1.06 ml/g
พื้นที่ผิว (Surface area)	230 m ² /g
ราคา (Price)	1,410.28 บาท/ลิตร

(M. Nowosielska et al, 2004, Sigmaaldrich.com)

3. ซิลิกาผง (Powder silica) เป็นซิลิกาที่เตรียมได้จากสภาวะกลายเป็นไอ และการตกตะกอนของสารละลายที่มีลักษณะการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง เมื่อตกตะกอนจะได้ซิลิกาที่มีมีขนาดเล็กมาก และมีพื้นที่ผิวสูง

2.5.3 ประโยชน์ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)

- ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ยาง พลาสติก
- ใช้เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดในผลิตภัณฑ์กาว
- ใช้เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว
- ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สี ยา เครื่องสำอาง
- ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายกันผสมเข้ากันได้ดี เช่น น้ำกับน้ำมัน
- ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดโฟม
- ใช้เป็นสารปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

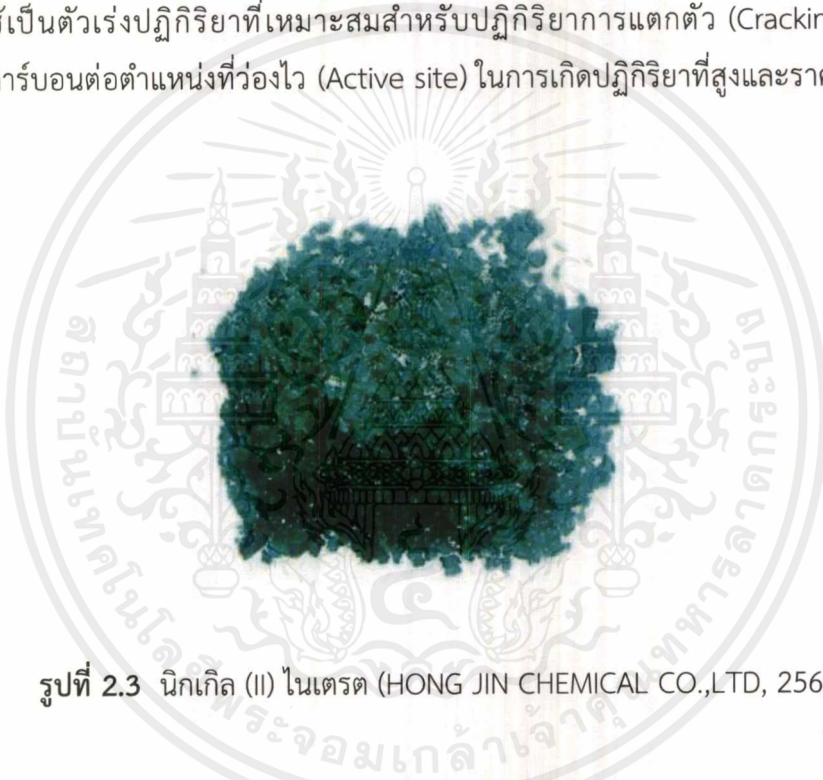
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้เป็นสารเพิ่มความเงา
- ใช้เป็นสารดูดความชื้น
- ใช้เป็นสารเติมแต่ง

2.6 นิกเกิล (II) ไนเตรต

2.6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนิกเกิล

รูปที่ 2.4 นิกเกิล (II) ไนเตรต ที่มีน้ำประกอบ 6 โมเลกุล สูตร $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ มวลโมเลกุล 290.81 g/mol มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีเขียว มีจุดหลอมเหลว 56.7°C ความสามารถในการละลายน้ำ 940 g/l ที่ 20°C อุณหภูมิของการสลายตัว 137°C นิกเกิลเป็นโลหะทรานสิชันที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) ของมีเทน เนื่องจากมีคาร์บอนต่อตำแหน่งที่ว่างไว้ (Active site) ในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงและราคาถูก (Naito, 2000)



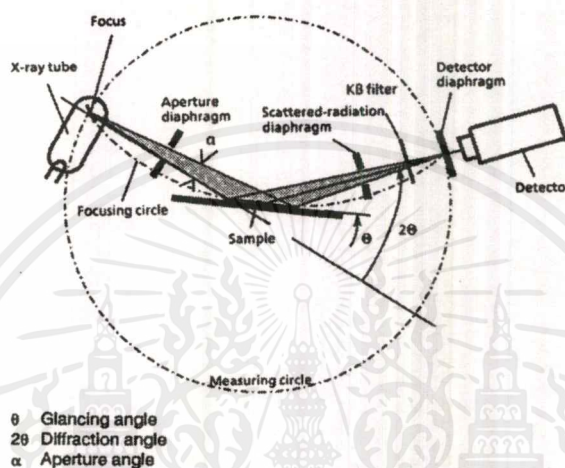
รูปที่ 2.3 นิกเกิล (II) ไนเตรต (HONG JIN CHEMICAL CO.,LTD, 2563)

2.7 เทคนิคสำหรับการตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

2.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2563)

เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 2.5 เครื่อง X-ray Diffractometer และลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน ก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะที่สภาวะทดสอบเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.4 เครื่อง X-ray Diffractometer และลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (P. Mbule, 2020)

2.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวและปริมาณของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2563)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยาย 6-1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร สามารถถ่ายภาพตัวอย่างได้หลากหลายโดยไม่มี ความจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าก่อนการถ่ายภาพ โดยเลือกระบบสุญญากาศในห้องใส่ ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างแต่ละประเภท ได้แก่

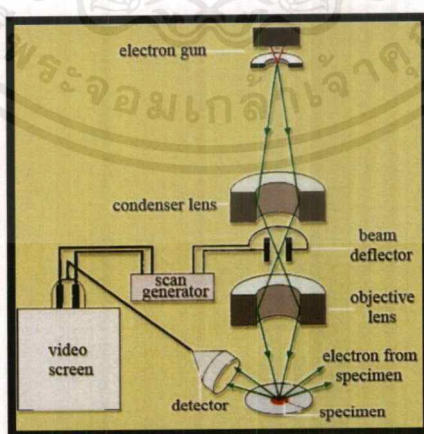
1. ระบบสุญญากาศระดับสูง (High Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และนำไฟฟ้า เช่น โลหะ เป็นต้น
2. ระบบสุญญากาศระดับต่ำ (Low Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แข็ง และไม่นำไฟฟ้าเช่น พอลิเมอร์ ยาง เป็นต้น
3. ระบบสุญญากาศระดับสภาวะแวดล้อม (Environmental SEM) ที่สามารถทำงานที่ความดัน 10 ถึง 2600 Pa เหมาะกับตัวอย่างที่มีความชื้น มีน้ำเป็นองค์ประกอบ สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับระดับความชื้นในห้องใส่ตัวอย่างได้ตามความต้องการและสามารถวัดตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำได้ เช่น ไอคริม ตัวอย่างแช่แข็ง ตัวอย่างทางชีวภาพ ทางการแพทย์ เป็นต้น

โหมดการวิเคราะห์เพิ่มเติม

1. การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) เป็นการวิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่าง ตั้งแต่ธาตุ B โบรอน ถึง U ยูเรเนียม วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ และสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิวตัวอย่างที่ศึกษาได้
2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง ขณะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ : มีแท่นวางตัวอย่าง ชนิดควบคุมอุณหภูมิสูง ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 1,400 องศาเซลเซียส และแท่นวางตัวอย่างชนิดควบคุมอุณหภูมิต่ำ ควบคุมได้ในช่วง -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส จึงสามารถถ่าย VDO เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างขณะปรับอุณหภูมิที่ต้องการได้
3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง ขณะปรับแรงดึง : มีชุดแท่นวิเคราะห์ทางกลของตัวอย่างด้วยเทคนิคแรงดึงขนาด 450 นิวตัน รองรับตัวอย่างได้สูงสุดที่ 1x12x65 mm มีระยะ Max Strain Travel 31 mm จึงสามารถถ่าย VDO เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างขณะใส่แรงดึงได้
4. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและส่องกราด (Scanning transmission electron microscopy (SEM)) รูปที่ 2.6 เป็นการวัดตัวอย่างที่เตรียมให้บาง เพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ส่องผ่าน เพื่อให้วัดผลได้คล้ายกับ TEM สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การศึกษาเฟสที่ผสมรุกรานการกระจายตัวของโลหะในพอลิเมอร์ตัวอย่างทางชีวภาพ เป็นต้น



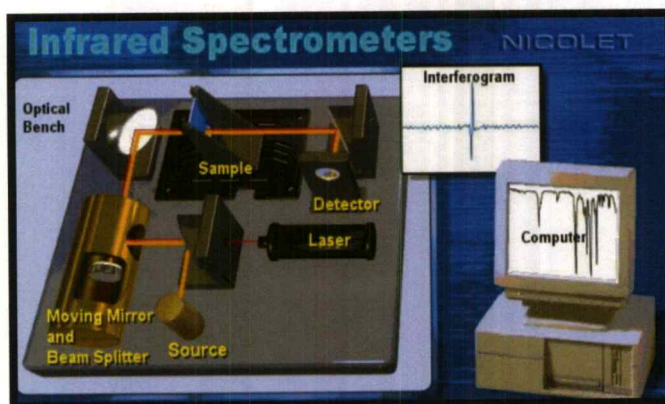
รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (กนกวรรณ, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) ซึ่งช่วยศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุหรือสารมลทินได้ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุ วิเคราะห์รอยบกพร่องและคราบสกปรกของวัสดุ วิเคราะห์วัสดุที่นำมาเป็นบรรจุภัณฑ์ วิเคราะห์วัสดุทางทันตแพทย์ วิเคราะห์ความเสียหายและการกัดกร่อนของวัสดุ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงและพัฒนาวิจัย งานในกระบวนการผลิต งานวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ งานแก้ไขปัญหาอุตสาหกรรม และงานควบคุมคุณภาพของวัสดุได้เป็นอย่างดี

2.7.3 พูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) รูปที่ 2.7 เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งสามารถ วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดช่วงกลาง (Middle infrared region) ช่วงความยาวคลื่น (l) 2.5 - 50 mm ช่วงเลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum และยังเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Nondestructive) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างหลังการวัด นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สะดวก ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวัดสั้น และมีความปลอดภัยสูงสามารถวัดตัวอย่างได้ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว (Mae Fah Luang University, 2562)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2558)

2.7.4 เทคนิคการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (ต้นกล้า, 2558)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกตัวอย่างที่เป็นสารผสมที่ระเหยได้โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง ไอที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่คอลัมน์โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) หรือ carrier gas ตาม flow rate ที่ต้องการภายในคอลัมน์บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่ในการแยก เรียกว่า เฟสคงที่ (stationary phase) สารผสมจะถูกแยกออกเป็นส่วนๆที่คอลัมน์นี้ ด้วยความแตกต่างของสมบัติทางเคมีโครงสร้างน้ำหนักโมเลกุล จุดเดือดสารที่แยกได้ผ่านออกไปสู่ส่วนตรวจวัด (detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังระบบประมวลผล (Data system) ซึ่งสามารถคำนวณและรายงานผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม ให้ทราบถึงองค์ประกอบหรือเทียบปริมาณของสารตัวอย่างได้กล่าวคือสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ หลักการและส่วนประกอบที่สำคัญ ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังรูปที่ 2.8

1. Carrier gases หรือแก๊สพา มีหน้าที่นำแก๊สตัวอย่างจาก จุดฉีด (injection port) ผ่านเข้าสู่คอลัมน์และไปยัง detector แก๊สที่ ใช้งานกับเครื่อง GC เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำ ปฏิกิริยากับ โมเลกุลของ สารตัวอย่าง เช่น แก๊สฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือไนโตรเจน
2. Injector port เป็นส่วนที่ใช้ในการฉีดสารตัวอย่างเข้า คอลัมน์โดยทั่วไปส่วนที่ ฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (inlet) มักจะมีตัวให้ความร้อน (heater) ติดตั้งอยู่ด้วย เพื่อทำให้สารตัวอย่าง กลายเป็นไอ การเลือกใช้งานว่าจะใช้ inlet แบบใดนั้นขึ้นขึ้นอยู่กับสารตัวอย่าง หากสารตัวอย่างเป็น แก๊สมักจะฉีดตัวอย่างเข้าไปด้วย gas sampling valve
3. Column เป็นส่วนที่ใช้แยกสารตัวอย่าง คอลัมน์ที่ใช้กัน ทั่วไปใน GC นั้นมีอยู่ 2 ประเภท คือ packed column และ capillary column

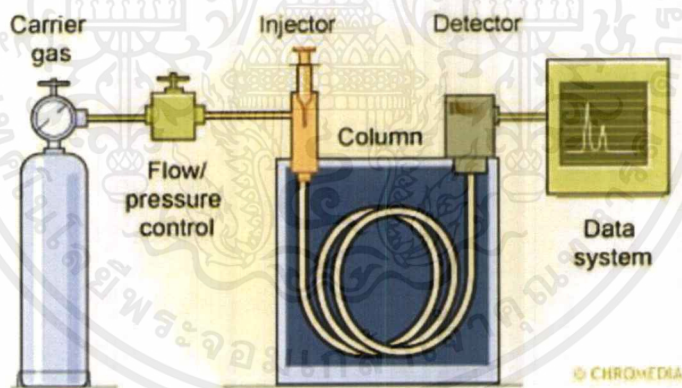
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Detector หรือส่วนตรวจวัด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับ ตรวจวัดสารเชิงเดี่ยวที่ถูกแยกออกมาจากคอลัมน์แล้วส่งสัญญาณ ไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผลสามารถจำแนกประเภทของ ส่วนตรวจวัดได้เป็นหลายประเภทตามคุณสมบัติการตรวจวัด โดยรูปแบบตรวจ วัดที่ใช้กันอย่าง กว้างขวาง

4.1 Flame Photometric Detector (FID) ใช้ในการตรวจหาสารประกอบ อินทรีย์ (สารประกอบที่มี C-C, C-H bonds)

4.2 Electron Capture Detector (ECD) เป็นอุปกรณ์ ตรวจวัดที่ดีในการตรวจ หาสารประกอบที่มีแฮโลเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ เช่น ยาฆ่าแมลง และยาปราบวัชพืช

5. Data system หรือระบบประมวลผล เป็นส่วนที่ประมวลผลและข้อมูลต่าง ๆ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งคำนวณ และรายงานผลเป็น Retention time คือ เวลาที่สารแต่ละชนิด ใช้ ผ่านคอลัมน์จากจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุดของของพีคที่ได้จากโครมาโทแกรม Retention time สามารถ นำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิง คุณภาพเพื่อระบุว่าเป็นสารชนิดใดเมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน นอกจากนี้ ลักษณะและขนาดของพีคที่ได้จากโครมาโทแกรมใช้ เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและ เชิงปริมาณได้



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่อง Gas Chromatography (Chromedia, 2016)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 Highly Dispersed Nickel-Containing Mesoporous Silica with Superior Stability in Carbon Dioxide Reforming of Methane : The Effect of Anchoring.

Wenjia Cai, *et al.* (2014) ตัวอย่างนิกบนตัวรองรับเมโซพอร์สซิลิกาที่มีปริมาณนิกเกิลแตกต่างกัน (3.1 %–13.2 %) ด้วยวิธี Evaporation-induced self-assembly ประสิทธิภาพในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทดสอบในปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์รีฟอร์มมิงของมีเทน ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิด 6.7 % Ni-SiO₂ มีการกระจายตัวสูง อนุภาคนิกเกิลมีขนาดเล็กส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดี เกิดประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดี และมีความเสถียรภาพ อนุภาคนิกเกิลขนาดเล็ก เนื่องมาจากการกระทำระหว่างโลหะนิกเกิลและนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซิลิกา สภาวะของการทำปฏิกิริยาใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง รีดิคซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำปฏิกิริยา การเปลี่ยนรูป CO₂ และ CH₄ นั้นดำเนินการที่ 650 องศาเซลเซียส (CH₄ : CO₂ : N₂ = 1 : 1 : 3) วิเคราะห์น้ำทิ้งโดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟีแบบออนไลน์ด้วย TCD มีการใช้คอลัมน์ TDX-01 สำหรับการแยก H₂, CO, CH₄ และ CO₂ การเปลี่ยนแปลง CH₄ และ CO₂, อัตราการเกิดของ H₂ และ CO, รวมถึงอัตราส่วนของ H₂/CO ที่เกิดขึ้น

2.8.2 Syngas methanation over Ni/SiO₂ catalyst prepared by ammonia-assisted impregnation.

Zhao B, *et al.* (2017) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาอสัณฐาน โดยใช้ตัวทำละลายแอมโมเนีย และพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยามีเทนเนชัน เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรดและยูวี แสดงให้เห็นว่ามีนิกเกิล 2 ชนิด ได้แก่ การก่อตัวของนิกเกิลฟิโลซิลิเกต และนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Ni²⁺) บนพื้นผิวซิลิกา จากการดูดซับนิกเกิลไนเตรต เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เทคนิคโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ และเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟสอิลิเคตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็น นิกเกิล 2 ชนิด ก่อให้เกิดนิกเกิลฟิโลซิลิเกตและมีการกระจายตัวของนิกเกิลออกไซด์สูง มีแรงกระทำระหว่างนิกเกิลและซิลิกาที่แข็งแรง หลังจากการเผา ในกระบวนการเผาเกิดการรวมตัวของนิกเกิลออกไซด์และการรวมตัวของโลหะนิกเกิลทำให้ประสิทธิภาพลดลง วิธีการเตรียมตัวเร่งที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของนิกเกิลได้ดีและมีแรงกระทำระหว่างนิกเกิลและซิลิกาแข็งแรง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยามีเทนเนชัน

2.8.3 CO₂ reforming with methane reaction over Ni@SiO₂ catalysts coupled by size effect and metal-support interaction.

L. Zhang, *et al.* (2019) การเปลี่ยน คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และมีเทน (CH₄) ถือเป็นปฏิกิริยาที่น่าสนใจ ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ช่วยลดแก๊สเรือนกระจก ปัญหาหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปฏิกิริยา คือ การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาและการเกิดสะสมคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษาที่เราได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni บนตัวรองรับ SiO_2 ที่มีโครงสร้างเป็นแกนกลางซึ่งมีโครงสร้างนาโนนิโคติน โดยวิธีไมโครอิมัลชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคนาโน Ni ที่แตกต่างกันและมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับตัวรองรับ การเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2) เปิดเผยว่าประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน Ni และความแข็งแรงจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะและตัวรองรับ จากการศึกษาพบว่า Ni บนตัวรองรับ SiO_2 ถูกเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะแสดงถึงประสิทธิภาพและความเสถียรสูงสุด ทำให้มีขนาดเล็กที่สุดของอนุภาคนาโน Ni และมีการสะสมคาร์บอนต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Ni บนตัวรองรับ SiO_2 ถูกเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส

2.8.4 การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาสำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์

จิราพัชร และคณะ (2561) โครงการพิเศษนี้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแกมมาอะลูมินาที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์และศึกษาผลของตัวเร่งต่อการเกิดแก๊สสังเคราะห์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($\text{NiO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) เตรียมวิธีตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI) โดยสังเคราะห์ผ่านเครื่องอัลตราโซนิค คลีนเนอร์ ซึ่งอาศัยการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเป็นเวลา 30 นาที ออบสารที่ 100 องศาเซลเซียส และเผาสารที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยากับแก๊สมีเทนที่สภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 500 °C ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการไหลของแก๊ส 20 mL/min ($\text{CH}_4 : \text{CO}_2 : \text{Ar} = 50 : 40 : 10$) โดยใช้เครื่องเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)

2.8.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานาโนนิกเกิล โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่มีเอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม สำหรับการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน

พรประภา และ มานพ (2553) การโหลดตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิคจุ่มซุบแบบ (incipient wetness impregnation) ละลายนิกเกิลไนเตรต 10 %wt และ 20 %wt นิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยน้ำปริมาณ 2-3 มล. โดยปริมาณน้ำดังกล่าวพอดีกับ pore volume ของตัวรองรับ จากนั้นค่อย ๆ เท SBA-15 ปริมาณ 0.5 กรัมลงไปยัง สารละลายนิกเกิลไนเตรต และน้ำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการนำแก๊สชีวภาพมาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนตัวรองรับซิลิกา เพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ อันประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ปริมาณนิกเกิลที่โหลดลงบนตัวรองรับซิลิกาในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 1, 3 และ 5 %wt ศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ซิลิกาเจลเกรดการค้าที่มีความแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเจล ที่มีลักษณะแข็ง เป็นเม็ดกลมที่สำเร็จรูป (SiO_2 -Pellet) และซิลิกาเจล มีลักษณะเป็นของเหลวที่นำมาผ่านการระเหย (Evaporation) จนเกิดเป็นผงสีขาว (SiO_2 -Powder) และเพื่อเป็นการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI)

งานวิจัยบทนี้จะกล่าวถึง เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย แก๊สและสารเคมีที่ใช้ ขั้นตอนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบจุ่มซุบ (IWI) เครื่องมือที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Characterization) ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค (XRD) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาคด้วยเทคนิค (SEM) การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (EDS) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค (FT-IR) ตามลำดับ รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา และขั้นตอนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- ชุดเครื่องแก้ว (ยี่ห้อ Duran)
 - 1.1 ปีกเกอร์ ขนาด 50 มล.
 - 1.2 หลอดหยดสาร (Dropper)
 - 1.3 ครอบกวดวงแก้ว ขนาด 10 มล.
 - 1.4 แท่งแก้วคนสารละลาย
- ซ็อนตักสารเคมี
- ถ้วยระเหยเซรามิก
- อ่างน้ำร้อน
- เครื่องชั่งสาร (ความละเอียด 4 ตำแหน่ง ± 1 ms, ยี่ห้อ Mettler Toledo, รุ่น ME-204)
- เครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ (ความถี่ 40 KHz, กำลัง 150 W, รุ่น 1860QTD)
- ชุดชาตั่ง แคลมป์จับ และโอริง
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- ชุดชาตั่ง แคลมป์จับ และโอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เตาเผาสารอุณหภูมิสูง (ความต่างศักย์ 100 V, ความถี่ 50/60 Hz, กำลัง 500 W รุ่น ROP-001)
11. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator ความต่างศักย์ 24 VDC, กำลัง 30W, รุ่น R-100, บริษัท BUCHI Thailand.,Ltd.)
12. เครื่องอัดเม็ด (Chavachote)
13. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)
14. ฉนวนใยแก้ว (Glass wool เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Chem-supply Pty.,Ltd.)
15. ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor ปริมาตร 3.7002×10^{-5} ลบ.ม., บริษัท Wisdom Invertor CO.,Ltd.)
16. ถูชิปใส่สาร (ขนาด 6 x 8 cm บริษัท Red Pack International Part., Ltd.)
17. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
18. ตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert UNB 300)

3.2 เครื่องมือใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

1. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (λ -ray Diffractometer, XRD), ยี่ห้อ Bruker, รุ่น AXS D8 Advance
2. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM), ยี่ห้อ LEO, รุ่น LEO 1455 VP
3. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface Area and Porosity Analyzer, BET), ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2020
4. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR), ช่วงเลขคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$, รุ่น Spectrum GX, บริษัท Perkin Elmer CO., Ltd.)
5. เครื่องวิเคราะห์เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC), TCD (Thermal Conductivity Detector) คอลัมน์ CP-Molsieve และ FID (Flame Ionization Detector) ใช้คอลัมน์ HP-PLOT/Q, ยี่ห้อ Varian CP-3800

3.3 แก๊สและสารเคมี

1. นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Qchemical Co., Ltd.)
2. ซิลิกาเจล (สำเร็จรูป ขนาด 0.85-1.7 มม., ชนิด Q-10, บริษัท Fuji Silisia Chemical., Ltd.)
3. ซิลิกาเจล (จากคอลลอยด์ ความเข้มข้น 30 %wt ในน้ำ (H_2O), บริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd.)
4. ททรายซิลิกา (Quartz Sand บริษัท Wako Pure Chemical Industries., Ltd.)
5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แก๊สไนโตรเจน (N_2 ความบริสุทธิ์ 99.99 % บริษัท Praxair (Thailand) ประเทศไทย จำกัด)
7. แก๊สไฮโดรเจน (H_2 ความบริสุทธิ์ 5.00 % บริษัท Praxair (Thailand) ประเทศไทย จำกัด)
8. แก๊สชีวภาพ (สัดส่วน $CH_4 : CO_2 : Ar = 50 : 40 : 10$ %โดยโมล บริษัท Thai-Japan Gas., Ltd)

3.4 วิธีการทดลอง (พรประภา และ มานพ, 2553)

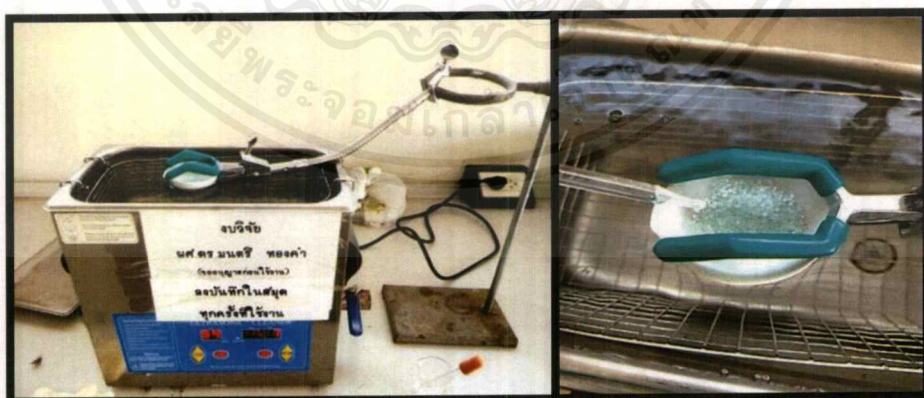
3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO_2 (Pellet) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI)

1. ชั่งซิลิกา 3.0000 กรัม ใส่ลงในถ้วยระเหยเซรามิก
2. นำไปดูดความชื้นด้วยโถดูดความชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ปิดขามระเหยด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์พร้อมเจาะรูเพื่อเป็นการระบายความร้อนและป้องกันสารรั่วไหล
4. นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก
5. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ก่อนทำการเผาสาร (Calcination)
6. นำแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ออก แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ บนตัวรองรับซิลิกาที่เป็นเกรดการค้า
7. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชั่งได้และสังเกตการเปลี่ยนแปลงหลังจากเผาสาร

3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3, และ 5 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO_2 (Pellet) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI) ดังรูปที่ 3.1

1. ชั่งนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 0.1501 กรัม (1 %wt) ใส่ลงบีกเกอร์ ขนาด 50 มล.
2. ตวงน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 3 มล. ใส่กระบอกตวง แล้วเทลงในบีกเกอร์ที่มีนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต
3. ใช้แท่งแก้วคนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายใสที่มีสีเขียว หากมีตะกอนหรือมีส่วนที่ไม่ละลายให้นำสารละลายมาปั่นกวนในอ่างน้ำร้อน ที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อทำการละลายตะกอนให้หมดไป
4. ทำการจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับทำการสังเคราะห์ที่เครื่องมืออัลตราโซนิก คลีนเนอร์ ให้เรียบร้อย

5. ชั่งซิลิกา ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม 3.0000 กรัม ใส่ลงในชามระเหย แล้วนำไปใส่ลงในอุปกรณ์อัลตราโซนิก คลีนเนอร์ ที่จัดตั้งไว้แล้ว จากนั้นทำการเปิดเครื่อง ระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อของตัวรองรับได้ดี
6. นำสารละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ที่เตรียมได้มาทำการหยดลงบนพื้นผิวของซิลิกา พร้อมกับใช้แท่งแก้วปั่นกวน สารตลอดเวลา จนครบ 30 นาที
7. นำสารผสมที่ได้ในชามระเหยมาดูความเข้มข้นด้วยโถดูความเข้มข้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. ปิดชามระเหยด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์พร้อมเจาะรูเพื่อเป็นการระบายความร้อน และป้องกันสารรั่วไหล
9. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก
10. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ก่อนทำการเผาสาร
11. นำแผ่นอะลูมิเนียมออก แล้วนำไปเผาสาร ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ บนตัวรองรับซิลิกา
12. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซึ่งได้และสังเกตการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเผาสาร
13. ทำซ้ำข้อ 1-12 หากต้องการสังเคราะห์ตัวเร่ง 3 %wt และ 5 %wt โดยชั่งน้ำหนักของนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 0.4598 กรัม และ 0.7823 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนแบบซูป (IWI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO₂ (Powder) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI)

1. นำสารละลายคอลลอยด์ซิลิกาในน้ำไประเหย ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนจนได้ผงตะกอนสีขาว
2. นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. นำผงซิลิกาที่ได้มาทำการอัดเม็ดสาร แล้วนำมาผ่านตะแกรงคัดแยกขนาด
4. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการคัดแยกขนาด 3.0000 กรัม ใส่ลงในขามระเหย
5. นำไปดูดความชื้นด้วยโถดูดความชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ปิดขามระเหยด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์พร้อมเจาะรูเพื่อเป็นการระบายความร้อนและป้องกันสารรั่วไหล
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก
8. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ก่อนทำการเผาสาร
9. นำแผ่นอะลูมิเนียมออก แล้วนำสารไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ บนตัวรองรับซิลิกา
10. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชั่งได้และสังเกตการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาสาร

3.4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 %wt Ni บนตัวรองรับ SiO₂ (Powder) ด้วยวิธีการตกตะกอน แบบจุ่มซุบ (IWI)

1. ชั่งนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 0.1501 กรัม (1 %wt) ใส่ลงบีกเกอร์ ขนาด 50 มล.
2. ตวงน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 3 มล. ใส่กระบอกตวง แล้วเทลงในบีกเกอร์ที่มีนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต
3. ใช้แท่งแก้วคนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายใสที่มีสีเขียว หากมีตะกอนหรือมีส่วนที่ไม่ละลายให้นำสารละลายมาปั่นกวนในอ่างน้ำร้อน ที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อทำการละลายตะกอนให้หมดไป
4. ทำการจัดตั้งอุปกรณ์อัลตราโซนิก คลีนเนอร์ ให้เรียบร้อย
5. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการอัดเม็ดแล้ว จำนวน 3.0000 กรัม ใส่ลงในขามระเหย แล้วนำไปใส่ลงในอุปกรณ์อัลตราโซนิก คลีนเนอร์ ที่จัดตั้งไว้แล้ว จากนั้นทำการเปิดเครื่องระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนของเสียงที่มีความถี่สูงเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อของตัวรองรับได้ดี

6. นำสารละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตที่เตรียมได้มาทำการหยดลงบนพื้นผิวของซิลิกา พร้อมกับใช้แท่งแก้วปั่นกวนสารตลอดเวลา จนครบ 30 นาที
7. นำสารผสมที่ได้ในขามระเหยไปดูความชื้นด้วยโถดูความชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. ปิดขามระเหยด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์พร้อมเจาะรูเพื่อเป็นการระบายความร้อนและป้องกันสารรั่วไหล
9. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ก่อนทำการเผาสาร
11. นำแผ่นอะลูมิเนียมออก แล้วนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ บนตัวรองรับซิลิกา
12. บันทึกน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชั่งได้หลังการเผาและสังเกตการเปลี่ยนแปลง
13. ทำซ้ำข้อ 1-12 หากต้องการสังเคราะห์ตัวเร่ง 3 %wt และ 5 %wt โดยชั่งน้ำหนักของนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 0.4598 กรัม และ 0.7823 กรัม ตามลำดับ

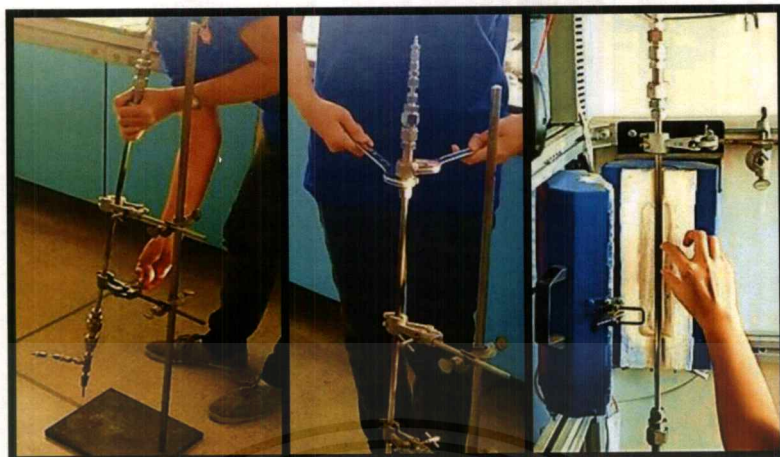
3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ Biogas ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Ni บนตัวรองรับ SiO₂

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ ลงใน Reactor ดังรูปที่ 3.2

1. นำแท่งเหล็กสั้นใส่ลงในรีแอกเตอร์
2. นำที่คีบหนีบฉนวนใยแก้ว ขนาดพอประมาณใส่ลงในรีแอกเตอร์
3. นำแท่งเหล็กยาวใส่ลงในรีแอกเตอร์ เพื่อค้ำฉนวนใยแก้วลงไปจนติดแท่งเหล็กสั้น
4. ทำการหาความสูงและตำแหน่งของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทำสัญลักษณ์ที่แท่งเหล็กยาว แล้วนำออกมาขนานข้าง แล้วทำสัญลักษณ์ที่รีแอกเตอร์อีกครั้ง
5. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ปริมาณ 0.5000 กรัม และชั่งทรายแก้ว ปริมาณ 0.5000 กรัม นำมาผสมกันแล้วเทใส่ลงในรีแอกเตอร์ (ทรายแก้ว ช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาการกระจายได้ดี และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น)
6. ทำซ้ำข้อ 4 อีกครั้ง เพื่อทำการวัดหาความสูงและตำแหน่งของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. นำที่คีบหนีบฉนวนใยแก้ว ขนาดพอประมาณใส่ลงในรีแอกเตอร์อีกครั้ง แต่ไม่ต้องทำการค้ำฉนวนใยแก้วไปจนสุด
8. วางประเก็นบนบ่าวาล์ว (ประเก็นช่วยลดการเสียดสีกันของโลหะ)
9. ประกอบรีแอกเตอร์ พร้อมขันน็อตให้แน่นด้วยประแจ เบอร์ 27 และ 24

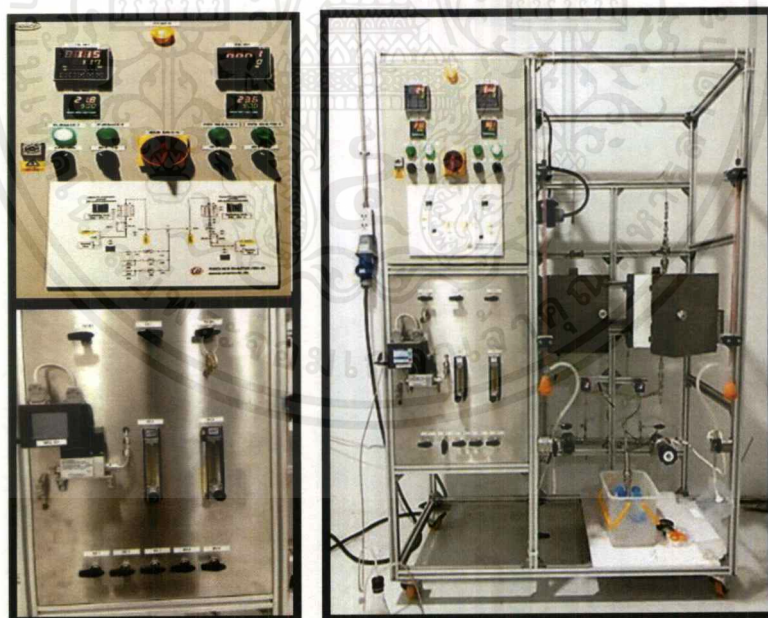
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. นำรีแอกเตอร์ มาประกอบเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ลงในรีแอกเตอร์

3.5.2 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนตัวรองรับซิลิกา ดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4

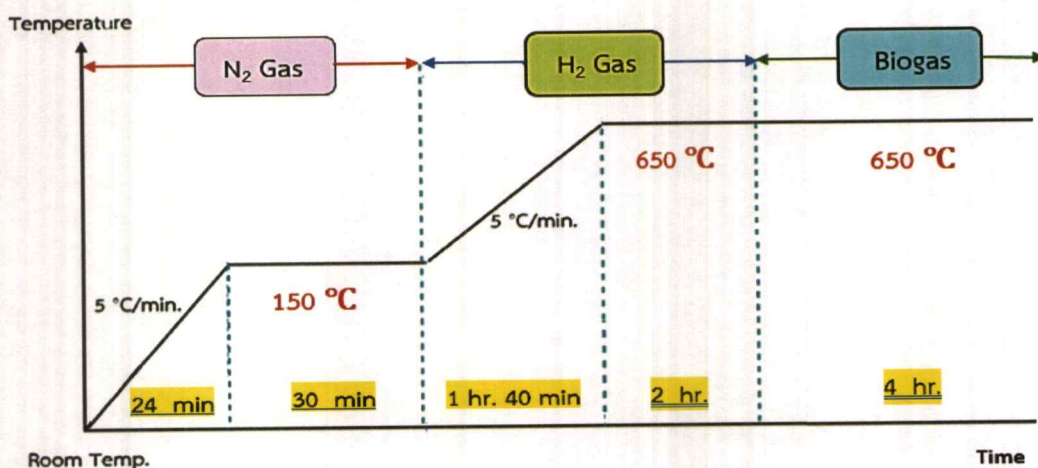


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิและทิศทางการไหลในท่อ (ข) ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed-bed reactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂

3.5.2.1 ทำการไล่ความชื้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂)

1. เปิดสวิตซ์ที่แผงควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
2. เปิดวาล์วถึงแก๊สไนโตรเจน แล้วเปิดวาล์ว BV 2 ที่แผงควบคุมให้มีทิศชี้ขึ้น
3. แก๊สไนโตรเจนจะไหลเข้าสู่ BV 2 ไปยัง Rotameter 1 (RT 1)
4. ปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนให้มีอัตราการไหลเป็น 20 มล./นาที โดยการหมุนวาล์ว RT 1 แล้วทำการบิบฟองสบู่ให้พร้อมทั้งจับเวลาให้ฟองสบู่เคลื่อนที่ผ่านสเกล 5 ช่องภายใน 15 วินาที
5. ปรับวาล์ว TV 1 ชี้ไปทางด้านซ้าย เพื่อให้แก๊สไนโตรเจนเข้าฝั่งรีแอกเตอร์ตัวที่ 1
6. ปรับวาล์ว TV 101 ชี้ไปทางด้านซ้าย เพื่อให้แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่รีแอกเตอร์
7. สังเกตฟองแก๊สในฟลาสก์ แล้วทำการเปิดปุ่ม Main switch
8. เปิดปุ่ม Furnace 1 เพื่อให้เตาเผาทำงาน
9. ทำการตั้งค่าสภาวะที่ใช้ในปฏิกิริยา
10. หลังจากตั้งค่าสภาวะของปฏิกิริยา ให้ทำการกดปุ่ม ▲ ค้างไว้เพียงครั้งเดียว แล้วระบบจะเริ่มทำงาน
11. รออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนเป็น 150 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส รวมทั้งสิ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
12. เมื่อใกล้ครบ 1 ชั่วโมง ทำการปิดวาล์วถึงแก๊สไนโตรเจน และปิดวาล์ว BV 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.2 การรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีขึ้น โดยผ่านแก๊ส H_2

1. เปิดวาล์วถึงแก๊สไฮโดรเจน พร้อมเปิดวาล์ว BV 3
2. หมุนวาล์ว RT 1 เพื่อปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน
3. ปรับวาล์ว TV 1 ไปทางด้านซ้าย เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เครื่องที่ 1
4. ปรับวาล์ว TV 101 ไปทางด้านซ้ายเพื่อเพื่อให้แก๊สไฮโดรเจน เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
5. ปรับวาล์ว TV 102 ขึ้นด้านบน เพื่อแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ออกไปสู่ฟลาสก์ แล้วสังเกตฟองแก๊สที่เกิดขึ้น
6. รอกอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนเป็น 650 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่ 650 องศาเซลเซียส รวมทั้งสิ้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 40 นาที
7. เมื่อใกล้ครบ 3 ชั่วโมง 40 นาที ทำการปิดวาล์วถึงแก๊สไฮโดรเจนพร้อมปิดวาล์ว BV 3

3.5.2.3 ทำการเก็บแก๊สชีวภาพที่ได้จากถังแก๊สชีวภาพ

1. เปิดวาล์วถึงแก๊สชีวภาพ (Biogas) พร้อมเปิดวาล์ว BV 5 ขึ้นไปทางด้านบน
2. หมุนวาล์ว RT 2 เพื่อปรับอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ
3. ปรับวาล์ว TV 1 ไปทางด้านซ้าย เพื่อให้แก๊สชีวภาพ เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เครื่องที่ 1
4. ปรับวาล์ว TV 101 ไปทางด้านขวาเพื่อทำการเก็บแก๊สชีวภาพลงถุง
5. เสียบถุงเก็บแก๊สเข้ากับท่อ พร้อมกับเปิดวาล์วที่ถุงแก๊สเพื่อให้แก๊สชีวภาพไหลเข้าถุง
6. ปรับวาล์ว TV 102 ขึ้นด้านบน เพื่อแก๊สชีวภาพ (Biogas) ออกไปสู่ฟลาสก์ แล้วสังเกตฟองแก๊สที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีแก๊สไหลในท่อ
7. รอกจนแก๊สชีวภาพเต็มถุง แล้วทำการปิดวาล์วที่ถุงแก๊ส แล้วนำไปฉีด GC

3.5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

3.5.3.1 การเปิดเครื่องและตั้งค่าเพื่อวิเคราะห์สารตั้งต้นโดยเครื่องมือวิเคราะห์ GC

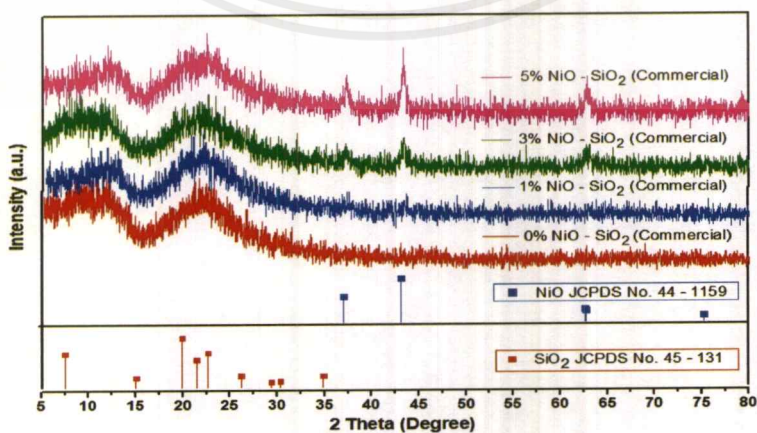
1. เปิดเครื่องมือวิเคราะห์ พร้อมกับเปิดโปรแกรม
2. เปิดวาล์วถึง gas ทั้ง 4 ถัง (อย่าลืม check gas ในถังว่าหมดหรือไม่)
3. ดันสวิตซ์ Power source ขึ้น
4. เปิดเครื่อง GC

5. เปิด CPU + เปิดจอ Computer → ใส่รหัส = 45K1639
6. เปิด Program (ซ้ายบนสุด) รอเครื่อง Connect
7. กด File → Activate Methode → test condition 2 - Off → Open → รอ ● เปลี่ยนเป็น ● ทั้งหมด
8. กด File → Activate Methode → test condition 2 - On → Open → รอ ● เปลี่ยนเป็น ● ทั้งหมด
9. นำถุงแก๊สที่เก็บได้จากถังแก๊สชีวภาพและถุงแก๊สที่เก็บได้จากการทำปฏิกิริยามาทำมาฉีดเข้าเครื่อง GC รอจนพีคปรากฏบนหน้าจอ
10. ทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ได้เพื่อคำนวณหา %Conversion, %Selectivity และ %Yield

3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Characterization)

3.6.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึก (Crystalline) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกและอสัณฐาน ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) นำสารตัวอย่างหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ มาทำการวิเคราะห์โดยสารตัวอย่างต้องมีลักษณะเป็นผง (Powder) หรือทำให้สารตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 1.0000 กรัม ในการวิเคราะห์ใช้รังสี CuK α (ความยาวคลื่น 1.54060 Å) ซึ่งใช้ Cu เป็นตัว X-ray source ศึกษา Intensity ที่ 2 θ ในช่วง 5 – 80° (step เป็น 0.020° และ counting time คือ 1 วินาทีต่อครั้ง) และทำการเปรียบเทียบมาตรฐาน JCPDS ของ NiO และ SiO₂ ให้ผลออกมาในรูปกราฟระหว่าง 2 Theta และ Intensity ดังรูปที่ 3.5

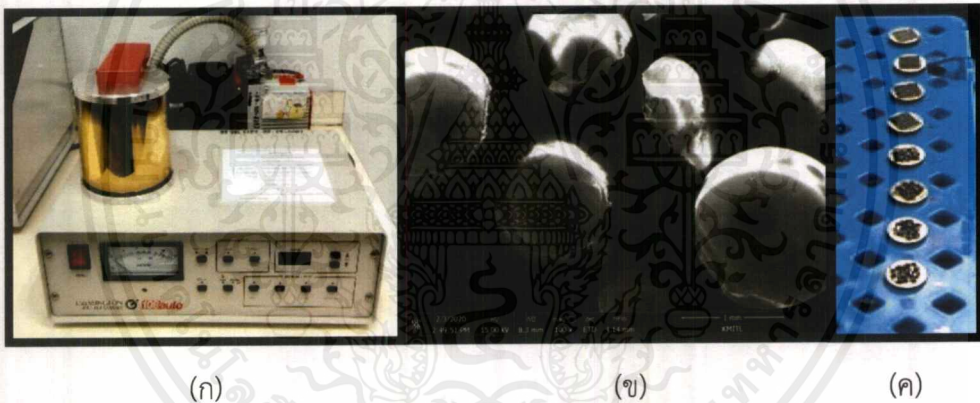


รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง XRD pattern

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การศึกษารูปร่างลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งให้ข้อมูลออกมาเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่มีพื้นหลังเป็นสีดำและตัววัตถุเป็นสีขาว ซึ่งการเตรียมตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้น ใช้ปริมาณสารเพียง 0.1000 กรัม แล้วทำการเคลือบบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยทอง (Au) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% โดยเครื่องมือที่เรียกว่า Sputter coater ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเคลือบประมาณ 30 วินาที เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ทำให้ลำแสงอิเล็กตรอนตกกระทบและเกิดการสะท้อนออกมาเพิ่มขึ้น ภาพที่ได้จะมีความชัดเจนมากขึ้นด้วย จากนั้นจึงนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 5,000 , 7,500 และ 10,000 เท่า ซึ่งให้ข้อมูลออกมาเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่มีพื้นหลังเป็นสีดำและตัววัตถุเป็นสีขาว ดังรูปที่ 3.6



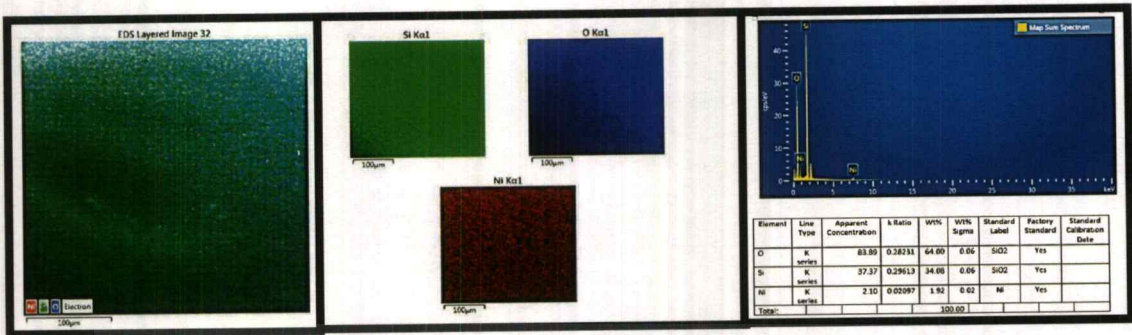
รูปที่ 3.6 (ก) เครื่องมือสำหรับเคลือบทองบนสารตัวอย่าง (ข) ตัวอย่างภาพ 3 มิติที่ได้ (ค) การเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ SEM

3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS) นิยมใช้และติดตั้งบนเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จึงเรียกเทคนิคนี้ว่า SEM-EDS จะบ่งบอกถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวอย่างว่ามีธาตุชนิดใดบ้าง ส่วนปริมาณวิเคราะห์ จะบ่งบอกถึงปริมาณธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวอย่างว่ามีมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้มักทำควบคู่กับการทำ Element mapping มีลักษณะเป็นจุดที่มีสีต่าง ๆ เพื่อบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ Element mapping

3.6.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (FT-IR)

เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) ดังรูปที่ 3.8 โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์นั้น จะใช้เครื่องมือ รุ่น FT-IR SPECTRUM GX ที่มีช่วงความถี่คลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ จะต้องนำสารตัวอย่างไปบดผสมร่วมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำมาใส่แม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดเม็ดปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 2 นาที เสร็จแล้วจะได้สารตัวอย่างที่เป็นลักษณะแผ่นวงกลมใสที่มีตัวอย่างอยู่ภายใน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ในเครื่อง FT-IR แล้วรออนพิศปรากฏขึ้นบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

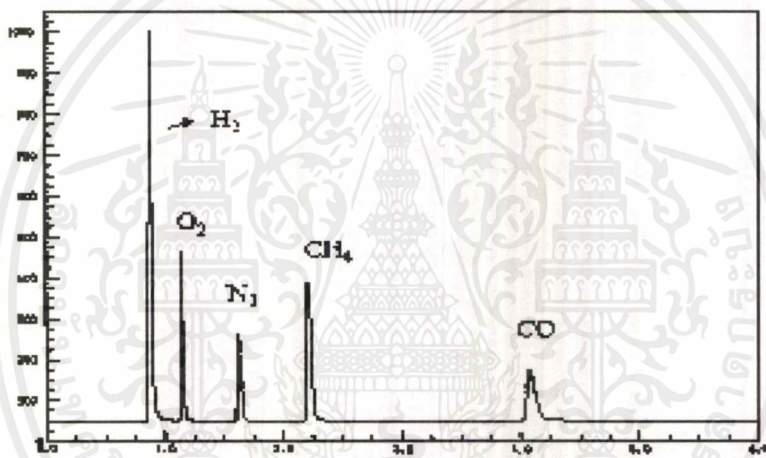


รูปที่ 3.8 การเตรียมสารตัวอย่างและการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร (FT-IR)

3.6.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์การแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (GC)

เทคนิคสำหรับการแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม (Gas Chromatography, GC) โดยสารผสมตัวอย่างถูกป้อนเข้าที่ sample injection port เข้าไปในคอลัมน์และถูกตรวจวัดสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

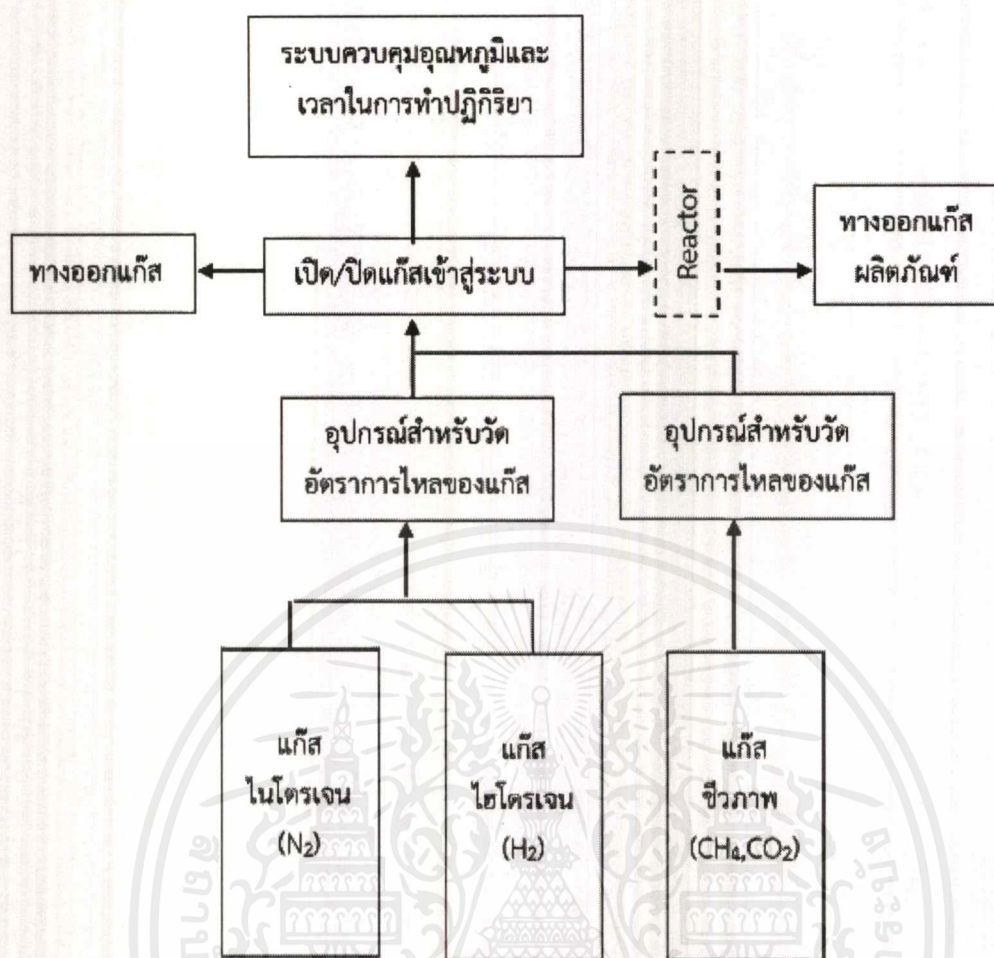
ด้วย Detector หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกบันทึกและแสดงผลออกมาในรูปแบบ Chromatogram ดังรูปที่ 3.9 โดยวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สอาร์กอน ซึ่งตรวจวัดโดย TCD (Thermal Conductivity Detector) โดยใช้คอลัมน์ชนิด Agilent J & W GC Columns รุ่น CP-Molsieve 5A และ โดยวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ แก๊สมีเทน โดยใช้คอลัมน์ชนิด Agilent J&W GC Columns รุ่น HP-PLOT/Q ซึ่งจะให้ความร้อนกับดีเทคเตอร์โดยอุณหภูมิของ TCD คือ 120 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของ FID คือ 300 องศาเซลเซียส มีแก๊สไนโตรเจน และ แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาตัวพา (Carrier gas) เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดจึงฉีดอากาศเข้าไปเพื่อทำความสะอาดภายในคอลัมน์ และวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ประมาณ 31 นาที โดยมีกระบวนการในการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatography

3.7 กระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์

ภาพรวมของกระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ดังรูปที่ 3.10 เริ่มจากการป้อนสารตั้งต้นไบโอแก๊ส ที่ประกอบด้วย แก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าสู่ระบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง แล้วทำการปรับสภาวะต่าง ๆ ตามที่ได้กำหนด เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส จากนั้นนำสารเข้าสู่รีแอกเตอร์แล้วเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยา เพื่อนำไปวิเคราะห์และคำนวณอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 3.10 แผนผังกระบวนการในการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) แตกต่างกันได้แก่ 0, 1, 3 และ 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO₂) 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเจล ที่มีลักษณะกลม แข็ง สำเร็จรูป (SiO₂-Pellet) และซิลิกาเจลที่ผ่านการระเหยน้ำ จนเกิดเป็นผงสีขาว (SiO₂-Powder) โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation, IWI) สำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Dry reforming of methane, DRM) เพื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

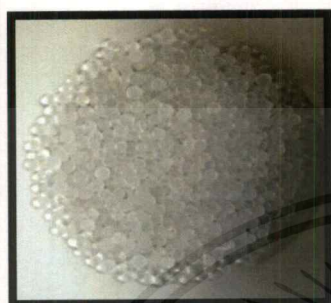
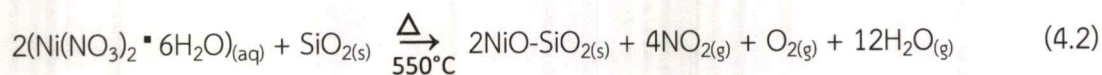
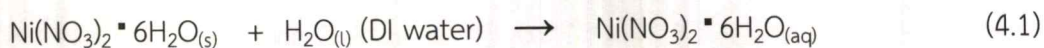
ในบทนี้ได้แสดงถึงผลจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ 4 เทคนิค คือ การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน (XRD) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM) การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา (EDS) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา (FT-IR) และผลจากการศึกษาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาจะแสดงดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ (Pellet) และ NiO-SiO₂ (Powder) ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (Incipient Wetness Impregnation, IWI) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ Ni 0 %wt นำเฉพาะซิลิกาเจล (SiO₂) ทั้ง 2 ชนิด มาทำการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากการเผาจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.1(ก) และ 4.3(ก) เนื่องจากซิลิกาทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก ส่วนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ Ni 1, 3 และ 5 %wt เริ่มจากการเตรียมสารละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต Ni(NO₃)₂•6H₂O ที่มีปริมาณ Ni ต่าง ๆ แล้วนำมาหยดลงตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO₂) 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาที่มีลักษณะกลม สำเร็จรูป (SiO₂-Pellet) และซิลิกาเจลที่ผ่านการระเหยน้ำ จนเกิดเป็นผงสีขาว (SiO₂-Powder) โดยใช้ในการสั่นสะเทือนด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปใส่ตู้ดูดความชื้น เพื่อไล่อากาศและความชื้นออก และนำมาอบไล่ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวอมฟ้าของ Ni(NO₃)₂ ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.3 จากนั้นนำไปเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ ที่มีลักษณะเป็นสีดำดังรูปที่

4.2 และ รูปที่ 4.4 เนื่องจากเกิดการสลายตัวของไนเตรต (NO_3^-) ให้แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) จึงเกิดเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) เกิดขึ้น ดังสมการที่ 4.2



(ก)



(ข)



(ค)

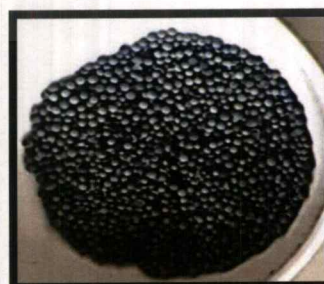


(ง)

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะก่อนการเผาสาร (Calcination) ของ SiO_2 (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt และ (ง) 5 %wt



(ก)

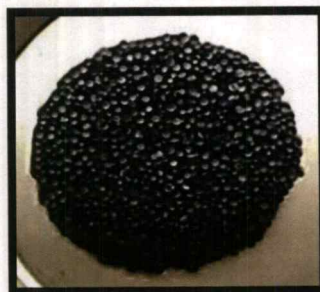


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

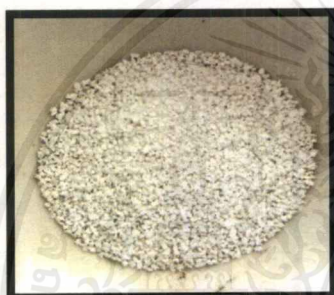


(ค)

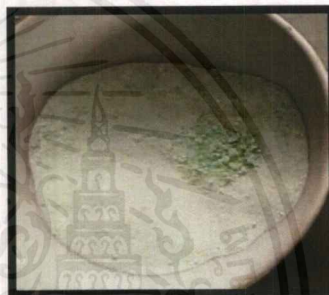


(ง)

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะหลังการเผาสาร (Calcination) ของ SiO_2 (Pellet) ที่ปริมาณ Ni ต่างต่างกัน (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt และ (ง) 5 %wt



(ก)



(ข)

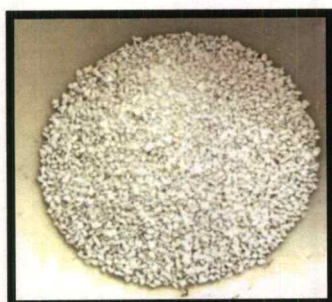


(ค)

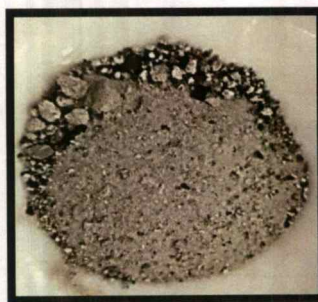


(ง)

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะก่อนการเผาสาร (Calcination) ของ SiO_2 (Powder) ที่ปริมาณ Ni ต่างต่างกัน (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt และ (ง) 5 %wt



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะหลังการเผาสาร (Calcination) ของ SiO_2 (Powder) ที่ปริมาณ Ni ต่างกัน (ก) 0 %wt (ข) 1 %wt (ค) 3 %wt และ (ง) 5 %wt

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักทางทฤษฎี น้ำหนักหลังเผาสาร และร้อยละการสังเคราะห์ของ Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst (Pellet)	Weight (Theory)	Weight (Before calcined)	% Yield
0 %wt Ni-SiO ₂	3.0000	2.8922	96.4067
1 %wt Ni-SiO ₂	3.1501	3.0546	96.9684
3 %wt Ni-SiO ₂	3.4598	3.3594	97.0981
5 %wt Ni-SiO ₂	3.7823	3.6156	95.5926

หมายเหตุ : การคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักทางทฤษฎี น้ำหนักหลังเผาสาร และร้อยละการสังเคราะห์ของ Ni-SiO₂(Powder)

Catalyst (Powder)	Weight (Theory)	Weight (Before calcined)	% Yield
0 %wt Ni-SiO ₂	3.0000	2.9685	98.9500
1 %wt Ni-SiO ₂	3.1501	3.0767	97.6699
3 %wt Ni-SiO ₂	3.4598	3.3897	97.9739
5 %wt Ni-SiO ₂	3.7823	3.8960	97.0816

หมายเหตุ : การคำนวณในภาคผนวก ข

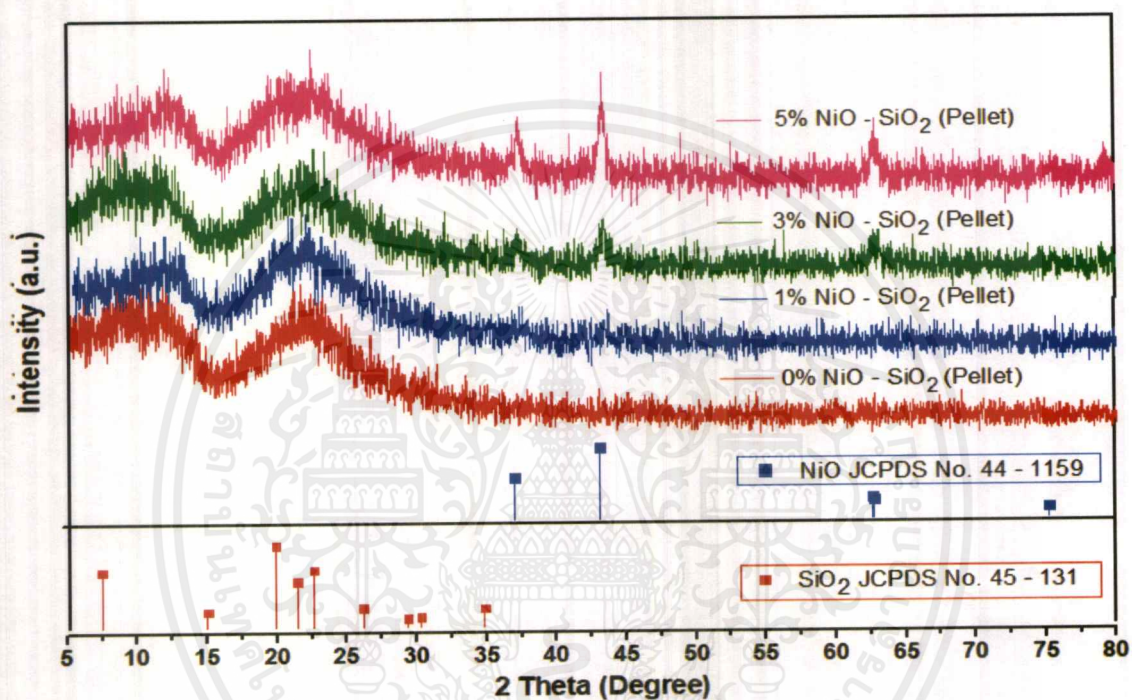
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกและอสัณฐาน (XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบของ XRD pattern จะบ่งบอกถึงชนิดและธรรมชาติของความเป็นผลึก ทำให้เห็นการเกิดเป็นเฟสเกิดขึ้น รวมถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของสารตัวอย่างว่ามีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือไม่ ทำให้ทราบว่าสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีความเป็นผลึกหรืออสัณฐานมากน้อยเพียงใด และทำให้ทราบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นได้ โดยทำการเปรียบเทียบสารตัวอย่างกับข้อมูลมาตรฐานเพื่อยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้คือนิกเกิลออกไซด์ (NiO) และ ซิลิกา (SiO₂)

จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ นั่นคือ NiO-SiO₂ (Pellet) โดยมีปริมาณ Ni ที่แตกต่างกัน ผ่านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เมื่อพิจารณาในส่วนของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) พบว่า พีคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 1, 3 และ 5 %wt มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลจะส่งผลให้มีความเป็นผลึกมากขึ้นด้วยนั่นเอง โดยพีคขั้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 37.25°, 43.29° และ 62.85° ในระนาบ (101), (012) และ (110) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของโครงสร้างมาตรฐานของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) จากข้อมูลมาตรฐาน JCPDS No.44-1159 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบ Rhombohedral และเห็นได้ชัดว่าที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0 %wt ไม่พบพีคเกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีปริมาณนิกเกิลที่สามารถแสดงความเป็นผลึกอยู่ในสารตัวอย่างนั่นเอง

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาในส่วนของซิลิกาเจล (SiO_2 -Pellet) พบว่า พีคของซิลิกา (SiO_2) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0, 1, 3 และ 5%wt มีพีคที่ไม่ชัดเจน จึงไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั่นคือมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบจึงไม่เกิดความเป็นผลึกเกิดขึ้น โดยพีคขึ้นที่ 2θ หลายตำแหน่ง เมื่อทำการเทียบมาตรฐาน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าของโครงสร้างผลึกมาตรฐานของซิลิกา (SiO_2) จากข้อมูลมาตรฐาน JCPDS No.45-131 ที่ 2θ เท่ากับ 7.50° , 19.94° , 21.45° และ 22.66° ในระนาบ (100), (210) (002) และ (211) ตามลำดับ



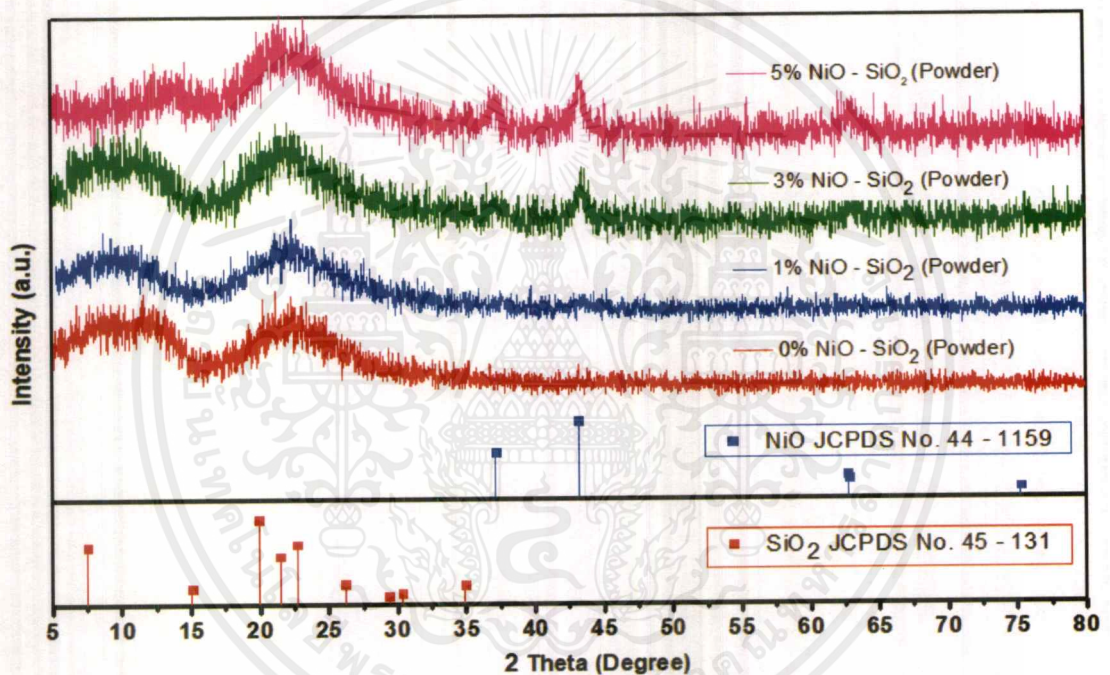
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเข้มของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนตัวรองรับซิลิกา SiO_2 (Pellet) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0, 1, 3 และ 5%wt เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของนิกเกิลออกไซด์ (NiO, JCPDS No.44-1159) และเทียบโครงสร้างผลึกมาตรฐานของ (SiO_2 , JCPDS No.45-131)

จากรูปที่ 4.6 เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ นั่นคือ NiO-SiO_2 (Powder) โดยมีปริมาณ Ni ที่แตกต่างกัน ผ่านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เมื่อพิจารณาในส่วนของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) พบว่า พีคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 1, 3 และ 5 %wt มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลจะส่งผลให้มีความเข้มของผลึกมากขึ้นด้วยนั่นเอง โดยพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 37.25° , 43.29° และ 62.85° ในระนาบ (101), (012) และ (110) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของโครงสร้างผลึกมาตรฐานของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) จากข้อมูลมาตรฐาน JCPDS No.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

44-1159 มีการจัดเรียงตัวแบบ Rhombohedral และเห็นได้ชัดว่าที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0 %wt ไม่พบฟิสิกเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีปริมาณนิกเกิลที่สามารถแสดงความเป็นผลึกอยู่ในสารตัวอย่างนั่นเอง

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาในส่วนของซิลิกาเจล (SiO_2 -Powder) พบว่า ฟิสิกของซิลิกา (SiO_2) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0, 1, 3 และ 5%wt มีฟิสิกที่ไม่ชัดเจน จึงไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั่นคือมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบจึงไม่เกิดความเป็นผลึกเกิดขึ้น โดยฟิสิกชั้นที่ 2 θ หลายตำแหน่ง เมื่อทำการเทียบมาตรฐาน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าของ โครงสร้างผลึกมาตรฐานของซิลิกา (SiO_2) จากข้อมูลมาตรฐาน JCPDS No. 45-131 ที่ 2 θ เท่ากับ 7.50°, 19.94°, 21.45° และ 22.66° ในระนาบ (100), (210) (002) และ (211) ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนตัวรองรับซิลิกา SiO_2 (Powder) ที่ปริมาณนิกเกิล (Ni) 0, 1, 3 และ 5 %wt เทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของ นิกเกิลออกไซด์ (NiO, JCPDS No.44-1159) และเทียบโครงสร้างผลึกมาตรฐานของ (SiO_2 , JCPDS No.45-131)

จากการวิเคราะห์ XRD สามารถหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยใช้โปรแกรม Origins แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณลงในสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงข้อมูลการคำนวณ ดังตารางที่ 4.3 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา NiO- SiO_2 (Pellet) พบว่า ที่ 1, 3 และ 5 %wt NiO- SiO_2 (Pellet) สามารถวิเคราะห์ขนาดผลึกของ NiO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ 6.92 , 19.40 และ 27.88 nm จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ 1 %wt NiO-SiO₂ (Pellet) มีขนาดผลึกที่เล็กที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิล (Ni) 3 และ 5 %wt พบว่าขนาดผลึก NiO ใหญ่ขึ้น เนื่องจากปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นผลึกที่ใหญ่ขึ้นนั่นเอง ดังนั้น 1 %wt NiO-SiO₂ (Pellet) ด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กจึงมีโอกาสเกิดการกระจายตัวได้ดีกว่าที่ 3 และ 5 %wt NiO-SiO₂ (Pellet) ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพ 3 มิติ จากการวิเคราะห์เทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.8 พบว่าซิลิกามีลักษณะพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุน มีการกระจายตัว และรวมตัวกันของอนุภาคนิกเกิล และสอดคล้องกับการทำ Element mapping ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.16 เห็นได้ชัดว่ามีการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคนิกเกิล (Ni) ส่วน 3 %wt NiO-SiO₂ และ 5 %wt NiO-SiO₂ มีขนาดอนุภาคของ NiO 19.40 และ 27.88 nm ตามลำดับ พบว่า ขนาดผลึกของ 3 %wt NiO-SiO₂ มีขนาดเล็กกว่า ที่ 5 %wt NiO-SiO₂ ทำให้ทราบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไหลลงบนตัวรองรับมีผลต่อขนาดของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยปริมาณนิกเกิล (Ni) ที่มากขึ้น โอกาสเกิดการรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีโอกาสในการกระจายตัวที่น้อยลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพ SEM ดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 และสอดคล้องกับการทำ Element mapping ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 ที่พบว่ามีกระจายตัว และรวมตัวกันเกิดขึ้นเกิดขึ้นบางบริเวณ

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO₂ (Pellet)

Pellet	2θ	FWHM (β)	Crystallite size (Å)	Crystallite size (nm)
0 %wt NiO-SiO ₂	-	-	-	-
1 %wt NiO-SiO ₂	43.30	1.23464	69.23	6.92
3 %wt NiO-SiO ₂	43.20	0.44033	194.04	19.40
5 %wt NiO-SiO ₂	43.30	0.30667	278.81	27.88

หมายเหตุ : สมการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.4 การกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst (Pellet)	Distribution of NiO
0 %wt Ni-SiO ₂	-
1 %wt Ni-SiO ₂	1.3869
3 %wt Ni-SiO ₂	0.4947
5 %wt Ni-SiO ₂	0.3443

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

จาดตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลขนาดผลึกสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ (Powder) พบว่า ที่ 1 %wt สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ เนื่องจาก XRD pattern ที่ 2θ เท่ากับ 3.02 แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาค NiO ที่ขนาดเล็กมาก ๆ จึงมีโอกาสเกิดการกระจายตัวได้ดี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพ 3 มิติ จากการวิเคราะห์เทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.12 พบว่าซิลิกามีลักษณะพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุน มีการกระจายตัวที่ดี และสอดคล้องกับการทำ Element mapping ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคนิกเกิล (Ni) ส่วน 3 %wt NiO-SiO₂ และ 5 %wt NiO-SiO₂ มีขนาดอนุภาคของ NiO 8.40 และ 14.04 nm ตามลำดับ พบว่าขนาดผลึกของ 3 %wt NiO-SiO₂ มีขนาดเล็กกว่า ที่ 5 %wt NiO-SiO₂ จึงมีโอกาสเกิดการกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวดำรงรับ ทำให้ทราบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไหลลงบนตัวรองรับมีผลต่อขนาดของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพ SEM ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 และสอดคล้องกับการทำ Element mapping ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.21 ที่มีการกระจายตัวที่ดี และรูปที่ 4.22 มีการกระจายตัวและเกิดการรวมตัวกันเกิดขึ้นบางบริเวณ

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO₂ (Powder)

Powder	2θ	FWHM (β)	Crystallite size (Å)	Crystallite size (nm)
0 %wt NiO-SiO ₂	-	-	-	-
1 %wt NiO-SiO ₂	43.30	2.82996	30.20	3.02
3 %wt NiO-SiO ₂	43.42	1.01752	84.04	8.40
5 %wt NiO-SiO ₂	43.34	0.60869	140.44	14.04

หมายเหตุ : สมการคำนวณในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.6 การกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO₂ (Powder)

Catalyst (Powder)	Distribution of NiO
0 %wt Ni-SiO ₂	-
1 %wt Ni-SiO ₂	2.5478
3 %wt Ni-SiO ₂	1.1423
5 %wt Ni-SiO ₂	0.6836

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับจุลภาค (SEM)

การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ (NiO-SiO₂) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว รวมถึงการกระจายตัวหรือการรวมตัวกันของสารตัวอย่าง ที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงออกมาเป็นรูปภาพขาวดำแบบ 3 มิติ ด้วยกำลังขยายต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.7 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO_2 -Pellet) พบว่า ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) ซิลิกา (SiO_2) มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมที่มีพื้นผิวขรุขระไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) มีความขรุขระและมีความเป็นรูพรุนสูง และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงความขรุขระและเห็นถึงปริมาณรูพรุนอย่างชัดเจน ซึ่งการมีพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้ซิลิกา (SiO_2) เป็นตัวรองรับ (Supporter) ที่ดี



(ก)

(ข)

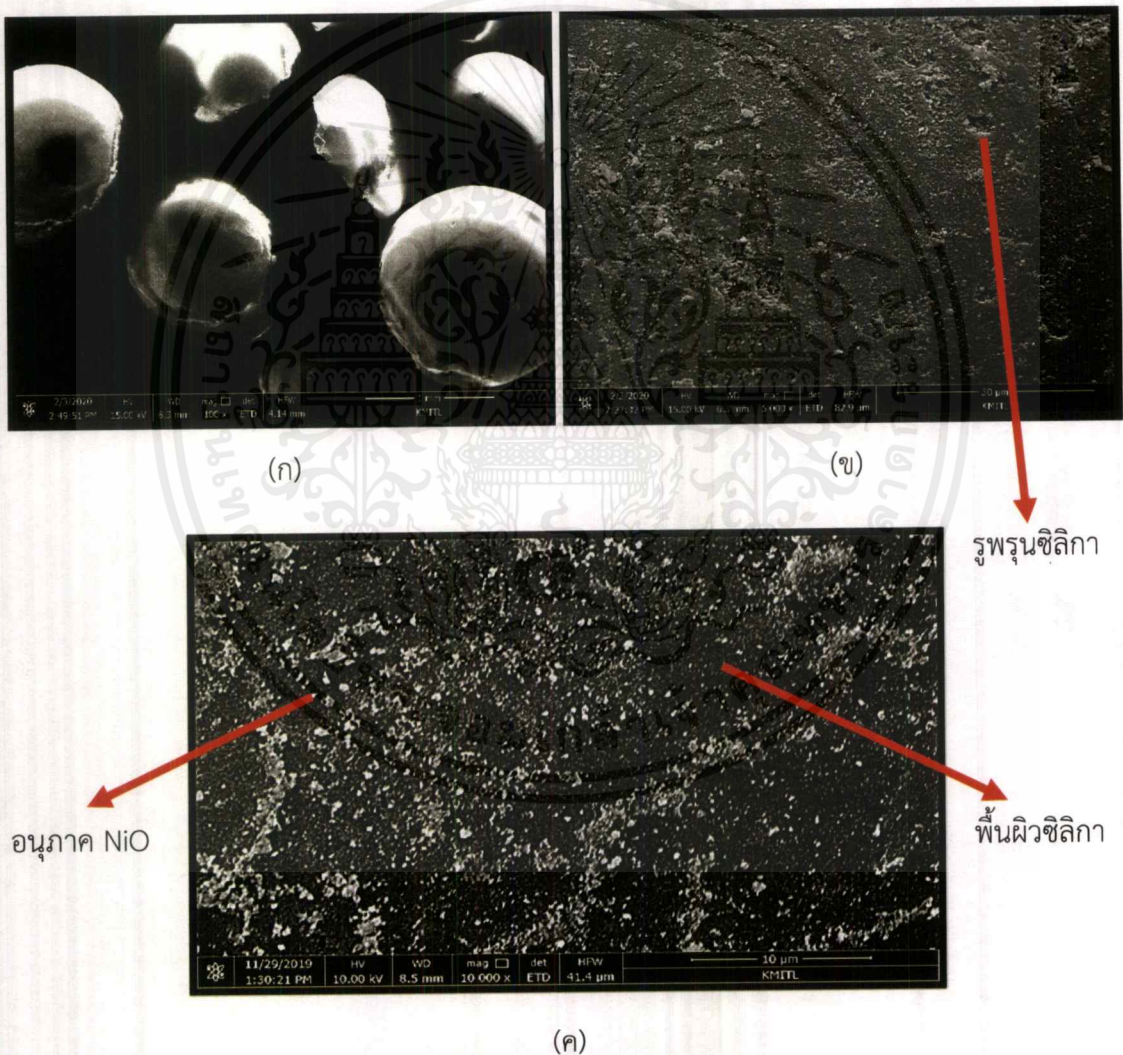


(ค)

รูปที่ 4.7 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO_2 (Pellet) (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Pellet) พบว่า ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) ซิลิกาเจล (SiO_2) มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมที่มีพื้นผิวขรุขระไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกามีความขรุขระไม่เรียบเนียนและมีรูพรุนสูง มีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) กระจายตัวอยู่และบางส่วนมีการรวมตัวกัน แม้จะเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงความขรุขระบนพื้นผิวซิลิกา และเห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกัน บางส่วนของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) แม้เห็นไม่ชัดเจน แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.16(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของนิกเกิล (Ni) ได้อย่างชัดเจน



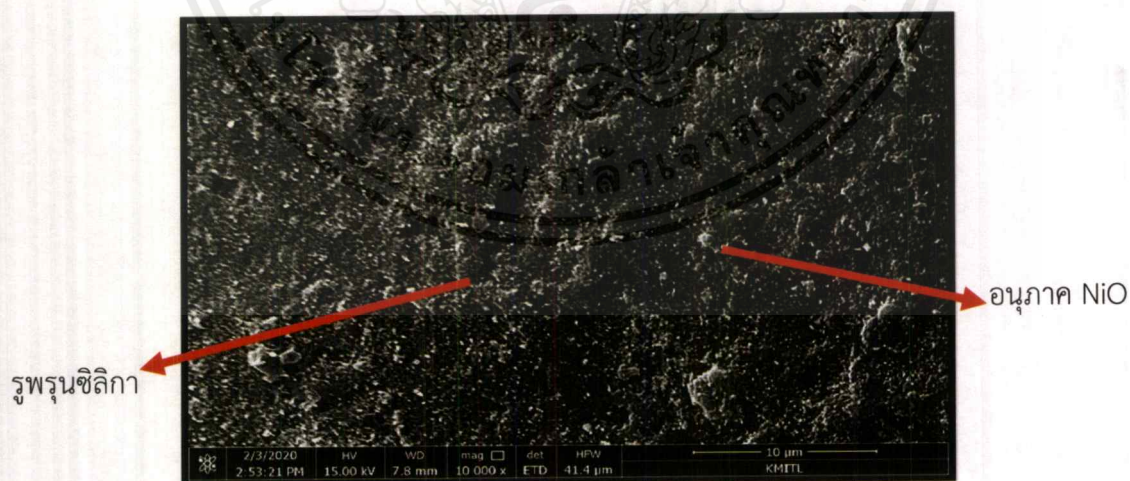
รูปที่ 4.8 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni- SiO_2 (Pellet) (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO_2 -Pellet) พบว่า ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ก) ซิลิกา (SiO_2) มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมที่มีพื้นผิวขรุขระไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า บนพื้นผิวของซิลิกามีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) กระจายตัวอยู่และบางส่วนมีการรวมตัวกัน มีพื้นผิวความขรุขระและมีรูพรุน และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงความขรุขระบนพื้นผิวซิลิกา และเห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกันบางส่วนในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) เพียง 1 %wt แม้เห็นอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ไม่ชัดเจน เนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.17(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัว และมีการรวมตัวกันเกิดขึ้นบางส่วนของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO)



(ก)

(ข)

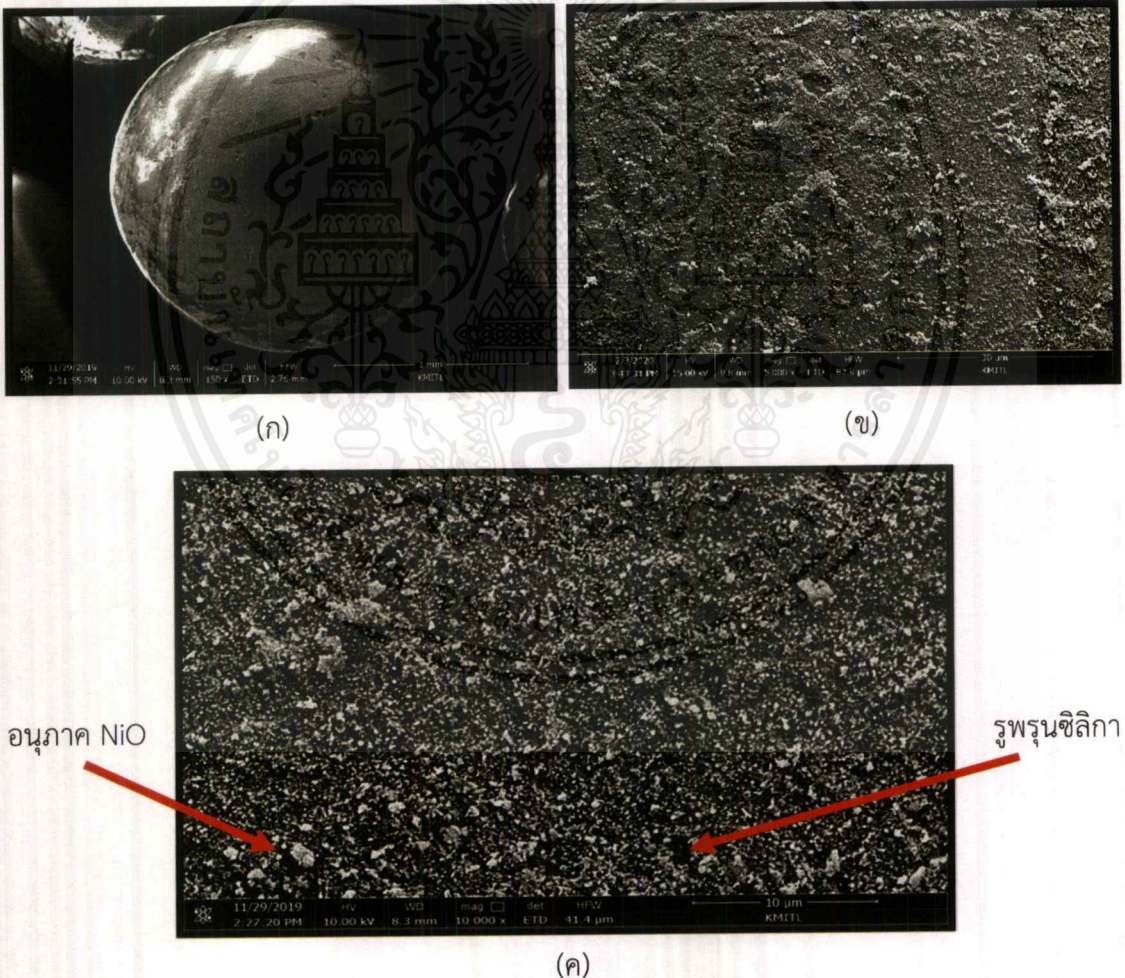


(ค)

รูปที่ 4.9 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni- SiO_2 (Pellet) (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

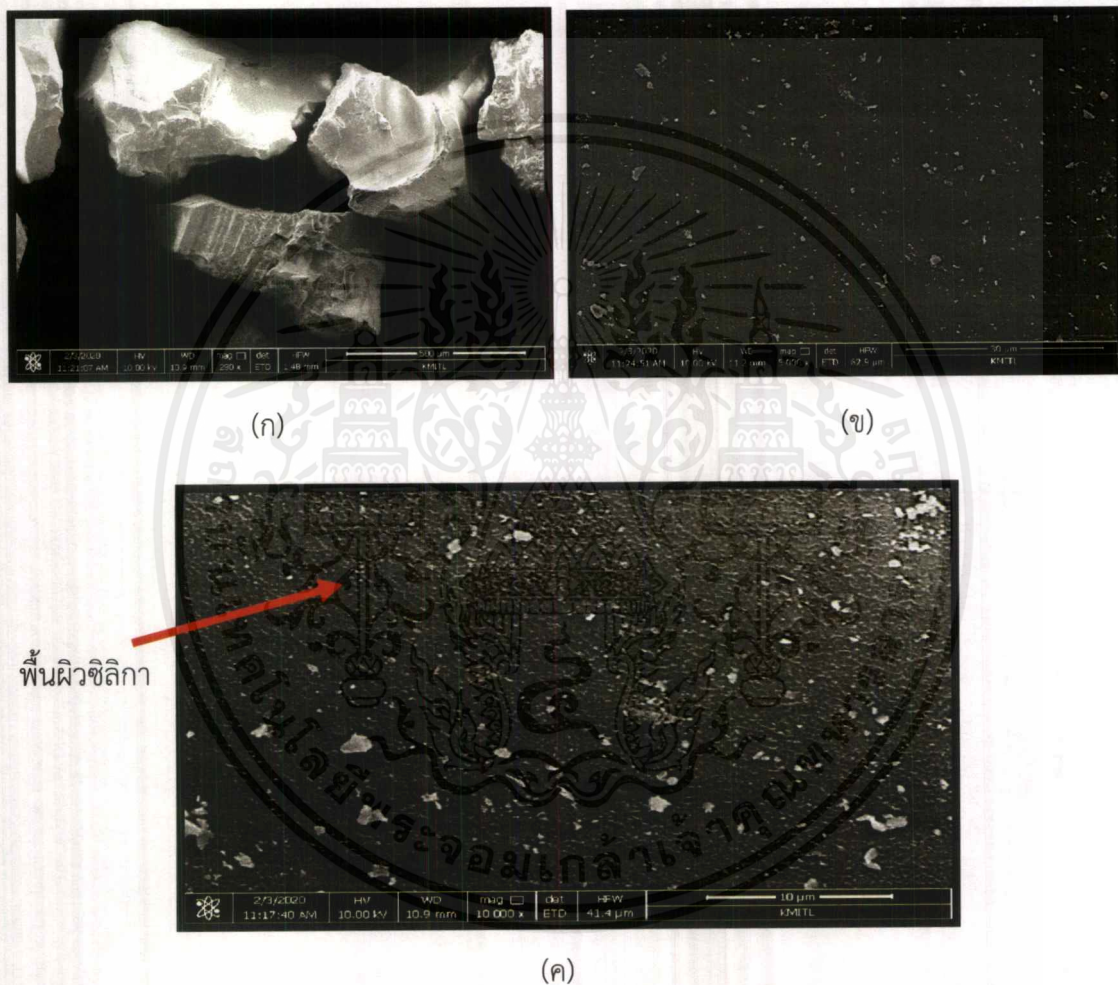
จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO_2 -Pellet) พบว่า ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ก) ซิลิกา (SiO_2) มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมที่มีพื้นผิวขรุขระไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า บนพื้นผิวของซิลิกามีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) กระจายตัวอยู่และบางส่วนมีการรวมตัวกัน มีพื้นผิวความขรุขระและมีรูพรุน และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงความขรุขระบนพื้นผิวซิลิกา และเห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 3 และ 1 %wt ตามลำดับ แม้เห็นอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ไม่ชัดเจน เนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.18(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัว และมีการรวมตัวกันเกิดขึ้นบางส่วนบนตัวรองรับซิลิกา



รูปที่ 4.10 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni- SiO_2 (Pellet) (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Powder) พบว่า ที่กำลังขยาย 260 เท่า (ก) สารตัวอย่างมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนผลึกลักษณะเหลี่ยมที่มีพื้นผิวขรุขระหรือไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) มีอนุภาคของสิ่งเจือปนเกาะอยู่บนพื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกันของอนุภาคสิ่งเจือปนอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.11 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni- SiO_2 (Powder) (ก) กำลังขยาย 260 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

จากรูปที่ 4.12 แสดงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Powder) พบว่า ที่กำลังขยาย 260 เท่า (ก) สารตัวอย่างมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนผลึกลักษณะเหลี่ยมที่มีพื้นผิวขรุขระหรือไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) มีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) เกาะอยู่บนพื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกันของอนุภาคนิกเกิล (Ni) บนตัวรองรับซิลิกา แม้เห็นอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ไม่ชัดเจน เนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.20(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัวของนิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) กำลังขยาย 260 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 3 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Powder) พบว่า ที่กำลังขยาย 260 เท่า (ก) สารตัวอย่างมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนผลึกลักษณะเหลี่ยมที่มีพื้นผิวขรุขระหรือไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) มีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) และที่ กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงการกระจายตัวและการรวมตัวกันของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ในปริมาณที่มากกว่า 1 %wt แม้เห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.21(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัวที่บนตัวรองรับซิลิกา



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) กำลังขยาย 300 เท่า (ข) กำลังขยาย 2500 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 แสดงรูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล (Ni) 5 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Powder) พบว่า ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ก) สารตัวอย่างมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนผลึกลักษณะเหลี่ยมที่มีพื้นผิวขรุขระหรือไม่เรียบเนียน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) พบว่า พื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) มีอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์เกาะอยู่บนพื้นผิวของซิลิกา (SiO_2) ในปริมาณที่มากกว่าอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ที่ 3 และ 1 %wt ตามลำดับ และที่กำลังขยาย 10000 เท่า (ค) เห็นถึงพื้นผิวซิลิกาที่น้อยลง เกิดการกระจายตัวและการรวมตัวกันของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่มาก แม้เห็นไม่ชัดเจนเนื่องจากมีกำลังขยายต่ำ แต่สามารถสังเกตได้จากผลของ EDS ดังรูปที่ 4.22(ก) ที่เห็นถึงการกระจายตัวและมีการรวมตัวกันบางส่วนของอนุภาคนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 รูปร่างลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni- SiO_2 (Powder) (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

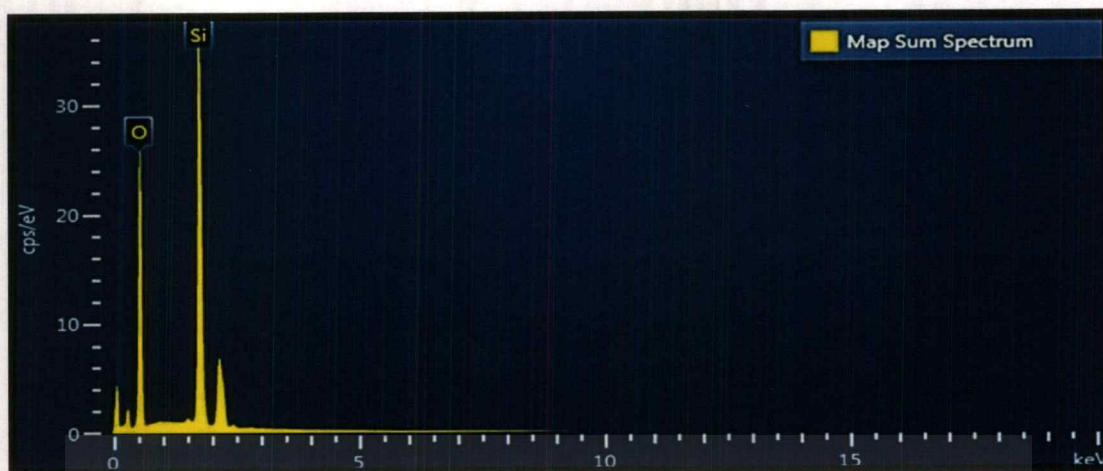
4.2.3 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบ (EDS)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS) นิยมใช้และติดตั้งบนเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จึงเรียกเทคนิคนี้ว่า SEM-EDS โดยให้ผลวิเคราะห์ 2 แบบ ได้แก่ คุณภาพวิเคราะห์ จะบ่งบอกถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในสารตัวอย่างว่ามีธาตุชนิดใดบ้าง ส่วนปริมาณวิเคราะห์ จะบ่งบอกถึงปริมาณธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวอย่างว่ามีมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้มักทำควบคู่กับการทำ Element mapping มีลักษณะเป็นจุดที่มีสีต่าง ๆ เพื่อบอกการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่าง และเพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ตามที่ผู้ทดลองได้กำหนดไว้

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) 0 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO_2 -Pellet) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการสุ่มบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ พบว่า มีองค์ประกอบ Si และ O ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si และ O และ ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 63.34 %wt และ Si ปริมาณ 36.66 %wt แต่ไม่พบองค์ประกอบและปริมาณของ Ni เนื่องจากไม่ได้ทำการโหลดโลหะลงไปบนตัวรองรับซิลิกา



(ก)



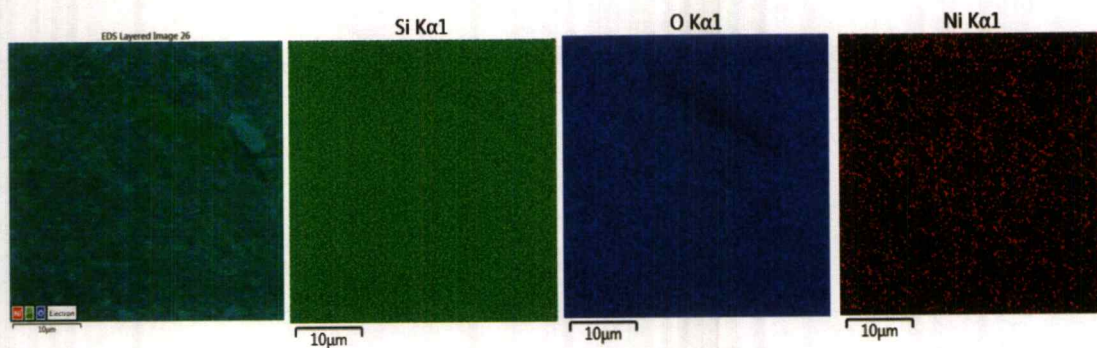
(ข)

รูปที่ 4.15 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.7 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst	Element	% Weight Average
0 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet)	O	63.34
	Si	36.66

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO₂-Pellet) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการสุ่มบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ เมื่อพิจารณาที่นิกเกิล (Ni) พบว่ามีการกระจายตัวที่ดี ไม่มีการรวมตัวกันเกิดขึ้น จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และ ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 64.59 %wt, Si ปริมาณ 34.87 %wt และมีปริมาณของ Ni 0.84 %wt ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 %wt Ni ที่ต้องการ จึงบ่งบอกได้ว่าอาจมีบางบริเวณที่เกิดการรวมตัวกันของ Ni หรือมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

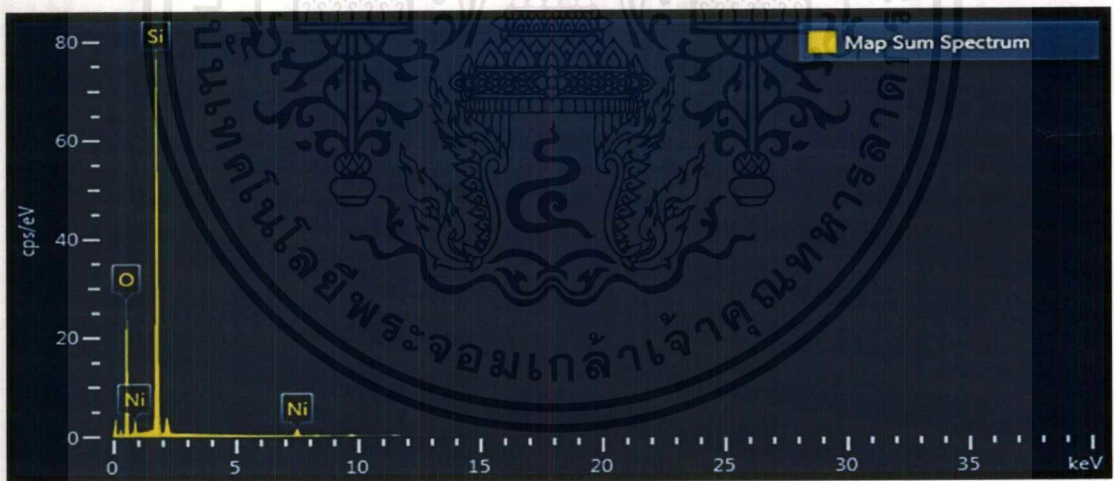
ตารางที่ 4.8 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst	Element	% Weight Average
1 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet)	O	64.59
	Si	34.87
	Ni	0.84

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการสุมบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ เมื่อพิจารณาที่นิกเกิล (Ni) พบว่าเกิดการรวมตัวกันเกิดขึ้น จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และตารางที่ 4.9 ตารางแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 54.23 %wt, Si ปริมาณ 42.32 %wt และมีปริมาณของ Ni 2.89 %wt ซึ่งใกล้เคียงกับ 3 %wt ที่ต้องการ จึงบ่งบอกได้ว่าอาจมีบางบริเวณที่เกิดการรวมตัวกันของ Ni หรือมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ



(ก)



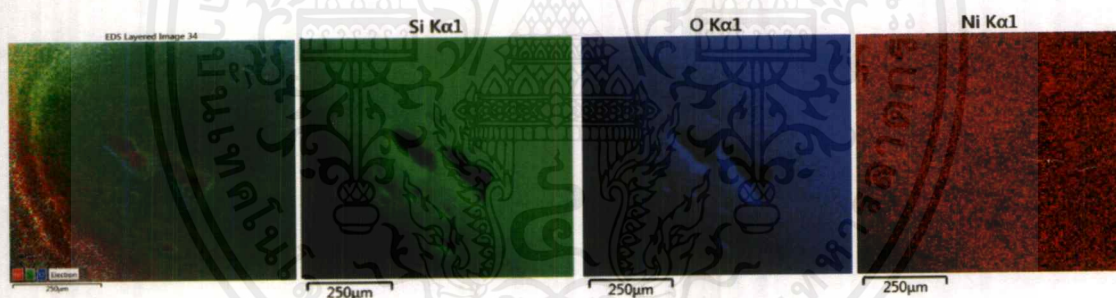
(ข)

รูปที่ 4.17 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 3 % wt Ni-SiO₂ (Pellet) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

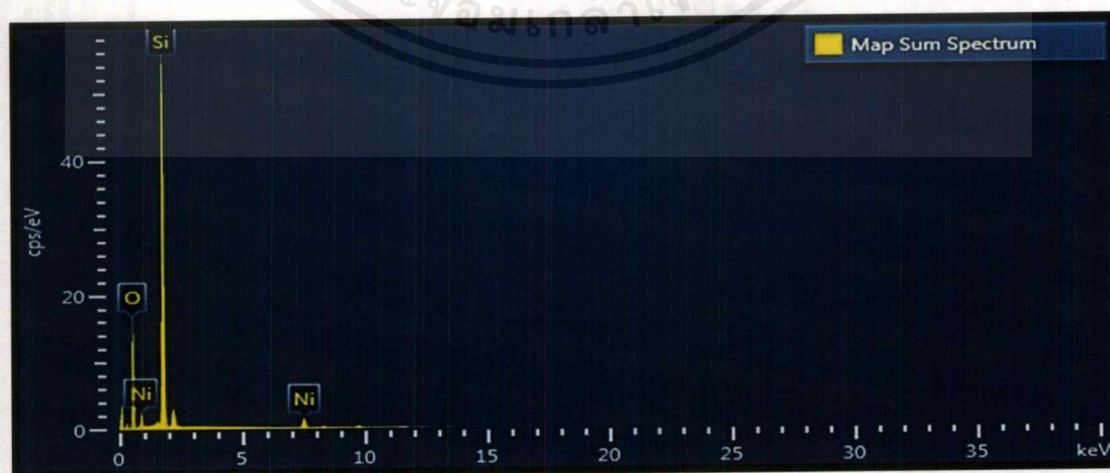
ตารางที่ 4.9 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 3 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst	Element	% Weight Average
3 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet)	O	54.23
	Si	42.32
	Ni	2.89

จากรูปที่ 4.18 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการสุมบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ เมื่อพิจารณานิกเกิล (Ni) พบว่ามีการกระจายตัวและมีการรวมตัวกันเกิดขึ้น จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และ ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 50.55 %wt, Si ปริมาณ 44.45 %wt และมีปริมาณของ Ni 4.57 %wt ซึ่งใกล้เคียงกับ 5 %wt ที่ต้องการสังเคราะห์



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

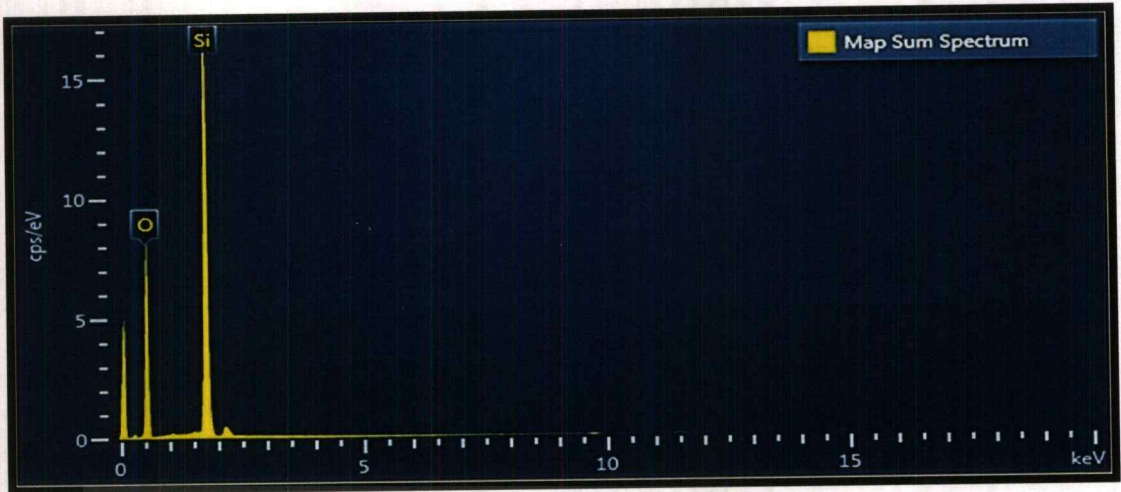
ตารางที่ 4.10 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst	Element	% Weight Average
5 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet)	O	50.55
	Si	44.45
	Ni	4.57

จากรูปที่ 4.19 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt -SiO₂ (Powder) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการซูมบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีองค์ประกอบ Si และ O ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si และ O และในตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 57.21 %wt และ Si ปริมาณ 42.79 %wt แต่ไม่พบองค์ประกอบและปริมาณของ Ni เนื่องจากไม่ได้ทำการโหลดโลหะลงไปบนตัวรองรับซิลิกา



(ก)



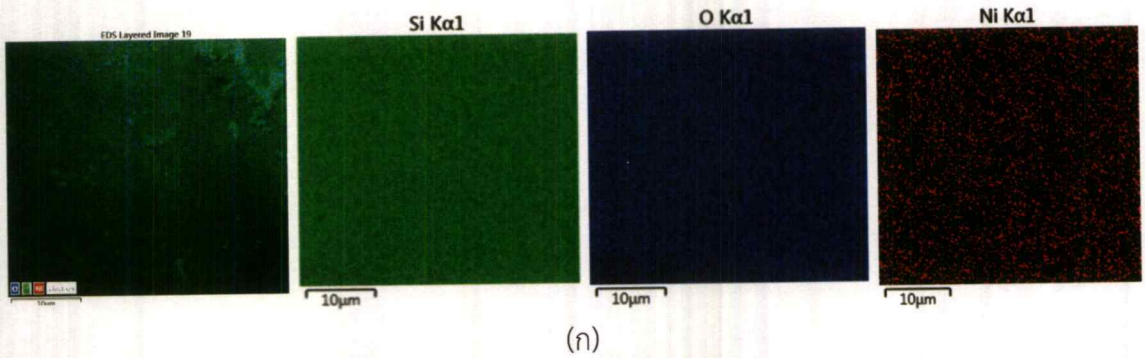
(ข)

รูปที่ 4.19 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.11 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 0 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

Catalyst	Element	% Weight Average
0 %wt Ni-SiO ₂ (Powder)	O	57.21
	Si	42.79

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) 1 %wt บนตัวรองรับซิลิกา (SiO₂, Powder) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการสุ่มบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ เมื่อพิจารณานิกเกิล พบว่ามีการกระจายตัวที่ดี จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และตารางที่ 4.12 ตารางแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 53.55 %wt, Si ปริมาณ 45.31 %wt และมีปริมาณของ Ni 0.73 %wt ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 %wt ที่ต้องการสังเคราะห์



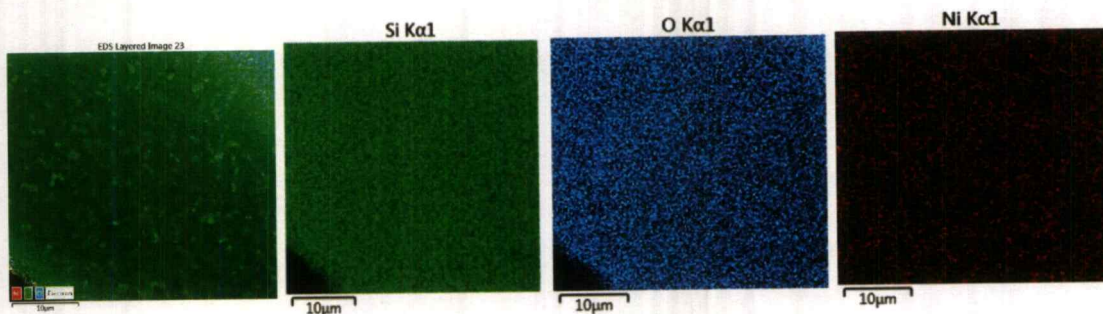
รูปที่ 4.20 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.12 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

Catalyst	Element	% Weight Average
1 %wt Ni-SiO ₂ (Powder)	O	53.55
	Si	45.31
	Ni	0.73

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการซูมบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และ ตารางที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ O ปริมาณ 44.98 %wt, Si ปริมาณ 51.15 %wt และมีปริมาณของ Ni 2.64 %wt ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 3 %wt ที่ต้องการสังเคราะห์



(ก)



(ข)

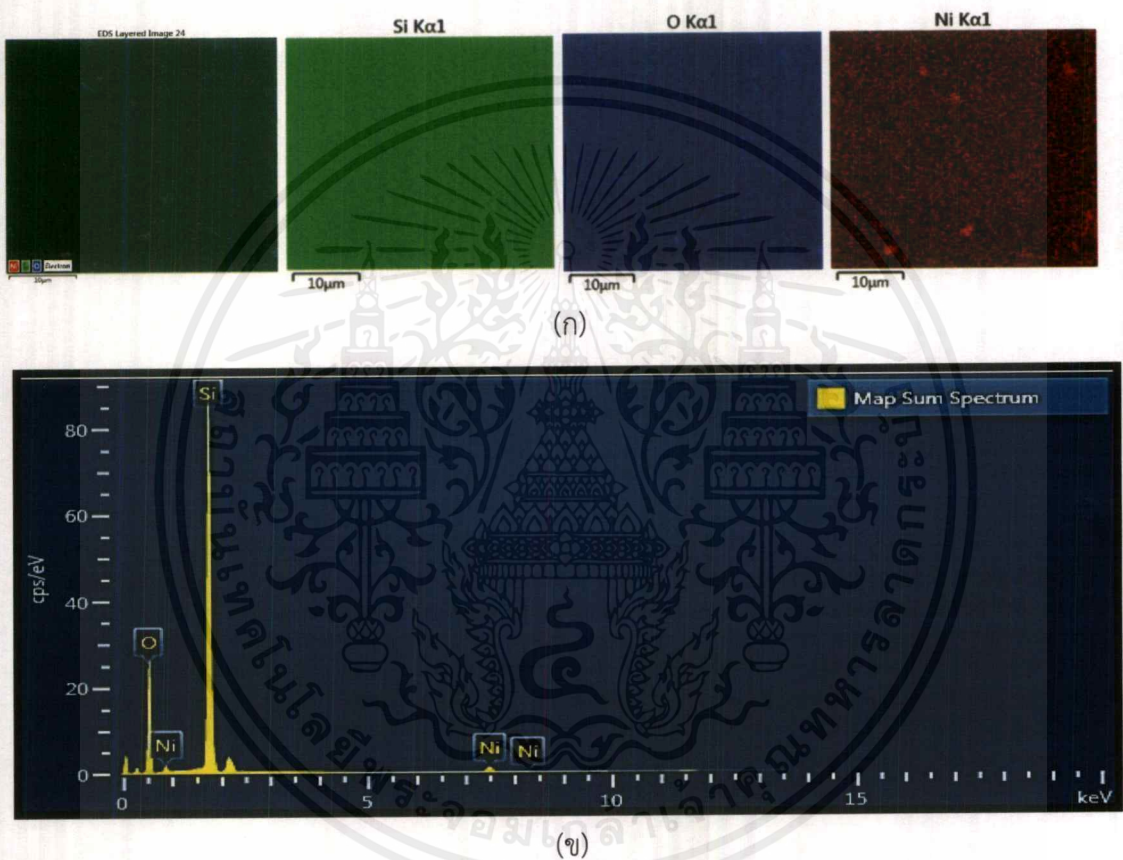
รูปที่ 4.21 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.13 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

Catalyst	Element	% Weight Average
3 %wt Ni-SiO ₂ (Powder)	O	44.98
	Si	51.15
	Ni	2.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder) จากภาพ (ก) การทำ Element mapping โดยการส่มบางบริเวณของสารตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีองค์ประกอบ Si, O และ Ni ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ จากภาพ (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีพีคของธาตุองค์ประกอบคือ Si, O และ Ni และตารางที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง พบว่า มีองค์ประกอบเฉลี่ยของ O ปริมาณ 45.57 %wt, Si ปริมาณ 49.23 %wt และมีปริมาณของ Ni 4.62 %wt ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 5 %wt ที่ต้องการสังเคราะห์



รูปที่ 4.22 แสดงถึงธาตุองค์ประกอบที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder) (ก) การทำ Element mapping (ข) กราฟแสดงองค์ประกอบ และปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.14 ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยของ 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

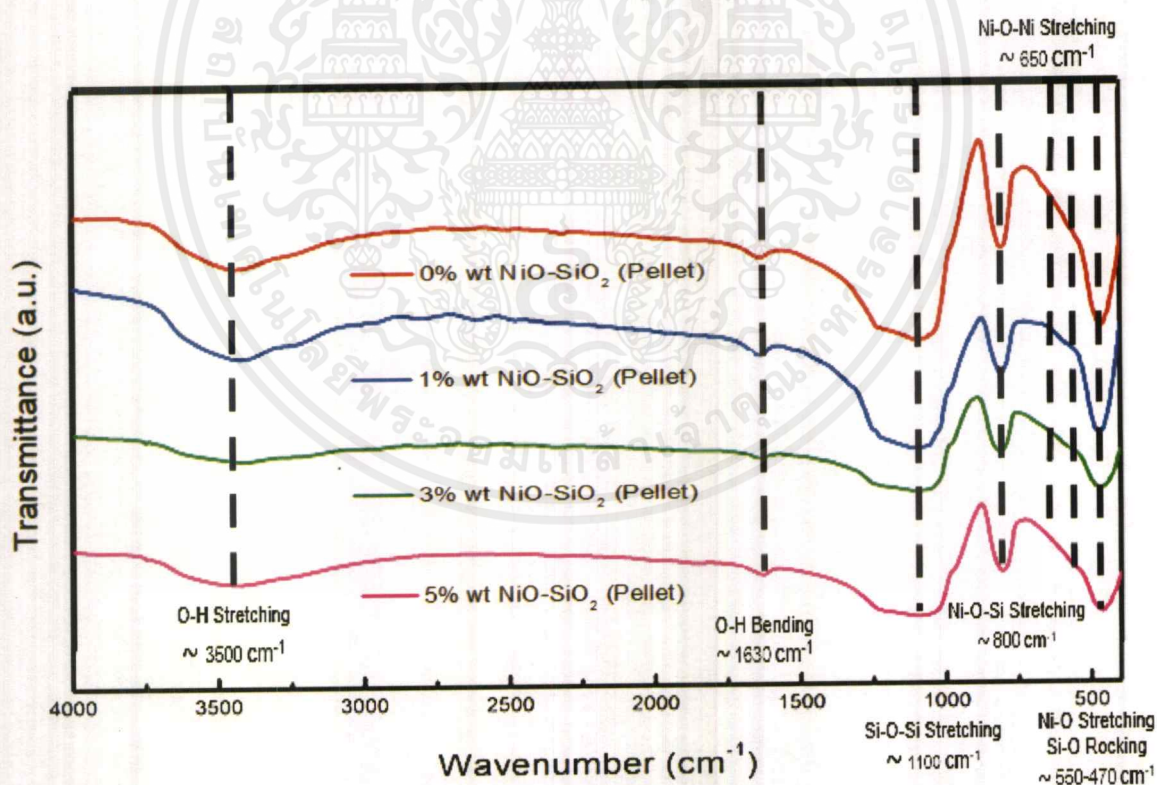
Catalyst	Element	% Weight Average
5 %wt Ni-SiO ₂ (Powder)	O	45.57
	Si	49.23
	Ni	4.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

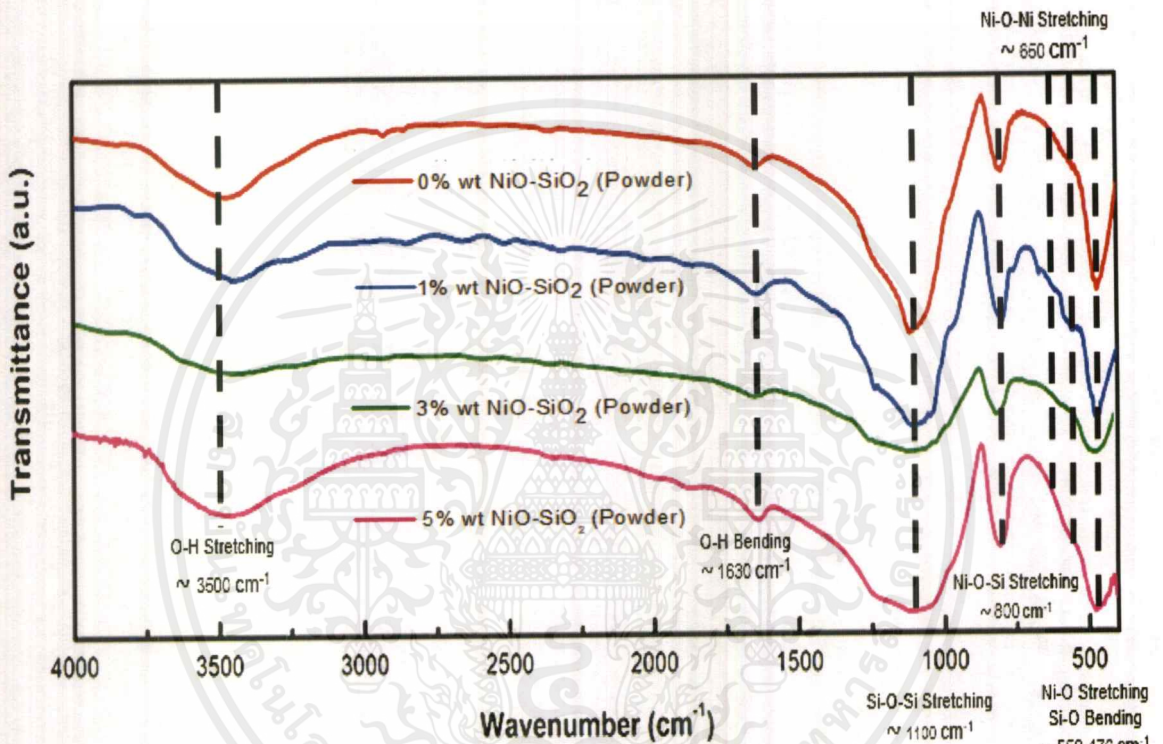
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยแสงอินฟราเรด ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ซึ่งสามารถตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลโดยการวัดจากการสั่นสะเทือนและการหมุนของพันธะภายในโมเลกุล ซึ่งทำให้ทราบถึงโครงสร้างและองค์ประกอบของสารตัวอย่าง แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

จากรูปที่ 4.23 เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับซิลิกา ชนิดเกรดการค้า NiO-SiO₂ (Pellet) มาทำการวิเคราะห์ พบว่า ที่เลขคลื่นประมาณ 3500 cm⁻¹ และ 1630 cm⁻¹ เป็นการสั่นพันธะแบบยืด (Stretching) และการงอ (Bending) ของน้ำ (H₂O) ที่เลขคลื่นประมาณ 1100 cm⁻¹ เป็นการสั่นแบบยืดของ Si-O-Si ส่วนที่เลขคลื่นประมาณ 800 cm⁻¹ เป็นการยืดของ Ni-O-Si ที่เลขคลื่นประมาณ 650 cm⁻¹ เป็นการสั่นแบบยืดของ Ni-O-Ni ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 550-470 cm⁻¹ เป็นการยืดพันธะของ Ni-O และการสั่นของพันธะแบบงอของ Si-O ตามลำดับ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นั้น คือ NiO-SiO₂ อย่างแท้จริง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดง Infrared spectra ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ (Pellet)

จากรูปที่ 4.24 เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับซิลิกา ชนิดคอลลอยด์ NiO-SiO₂ (Powder) มาทำการวิเคราะห์ พบว่า ที่เลขคลื่นประมาณ 3500 cm⁻¹ และ 1630 cm⁻¹ เป็นการสั่นพันธะแบบยืด (Stretching) และการงอ (Bending) ของน้ำ (H₂O) ที่เลขคลื่นประมาณ 1100 cm⁻¹ เป็นการสั่นแบบยืดของ Si-O-Si ส่วนที่เลขคลื่นประมาณ 800 cm⁻¹ เป็นการยืดของ Ni-O-Si ที่เลขคลื่นประมาณ 650 cm⁻¹ เป็นการสั่นแบบยืดของ Ni-O-Ni ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 550-470 cm⁻¹ เป็นการยืดพันธะของ Ni-O และการสั่นของพันธะแบบงอของ Si-O ตามลำดับ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นั้น คือ NiO-SiO₂ อย่างแท้จริง



รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Infrared spectra ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ (Powder)

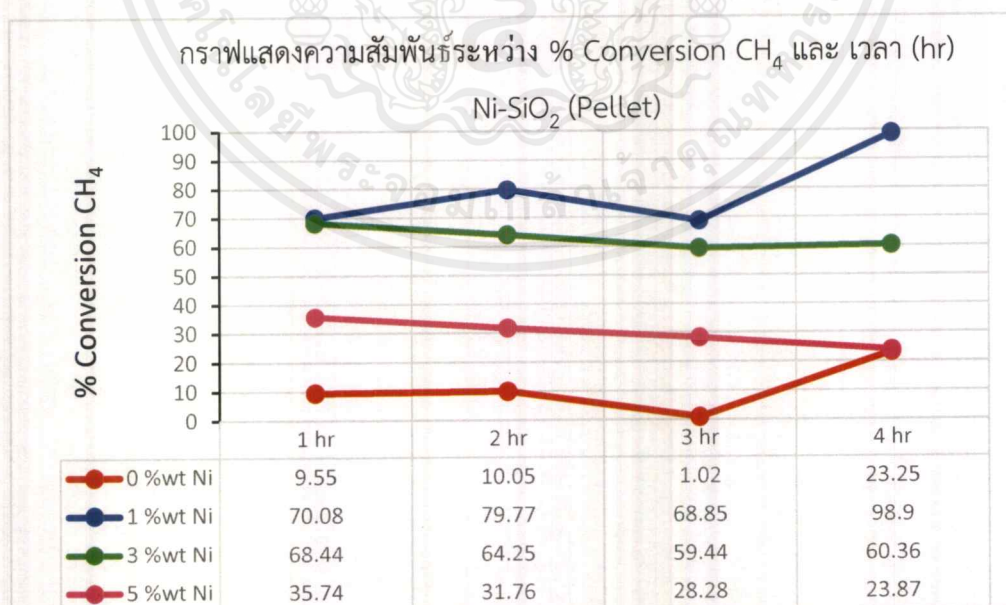
4.3 การศึกษาผลการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทุก ๆ ชนิด ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.00 มิลลิเมตร ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.50 กรัม ใช้อัตราการไหลของแก๊สที่ 20 มิลลิลิตร/นาที ในขั้นตอนการทดลองช่วงแรกจะเป็นการไล่ความชื้น ไล่อากาศออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สไนโตรเจน (N₂) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที ขั้นตอนถัดมาคือการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H₂) 5% เพื่อปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีขึ้น โดยเปลี่ยนจากนิกเกิล (II) ออกไซด์ (NiO) ไปเป็นโลหะนิกเกิล (Ni) ที่มีเลขออกซิเดชัน เท่ากับ 0 ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การป้อนสารตั้งต้นไบโอแก๊ส ($\text{CO} : \text{H}_2$) ที่มีอัตราส่วน 1:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 4 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเก็บถูกเก็บใส่ถุงแก๊สทุก ๆ ชั่วโมง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

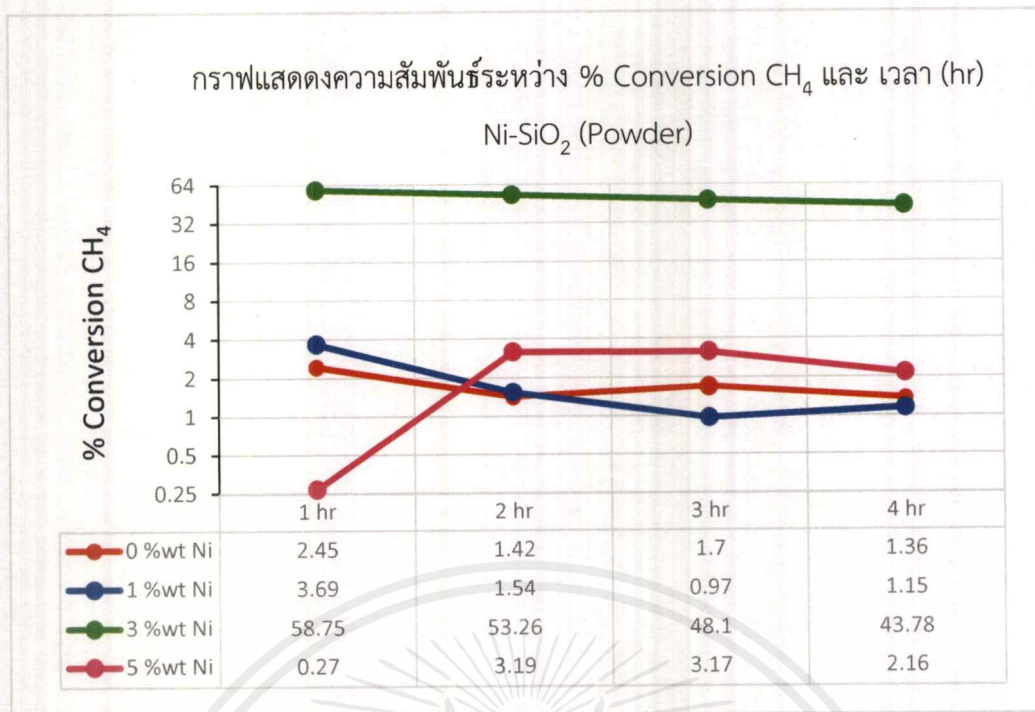
การวิเคราะห์แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา เป็นการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (%Yield) และร้อยละความจำเพาะ (Selectivity) ในการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ ที่เตรียมได้ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Offline Gas Chromatography รุ่น CP-3800 ยี่ห้อ VARIAN โดยใช้คอลัมน์ CP-7538 ต่อกับ Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อวิเคราะห์ไฮโดรเจน (H₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอาร์กอน (Ar) และคอลัมน์ HP-PLOT/Q ต่อกับ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อวิเคราะห์มีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

จากรูปที่ 4.25-4.30 กราฟแสดงผลของการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni ที่ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับ SiO₂ ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งจะแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทน (% Conversion) ค่าร้อยละความจำเพาะ (% Selectivity) ของการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ CO และ H₂ ตามลำดับ และค่าร้อยละผลผลิต (% Yield) และตารางที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.16 ตารางสรุปผลเป็นข้อมูลตัวเลข ของ Ni-SiO₂ (Pellet) และ Ni-SiO₂ (Powder) ตามลำดับ

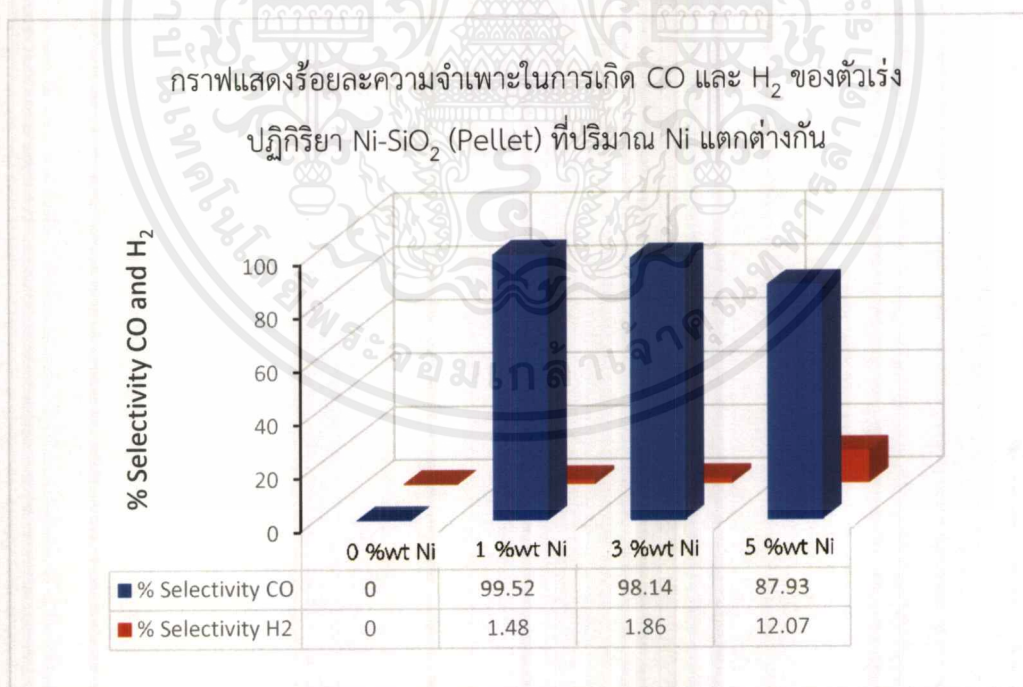


รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

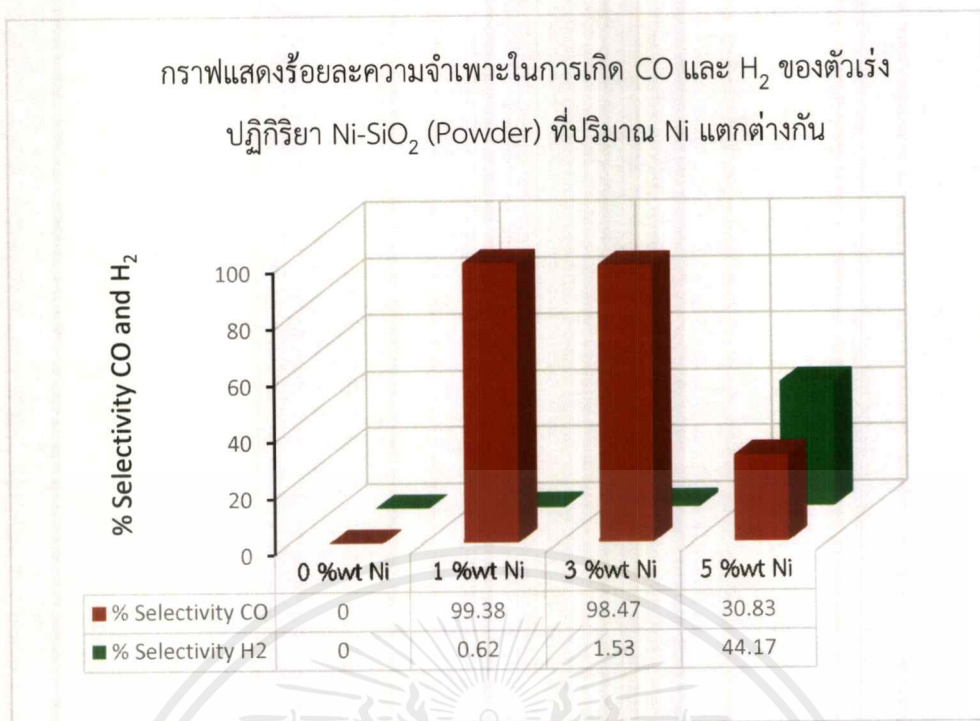


รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder)

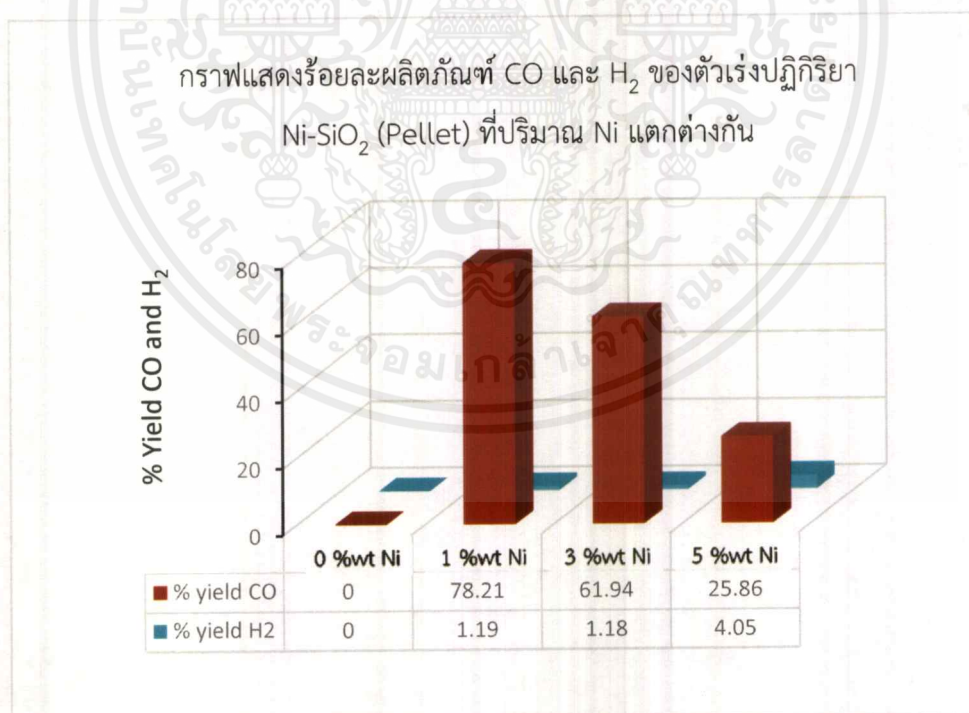


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

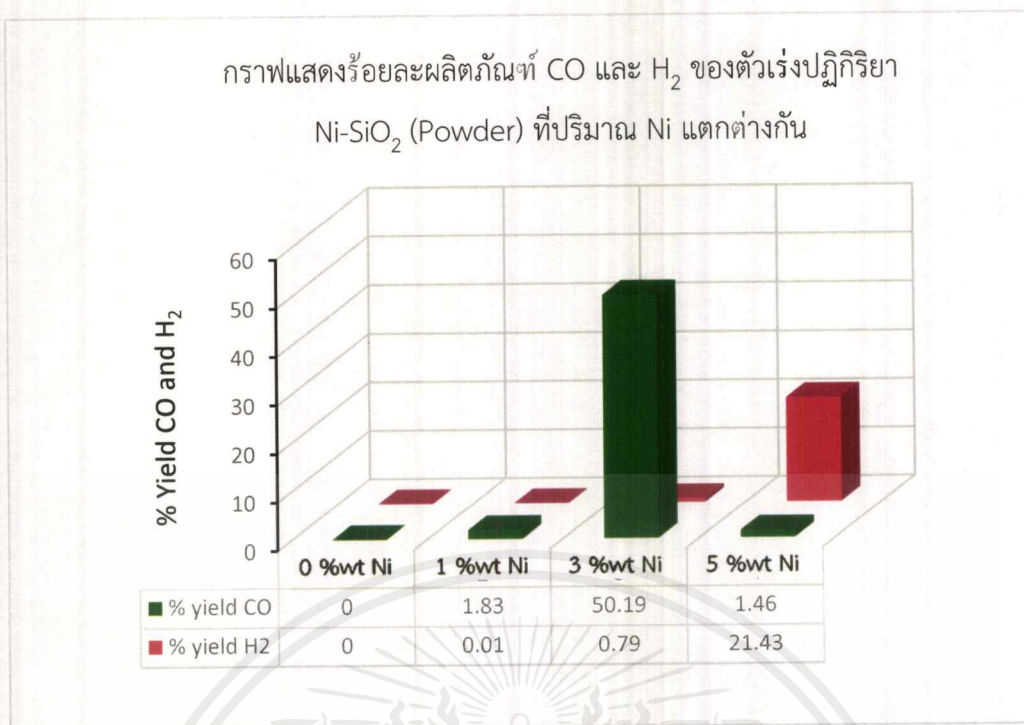


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni ต่างกัน

ตารางที่ 4.15 ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ และร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Pellet)	การเปลี่ยนของมีเทน (mol%)	ความจำเพาะในการเกิดแก๊สสังเคราะห์ (mol%)		สัดส่วนแก๊ส H ₂ /CO	% Yield	
		H ₂	CO		H ₂	CO
0 %wt Ni-SiO ₂	10.97	-	-	-	-	-
1 %wt Ni-SiO ₂	79.40	1.48	98.52	0.0150	1.17	78.21
3 %wt Ni-SiO ₂	63.12	1.86	98.14	0.0190	1.18	61.94
5 %wt Ni-SiO ₂	29.91	12.07	87.93	0.1373	3.61	25.86

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ง, จ และ ฉ

จากตารางที่ 4.15 เมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Chromatography พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ Ni 0 %wt เกิดการเปลี่ยนของมีเทนน้อย เนื่องจากไม่มีปริมาณนิกเกิลที่มีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยา และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมีเทน (% Conversion) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ Ni 1, 3 และ 5 %wt มีค่าเท่ากับ 79.40, 63.12 และ 29.91 mol% ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละความจำเพาะ (% Selectivity) ของการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยร้อยละความจำเพาะของการเกิดเป็น H_2 มีค่าเท่ากับ 1.48, 1.86 และ 12.07 mol% ตามลำดับ และร้อยละความจำเพาะของการเกิดเป็น CO มีค่าเท่ากับ 98.52, 98.14 และ 87.93 mol% ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ H_2/CO มีค่าเท่ากับ 0.0150, 0.0190 และ 0.1373 ตามลำดับ และร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จริงต่อสารตั้งต้นทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (% Yield) ของ H_2 มีค่าเท่ากับ 1.17, 1.18 และ 3.61 ตามลำดับ และของ CO 78.21, 61.94 และ 25.86 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี พบว่า ที่ 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนสูงถึง 79.40 % มีร้อยละผลิตภัณฑ์ H_2 1.17 % และ CO 78.21 %

จากตาราง 4.15 สรุปได้ว่า ที่ 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) เกิดการเปลี่ยนของมีเทนที่น้อย จึงไม่เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ หรือเกิดน้อยมาก จึงไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ เพราะไม่มีปริมาณนิกเกิลที่เป็นตำแหน่งที่ว่างไว้ที่จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ดี ตัวรองรับซิลิกาจึงไม่มีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยา เป็นเพียงตัวรองรับที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาเพียงเท่านั้น และที่ 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) สูงที่สุด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณโลหะ Ni เจือลงบนตัวรองรับที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีขนาดอนุภาค NiO ที่เล็กถึง 6.92 nm เกิดการกระจายตัวที่ดี 1.3869 ทั้งนี้ตัวรองรับซิลิกามีพื้นผิวที่ขรุขระ มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม มีปริมาตรรูพรุนที่สูง จึงรองรับปริมาณโลหะได้มาก โอกาสที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยามีมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแปรสภาพของแก๊สมีเทนที่สูง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากและจำเพาะเจาะจง ซึ่งสอดคล้องกับภาพ 3 มิติ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.8(ค) สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.16(ก) และสอดคล้องกับผลของเทคนิค XRD ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่น้อยกว่า เนื่องจากเมื่อเจือปริมาณโลหะนิกเกิลลงบนตัวรองรับที่มากขึ้น ขนาดอนุภาค NiO มากขึ้น คือ 19.40 และ 27.88 nm ตามลำดับ ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่น้อยลง โอกาสที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันสูงขึ้น จึงเกิดการบดบังทำให้สารตั้งต้นสัมผัสตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก เมื่อในสถานะที่อุณหภูมิสูงสามารถเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้ง่าย ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำ จึงได้ร้อยละการแปรสภาพของแก๊สมีเทนและร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับภาพ 3 มิติ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.9(ค) และรูปที่ 4.10(ค) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และรูปที่ 4.17(ก) และ 4.18(ก) ตามลำดับ และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ การได้ร้อยละผลผลิต H_2 ที่น้อย เกิดจากเครื่องมือในการวิเคราะห์สามารถตรวจวัดสัญญาณของ H_2 ได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพมากพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน ร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ และ ร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Powder)	การเปลี่ยน ของมีเทน (mol%)	ความจำเพาะในการเกิด แก๊สสังเคราะห์ (mol%)		สัดส่วน แก๊ส H ₂ /CO	% Yield	
		H ₂	CO		H ₂	CO
0 %wt Ni-SiO ₂	1.73	-	-	-	-	-
1 %wt Ni-SiO ₂	1.84	0.62	99.38	0.0062	0.01	1.82
3 %wt Ni-SiO ₂	50.97	1.53	98.47	0.0155	0.79	50.19
5 %wt Ni-SiO ₂	22.96	44.17	30.83	1.4327	21.43	1.46

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ง, จ และ ฉ

จากตารางที่ 4.16 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) ที่ Ni 0 %wt เกิดการเปลี่ยนของมีเทนน้อย จึงไม่เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ หรือเกิดน้อยมาก จึงไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ เพราะไม่มีปริมาณนิกเกิลที่เป็นตำแหน่งที่ว่างไว้ที่จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า และค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมีเทน (% Conversion) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ ที่ปริมาณ Ni 1, 3 และ 5 %wt มีค่าเท่ากับ 1.84, 50.97 และ 22.96 mol% ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยร้อยละความจำเพาะ (% Selectivity) ของการเกิดเป็น H₂ มีค่าเท่ากับ 0.62, 1.53 และ 44.17 mol% ตามลำดับ และร้อยละความจำเพาะของการเกิดเป็น CO มีค่าเท่ากับ 99.38, 98.47 และ 30.83 mol% ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.0062, 0.0155 และ 1.4327 ตามลำดับ และร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จริงต่อสารตั้งต้นทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (% Yield) ของ H₂ มีค่าเท่ากับ 0.01, 0.79 และ 21.43 ตามลำดับ และของ CO 1.82, 50.19 และ 1.46 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี พบว่า ที่ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนสูงสุดที่ 50.97 % และร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ของ H₂ 0.79 % และ CO 50.19 %

จากตาราง 4.16 สรุปได้ว่า ที่ 0 %wt Ni-SiO₂ (Powder) ไม่เกิดการเปลี่ยนของมีเทนเนื่องจากไม่มีปริมาณนิกเกิลที่เป็นตำแหน่งที่ว่างไว้ที่จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ดี จึงไม่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และที่ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) พบว่า ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงสุด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณโลหะ Ni เจือลงบนตัวรองรับที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยา ขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งมีการกระจายตัวที่ดี เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนบางบริเวณ พื้นผิวของซิลิกามีความขรุขระซึ่ง

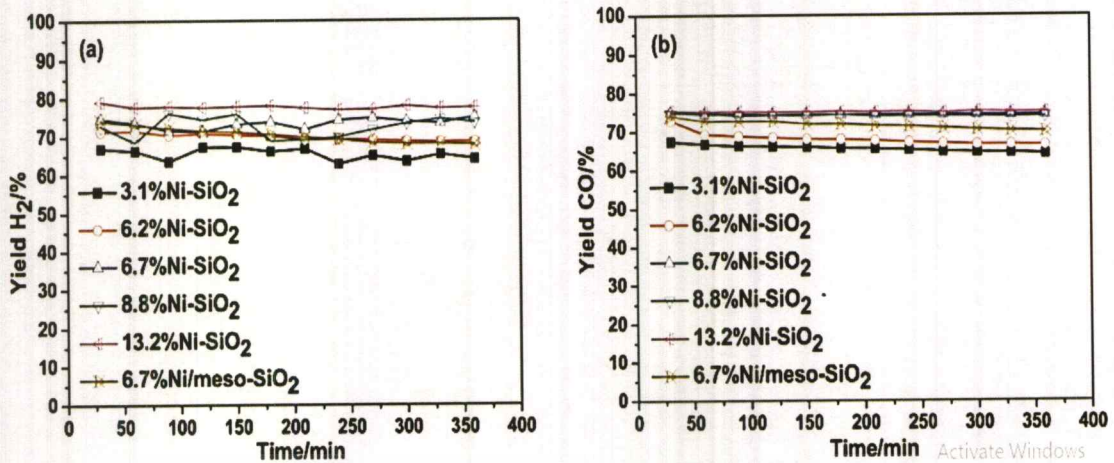
สอดคล้องกับภาพ 3 มิติ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.13(ค) สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS รูปที่ 4.21(ก) และสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาที่ 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder) ให้คาร์บอนการเปลี่ยนแปลงของมีเทนและร้อยละผลิตภัณฑ์ที่น้อย เนื่องจากเมื่อเจือปริมาณโลหะนิกเกิลลงบนตัวรองรับที่มากขึ้น ขนาดอนุภาค NiO ใหญ่ขึ้น โอกาสที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันสูงขึ้นด้วย การรวมตัวกันส่งผลให้เกิดการบดบังทำให้สารตั้งต้นเข้าสัมผัสตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก เมื่อในสภาวะที่อุณหภูมิสูงจึงสามารถเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้ง่าย ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำ จึงได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับภาพ 3 มิติ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.14(ค) สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.22(ก) และสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ การได้ร้อยละผลผลิต H₂ ที่น้อย เกิดจากเครื่องมือในการวิเคราะห์สามารถตรวจวัดสัญญาณของ H₂ ได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพมากพอ

เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder) แม้ขนาดผลึกของนิกเกิลออกไซด์เล็กที่สุด มีการกระจายตัวของนิกเกิลที่ดี ไม่จำเป็นจะต้องให้ประสิทธิภาพที่ดีเสมอไป อาจให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่น้อยได้ สาเหตุมาจากหลายปัจจัยโดยสามารถอ้างอิงได้จากงานวิจัยของ Wenjia Cai *et al.*, 2014. ได้ทำการศึกษาปริมาณนิกเกิลที่แตกต่างกันบนตัวรองรับซิลิกาที่ผ่านการระเหย จากตารางที่ 4.17 พบว่า ที่ปริมาณ Ni 3.1 %wt แม้จะมีพื้นที่ผิวของซิลิกา ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนที่สูง มีการกระจายตัวที่ดี ขนาดผลึกที่เล็ก แต่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่น้อยที่สุดดังรูปที่ 4.31 เนื่องจากหลังทำการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน H₂ ปริมาณนิกเกิลเหลือในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่เหมาะสมต่อพื้นที่ผิวของตัวรองรับ และพบว่าที่ 6.7 %wt ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณโลหะที่เหมาะสมต่อพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ จากงานวิจัยฉบับอื่น

Sample	Surface area (m ² g ⁻¹)	Pore volume (cm ³ g ⁻¹)	Pore diameter (nm)	TPR results ^a (%)	Ni ^b (wt%)	Reduced Ni ^c (wt%)	Ni dispersion ^d (%)	Metal particle size ^e (nm)
3.1%Ni-SiO ₂	504	0.62	3.60	-	3.1	0.4	24.8	4.1
6.2%Ni-SiO ₂	484	0.57	3.58	-	6.2	3.0	16.3	6.2
6.7%Ni-SiO ₂	479	0.46	3.57	7.1	6.7	3.0	13.1	7.7
8.8%Ni-SiO ₂	419	0.38	3.58	9.8	8.8	3.3	9.6	10.5
13.2%Ni-SiO ₂	466	0.39	3.55	23.8	13.2	6.5	7.2	14.0

(W. Cai, *et al.* 2014.)



รูปที่ 4.31 ร้อยละการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ (Wenjia Cai *et al*, 2014.)

จากตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบระหว่าง 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) และ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยามากกว่าที่ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) เนื่องจากการมีขนาดผลึกของ NiO ที่เล็กกว่า เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า ทั้งนี้ตัวรองรับซิลิกา (Pellet) มีพื้นที่ผิวสูงช่วยในการกระจายตัวของโลหะนิกเกิล เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มาก ดังนั้น 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) จึงมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงสุด ให้ค่าการแปรสภาพของแก๊สมีเทน (% Conversion) ให้ค่าความจำเพาะในการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (% Selectivity) และให้ค่าการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สูง ส่วนที่ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) พบว่า มีขนาดผลึกของ NiO ที่ใหญ่กว่า เกิดการกระจายตัวที่น้อยกว่า เกิดการรวมตัวกันเกิดขึ้น เมื่อผ่านปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิสูง ส่งผลให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เสถียรและพังทลายลง ขนาดผลึกที่ใหญ่และรวมตัวกันลดโอกาสการสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยา แม้ตัวรองรับซิลิกา (Powder) จะมีปริมาตรรูพรุนสูงกว่า แต่พื้นที่ผิวที่น้อยกว่าช่วยลดการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นเป็นผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบระหว่าง 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) และ 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

Property	1 %wt Ni-SiO ₂ (Pellet)	3 %wt Ni-SiO ₂ (Powder)
%wt Ni	1 %wt Ni	3 %wt Ni
Support	SiO ₂ -Pellet	SiO ₂ -Powder
Surface area	300 m ² /g (Pellet)	230 m ² /g (Powder)
Pore size	10 nm	10 nm
Pore volume	1.00 ml/g	1.06 ml/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crystallite size NiO	6.92 nm		8.4 nm	
Distribution NiO	1.3869		1.1423	
% Conversion	79.40 %		50.97 %	
% Selectivity	CO 98.52 %	H ₂ 1.48 %	CO 98.47 %	H ₂ 1.53 %
% Yield	CO 78.21 %	H ₂ 1.17 %	CO 50.19 %	H ₂ 0.79 %

จากตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยากับงานวิจัยฉบับอื่น พบว่าที่ 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ร้อยละความจำเพาะของการเกิดเป็น H₂ และ CO เท่ากับ 1.48 และ 98.52 % ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ จิราพัชร และคณะ, 2561 ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %wt Ni- γ Al₂O₃ สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation) โดยให้ค่าร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็น H₂ และ CO เป็นมีค่าเท่ากับ 1.88 และ 98.12 % ตามลำดับ ดังนั้น 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) แม้จะมีปริมาณ Ni ที่น้อยกว่า แต่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่า 10 %wt Ni- γ Al₂O₃ เพราะมีปริมาตรรูพรุนสูง และมีกระจายตัวที่ดี

ตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยากับงานวิจัยฉบับอื่น

Property	ดวานภา ธีราภรณ์, 2562	จิราพัชร และคณะ, 2561		
Method	ตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI)	ตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (IWI)		
Catalyst	Ni-SiO ₂ (Pellet)	Ni- γ Al ₂ O ₃		
%wt Ni	1 %wt Ni	10 %wt Ni		
Surface area	300 m ² /g (SiO ₂)	360 m ² /g (γ Al ₂ O ₃)		
Pore volume	1.00 ml/g	0.68 ml/g		
Crystallite size NiO	6.92 nm	0.96 nm		
Distribution NiO	1.3869	1.0000		
% Conversion	79.40 %	25.36 %		
% Selectivity	CO 98.52 %	H ₂ 1.48 %	CO 98.12 %	H ₂ 1.88 %

ดังนั้น การได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงและมีประสิทธิภาพ จากปฏิกิริยา Dry reforming of methane ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดตัวรองรับ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน ปริมาณโลหะที่เจือลงบนตัวรองรับ ขนาดผลึกของโลหะออกไซด์ การกระจายตัวของโลหะ วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่ง สภาวะในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือ เป็นต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ที่ปริมาณต่าง ๆ บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO_2) 2 ชนิด ได้แก่ SiO_2 (Pellet) และ SiO_2 (Powder) สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนแบบจุ่มซุบ (Incipient wetness impregnation) แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์ในเทคนิคต่าง ๆ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni) ที่ปริมาณแตกต่างกัน บนตัวรองรับซิลิกาเจล (SiO_2) 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเจลสำเร็จรูป (SiO_2 -Pellet) และซิลิกาเจลที่ผ่านการระเหยน้ำจาง (SiO_2 -Powder) จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ซิลิกาเจล (Pellet) ที่ 1 %wt Ni- SiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากมีขนาดผลึกของ NiO ที่เล็ก เกิดการกระจายตัวที่ดี ทั้งนี้ตัวรองรับซิลิกา (Pellet) มีพื้นที่ผิวสูงช่วยในการกระจายตัวของโลหะนิกเกิล เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มาก จึงให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทน (% Conversion) สูงถึง 79.40 % ให้ค่าร้อยละความจำเพาะ (% Selectivity) ในกาเกิดเป็นแก๊ส H_2 1.48 % และ CO 98.52 % และให้ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) H_2 1.17 % และ CO 78.21 % จากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี จะมีพื้นที่ผิวของตัวรองรับที่สูง มีลักษณะเป็นรูพรุนและปริมาตรรูพรุนสูง มีความขรุขระ มีขนาดผลึกของโลหะออกไซด์ขนาดเล็ก การกระจายตัวของโลหะที่สูง เป็นปัจจัยในการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ในปริมาณที่มากจากปฏิกิริยา Dry reforming of methane ซึ่งผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ และสอดคล้องกับผลจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR, XRD, SEM และ EDS นอกจากนี้ การมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีและมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดตัวรองรับ ปริมาณโลหะที่เจือลงบนตัวรองรับ ขนาดผลึก การกระจายตัวของโลหะ วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่ง สภาพะในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นในการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ เช่น Ni- Al_2O_3
2. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อดูความเสถียรของโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET เพื่อทราบขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน เพื่อเป็นการสนับสนุนผลการทดลองเพิ่มเติม
4. ควรทำการทดลองซ้ำในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพ
5. ควรพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยายสูง ๆ เพื่อให้เห็นอนุภาคของโลหะที่ชัดเจน



เอกสารอ้างอิง

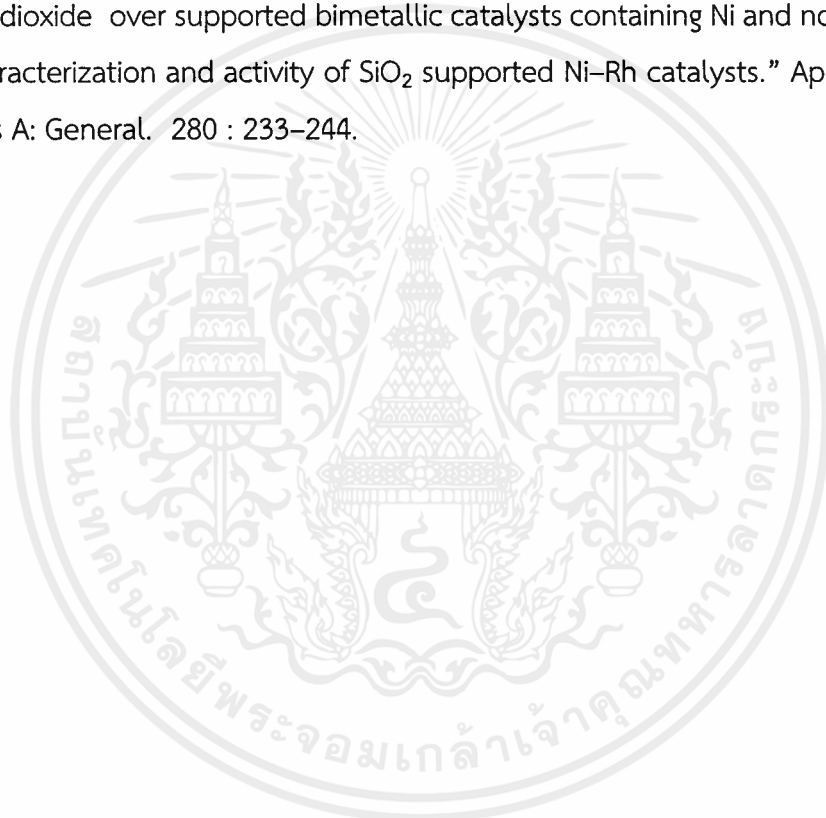
- การะเกด เทศศรี. 2556. “ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยายุคใหม่.” 18(20) : 274-280
- จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษฏานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. หนังสือ
- จิราพัชร และคณะ. 2561. “การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาสำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ต้นกล้า อินสว่าง. 2558. “แนะนำเครื่องมือวิจัย.” 2(7)
- นวดล เหล่าศิริพจน์. 2555. ผลิตภัณฑ์โพลิงไฮโดรเจน. [Online]. Available : http://www.kalasin3.go.th/view.php?article_id=24359.
- บริษัท เอ็นเนอร์ยี วิชั่น จำกัด. 2563. ผลงานก๊าซชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.energyvision.co.th/14432517/ผลงานก๊าซชีวภาพ>
- พรประภา สายทองสุข และ มานพ เจริญไชยตระกูล. 2553. “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานาโนนิกเกิลโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่มี เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมสำหรับการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน.” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิชญ์ รัชฎาวงศ์. 2554. แก๊สชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php?title=ก๊าซชีวภาพ>
- พิชญ์ ศุภผล และคณะ. 2553. “โครงการพัฒนาระบบนำส่งสารออกฤทธิ์สมุนไพรไทยด้วยระบบเส้นใยอิเล็กโตรสปิน.”
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. 2563. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. Available : sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/73-scanning-electron-Microscope-sem.html
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. 2563. ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์. [Online]. Available : sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/66-ftir-micro-spectrometer.html
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. 2563. เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available : sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- สุพะไชย์ จินดาวงศ์กุล. 2555. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. [Online]. Available : http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2555_189_60_p22-24.pdf.
- B. Zhao, et al. 2017. "Syngas methanation over Ni/SiO₂ catalyst prepared by ammonia-assisted impregnation." *international journal of hydrogen energy*. : 1-11
- James R. Connolly. 2005. "Introduction to X-ray Powder Diffraction." : 1-9
- HONG JIN CHEMICAL CO.,LTD. 2563. นิกเกิลไนเตรต.[Online]. Available : <http://th.hongjinchemical.com/inorganic-chemical/nickel-salt/nickel-nitrate-cas-13478-007.html>
- KANG YONG GROUP. 2563. ระบบแก๊สซิฟิเคชัน. [Online]. Available : <https://www.kyg.co.th/products-services/gasification-system/>
- L. Zhang, et al. 2017. "Dry reforming of methane to syngas over lanthanum-modified mesoporous nickel aluminate/g-alumina nanocomposites by one-pot synthesis." *International Journal of Hydrogen Energy*. 42 (16) : 11333-11345.
- L. Zhang, et al. 2019. "CO₂ reforming with methane reaction over Ni@SiO₂ catalysts Coupled by size effect and metal-support interaction." *Fuel*. 256 : 115954
- M.A. Hossain, et al. 2017. "Optimization of renewable hydrogen-rich syngas Production from catalytic reforming of greenhouse gases (CH₄ and CO₂) over calcium iron oxide supported nickel catalyst." *Journal of the Energy Institute*. : 1-18
- Naito S. 2000. "Methane conversion by various metal, metal oxide and metal carbide Catalysts." *Catalysis Surveys from Japan*. 4 : 3-15.
- Nopporn Sirisaypirun, Somsak Woramongkolchai, Samart Kongtaweelert and Montree Thongkam. 2017. "Fischer Tropsch synthesis in Fixed-bed reactor Over Ru promoted Co/SiO₂ catalysts." In Pure and Applied Chemistry International Conference. Bangkok.
- Osazuwa OU, et al. 2017. "Syngas production from methane dry reforming over SmCoO₃ perovskite catalyst: Kinetics and mechanistic studies." *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(15) : 9707-9721.
- paintmattingagent.com. 2563. ผงซิลิกา. [Online] : <http://thai.paintmattingagent.com/sale-10628159-fine-grained-wax-after-treated-precipitated-silica-matting-agent-white-powder-for-water-based-coatin.html>
- P.S. Roy, et al. 2018. "CO₂ conversion to syngas through the steam-biogas reforming Process." *Journal of CO₂ Utilization*. 25 : 275-282.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- siamchemi.com. 2563. **ซิลิกาและประโยชน์ซิลิกา**. [Online] : <https://www.siamchemi.com/ซิลิกา/>
- W. Cai, et al. 2014. "Highly Dispersed Nickel-Containing Mesoporous Silica with Superior Stability in Carbon Dioxide Reforming of Methane:The Effect of Anchoring." *Materials*. 7 : 2340-2355
- W. Lamai, et al. 2019. "Synthesis and Characterization of Ni@Pt core-shell catalyst Over TiO₂ support prepared by incipient wetness impregnation and electroless deposition." *Materials Today: Proceedings*. 17 : 1396–1402
- W.K. Jo´z´wiak*, M. Nowosielska, J. Rynkowski. 2005. " Reforming of methane with Carbon dioxide over supported bimetallic catalysts containing Ni and noble metal. Characterization and activity of SiO₂ supported Ni–Rh catalysts." *Applied Catalysis A: General*. 280 : 233–244.





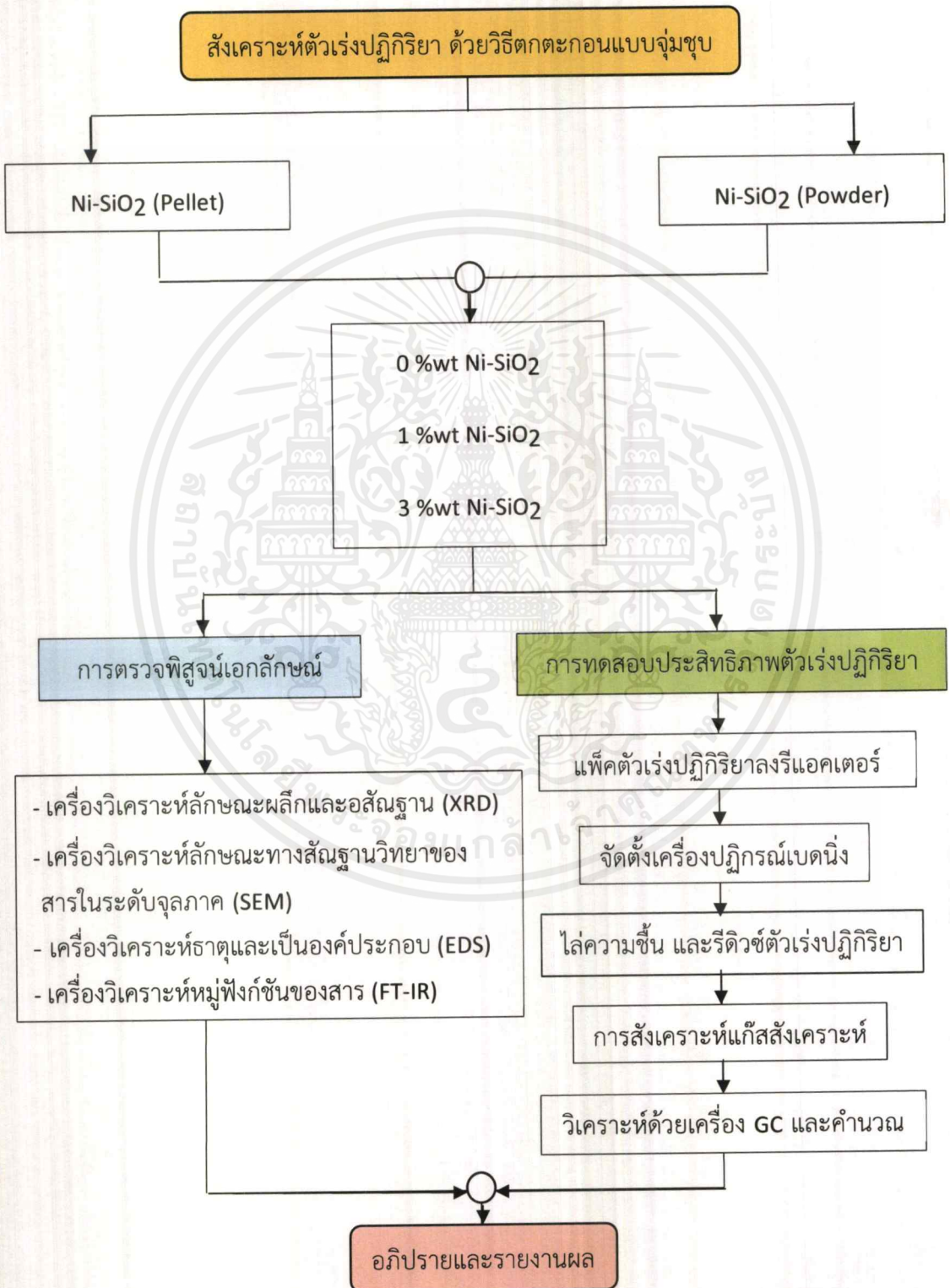
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แผนการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเปลี่ยนรูปมีเทน (CH_4) ไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ (CO , H_2)



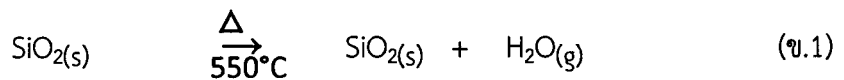
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0, 1, 3 และ 5 %wt NiO-SiO₂ (Pellet) และ (Powder)

- สมการเคมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Calcination)



- สมการเคมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา NiO-SiO₂ ที่ปริมาณ Ni ต่าง ๆ



2. การคำนวณน้ำหนักสารตั้งต้น

ข้อมูล	มวลอะตอม Ni	เท่ากับ	59.6934	g/mol
	มวลโมเลกุล SiO ₂	เท่ากับ	60.0800	g/mol
	มวลโมเลกุล Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	เท่ากับ	290.7949	g/mol

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet และ Powder)

- ชั่งน้ำหนักเฉพาะ SiO₂ Pellet และ Powder 3.0000 g. แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C

2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet และ Powder) จากสารตั้งต้น

Ni(NO₃)₂·6H₂O ในน้ำปราศจากไอออน 3 ml โดยชั่ง SiO₂ 3.0000 g

$$\begin{aligned} \text{สูตร } g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= g \text{ SiO}_2 \times \frac{g \text{ Ni}}{g \text{ SiO}_2} \\ g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 3.0000 g \text{ SiO}_2 \times \frac{1 g \text{ Ni}}{99 g \text{ SiO}_2} = 0.0303 g \text{ Ni} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สูตร } 1 \% \text{wt Ni} &= g \text{ Ni} \times \frac{\text{MW Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{\text{MW Ni}} \\ 1 \% \text{wt Ni} &= 0.0303 g \text{ Ni} \times \frac{290.7949 g/\text{mol Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{58.6934 g/\text{mol Ni}} \end{aligned}$$

$$1 \% \text{wt Ni} = 0.1501 g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ ดังนั้น ต้องชั่ง $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.1501 g ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂

2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Pellet และ Powder) จากสารตั้งต้น $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำปราศจากไอออน 3 ml โดยชั่ง SiO₂ 3.0000 g

$$\begin{aligned} \text{สูตร } g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= g \text{ SiO}_2 \times \frac{g \text{ Ni}}{g \text{ SiO}_2} \\ g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 3.0000 g \text{ SiO}_2 \times \frac{3.0000 g \text{ Ni}}{97.0000 g \text{ SiO}_2} = 0.0928 g \text{ Ni} \\ \text{สูตร } 3 \% \text{wt Ni} &= g \text{ Ni} \times \frac{\text{MW Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{\text{MW Ni}} \\ 3 \% \text{wt Ni} &= 0.0928 g \text{ Ni} \times \frac{290.7949 g/\text{mol Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{58.6934 g/\text{mol Ni}} \\ 3 \% \text{wt Ni} &= 0.4598 g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

∴ ดังนั้น ต้องชั่ง $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.4598 g ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂

2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet และ Powder) จากสารตั้งต้น $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำปราศจากไอออน 3 ml โดยชั่ง SiO₂ 3.0000 g

$$\begin{aligned} \text{สูตร } g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= g \text{ SiO}_2 \times \frac{g \text{ Ni}}{g \text{ SiO}_2} \\ g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 3.0000 g \text{ SiO}_2 \times \frac{5.0000 g \text{ Ni}}{95.0000 g \text{ SiO}_2} = 0.1579 g \text{ Ni} \\ \text{สูตร } 5 \% \text{wt Ni} &= g \text{ Ni} \times \frac{\text{MW Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{\text{MW Ni}} \\ 5 \% \text{wt Ni} &= 0.1579 g \text{ Ni} \times \frac{290.7949 g/\text{mol Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{58.6934 g/\text{mol Ni}} \\ 5 \% \text{wt Ni} &= 0.7823 g \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

∴ ดังนั้น ต้องชั่ง $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.7823 g ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂

3. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\text{สูตร ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักที่ได้จริง}}{\text{น้ำหนักทางทฤษฎี}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

1 %wt NiO-SiO₂ (Pellet)

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{3.1501 \text{ g}}{3.0546 \text{ g}} \times 100$$

$$= 96.9684 \%$$

4. การคำนวณหาขนาดผลึกของ NiO

จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation)

$$d = \frac{K\lambda}{\beta_{1/2} \cos\theta_B}$$

K คือ ค่าคงที่ Scherrer (0.9)

λ คือ ความยาวคลื่นของ x-ray ($\text{CuK}\alpha = 1.54060$) มีหน่วยเป็น อังสตรอม (Å)

β คือ ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM) มีหน่วยเป็น เรเดียน

d คือ ขนาดผลึกที่ต้องการหา

θ คือ ตำแหน่งมุมหักเหของพีค (กราฟ XRD จะให้ค่ามุมเป็น 2θ) มีหน่วยเป็น เรเดียน

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO₂ (Pellet)

Pellet	2θ	FWHM (β)	Crystallite size (Å)	Crystallite size (nm)
0 %wt Ni-SiO ₂	-	-	-	-
1 %wt Ni-SiO ₂	43.30	1.23464	69.23	6.92
3 %wt Ni-SiO ₂	43.20	0.44033	194.04	19.40
5 %wt Ni-SiO ₂	43.30	0.30667	278.81	27.88

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลในการหาขนาดผลึก (Crystallite size) ของ NiO บน SiO₂ (Powder)

Powder	2θ	FWHM (β)	Crystallite size (Å)	Crystallite size (nm)
0 %wt Ni-SiO ₂	-	-	-	-
1 %wt Ni-SiO ₂	43.30	2.82996	30.20	3.02
3 %wt Ni-SiO ₂	43.42	1.01752	84.04	8.40
5 %wt Ni-SiO ₂	43.34	0.60869	140.44	14.04

5. การคำนวณหาการกระจายตัวของ NiO (Nopporn Sirisaypirun, *et al.* 2017.)

ตัวอย่างการคำนวณ

- 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

$$\begin{aligned}
 \text{สูตร} \quad D &= \frac{96}{d \text{ (Å)}} \\
 &= \frac{96}{96.23} \\
 &= 1.3869
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.3 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst (Pellet)	Distribution of NiO
0 %wt Ni-SiO ₂	-
1 %wt Ni-SiO ₂	1.3869
3 %wt Ni-SiO ₂	0.4947
5 %wt Ni-SiO ₂	0.3443

ตารางที่ ข.4 การกระจายตัวของอนุภาค निकิลออกไซด์ (NiO) ของ Ni-SiO₂ (Powder)

Catalyst (Powder)	Distribution of NiO
0 %wt Ni-SiO ₂	-
1 %wt Ni-SiO ₂	2.5478
3 %wt Ni-SiO ₂	1.1423
5 %wt Ni-SiO ₂	0.6836

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลอง

6.1 การสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂

ข้อมูล	N ₂	150 °C
	Biogas	650 °C
	Room Temp	25 °C

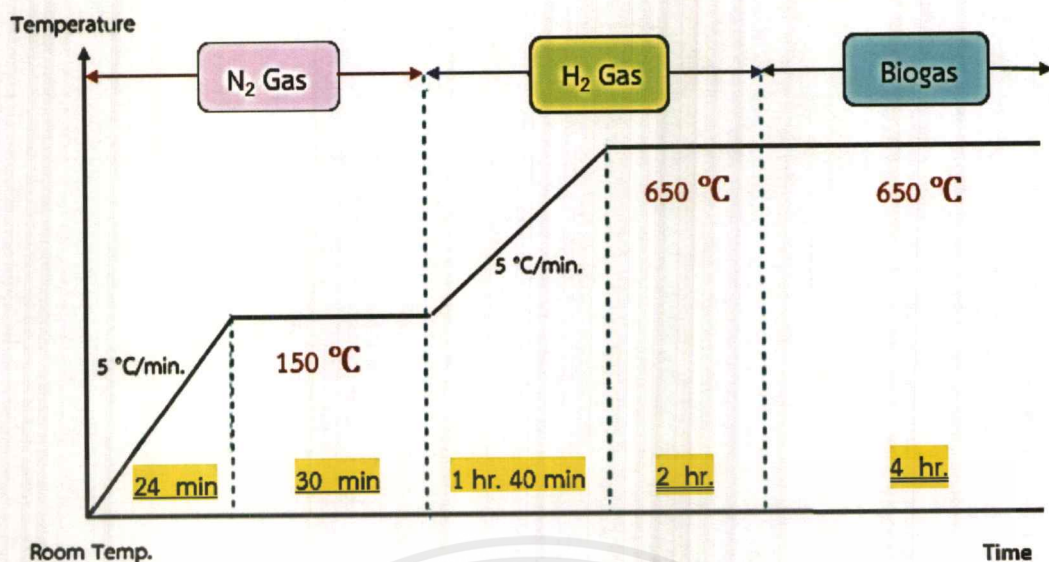
การคำนวณ

$$\text{เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิตามที่กำหนด} = \frac{\text{อุณหภูมิ (สุดท้าย) - อุณหภูมิ (เริ่มต้น)}}{\text{อัตราการเพิ่ม หรือ ลดอุณหภูมิ}}$$

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทดลอง

N ₂	150 °C	1	เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ $\frac{150^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{5^{\circ}\text{C}} = 25 \text{ min}$
		2	เวลาที่ใช้ช่วงอุณหภูมิคงที่ 30 min
5 % H ₂	650 °C	3	เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ $\frac{650^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}}{5^{\circ}\text{C}} = 100 \text{ min}$ = 1 hr 40min
		4	เวลาที่ใช้ช่วงอุณหภูมิคงที่ 2 hr.
Biogas (CH ₄ : CO ₂)	5 °C /min	4	เวลาที่ใช้ช่วงอุณหภูมิคงที่ 4 hr (เก็บแก๊สทุก ๆ ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสังเคราะห์ Syngas ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สชีวภาพ

สภาวะของการทำปฏิกิริยา

- สัดส่วนของแก๊สชีวภาพ (CH ₄ : CO ₂ : Ar)	50 : 40 : 10
- อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ	20 ml/min
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้	0.5000 g
- Quartz sand	0.5000 g
- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	650 °C
- ความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	1 atm.

ข้อมูลจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี Thermal conductivity detector (TCD) และ Flame ionized detector (FID)

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.905	363538176
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.923	328820128
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	1.916	327017216
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.906	359823904
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.930	279027360
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND

หมายเหตุ : ND (Non detect)

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.909	354493152
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.988	106073712
CO	9.165	1190175
H ₂	1.525	23241
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	2.021	71713760
CO	8.003	688362
H ₂	1.944	133789
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.987	110441408
CO	9.189	1329350
H ₂	1.527	22255
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	2.065	3889894
CO	9.470	310901
H ₂	1.572	6899

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.949	200497984
เก็บแก๊สชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	2.014	63280296
CO	9.070	1245342
H ₂	1.518	26147
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	2.009	71680152
CO	9.072	1304476
H ₂	1.519	24906
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	2.002	81327544
CO	9.096	1270087
H ₂	1.517	26184
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	2.007	79471768
CO	9.109	1333291
H ₂	1.523	21955

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.996	114324872
เก็บแก๊สชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	2.005	73470480
CO	9.002	1084059
H ₂	0.628	640417
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	2.001	78012040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CO	9.002	1142075
H ₂	1.514	25447
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	2.00	81998840
CO	9.006	1172499
H ₂	1.514	26176
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.999	87037296
CO	9.020	1225307
H ₂	1.609	89219

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Powder) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.898	364458528
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.912	355535680
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	1.907	359271808
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.907	358277888
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.997	58371576
CO	ND	ND
H ₂	ND	ND

หมายเหตุ : ND (Non detect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.906	364755296
เก็บแก๊สชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.901	351285984
CO	9.199	137778
H ₂	1.571	1581
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	1.909	359146080
CO	9.234	100478
H ₂	1.585	534
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.907	361220896
CO	9.262	94267
H ₂	1.586	396
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.908	360543136
CO	9.280	86367
H ₂	1.587	355

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.931	290164592
เก็บแก๊สชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.983	119673464
CO	8.900	1309908
H ₂	1.518	22582
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	1.979	135613872

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CO	8.922	1308677
H ₂	1.525	20265
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.979	150590448
CO	8.948	1311970
H ₂	1.526	19801
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.968	163117280
CO	8.960	1307722
H ₂	1.526	18871

ตารางที่ ค.8 การวิเคราะห์แก๊สสังเคราะห์ด้วย GC-TCD และ GC-FID ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder) แต่ละชั่วโมง

Peak name	Retention time	Area
CH ₄ ขาเข้า	1.907	361232288
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 1		
CH ₄ ขาออก	1.907	360263648
CO	9.248	47812
H ₂	ND	ND
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 2		
CH ₄ ขาออก	1.911	349720128
CO	9.224	132523
H ₂	1.581	1175
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 3		
CH ₄ ขาออก	1.910	349776256
CO	9.141	130241
H ₂	2.406	465741
เก็บแก๊ส ชั่วโมงที่ 4		
CH ₄ ขาออก	1.998	353428536
CO	9.343	16798
H ₂	2.376	702283

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	9.550041864	0	0
2	10.04597657	0	0
3	1.021700676	0	0
4	23.24675139	0	0
เฉลี่ย	10.96611763	0	0

ตารางที่ ค.10 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	70.07735935	98.08466346	1.915336538
2	79.77005773	99.81378766	0.186212337
3	68.84526334	98.35343906	1.646560941
4	98.90268853	97.82913782	2.170862177
เฉลี่ย	79.39884224	98.520257	1.479742998

ตารางที่ ค.11 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	68.43843777	97.94359212	2.056407881
2	64.24894128	98.24529267	1.75470733
3	59.43722606	97.98005201	2.019947989
4	60.36280943	98.37999891	1.620001092
เฉลี่ย	63.12185363	98.13723393	1.862766073

ตารางที่ ค.12 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Pellet)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	35.735349	62.8630958	37.1369042
2	31.7628451	97.82042651	2.17957349
3	28.27558993	97.81625545	2.183744551
4	23.86845095	93.2128387	6.787161304
เฉลี่ย	29.91055875	87.92815411	12.07184589

ตารางที่ ค.13 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	2.448247829	0	0
2	1.423130371	0	0
3	1.695841783	0	0
4	1.358402794	0	0
เฉลี่ย	1.733655694	0	0

ตารางที่ ค.14 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	3.692698132	98.86551999	1.134480012
2	1.537802483	99.47134994	0.528650061
3	0.968978391	99.58167394	0.418326062
4	1.154790635	99.61361906	0.386380937
เฉลี่ย	1.83856741	99.38304073	0.616959268

ตารางที่ ค.15 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	58.75413763	98.30527809	1.694721912
2	53.26022234	98.47510275	1.524897249
3	48.09849498	98.51318282	1.486817178
4	43.78108015	98.57748383	1.422516175
เฉลี่ย	50.97348378	98.46776187	1.532238128

ตารางที่ ค.16 ร้อยละการเปลี่ยนแก๊สชีวภาพ (CH_4) และค่าร้อยละการเลือกเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2 , CO) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt Ni-SiO₂ (Powder)

ชั่วโมง	% CH ₄ Conversion	% CO Selectivity	% H ₂ Selectivity
1	0.268148787	0	0
2	3.186913347	99.12115364	0.878846355
3	3.171375423	21.85317677	78.14682323
4	2.160314086	2.336037248	97.66396275
เฉลี่ย	2.196687911	30.82759191	44.17240808

ตารางที่ ค.17 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ CO ในแต่ละชั่วโมงของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet)

Catalyst (Pellet)	% Yield (1 hr)	% Yield (2 hr)	% Yield (3 hr)	% Yield (4 hr)	เฉลี่ย
0 %wt Ni-SiO ₂	0	0	0	0	0
1 %wt Ni-SiO ₂	68.73514208	79.62151604	67.71168412	96.75564748	78.21
3 %wt Ni-SiO ₂	67.03106434	63.12156039	58.23662501	59.38493126	61.94
5 %wt Ni-SiO ₂	22.46434668	31.07055055	27.65812328	22.24846069	25.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ H_2 ในแต่ละชั่วโมงของตัวเร่งปฏิกิริยา $Ni-SiO_2$ (Pellet)

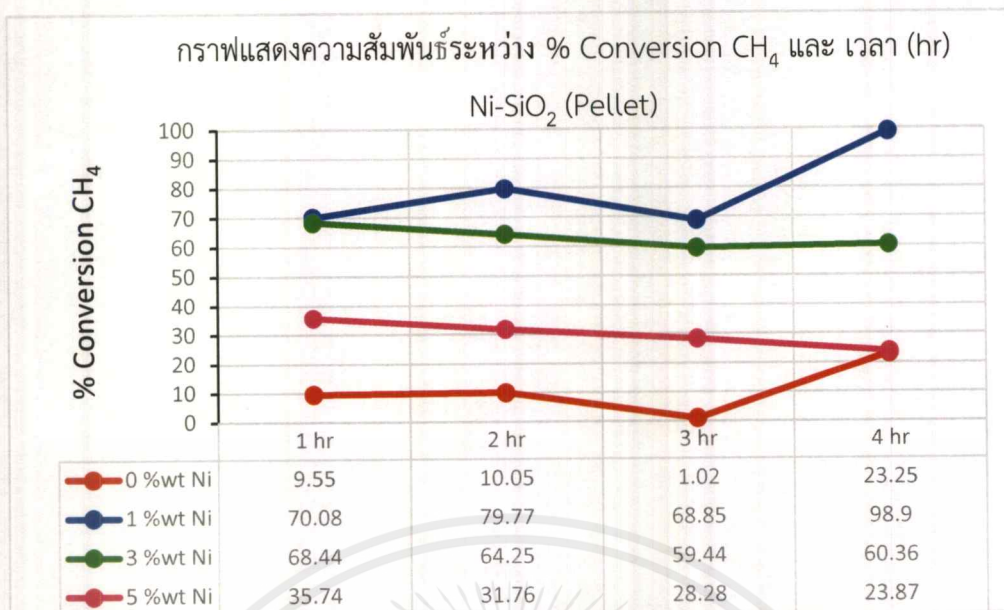
Catalyst (Pellet)	% Yield (1 hr)	% Yield (2 hr)	% Yield (3 hr)	% Yield (4 hr)	เฉลี่ย
0 %wt $Ni-SiO_2$	0	0	0	0	0
1 %wt $Ni-SiO_2$	1.342217268	0.148541689	1.133579215	2.147041058	1.19
3 %wt $Ni-SiO_2$	1.407373428	1.127380882	1.200601053	0.977878172	1.18
5 %wt $Ni-SiO_2$	13.27100232	0.692294551	0.617466655	1.619990267	4.05

ตารางที่ ค.19 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ CO ในแต่ละชั่วโมงของตัวเร่งปฏิกิริยา $Ni-SiO_2$ (Powder)

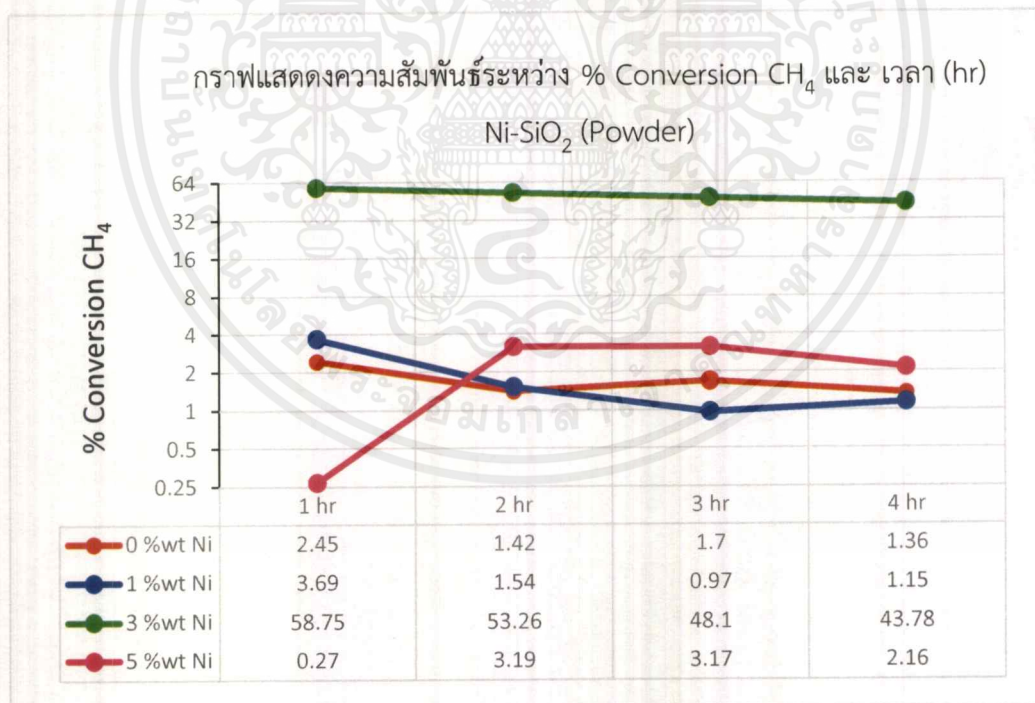
Catalyst (Powder)	% Yield (1 hr)	% Yield (2 hr)	% Yield (3 hr)	% Yield (4 hr)	เฉลี่ย
0 %wt $Ni-SiO_2$	0	0	0	0	0
1 %wt $Ni-SiO_2$	3.650805209	1.52967289	0.964924902	1.150328744	1.82
3 %wt $Ni-SiO_2$	57.75841839	52.44805867	47.3833583	43.1582872	50.19
5 %wt $Ni-SiO_2$	0	3.158905275	0.693046277	1.99052259	1.46

ตารางที่ ค.20 ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield) ของ H_2 ในแต่ละชั่วโมงของตัวเร่งปฏิกิริยา $Ni-SiO_2$ (Powder)

Catalyst (Powder)	% Yield (1 hr)	% Yield (2 hr)	% Yield (3 hr)	% Yield (4 hr)	เฉลี่ย
0 %wt $Ni-SiO_2$	0	0	0	0	0
1 %wt $Ni-SiO_2$	0.041892922	0.008129594	0.004053489	0.004461891	0.01
3 %wt $Ni-SiO_2$	0.995719244	0.812163665	0.715136686	0.622792947	0.79
5 %wt $Ni-SiO_2$	0	0.028008072	2.478329145	83.21884607	21.43

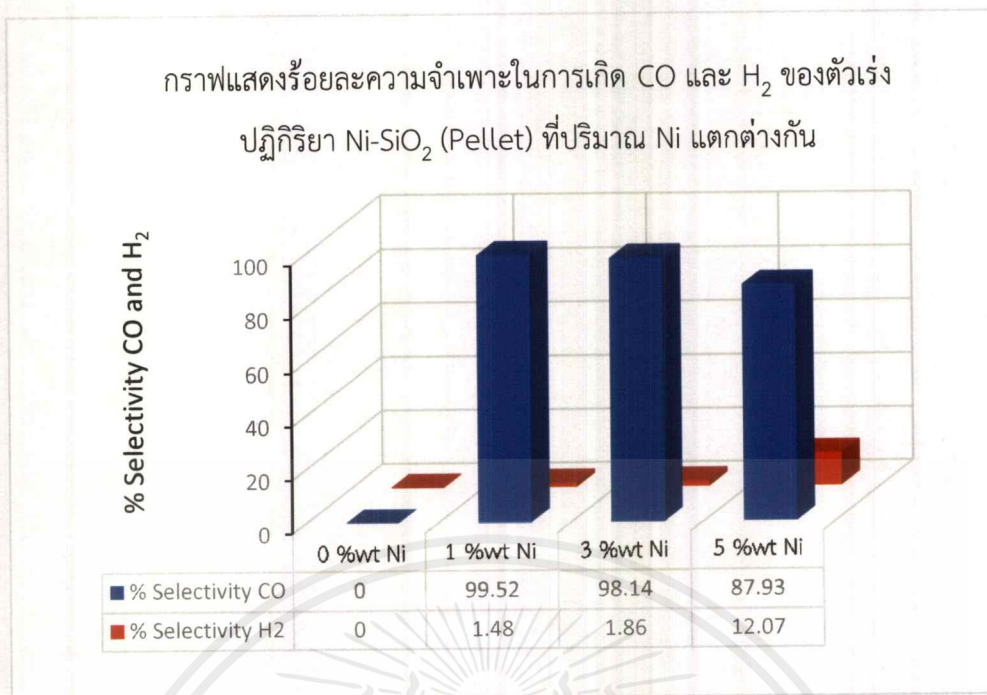


รูปที่ ค.1 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet)

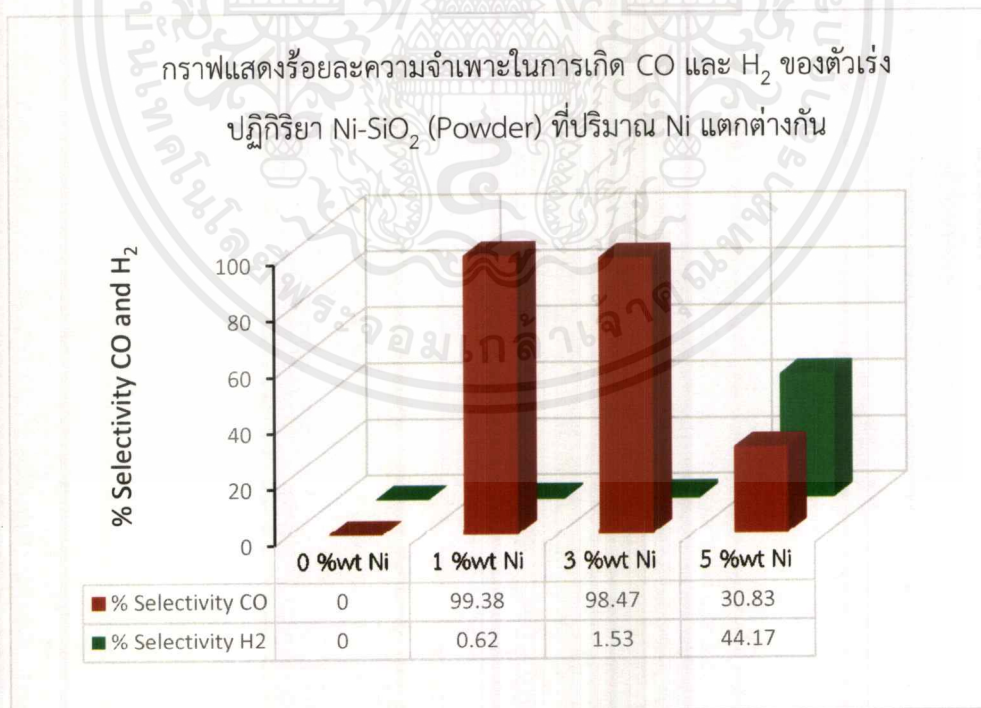


รูปที่ ค.2 กราฟเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนที่เวลาต่าง ๆ ของตัวตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

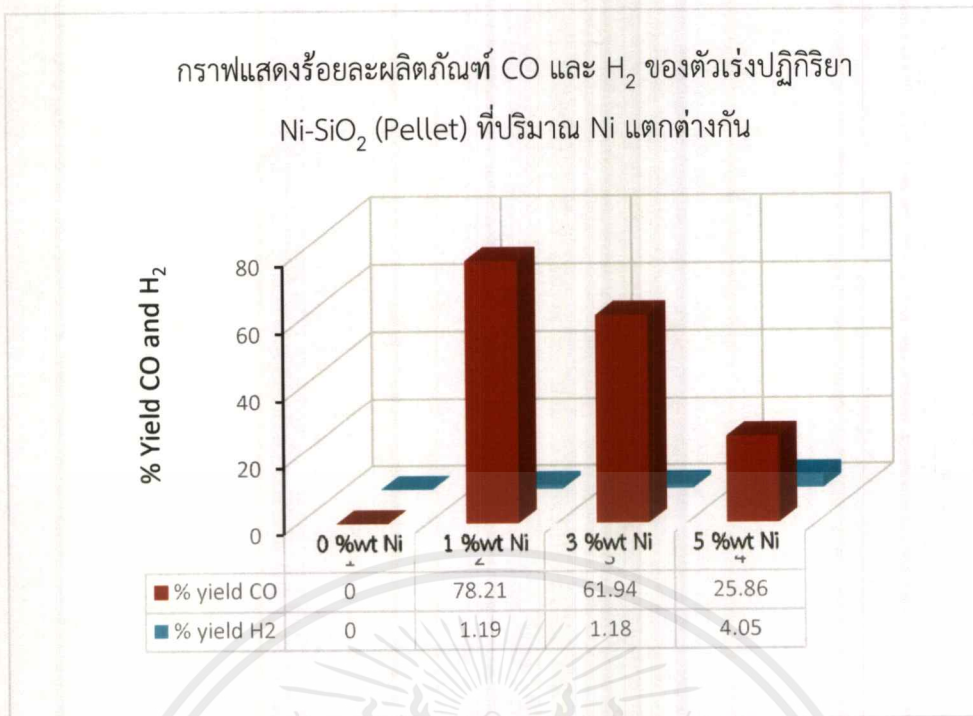


รูปที่ ค.3 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน

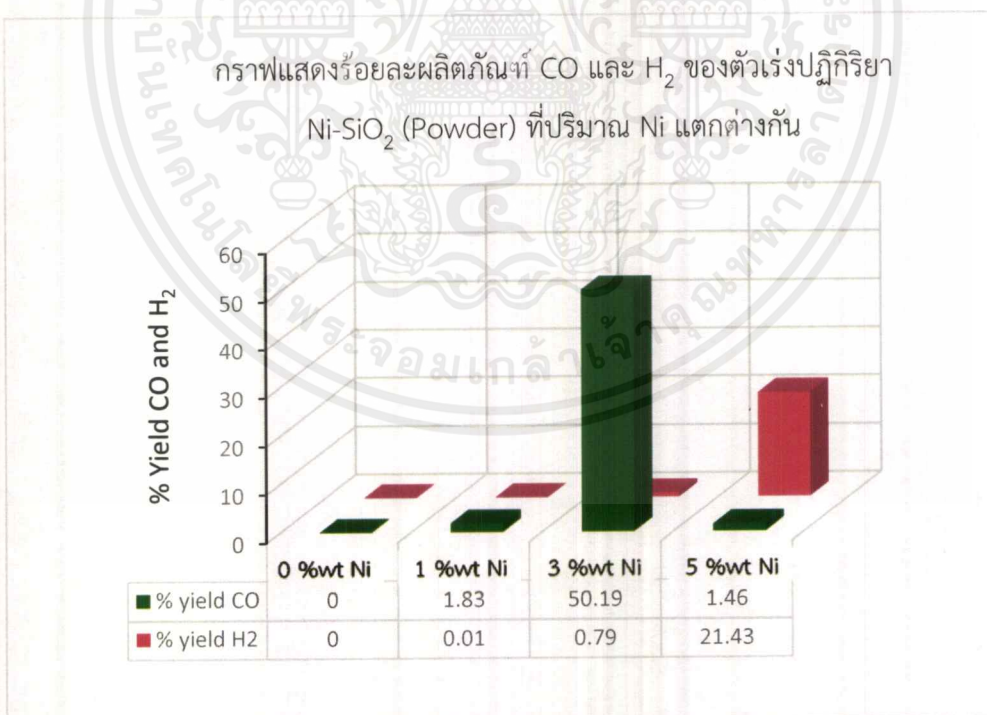


รูปที่ ค.4 กราฟแสดงร้อยละความจำเพาะในการเกิด CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน



รูปที่ ค.6 กราฟแสดงร้อยละผลิตภัณฑ์ CO และ H₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-SiO₂ (Powder) ที่ปริมาณ Ni แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สชีวภาพ

1. ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สชีวภาพ โดยคิดการเปลี่ยนของมีเทน (CH₄)

$$\text{สูตร } \% \text{ CH}_4 \text{ Conversion} = \frac{\text{CH}_4 \text{ Mole (ขาเข้า)} - \text{CH}_4 \text{ Mole (ขาออก)}}{\text{CH}_4 \text{ Mole (ขาเข้า)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงแก๊สมีเทน (CH₄) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ชั่วโมงที่ 4

$$\text{สูตร } PV = nRT, \quad n = \frac{PV}{RT}$$

ภายใต้สภาวะขาเข้า

$$\text{ความดันขาเข้า (P)} = 0.99776 \text{ atm} \quad \text{อัตราการไหลของแก๊ส (V}_{in}\text{)} = 20 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

$$\text{ค่าคงที่ของแก๊ส (R)} = 82.05746 \frac{\text{mL} \cdot \text{atm}}{\text{Kmol}} \quad \text{อุณหภูมิภายนอก (T)} = 298 \text{ K}$$

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{(0.99776 \text{ atm}) (20 \text{ mL/min})}{(82.06 \text{ mL} \cdot \text{atm/Kmol}) (298 \text{ K})}$$

$$= 0.000816056 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{\text{CH}_4} (\text{ขาเข้า}) = \text{Peak area ของ CH}_4 \text{ ขาเข้า} \times n_{\text{CH}_4}$$

$$= 354493152 \times 0.000816056 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$= 289286.2664 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

ภายใต้สภาวะขาออก

$$\text{ความดันขาเข้า (P)} = 0.99776 \text{ atm} \quad \text{อัตราการไหลของแก๊ส (V}_{in}\text{)} = 20 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

$$\text{ค่าคงที่ของแก๊ส (R)} = 82.05746 \frac{\text{mL} \cdot \text{atm}}{\text{Kmol}} \quad \text{อุณหภูมิภายนอก (T)} = 298 \text{ K}$$

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{(0.99776 \text{ atm}) (20 \text{ mL/min})}{(82.06 \text{ mL} \cdot \text{atm/Kmol}) (298 \text{ K})}$$

$$= 0.000816056 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$n_{\text{CH}_4}(\text{ขาออก}) = \text{Peak area ของ CH}_4 \text{ ขาออกของชั่วโมงที่ 4} \times n_{\text{CH}_4}$$

$$= 3889894 \times 0.000816056 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$= 3174.371369 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

สูตร % CH₄ Conversion = $\frac{n(\text{ขาเข้า}) - n(\text{ขาออก})}{n(\text{ขาเข้า})} \times 100$

$$= \frac{289286.2664 \frac{\text{mol}}{\text{min}} - 3174.371369 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{289286.2664 \frac{\text{mol}}{\text{min}}} \times 100$$

$$= 98.90268853 \%$$

∴ ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ที่ชั่วโมงที่ 4 ให้การเปลี่ยนแปลงแก๊ส CH₄ 98.90 %

ภาคผนวก จ

การคำนวณร้อยละความจำเพาะการเกิดผลิตภัณฑ์ (% Selectivity)

1. ค่าร้อยละความจำเพาะการเกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์

$$\text{สูตร } \% \text{ Syngas Selectivity} = \frac{\text{Syngas moles produced}}{\text{All products (moles)}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ร้อยละความจำเพาะแก๊สสังเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ในชั่วโมงที่ 4

ภายใต้สภาวะ

$$\begin{aligned} \text{ความดัน (P)} &= 0.99776 \text{ atm} & \text{อัตราการไหลของแก๊ส (V}_{in}\text{)} &= 20 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \\ \text{ค่าคงที่ของแก๊ส (R)} &= 82.05746 \frac{\text{mL}\cdot\text{atm}}{\text{Kmol}} & \text{อุณหภูมิ (T)} &= 298 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สูตร } \text{Syngas (CO)} &= n_{(\text{biogas})} \times \frac{\text{Area peak (CO)}}{\text{Area peak (CO)} + \text{Area peak (H}_2\text{)}} \\ &= 0.000816056 \times \frac{310901}{310901 + 6899} \\ &= 0.000798341 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สูตร } \text{Syngas (H}_2\text{)} &= n_{(\text{biogas})} \times \frac{\text{Area peak (H}_2\text{)}}{\text{Area peak (CO)} + \text{Area peak (H}_2\text{)}} \\ &= 0.000816056 \times \frac{310901}{310901 + 6899} \\ &= 0.0000177155 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{สูตร \% Selectivity Syngas (CO)} &= \frac{\text{Syngas (CO)}}{\text{Syngas (CO)} + \text{Syngas (H}_2\text{)}} \times 100 \\
 &= \frac{0.000798341}{0.000798341 + 0.0000177155} \times 100 \\
 &= 97.82913782 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{สูตร \% Selectivity Syngas (H}_2\text{)} &= \frac{\text{Syngas (H}_2\text{)}}{\text{Syngas (CO)} + \text{Syngas (H}_2\text{)}} \times 100 \\
 &= \frac{0.0000177155}{0.0000177155 + 0.000798341} \times 100 \\
 &= 2.170862177 \%
 \end{aligned}$$

∴ ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ร้อยละความจำเพาะการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ ในชั่วโมงที่ 4 คือ CO 97.83 % และ H₂ 2.17 %

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield)

1. การคำนวณร้อยละเป็นผลิตภัณฑ์

$$\text{สูตร} \quad \% \text{ Yield} = \frac{\% \text{ Conversion} \times \% \text{ Selectivity}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ร้อยละผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ในชั่วโมงที่ 4

$$\begin{aligned} \% \text{ Yield (CO)} &= \frac{\% \text{ Conversion CH}_4 \times \% \text{ Selectivity CO}}{100} \\ &= \frac{98.90268853 \% \times 97.82913782 \%}{100} \\ &= 96.75564748 \% \\ \% \text{ Yield (H}_2) &= \frac{\% \text{ Conversion CH}_4 \times \% \text{ Selectivity H}_2}{100} \\ &= \frac{98.90268853 \% \times 2.170862177 \%}{100} \\ &= 2.147041058 \% \end{aligned}$$

∴ ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 %wt Ni-SiO₂ (Pellet) ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊สสังเคราะห์ในชั่วโมงที่ 4 คือ CO 96.76 % และ H₂ 2.15 %