

พลาสมาทรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/เส้นใยซิลิกา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PLASMA DRY REFORMING OF METHANE TO SYNGAS OVER NICKEL/SILICA FIBER
CATALYST



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พลาสมาทรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์บน ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/เส้นใยซิลิกา
โดย	น.ส.อริสา ธมาภรณ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงค์นุช เรืองจิตต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิพย์ธีระนันทน์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงค์นุช เรืองจิตต์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชลาธारा)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

อริสา ธมาภรณ์ : พลาสมาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์บนตัวเร่ง
 ปฏิกริยานิกเกิล/เส้นใยซิลิกา. (PLASMA DRY REFORMING OF METHANE TO
 SYNGAS OVER NICKEL/SILICA FIBER CATALYST) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.
 ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.นงคฺนุช เรืองจิตต์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้
 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัว
 รองรับเส้นใยซิลิกา (SF) และเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (SP) ทั้งนี้ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่ใช้ถูกสังเคราะห์
 ด้วยเทคนิคโซล-เจลร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง และตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP ถูก
 เตรียมด้วยวิธีการแช่จุ่มแบบเปียกพอดี้ โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย
 เทคนิค BET, SEM-EDS และ XRD พบว่าลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP มี
 ความแตกต่างกัน โดยเฉพาะการไหลลดปริมาณไหลตุนิกเกิลที่แตกต่างกันบนตัวรองรับตัวเร่ง
 ปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มปริมาณไหลตุนิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ
 เพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณไหล
 ตุนิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา (5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ชนิดของตัวรองรับ (SF และ
 SP) รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา (บรรจุแบบบางส่วนและแบบเต็ม)
 และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (10, 13 และ 15 กิโลโวลต์) ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของ
 ระบบ พบว่าปริมาณไหลตุนิกเกิลที่ต่างกันบนตัวรองรับซิลิกาและชนิดของตัวรองรับมีบทบาท
 อย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ มากไปกว่านั้นการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ
 บางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาและการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ให้ผลเชิงบวกต่อการ
 ปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวม โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คือ การบรรจุตัวเร่ง
 ปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วน ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของ
 มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ผลผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจน
 ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์และประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงที่สุด

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370099723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Dry reforming of methane, Plasma catalysis, Silica fiber support

Arisa Thamaporn : PLASMA DRY REFORMING OF METHANE TO SYNGAS OVER NICKEL/SILICA FIBER CATALYST. Advisor: Assoc. Prof. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Nongnuch Rueangjitt, Ph.D.

This research investigated the syngas production from dry reforming of methane under a dielectric barrier discharge plasma reactor with nickel catalyst on silica fiber (SF) and silica porous (SP) support. The silica fiber support was synthesized by using sol-gel and electrospinning technique. The Ni/SF and Ni/SP catalysts were prepared by incipient wetness impregnation method. The results of catalyst characterization by BET, SEM-EDS and XRD showed the characteristics of Ni/SF and Ni/SP catalysts were different, especially the different Ni loadings on catalyst support. The increasing Ni loading on silica fiber resulted in an increase in the specific surface area. The effects of Ni loading on support (5, 10 and 15%wt.), catalyst support type (SF and SP), different packings of catalyst (full and partial) and applied voltage (10, 13 and 15 kV) were investigated on the overall system performance. The results showed the effects of Ni loading on silica support and support type had a significant role on the overall system performance. Moreover, the partial catalyst packing into plasma reactor with increasing applied voltage gave a positive effect in improving performance. In addition, the best condition of this study was the partial packing of 10%Ni/SF catalyst at an applied voltage of 15 kV, providing the highest CH₄ and CO₂ conversions, syngas yield, hydrogen-to-carbon monoxide molar ratio and energy efficiency.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงคินุช เรืองจิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความกรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. นพิตา วิทยุธีระนันท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ได้กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้ความรู้และคำแนะนำแก่ผู้เขียน รวมถึงให้ความกรุณาในการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology; PETROMAT) สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาและสนับสนุนทุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านที่คอยดูแล ให้คำปรึกษา และให้ความรู้และทักษะในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ รวมถึงภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทั้งในและนอกภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณมารดาและครอบครัว รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ กำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านของผู้เขียนโดยเสมอมา

หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้สนใจในงานด้านนี้ต่อไป

อริสา ธมาภรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 3	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5	5
2.1 แนวคิดของงานวิจัย..... 5	5
2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming process)..... 6	6
2.2.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming Process)..... 6	6
2.2.2 กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation Process)..... 8	8
2.2.3 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือกระบวนการดรายรีฟอร์มมิง (Carbon Dioxide Reforming Process หรือ Dry Reforming Process)..... 8	8
2.2.4 กระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Autothermal Reforming)..... 13	13
2.3 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas)..... 14	14
2.4 การสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง..... 16	16
2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแช่จุ่ม..... 18	18

2.6 พลาสมา (Plasma).....	20
2.6.1 คำจำกัดความพลาสมา	20
2.6.2 การเกิดพลาสมา (Plasma Generation)	21
2.6.3 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของแก๊สในพลาสมา.....	23
2.6.3.1 ฟังก์ชันการกระจายตัวของอนุภาค	23
2.6.3.2 การชนกันของอนุภาค.....	23
2.6.3.3 การชนกันระหว่างอนุภาคสองชนิดแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision).....	24
2.6.3.4 การชนกันระหว่างอนุภาคสองชนิดแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision).....	24
2.6.3.5 การชนกันต่างสถานะที่พื้นผิว	24
2.6.4 การประยุกต์ใช้พลาสมาในกระบวนการผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิง	24
2.7 พลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge Plasma).....	25
2.8 ทบทวนวารสารทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	32
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ทดสอบปฏิกิริยาซีฟอรัมมิง.....	32
3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้.....	32
3.1.2 การสังเคราะห์ตัวรองรับชนิดเส้นใยซิลิกา (Silica Fiber, SF)	32
3.1.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับ	33
3.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้.....	34
3.1.4.1 เทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน (Nitrogen Physisorption).....	34
3.1.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	35
3.1.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)	35
3.1.4.4 เครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)	36

3.2 การทดสอบปฏิกิริยารีดอกซ์ภายใต้การใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา	37
3.2.1 แก๊สที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาและแก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์	37
3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยา.....	37
3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบปฏิกิริยา	38
3.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส.....	39
3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ	40
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	43
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน	44
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี.....	47
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและโครงสร้างผลึก	50
4.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยารีดอกซ์ของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา	52
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณโพลีเมอริสของตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ	52
บางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา.....	52
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณโพลีเมอริสของตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ	61
เต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา.....	61
4.2.3 อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้.....	66
4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบกระบวนการ.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	79
ประวัติผู้เขียน	110



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แนวโน้มของปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากการเผาไหม้พลังงานและกระบวนการทางอุตสาหกรรมระหว่างปี ค.ศ. 1900-2021	5
รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ H_2O ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ.....	7
รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ.....	9
รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ.....	9
รูปที่ 2.5 เส้นทางการผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิงต่างๆ ผ่านแก๊สสังเคราะห์.....	16
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย.....	17
รูปที่ 2.7 ลักษณะกรวยเทย์เลอร์ที่มีสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสารละลายถูกยึดเป็นเส้นใย	17
รูปที่ 2.8 การไฮโดรไลซิสและการควบแน่นในกระบวนการโซล-เจล ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด	18
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งกลายเป็นพลาสมาเมื่อให้พลังงานความร้อน	20
รูปที่ 2.10 แบบจำลองแสดง (ก) อนุภาคพลาสมา และ (ข) การเกิดการดีสชาร์จของพลาสมา.....	22
รูปที่ 2.11 ขอบเขตการเกิดของพลาสมาตามธรรมชาติและจากงานวิจัยและในอุตสาหกรรม	22
รูปที่ 2.12 ไทมีไลน์แสดงความก้าวหน้าของการประยุกต์ใช้พลาสมาในวงการแพทย์	25
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จโดยทั่วไป.....	26

รูปที่ 2.14 พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จแบบแผ่นขั้วไฟฟ้าคู่ขนานกับวัสดุแบริเออร์คู่ (parallel-plate electrodes with double barrier material) (ก) แบบจำลองโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา และ (ข) รูปถ่ายดีสชาร์จที่เกิดขึ้น.....26

รูปที่ 3.1 สังเคราะห์ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง.....33

รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายตัวรองรับเส้นใยซิลิกาหลังการเผาแคลไซน์.....33

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับชนิดต่างๆ.....34

รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน.....34

รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....35

รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์.....36

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน.....36

รูปที่ 3.8 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ.....38

รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยารีฟอร์มมิงภายใต้ระบบพลาสมา ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....39

รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี.....40

รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา.....42

รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา.....42

รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ.....46

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเปล่า ที่กำลังขยาย (ก) 10,000 เท่า และ (ข) 50,000 เท่า.....48

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (ก) 5%Ni/SF (ข) 10%Ni/SF และ (ค) 15%Ni/SF49

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า49

รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP).....51

รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำให้ปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น.....60

รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำให้ปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น.....65

รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำให้ปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา..... 70

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียต่ออุณหภูมิ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 5%Ni/SP หลังทดสอบกระบวนการ..... 73

รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP ก่อนและหลังการทดสอบกระบวนการ..... 74

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (ก) ก่อนทดสอบกระบวนการ และ (ข) หลังทดสอบกระบวนการ75



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ	14
ตารางที่ 2.2 การผลิตสารเคมีจากแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ต่างๆ.....	15
ตารางที่ 2.3 กลไกการเกิดการชนกันของอนุภาคต่างๆ ในพลาสมา.....	23
ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้.....	32
ตารางที่ 3.2 แก๊สที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาและแก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	37
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ศึกษา.....	42
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	46
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลและขนาดอนุภาค NiO บนตัวเร่งปฏิกิริยา	48
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาค NiO บนตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบ	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและความไม่มั่นคงทางด้านพลังงาน อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานหลักของโลกยังคงเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ปริมาณแก๊สเรือนกระจกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น [1] โดยในช่วงปี พ.ศ. 2562 สถานการณ์การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานของประเทศไทยเริ่มลดลง เนื่องจากการส่งเสริมนโยบายการใช้พลังงานทดแทนของรัฐบาล และด้วยปัญหาการแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ทั้งในและต่างประเทศ ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมการผลิตทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคบริการลดลงเป็นวงกว้าง ซึ่งทั้งหมดนี้ส่งผลทำให้ภาพรวมการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ [2] ดังนั้นจึงเป็นสัญญาณที่ดีในการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดเพื่อปรับปรุงการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในอนาคต โดยกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการเป็นองค์ประกอบหลักในแก๊สเรือนกระจก (แก๊สมีเทน, CH_4 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, CO_2) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ (แก๊สไฮโดรเจน, H_2 และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์, CO) ที่เกิดขึ้นสามารถใช้เป็นสารตัวกลางในการผลิตสารเคมีที่มีมูลค่าสูงในระดับอุตสาหกรรมได้ เช่น เมทานอล แอมโมเนีย และเชื้อเพลิงสังเคราะห์เหลว [3] ในขณะเดียวกันปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเป็นกระบวนการดูดความร้อนสูงและการกระตุ้นโครงสร้างมีเทนซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียร ทำให้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ ส่งผลให้เกิดการสะสมคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และลดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (low temperature plasma technology) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน เนื่องจากแก๊สที่ถูกกระตุ้นโดยพลาสมาจะสร้างอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (1-10 อิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งเพียงพอต่อการสลายพันธะของโมเลกุลเฉื่อย ส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงในระยะเวลาอันสั้นภายใต้ภาวะปฏิบัติงานที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมา ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงการเปลี่ยนรูปสารตั้งต้นและกำหนดทิศทางการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ รวมถึงลดการก่อตัวของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้ดีขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการศึกษาและนิยมใช้เนื่องจากเป็นหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni-based catalyst)

บนตัวรองรับชนิดต่างๆ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกา (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) และซีโอไลต์ [5] ทั้งนี้เส้นใยซิลิกาถือเป็นวัสดุตัวรองรับทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากความไม่มีรูพรุนของโครงสร้างที่สามารถเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและตำแหน่งกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาและเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุนทั่วไปในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming process) [6] นอกจากนี้มีการรายงานเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาภายใต้กระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของโลหะให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพที่สูงขึ้น [7] รวมไปถึงการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซีเรียมออกไซด์ในกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนที่สามารถปรับปรุงการก่อตัวของคาร์บอนและเพิ่มความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา [8] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งสนใจศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิการ่วมกับการใช้เทคโนโลยีพลาสมาที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ รวมถึงความต้านทานการก่อตัวของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มุ่งเน้นศึกษาเป็นเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (dielectric barrier discharge, DBD) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์เตรียมได้จากวิธีการแช่จุ่มแบบเปียกของนิกเกิลออกไซด์บนผิวตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของการทดสอบปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของลักษณะตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (เส้นใยซิลิกาและซิลิกาที่มีรูพรุน), ปริมาณโลหะนิกเกิล (5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา (แบบบรรจุเต็มและแบบบางส่วน) และอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (10, 13 และ 15 กิโลโวลต์) ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ภาวะพลาสมา ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดัชนีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) และทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาครายรีฟอร์มมิงของมีเทนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมองค์ความรู้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 วางแผนการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- 1.4.3 ศึกษาการเตรียมเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning technique)
- 1.4.4 เตรียมตัวรองรับเส้นใยซิลิกา รวมถึงเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา และซิลิกาที่มีรูพรุน
- 1.4.5 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพของครายรีฟอร์มมิงของมีเทน และวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC)
 - 1.4.5.1 ปริมาณโลหะนิกเกิล ได้แก่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 - 1.4.5.2 ลักษณะตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยซิลิกา (silica fiber, SF) และซิลิกาที่มีรูพรุน (silica porous, SP)
 - 1.4.5.3 รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ต่างกัน ได้แก่ แบบบรรจุเต็ม (full packing) และแบบบรรจุบางส่วน (partial packing)
 - 1.4.5.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้า ได้แก่ 10, 13 และ 15 กิโลโวลต์
- 1.4.6 ศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - 1.4.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Spectroscopy, XRD)
 - 1.4.6.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Physisorption)
 - 1.4.6.3 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)
 - 1.4.6.4 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

1.4.7 รวบรวม วิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผลจากการทดลอง และสรุปผลการทดลองเพื่อนำเสนอในวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้และภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์สำหรับปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ภาวะพลาสมาพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา

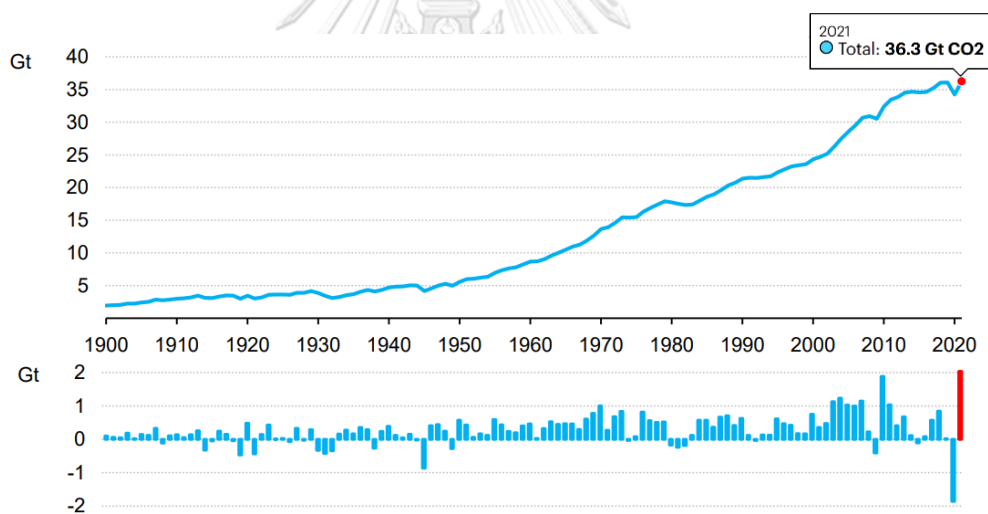


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดของงานวิจัย

ปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบันอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกยังคงเป็นปัญหาหลักที่นักวิจัยตระหนักและให้ความสนใจกันอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้นสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ในช่วงปี พ.ศ. 2562 ทั้งในและต่างประเทศ ส่งผลต่อการชะลอตัวของเศรษฐกิจทั้งภาคอุตสาหกรรมและการบริการ ซึ่งนำไปสู่การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกลดลงทั่วโลก แต่อย่างไรก็ตามองค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency, IEA) ได้รายงานแนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในปี พ.ศ. 2564 ดังรูปที่ 2.1 โดยมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ถ่านหินและการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มากขึ้น เพื่อตอบสนองนโยบายการฟื้นฟูเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมหลังจากหยุดชะงักเป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 2.1 แนวโน้มของปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากการเผาไหม้พลังงานและกระบวนการทางอุตสาหกรรมระหว่างปี ค.ศ. 1900-2021 [1]

แก๊สเรือนกระจกเป็นแก๊สที่สำคัญที่ทำหน้าที่ดูดซับรังสีและกักเก็บความร้อนในชั้นบรรยากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวโลกให้เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นไปอันเนื่องมาจากการกระทำของมนุษย์ เป็นเหตุทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นตามไปด้วยและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนขึ้น โดยแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 79% แก๊สมีเทน (CH₄) 11% แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O) 7% และแก๊สอื่นๆ อีก 3% [9] ด้วยเหตุนี้การพัฒนา

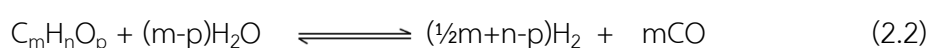
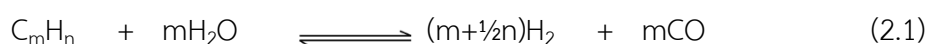
พลังงานสะอาดเพื่อบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าของแก๊สเรือนกระจกจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อนักวิจัยในปัจจุบัน โดยเทคโนโลยีทางเคมีที่น่าสนใจและมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนรูปแก๊สเรือนกระจกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าหลายกระบวนการ ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ผ่านกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปส์ และการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง และนำไปสังเคราะห์เป็นสารเคมีต่างๆ มากมาย ได้แก่ การผลิตเมทานอล แอมโมเนีย และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming process)

กระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นกระบวนการทางความร้อนเคมี (thermo-chemical process) เพื่อเปลี่ยนรูปไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งให้เป็นสารอีกชนิดหนึ่ง โดยอาศัยความร้อนหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยในการเกิดผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกระบวนการย่อยขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยา ได้แก่

2.2.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming Process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการดูดความร้อนสูง ภายใต้อุณหภูมิ 800-950 องศาเซลเซียส และความดัน 20-30 บรรยากาศ โดยสารตั้งต้นส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) ในสถานะแก๊ส เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ และเอทานอล เป็นต้น โดยหลักการของกระบวนการนี้เป็นการทำปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำ (steam) โดยอะตอมไฮโดรเจน (H) จะถูกดึงออกจากโมเลกุลของไอน้ำ (H_2O) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) ส่วนอะตอมออกซิเจน (O) ที่เหลือจากโมเลกุลน้ำ และอะตอมคาร์บอน (C) ที่เหลือจากไฮโดรคาร์บอนจะรวมตัวกันเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มากไปกว่านั้นปฏิกิริยานี้ให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูง มีค่าใช้จ่ายน้อย และปัจจุบันมีการนำมาใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย [10]



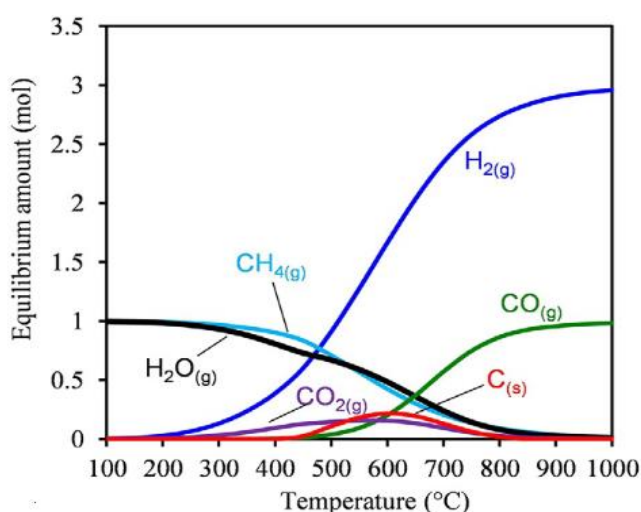
เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจำเป็นต้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงรวมถึงการป้อนไอน้ำในปริมาณที่มาก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาดังกล่าวควรมีคุณสมบัติต่อไปนี้

1. มีความต้านทานการเกิดโค้กและการสลายตัวด้วยไอน้ำ
2. ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงและสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในสภาวะรุนแรง
3. มีการถ่ายเทความร้อนสูงและมีความแข็งแรงทั้งเชิงกลและเชิงความร้อน
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เสริมการดำเนินปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction)

ตัวอย่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยไอน้ำ (methane steam reforming) ซึ่งมีสมการปฏิกิริยาแสดงดังนี้



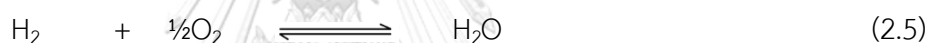
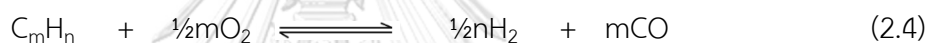
รูปที่ 2.2 แสดงข้อมูลสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยไอน้ำ ในทางอุดมคติจากการทำปฏิกิริยาของแก๊สมีเทน 1 โมล กับไอน้ำ 1 โมล ตามสมการที่ 2.3 จะเห็นว่าแก๊สไฮโดรเจนถูกผลิตขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ขณะเดียวกันของแข็งคาร์บอนหรือโค้กจะก่อตัวขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 450-800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อจำกัดหลักของกระบวนการนี้ เนื่องจากคาร์บอนอาจสะสมบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกปิดการใช้งานและเสื่อมสภาพลงได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เช่น เอทิลีน (C_2H_4) อีเทน (C_2H_6) เมทานอล (CH_4O) และอะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย



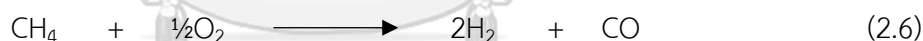
รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ H_2O ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ [11]

2.2.2 กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation Process)

กระบวนการนี้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน โดยกระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งทั่วไปตรงที่ไม่จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากภายนอก เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic reaction) ทำให้เกิดพลังงานขึ้นภายในระบบ แต่ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือปริมาณแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบต้องไม่สูงจนเกินไปเนื่องจากแก๊สออกซิเจนที่เหลือจากกระบวนการสามารถกลับมาทำกับแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้และให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้สูญเสียผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.5 นอกจากนี้ข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการของการใช้กระบวนการออกซิเดชันบางส่วนในเชิงพาณิชย์คือค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งแบบทั่วไป เนื่องจากต้องมีระบบแยกแก๊สออกซิเจนจากอากาศก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ โดยหากไม่แยกแก๊สออกซิเจนออกจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลงเนื่องจากในอากาศมีปริมาณของแก๊สไนโตรเจนในส่วนผสมสูง [12]



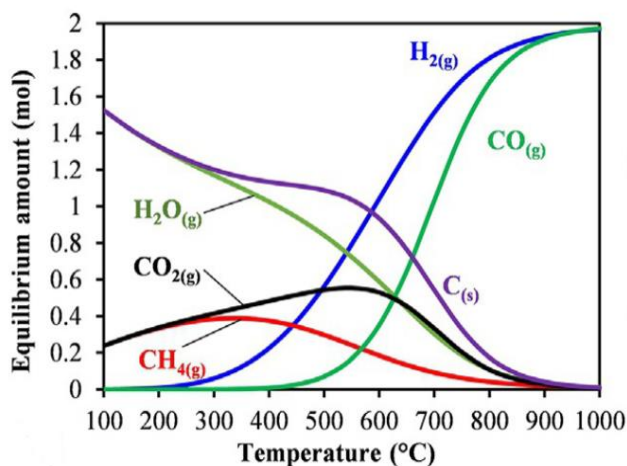
ตัวอย่างกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของแก๊สมีเทน (methane partial oxidation) ซึ่งมีสมการปฏิกิริยาแสดงดังนี้



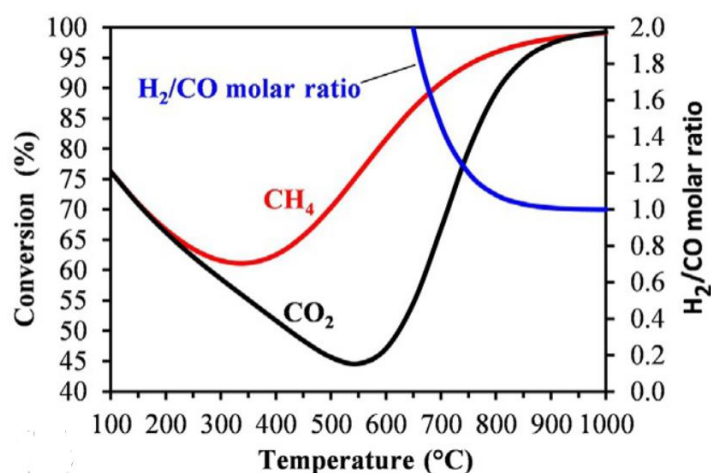
2.2.3 กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือกระบวนการดรายรีฟอร์มมิ่ง (Carbon Dioxide Reforming Process หรือ Dry Reforming Process)

กระบวนการนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปมีบทบาทในการเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) ในปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นยังเป็นกระบวนการที่ดูดความร้อนสูงเช่นเดียวกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิถึง 800-1,000 องศาเซลเซียส ในการดำเนินปฏิกิริยาเพื่อแตกสลายพันธะของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นโมเลกุลสารตั้งต้นที่เสถียร อย่างไรก็ตามกระบวนการดรายรีฟอร์มมิ่งนี้สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรเจนที่สูง (1:1) ดังแสดงในสมการที่ 2.7





รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ [11]

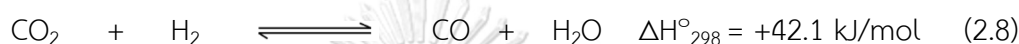


รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากแก๊สผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ณ ความดันบรรยากาศ [11]

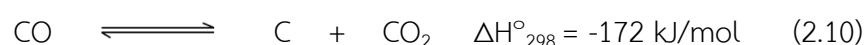
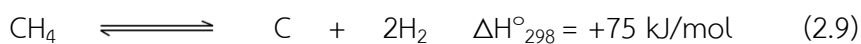
จากรูปที่ 2.3 แสดงข้อมูลสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยานี้จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ขณะเดียวกันหากดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ของแข็งคาร์บอนและไอน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการก่อตัวขึ้นและเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 2.4 ที่แสดงค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น โดยค่าคอนเวอร์ชันของแก๊สมีเทนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิบัติการสูงกว่า 350

องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับค่าคอนเวอร์ชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส และค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นทั้งสองจะเพิ่มถึง 98% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส

ปัจจุบันได้มีการตระหนักกันมากขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบเชิงลบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้เทคโนโลยีรีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนอาจลดลงได้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาย้อนกลับของการเปลี่ยนน้ำไปเป็นแก๊ส (reverse water-gas shift reaction) ดังสมการที่ 2.8 [13]



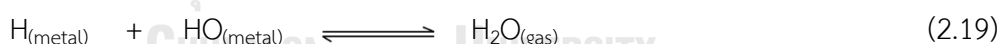
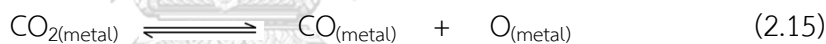
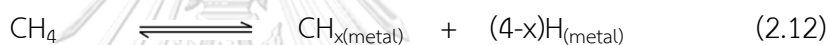
การนำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้งานในทางปฏิบัตินั้นมักต้องเผชิญกับความท้าทายที่สำคัญหลายอย่างทั้งทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ โดยในทางเศรษฐศาสตร์ที่ความดันของโรงงานผลิตแก๊สสังเคราะห์ 2-4 เมกะปาสคาล กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่สามารถทำให้แก๊สมีเทนเกิดคอนเวอร์ชันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากข้อจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ อย่างไรก็ตามปัญหาที่น่าหนักใจที่เป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในทางปฏิบัติคือ การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการสะสมของคาร์บอนหรือโค้ก (carbon deposition) บนผิวเร่งปฏิกิริยา โดยการเกิดคาร์บอนสามารถเกิดได้หลายปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สมีเทน (methane decomposition reaction) ปฏิกิริยาดิสพรอบพอร์ชันเนชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO disproportionation reaction) และปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอน แสดงตามสมการที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ [14]



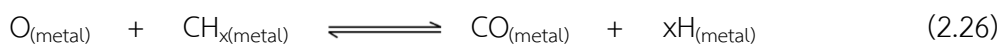
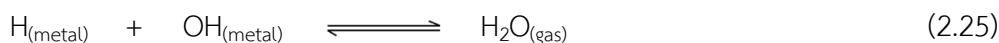
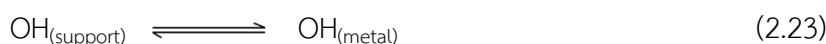
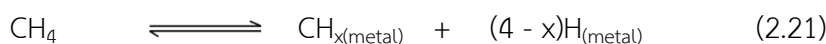
งานวิจัยก่อนหน้ารายงานว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สมีเทนเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 557 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปฏิกิริยาดิสพรอบพอร์ชันเนชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ปฏิกิริยาย้อนกลับของการเปลี่ยนน้ำไปเป็นแก๊สสามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 820 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้จึงชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

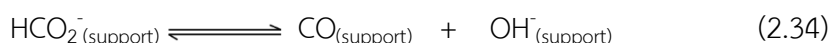
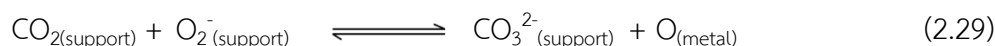
รวมไปถึงการยับยั้งการเกิดคาร์บอนหรือโค้ก โดยอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยานี้อยู่ระหว่าง 850-1,040 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1:1 มากไปกว่านั้นยังมีการรายงานเกี่ยวกับการตั้งสมมติฐานกลไกการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่าน 2 กลไก คือ กลไกฟังก์ชันเดียว (monofunctional mechanism) โดยโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจะถูกกระตุ้นบนตำแหน่งกัมมันต์ผ่านแบบจำลองแลงเมียร์-ฮินเชลวูด-ฮอยเกน-และวัตสัน (Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson, LHHW) ดังสมการที่ 2.12 ถึง 2.20 และกลไกสองฟังก์ชัน (bifunctional mechanism) โดยโมเลกุลของมีเทนจะถูกกระตุ้นบริเวณตำแหน่งของโลหะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกระตุ้นบริเวณตำแหน่งตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้ Ferreira-Aparicio และคณะได้แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแบบกลไกสองฟังก์ชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ru/Al₂O₃) ดังสมการที่ 2.12 ถึง 2.36 [15]

กลไกฟังก์ชันเดียว



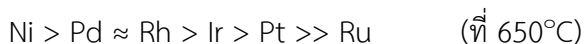
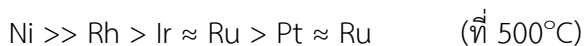
กลไกสองฟังก์ชัน





รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรีฟอร์มมิงแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่ ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล เนื่องจากโลหะนิกเกิลมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับโลหะที่มีตระกูล อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมโค้ก ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพได้ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษเพื่อปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลให้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพและลดการก่อตัวของโค้กระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา โดยการรวบรวมความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนิกเกิลและตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมูลค่าต่ำชนิดอื่นในปฏิกิริยารีฟอร์มมิง พบว่าโครงสร้างผิวที่เป็นผลึกและความเป็นกรด (acidity) ที่ผิวเป็นสองปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดโค้ก เช่น พื้นผิวของ Ni(100) และ Ni(110) มีความว่องไวมากในการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของแก๊สมีเทน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มเกิดโค้กมากกว่าพื้นผิวของ Ni(111) ซึ่งหากสามารถควบคุมขนาดของการรวมตัวของอะตอมโลหะที่อยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ก็มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยยับยั้งการเกิดโค้กบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการสะสมของโค้กคือความเป็นเบส (basicity) บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เห็นได้จากการก่อตัวของโค้กสามารถยับยั้งได้เมื่อโลหะถูกรองรับบนตัวรองรับโลหะออกไซด์ที่มีความเป็นเบสลิวอิส (strong Lewis basicity) ที่แรง ซึ่งความเป็นเบสลิวอิสที่สูงของตัวรองรับทำให้การดูดซับทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และเป็นผลให้คาร์บอนถูกกำจัดผ่านปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชันที่ผิวตัวรองรับ จากการศึกษาของ Rostrup-Nielsen กับ Hansen พบว่าปริมาณคาร์บอนหรือโค้กที่สะสมบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะจะลดลงเรียงตามลำดับดังนี้



ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาและโปรโมเตอร์ส่งผลต่ออัตราการก่อตัวของโค้กอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวรองรับเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) ที่ถูกใช้เป็นตัวรองรับอย่างกว้างขวางให้กับโลหะแพลทินัม (Pt) เนื่องจากทำให้อัตราการสะสมของโค้กที่ต่ำกว่าตัวรองรับชนิดอื่น ซึ่งสามารถเรียงลำดับการก่อตัวของโค้กของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดังนี้



มากไปกว่านั้นยังพบว่าวานาเดียมออกไซด์ให้ผลเชิงบวกต่อตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนตัวรองรับซิลิกา (Rh/SiO_2) โดยสามารถลดอัตราการสะสมของโค้กและช่วยเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในเวลาเดียวกันด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดขึ้น VO_x ปกคลุมบนผิวของ Rh ทำให้สามารถลดขนาดของอะตอม Rh จึงทำให้ยับยั้งการเกิดโค้กได้ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเชิงคู่ Pt-Au และ Pt-Sn ที่ถูกรองรับด้วยซิลิกา (SiO_2) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) นั้นมีแนวโน้มของการสะสมของโค้กระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเชิงเดี่ยว Pt แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีตระกูลจะทนต่อการเสื่อมสภาพจากการก่อตัวของโค้กดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทั่วไปก็ตาม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือมีราคาแพง ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ในระดับสเกลใหญ่

นอกจากนี้การป้อนไอน้ำเข้าไปในสารป้อนแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CH_4/CO_2) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดของโค้กเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการปฏิบัติงานจริง ซึ่งกระบวนการแกสซิฟิเคชันไอน้ำด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของมีเทนสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.37 [16, 17]



2.2.4 กระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน

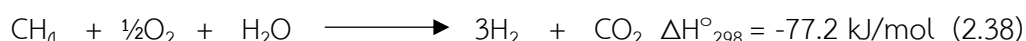
บางส่วน (Autothermal Reforming)

เนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมีข้อดีคือเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นง่ายแม้ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักของกระบวนการนี้คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) ก่อนข้างต่ำ และจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000-1,500 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ภายใต้การไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทั้งนี้กระบวนการออกซิเดชันบางส่วนสามารถดำเนินการร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน โดยความร้อนส่วนหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water gas shift reaction) สามารถนำไปใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนได้ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถปรับปรุงการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและให้

อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มากกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (2-3.5) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนของสารตั้งต้น นอกจากนี้ยังใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำอีกด้วย

ตัวอย่างกระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน เช่น กระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน แก๊สมีเทน (autothermal methane reforming) ซึ่งมีสมการปฏิกิริยาแสดงดังนี้ [18]



2.3 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas)

แก๊สสังเคราะห์เป็นแก๊สผสมของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นส่วนใหญ่ โดยการผลิตแก๊สสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทุกชนิด เช่น แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน แนนทา ชีวมวล น้ำมันเหลือใช้ ของเหลือทางการเกษตร รวมถึงของเสียที่เป็นของแข็ง ซึ่งแหล่งผลิตแก๊สสังเคราะห์ขนาดใหญ่ที่ใช้กันโดยทั่วไปคือแก๊สธรรมชาติ เนื่องจากเป็นตัวเลือกที่มีปริมาณมากและต้นทุนต่ำที่สุด มากไปกว่านั้นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์มีหลายกระบวนการ ได้แก่ การแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) การรีฟอร์มมิ่ง (reforming) และการรีดักชัน (reduction) สำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแก๊สธรรมชาตินิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและกระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน เนื่องจากเป็นกระบวนการดั้งเดิมและมีความเป็นไปได้มากที่สุดในการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของแก๊สมีเทนจะทำให้เกิดแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ประมาณ 3 ในขณะที่การออกซิเดชันบางส่วนของแก๊สมีเทนจะทำให้เกิดแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ประมาณ 2 ทั้งนี้แต่ละกระบวนการจะให้อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ

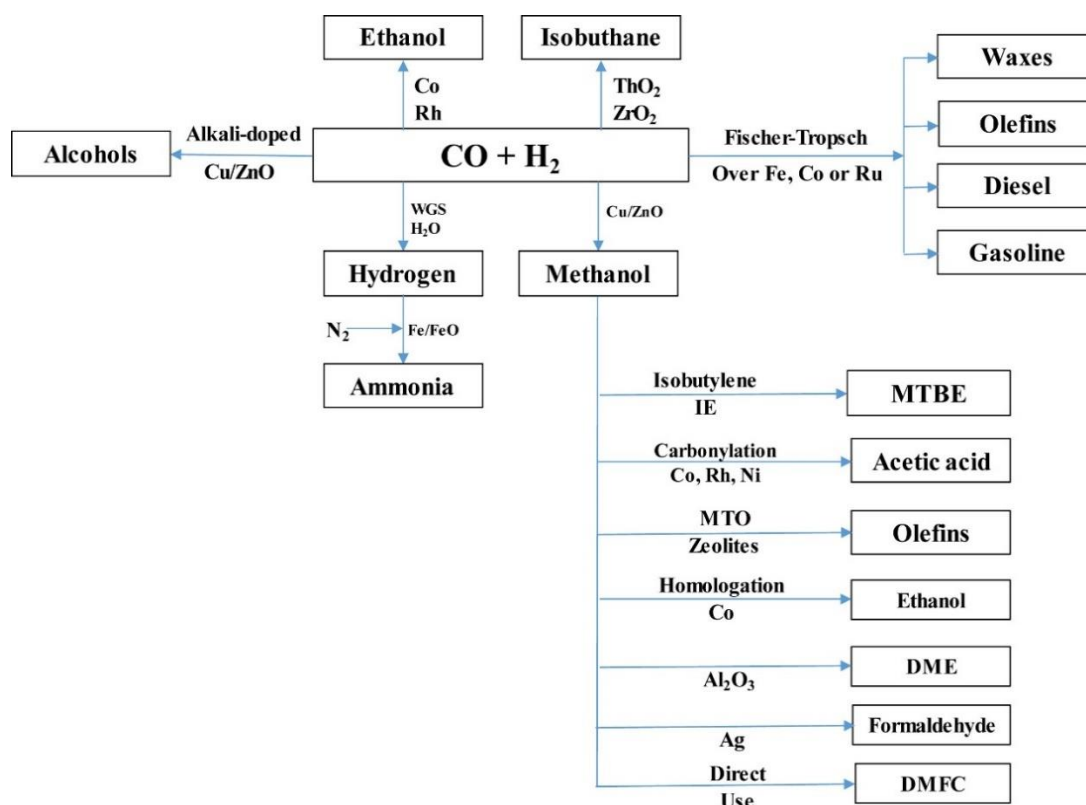
ชนิดของกระบวนการ	อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO
methane steam reforming	3
dry methane reforming	1
partial oxidation	2
coal gasification	0.5

แก๊สสังเคราะห์เป็นสารเคมีขั้นกลาง (chemical intermediates) ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ทางอ้อม (indirect synthesis process) โดยการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้งานต้องคำนึงถึงองค์ประกอบในแก๊สนั้น ตัวอย่างเช่น กระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปส์ (Fischer-Tropsch process) และการสังเคราะห์เมทานอล (methanol synthesis) ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO เท่ากับ 2 ปฏิกริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (hydroformylation) ผ่านกระบวนการออกโซ (oxo process) เพื่อผลิตสารอัลดีไฮด์ (aldehyde) จากโอเลฟินส์ (olefins) ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO เท่ากับ 1 เป็นต้น ดังนั้นการเลือกกระบวนการสังเคราะห์เพื่อผลิตสารเคมีจากแก๊สสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO อย่างไรก็ตามได้แสดงตัวอย่างอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ในแก๊สสังเคราะห์เพื่อใช้สำหรับการผลิตสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การผลิตสารเคมีจากแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO
เมทานอล (methanol)	2
เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol)	1.5
กรดอะซิติก (acetic acid)	1
อะซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride)	1
เอทิลอะซิเตท (ethyl acetate)	1.5
ไวนิลอะซิเตท (vinyl acetate)	1.25
เอทานอล (ethanol)	2
เอทิลีน (ethylene)	2
เบนซีน โทลูอินและไซลีน (BTX)	1.5

รูปที่ 2.5 แสดงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์เป็นสารเคมีหรือเชื้อเพลิงต่างๆ โดยกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปส์เป็นหนึ่งในเส้นทางหลักที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยสารผสมไฮโดรคาร์บอนหนัก (heavy hydrocarbon mixtures) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งข้อดีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้คือเป็นเชื้อเพลิงที่ปราศจากกำมะถัน สารประกอบอะโรมาติก (aromatic compounds) และสารพิษอื่นๆ ที่มักพบในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมทั่วไป มากไปกว่านั้นการผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ยังเป็นเส้นทางที่โดดเด่นอีกเช่นกัน เนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น MTBE กรดอะซิติก เอทานอล และฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น



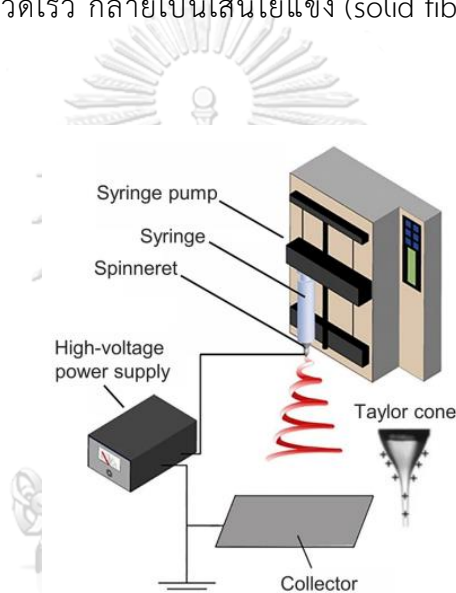
รูปที่ 2.5 เส้นทางการผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิงต่างๆ ผ่านแก๊สสังเคราะห์ [19]

อย่างไรก็ตาม ในแง่ประสิทธิภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงภาพรวมโดยต้องเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการจนถึงการเกิดผลิตภัณฑ์มาพิจารณาด้วย และนอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้ว ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆ ได้อีก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละตัว เพื่อให้เห็นภาพรวมที่ชัดเจนมากขึ้นในทิศทางการศึกษาเชิงลึกต่อไป [19-22]

2.4 การสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

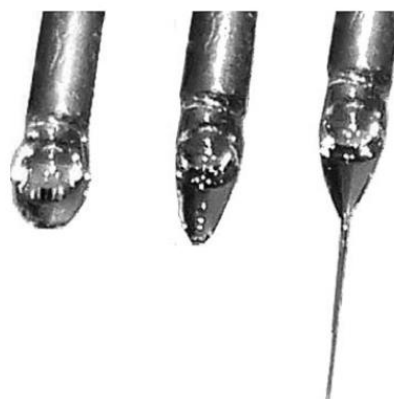
เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning technique) เป็นเทคนิคที่รู้จักและได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตเส้นใยระดับนาโน (nanoscale fibers) เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สามารถปรับความพรุนตัวได้ ง่ายต่อการใช้งาน และสามารถเลียนแบบโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติได้ในแง่ของขนาดและสัญญาณวิทยา หลักการของอิเล็กโตรสปินนิงเกี่ยวข้องกับกระบวนการอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิก (electrohydrodynamic process) โดยของเหลวที่หยดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและสร้างเส้นใยออกมาดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 การติดตั้งระบบอิเล็กโตรสปินนิงนั้นค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถทำได้กับทุกห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง

หลอดฉีดยา (syringe) และหัวฉีดเส้นใย (spinneret) โดยปกติใช้เป็นเข็มฉีดยา สำหรับการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งคือสารละลายหนืดจะถูกฉีดออกจากปลายเข็มฉีดยาเพื่อทำการสร้างหยดของเหลวเล็กซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของสารละลายหนืด ขณะเดียวกันสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างหัวเข็มฉีดยากับตัวรับกระแสไฟฟ้า (collector) จะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตบนผิวของสารละลาย ส่งผลให้หยดสารละลายกลมเปลี่ยนเป็นรูปกรวยเทย์เลอร์ (Taylor cone) ดังรูปที่ 2.7 เมื่อประจุบริเวณปลายกรวยเทย์เลอร์มีแรงไฟฟ้าสถิตมากพอที่สามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายได้ สารละลายจะถูกยึดเป็นเส้นตรงพุ่งออกอย่างรุนแรงและไม่เสถียรไปยังตัวรับกระแสไฟฟ้าที่อยู่ตรงข้าม ระหว่างที่สารละลายพุ่งออกเป็นเส้นใยตัวทำละลายในสารละลายจะเกิดการระเหยทำให้เส้นใยเกิดการแข็งตัว (solidification) ลงอย่างรวดเร็ว กลายเป็นเส้นใยแข็ง (solid fiber) สะสมบริเวณบนผิวตัวรับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งอย่างง่าย [23]

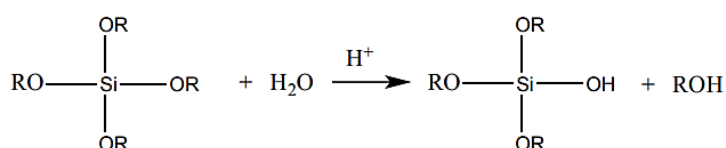
CHULALONGKORN UNIVERSITY



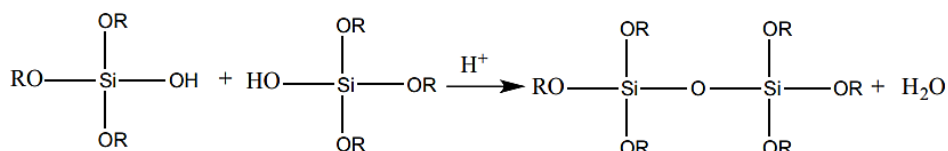
รูปที่ 2.7 ลักษณะกรวยเทย์เลอร์ที่มีสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสารละลายถูกยึดเป็นเส้นใย [24]

กระบวนการโซล-เจล (sol-gel) ถูกใช้กันอย่างทั่วไปสำหรับการเตรียมสารละลายเพื่อสังเคราะห์เส้นใยระดับนาโนผ่านเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยข้อดีของกระบวนการนี้คือสารละลายที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เส้นใยสังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ หลักการโดยทั่วไปของกระบวนการโซล-เจลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการควบแน่น (condensation) ของสารละลายตั้งต้น ซึ่งแสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.8 [23-25]

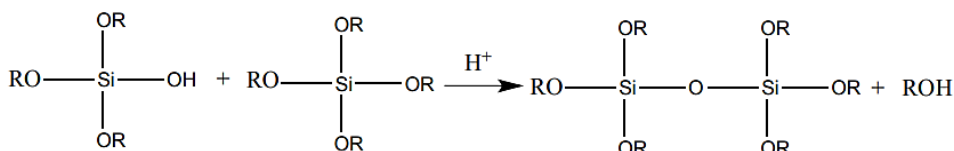
STEP 1: Hydrolysis



STEP 2a: Condensation with formation of water



STEP 2b: Condensation with formation of alcohol



รูปที่ 2.8 การไฮโดรไลซิสและการควบแน่นในกระบวนการโซล-เจล ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด [26]

2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแช่จุ่ม

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแช่จุ่ม (impregnation method) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมากและรู้จักกันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis) เนื่องจากเป็นกระบวนการเรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และมีปริมาณของเสียที่ จำกัด ซึ่งทำได้โดยนำตัวรองรับที่มีรูพรุน (porous support) แช่จุ่มลงในสารละลายที่มีองค์ประกอบ ของสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยวิธีนี้มักใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของ สารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ราคาสูงจำพวกโลหะมีตระกูลสำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัว รองรับ (supported catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแช่จุ่มแล้วจะถูกทำให้แห้งเพื่อไล่ตัวทำ ละลาย ซึ่งความร้อนจะทำการเปลี่ยนเกลือของโลหะให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์

ในกระบวนการแช่จุ่ม องค์ประกอบของสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นสารจำพวกแอนไอออนที่ไม่เสถียรต่อความร้อน ได้แก่ สารประกอบไนเตรท อะซีเตท คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ซึ่งตัวรองรับจะถูกแช่ในสารละลายของสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะควบคุมที่กำหนดไว้ (ความเข้มข้น การผสมกัน อุณหภูมิและเวลา) ทั้งนี้การดูดซับของสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้บนผิวหรือภายในตัวรองรับก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขึ้น โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแช่จุ่มให้ได้ผลดีที่สุดนั้น ก่อนทำการแช่จุ่มจะต้องมีการกำจัดอากาศหรือความชื้นที่อยู่ในรูพรุนของตัวรองรับออกหรือทำการปรับสภาพตัวรองรับโดยการใช้แก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สแอมโมเนีย จากนั้นจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปแช่จุ่ม ทำให้แห้ง และเผาเคลือบตามลำดับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแช่จุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายที่ใช้ ได้แก่ การแช่จุ่มแบบเปียก (wet impregnation) และการแช่จุ่มแบบเปียกพอดิ (incipient wetness impregnation) สำหรับวิธีการแช่จุ่มแบบเปียกจะใช้ปริมาณของสารละลายที่มากเกินไปและกำหนดเวลาในการแช่จุ่มที่แน่นอน จากนั้นจึงทำการแยกส่วนที่เป็นของแข็งออกจากสารละลาย และนำไปกำจัดตัวทำละลายที่มากเกินไปออกโดยการทำให้แห้ง อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของสารละลายที่เตรียมในแต่ละครั้งอาจมีความไม่คงที่ และสารละลายมักจะเกิดตะกอนขึ้นซึ่งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ในขณะที่เดียวกันการแช่จุ่มแบบเปียกพอดิจะใช้ปริมาณสารละลายที่พอดิกันกับปริมาตรรูพรุนรวมของตัวรองรับซึ่งทำให้สารประกอบตั้งต้น (precursor compound) ที่บรรจุในรูพรุนมีปริมาณที่เหมาะสม โดยสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณและความเข้มข้นที่พอดิกับรูพรุนของตัวรองรับ ดังนั้นการควบคุมการเตรียมสารละลายให้มีความแน่นอนจึงเป็นสิ่งสำคัญของกระบวนการแช่จุ่ม นอกจากนี้การควบคุมอัตราการทำให้แห้ง (drying rate) เพื่อกำจัดตัวทำละลายก็มีส่วนอย่างมากต่อการกระจายตัวของอนุภาคโลหะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย

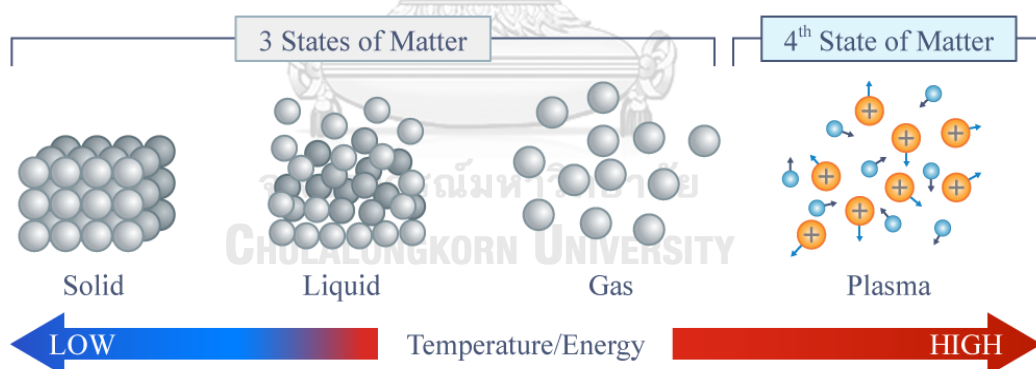
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีแช่จุ่ม (impregnated catalysts) มีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอน (precipitated catalysts) โดยโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกำหนดด้วยตัวรองรับเป็นส่วนใหญ่ และเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวรองรับที่สามารถหาได้ง่ายในช่วงของพื้นที่ผิว ความพรุน รูปร่าง ขนาด และความเสถียรเชิงกลที่ต้องการได้ จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีแช่จุ่มที่มีสมบัติการถ่ายโอนมวลที่ดี โดยหลักการแล้วสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะถูกกระจายให้อยู่ในรูปผลึกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 2-200 นาโนเมตร ทั้งนี้การกระจายตัวที่ดีบนตัวรองรับนั้นไม่เพียงแต่ช่วยให้มั่นใจว่าได้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรตามที่ต้องการ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการใช้สารว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดโอกาสในการเกิดซินเทอริง (sintering) ได้อีกด้วย มากไปกว่า

นั้นการเพิ่มปริมาณการโหลด (loading) ของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นด้วยเหตุผลในทางเศรษฐศาสตร์ปริมาณการโหลดโลหะควรจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยควรทำการโหลดในช่วง 0.05-0.5% สำหรับโลหะมีตระกูลและ 5-15% สำหรับโลหะทั่วไป [27, 28]

2.6 พลาสมา (Plasma)

2.6.1 คำจำกัดความพลาสมา

พลาสมาคือแก๊สที่ถูกไอออไนซ์ (ionized gas) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) และอนุภาคแก๊สที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral gas particles: เรดดิคอลลิสระ และแก๊สที่มีความเสถียรและเป็นกลางทางไฟฟ้า) โดยอนุภาคเหล่านี้มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระและไม่มีทิศทางที่แน่นอน และเนื่องจากพลาสมามีพลังงานที่สูงมากจึงถูกนิยามว่าเป็น “สถานะที่สี่ของสสาร (the fourth state of matter)” โดยเซอร์วิลเลียมครูก์ ในปี ค.ศ.1879 กล่าวคือ เมื่อสสารหนึ่งถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดยเริ่มตั้งแต่สถานะยังเป็นของแข็ง เมื่อเวลาผ่านไปสสารนั้นจะเริ่มหลอมละลายเป็นสถานะของเหลวและระเหยเป็นสถานะแก๊สในที่สุด และถ้าหากมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีก อุณหภูมิของสสารจะสูงขึ้นจนทำให้แต่ละอะตอมแตกออกกลายเป็นประจุบวกและประจุลบ เกิดเป็นสถานะที่สี่ของสสารขึ้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งกลายเป็นพลาสมาเมื่อให้พลังงานความร้อน [29]

พลาสมา แบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือพลาสมาในสภาวะสมดุล (equilibrium plasma) และพลาสมาในสภาวะที่ไม่สมดุล (non-equilibrium plasma) สำหรับพลาสมาในสภาวะสมดุลเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เทอร์มอลพลาสมา (thermal plasma) หรือพลาสมาอุณหภูมิสูง (high thermal plasma)” พลาสมาจะอยู่ในสภาวะสมดุลเมื่ออุณหภูมิของแก๊ส (gas temperature, T_g) ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (electron temperature, T_e) อุณหภูมิที่ต้องใช้ในการเกิดพลาสมาประเภทนี้ต้องสูงถึง 4,000-20,000 เคลวิน ซึ่งทำให้จำนวนครั้งการชนของอนุภาคเพิ่มมาก

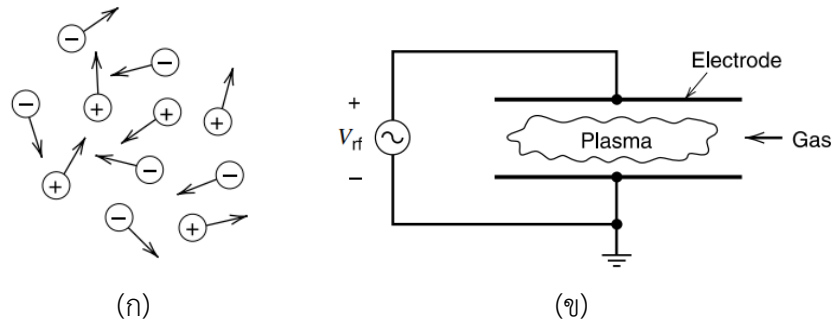
ขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิทั้งหมดมีพลังงานกระจายอย่างเท่ากัน ตัวอย่างทั่วไปของเทอร์มอลพลาสมา ได้แก่ อาร์ค (arcs) และพลาสมาทอร์ช (plasma torches) ซึ่งโดยทั่วไปเทอร์มอลพลาสมาจะถูกนำไปใช้กับงานที่ต้องใช้ความร้อนสูง เช่น การตัดและเชื่อมโลหะ การพ่นสเปรย์ (spraying) หรือการใช้วิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma (ICP) เป็นต้น

สำหรับพลาสมาในสภาวะที่ไม่สมดุล มักเรียกอีกอย่างว่า “นอนเทอร์มอลพลาสมา (non-thermal plasma) หรือพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (low-thermal plasma)” อุณหภูมิของแก๊สจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมาก ($T_0 \ll T_e$) ตัวอย่างของพลาสมาประเภทนี้ เช่น พลาสมาโกลว์ดีสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งเกิดขึ้นที่ความดันน้อยกว่า 1 กิโลปาสคาล และมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณ 10,000 เคลวิน ขณะที่อุณหภูมิของไอออนและแก๊สมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบนอนเทอร์มอลพลาสมาจะถูกใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (high energy electrons) ซึ่งตรงกันข้ามกับเทอร์มอลพลาสมาที่พลังงานไฟฟ้าจะถูกใช้ทั้งหมดในการให้ความร้อนกับแก๊ส ดังนั้นนอนเทอร์มอลพลาสมาจึงมักใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำที่จำเป็นต้องใช้สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ความร้อนต่างๆ (thermal reactions) โดยการประยุกต์ใช้นอนเทอร์มอลพลาสมาที่สำคัญมากที่สุดคือ การสังเคราะห์แก๊สโอโซน (O_3) และการทำให้น้ำบริสุทธิ์โดยใช้พลาสมา นอกจากนี้ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 ยังได้มีการคิดค้นการสร้างอาร์คชนิดกระแสสลับ (alternating current arc) มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์กรดไนตริก (HNO_3) ในเชิงอุตสาหกรรมอีกด้วย

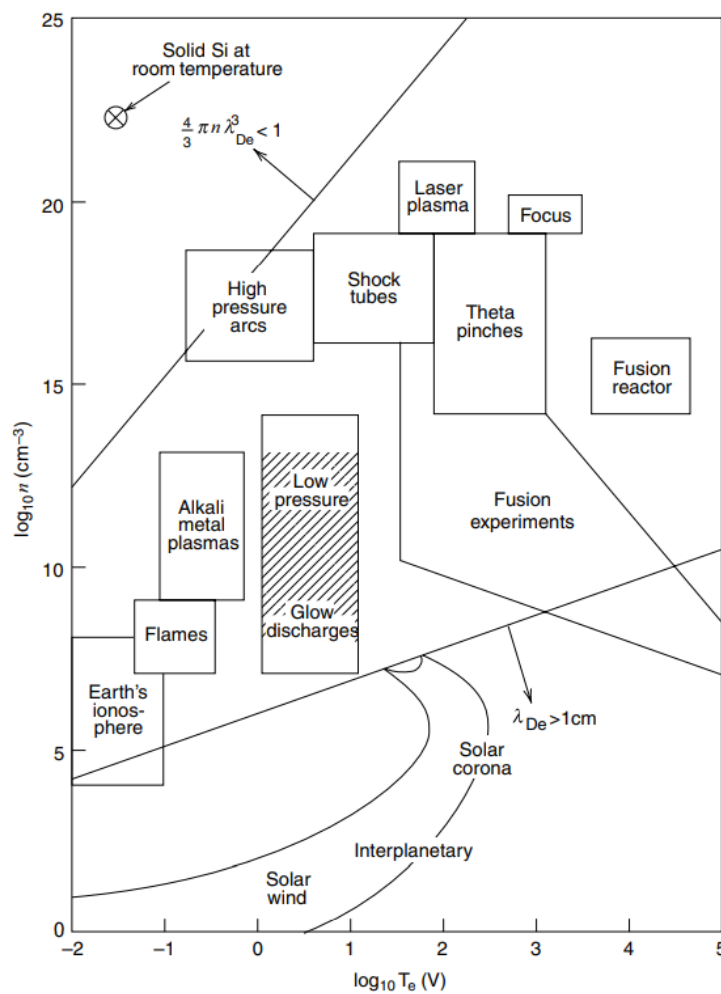
2.6.2 การเกิดพลาสมา (Plasma Generation)

พลาสมาสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้กระแสไฟฟ้า เมื่อมีสนามไฟฟ้า (electric field) ที่แรงพอให้กับแก๊สชนิดหนึ่งที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (electrodes) อนุภาคของประจุจะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงจนชนเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลและไปทำให้อนุภาคที่เป็นกลางนั้นเกิดเป็นไอออน โดยไปชนให้อิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่หลุดออกไปเรียกว่า การเกิดไอออไนซ์ (ionization) ไอออนและอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นจากการชนกันก็จะถูกเร่งต่อด้วยสนามไฟฟ้าและไปชนกับอนุภาคที่เป็นกลางอื่นต่อไป ซึ่งการชน (collision) ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “อิเล็กโตรดิสชาร์จ (electrodischarge) หรือปรากฏการณ์เกิดพลาสมาโดยการชนกันของอนุภาค” โดยแสดงแบบจำลองอย่างง่ายดังรูปที่ 2.10

นอกจากการเกิดพลาสมาโดยอาศัยการปล่อยกระแสไฟฟ้าแล้ว สภาวะพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น ชั้นบรรยากาศของโลกที่ถูกไอออไนซ์เรียกว่า “ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere)” และพลาสมาจากดวงอาทิตย์ซึ่งแหล่งกำเนิดพลาสมาที่สำคัญของจักรวาลที่ส่งกระแสของพลาสมาเหล่านั้นมายังโลกและดาวเคราะห์ดวงอื่นในระบบสุริยะ



รูปที่ 2.10 แบบจำลองแสดง (ก) อนุภาคพลาสมา และ (ข) การเกิดการดีสชาร์จของพลาสมา [30]



รูปที่ 2.11 ขอบเขตการเกิดของพลาสมาตามธรรมชาติและจากงานวิจัยและในอุตสาหกรรม [30]

ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (electron density) และอุณหภูมิของพลาสมา (temperature of plasma) จะแตกต่างกันไปตามสภาวะการเกิด ดังนั้นพลาสมาที่เกิดขึ้นในสภาวะใดๆ ทั้งโดยวิธีสร้างขึ้นหรือเกิดเองตามธรรมชาตินั้นจะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิในทางจลนพลศาสตร์ (kinetic temperature) ที่ต่างกันดังรูปที่ 2.11 โดยพลาสมาที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี

ส่วนใหญ่จะเป็นพลาสมาที่มีการดีสชาร์จความดันต่ำ (low-pressure discharges) ซึ่งจะมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณ 1-10 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ 10^8 - 10^{13} อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร

2.6.3 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของแก๊สในพลาสมา

2.6.3.1 ฟังก์ชันการกระจายตัวของอนุภาค

อนุภาคแต่ละอนุภาคของแก๊สและพลาสมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่ออนุภาคเหล่านี้มีการชนกันแล้วความเร็วและพลังงานของอนุภาคต่างๆจะแสดงเป็นค่าที่มีขอบเขตตามฟังก์ชันการกระจายตัวของแมกซ์เวลล์-โบลทซ์มาน (Maxwell-Boltzman distribution function)

2.6.3.2 การชนกันของอนุภาค

ฟังก์ชันการกระจายตัวของแมกซ์เวลล์-โบลทซ์มานจะเกิดขึ้นเมื่อมีการชนกันระหว่างอนุภาคชนิดเดียวกันของแก๊สหรือพลาสมา หรือการชนกันในระบบสองชนิดหรือหลายชนิดระหว่างอิเล็กตรอน ไอออน อะตอมที่เป็นกลางหรือโมเลกุลของสารอื่น เช่น A และ B ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งในการประยุกต์ใช้พลาสมาในอุตสาหกรรมไม่เพียงแต่พิจารณากระบวนการเหล่านี้เท่านั้นแต่ยังรวมถึงการชนกันระหว่างสสารที่มีสถานะอื่นทั้งของแข็งของเหลวและแก๊สที่บรรจุอยู่ภายในระบบด้วย

ตารางที่ 2.3 กลไกการเกิดการชนกันของอนุภาคต่างๆ ในพลาสมา

Collision	Reaction
Elastic Collision	$e^- + A \rightarrow e^- + A$
Excitation	$e^- + A \rightarrow e^- + A^*$
Ionization	$e^- + A \rightarrow e^- + A^+$
Attachment	$e^- + A \rightarrow A^*$
Dissociative Attachment	$e^- + B_2 \rightarrow B^* + B$
Recombination	$e^- + B_2^+ \rightarrow B_2$
Detachment	$e^- + B_2^- \rightarrow 2e^- + B_2$
Ion Recombination	$A^- + B^+ \rightarrow AB$
Charge Transfer	$A^\pm + B \rightarrow A + B^\pm$
Electronic Decomposition	$e^- + AB \rightarrow e^- + A + B$
Atomic Decomposition	$A^* + B_2 \rightarrow AB + B$

หมายเหตุ: A และ B แทนสัญลักษณ์ของอะตอมธาตุหรือโมเลกุลที่สามารถกลายเป็นพลาสมาได้

2.6.3.3 การชนกันระหว่างอนุภาคสองชนิดแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision)

การชนกันลักษณะแบบนี้เป็นการชนกันระหว่างสองอนุภาคของแก๊สหรือพลาสมา โดยในการชนกันแบบยืดหยุ่นนี้พลังงานจลน์ของสองอนุภาคจะเป็นแบบอนุรักษ์พลังงาน นั่นคือพลังงานจลน์ทั้งก่อนและหลังการชนกันจะเท่ากัน

2.6.3.4 การชนกันระหว่างอนุภาคสองชนิดแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision)

เมื่ออนุภาคสองอนุภาคเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานจลน์ของทั้งสองอนุภาคก่อนการชนจะมากกว่าหลังการชนซึ่งเป็นผลมาจากสูญเสียพลังงาน การชนกันในลักษณะนี้กระบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้นคือการเกิดสภาวะกระตุ้น (excitation) ของอะตอมของแก๊สที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นขึ้นไปให้อยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงกว่าปกติ อะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) เหล่านี้จะคายพลังงานออกมาในรูปของเส้นสเปกตรัมหรือแสงเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในพลาสมา

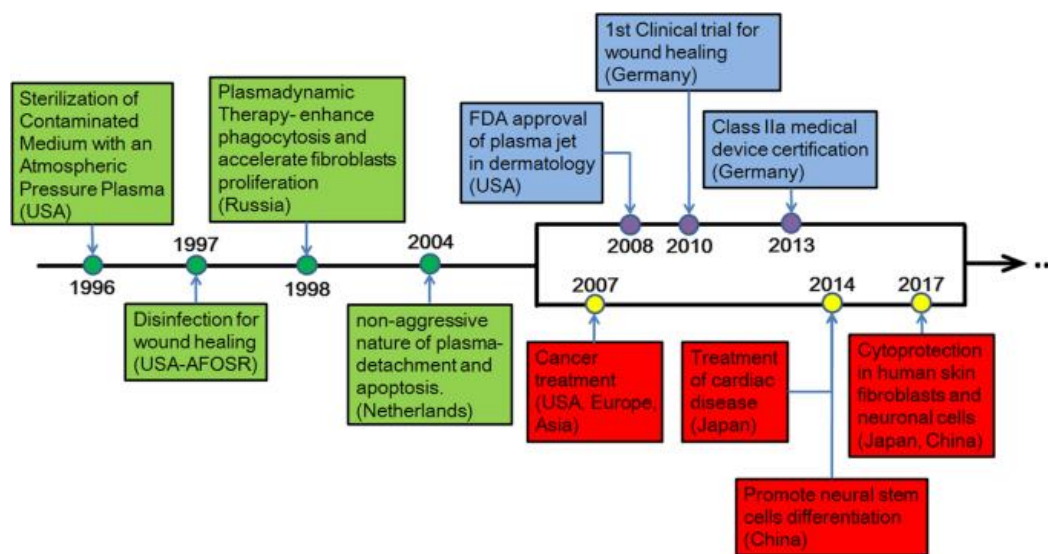
2.6.3.5 การชนกันต่างสถานะที่พื้นผิว

การชนกันต่างสถานะเกิดขึ้นกับสสารที่ต่างสถานะกัน ส่วนใหญ่จะเป็นการชนของผนังพื้นผิววัตถุโดยเรดิคอลลิสระ ไอออน หรืออิเล็กตรอนที่มีพลังงานในตัว ซึ่งทำให้ไปกระทบโดนอิเล็กตรอน (secondary electron emission) หรืออะตอมที่เป็นกลางหลุดออกจากผนังพื้นผิววัตถุ (sputtering emission) ในขณะที่ไอออนและอิเล็กตรอนจากพลาสมาเข้าสัมผัสกับพื้นผิวนั้นจะทำให้เกิดการกลับมารวมตัวกันเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง หรือทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาขึ้นเมื่อแก๊สที่ถูกดูดซับไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวมันเองหรือกับวัตถุที่เป็นพื้นผิว อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวอาจทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางหรือมีการสะสมของสารบนพื้นผิวจนเกิดเป็นตะกรันขึ้น [30-32]

2.6.4 การประยุกต์ใช้พลาสมาในกระบวนการผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิง

เทอร์มอลพลาสมาและนอนเทอร์มอลพลาสมามีการใช้งานในเชิงพาณิชย์และทางอุตสาหกรรมเคมีอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามพลาสมาบางชนิดไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม เช่น เทอร์มอลพลาสมาอาร์ค (thermal arc plasma) เนื่องจากมีประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมต่ำ ทำให้มีต้นทุนการใช้พลังงานที่สูงเมื่อเทียบกับพลาสมาชนิดอื่น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงเกินไปของพลาสมาอาร์คสามารถปรับปรุงปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) และนำไปสู่การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่พึงประสงค์ได้ เช่น เอทิลีนและอะเซทิลีนที่เป็นผลพลอยได้ (byproduct) จากการสังเคราะห์โอเลฟินส์ (olefin) ขณะเดียวกันนอนเทอร์มอลพลาสมาบางชนิดก็ไม่สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงได้ เนื่องจากเกิดการไอออนไนซ์ที่อ่อนเกินไปและไม่สามารถสร้างสปีชีส์ที่ว่องไว (active species) ที่มีความเข้มข้นสูงพอต่อกระตุ้นปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพได้ ด้วยเหตุนี้การเลือกประเภทและชนิดของพลาสมาจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

โดยในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมากันอย่างแพร่หลายหลาย เช่น การใช้พลาสมาปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์เพื่อผลิตวัสดุพอลิเมอร์ขั้นสูงตามความต้องการที่เพิ่มขึ้น การใช้พลาสมาในกระบวนการเคมีเพื่อเพิ่มการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์อย่างมีประสิทธิภาพและลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ต้องการ รวมถึงการพัฒนาใช้เทคโนโลยีพลาสมาในวงการแพทย์ดังรูปที่ 2.12 [33-35]

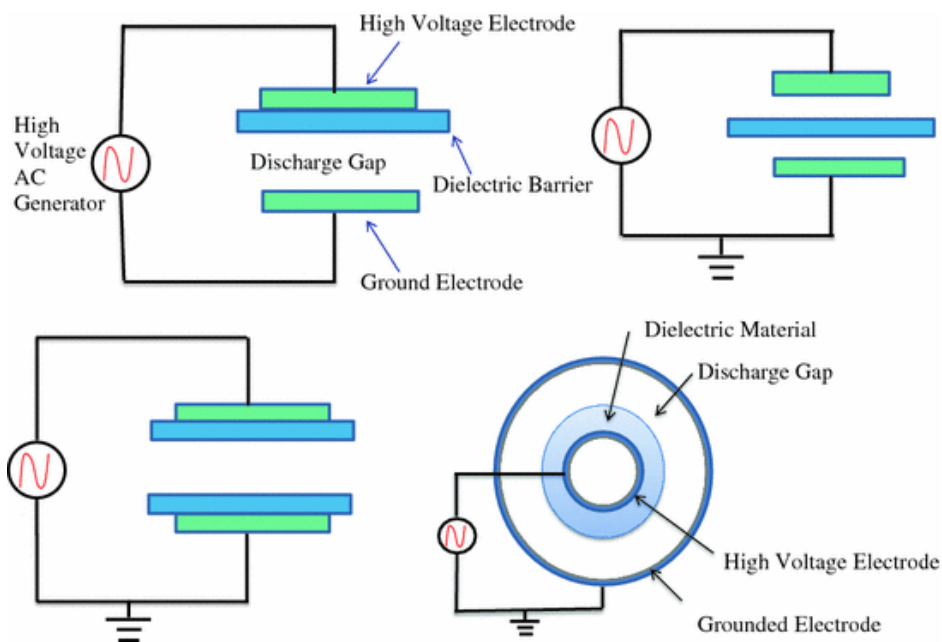


รูปที่ 2.12 ไทม์ไลน์แสดงความก้าวหน้าของการประยุกต์ใช้พลาสมาในวงการแพทย์ [35]

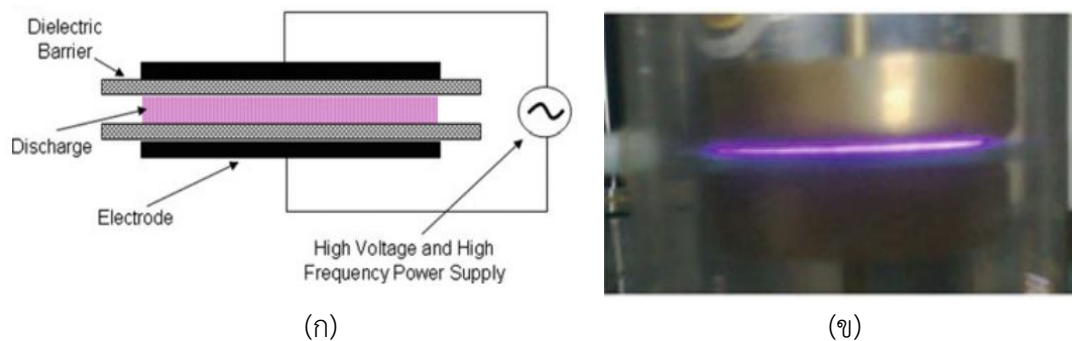
2.7 พลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge Plasma)

พลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (dielectric barrier discharge plasma, DBD plasma) เป็นเทคโนโลยีพลาสมาที่ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา และได้มีการประยุกต์ใช้งานหลากหลายในอุตสาหกรรมเคมี ยา การรักษาโรค การสร้างโอโซน และการควบคุมมลพิษ โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่วางขนานตัวกันสองขั้ว และวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) เช่น ควอตซ์ อะลูมินา แก้วซิลิกา เซรามิก หรือชั้นพอลิเมอร์ ซึ่งมีทำหน้าที่จำกัดพื้นที่การถ่ายโอนของประจุและช่วยให้ประจุมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโซนดีสชาร์จ (discharge zone) ขณะเดียวกันยังช่วยหลีกเลี่ยงการก่อตัวของประกายไฟ (spark formation) ได้อีกด้วย สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นค่าที่ใช้แสดงความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุไดอิเล็กทริกในพลาสมา DBD ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 1-30 กิโลโวลต์ และความถี่กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 500 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อขับเคลื่อนการดีสชาร์จในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา DBD อย่างไรก็ตามการป้อนความถี่กระแสไฟฟ้าที่สูงมากเกินไปไม่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแก๊ส เนื่องจากความถี่กระแสไฟฟ้าอาจเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายโอนมวลได้ [36]

มากไปกว่านั้น Khoja และคณะได้รวบรวมโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบต่างๆ ไว้ดังรูปที่ 2.14 โดยเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกกลาง (cylindrical electrode) ได้รับการศึกษาและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการสร้างไอโซน ขณะเดียวกันเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบแผ่นขั้วไฟฟ้าขนาน (parallel-plate electrode) เป็นโครงสร้างที่ใช้งานง่ายและสะดวกที่สุดในระบบพลาสมา DBD ซึ่งโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบและสมมาตร ส่วนการดีสชาร์จจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สมมาตรทั้งสอง ดังรูปที่ 2.15 [36, 37]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จโดยทั่วไป [36]



รูปที่ 2.14 พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จแบบแผ่นขั้วไฟฟ้าคู่ขนานกับวัสดุแบริเออร์คู่ (parallel-plate electrodes with double barrier material) (ก) แบบจำลองโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา และ (ข) รูปถ่ายดีสชาร์จที่เกิดขึ้น [36]

2.8 ทบทวนวารสารทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อเปลี่ยนรูปแก๊สเรือนกระจกให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้รับการศึกษาพัฒนากันอย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น

ในปี ค.ศ. 2012 Tu และ Whitehead [38] ได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (coaxial dielectric barrier discharge reactor) สำหรับปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเป็นแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ทั้งนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ 1. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเติมช่องว่างที่เกิดการดีสชาร์จ 2. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ในช่องว่างที่เกิดดีสชาร์จตามแนวรัศมี และ 3. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ด้านล่างของหลอดควอตซ์ (quartz tube) ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพลาสมา และพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันในปฏิกิริยาพลาสมาเชิงเร่งดรายรีฟอร์มมิง พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเติมมีผลต่อรูปแบบการดีสชาร์จอย่างมากเนื่องจากทำให้ปริมาตรดีสชาร์จนั้นลดน้อยลงและในส่วนของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ในช่องว่างดีสชาร์จตามแนวรัศมีและตามแนวแกนยังคงแสดงการดีสชาร์จแบบฟิลาเมนต์ (filamentary discharge) ที่แรง อีกทั้งยังเพิ่มการเกิดอันตรกิริยาทางกายภาพและทางเคมีระหว่างพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นผลของการทำงานร่วมกันของพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบบางส่วนแสดงให้เห็นว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าเป็น 56.4% และ 17.5% ตามลำดับ นอกจากนี้การทำงานร่วมกันของพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยายังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในการเปลี่ยนรูปแก๊สเรือนกระจกอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2015 Zeng และคณะ [39] ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน และชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ Ni, Co, Cu และ Mn บนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) สำหรับปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ โดยพบว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อนทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์ลดลง ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ระบบพลาสมาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงสุด 19.6% ภายใต้ภาวะการใช้กำลังไฟฟ้า 7.5 วัตต์ และอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 50 มิลลิลิตรต่อนาที

ในปีเดียวกัน Zheng และคณะ [40] ศึกษาอนุภาคนาโนสปินเนลนิกเกิลเฟอร์ไรต์ (spinel nickel ferrite nanoparticles, NiFe_2O_4) บนซิลิกา ($\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$) ในการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยารายรีฟอร์มมิงของมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบริเออร์ ดิสชาร์จภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ไม่มีการป้อนความร้อนจากภายนอก ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiFe_2O_4 ขนาด 10 นาโนเมตร ถูกโหลดบนซิลิกา (SiO_2) ที่มีรูพรุนเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่แตกต่างกัน ($\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni-Fe}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni-Fe}/\text{SiO}_2$, และ NiFe_2O_4) มากไปกว่านั้นได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ในช่วง 60-200 วัตต์ ที่มีต่อค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและค่าการเลือกเกิดของแก๊สสังเคราะห์ พบว่าค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า โดยค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงกว่าค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามค่าการเลือกเกิดของแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและลดลง โดยกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า 160 วัตต์ ให้ค่าการเลือกเกิดของแก๊สสังเคราะห์สูงสุด นอกจากนี้เมื่อเทียบกับพลาสมาเปล่า (plasma-alone) ซึ่งให้เห็นว่า การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในโซนพลาสมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ภายใต้ระบบพลาสมาให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอื่นที่ทำการศึกษา ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (80.01% และ 70.27%) ค่าการเลือกเกิดของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (89.92% และ 80.50%) และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (0.953) สูงสุด ณ กำลังที่ป้อนเข้า เท่ากับ 160 วัตต์

ในปี ค.ศ. 2017 Zhu และคณะ [41] ศึกษาปฏิกิริยารายรีฟอร์มมิงแก๊สชีวภาพที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดประกายไฟฟาร้อนแบบหมุนได้ (rotating gliding arc plasma reactor) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ที่เตรียมด้วยวิธีแช่จุ่มปริมาตรมากเกินไป (excess volume impregnation) ในการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีมูลค่า ทั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการบรรจุนิกเกิลปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่ 6, 8 และ 10% โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน ในช่วง 6-20 ลิตรต่อนาที ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาดรายรีฟอร์มมิง โดยพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อนส่งผลให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อนทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นเคลื่อนที่ผ่านบริเวณดิสชาร์จลดลง โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 3:7 และอัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 6 ลิตรต่อนาที ให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงสุด 52.6% ภายใต้สภาวะพลาสมาที่ไม่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาการใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ พบว่ามีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยการเพิ่มปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาให้

ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงขึ้น และค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงสุด 58.5% ผลผลิตของไฮโดรเจน 20.7% เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/ γ -Al₂O₃ บรรจุบริเวณกระแสนอกของเครื่องปฏิกรณ์

ในปี ค.ศ. 2019 Ray และคณะ [42] ศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลภายใต้การใช้พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จที่อุณหภูมิและความดันปกติ ทั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ZSM-5, Al₂O₃ และ TiO₂ โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดและให้ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์ที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องจากขนาดของอนุภาคนิกเกิลที่เล็กกว่า และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂ ให้ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนสูงสุด (50%) ขณะเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ให้ค่าการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด (71%) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคือ การใช้ความร้อนอย่างเดียว (thermal) การใช้พลาสมาอย่างเดียว (plasma) และการใช้พลาสมาพร้อมกับความร้อน (plasma-thermal) ในการเกิดปฏิกิริยา สำหรับสภาวะการใช้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส ในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ZSM-5 ให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 73% และ 68% ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้พลาสมาพร้อมกับความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 76% และ 71% ตามลำดับ ภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ZSM-5 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการทำงานร่วมกันของพลาสมาและความร้อนในการกระตุ้นสารตั้งต้นก่อนการทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปี ค.ศ. 2020 Suttikul และคณะ [43] ศึกษากระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนร่วมกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จแผ่นคู่ขนาน (parallel plate dielectric barrier discharge reactor) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ โดยมีอิทธิพลที่ศึกษา ได้แก่ ความถี่ในการดีสชาร์จ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมินา (Al₂O₃) และนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni/Al₂O₃) โดยพบว่าค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ในการดีสชาร์จ ในขณะที่ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ โดยสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์คือ ความถี่ดีสชาร์จ 750 เฮิร์ตซ์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 11 กิโลโวลต์ ในส่วนผลของการทำงานร่วมกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและพลาสมา เมื่อพิจารณาปริมาณการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าปริมาณ Al₂O₃ 6.4 กรัม ให้ค่าการเลือกเกิดแก๊สสังเคราะห์สูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณ Al₂O₃ 3.2 และ 9.6 กรัม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่ปริมาณโหนดนิกเกิลแตกต่างกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt% Ni/Al₂O₃ ให้ค่าการเลือกเกิดแก๊สสังเคราะห์สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 0, 10 และ 20 wt% Ni/Al₂O₃ และการใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา 5 wt% Ni/Al₂O₃ มีการสะสมของโค้กลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al₂O₃ ภายใต้การใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 2022 Zeng และคณะ [44] ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงแก๊สชีวภาพสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนภายใต้ระบบพลาสมาชนิดโคแอกเซียลไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni/Al₂O₃) ที่โปรโมทด้วยโพแทสเซียม (K) ในปริมาณที่แตกต่างกัน (0, 2, 4 และ 6% โดยน้ำหนัก) ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าการโปรโมทโพแทสเซียมบนตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ขนาดผลึกเฉลี่ยและความเป็นเบส (basicity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มากไปกว่านั้นการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-K/Al₂O₃ ที่มีปริมาณโพลโพแทสเซียม 2% โดยน้ำหนัก แสดงประสิทธิภาพการรีฟอร์มมิงแก๊สชีวภาพที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงสุด 32% ค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 23% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุด 0.67 มิลลิโมลต่อกิโลจูล อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการสะสมของคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณการสะสมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพลโพแทสเซียม ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับขนาดผลึกของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-K/Al₂O₃ ที่มีปริมาณการโพลโพแทสเซียม 6% โดยน้ำหนัก มีปริมาณคาร์บอนสะสมสูงสุด

และสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเส้นใยในปฏิกิริยาต่างๆ ได้มีการรายงานหลายงานวิจัยด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 2010 Reubroycharoen และคณะ [45] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SiO₂ fiber) ที่สังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกด้วยเทคนิคโซล-เจล (sol-gel technique) และเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning technique) ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยไอน้ำ (glycerol steam reforming) ทั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการโหลดนิกเกิลที่แตกต่างกัน คือ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก รวมถึงผลของแรงดันไฟฟ้าในการสปินนิงที่มีต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยซิลิกา จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยซิลิกาอยู่ในช่วง 1.28 ไมโครเมตร ถึง 930 นาโนเมตร และปริมาณนิกเกิลที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS นั้นใกล้เคียงกับปริมาณนิกเกิลที่ทำการโหลด โดยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ ให้ลักษณะเส้นใยซิลิกาที่สม่ำเสมอมากกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 20 และ 25 กิโลโวลต์ ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุนแบบทั่วไป และแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 2 ตามปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปส์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา

ในปี ค.ศ. 2015 Wen และคณะ [7] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเส้นใยนาโนซิลิกาที่ปกคลุมด้วยนิกเกิล (silica nanofibre confined nickel catalyst, Ni/SiO₂) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SiO₂ ที่เตรียมด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าเล็กน้อย และให้เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาทั่วไปที่เตรียมด้วยวิธีแช่จุ่มแบบพอดิของผงซิลิกาการค้า ทั้งนี้เป็นผลมาจากการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลที่ดีกว่าและการสะสมของคาร์บอนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปี ค.ศ. 2018 Mhadmhan และคณะ [6] สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ (ethanol steam reforming) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนที่สูงกว่าและให้เสถียรภาพที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP หลังการทดสอบปฏิกิริยาพบคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) จำนวนมากปกคลุมบริเวณตำแหน่งกัมมันต์ ซึ่งคาดว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลลดลงเมื่อเวลาปฏิกิริยาดำเนินไป ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF พบการสะสมของคาร์บอนในรูปแบบเส้นใย (filaments) และมีอนุภาคนิกเกิลขนาดใหญ่บนเส้นใย ส่งผลให้สารตั้งต้นสามารถเข้าถึงตำแหน่งกัมมันต์ได้ง่าย จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF มีเสถียรภาพที่ดีกว่า Ni/SP

นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 2020 Herminio และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาและเสนอการประยุกต์ใช้งานครั้งแรกของตัวเร่งปฏิกิริยาลักษณะเส้นใยที่มีส่วนประกอบของนิกเกิล-ซีเรีย จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการสปินนิงแบบเป่าสารละลาย (solution blow spinning, SBS) ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน และพิจารณาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ชั่วโมง จากการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างมีนัยสำคัญหลังจากดำเนินปฏิกิริยาไป 30 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าการคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 44% และ 57% ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนและการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วแสดงให้เห็นว่าสปีชีส์ของคาร์บอนที่สะสมบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกล่าวโดยรวมได้ว่าการสปินนิงแบบเป่าสารละลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเส้นใยนิกเกิล เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้ต้นทุนต่ำ ให้อายุการใช้งานที่ยาวนาน การซินเทอริง (sintering) และการสะสมของคาร์บอน รวมถึงมีเสถียรภาพสำหรับกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ทดสอบปฏิกิริยาอีพอกซี

3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

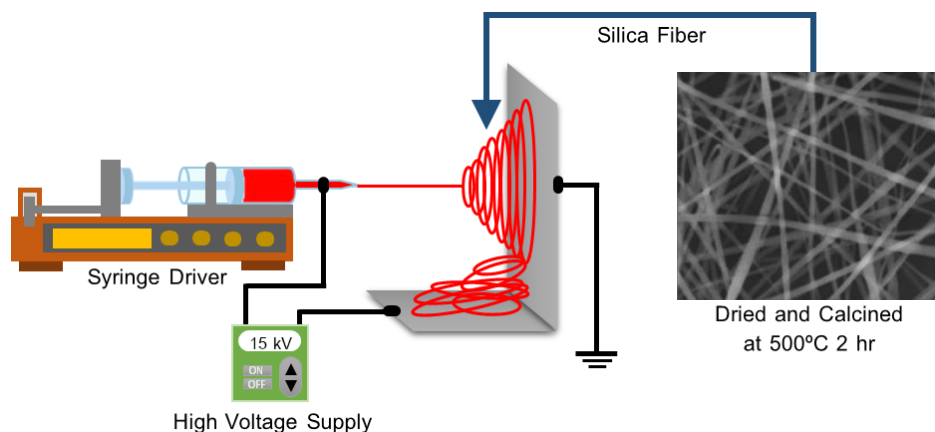
ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

วัสดุและสารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต 99.0% (TEOS; $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$)	analytical	Sigma-Aldrich
เอทานอล 99.9% ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)	analytical	Sigma-Aldrich
กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl)	analytical	Sigma-Aldrich
นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	analytical	Sigma-Aldrich
เม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (silica porous, Q-10) (\varnothing 0.85-1.70 mm)	commercial	Fuji Silysia

3.1.2 การสังเคราะห์ตัวรองรับชนิดเส้นใยซิลิกา (Silica Fiber, SF)

ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล (sol-gel technique) ร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning technique) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ [6]

1. เตรียมสารละลายเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) เพื่อใช้เป็นแหล่งของธาตุซิลิกอน (Si)
2. ผสม TEOS และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:2 พร้อมทั้งกวนผสมด้วยเครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 0.01:1 พร้อมทั้งกวนผสมต่อที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมเอทานอลในอัตราส่วน 2:1 พร้อมทั้งกวนผสมต่อที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที
4. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปกวนผสมในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายมีลักษณะหนืดคล้ายเจล
5. ดูดสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา (syringe) เพื่อนำไปสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ดังรูปที่ 3.1 โดยควบคุมใช้หัวเข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับขั้วไฟฟ้า 15 เซนติเมตร อัตราการฉีดสารละลาย 10 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 15 กิโลโวลต์
6. นำตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งคืน แล้วนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 สังกะหราะห์ตัวร่งรับเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

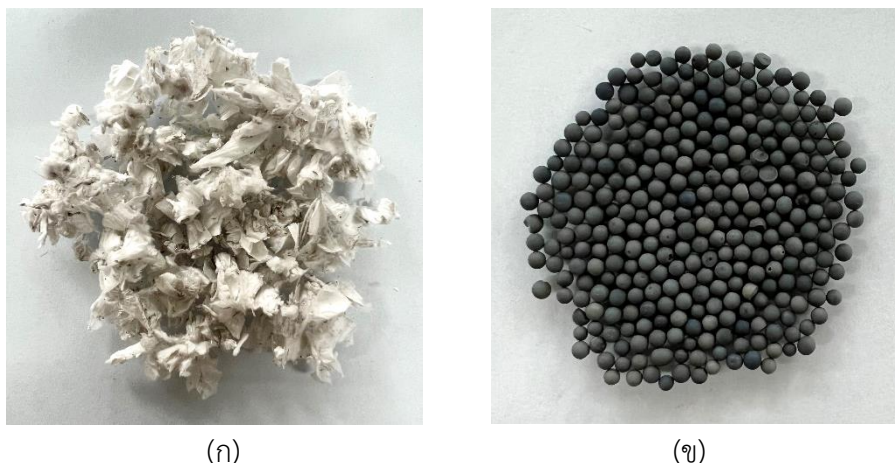


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายตัวร่งรับเส้นใยซิลิกาหลังการเผาคล้ไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.1.3 การสังเคราะห์ตัวร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวร่งรับ

ตัวร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวร่งรับเส้นใยซิลิกา (nickel catalyst on silica fiber support, Ni/SF) และตัวร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวร่งรับซิลิกาที่มีรูพรุน (nickel catalyst on silica porous support, Ni/SP) ถูกเตรียมด้วยวิธีการแช่จุ่มแบบเปียกพอดิ (incipient wetness impregnation method) โดยมีขั้นตอนดังนี้ [6]

1. เตรียมนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตเพื่อใช้เป็นแหล่งของธาตุนิกเกิล ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. ละลายนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตด้วยน้ำกลั่นในปริมาณที่เหมาะสมกับรูพรุนของตัวร่งรับ
3. แช่จุ่มตัวร่งรับเส้นใยซิลิกาและเมตซิลิกาที่มีรูพรุนด้วยสารละลายที่เตรียมจากข้อ 2
4. นำตัวร่งปฏิกริยาที่เตรียมได้มาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งคืน จากนั้นนำไปเผาคล้ไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



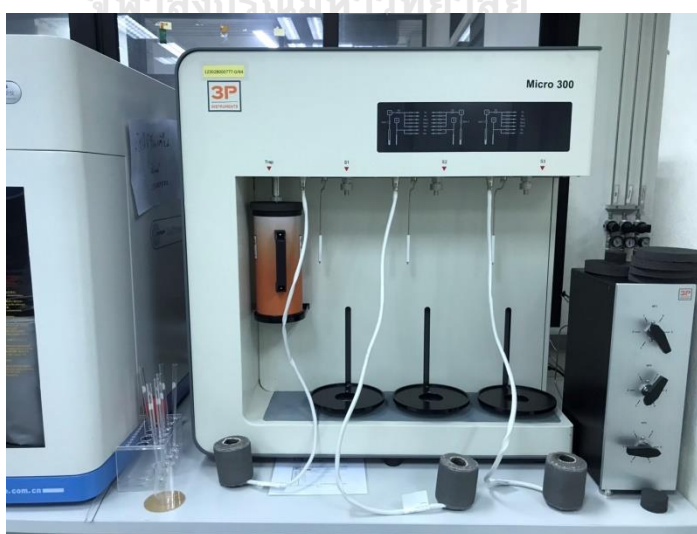
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับชนิดต่างๆ

(ก) นิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา และ (ข) นิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุน

3.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

3.1.4.1 เทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน (Nitrogen Physisorption)

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน รุ่น Micro 300 ซึ่งผลิตโดยบริษัท 3P Instruments GmbH & Co. KG และใช้วิธีบีอีที (Brunauer, Emmett and Teller; BET method) เพื่อคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ ใช้วิธีบีเจเอช (Barrett, Joyner and Halenda; BJH method) เพื่อหาปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยควบคุมสภาวะการไล่แก๊ส (degassing) ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน

3.1.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รุ่น Smart Lab ซึ่งผลิตโดยบริษัท Rigaku เพื่อใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ยืนยันผลึกและประมาณขนาดของอนุภาคตำแหน่งกัมมันต์ (active site) บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากการคำนวณผ่านสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation)



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [46]

3.1.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะภาพ 3 มิติ และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ รุ่น JSM-7610F ซึ่งผลิตโดยบริษัท JEOL Technique



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ [47]

3.1.4.4 เครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)

การวิเคราะห์โดยสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน รุ่น TGA 8000 ซึ่งผลิตโดยบริษัท PerkinElmer เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างหลังได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นปริมาณน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัวของคาร์บอนที่สะสมบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน

3.2 การทดสอบปฏิกิริยารีฟอร์มมิงภายใต้การใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

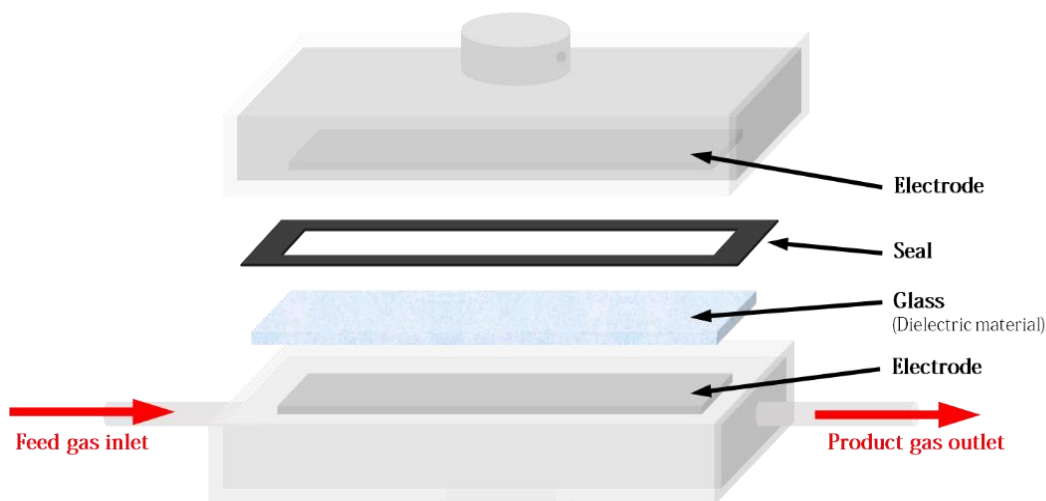
3.2.1 แก๊สที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาและแก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 แก๊สที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาและแก๊สที่ใช้ในการวิเคราะห์

ชนิดของแก๊ส	เกรด/ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
แก๊สที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา - แก๊สป้อนผสม (70%CH ₄ : 30%CO ₂)	certificate/ -	บริษัท ลินด์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
แก๊สที่ใช้ล้างระบบ - แก๊สไนโตรเจน (N ₂)	HP/ 99.99%	บริษัท แสตนด์การ์ดแก๊ส แอนด์ เซฟตี้โปรดักส์ จำกัด
แก๊สที่ใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์แก๊ส - แก๊สฮีเลียม (He)	UHP/ 99.99%	บริษัท แสตนด์การ์ดแก๊ส แอนด์ เซฟตี้โปรดักส์ จำกัด
แก๊สผสมมาตรฐาน (standard mixed gas) - แก๊สมีเทน (CH ₄) - แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) - แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) - แก๊สไฮโดรเจน (H ₂) - แก๊สไนโตรเจน (N ₂) - แก๊สออกซิเจน (O ₂) - แก๊สฮีเลียม (He) เป็น balancing gas	4.00% 5.00% 5.00% 4.00% 5.00% 4.99%	บริษัท Air Liquide (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยา

เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ใช้สำหรับทดสอบปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ เป็นเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (dielectric barrier discharge plasma reactor, DBD) ซึ่งทำมาจากวัสดุอะคริลิกใส (acrylic material) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยแผ่นโลหะเหล็กสแตนเลส (stainless steel) ลักษณะสี่เหลี่ยมบางสองแผ่นวางคู่ขนานซึ่งกันและกัน และทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโลหะ (metal electrodes) มากไปกว่านั้นภายในยังประกอบไปด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นแผ่นกระจกใส มีหน้าที่ช่วยให้การเกิดพลาสมาดีสชาร์จ (discharge plasma) กระจายทั่วพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.9



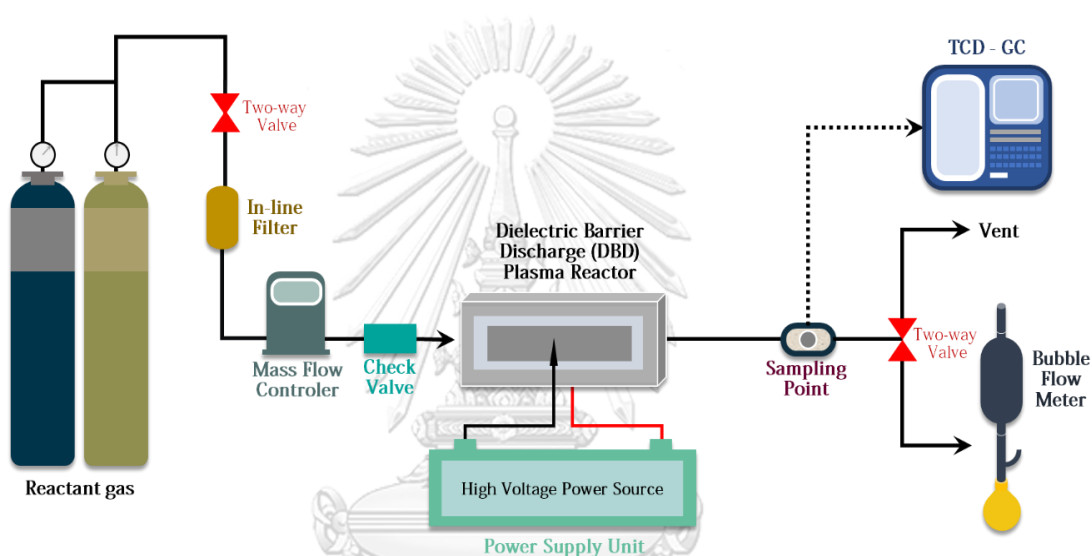
รูปที่ 3.8 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ

ในส่วนของระบบพลาสมาสามารถติดตั้งได้โดยการต่อแผ่นขั้วไฟฟ้าโลหะทั้งคู่เข้ากับหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply unit) ซึ่งแปลงกระแสไฟฟ้าสลับ (alternating current, AC) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ 220 โวลต์ และความถี่กระแสไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ไปเป็นกระแสไฟฟ้าสลับที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงมากพอจะทำให้เกิดการดีสชาร์จของพลาสมาขึ้นระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าโลหะทั้งสอง

3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบปฏิกิริยา

1. บรรจุก๊าซปฏิกิริยาที่ต้องการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา
2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา และเซ็นเซอร์และเครื่องมือต่างๆ ดังรูปที่ 3.10
3. เปิดแก๊สผสมของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากถังแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์พลาสมา
4. ปรับอัตราการไหลของแก๊สผสมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สแบบดิจิตอลให้มีอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
5. วัดอัตราการไหลของแก๊สก่อนเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟอง พร้อมกับเก็บแก๊สที่จุดเก็บแก๊สตัวอย่างด้วยเข็มฉีดยาสำหรับแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผสมก่อนเกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี
6. เปิดระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า พร้อมกับตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 13 กิโลโวลต์ และความถี่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 300 เฮิร์ตซ์ จากเครื่องฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์
7. รอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เป็นเวลา 15 นาที

8. เก็บแก๊สหลังเกิดปฏิกิริยาที่จุดเก็บแก๊สตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีทุกๆ 20 นาที ทั้งหมด 3 ครั้ง
9. วัดอัตราการไหลของแก๊สหลังเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมจดบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ จากเครื่องพาวเวอร์อะนาไลเซอร์
10. ปิดระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ปิดวาล์วแก๊สผสม และปิดสวิทช์เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊ส
11. เปิดแก๊สไนโตรเจนจากถังแก๊สเข้าสู่ระบบ เพื่อไล่แก๊สที่อยู่ในระบบ
12. ถอดและทำความสะอาดแผ่นขั้วไฟฟ้า และเครื่องปฏิกรณ์

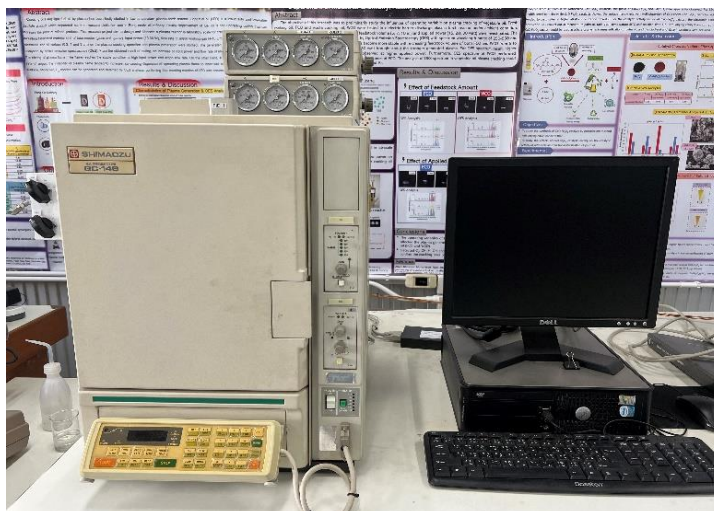


รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบปฏิกิริยาฟอรัมมิงภายใต้ระบบพลาสมา ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส

องค์ประกอบของแก๊สทั้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาถูกตรวจสอบโดยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC) ของ Shimadzu รุ่น GC-14B ซึ่งใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) และกำหนดโปรแกรมอุณหภูมิภายในเตาเป็นดังนี้

อุณหภูมิเริ่มต้น:	40 องศาเซลเซียส และกำหนดให้คงที่ 6 นาที
อุณหภูมิขณะทำการทดลอง:	40-110 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการทดลอง:	20 นาที



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟ

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของระบบพิจารณาได้จากค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ผลผลิตของไฮโดรเจนคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณพลังงานจำเพาะที่ใช้ในระบบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการแสดงดังต่อไปนี้

ค่าคอนเวอร์ชันมีเทน (CH_4 conversion, %)

$$= \frac{\text{โมลของ } \text{CH}_4 \text{ ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์} - \text{โมลของ } \text{CH}_4 \text{ หลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{โมลของ } \text{CH}_4 \text{ ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์}} \times 100 \quad (3.1)$$

ค่าคอนเวอร์ชันคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 conversion, %)

$$= \frac{\text{โมลของ } \text{CO}_2 \text{ ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์} - \text{โมลของ } \text{CO}_2 \text{ หลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{โมลของ } \text{CO}_2 \text{ ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์}} \times 100 \quad (3.2)$$

ค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจน (H_2 selectivity, %)

$$= \frac{\text{โมลของ } \text{H}_2 \text{ ที่เกิดจากปฏิกิริยา}}{\text{โมลของ } \text{H}_2 \text{ ใน } \text{CH}_4 \text{ ที่ใช้ในปฏิกิริยา}} \times 100 \quad (3.3)$$

ค่าการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO selectivity, %)

$$= \frac{\text{โมลของ } \text{CO} \text{ ที่เกิดจากปฏิกิริยา}}{\text{โมลของ } \text{C} \text{ ใน } \text{CH}_4 \text{ ที่ใช้ในปฏิกิริยา} + \text{โมลของ } \text{C} \text{ ใน } \text{CO}_2 \text{ ที่ใช้ในปฏิกิริยา}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} & \text{ผลผลิตของไฮโดรเจน (H}_2 \text{ yield, \%)} \\ & = \frac{(\% \text{CH}_4 \text{ conversion}) \times (\% \text{H}_2 \text{ selectivity})}{100} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} & \text{ผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO yield, \%)} \\ & = \frac{\Sigma(\% \text{CH}_4 \text{ \& CO}_2 \text{ conversion}) \times (\% \text{CO selectivity})}{100} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} & \text{ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์ (syngas yield, \%)} \\ & = (\% \text{H}_2 \text{ yield}) + (\% \text{CO yield}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} & \text{อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H}_2 \text{/CO molar ratio)} \\ & = \frac{\text{โมลของ H}_2 \text{ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา}}{\text{โมลของ CO ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

สำหรับค่าปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในระบบ สามารถคำนวณได้ในหน่วยของ W·s ต่อโมเลกุลของแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา ตามสมการ 3.9 หรือในหน่วยของ W·s ต่อโมเลกุลของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ตามสมการ 3.10

$$\text{ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ (E}_C \text{, W}\cdot\text{s/ molecule of reactant converted)} = \frac{P \times 60}{N \times M} \quad (3.9)$$

$$\text{ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ (E}_S \text{, W}\cdot\text{s/ molecule of syngas produced)} = \frac{P \times 60}{N \times M} \quad (3.10)$$

เมื่อ P = กำลังไฟฟ้า (power, W)

N = เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} molecule/mole

M = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สป้อน หรืออัตราการเกิดแก๊สสังเคราะห์ (mole/min)

ในสมการ 3.9 หรือ 3.10 ตามลำดับ

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

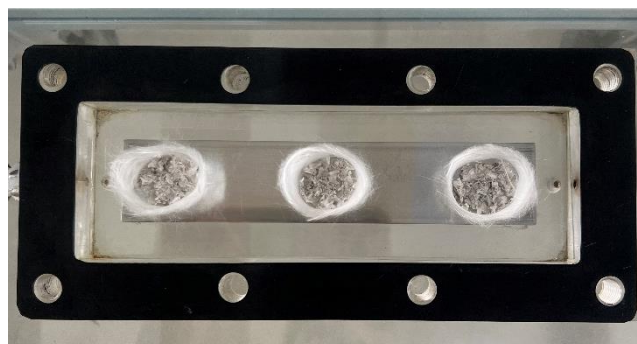
ในการศึกษาปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา มีรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษา	ช่วงที่ทำการศึกษา
ปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับซิลิกา	5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ชนิดของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา	- เส้นใยซิลิกา (silica fiber, SF) - เม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (silica porous, SP)
รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์	- บรรจุแบบบางส่วน (partial packing) - บรรจุแบบเต็ม (full packing)
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้	10, 13 และ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.11 ภายถ่ายรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา



รูปที่ 3.12 ภายถ่ายรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากปฏิกิริยาตรารายรีฟอร์มมิงของมีเทน โดยประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาภายใต้อุณหภูมิปกติและความดันบรรยากาศ ซึ่งการทดลองได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคโซล-เจล ร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง และการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (silica fiber, SF) และเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (silica porous, SP) ด้วยวิธีแช่จุ่มแบบเปียกพอดี้ในสารละลายนิกเกิลในเตรด จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาอบและเผาแคล์ไซน์ตามสภาวะที่กำหนด ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีเพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และรัศมีรูพรุนเฉลี่ย รวมถึงเพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาและยืนยันผลึกบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา (5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ชนิดของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (เส้นใยซิลิกาและเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน) รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา (บรรจุแบบบางส่วนและบรรจุแบบเต็ม) และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (10, 13 และ 15 กิโลโวลต์) ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของปฏิกิริยาตรารายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้สภาวะพลาสมาพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการทดสอบปฏิกิริยาตรารายรีฟอร์มมิงของมีเทนได้ควบคุมสภาวะการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 70:30 อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความถี่กระแสไฟฟ้าที่ 300 เฮิร์ตซ์ ตลอดการทดลอง ในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการ ได้มีการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (CH_4 & CO_2 conversion) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2 & CO selectivity) ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ (syngas yield) อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO molar ratio) ปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา (E_c) และพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น (E_s) ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) ก่อนการทดสอบปฏิกิริยาที่ปริมาณโพลดนิคเกิลแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน โดยตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเปล่า (SF) มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ $2.892 \text{ m}^2/\text{g}$ ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาจาก 5%Ni/SF เป็น 15%Ni/SF ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 15%Ni/SF มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงสุดเท่ากับ $28.104 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากลักษณะเฉพาะของเส้นใยซิลิกาที่เป็นวัสดุไม่มีรูพรุน (non-porous material) เพราะฉะนั้นการเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลจึงมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนพบว่าตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเปล่า (SP) มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ $258.685 \text{ m}^2/\text{g}$ และการเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลจาก 5%Ni/SP เป็น 15%Ni/SP ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มลดลงจาก $231.217 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $200.692 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของการโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการแช่จุ่มแบบเปียกพอดิของเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนในสารละลายนิกเกิลไนเตรต ทำให้เกิดการดูดซึมสารละลายเข้าไปในรูพรุนภายในเม็ดซิลิกาซึ่งจะเกิดเป็นผลกึ่งของนิกเกิลหลังจากการเผาแคลไซน์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณโพลดนิคเกิลที่เพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้บดบังในส่วนของพื้นที่ผิวภายในรูพรุนของซิลิกามากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน

ในส่วนผลของปริมาตรรูพรุนรวมและรัศมีรูพรุนเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดพบว่า เป็นไปตามทฤษฎีและมีแนวโน้มสอดคล้องกับพื้นที่ผิวจำเพาะดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยปริมาตรรูพรุนรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก $0.011 \text{ cm}^3/\text{g}$ เป็น $0.068 \text{ cm}^3/\text{g}$ เมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา อย่างไรก็ตามปริมาตรรูพรุนรวมมีแนวโน้มลดลงจาก $0.889 \text{ cm}^3/\text{g}$ เป็น $0.640 \text{ cm}^3/\text{g}$ เมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน สำหรับผลของรัศมีรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับทั้งสองชนิด

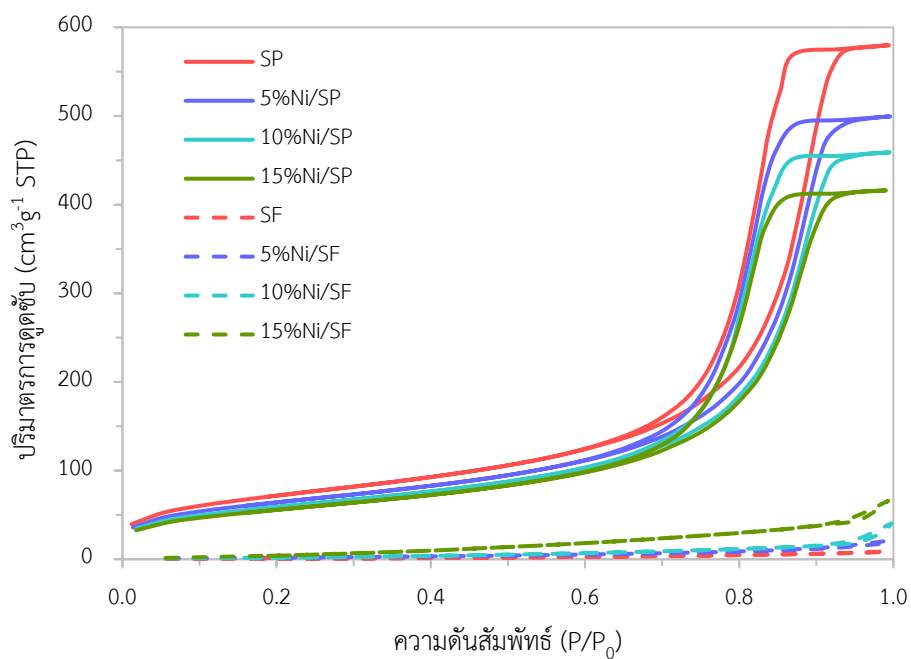
ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าดังเช่นในงานวิจัยของ Mhadmhan และคณะ [6] ที่ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาด้วยวิธีที่แตกต่างกันเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนสำหรับการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเปล่ามีพื้นที่ผิว

จำเพาะน้อยกว่าตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเปลือยอย่างมาก (5.9 และ 236.3 m²/g) เนื่องจากความไม่มีพรุนของเส้นใยซิลิกา และการไหลตุนิกเกลปริมาณ 10% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 9.9 m²/g มากไปกว่านั้นในงานวิจัยของ Ren และคณะ [48] ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาเชิงพาณิชย์สำหรับการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการไหลตุนิกเกลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาเชิงพาณิชย์ส่งผลให้สมบัติทางพื้นผิว (texture properties) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และรัศมีรูพรุนเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสะสมตัวของนิกเกลออกไซด์ (NiO) ภายในรูพรุนของตัวรองรับเม็ดซิลิกา เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [49] ที่ศึกษาการไหลตุนิกเกลปริมาณมากบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยอะลูมินาเชิงพาณิชย์สำหรับการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าการไหลตุนิกเกลเพิ่มขึ้นจาก 20% โดยน้ำหนัก เป็น 78% โดยน้ำหนักส่งผลให้สมบัติทางเนื้อสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มของการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนแสดงไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 (type IV isotherms) ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอร์มเฉพาะของวัสดุรูพรุนที่มีโครงสร้างแบบมีโซพอร์ส (mesoporous structure) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในช่วง 2-50 นาโนเมตร ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาแสดงแนวโน้มไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (linear isotherm) ไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอร์มเฉพาะของวัสดุไม่มีรูพรุน

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm ³ /g)	รัศมีรูพรุนเฉลี่ย (nm)
SF	2.892	0.011	1.447
5%Ni/SF	8.025	0.023	1.313
10%Ni/SF	8.504	0.029	1.188
15%Ni/SF	28.104	0.068	1.042
SP	258.685	0.889	5.328
5%Ni/SP	231.217	0.764	5.026
10%Ni/SP	211.928	0.702	4.850
15%Ni/SP	200.692	0.640	4.582



รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเปล่า (SF) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 50,000 เท่า พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาเปล่ามีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว ไม่มีรูพรุนและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร และสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนที่กำลังขยาย 50,000 เท่า โดยเมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีปริมาณโพลดนิคเกิลแตกต่างกันบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (5%Ni/SF, 10%Ni/SF และ 15%Ni/SF) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าบนผิวตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีผลึก NiO ขนาดเล็กเคลือบเกาะอยู่ (<100 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาเทียบกับแถบวัดในภาพถ่าย SEM) ผลึกดังกล่าวเกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการเผาเคลือบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการแช่จุ่มในสารละลายนิกเกิลไนเตรด ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าผลึก NiO บนผิวเส้นใยซิลิกาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SF มีขนาดเล็กมาก สังเกตได้ยากที่กำลังขยาย 50,000 เท่า และมีการกระจายตัวทั่วผิวเส้นใยซิลิกา นอกจากนี้ยังพบผลึก NiO ที่มีขนาดใหญ่ปะปนเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 4.3(ก) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF มีขนาดผลึก NiO ที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SF และมีการกระจายตัวทั่วผิวเส้นใยซิลิกาเช่นกันแสดงดังรูปที่ 4.3(ข) มากไปกว่านั้นสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 15%Ni/SF สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงการก่อตัวของผลึก NiO บนผิวเส้นใยซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเกาะกลุ่ม (agglomeration) ในบางบริเวณแสดงดังรูปที่ 4.3(ค) เพราะฉะนั้นจึงสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาจาก 5% เป็น 10% และ 15% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ผลึก NiO ที่กระจายตัวเคลือบเกาะบนผิวของเส้นใยซิลิกามีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีโอกาสในการเกาะตัวสะสมกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น สำหรับลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวรองรับเม็ดซิลิกามีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และจะเห็นได้ว่าบนพื้นผิวดังกล่าวมีลักษณะคล้ายเม็ดผลึก NiO เล็กๆ กระจายตัวเคลือบเกาะบนผิวเม็ดซิลิกา ซึ่งในบางบริเวณคาดว่าผลึก NiO ดังกล่าวอาจเคลือบปิดบริเวณปากรูพรุนของตัวรองรับได้ ทั้งนี้ลักษณะทางกายภาพของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงของเส้นใยซิลิกาและเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนนั้นมีผลทำให้เกิดการเคลือบเกาะของผลึก NiO บนผิวดังกล่าวที่แตกต่างกันตามไปด้วย มากไปกว่านั้นปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดได้รับการตรวจสอบและยืนยันผลด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ (EDS) แสดงผลไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณนิกเกิลมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณตามทฤษฎี โดยปริมาณนิกเกิลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 5% และ 10% มีค่าต่ำกว่าที่ต้องการเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่สารละลายนิกเกิลอาจติดภาชนะบรรจุระหว่างกระบวนการแช่จุ่มหรือระหว่างการระเหยแห้ง แต่อย่างไรก็

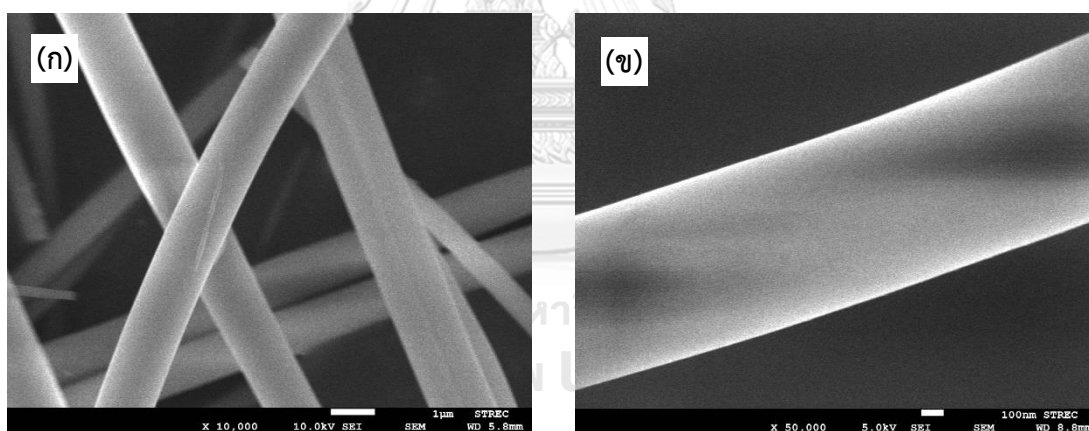
ตามจากการวิเคราะห์ผลดังที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดมีผลึก NiO เคลือบเกาะบนผิวของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลและขนาดอนุภาค NiO บนตัวเร่งปฏิกิริยา

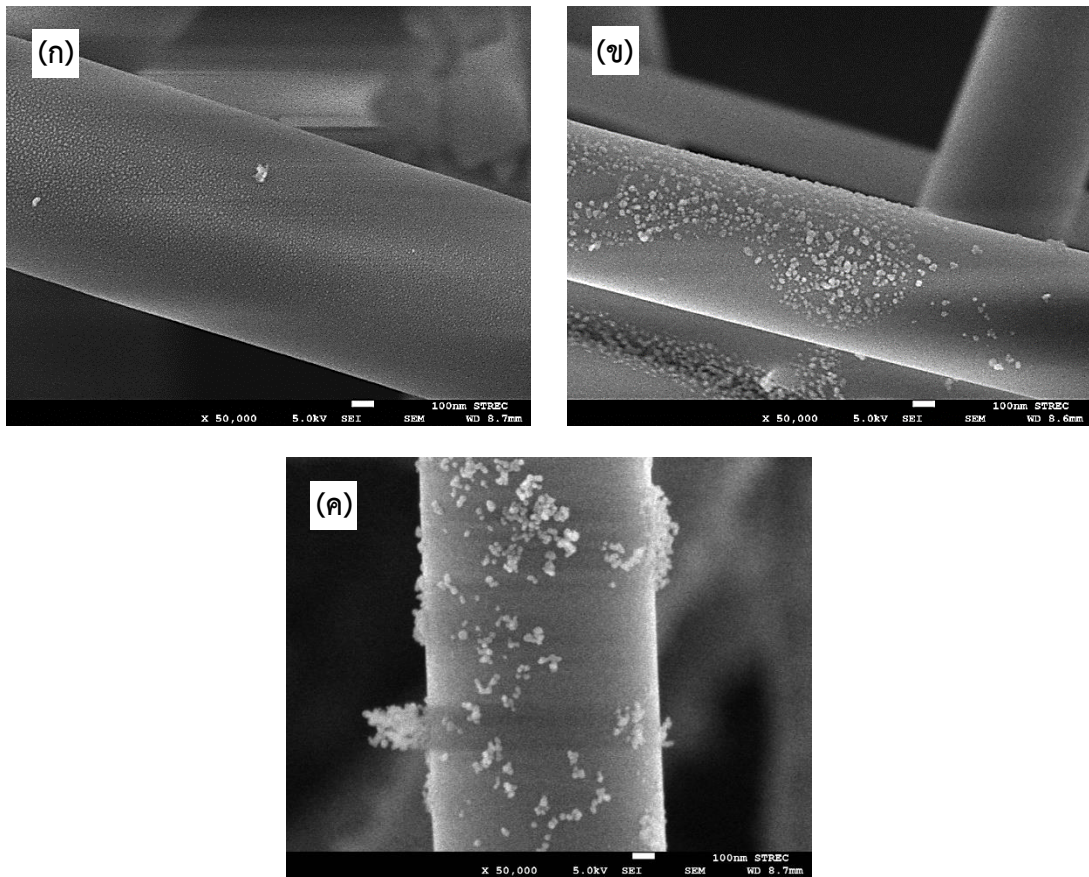
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณนิกเกิล (wt%) ^ก	ขนาดอนุภาค NiO (nm) ^ข
5%Ni/SF	3.02	24.55
10%Ni/SF	7.64	27.50
15%Ni/SF	17.38	32.12
5%Ni/SP	1.94	25.74
10%Ni/SP	-	27.04
15%Ni/SP	-	29.25

^ก ปริมาณนิกเกิลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

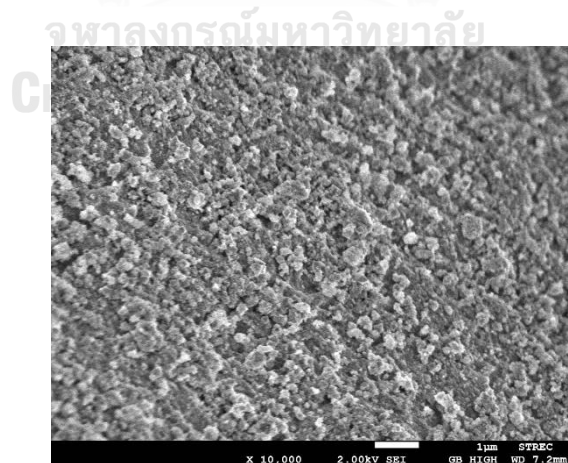
^ข ขนาดอนุภาคนิกเกิลเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเปล่า ที่กำลังขยาย (ก) 10,000 เท่า และ (ข) 50,000 เท่า



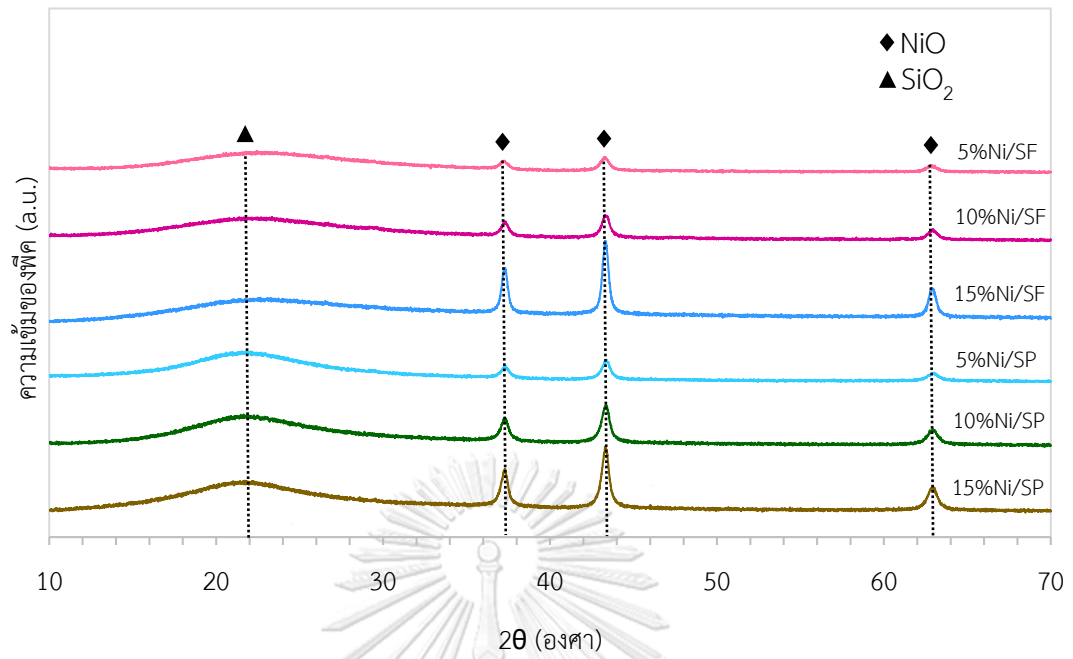
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (ก) 5%Ni/SF (ข) 10%Ni/SF และ (ค) 15%Ni/SF



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและโครงสร้างผลึก

รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) ก่อนการทดสอบปฏิกิริยา ซึ่งได้แสดงผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และความเข้มของพิก (peak intensity) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดมีลักษณะเหมือนกัน โดยตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 22 องศา ซึ่งมีลักษณะของพิกที่กว้าง (broad peak) แสดงถึงโครงสร้างผลึกของซิลิกาแบบอสัณฐาน (amorphous SiO_2) พบได้ทั้งในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเชิงพาณิชย์ ในขณะที่เดียวกันตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 37, 43 และ 63 องศา ซึ่งมีลักษณะของพิกที่แหลม (sharp peak) แสดงถึงโครงสร้างผลึก NiO บนผิวตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดซึ่งถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการแช่จุ่มแบบเปียกพอดิ ด้วยเหตุนี้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถสนับสนุนการผลวิเคราะห์ก่อนหน้านี้และยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ทุกชนิดมีผลึก NiO เคลือบเกาะอยู่บนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา [50, 51] มากไปกว่านั้นยังพบว่าความเข้มของพิกที่แสดงผลึก NiO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาและตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าการโพลดนิคเกิลที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายตัวของปริมาณผลึก NiO บนผิวตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด นอกจากนี้เมื่อคำนวณขนาดอนุภาคของผลึก NiO โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ซึ่งพิจารณาพิก NiO ที่ระนาบ (200) ตำแหน่ง 43 องศา โดยได้แสดงค่าไว้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีขนาดอนุภาค NiO ในช่วง 24.55–32.12 นาโนเมตร และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนมีขนาดอนุภาค NiO ในช่วง 25.74–29.25 นาโนเมตร ทั้งนี้อนุภาค NiO มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาปริมาณโพลดนิคเกิลที่เท่ากันบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดพบว่าอนุภาค NiO บนผิวตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใกล้เคียงกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SF และ 5%Ni/SP มีขนาดอนุภาค NiO เท่ากับ 24.55 และ 25.74 นาโนเมตร ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP มีขนาดอนุภาค NiO เท่ากับ 27.50 และ 27.40 นาโนเมตร ตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยา 15%Ni/SF และ 15%Ni/SP มีขนาดอนุภาค NiO เท่ากับ 32.12 และ 29.25 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP)

4.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมาด้วยเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิล (Ni-based catalyst) ในสภาวะความดันและอุณหภูมิปกติ เพื่อศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนนั้น ได้กำหนดสภาวะควบคุมที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 70:30 อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความถี่กระแสไฟฟ้าที่ 300 เฮิร์ตซ์ ตลอดการทดลอง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณโพลินิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

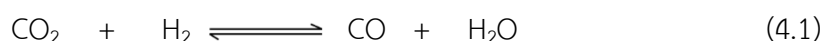
ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลินิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) สำหรับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วน (partial packing) ในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ดังรูปที่ 3.11 ที่มีปริมาณโพลินิกเกิลบนตัวรองรับแตกต่างกัน คือ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น แสดงผลดังรูปที่ 4.6 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการมีทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่ 0%Ni/SF, 5%Ni/SF, 10%Ni/SF, 15%Ni/SF, 0%Ni/SP, 5%Ni/SP, 10%Ni/SP และ 15Ni/SP รวมไปถึงได้มีการพิจารณาเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้ว (glass wool) ซึ่งใช้เป็นวัสดุช่วยในการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาและสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดียว (only plasma) หรือสภาวะที่ไม่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (without catalyst) นอกจากนี้ได้ควบคุมสภาวะการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 70:30 อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 13 กิโลโวลต์ ความถี่กระแสไฟฟ้า 300 เฮิร์ตซ์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.012 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ 0.200 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP

จากรูปที่ 4.6(ก) แสดงประสิทธิภาพของกระบวนการในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบไปด้วยกราฟด้านบนที่แสดงอิทธิพลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF ที่มีปริมาณโพลินิกเกิล 0%Ni/SF, 5%Ni/SF, 10%Ni/SF และ 15%Ni/SF และกราฟด้านล่างที่แสดงอิทธิพลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ที่มีปริมาณโพลินิกเกิล 0%Ni/SP, 5%Ni/SP, 10%Ni/SP และ 15Ni/SP พบว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมีค่ามากกว่าค่าคอนเวอร์ชัน

ของคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการแตกพันธะ (bond dissociation energy, BDE) ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการแตกพันธะของมีเทน ($\text{CH}_3\text{—H}$) เท่ากับ 4.55 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่าพลังงานที่ใช้ในการแตกพันธะของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO—O) เท่ากับ 5.52 อิเล็กตรอนโวลต์ [34] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีเทนมีความสามารถในการแตกตัวและเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเส้นใยแก้วซึ่งเป็นวัสดุช่วยในการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาเทียบกับสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดียว พบว่าการบรรจุเส้นใยแก้วให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทน (6.00%) มากกว่าการใช้พลาสมาอย่างเดียว (5.25%) เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการบรรจุเส้นใยแก้ว (4.73%) และการใช้พลาสมาเพียงอย่างเดียว (4.37%) ไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF ร่วมกับการใช้พลาสมาสำหรับทุกสภาวะให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าสภาวะการบรรจุเส้นใยแก้วและการใช้พลาสมาอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาจาก 0%Ni/SF เป็น 5%Ni/SF และ 10%Ni/SF ตามลำดับ มีผลทำให้แนวโน้มค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณโพลติคเกิลเป็น 15%Ni/SF ส่งผลให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเพียงเล็กน้อย โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วนร่วมกับการใช้พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 9.12% และ 8.29% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกาเดียวกัน สำหรับผลของปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ร่วมกับการใช้พลาสมาสำหรับทุกสภาวะให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าสภาวะการบรรจุเส้นใยแก้วและการใช้พลาสมาอย่างเดียว เช่นเดียวกันกับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF ร่วมกับการใช้พลาสมา และเมื่อทำการโพลติคเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนพบว่าการเพิ่มปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนจาก 0%Ni/SP เป็น 5%Ni/SP ส่งผลให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณโพลติคเกิลเป็น 10%Ni/SP และ 15%Ni/SP ตามลำดับ ส่งผลให้แนวโน้มค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP แบบบางส่วนร่วมกับการใช้พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 8.10% และ 6.27% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเดียวกัน ทั้งนี้สามารถ

กล่าวโดยรวมได้ว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบบางส่วนร่วมกับการใช้พลาสมา ในสภาวะความดันและอุณหภูมิปกติ ให้ผลเชิงบวกต่อกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยา (plasma-catalyst interaction) ที่เสริมการทำงานระหว่างกัน รวมถึงบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของกระบวนการที่เป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้สูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิลบนตัวรองรับประเภทซิลิกายังสามารถช่วยการแตกตัวของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนและเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา (reaction pathways) กำหนดเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาใหม่ที่ยั่งยืนเพื่อลดปริมาณผลิตภัณฑ์พลอยได้ (byproduct) ที่ไม่ต้องการและเพิ่มอัตราการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu และ Whitehead [38] และ Zeng และคณะ [44] ที่ศึกษาปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาฐานนิกเกิล รวมถึงงานวิจัยของ Zhu และคณะ [41] ที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (Ni/ γ -Al₂O₃) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการรีฟอร์มมิงแก๊สชีวภาพที่ประกอบด้วยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดประกายไฟฟ้าร้อนแบบหมุนได้ งานวิจัยเหล่านี้รายงานว่าการใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยสนับสนุนการเปลี่ยนรูปของสารตั้งต้นเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทน ส่งผลให้การคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้พลาสมาเพียงอย่างเดียวหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเพียงอย่างเดียว และค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมีค่าสูงกว่าค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์เสมอภายใต้การดำเนินปฏิกิริยาโดยใช้พลาสมา อย่างไรก็ตามสำหรับการเร่งปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยความร้อนทั่วไปอาจให้ค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของการเปลี่ยนน้ำไปเป็นแก๊ส (reverse water gas shift reaction, RWGS) ดังสมการที่ 4.1 และเมื่อวิเคราะห์สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยานี้ยังพบว่า การเปลี่ยนรูปเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าและให้ค่าคอนเวอร์ชันที่สูงกว่าโมเลกุลของมีเทน [11]

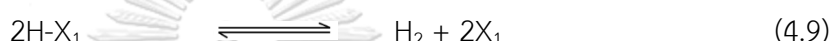
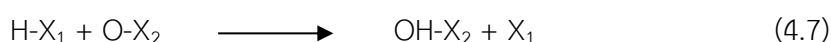
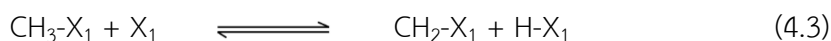
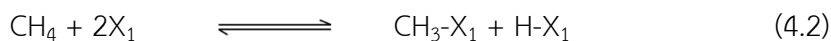


มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน คือ เส้นใยซิลิกาและเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน (เปรียบเทียบที่ปริมาณโพลนิกเกิลเท่ากัน) พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา

Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมากกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ในทุกสภาวะการทดลอง ยกเว้นการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SF และ 5%Ni/SP ที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนใกล้เคียงกัน คือ 8.09% และ 8.10% ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ในทุกสภาวะการทดลอง ยกเว้นการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF (5.61%) ที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SP (5.77%) เพียงเล็กน้อย ผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF สามารถปรับปรุงค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมาได้ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเหมาะสมทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยตัวรองรับเส้นใยซิลิกา โดยในงานวิจัยของ Mhadmhan และคณะ [6] ที่ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ และงานวิจัยของ Pramongthum และคณะ [51] ที่ศึกษาการผลิตร่วมของแก๊สไฮโดรเจนและท่อานาโนคาร์บอนบนเส้นใยซิลิกา (carbon nanotube silica fiber, CNT-SF) จากกระบวนการรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำ ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา ได้รายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่สูง เนื่องจากธรรมชาติของตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่ไม่มีรูพรุนและโครงสร้างแบบเปิดของเส้นใยซิลิกาที่มีโลหะนิกเกิล (Ni) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกัมมันต์ กระจายตัวและเคลือบเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้สารตั้งต้นสามารถเข้าถึงตำแหน่งของโลหะนิกเกิลแล้วเปลี่ยนรูปเกิดผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวล (mass transfer) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Wen และคณะ [7] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเส้นใยนาโนซิลิกาที่ปกคลุมด้วยโลหะนิกเกิลจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อใช้สำหรับกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทน พบว่าการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดีขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้งานพบว่าการสะสมของคาร์บอนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาเชิงพาณิชย์ มากไปกว่านั้นจากการสังเกตลักษณะพื้นผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาด้วยตาเปล่าหลังทำการทดลองพบว่าบริเวณการดีสชาร์จของพลาสมาเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมามีพื้นที่มากกว่าและคาดว่ามีพฤติกรรมการดีสชาร์จที่ดีกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ทั้งนี้สามารถอนุมานได้ว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันส่งผลต่อพฤติกรรมการดีสชาร์จของพลาสมาที่เกิดขึ้นด้วย

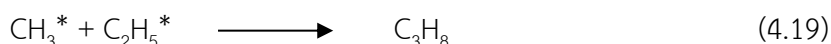
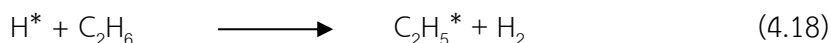
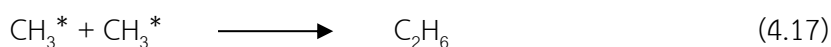
ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังรูปที่ 4.6(ข) พบว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับสภาวะที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาและเส้นใยแก้วแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาให้ค่าต่ำกว่าสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดียวยิ่งให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน 57.01% และค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ 58.25% ทั้งนี้คาดว่าอาจเป็นผลมาจากการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นผ่านปฏิกิริยาข้างเคียง อาทิเช่น อีเทน (C_2H_6) เอทิลีน (C_2H_4) โพรเพน (C_3H_8) โพรพีน (C_3H_6) และคาร์บอน (C) หรือโค้ก ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Tu และคณะ [38] Zeng และคณะ [44] และ Suttikul และคณะ [52] แต่อย่างไรก็ตามการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนสูงกว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ ตรงกันข้ามกับสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดียวยังและสภาวะการบรรจุเส้นใยแก้วแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาปริมาณโพลีเมอร์เคลือบตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนสูงสุด (53.79%) และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF ให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด (43.89%) ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาปริมาณโพลีเมอร์เคลือบตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 15%Ni/SP ให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด 51.91% และ 45.49% ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโพลีเมอร์เคลือบตัวรองรับประเภทซิลิกา (Ni/SF และ Ni/SP) ร่วมกับการใช้พลาสมา มีความจำเพาะต่อการผลิตไฮโดรเจนมากกว่า เพราะฉะนั้นจึงสามารถเพิ่มอัตราการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนให้สูงกว่าอัตราการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการมีอยู่ของอนุภาคโพลีเมอร์เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลมีเทนที่เป็นแหล่งของไฮโดรเจนอะตอมเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนสำหรับกระบวนการตรึงไนโตรเจนของมีเทน โดยในงานวิจัยของ Rahemi และคณะ [53] ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาตรึงไนโตรเจนของมีเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยอะลูมินา-เซอร์โคเนีย ($Ni/Al_2O_3-ZrO_2$) ว่า โมเลกุลมีเทนสามารถถูกดูดซับและถูกกระตุ้นบนอนุภาคนิกเกิลได้ง่าย โดยการแตกตัวของโมเลกุลมีเทนบนอนุภาคนิกเกิลทำให้เกิดสารประกอบนิกเกิลไฮไดรด์ (NiH) และสปีชีส์นิกเกิล-ไฮโดรคาร์บอน ($Ni-CH_x$ species) ดังสมการที่ 4.2 ขณะเดียวกันสปีชีส์ $Ni-CH_x$ จะแตกตัวและค่อยๆ สูญเสียไฮโดรเจนอะตอม (H) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ได้จากการคายซับของไฮโดรเจนอะตอมจากสารประกอบ NiH ดังสมการที่ 4.9 สำหรับโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับและเกิดการแตกตัวให้

คาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณตำแหน่งตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมินา-เซอร์โคเนียม ดังสมการที่ 4.5 และ 4.10 ตามลำดับ



นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Diao และคณะ [54] ได้อธิบายเกี่ยวกับปฏิกิริยาเบื้องต้นที่เป็นไปได้ของการผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จากปฏิกิริยาตรารายรีฟอร์มมิงของมีเทนในระบบพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนว่า เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของโมเลกุลมีเทนในระบบพลาสมาค่อนข้างหลากหลายและซับซ้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเฟสแก๊ส เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) (CH_4^*) ที่ชนกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง (e) ในพลาสมาเพื่อสร้างเรดิคัลไฮโดรคาร์บอน (CH_x radical) ที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ 4.11-4.13 มากไปกว่านั้นจะเห็นได้ว่าการแตกตัวของมีเทนอาจก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอน (C) ที่ไม่ต้องการได้ ดังสมการที่ 4.14-4.15 และการรวมตัวของเรดิคัลไฮโดรคาร์บอนสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ดังสมการที่ 4.16-4.19 ในส่วนของเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับระบบพลาสมาในเฟสแก๊ส พบว่าการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์จากการกระตุ้นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในระบบพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนและสามารถถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนไปสู่โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึง 97% ดังสมการที่ 4.20-4.21



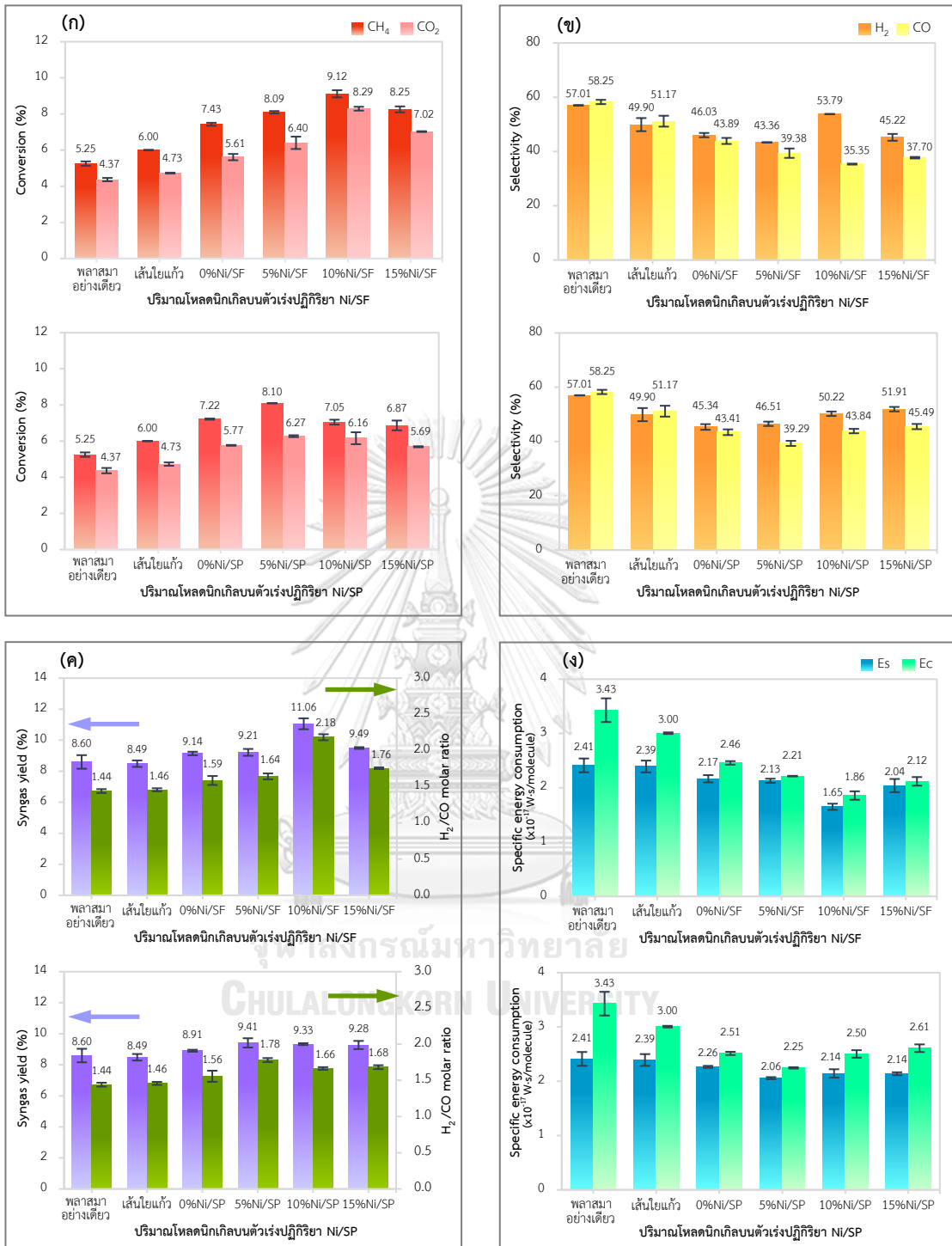


จากรูปที่ 4.6(ค) แสดงประสิทธิภาพของกระบวนการในเทอมของผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์สำหรับสภาวะที่มีการบรรจุเส้นใยแก้วบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา (8.49%) ให้ค่าใกล้เคียงกับสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดี่ยว (8.60%) และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมามีผลทำให้ค่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ซึ่งให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดในกระบวนการเท่ากับ 11.06% ในส่วนของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ที่มีปริมาณโพลติกเกิดแตกต่างกันบนตัวรองรับเม็ดซิลิกา พบว่าให้ค่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกันในช่วง 8.91-9.41% ซึ่งการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP ให้ค่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดเท่ากับ 9.41% ในส่วนผลของอิทธิพลของปริมาณโพลติกเกิดบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาต่ออัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกามีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดเป็น 10%Ni/SF ขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดเป็น 15%Ni/SF มีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง สำหรับการเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดบนตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดจาก 0%Ni/SP เป็น 5%Ni/SP มีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณโพลติกเกิดเป็น 10%Ni/SP และ 15%Ni/SP ตามลำดับ มีผลทำให้แนวโน้มของอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ซึ่งผลที่ได้นี้มีผลสอดคล้องกับค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลของปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบ ดังรูปที่ 4.6(ง) พบว่าการบรรจุเส้นใยแก้วบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมามีผลทำให้ค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบ

ลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดี่ยว ซึ่งสามารถสังเกตแนวโน้มได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น และเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบบางส่วนร่วมกับการใช้พลาสมา ยิ่งทำให้ปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบมีค่าลดลง โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ให้ค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 1.86×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP ให้ค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่ำที่สุดเท่ากับ 2.06×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับที่สภาวะการใช้ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกัน ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา รูปแบบการบรรจุ และพฤติกรรมการดีสชาร์จของพลาสมาส่งผลต่อความหนาแน่นและพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า ซึ่งการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถปรับปรุงการใช้พลังงานในระบบได้เมื่อเทียบกับการไม่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ ดังเช่นในงานวิจัยของ Ray และคณะ [55]

ผลที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลีเมอร์เคลือบตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาสามารถสรุปได้ว่า การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการศึกษาสำหรับอิทธิพลนี้ ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน และผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาสามารถลดปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการทดลองอื่น ด้วยเหตุนี้ผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกนำตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ไปขยายผลและศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ที่ได้แสดงผลการอภิปรายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาและตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนสำหรับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็ม (full packing) ในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ดังรูปที่ 3.12 โดยควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.036 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ 0.600 กรัม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 70:30 อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 13 กิโลโวลต์ และความถี่กระแสไฟฟ้า 300 เฮิร์ตซ์ แสดงผลดังรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ดังรูปที่ 4.7(ก) แสดงให้เห็นว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมากกว่าค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกสภาวะการทดลอง และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบเต็มร่วมกับการใช้พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าสภาวะการบรรจุเส้นใยแก้วและการใช้พลาสมาอย่างเดียว ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาดังที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.2.1 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF แบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าการเพิ่มปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาจาก 0%Ni/SF เป็น 5%Ni/SF และ 10%Ni/SF ตามลำดับ มีผลทำให้แนวโน้มค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดิกเกลเป็น 15%Ni/SF มีผลทำให้แนวโน้มดังกล่าวลดลง โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบเต็มร่วมกับการใช้พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 7.61% และ 6.41% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกาเดียวกัน ในส่วนผลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP แบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าการเพิ่มปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนจาก 0%Ni/SP เป็น 5%Ni/SP มีผลทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณโพลดิกเกลเป็น 10%Ni/SP และ 15%Ni/SP ตามลำดับ มีผลทำให้แนวโน้มดังกล่าวลดลง โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP แบบเต็มร่วมกับการใช้พลาสมาให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 6.85% และ 6.07% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลสำหรับอิทธิพลของปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มเปรียบเทียบกับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ชี้ให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มปริมาณโพลดิกเกลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการ

บรรจุแบบเต็มและแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแสดงแนวโน้มค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่คล้ายคลึงกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโพลีเมติกิลเท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับตัวเส้นใยซิลิกา และ 5% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นที่สูงที่สุดเช่นเดียวกันด้วย นอกจากนี้การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมายังให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในทุกสภาวะการทดลอง ตัวอย่างเช่น การบรรจุตัวเร่ง 10%Ni/SF แบบเต็มให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทน 7.64% และค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ 6.41% ขณะเดียวกันการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วนซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนสูงถึง 9.12% และค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 8.29% เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลของรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันมีผลต่อค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นมากกว่าอิทธิพลของปริมาณโพลีเมติกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่ต่างกัน และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนให้ผลเชิงบวกต่อกระบวนการที่มากกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา โดยคาดว่าจะมีสาเหตุหลักมาจากการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ซึ่งทำให้พื้นที่การดีสซาร์จของพลาสมาบนผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าลดลงและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของการเกิดพลาสมา โดยการลดพื้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีผลทำให้สนามไฟฟ้า (electric field) มีความแรงลดลงและลดความหนาแน่นของการเกิดดีสซาร์จในบริเวณโซนพลาสมา ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงกับโมเลกุลของสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนรูปเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเสถียร ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Ray และคณะ [56] ที่ศึกษาการใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-แมงกานีสบนตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา (Ni-Mn/ γ -Al₂O₃) สำหรับกระบวนการดรายรีฟอร์มมิงของมีเทนในส่วนอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในพื้นที่การดีสซาร์จของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ซึ่งได้รายงานว่า การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 25% ของพื้นที่การดีสซาร์จแสดงค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 50% และ 100% ของพื้นที่การดีสซาร์จ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการก่อดิวของไมโครดีสซาร์จภายในโซนพลาสมาถูกจำกัดอย่างมากเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มพื้นที่ ในขณะที่เดียวกันการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 25% ของพื้นที่การดีสซาร์จทำให้มีการกระจายตัวของไมโครดีสซาร์จที่ตื้นและมีพื้นที่การเกิดดีสซาร์จที่เพิ่มขึ้น มากไปกว่านั้นในงานวิจัยของ Tu และคณะ [38] ได้รายงานว่า การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดโคเอกเซียลไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสซาร์จสามารถรักษาอันตรกิริยาระหว่างพลาสมาและตัวเร่งปฏิกิริยาที่แข็งแรงได้ และสัญญาณไฟฟ้า (electrical signals) ที่แสดงการดีสซาร์จของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนมีลักษณะ

คล้ายคลึงกันกับสัญญาณไฟฟ้าของสถานะที่ไม่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา นั้นหมายความว่าความแข็งแรงของการเกิดไมโครดีสซาร์จไม่เปลี่ยนแปลงแม้จะมีการรบกวนจากการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

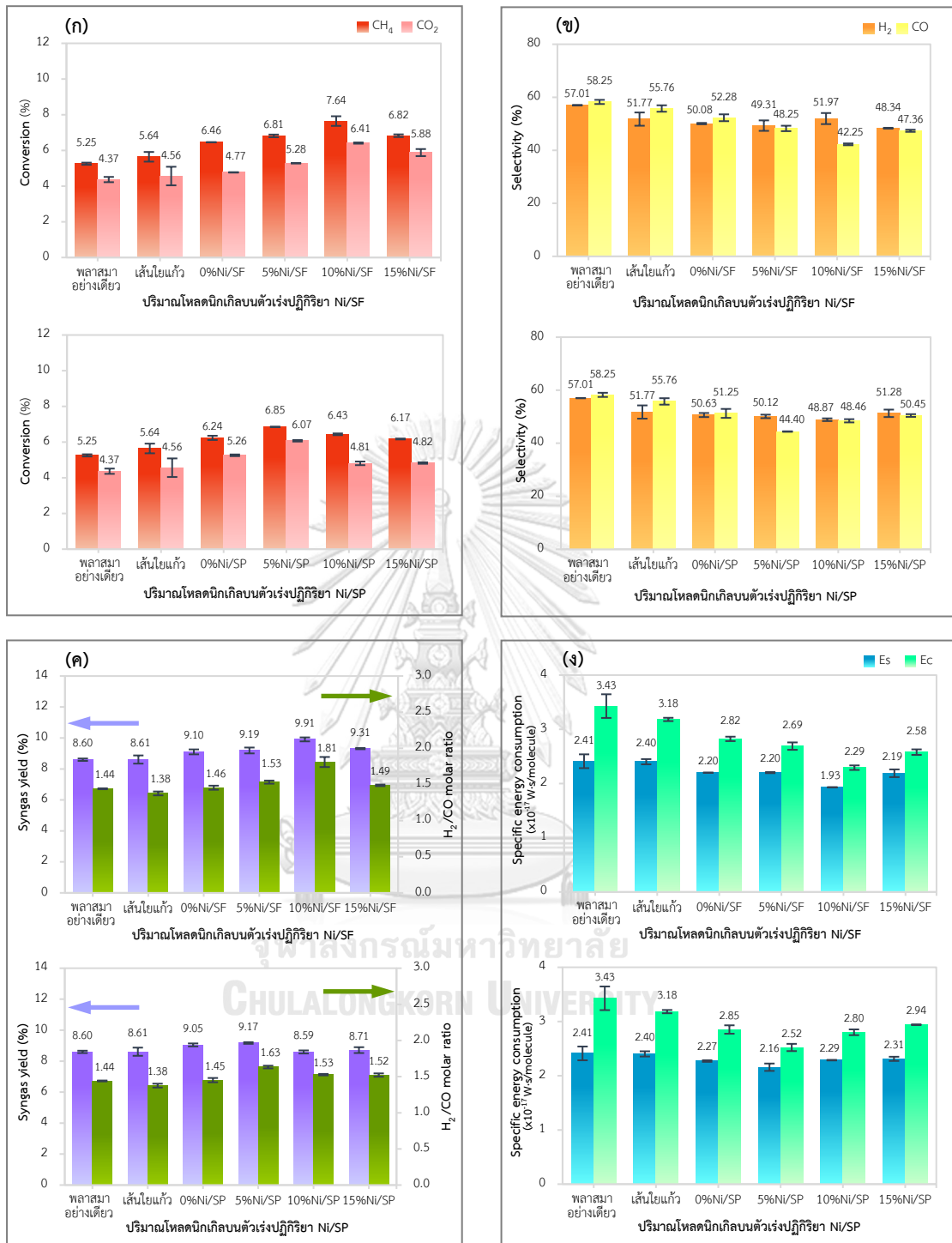
ส่วนรูปที่ 4.7(ข) แสดงค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา พบว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในทุกสถานะการทดลองแสดงค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วง 48.34-51.97% และ 42.25-52.28% ตามลำดับ เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกาแบบเต็ม และในช่วง 48.87-51.28% และ 44.40-51.25% ตามลำดับ เมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนแบบเต็ม ผลที่ได้ดังกล่าวมีความสอดคล้องกันกับค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สถานะการบรรจุแบบบางส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ยังคงให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่สูงสุด (51.97%) และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF ยังคงให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงสุด (52.28%) เมื่อเทียบกับสถานะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบเต็มที่มีปริมาณโพลดนิคเกิลแตกต่างกัน มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มและการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ซึ่งให้เห็นว่ารูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันมีผลต่อค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามยังคงแสดงแนวโน้มค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเปล่า (0%Ni/SF และ 0%Ni/SP) ที่มีการบรรจุแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา แสดงค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนในทางกลับกันการบรรจุตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเปล่าแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแสดงค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่สูงกว่าค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าการบรรจุของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นในพื้นที่ดีสซาร์จพลาสมาให้ผลเชิงลบต่อการสร้างสปีชีส์ว่องไวที่จำเพาะในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน ขณะเดียวกันมีผลต่อการเสริมกันเชิงบวกต่อการสร้างสปีชีส์ว่องไวที่จำเพาะในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์

นอกจากนี้รูปที่ 4.7(ค) แสดงผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาแบบเต็มให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงกว่าการบรรจุเส้นใยแก้วแบบเต็มและการใช้พลาสมาอย่างเดียว นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณโพลดนิคเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาและเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน พบว่ามีผลทำให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น รวมถึงทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งได้แสดงแนวโน้มของประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา

เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาและเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนเมื่อทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ทั้งนี้การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 9.91% เมื่อทำการไหลดุนิกเกิลที่ 10% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา และสูงสุดเท่ากับ 9.17% เมื่อทำการไหลดุนิกเกิลที่ 5% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบสภาวะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ยังคงพบว่ารูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนให้ผลเชิงบวกต่อกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนที่มากกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา สอดคล้องกับการศึกษาในงานวิจัยของ Ray และ คณะ [56]

และเมื่อพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติพลังงานที่ใช้ในระบบ ดังรูปที่ 4.7(ง) พบว่าแนวโน้มของปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบสำหรับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา คล้ายคลึงกันกับแนวโน้มของปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบสำหรับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ให้ค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่ำสุดเท่ากับ 1.93×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา และเท่ากับ 2.29×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบที่สภาวะการใช้ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาเดียวกัน นอกจากนี้สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP ให้ค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่ำสุดเท่ากับ 2.16×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา และเท่ากับ 2.52×10^{-17} วัตต์·วินาทีต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น

เพราะฉะนั้นจึงกล่าวโดยสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนสำหรับการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไหลดุนิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และยังพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการเมื่อควบคุมสภาวะการทดลองเดียวกัน สำหรับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเต็มให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วน (การบรรจุแบบเต็มแสดงการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนอย่างเห็นได้ชัด) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนให้ผลเชิงบวกที่มากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณไหลดุนิกเกิลเท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณโพลติคเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเติมในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา และพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น

4.2.3 อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้

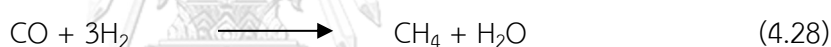
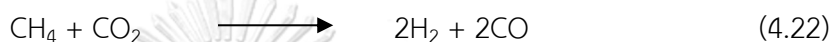
ในส่วนผลการศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้การใช้พลาสมาพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมและปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่หน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 3 ค่า คือ 10, 13 และ 15 กิโลโวลต์ เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้างกล่าวเป็นค่าที่สามารถทำให้เกิดพลาสมาได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอตลอดการทดลองสำหรับทุกสถานะการทดลอง นอกจากนี้ยังได้กำหนดสถานะการศึกษาภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโพลนิกเกิลเท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (10%Ni/SF) และมีรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ ที่ควบคุมสถานะการทดลองให้คงที่ที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 70:30 อัตราการไหลรวมของแก๊สป้อน 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที และความถี่กระแสไฟฟ้า 300 เฮิร์ตซ์ โดยสถานะการทดลองดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา อิทธิพลของชนิดตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา และอิทธิพลของรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้าในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 มากไปกว่านั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบผลกับการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SP, 0%Ni/SF และ 0%Ni/SP แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่สถานะการทดลองเดียวกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8(ก) แสดงอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมีค่ามากกว่าค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกสถานะการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทางทฤษฎีของพลังงานที่ใช้ในการแตกพันธะของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SP และ 10%Ni/SP ส่งผลทำให้มีค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF และ 10%Ni/SF ตามลำดับ ยกเว้นการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SP ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 13 กิโลโวลต์ ที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันเฉพาะของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF เพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ยังคงแสดงประสิทธิภาพของกระบวนการในเทอมของค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นที่ดีที่สุดในการทดลอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ พบว่าภายใต้การพิจารณาการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ มีผลทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น

15 กิโลโวลต์ จะมีผลทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 3.23% เป็น 9.12% และ 1.62% เป็น 8.29% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ ในขณะที่เดียวกันค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 9.12% เป็น 10.04% และ 8.29% เป็น 9.27% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น 15 กิโลโวลต์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้ามูลทำให้ความแรงของสนามไฟฟ้าที่เกิดในโซนพลาสมามีค่าสูงขึ้น ซึ่งความแรงของสนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอน นั่นหมายความว่า การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงยิ่งขึ้นอีกนั้นนอกจากจะเพิ่มพลังงานเฉลี่ยและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนแล้ว ยังมีผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโซนพลาสมาด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โมเลกุลของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการมีโอกาสนในการชนกันกับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงและเกิดการแตกตัวเป็นสปีชีส์ที่มีความว่องไวมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้จากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น 15 กิโลโวลต์ ส่งผลให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยนั้น คาดว่าอาจเป็นผลมาจากการการสะสมตัวของโค้กที่เพิ่มขึ้นในบริเวณผิวแผ่นขั้วไฟฟ้าคู่ขนานเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ในขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นขั้วไฟฟ้าหลังการทดสอบปฏิกิริยา โดยการสะสมของโค้กนี้มีส่วนสำคัญในการรบกวนและขัดขวางการเกิดดีสชาร์จของพลาสมา ส่งผลทำให้พฤติกรรมที่ดีสชาร์จที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและมีความเสถียรของดีสชาร์จที่ต่ำลง ทั้งนี้แนวโน้มค่าคอนเวอร์ชันที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Song และคณะ [57] และ Suttikul และคณะ [43] ที่ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดีสชาร์จ โดยงานวิจัยเหล่านี้รายงานว่าค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้วไฟฟ้าภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ขณะเดียวกันค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลต่อการสะสมของโค้กบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ แสดงดังรูปที่ 4.8(ข) พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามูลต่อค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ ส่งผลทำให้แนวโน้มค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น 15 กิโลโวลต์ ส่งผลทำให้แนวโน้มค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น

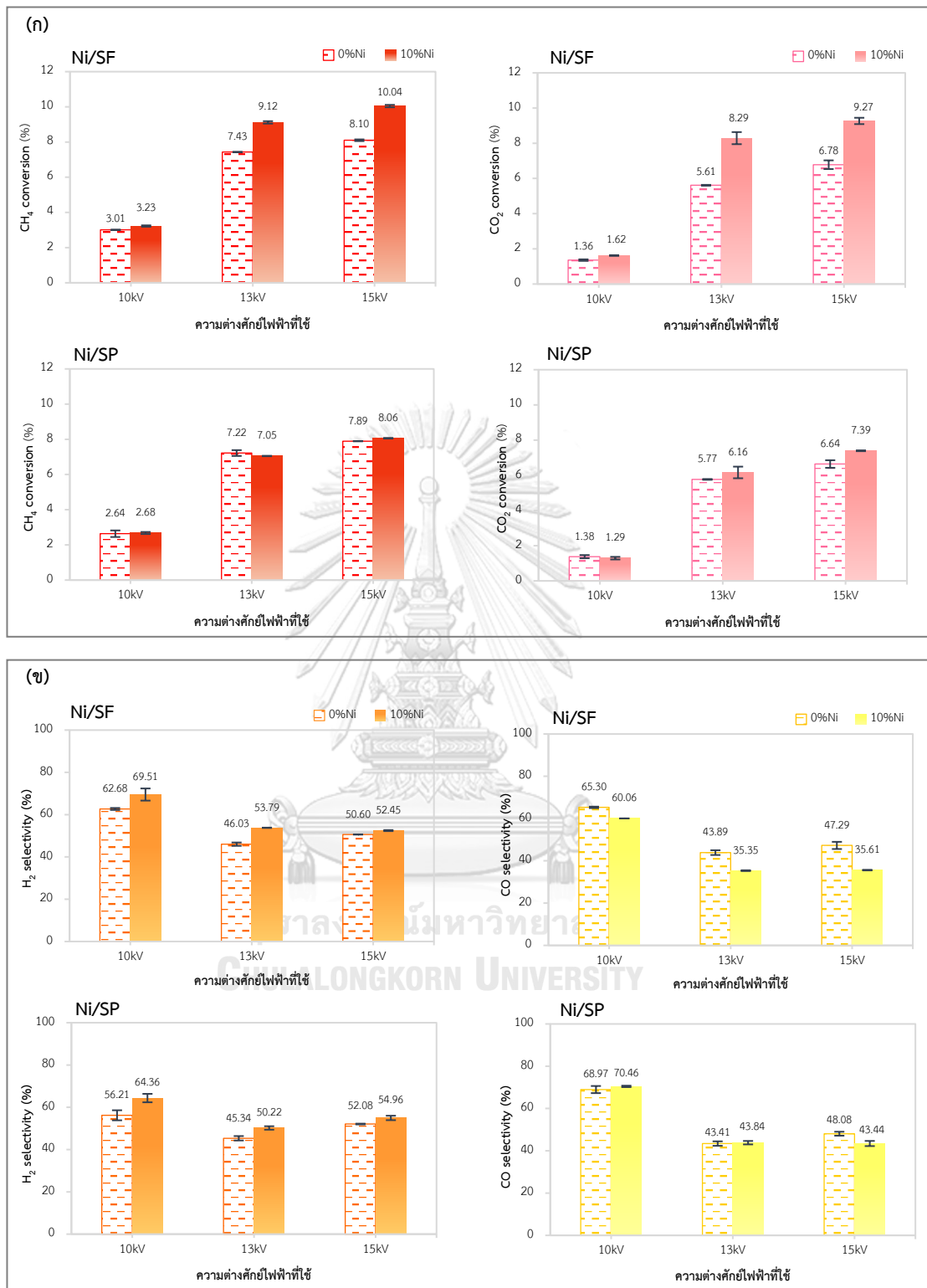
เพียงเล็กน้อย ยกเว้นค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SP ทั้งนี้คาดว่าสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ซับซ้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสติกที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวก C₂, C₃, C₄ และการก่อตัวของโค้กที่สะสมบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและแผ่นขั้วไฟฟ้า รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจากโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนที่มีผลกระทบต่อค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ดังสมการที่ 4.22-4.28 [58]



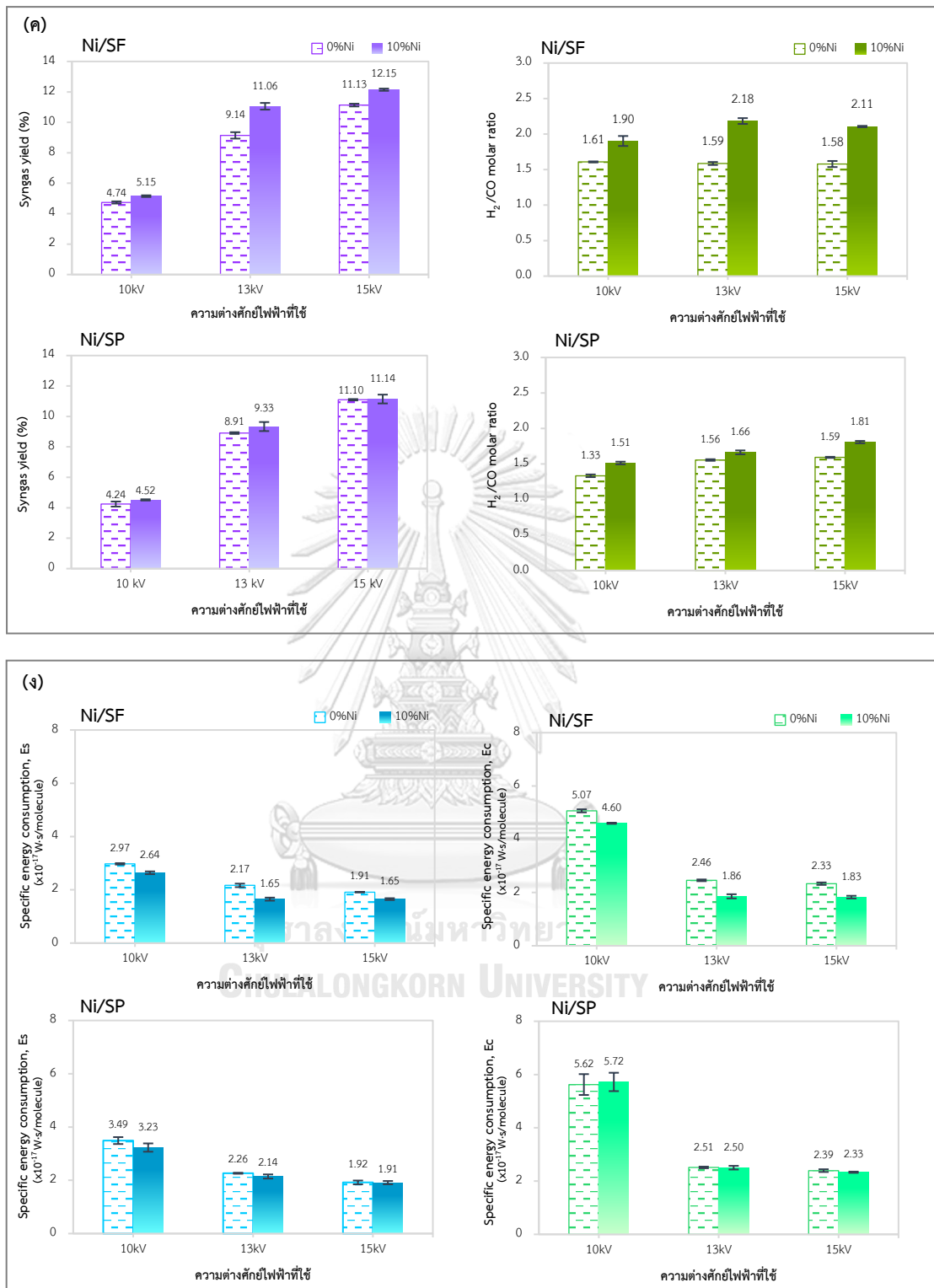
รูปที่ 4.8(ค) แสดงอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าเมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF ให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงกว่าการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP และปริมาณโพลดนิคเกิลที่ 10% โดยน้ำหนัก ให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงกว่าปริมาณโพลดนิคเกิลที่ 0% โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับซิลิกา เช่นเดียวกับกับผลของอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF ที่แสดงแนวโน้มที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวยังคงสอดคล้องกันกับผลการทดลองที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 แม้ว่าจะมีการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าในระบบพลาสติก นอกจากนี้ในส่วนอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้พบว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น 15 กิโลโวลต์ โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ให้ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการใช้ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกัน ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 12.15% และ 11.14% ตามลำดับ

มากไปกว่านั้นจากการสังเกตจะเห็นได้ว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าในแก๊สระบบพลาสมาส่งผลทำให้บริเวณของสนามไฟฟ้ามีจำนวนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสของการชนกันของอิเล็กตรอนพลังงานสูงกับโมเลกุลของสารตั้งต้นแล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ได้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับประสิทธิภาพในเทอมของอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ มีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 เป็น 15 กิโลโวลต์ มีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา 0%Ni/SF พบว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SP และ 0%Ni/SP จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

และจากรูปที่ 4.8(ง) แสดงอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น พบว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 และ 15 กิโลโวลต์ ส่งผลให้ทั้งปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงในทุกสภาวะการทดลอง นั่นหมายความว่า การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบพลาสมาได้ โดยผลการศึกษาดังกล่าวมีแนวโน้มประสิทธิภาพโดยรวมที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Chung และคณะ [59] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ ในช่วง 12.1 ถึง 13.6 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะควบคุมที่อัตราการไหลรวม 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราส่วนของแก๊สป้อนระหว่างแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1 จากการศึกษา รายงานว่าค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นและประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ และค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนมีค่ามากกว่าค่าคอนเวอร์ชันของคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกสภาวะการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไตราริฟอร์มมีนงของมีเทนที่สามารถตรวจวัดได้ประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ อีเทน และเอทิลีน ซึ่งได้แสดงแนวโน้มค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ อีเทน และเอทิลีนที่ลดลงตรงกันข้ามกันค่าการเลือกเกิดไฮโดรเจนเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้



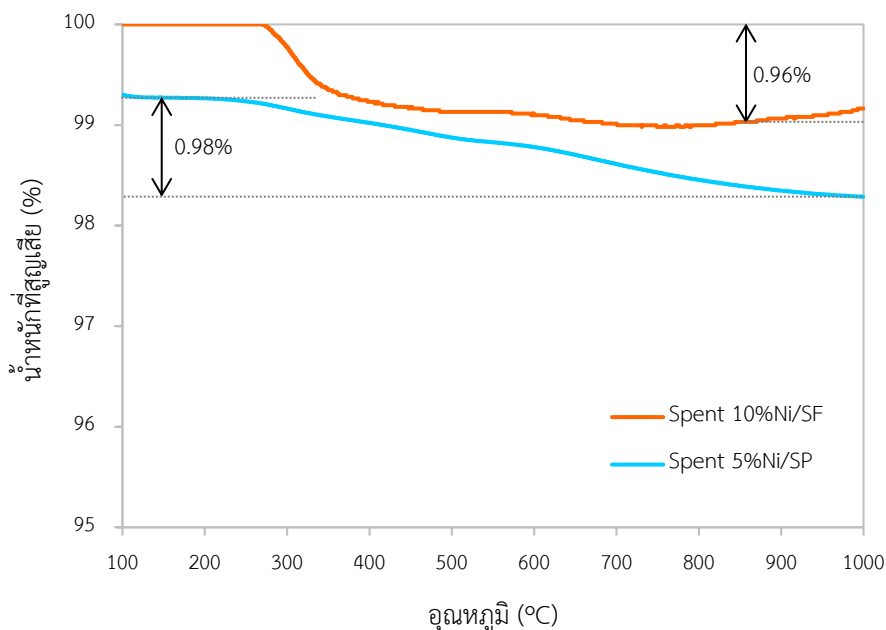
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ที่มีต่อ (ก) ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) ค่าการเลือกเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ภายใต้สภาวะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา



รูปที่ 4.9(ต่อ) อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ที่มีต่อ (ค) ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และ (ง) พลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สป้อนที่ทำให้ปฏิกิริยาและพลังงานที่ใช้ในระบบต่อโมเลกุลแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา

4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบกระบวนการ

รูปที่ 4.9 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังได้รับความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 5%Ni/SP หลังการทดสอบกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทน ภายใต้การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาและใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 13 กิโลโวลต์ พบว่าการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SP จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีผลทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลงเกือบ 1% ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียนี้คาดว่าเป็นน้ำหนักของไอน้ำหรือความชื้นในบรรยากาศที่เกิดการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นรูพรุนในระหว่างการเตรียมตัวอย่าง ขณะเดียวกันสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF จะเห็นว่าเมื่อให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไม่มีการดูดซับของความชื้นบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเส้นใยซิลิกาโดยเป็นผลเนื่องจากความไม่มีรูพรุนของโครงสร้าง นอกจากนี้เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 5%Ni/SP จนกระทั่งมีอุณหภูมิเป็น 1,000 องศาเซลเซียส มีผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1%) แต่อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวถือว่าไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถอนุมานได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนร่วมกับการใช้พลาสมาไม่พบการสะสมของคาร์บอนหรือโค้กบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ที่มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่สูงสุดในการศึกษานี้ ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วการใช้พลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้อุณหภูมิและความดันปกตินั้นจะพบการสะสมของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด ดังเช่นในงานของ Li และคณะ [60] ที่พบคาร์บอนสะสมถึง 8.17% โดยการสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 380-700 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของคาร์บอนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Andersen และคณะ [61] ได้รายงานลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วว่าสามารถมองเห็นสีที่เปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัดด้วยตาเปล่า โดยพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีสีดำคล้ำขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างการทดลอง



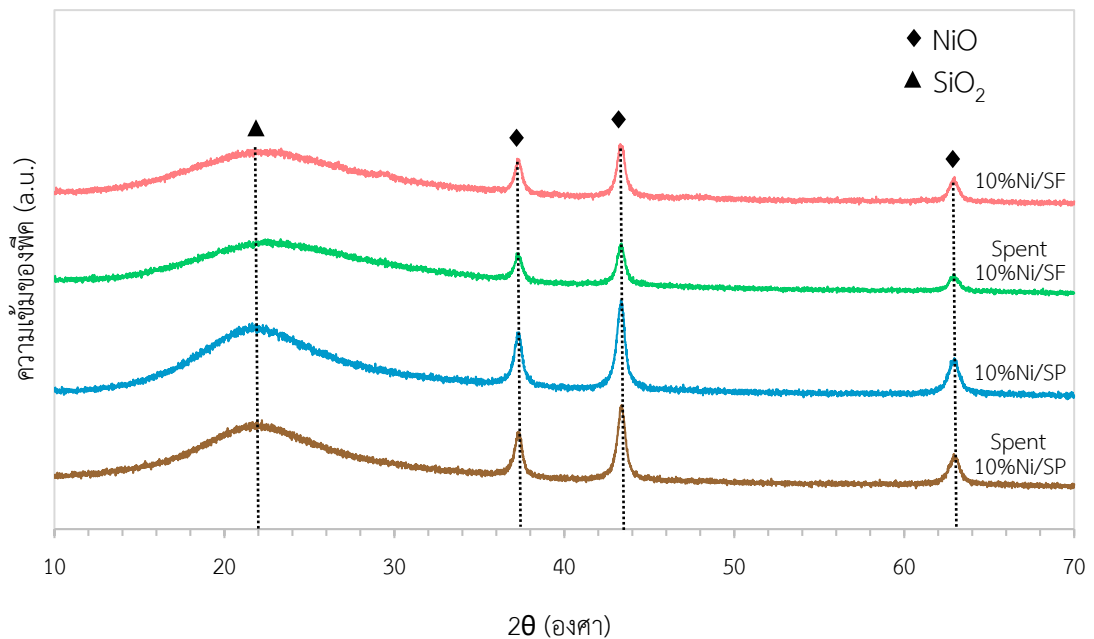
รูปที่ 4 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียต่ออุณหภูมิ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 5%Ni/SP หลังทดสอบกระบวนการ

เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP หลังการทดสอบกระบวนการตรายฟอร์มมิงของมีเทน ภายใต้การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาและใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ แสดงผลดังรูปที่ 4.10 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP ที่ผ่านการใช้งานแล้วแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่คล้ายคลึงกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการใช้งาน อีกทั้งยังไม่แสดงพีคบริเวณตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 25 องศา ที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกของคาร์บอน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อนตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเข้มของพีคที่แสดงผลึก NiO พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วแสดงความเข้มของพีคที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการใช้งาน โดยสันนิษฐานได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้งานแล้วมีปริมาณของอนุภาค निकิลลดลงหรือมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลงซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงได้ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการหลุดออกของอนุภาค निकิลระหว่างการเกิดปฏิกิริยาในโซนพลาสมาหรือการซินเทอริงของตัวเร่งปฏิกิริยา มากไปกว่านั้นจากการคำนวณขนาดอนุภาคของผลึก NiO ผ่านสมการเชอร์เรอร์ ซึ่งได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าขนาดของอนุภาคของผลึก NiO มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27.50 เป็น 29.92 นาโนเมตร เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27.40 เป็น 31.13 นาโนเมตร เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SP นั้นเป็นเพราะว่าอนุภาค निकิลมีการเกาะกลุ่มรวมกันมากขึ้นบนผิวตัว

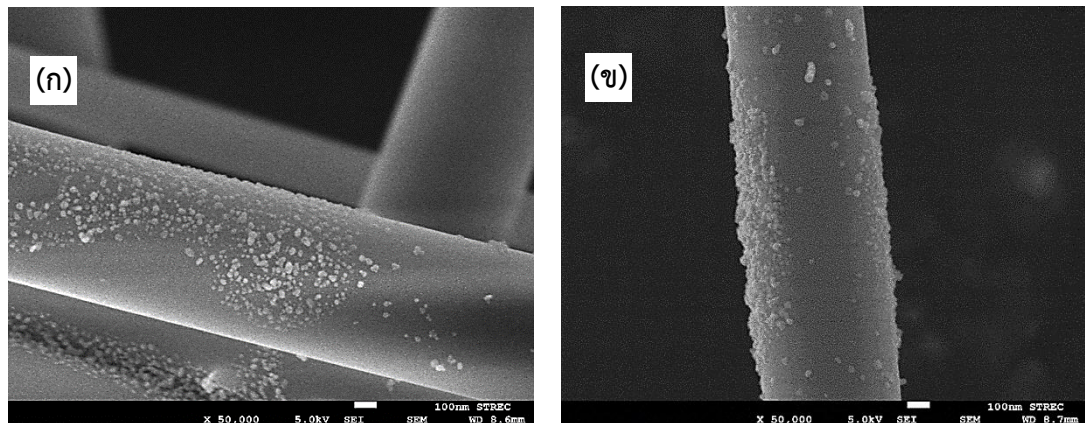
รองรับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Suttikul และคณะ [43] นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่ใช้แล้วไม่แตกต่างกับสภาพก่อนการใช้งาน แสดงว่าการดีสชาร์จของพลาสมาไม่มีผลต่อการดัดแปลงโครงสร้างของตัวรองรับเส้นใยซิลิกา แสดงดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาค NiO บนตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบ

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดอนุภาค NiO (nm)	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
10%Ni/SF	27.50	29.92
10%Ni/SP	27.04	31.13



รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF และ 10%Ni/SP ก่อนและหลังการทดสอบกระบวนการ



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (ก) ก่อนทดสอบกระบวนการ และ (ข) หลังทดสอบกระบวนการ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ส่วนที่ 1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีลีกา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีปริมาณโพลนิกเกิลแตกต่างกันบนตัวรองรับเส้นใยซีลีกาซึ่งสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจลร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง และเม็ดซีลีกาที่มีรูพรุน เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของตัวรองรับเส้นใยซีลีกาเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุนซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก เท่ากับ $2.892 \text{ m}^2/\text{g}$ ตรงกันข้ามกับตัวรองรับเม็ดซีลีกาที่มีรูพรุนและมีโครงสร้างแบบมีโซพอร์ส ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง $258.685 \text{ m}^2/\text{g}$ รวมถึงการเพิ่มปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซีลีกา มีผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น ขณะที่รัศมีรูพรุนเฉลี่ยลดลง เนื่องจากความไม่มีรูพรุนของเส้นใยซีลีกา ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับเม็ดซีลีกาที่มีรูพรุน มีผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและรัศมีรูพรุนเฉลี่ยลดลง
2. ลักษณะสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP ต่างกันอย่างมาก สำหรับการเพิ่มปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับเส้นใยซีลีกาให้ผลให้ผลึก NiO กระจายตัวและเคลือบเกาะบนผิวมากขึ้น ขณะเดียวกันที่ 15%Ni/SF พบผลึก NiO เกาะตัวสะสมกันเป็นกลุ่มก้อนบนผิวตัวรองรับเส้นใยซีลีกา
3. ลักษณะทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP ประกอบด้วยโครงสร้างผลึก NiO และ SiO_2 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีอนุภาคนิกเกิลเคลือบเกาะอยู่ และขนาดของอนุภาคนิกเกิลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับซีลีกา

ส่วนที่ 2 การทดสอบปฏิกิริยารายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้ระบบพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการทดสอบปฏิกิริยารายรีฟอร์มมิงของมีเทนภายใต้การใช้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีลีกาที่สภาวะความดันและอุณหภูมิปกติ ซึ่งมีการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณโพลนิกเกิลบนตัวรองรับซีลีกา ชนิดของตัวรองรับ รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา ร่วมกับพลาสมา แสดงผลเชิงบวกต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ขณะเดียวกันการบรรจุเส้นใยแก้วซึ่งใช้เป็นวัสดุช่วยในการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ร่วมกับพลาสมา ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเมื่อเทียบกับสภาวะการใช้พลาสมาอย่างเดียว
2. ปริมาณโพลดนิคเกิลที่แตกต่างกันบนตัวรองรับซิลิกา และชนิดของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อีกทั้งความเหมาะสมของปริมาณโพลดนิคเกิลมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของตัวรองรับที่ศึกษา โดยปริมาณนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับตัวรองรับเส้นใยซิลิกา คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสำหรับตัวรองรับเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงสุด ขณะเดียวกันการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเส้นใยซิลิกา แสดงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่รองรับด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุน
3. รูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ที่ต่างกัน มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ และลักษณะพฤติกรรมการดีสชาร์จของพลาสมา โดยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในโซนพลาสมามีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของการดีสชาร์จที่ดี และพฤติกรรมของพลาสมาที่เสถียร
4. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบพลาสมามีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ และความเสถียรของพลาสมาดีสชาร์จ โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10 เป็น 13 กิโลโวลต์ แสดงการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบที่ชัดเจนมากกว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 13 ถึง 15 กิโลโวลต์ ซึ่งสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษานี้คือ การใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทั้งนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอนเคลือบเกาะบริเวณแผ่นขั้วไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย
5. ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการทดสอบปฏิกิริยาด้วยเครื่อง TGA, XRD และ SEM ชี้ให้เห็นว่าไม่มีการสะสมตัวของโค้กเกิดขึ้นบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษา และโครงสร้างของตัวรองรับเส้นใยซิลิกาที่ใช้แล้วไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกบรรจุอยู่ในโซนพลาสมาดีสชาร์จ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วมีปริมาณนิกเกิลลดลงและเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนิกเกิล
6. การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/SF แบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ เป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการตรารายรีฟอร์มมิงของมีเทน ซึ่งให้ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่มากที่สุดในการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นนอกเหนือจากผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวก อีเทน (C_2H_6) เอทิลีน (C_2H_4) โพรเพน (C_3H_8) และโพรพีน (C_3H_6) เป็นต้น เพื่อประกอบการวิเคราะห์และอธิบายเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา (reaction pathway) เพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ภายในระบบพลาสมาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ควรทำการวิเคราะห์แก๊สแบบออนไลน์ โดยการต่อแก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาโดยตรงกับเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ เพื่อให้ผลที่ได้มีความแม่นยำและถูกต้องยิ่งขึ้น
3. ควรศึกษาและออกแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาเพิ่มเติม รวมถึงควบคุมน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแต่ละรูปแบบให้เท่ากัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา
4. ควรศึกษาตำแหน่งการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทน เช่น การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์ และการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น
5. ควรศึกษาความเสถียรภาพการเร่งปฏิกิริยา (catalytic stability) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนเมื่อดำเนินการทดลองภายใต้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาในระยะเวลานานขึ้น รวมถึงพิจารณาการฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทนใหม่อีกครั้ง
6. ควรพัฒนาประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการตรายรีฟอร์มมิงของมีเทน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ ทั้งนี้ อาจทำได้โดยการลดอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์พลาสมา ส่งผลให้เวลาในการทำปฏิกิริยา (residence time) ของโมเลกุลสารตั้งต้นกับอนุภาคที่มีพลังงานสูงในโซนพลาสมาเพิ่มขึ้น หรือการเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินปฏิกิริยาควบคู่ไปกับการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาตรายรีฟอร์มมิงของมีเทน

บรรณานุกรม

- [1] IEA, Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021, IEA 2022.
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้พลังงาน 6 เดือนแรก ปี 2563, 2563.
- [3] J. Ereña, Catalysts for Syngas Production, *Catalysts*, 2020, 10(6): 657.
- [4] J. Gao, Z. Hou, H. Lou, and X. Zheng, Chapter 7-Dry (CO₂) Reforming, *Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing*, D. Shekhawat, J. J. Spivey and D. A. Berry, eds., pp. 191-221, Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [5] C. Shi, S. Wang, X. Ge, S. Deng, B. Chen, and J. Shen, A review of different catalytic systems for dry reforming of methane: Conventional catalysis-alone and plasma-catalytic system, *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 46: 101462.
- [6] S. Mhadmhan, P. Natewong, N. Prasongthum, C. Samart, and P. Reubroycharoen, Investigation of Ni/SiO₂ Fiber Catalysts Prepared by Different Methods on Hydrogen production from Ethanol Steam Reforming, *Catalysts*, 2018, 8(8): 319.
- [7] S. Wen, M. Liang, J. Zou, S. Wang, X. Zhu, L. Liu, and Z.-j. Wang, Synthesis of a SiO₂ nanofibre confined Ni catalyst by electrospinning for the CO₂ reforming of methane, *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(25): 13299-13307.
- [8] T. Herminio, M. Cesário, V. Silva, T. Simões, E. Medeiros, D. Macedo, H. Tidahy, C. Gennequin, and E. Abi-Aad, CO₂ reforming of methane to produce syngas using anti-sintering carbon-resistant Ni/CeO₂ fibers produced by solution blow spinning, *Environmental Chemistry Letters*, 2020, 18(3): 895-903.
- [9] EPA, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020, 2022.
- [10] S. Wongsakulphasatch, N. Noppakun, S. Chimpae, T. Nimmas, P. Kim-Lohsoontorn, J. Powell, and S. Assabumrungrat, 5-Intensified processes of steam reforming and their materials for hydrogen production, *New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen*, S. Nanda, D.-V. N. Vo and P. Nguyen-Tri, eds., pp. 117-142: Elsevier, 2020.
- [11] J. G. Speight, Chapter 4-Hydrocarbons from natural gas and natural gas hydrates, *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes (Second Edition)*, J. G. Speight,

- ed., pp. 143-192, Boston: Gulf Professional Publishing, 2020.
- [12] R. L. Keiski, S. Ojala, M. Huuhtanen, T. Kolli, and K. Leiviskä, 9-Partial oxidation (POX) processes and technology for clean fuel and chemical production, *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing*, M. R. Khan, ed., pp. 262-286: Woodhead Publishing, 2011.
- [13] J. Gao, Z. Hou, H. Lou, and X. Zheng, Chapter 7–Dry (CO₂) Reforming, 2011.
- [14] I. V. Yentekakis, P. Panagiotopoulou, and G. Artemakis, A review of recent efforts to promote dry reforming of methane (DRM) to syngas production via bimetallic catalyst formulations, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 296: 120210.
- [15] A. M. Ranjekar, and G. D. Yadav, Dry reforming of methane for syngas production: A review and assessment of catalyst development and efficacy, *Journal of the Indian Chemical Society*, 2021, 98(1): 100002.
- [16] B. B. Gupta, *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [17] S. L. Suib, *New and Future Developments in Catalysis*, USA: Elsevier, 2013.
- [18] R. Carapellucci, and L. Giordano, Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis, *Journal of Power Sources*, 2020, 469: 228391.
- [19] R. G. d. Santos, and A. C. Alencar, Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(36): 18114-18132.
- [20] K. Cheng, J. Kang, D. L. King, V. Subramanian, C. Zhou, Q. Zhang, and Y. Wang, Chapter Three-Advances in Catalysis for Syngas Conversion to Hydrocarbons, *Advances in Catalysis*, C. Song, ed., pp. 125-208: Academic Press, 2017.
- [21] P. Spath, and D. Dayton, Preliminary Screening - Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals With Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas, 2003: 160.
- [22] P. H. Pandey, T. M. Ukarde, J. S. Mahale, A. Vasishta, and H. S. Pawar, Chapter 9- Syngas production via biomass gasification, *Biomass, Biofuels, Biochemicals*, H. Li, S. Saravanamurugan, A. Pandey *et al.*, eds., pp. 211-261: Elsevier, 2022.

- [23] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications, Chemical Reviews, 2019, 119(8): 5298-5415.
- [24] G. George, T. Senthil, Z. Luo, and S. Anandhan, 22-Sol-gel electrospinning of diverse ceramic nanofibers and their potential applications, Electrospun Polymers and Composites, Y. Dong, A. Baji and S. Ramakrishna, eds., pp. 689-764: Woodhead Publishing, 2021.
- [25] X. Mo, B. Sun, T. Wu, and D. Li, Chapter 24-Electrospun Nanofibers for Tissue Engineering, Electrospinning: Nanofabrication and Applications, B. Ding, X. Wang and J. Yu, eds., pp. 719-734: William Andrew Publishing, 2019.
- [26] G. Malucelli, Hybrid Organic/Inorganic Coatings Through Dual-Cure Processes: State of the Art and Perspectives, Coatings, 2016, 6(1).
- [27] M. Campanati, G. Fornasari, and A. Vaccari, Fundamentals in the preparation of heterogeneous catalysts, Catalysis Today, 2003, 77(4): 299-314.
- [28] J. R. A. Sietsma, A. Jos van Dillen, P. E. de Jongh, and K. P. de Jong, Application of ordered mesoporous materials as model supports to study catalyst preparation by impregnation and drying, Studies in Surface Science and Catalysis, E. M. Gaigneaux, M. Devillers, D. E. De Vos *et al.*, eds., pp. 95-102: Elsevier, 2006.
- [29] G. Medecal, Plasma-The 4th State of Matter, 2003, Accessed: 10 July 2022, from <http://gaotontech.com/plasma-basics/>.
- [30] A. J. L. Michael A. Lieberman, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Canada: John Wiley and Sons, 2005.
- [31] E. Nasser, Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics, USA: Wiley-Interscience, 1971.
- [32] F. Rezaei, P. Vanraes, A. Nikiforov, R. Morent, and N. De Geyter, Applications of Plasma-Liquid Systems: A Review, Materials, 2019, 12.
- [33] M. J. Gallagher, and A. Fridman, Chapter 8-Plasma Reforming for H₂-Rich Synthesis Gas, Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing, D. Shekhawat, J. J. Spivey and D. A. Berry, eds., pp. 223-259, Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [34] D. H. Lee, 12-Hydrogen production via the Kvaerner process and plasma

- reforming, *Compendium of Hydrogen Energy*, V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroğlu, eds., pp. 349-391, Oxford: Woodhead Publishing, 2015.
- [35] X. Yan, J. Ouyang, C. Zhang, Z. Shi, B. Wang, and K. Ostrikov, Plasma medicine for neuroscience-an introduction, *Chinese Neurosurgical Journal*, 2019, 5(1): 25.
- [36] R. S. Rawat, *Plasma Science and Technology for Emerging Economies: An AAAPT Experience*, 2017.
- [37] A. H. Khoja, M. Tahir, and N. A. S. Amin, Recent developments in non-thermal catalytic DBD plasma reactor for dry reforming of methane, *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 529-560.
- [38] X. Tu, and J. C. Whitehead, Plasma-catalytic dry reforming of methane in an atmospheric dielectric barrier discharge: Understanding the synergistic effect at low temperature, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2012, 125: 439-448.
- [39] Y. Zeng, X. Zhu, D. Mei, B. Ashford, and X. Tu, Plasma-catalytic dry reforming of methane over γ -Al₂O₃ supported metal catalysts, *Catalysis Today*, 2015, 256: 80-87.
- [40] X. Zheng, S. Tan, L. Dong, S. Li, and H. Chen, Plasma-assisted catalytic dry reforming of methane: Highly catalytic performance of nickel ferrite nanoparticles embedded in silica, *Journal of Power Sources*, 2015, 274: 286-294.
- [41] F. Zhu, H. Zhang, X. Yan, J. Yan, M. Ni, X. Li, and X. Tu, Plasma-catalytic reforming of CO₂-rich biogas over Ni/ γ -Al₂O₃ catalysts in a rotating gliding arc reactor, *Fuel*, 2017, 199: 430-437.
- [42] D. Ray, D. Nepak, S. Janampelli, D. P. Ghosal, and S. Challapalli, Dry Reforming of Methane in DBD Plasma over Ni-Based Catalysts: Influence of Process Conditions and Support on Performance and Durability, *Energy Technology*, 2019, 7.
- [43] T. Suttikul, S. Nuchdang, D. Rattanaphra, and C. Phalakornkule, Influence of Operating Parameters, Al₂O₃ and Ni/Al₂O₃ Catalysts on Plasma-Assisted CO₂ Reforming of CH₄ in a Parallel Plate Dielectric Barrier Discharge for High H₂/CO Ratio Syngas Production, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2020, 40(6): 1445-1463.
- [44] Y. Zeng, G. Chen, J. Wang, R. Zhou, Y. Sun, A. Weidenkaff, B. Shen, and X. Tu, Plasma-catalytic biogas reforming for hydrogen production over K-promoted

- Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of K-loading, *Journal of the Energy Institute*, 2022, 104: 12-21.
- [45] P. Reubroycharoen, N. Tangkanaporn, and C. Chaiya, Ni/SiO₂ fiber catalyst prepared by electrospinning technique for glycerol reforming to synthesis gas, *Studies in Surface Science and Catalysis - STUD SURF SCI CATAL*, 2010, 175: 689-693.
- [46] M. S. Engineering, Rigaku smartlab XRD Accessed: 05 August 2022, from <https://mse.engin.umich.edu/undergraduate/facilities/wvul/rigaku-smartlab-xrd>.
- [47] STREC, Scientific and Technological Research Equipment: XRD and SEM, Accessed: 11 July 2022, from <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates>.
- [48] H.-P. Ren, S.-Y. Ding, Q. Ma, W.-Q. Song, Y.-Z. Zhao, J. Liu, Y.-M. He, and S.-P. Tian, The Effect of Preparation Method of Ni-Supported SiO₂ Catalysts for Carbon Dioxide Reforming of Methane, *Catalysts*, 2021, 11(10): 1221.
- [49] T. Wang, H. Ma, L. Zeng, D. Li, H. Tian, S. Xiao, and J. Gong, Highly loaded Ni-based catalysts for low temperature ethanol steam reforming, *Nanoscale*, 2016, 8(19): 10177-10187.
- [50] C. Lv, L. Xu, M. Chen, Y. Cui, X. Wen, C.-e. Wu, B. Yang, F. Wang, Z. Miao, X. Hu, and Q. Shou, Constructing highly dispersed Ni based catalysts supported on fibrous silica nanosphere for low-temperature CO₂ methanation, *Fuel*, 2020, 278: 118333.
- [51] N. Prasongthum, C. Chaiya, C. Samart, G. Guan, P. Natewong, and P. Reubroycharoen, Co-production of hydrogen and carbon nanotube-silica fiber composites from ethanol steam reforming over an Ni-silica fiber catalyst, *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 2017, 148(7): 1311-1321.
- [52] T. Suttikul, S. Nuchdang, D. Rattanaphra, T. Photsathain, and C. Phalakornkule, Plasma-assisted CO₂ reforming of methane over Ni-based catalysts: Promoting role of Ag and Sn secondary metals, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(72): 30830-30842.
- [53] N. Rahemi, M. Haghghi, A. A. Babaluo, M. F. Jafari, and P. Estifaei, Synthesis and physicochemical characterizations of Ni/Al₂O₃-ZrO₂ nanocatalyst prepared via impregnation method and treated with non-thermal plasma for CO₂ reforming

- of CH₄, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, 19(5): 1566-1576.
- [54] Y. Diao, X. Zhang, Y. Liu, B. Chen, G. Wu, and C. Shi, Plasma-assisted dry reforming of methane over Mo₂C-Ni/Al₂O₃ catalysts: Effects of β-Mo₂C promoter, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, 301: 120779.
- [55] D. Ray, D. Nepak, T. Vinodkumar, and C. Subrahmanyam, g-C₃N₄ promoted DBD plasma assisted dry reforming of methane, *Energy*, 2019, 183: 630-638.
- [56] D. Ray, P. M. K. Reddy, and C. Subrahmanyam, Ni-Mn/γ-Al₂O₃ assisted plasma dry reforming of methane, *Catalysis Today*, 2018, 309: 212-218.
- [57] H. K. Song, H. Lee, J.-W. Choi, and B.-k. Na, Effect of Electrical Pulse Forms on the CO₂ Reforming of Methane Using Atmospheric Dielectric Barrier Discharge, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2004, 24(1): 57-72.
- [58] D. Mei, Plasma-catalytic conversion of greenhouse gas into value-added fuels and chemicals, Doctor of Philosophy thesis, University of Liverpool, 2016.
- [59] W.-C. Chung, K.-L. Pan, H.-M. Lee, and M.-B. Chang, Dry Reforming of Methane with Dielectric Barrier Discharge and Ferroelectric Packed-Bed Reactors, *Energy & Fuels*, 2014, 28(12): 7621-7631.
- [60] J.-q. Li, B. Xu, W.-b. Wang, J.-j. Xie, X.-l. Yin, C.-z. Wu, and J.-b. Xiao, Experimental study on dry reforming of methane by a plasma catalytic hybrid system, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2021, 49(8): 1161-1172.
- [61] J. A. Andersen, J. M. Christensen, M. Østberg, A. Bogaerts, and A. D. Jensen, Plasma-catalytic dry reforming of methane: Screening of catalytic materials in a coaxial packed-bed DBD reactor, *Chemical Engineering Journal*, 2020, 397: 125519.

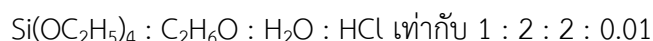


ภาคผนวก ก

การคำนวณสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การคำนวณสำหรับการสังเคราะห์ตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (silica fiber, SF)

สำหรับการเตรียมสารละลายไฮโดรเจน-เจลของซิลิกาเพื่อสังเคราะห์ตัวรองรับเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงได้ใช้อัตราส่วนโดยโมลของสารเคมีแต่ละชนิดเป็นดังนี้



ตารางที่ ก.1 สมบัติของสารเคมีที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ตัวรองรับเส้นใยซิลิกา

สารเคมี	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต 99.0% (Si(OC ₂ H ₅) ₄)	208.33	0.93
ซิลิกา (SiO ₂)	60.09	2.20
เอทานอล 99.9% (C ₂ H ₆ O)	46.07	0.79
กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl)	36.46	1.18
น้ำปราศจากไอออน (H ₂ O)	18.00	1.00

พิจารณา SiO₂ 7.5 กรัม

$$\text{จะได้ SiO}_2 = \frac{7.5 \text{ g}}{60.09 \text{ g/mol}} = 0.125 \text{ mol}$$

จาก Si(OC₂H₅)₄ 1 mol = SiO₂ 1 mol

$$\begin{aligned} \text{จะได้ Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 &= 0.125 \text{ mol} \\ &= \frac{0.125 \text{ mol} \times 208.33 \text{ g/mol} \times 99}{100} = 25.78 \text{ g} \\ \text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 &= \frac{25.78 \text{ g}}{0.93 \text{ g/cm}^3} = 27.72 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

จากอัตราส่วนโดยโมลของ Si(OC₂H₅)₄ : C₂H₆O : H₂O : HCl = 1 : 2 : 2 : 0.01

เมื่อใช้ Si(OC₂H₅)₄ = 0.125 mol

จะได้อัตราส่วนโดยโมลของ Si(OC₂H₅)₄ : C₂H₆O : H₂O : HCl = 0.125 : 0.250 : 0.250 : 0.00125

$$\text{ดังนั้น C}_2\text{H}_6\text{O} = \frac{0.250 \text{ mol} \times 46.07 \text{ g/mol}}{0.79 \text{ g/cm}^3} = 14.58 \text{ cm}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{0.250 \text{ mol} \times 18.00 \text{ g/mol}}{1.00 \text{ g/cm}^3} = 4.50 \text{ cm}^3$$

$$\text{HCl} = \frac{0.00125 \text{ mol} \times 36.46 \text{ g/mol}}{1.18 \text{ g/cm}^3} = 0.04 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซล-เจลของซิลิกาคือ

$$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 : \text{C}_2\text{H}_6\text{O} : \text{H}_2\text{O} : \text{HCl} \text{ เท่ากับ } 27.72 : 14.58 : 4.50 : 4.50$$

2. การคำนวณสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับ

สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนตัวรองรับเส้นใยซิลิกา (Ni/SF) และตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุน (Ni/SP) แสดงการคำนวณดังนี้

ตารางที่ ก.2 สมบัติของสารเคมีที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับแต่ละชนิด

สารเคมี	มวลโมเลกุล (g/mol)
นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	290.81
นิกเกิล (Ni)	58.69

พิจารณาเส้นใยซิลิกา 0.2 กรัม

ที่ 5%Ni/SF จะได้

$$\text{Ni} = \frac{5 \times 0.2 \text{ g}}{95} = 0.0105 \text{ g}$$

$$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{0.0105 \text{ g} \times 290.81 \text{ g/mol}}{58.69 \text{ g/mol}} = 0.0520 \text{ g}$$

ที่ 10%Ni/SF จะได้

$$\text{Ni} = \frac{10 \times 0.2 \text{ g}}{90} = 0.0222 \text{ g}$$

$$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{0.0222 \text{ g} \times 290.81 \text{ g/mol}}{58.69 \text{ g/mol}} = 0.1100 \text{ g}$$

ที่ 15%Ni/SF จะได้

$$\text{Ni} = \frac{15 \times 0.2 \text{ g}}{85} = 0.0353 \text{ g}$$

$$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{0.0353 \text{ g} \times 290.81 \text{ g/mol}}{58.69 \text{ g/mol}} = 0.1749 \text{ g}$$

ดังนั้นต้องชั่งน้ำหนัก $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0520, 0.1100 และ 0.1749 กรัม สำหรับการแช่จุ่มเส้นใยซิลิกา 0.2 กรัม เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/SF, 10%Ni/SF และ 15%Ni/SF ตามลำดับ

สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SP ที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการทดลองและคำนวณ

1 ข้อมูลแก๊สผสมมาตรฐาน

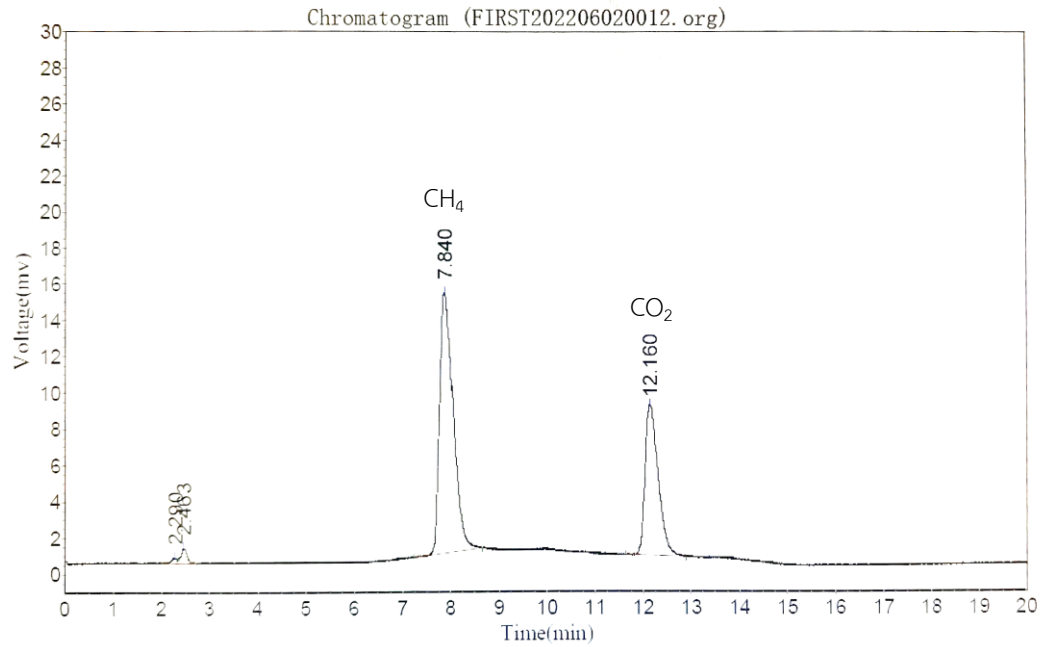
1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สผสมมาตรฐาน

สำหรับการทดลองนี้มีแก๊สที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ มีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยการวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สดังกล่าวทำได้โดยนำแก๊สที่ต้องการจากถังบรรจุแก๊สมาตรฐานที่ทราบเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วมาวิเคราะห์หาชนิดก๊าซและปริมาณด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.1

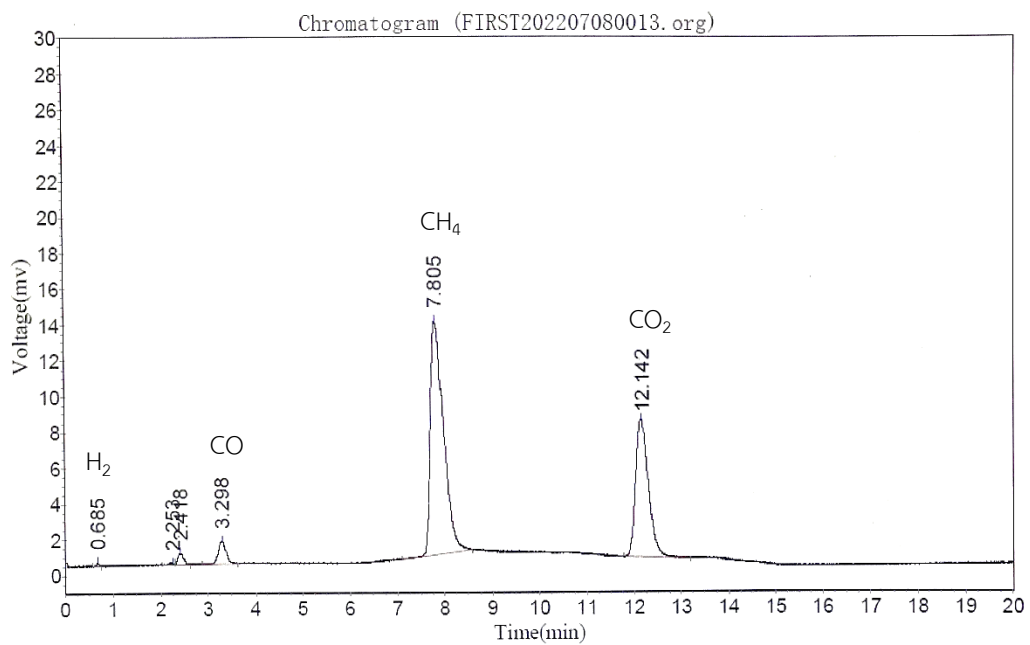
ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สผสมมาตรฐานแต่ละชนิด

ชนิดของแก๊สผสมมาตรฐาน	ความเข้มข้น (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (มิลลิโวลต์·วินาที)
CH_4	70	286,858
CO_2	30	162,761
H_2	4	549
CO	5	23,986

1.2 โครมาโทแกรม (GC Chromatogram)



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของก๊าซต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้ก่อนเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ ข.2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของก๊าซต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้หลังเกิดปฏิกิริยา

2 ข้อมูลผลการทดลอง

2.1 อิทธิพลของการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/SF และ Ni/SP แบบบางส่วนและแบบเต็มในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่มีปริมาณไหลตุนิกเกิดแตกต่างกัน

2.1.1 การคำนวณ

2.1.1.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊ส

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ ในแต่ละการทดลองสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของมีเทน

ความเข้มข้นของมีเทนมาตรฐาน 70 %mol

พื้นที่ใต้กราฟของมีเทนมาตรฐาน 286,858 mV·s

พื้นที่ใต้กราฟของมีเทน เท่ากับ 281,871 mV·s

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{ความเข้มข้นของมีเทน (x)} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ} \times 70}{286,858.14} \\ &= \frac{281,871 \times 70}{286,858} \\ &= 68.7829 \text{ \%mol} \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สชนิดต่างๆ ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.1.2 การคำนวณอัตราการไหลโดยโมลของแก๊สก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา

จากสมการของแก๊สอุดมคติ, $PV = nRT$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

เมื่อ	P	คือความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1 atm
	V	คืออัตราการไหลโดยปริมาตรของแก๊สก่อนหรือหลังเกิดปฏิกิริยา
	R	คือค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 82.06 (cm ³ ·atm)/(mol·K)
	T	คืออุณหภูมิ เท่ากับ 298.15 K
	n	คืออัตราการไหลโดยโมลรวมของแก๊สก่อนและหลังปฏิกิริยา (mol/min)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลโดยโมลรวมของแก๊สก่อนเกิดปฏิกิริยา

อัตราการไหลของแก๊สก่อนเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ $35.140597 \text{ cm}^3/\text{min}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } n &= \frac{1 \text{ atm} \times 35.140597 \text{ cm}^3/\text{min}}{(82.08 \text{ cm}^3\text{atm/mol}\cdot\text{K}) \times 298 \text{ K}} \\ &= 0.001436 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

สำหรับอัตราการไหลโดยโมลรวมของแก๊สก่อนหรือหลังเกิดปฏิกิริยา ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

2.1.1.3 การคำนวณอัตราการไหลโดยโมลของแก๊สแต่ละชนิด

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลโดยโมลของมีเทนก่อนเกิดปฏิกิริยา

จากเปอร์เซ็นต์ของมีเทนในแก๊สก่อนเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 68.7829 \%mol

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหลโดยโมลของมีเทนก่อนเกิดปฏิกิริยา} &= (68.7829/100) \times 0.001436 \\ &= 0.000988 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

สำหรับอัตราการไหลโดยโมลของแก๊สแต่ละชนิด ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

2.1.1.4 การคำนวณค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

จากสมการค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น (reactant conversion)

ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้น (%)

$$= \frac{\text{โมลสารตั้งต้นก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์} - \text{โมลสารตั้งต้นหลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{โมลของสารตั้งต้นก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าคอนเวอร์ชันของมีเทน

จาก โมลของมีเทนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ $0.00098792 \text{ mol/min}$

โมลของแก๊สมีเทนหลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ $0.00093560 \text{ mol/min}$

ดังนั้น ค่าคอนเวอร์ชันของแก๊สมีเทน (CH_4 conversion, %)

$$= \frac{0.00098792 \text{ mol/min} - 0.00093560 \text{ mol/min}}{0.00098792 \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 5.2966 \%$$

สำหรับค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ข.2

2.1.1.5 การคำนวณค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์

ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (H_2 selectivity, %)

$$= \frac{\text{โมลของ } H_2 \text{ ที่เกิดจากปฏิกิริยา}}{\text{โมลของ } H_2 \text{ ใน } CH_4 \text{ ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน

จาก โมลของ H_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยา เท่ากับ 0.00005962 mol/min

โมลของ CH_4 ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา เท่ากับ 0.00005233 mol/min

ดังนั้น ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (H_2 selectivity, %)

$$= \frac{0.00005962 \text{ mol/min}}{2(0.00005233 \text{ mol/min})} \times 100$$

$$= 56.9691 \%$$

ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO selectivity, %)

$$= \frac{\text{โมลของ CO ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา}}{\text{โมลของ C ใน } CH_4 \text{ ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา} + \text{โมลของ C ใน } CO_2 \text{ ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์

จาก โมลของ CO ที่เกิดจากปฏิกิริยา เท่ากับ 0.00004127 mol/min

โมลของ CH_4 ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา เท่ากับ 0.00005233 mol/min

โมลของ CO_2 ที่ใช้ไปในปฏิกิริยา เท่ากับ 0.00001921 mol/min

ดังนั้น ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO selectivity, %)

$$= \frac{0.00004127 \text{ mol/min}}{0.00005233 \text{ mol/min} + 0.00001921 \text{ mol/min}} \times 100$$

$$= 57.6914 \%$$

สำหรับค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ข.3

2.1.1.6 การคำนวณผลผลิตของผลิตภัณฑ์

ผลผลิตของไฮโดรเจน (H_2 yield, %)

$$= \frac{(\% CH_4 \text{ conversion})(\% H_2 \text{ selectivity})}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณผลผลิตของไฮโดรเจน

จาก CH₄ conversion เท่ากับ 5.2966 %
 H₂ selectivity เท่ากับ 56.9691 %

ดังนั้น ผลผลิตของไฮโดรเจน (H₂ yield, %)

$$= \frac{5.2966 \times 56.9691}{100}$$

$$= 3.0174 \%$$

ผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO yield, %)

$$= \frac{\Sigma(\% \text{ CH}_4 \text{ \& CO}_2 \text{ conversion})(\% \text{ CO selectivity})}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์

จาก CH₄ conversion เท่ากับ 5.2966 %
 CO₂ conversion เท่ากับ 4.4710 %
 CO conversion เท่ากับ 57.6914 %

ดังนั้น ผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO yield, %)

$$= \frac{(5.2966+4.4710) \times 57.6910}{100}$$

$$= 5.6351 \%$$

ผลผลิตของแก๊สสังเคราะห์ (syngas yield, %) = (% H₂ yield) + (% CO yield)

$$= 3.0174 + 5.6351$$

$$= 8.6525 \%$$

สำหรับผลผลิตของไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สสังเคราะห์ ณ สภาวะอื่นสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ข.4

2.1.1.7 การคำนวณปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในระบบ

2.1.1.7.1 ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในหน่วยของ W-s ต่อโมเลกุลของแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา

$$\text{ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ } (E_C) = \frac{P \times 60}{N \times M}$$

เมื่อ E_C = พลังงานที่ต้องใช้ต่อโมเลกุลของแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา

(W-s/molecule of reactant converted)

P = กำลังไฟฟ้า (power, W)

N = เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} molecule/g-mol

M = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สป้อน (g-mol/min)

= โมลของ CH_4 ที่ใช้ไปต่อหน่วยเวลา + โมลของ CO_2 ที่ใช้ไปต่อหน่วยเวลา

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานที่ต้องใช้

จาก กำลังไฟฟ้าที่วัดได้เฉลี่ย เท่ากับ 23.50 W
 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ CH_4 เท่ากับ 0.00005233 mol/min
 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ CO_2 เท่ากับ 0.00001921 mol/min

$$\text{ดังนั้น } E_C = \frac{(23.50 \text{ W}) \times (60 \text{ s/min})}{(6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/g-mol}) \times (0.00005233 \text{ mol/min} + 0.00001921)}$$

$$E_C = 3.2740 \times 10^{-17} \text{ W-s/molecule of reactant converted}$$

หรือจาก $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ W-s}$

$$\text{ดังนั้น } E_C = \frac{(3.2740 \times 10^{-17} \text{ W-s/molecule of reactant converted}) \times 1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ W-s}}$$

$$E_C = 240.3698 \text{ eV/molecule of reactant converted}$$

สำหรับปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ข.5

2.1.1.7.2 ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในหน่วยของ W·s ต่อโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น

$$\text{ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ } (E_s) = \frac{P \times 60}{N \times M}$$

เมื่อ E_s = พลังงานที่ต้องใช้ต่อโมเลกุลของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา
(W·s/molecule of syngas produced)

P = กำลังไฟฟ้า (power, W)

N = เลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23} molecule/g-mol

M = อัตราการเกิดแก๊สสังเคราะห์ (g-mol/min)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานที่ต้องใช้

จาก กำลังไฟฟ้าที่วัดได้เฉลี่ย เท่ากับ 23.50 W
อัตราการเกิดแก๊สสังเคราะห์ เท่ากับ 0.00001009 mol/min

$$\text{ดังนั้น } E_s = \frac{(23.50 \text{ W}) \times (60 \text{ s/min})}{(6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/g-mol}) \times (0.00001009 \text{ mol/min})}$$

$$E_s = 2.3215 \times 10^{-17} \text{ W·s/molecule of syngas produced}$$

หรือจาก $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ W·s}$

$$\text{ดังนั้น } E_s = \frac{(2.3215 \times 10^{-17} \text{ W·s/molecule of syngas produced}) \times 1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ W·s}}$$

$$E_s = 144.9128 \text{ eV/molecule of syngas produced}$$

สำหรับปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ ณ สภาวะอื่น สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ข.6

2.1.2 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

สภาวะการทดลอง อัตราการไหลของแก๊สป้อน 35 cm³/min

ความต่างศักย์ไฟฟ้า 13 kV

ความถี่กระแสไฟฟ้า 300 Hz

ตารางที่ ข.2 ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)			
		บรรจุแบบบางส่วน		บรรจุแบบเต็ม	
		CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
พลาสมาอย่างเดียว	1	5.2966	4.4710	-	-
	2	5.2108	4.2626	-	-
	เฉลี่ย	5.2537	4.3668	-	-
เส้นใยแก้ว	1	5.9148	4.7937	5.8332	4.1947
	2	6.0874	4.6623	5.4501	4.9313
	เฉลี่ย	6.0011	4.7280	5.6416	4.5630
0%Ni/SF	1	7.4338	5.5948	6.4551	4.7779
	2	7.4256	5.6282	6.4611	4.7596
	เฉลี่ย	7.4297	5.6115	6.4581	4.7688
5%Ni/SF	1	8.0345	6.2800	6.8666	5.2732
	2	8.1497	6.5278	6.7605	5.2861
	เฉลี่ย	8.0921	6.4039	6.8135	5.2797
10%Ni/SF	1	9.1637	8.5337	7.8347	6.3868
	2	9.0675	8.0481	7.4531	6.4360
	เฉลี่ย	9.1156	8.2909	7.6439	6.4114
15%Ni/SF	1	8.3948	7.0991	6.7707	6.0181
	2	8.1118	6.9485	6.8767	5.7386
	เฉลี่ย	8.2533	7.0238	6.8237	5.8784
0%Ni/SP	1	7.3353	5.7806	6.1513	5.2257
	2	7.1018	5.7497	6.3196	5.2918
	เฉลี่ย	7.2186	5.7651	6.2355	5.2588
5%Ni/SP	1	8.0758	6.3097	6.8513	6.1031
	2	8.1201	6.2361	6.8501	6.0413
	เฉลี่ย	8.0980	6.2729	6.8507	6.0722

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)			
		บรรจุแบบบางส่วน		บรรจุแบบเต็ม	
		CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
10%Ni/SP	1	7.0419	6.3941	6.4005	4.8804
	2	7.0595	5.9261	6.4693	4.7364
	เฉลี่ย	7.0507	6.1601	6.4349	4.8084
15%Ni/SP	1	6.7723	5.7073	6.1526	4.7957
	2	6.9636	5.6679	6.1894	4.8521
	เฉลี่ย	6.8680	5.6876	6.1710	4.8239



ตารางที่ ข.3 ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%)			
		บรรจุแบบบางส่วน		บรรจุแบบเต็ม	
		H ₂	CO	H ₂	CO
พลาสมาอย่างเดียว	1	56.9691	57.6914	-	-
	2	57.0479	58.8028	-	-
	เฉลี่ย	57.0085	58.2471	-	-
เส้นใยแก้ว	1	48.1867	49.7486	50.0032	54.9055
	2	51.6082	52.5866	53.5335	56.6217
	เฉลี่ย	49.8974	51.1676	51.7683	55.7636
0%Ni/SF	1	45.4668	43.0955	49.9000	51.3681
	2	46.5923	44.6782	50.2511	53.1924
	เฉลี่ย	46.0296	43.8868	50.0755	52.2803
5%Ni/SF	1	43.3390	40.6030	47.9190	47.5248
	2	43.3714	38.1533	50.7038	48.9698
	เฉลี่ย	43.3552	39.3782	49.3114	48.2473
10%Ni/SF	1	53.8389	35.4762	50.4982	42.4951
	2	53.7415	35.2195	53.4512	42.0109
	เฉลี่ย	53.7902	35.3478	51.9747	42.2530
15%Ni/SF	1	46.1068	37.8992	48.2228	47.0768
	2	44.3255	37.5090	48.4492	47.6495
	เฉลี่ย	45.2162	37.7041	48.3360	47.3631
0%Ni/SP	1	44.6052	42.6648	51.1753	52.4419
	2	46.0763	44.1579	50.0901	50.0556
	เฉลี่ย	45.3407	43.4113	50.6327	51.2487
5%Ni/SP	1	45.9425	39.9532	50.5833	44.3384
	2	47.0763	38.6316	49.6540	44.4691
	เฉลี่ย	46.5094	39.2924	50.1186	44.4038
10%Ni/SP	1	50.7999	44.4127	48.5100	48.0356
	2	49.6429	43.2629	49.2261	48.8940
	เฉลี่ย	50.2214	43.8378	48.8680	48.4648
15%Ni/SP	1	52.4931	46.1733	50.2887	50.0952
	2	51.3243	44.8111	52.2672	50.8141
	เฉลี่ย	51.9087	45.4922	51.2780	50.4547

ตารางที่ ข.4 ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สสังเคราะห์

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ (%)					
		บรรจุแบบบางส่วน			บรรจุแบบเต็ม		
		H ₂	CO	syngas	H ₂	CO	syngas
พลาสมา อย่างเดียว	1	3.0174	5.6351	8.6525	-	-	-
	2	2.9727	5.5706	8.5433	-	-	-
	เฉลี่ย	2.9950	5.6028	8.5979	-	-	-
เส้นใยแก้ว	1	2.8501	5.3273	8.1775	2.9168	5.5059	8.4226
	2	3.1416	5.6529	8.7945	2.9176	5.8781	8.7958
	เฉลี่ย	2.9959	5.4901	8.4860	2.9172	5.6920	8.6092
0%Ni/SF	1	3.3799	5.6148	8.9947	3.2211	5.7702	8.9912
	2	3.4598	5.8322	9.2920	3.2468	5.9686	9.2153
	เฉลี่ย	3.4198	5.7235	9.1433	3.2339	5.8694	9.1033
5%Ni/SF	1	3.4821	5.8121	9.2942	3.2904	5.7694	9.0598
	2	3.5347	5.6000	9.1346	3.4278	5.8992	9.3271
	เฉลี่ย	3.5084	5.7060	9.2144	3.3591	5.8343	9.1934
10%Ni/SF	1	4.9336	6.2783	11.2120	3.9564	6.0435	9.9998
	2	4.8730	6.0280	10.9010	3.9838	5.8350	9.8187
	เฉลี่ย	4.9033	6.1532	11.0565	3.9701	5.9392	9.9093
15%Ni/SF	1	3.8706	5.8721	9.7427	3.2650	6.0206	9.2856
	2	3.5956	5.6489	9.2445	3.3317	6.0112	9.3429
	เฉลี่ย	3.7331	5.7605	9.4936	3.2984	6.0159	9.3142
0%Ni/SP	1	3.2719	5.5959	8.8678	3.1479	5.9663	9.1143
	2	3.2723	5.6750	8.9472	3.1655	5.8122	8.9777
	เฉลี่ย	3.2721	5.6354	8.9075	3.1567	5.8892	9.0460
5%Ni/SP	1	3.7102	5.7475	9.4577	3.4656	5.7438	9.2094
	2	3.8227	5.5461	9.3687	3.4013	5.7327	9.1340
	เฉลี่ย	3.7664	5.6468	9.4132	3.4335	5.7382	9.1717
10%Ni/SP	1	3.5773	5.9673	9.5446	3.1049	5.4189	8.5237
	2	3.5045	5.6179	9.1225	3.1846	5.4789	8.6635
	เฉลี่ย	3.5409	5.7926	9.3335	3.1447	5.4489	8.5936
15%Ni/SP	1	3.5550	5.7623	9.3173	3.0941	5.4846	8.5787
	2	3.5740	5.6603	9.2343	3.2350	5.6106	8.8457
	เฉลี่ย	3.5645	5.7113	9.2758	3.1646	5.5476	8.7122

ตารางที่ ข.5 ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้เทียบต่อโมเลกุลของแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา (E_c)

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	E_c			
		บรรจุแบบบางส่วน		บรรจุแบบเต็ม	
		eV/molecule	W:s/molecule	eV/molecule	W:s/molecule
พลาสติกอย่างเดี่ยว	1	204.3698	3.2740E-17	-	-
	2	223.6437	3.5828E-17	-	-
	เฉลี่ย	214.0068	3.4284E-17	-	-
เส้นใยแก้ว	1	186.9164	2.9944E-17	199.9910	3.2039E-17
	2	188.2368	3.0156E-17	197.3096	3.1609E-17
	เฉลี่ย	187.5766	3.0050E-17	198.6503	3.1824E-17
0%Ni/SF	1	154.8331	2.4804E-17	174.4646	2.7949E-17
	2	151.9842	2.4348E-17	178.0524	2.8524E-17
	เฉลี่ย	153.4087	2.4576E-17	176.2585	2.8237E-17
5%Ni/SF	1	138.4541	2.2180E-17	164.9241	2.6421E-17
	2	137.9294	2.2096E-17	170.9354	2.7384E-17
	เฉลี่ย	138.1917	2.2138E-17	167.9297	2.6902E-17
10%Ni/SF	1	112.4476	1.8014E-17	141.2594	2.2630E-17
	2	119.3574	1.9121E-17	144.9480	2.3221E-17
	เฉลี่ย	115.9025	1.8568E-17	143.1037	2.2925E-17
15%Ni/SF	1	128.7357	2.0623E-17	163.2641	2.6155E-17
	2	135.6908	2.1738E-17	158.7700	2.5435E-17
	เฉลี่ย	132.2132	2.1181E-17	161.0171	2.5795E-17
0%Ni/SP	1	155.5298	2.4916E-17	181.4578	2.9070E-17
	2	158.1627	2.5338E-17	174.6240	2.7975E-17
	เฉลี่ย	156.8463	2.5127E-17	178.0409	2.8522E-17
5%Ni/SP	1	140.7559	2.2549E-17	154.4216	2.4738E-17
	2	139.6744	2.2376E-17	160.3134	2.5682E-17
	เฉลี่ย	140.2151	2.2462E-17	157.3675	2.5210E-17
10%Ni/SP	1	153.1949	2.4542E-17	172.5282	2.7639E-17
	2	159.2779	2.5516E-17	177.2089	2.8389E-17
	เฉลี่ย	156.2364	2.5029E-17	174.8685	2.8014E-17
15%Ni/SP	1	165.9328	2.6582E-17	183.2488	2.9356E-17
	2	159.7332	2.5589E-17	183.8678	2.9456E-17
	เฉลี่ย	162.8330	2.6086E-17	183.5583	2.9406E-17

ตารางที่ ข.6 ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้เทียบต่อโมเลกุลของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น (E_s)

ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	E_s			
		บรรจุแบบบางส่วน		บรรจุแบบเต็ม	
		eV/molecule	W·s/molecule	eV/molecule	W·s/molecule
พลาสมาอย่าง เดียว	1	144.9128	2.3215E-17	-	-
	2	156.1477	2.5015E-17	-	-
	เฉลี่ย	150.5303	2.4115E-17	-	-
เส้นใยแก้ว	1	154.0574	2.4680E-17	152.0962	2.4366E-17
	2	144.5261	2.3153E-17	147.8342	2.3683E-17
	เฉลี่ย	149.2917	2.3917E-17	149.9652	2.4024E-17
0%Ni/SF	1	138.1432	2.2131E-17	137.2307	2.1984E-17
	2	132.3021	2.1195E-17	137.4602	2.2021E-17
	เฉลี่ย	135.2227	2.1663E-17	137.3455	2.2003E-17
5%Ni/SF	1	131.2042	2.1019E-17	137.8663	2.2086E-17
	2	134.5599	2.1557E-17	137.0166	2.1950E-17
	เฉลี่ย	132.8821	2.1288E-17	137.4415	2.2018E-17
10%Ni/SF	1	100.4751	1.6096E-17	120.3798	1.9285E-17
	2	105.4959	1.6900E-17	120.6482	1.9328E-17
	เฉลี่ย	102.9855	1.6498E-17	120.5140	1.9306E-17
15%Ni/SF	1	121.9853	1.9542E-17	139.8335	2.2401E-17
	2	132.7167	2.1261E-17	133.5363	2.1393E-17
	เฉลี่ย	127.3510	2.0402E-17	136.6849	2.1897E-17
0%Ni/SP	1	142.1672	2.2775E-17	142.3601	2.2806E-17
	2	140.5616	2.2518E-17	141.0820	2.2601E-17
	เฉลี่ย	141.3644	2.2647E-17	141.7210	2.2704E-17
5%Ni/SP	1	129.2479	2.0706E-17	131.6345	2.1088E-17
	2	127.5702	2.0437E-17	137.6273	2.2048E-17
	เฉลี่ย	128.4091	2.0571E-17	134.6309	2.1568E-17
10%Ni/SP	1	130.4483	2.0898E-17	142.5346	2.2834E-17
	2	137.2202	2.1983E-17	143.0012	2.2909E-17
	เฉลี่ย	133.8343	2.1440E-17	142.7679	2.2871E-17
15%Ni/SP	1	134.6434	2.1570E-17	145.9895	2.3388E-17
	2	132.2818	2.1192E-17	142.5725	2.2840E-17
	เฉลี่ย	133.4626	2.1381E-17	144.2810	2.3114E-17

2.2 อิทธิพลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบพลาสมาเมื่อบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางส่วนในเครื่องปฏิกรณ์

2.2.1 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

สภาวะการทดลอง อัตราการไหลของแก๊สป้อน 35 cm³/min

ความถี่กระแสไฟฟ้า 300 Hz

ตารางที่ ข.7 ค่าคอนเวอร์ชันของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)	
			CH ₄	CO ₂
10	0%Ni/SF	1	3.0001	1.3283
		2	3.0158	1.3896
		เฉลี่ย	3.0080	1.3589
	10%Ni/SF	1	3.2527	1.6039
		2	3.1979	1.6333
		เฉลี่ย	3.2253	1.6186
	0%Ni/SP	1	2.5030	1.3112
		2	2.7671	1.4389
		เฉลี่ย	2.6350	1.3750
	10%Ni/SP	1	2.6348	1.3421
		2	2.7169	1.2370
		เฉลี่ย	2.6759	1.2895
13	0%Ni/SF	1	7.4338	5.5948
		2	7.4256	5.6282
		เฉลี่ย	7.4297	5.6115
	10%Ni/SF	1	9.1637	8.5337
		2	9.0675	8.0481
		เฉลี่ย	9.1156	8.2909
	0%Ni/SP	1	7.3353	5.7806
		2	7.1018	5.7497
		เฉลี่ย	7.2186	5.7651
	10%Ni/SP	1	7.0419	6.3941
		2	7.0595	5.9261
		เฉลี่ย	7.0507	6.1601

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าคอนเวอร์ชัน (%)	
			CH ₄	CO ₂
15	0%Ni/SF	1	8.0678	6.6059
		2	8.1349	6.9552
		เฉลี่ย	8.1013	6.7806
	10%Ni/SF	1	10.0916	9.3955
		2	9.9952	9.1400
		เฉลี่ย	10.0434	9.2677
	0%Ni/SP	1	7.8944	6.7918
		2	7.8904	6.4880
		เฉลี่ย	7.8924	6.6399
	10%Ni/SP	1	8.0553	7.3752
		2	8.0658	7.4082
		เฉลี่ย	8.0605	7.3917

ตารางที่ ข.8 ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%)	
			H ₂	CO
10	0%Ni/SF	1	62.3560	65.0536
		2	63.0077	65.5372
		เฉลี่ย	62.6819	65.2954
	10%Ni/SF	1	67.4809	60.0591
		2	71.5380	60.0581
		เฉลี่ย	69.5094	60.0586
	0%Ni/SP	1	57.8920	70.1604
		2	54.5368	67.7787
		เฉลี่ย	56.2144	68.9696
	10%Ni/SP	1	65.7666	70.6890
		2	62.9477	70.2237
		เฉลี่ย	64.3572	70.4564
13	0%Ni/SF	1	45.4668	43.0955
		2	46.5923	44.6782
		เฉลี่ย	46.0296	43.8868
	10%Ni/SF	1	53.8389	35.4762
		2	53.7415	35.2195
		เฉลี่ย	53.7902	35.3478
	0%Ni/SP	1	44.6052	42.6648
		2	46.0763	44.1579
		เฉลี่ย	45.3407	43.4113
	10%Ni/SP	1	50.7999	44.4127
		2	49.6429	43.2629
		เฉลี่ย	50.2214	43.8378
15	0%Ni/SF	1	50.6014	48.4889
		2	50.6038	46.0929
		เฉลี่ย	50.6026	47.2909
	10%Ni/SF	1	52.2766	35.5136
		2	52.6264	35.7162
		เฉลี่ย	52.4515	35.6149

ตารางที่ ข.8 (ต่อ)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (%)	
			H ₂	CO
15	0%Ni/SP	1	51.9500	47.4163
		2	52.2104	48.7363
		เฉลี่ย	52.0802	48.0763
	10%Ni/SP	1	54.2187	42.5848
		2	55.6969	44.3019
		เฉลี่ย	54.9578	43.4434



ตารางที่ ข.9 ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สสังเคราะห์

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ (%)		
			H ₂	CO	syngas
10	0%Ni/SF	1	1.8708	2.8158	4.6865
		2	1.9002	2.8872	4.7874
		เฉลี่ย	1.8855	2.8515	4.7370
	10%Ni/SF	1	2.1950	2.9169	5.1118
		2	2.2877	2.9015	5.1892
		เฉลี่ย	2.2413	2.9092	5.1505
	0%Ni/SP	1	1.4490	2.6760	4.1251
		2	1.5091	2.8508	4.3598
		เฉลี่ย	1.4790	2.7634	4.2424
	10%Ni/SP	1	1.7328	2.8113	4.5441
		2	1.7102	2.7766	4.4868
		เฉลี่ย	1.7215	2.7939	4.5155
13	0%Ni/SF	1	3.3799	5.6148	8.9947
		2	3.4598	5.8322	9.2920
		เฉลี่ย	3.4198	5.7235	9.1433
	10%Ni/SF	1	4.9336	6.2783	11.2120
		2	4.8730	6.0280	10.9010
		เฉลี่ย	4.9033	6.1532	11.0565
	0%Ni/SP	1	3.2719	5.5959	8.8678
		2	3.2723	5.6750	8.9472
		เฉลี่ย	3.2721	5.6354	8.9075
	10%Ni/SP	1	3.5773	5.9673	9.5446
		2	3.5045	5.6179	9.1225
		เฉลี่ย	3.5409	5.7926	9.3335
15	0%Ni/SF	1	4.0824	7.1151	11.1976
		2	4.1166	6.9554	11.0720
		เฉลี่ย	4.0995	7.0353	11.1348
	10%Ni/SF	1	5.2755	6.9206	12.1961
		2	5.2601	6.8344	12.0945
		เฉลี่ย	5.2678	6.8775	12.1453

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ครั้งที่	ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ (%)		
			H ₂	CO	syngas
15	0%Ni/SP	1	4.1011	6.9636	11.0648
		2	4.1196	7.0075	11.1271
		เฉลี่ย	4.1104	6.9856	11.0960
	10%Ni/SP	1	4.3675	6.5711	10.9385
		2	4.4924	6.8552	11.3476
		เฉลี่ย	4.4299	6.7132	11.1431



ตารางที่ ข.10 ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้เทียบต่อโมเลกุลของแก๊สป้อนที่ทำปฏิกิริยา (E_C) และปริมาณพลังงานที่ต้องใช้เทียบต่อโมเลกุลของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น (E_S)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	E_C		E_S	
			eV/moleclue	W·s/moleclue	eV/moleclue	W·s/moleclue
10	0%Ni/SF	1	313.6856	5.0252E-17	184.5439	2.9564E-17
		2	318.7643	5.1066E-17	186.8617	2.9935E-17
		เฉลี่ย	316.2250	5.0659E-17	185.7028	2.9750E-17
	10%Ni/SF	1	286.1121	4.5835E-17	166.9913	2.6752E-17
		2	288.0197	4.6141E-17	162.4492	2.6024E-17
		เฉลี่ย	287.0659	4.5988E-17	164.7203	2.6388E-17
	0%Ni/SP	1	368.3817	5.9015E-17	223.6972	3.5836E-17
		2	333.8487	5.3483E-17	212.2489	3.4002E-17
		เฉลี่ย	351.1152	5.6249E-17	217.9731	3.4919E-17
	10%Ni/SP	1	372.3840	5.9656E-17	208.4536	3.3394E-17
		2	341.9061	5.4773E-17	194.7196	3.1194E-17
		เฉลี่ย	357.1450	5.7215E-17	201.5866	3.2294E-17
13	0%Ni/SF	1	154.8331	2.4804E-17	138.1432	2.2131E-17
		2	151.9842	2.4348E-17	132.3021	2.1195E-17
		เฉลี่ย	153.4087	2.4576E-17	135.2227	2.1663E-17
	10%Ni/SF	1	112.4476	1.8014E-17	100.4751	1.6096E-17
		2	119.3574	1.9121E-17	105.4959	1.6900E-17
		เฉลี่ย	115.9025	1.8568E-17	102.9855	1.6498E-17
	0%Ni/SP	1	155.5298	2.4916E-17	142.1672	2.2775E-17
		2	158.1627	2.5338E-17	140.5616	2.2518E-17
		เฉลี่ย	156.8463	2.5127E-17	141.3644	2.2647E-17
	10%Ni/SP	1	153.1949	2.4542E-17	130.4483	2.0898E-17
		2	159.2779	2.5516E-17	137.2202	2.1983E-17
		เฉลี่ย	156.2364	2.5029E-17	133.8343	2.1440E-17
15	0%Ni/SF	1	147.5412	2.3636E-17	119.4185	1.9131E-17
		2	143.4949	2.2988E-17	119.3449	1.9119E-17
		เฉลี่ย	145.5180	2.3312E-17	119.3817	1.9125E-17

ตารางที่ ข.10 (ต่อ)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (kV)	ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ครั้งที่	E_C		E_S	
			eV/moleclue	W-s/moleclue	eV/moleclue	W-s/moleclue
15	10%Ni/SF	1	111.7566	1.7903E-17	101.5346	1.6266E-17
		2	116.2395	1.8622E-17	104.5568	1.6750E-17
		เฉลี่ย	113.9981	1.8262E-17	103.0457	1.6508E-17
	0%Ni/SP	1	151.6026	2.4287E-17	123.0183	1.9708E-17
		2	147.1451	2.3573E-17	116.6617	1.8689E-17
		เฉลี่ย	149.3739	2.3930E-17	119.8400	1.9198E-17
	10%Ni/SP	1	146.5935	2.3484E-17	122.0777	1.9557E-17
		2	144.5448	2.3156E-17	116.6731	1.8691E-17
		เฉลี่ย	145.5691	2.3320E-17	119.3754	1.9124E-17



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอริสา ธมาภรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	23 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ที่อยู่ปัจจุบัน	62/1 หมู่6 ตำบลสำราญราษฎร์ อำเภอต๋อยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220
ผลงานตีพิมพ์	A. Thamaporn, S. Chavadej, P. Reubroycharoen, and N. Rueangjitt, Dry Reforming of Methane over Nickel Catalyst on Silica Fiber Support under Plasma System, The 28th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 13th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology, 2022: 6-11.