

การผลิตไฮโดรเจนโดยโฟโวลีซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN PRODUCTION BY CO-PYROLYSIS/STEAM REFORMING OF PLASTICS
AND GLYCEROL USING Ni/Al₂O₃ CATALYST

Miss Patcharaporn Wiboonwimonrat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนโดยไฟโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃
โดย	น.ส.พัชรพร วิบูลย์วิมลรัตน์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดธारा

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดธारा)	กรรมการ
.....	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภชิตา เกริกไกววัล)	

พัชรพร วิทยวิมลรัตน์ : การผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
ของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃. (HYDROGEN
PRODUCTION BY CO-PYROLYSIS/STEAM REFORMING OF PLASTICS AND
GLYCEROL USING Ni/Al₂O₃ CATALYST) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประพันธ์ คูซล
ธาวา

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิง
ด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา การทดลองนี้ถูก
ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ในส่วนแรกศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา
นิกเกิล/อลูมินาที่ส่งผลต่อไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำในการผลิตไฮโดรเจน โดยเทียบ
กรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา จากผลการทดลองพบว่า การเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/
อลูมินา ส่งผลทำให้องค์ประกอบและผลได้ของไฮโดรเจนมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน และให้
องค์ประกอบและผลได้ของมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลง ส่วนที่สองศึกษาผลของ
อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา
ภายใต้สภาวะการดำเนินงานเดียวกัน สำหรับกรณีที่ป้อนกลีเซอรอลหรือพลาสติกเดี่ยว พบว่า
ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์รวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่สูงขึ้น และที่อุณหภูมิ
รีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส มีผลได้ของไฮโดรเจนสูงสุดสำหรับกรณีที่ป้อนกลีเซอรอลร่วมกับ
ชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน จึงถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส
ร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล และส่วนสุดท้ายศึกษาผลของการใช้
พลาสติกที่แตกต่างกันสามชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน จากผลการ
ทดลองที่ได้พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอลร่วมกับ
พอลิสไตรีนมีแนวโน้มที่สูงใกล้เคียงกัน

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอ	ลายมือชื่อนิติ
	ลิเมอร์
ปี	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
การศึกษา	

6270074923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: HYDROGEN PRODUCTION, STEAM REFORMING, PYROLYSIS,
GLYCEROL, PLASTICS

Patcharaporn Wiboonwimonrat : HYDROGEN PRODUCTION BY CO-
PYROLYSIS/STEAM REFORMING OF PLASTICS AND GLYCEROL USING
Ni/Al₂O₃ CATALYST. Advisor: Assoc. Prof. Dr. PRAPAN KUCHONTHARA

The aim of this research was to study the hydrogen production by co-pyrolysis/steam reforming of plastics and glycerol using Ni/Al₂O₃ catalyst. Experiments were carried out using a two-stage fixed-bed reactor. In the first part, the effect of Ni/Al₂O₃ catalyst was examined. The results indicated that addition of Ni/Al₂O₃ catalyst significantly increased the composition and yield of hydrogen but the composition and yield of methane and carbon monoxide were decreased. This was attributable to the promotion of water-gas shift reaction. In the second part, the effect of reforming temperatures at 700, 750 and 800 °C was studied. For all cases of single feedstock, the results indicated that yield of all gas products trend to increase with higher reforming temperature and the maximum hydrogen yield was attained at reforming temperature of 750 °C. Additionally, the effects of using different types of plastics including polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polystyrene (PS) was investigated at reforming temperature of 750 °C, with Ni/Al₂O₃ catalyst. It was found that the hydrogen production of glycerol with PE and PS were quite similar. The addition of glycerol with each plastic was found to significantly result in the high evolution rate of hydrogen compared to the single feeds.

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature
Academic Year:	2020	Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดธारा ที่กรุณามอบความรู้ ให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคและภาควิชาเคมีที่ได้มอบความรู้ตลอดจนคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภชิตา เกริกโกวัล กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญมาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ทั้งในเรื่องของการจัดการงานธุรการ อุปกรณ์ งานวิจัยและเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวที่คอยดูแลและเป็นกำลังใจ รวมถึงคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเพชร ชูนะเกียรติและนิพัฐพนธ์ ปะนามะสา ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อย่างเต็มที่ ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

งานวิจัย “การผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา” จะสำเร็จไปไม่ได้เลยหากขาดทุนสนับสนุนค่าเล่าเรียนจากสาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

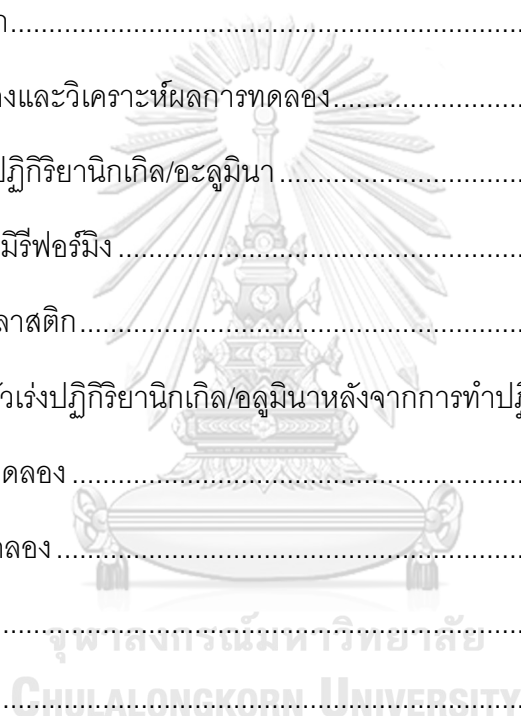
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณดีความชอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้แก่บุคคลดั่งที่กล่าวข้างต้น รวมถึงผู้มีพระคุณท่านอื่นที่ยังไม่ได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้

พัชรพร วิบูลย์วิมลรัตน์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ไบโอดีเซล (Biodiesel)	5
2.2 กlycerol (Glycerol).....	7
2.3 พลาสติก (Plastic)	15
2.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	27
2.5 ไฮโดรเจน (Hydrogen)	28
2.6 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจาก glycerol.....	31
2.7 รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming).....	32
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา (Ni/Al ₂ O ₃)	35

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	44
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	44
3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	46
3.3 วิธีการทดลอง	48
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
3.5 ตัวแปรที่ศึกษา	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา	55
4.2 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง	68
4.3 ผลของชนิดพลาสติก	71
4.4 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินาหลังจากการทำปฏิกิริยา	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก ก	84
ประวัติผู้เขียน	91



สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกาลีเซอรอล.....	9
ตารางที่ 2.2 ประเภท คุณสมบัติและตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของพลาสติกชนิดต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.3 การผลิตไฮโดรเจนจากไพโรไลซิส-รีฟอร์มมิงของชนิดพลาสติกที่แตกต่างกันและส่วน ผสมของพลาสติกที่ต่างกัน.....	38

บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง	52
--	----

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์.....	82
ตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC.....	82
ตารางที่ ก3 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์	83
ตารางที่ ก4 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์	83
ตารางที่ ก5 การคำนวณผลได้ขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ถุงที่หนึ่ง.....	85
ตารางที่ ก6 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์	86

สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

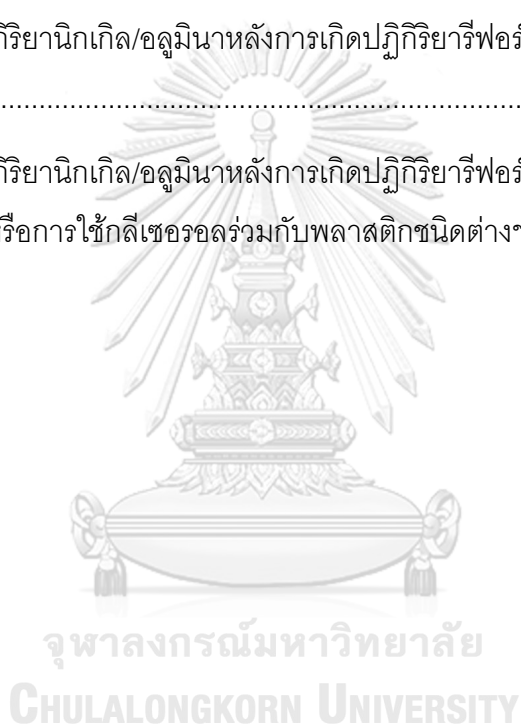
บทที่ 2

รูปที่ 2.1 ปริมาณการผลิตกลีเซอรอลดิบและไบโอดีเซลจากทั่วโลกตั้งแต่ปี 2003-2020.....	6
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	7
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification).....	11
รูปที่ 2.5 เส้นทางการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นสารเคมี.....	13
รูปที่ 2.6 การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่างๆเฉลี่ยจากทั่วโลก	14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเบคิลไลต์.....	17
รูปที่ 2.8 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิเอทิลีน	19
รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก.....	20
รูปที่ 2.10 เส้นทางการเปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นพลังงาน.....	22
รูปที่ 2.11 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน.....	23
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการทดลอง.....	24
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน	25
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง	25
รูปที่ 2.15 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน	26
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนที่ใช้ในการทดลอง	26
รูปที่ 2.17 การแปลงสภาพของ H ₂ , CO และ Coke เมื่อใช้ชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน	37
รูปที่ 2.18 การแปลงสภาพที่เวลาเป็นศูนย์ในขั้นตอนรีฟอร์มมิงเมื่อป้อนชนิดพลาสติกที่	38
รูปที่ 2.19 ผลได้ที่เวลาเป็นศูนย์บนสตรีมในไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงของชนิดพลาสติกที่.....	39

รูปที่ 2.20 องค์ประกอบของแก๊สและการผลิตไฮโดรเจนสำหรับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน	41
รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	42
รูปที่ 2.22 องค์ประกอบและผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน	43
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น	46
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น	47
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	52
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	52
รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	53
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ	56
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ	57
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ	58
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ	59
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al ₂ O ₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ	60

- รูปที่ 4.6** การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ 61
- รูปที่ 4.7** การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ 62
- รูปที่ 4.8** การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ 63
- รูปที่ 4.9** การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ..... 64
- รูปที่ 4.10** การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ 65
- รูปที่ 4.11** การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ 66
- รูปที่ 4.12** การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ 67
- รูปที่ 4.13** ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เมื่อป้อน (a) กลีเซอรอล (b) พอลิเอทิลีน (PE) (c) พอลิโพรพิลีน (PP) (d) พอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ 69

- รูปที่ 4.14** ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ เมื่อป้อน (d) Glycerol/PE (e) Glycerol/PP (f) Glycerol/PS 70
- รูปที่ 4.15** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H₂ evolution rate กับเวลา (นาที) จากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติกแต่ละชนิด (a) PE, (b) PP, (c) PS ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 750 องศาเซลเซียส 72
- รูปที่ 4.16** ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่นำไปใช้ทำการทดลอง..... 74
- รูปที่ 4.17** ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาหลังการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เมื่อป้อนพลาสติก 74
- รูปที่ 4.18** ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาหลังการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เมื่อป้อนกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวหรือการใช้กลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดต่างๆ..... 75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแบบเดิมนั้นไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน จึงมีความจำเป็นที่ต้องการหาพลังงานทดแทนชนิดใหม่ ไฮโดรเจนถือเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการแก้ปัญหาความมั่นคงด้านพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ข้อดีของไฮโดรเจนนั้นมีหลายประการ นั่นคือไฮโดรเจนถือเป็นพลังงานสะอาดและหมุนเวียนได้ การเผาไหม้ของไฮโดรเจนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ [1] อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานที่หลากหลายและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้ไบโอดีเซลก็เป็นหนึ่งในพลังงานที่ได้รับความสนใจ เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากการเผาไหม้ที่สะอาด ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมัน จะได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้อย่างกลีเซอรอล ($C_3H_8O_3$) ที่เพิ่มขึ้นตามความต้องการของไบโอดีเซล [2] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณที่เหลือจากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอล จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำกลีเซอรอลมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในทางเคมี นอกจากนี้ในแต่ละปียังมีการทิ้งพลาสติกที่จัดเป็นขยะมูลฝอยชนิดหนึ่งเป็นจำนวนมาก ส่งผลในด้านของการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่เพียงพอและยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง เช่น มีขยะที่เกิดการสะสมในทะเลหรือมหาสมุทร และการเผาขยะพลาสติกโดยไม่มีการควบคุมแหล่งมลพิษทางอากาศ ซึ่งพลาสติกเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง อีกทั้งมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่สูง จึงยากต่อการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เมื่อพิจารณาถึงปัญหาการรีไซเคิลขยะพลาสติก การใช้กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี อย่างไพโรไลซิสถือเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานจากขยะพลาสติก [3] นอกจากนี้การเกิดไพโรไลซิสด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาในภายหลัง ยังช่วยให้สามารถเปลี่ยนพลาสติกเป็นแก๊สที่มีมูลค่ามากขึ้น อย่างไฮโดรเจนได้ จากที่กล่าวมานี้พลาสติกและกลีเซอรอลจึงมีความน่าสนใจที่จะก่อให้เกิดพลังงานอย่างยั่งยืนด้วยต้นทุนสิ่งแวดล้อมที่ต่ำ ในส่วนของกระบวนการรี

ฟอรัมด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการทางเคมีโดยใช้ความร้อนรูปแบบหนึ่งที่ผลิตไฮโดรเจนได้จากแก๊สธรรมชาติ โดยกระบวนการเกิดรีฟอรัมด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลนี้จะเกิดปฏิกิริยาหลักที่สำคัญคือปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอล ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนกับปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟเป็นปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามในกระบวนการรีฟอรัมด้วยไอน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง นั่นคือปฏิกิริยาการเกิดมีเทน โดยจะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ดังนั้นสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยานี้ได้ด้วยการใช้อุณหภูมิสูงและการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อกลีเซอรอล นอกจากนี้ยังมีปัญหาการเกิดโค้กบนพื้นผิว ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปฏิกิริยาข้างเคียงที่มักจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากงานวิจัยหนึ่งที่ระบุว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในการเกิดรีฟอรัมด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอรอลและไฮโดรเจน [4-7] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นความสามารถในการเลือกของไฮโดรเจนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าถึงประมาณร้อยละ 80 [8] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้นิกเกิล/อลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเนื่องจากไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอรัมด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล ดังนั้นการผลิตไฮโดรเจนเพื่อให้ได้ผลผลิตไฮโดรเจนที่สูงขึ้นจึงเป็นปัจจัยหลักในการศึกษาของงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอรัมด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิรีฟอรัมภายใต้ภาวะการทำงานที่เหมาะสม ชนิดของพลาสติกและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่มีต่อผลผลิตของไฮโดรเจนจากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอรัมด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาชนิดของพลาสติกและผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 จัดเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทำวิจัย
- 1.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของพลาสติกทั้งสามชนิด ประกอบด้วย โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) โดยวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ (CHNS element analyzer)
- 1.5.4 การเตรียมสารละลายกลีเซอรอลมีความเข้มข้น 50 ร้อยละโดยปริมาตร
 - 1.5.4.1 ผสมกลีเซอรอลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีความเข้มข้น 99.5 ร้อยละโดยปริมาตร และน้ำในอัตราส่วนเป็น 1:1
 - 1.5.4.2 ทำการรวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที ให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.5.5 ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ด้วยวิธีการอิมเพกเนชัน (Impregnation) โดยซิงแกมมา-อลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) 10 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรดที่เตรียมจากนิกเกิลไนเตรด-6-ไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 4.95 กรัม ที่ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน แล้วทำการรวนและระเหยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 550

องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- 1.5.6 เตรียมท่อควอตซ์สำหรับใช้เป็นท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและใช้บรรจุเม็ดอลูมินาหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้
- 1.5.7 ศึกษาภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น โดยใช้พลาสติก 0.2 กรัม และสารละลายกลีเซอรอลที่เตรียมไว้ เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ สารละลายกลีเซอรอลจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (HPLC pump) ที่มีอัตราการไหล 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที ในส่วนแรกจะเป็นขั้นตอนการเกิดไฟโรไลซิสของพลาสติกและกลีเซอรอล จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารระเหย จากนั้นสารระเหยที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สอาร์กอน (Ar) ซึ่งเป็นแก๊สตัวพาที่มีอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที พาเข้าสู่ส่วนที่สอง ซึ่งเป็นขั้นที่เกิดรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยกำหนดให้อัตราการป้อนเข้าของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และมีตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมรองรับอยู่ จากนั้นไอรระเหยจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดทาร์และน้ำที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ และผ่านซิลิกาเจลเพื่อคัดความชื้นก่อนเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ด้วยถุงเก็บแก๊ส โดยจะวัดปริมาณแก๊สด้วยการวัดอัตราการไหลแบบฟองอากาศ (Bubble flow meter) ถูกละ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) เพื่อคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์
- 1.5.8 ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน
 - 1.5.8.1 เปรียบเทียบเมื่อไม่มีกับมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา
 - 1.5.8.2 อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส
 - 1.5.8.3 ชนิดของพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)
- 1.5.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

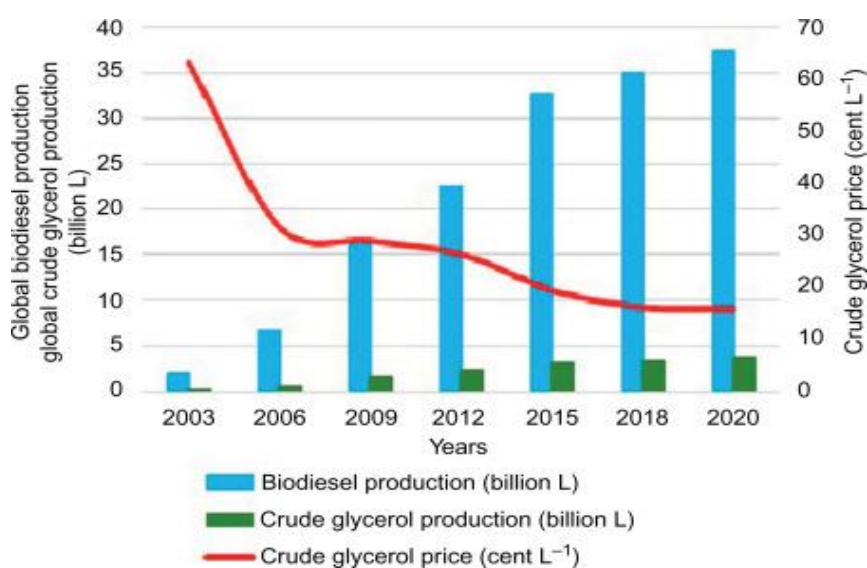
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซล หรือที่เรียกว่า B100 จัดเป็นเชื้อเพลิงเหลวทดแทนหรือเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนในธรรมชาติ อย่างไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืช เช่น ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว สาหร่าย สบู่ดำ ทานตะวัน ถั่วเหลือง ละหุ่งและเมล็ดเรพ ไบโอดีเซลถือเป็นน้ำมันชีวภาพประเภทหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ภายในเครื่องยนต์ จะมีคุณสมบัติการเผาไหม้เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียมและสามารถใช้ทดแทนกันได้ นอกจากนี้พลังงานหลักที่ใช้งานกันทั่วไปอย่างพลังงานที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน ฟอสซิล และแก๊สธรรมชาติเริ่มเกิดปัญหาการขาดแคลน เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดและเริ่มมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันในประเทศไทยให้ความสำคัญกับการสนับสนุนให้ใช้ไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีข้อดีคือ เป็นพลังงานสะอาดที่ช่วยลดปัญหาหมอกพิษอย่างฝุ่นละออง PM 2.5, ช่วยลดการเกิดภาวะโลกร้อน, สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้, มีค่าซีเทนสูง, ไม่เป็นพิษ, มีความสมดุลของพลังงานในเชิงบวก, มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและราคาของน้ำมันไบโอดีเซลถูกกว่าน้ำมันดีเซล ประเทศไทยจึงมีแนวโน้มการผลิตไบโอดีเซลจากมะพร้าวและปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทุกปี การพัฒนาอย่างรวดเร็วของการผลิตไบโอดีเซลนี้ส่งผลให้เกิดการผลิตกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองเพิ่มขึ้นร่วมด้วย [9] จากรูปที่ 2.1 [10] แนวโน้มของการผลิตกลีเซอรอลดิบและไบโอดีเซลของทั่วโลกในระหว่างปี 2003 ถึงปี 2020 ที่คาดการณ์ว่าภายในปี 2020 การผลิตกลีเซอรอลทั่วโลกสูงถึง 4 พันล้านลิตร ดังนั้นการกำจัดกลีเซอรอลและการนำไปใช้ประโยชน์จึงกลายเป็นปัญหาสำหรับอุตสาหกรรมไบโอดีเซลในปัจจุบัน เนื่องจากมูลค่าตลาดของกลีเซอรอลบริสุทธิ์อยู่ที่ร้อยละ 19.4-20.1 ต่อลิตรในปี 2014 และเกือบเท่ากับร้อยละ 12.01-15.03 ต่อลิตรของกลีเซอรอลดิบ โดยมูลค่าตลาดของกลีเซอรอลที่คาดการณ์ไว้จนถึงปี 2020 คาดว่าราคาจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 ด้วยเหตุนี้ทั่วโลกจึงมีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อค้นหาแนวทางใหม่สำหรับการใช้กลีเซอรอลดิบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาราคาของกลีเซอรอลที่ตกต่ำอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีปัญหา

กลีเซอรอลดิบที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซลไม่ค่อยบริสุทธิ์ วิธีการทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์จำเป็นต้องกำจัดสิ่งเจือปนเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการนำไปใช้งาน ซึ่งเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการทำให้กลีเซอรอลดิบกลายเป็นกลีเซอรอลบริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก [10]



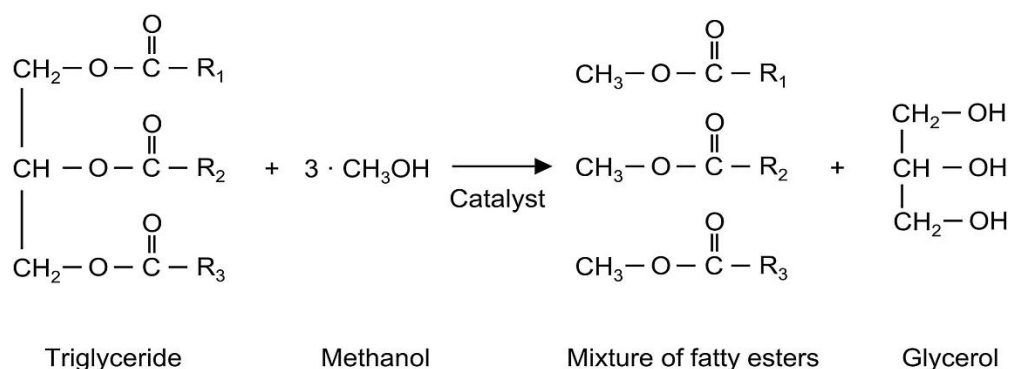
รูปที่ 2.1 ปริมาณการผลิตกลีเซอรอลดิบและไบโอดีเซลจากทั่วโลกตั้งแต่ปี 2003-2020

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.1 การผลิตไบโอดีเซล

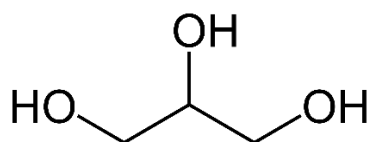
ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลสามารถทำได้จากปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Alcohol) อย่างเช่น เมทานอล (Methanol), เอทานอล (Ethanol) หรือบิวทานอล (Butanol) เนื่องจากแอลกอฮอล์กลุ่มนี้มีต้นทุนต่ำ และจำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบส อย่างเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ (Ester) และผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล (Glycerol) การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

2.2 กlycerol (Glycerol)

กlycerol หรือกลีเซอริน (Glycerine) มาจากคำว่า Glykys มีความหมายว่า หวาน มีชื่อทางเคมี (IUPAC) ว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-Propanetriol) กlycerol เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มของโพลีไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล กlycerol มีลักษณะเป็นของเหลว มีความหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ มีรสหวานเล็กน้อย จากรูปที่ 2.3 โครงสร้างของกลีเซอรอล [12] พบว่ากลีเซอรอลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) 3 หมู่ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (Primary hydroxyl) 2 หมู่ และหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (Secondary hydroxyl) 1 หมู่ [11]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกลีเซอรอล [12]

2.2.1 ที่มาของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1779 โดยนักเคมีหรือเภสัชกรชาวสวีเดนชื่อ Carl W. Scheele พบว่ากลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ในการผลิตสบู่ของปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน (Saponification) ที่เกิดจากน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว ต่อมาในปี ค.ศ. 1811 นักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ Michel E. Chevreul ค้นพบและอธิบายเกี่ยวกับการแยกองค์ประกอบทางเคมีของไขมันสัตว์ โดยเรียกของเหลวที่เป็นส่วนประกอบของกรดไขมันว่า กลีเซอริน และได้กำหนดสูตรทางเคมีของกรดไขมันและสูตรของกลีเซอริน กลีเซอรอลถูกนำมาใช้ในการทำอาหารครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1867 โดยนักเคมีชาวสวีเดนชื่อ Alfred B. Noble ได้เริ่มทำการคิดค้นนำสารไนโตรกลีเซอริน (Nitroglycerine) มาใช้ในการผลิตระเบิดไดนาไมต์ ต่อมาช่วงปลายปี ค.ศ. 1943 I. G. Farben ได้เริ่มทำการผลิตกลีเซอรอลจากวัตถุดิบปิโตรเลียม โดยใช้กระบวนการคลอรีเนชัน (Chlorination) ที่อุณหภูมิสูงของโพรพีนกับอัลลิลคลอไรด์ และตั้งแต่นั้นปี ค.ศ. 1980 จนถึงปัจจุบันการผลิตกลีเซอรอลส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันที่มาจากธรรมชาติมากถึงร้อยละ 75 และอีกส่วนได้จากการสังเคราะห์โพรพีนร้อยละ 25 [13, 14]

2.2.2 คุณสมบัติของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีความหนืด ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ มีรสหวานเพียงเล็กน้อย สามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำและแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล, เอทานอล, โพรพานอล, บิวทานอล, เพนทานอล นอกจากนี้รวมถึงไกลคอล ฟีนอลและพวกสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic), ไดเอทิลอีเทอร์, เอทิลเอสเทอร์และไดออกเซน เป็นต้น แต่กลีเซอรอลจะไม่ละลายในสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นโซ่ยาวและตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน (หมู่ 7) เช่น คลอโรฟอร์ม, เฮกเซน, เบนซีน เป็นต้น [15] และสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอลเป็นดังตาราง 2.1 [16]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอล

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรโมเลกุล	$C_3H_8O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09382 กรัมต่อโมล
สถานะและสี	เป็นของเหลวใส ไม่มีสี
ความหนาแน่น	1.261 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนืด	1.2 Pa-s
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดเดือด ที่ 101.3 kPa	290 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	17.9 องศาเซลเซียส
จุดติดไฟ	204 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ (ระบบเปิด)	177 องศาเซลเซียส
แรงตึงผิว ที่ 20 องศาเซลเซียส	63.4 มิลลินิวตันต่อเมตร
ละลายใน	น้ำและแอลกอฮอล์ ฯ
ไม่ละลายใน	ตัวทำละลายพวกเฮโลเจน, เบนซีน, คลอโรฟอร์ม ฯ

จากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลดัง **ตารางที่ 2.1** พบว่ากลีเซอรอลมีคุณสมบัติเป็นสารที่สามารถดูดความชื้นในบรรยากาศหรือดูดจับน้ำได้ดี (Hygroscopic) สามารถละลายได้ดีในน้ำและสารละลายอื่น ๆ อีกหลายชนิด นอกจากนี้กลีเซอรอลยังสามารถทำปฏิกิริยาได้เหมือนแอลกอฮอล์ โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลตรงส่วนปลายนั้นมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ตรงส่วนกลาง ภายใต้ในสภาวะที่เป็นกลางหรือเบส นอกจากนี้กลีเซอรอลยังสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยที่จะไม่เกิดอะโครลีน (Acrolein) ซึ่งเป็นอัลดีไฮด์ที่มีความเป็นพิษสูงแม้ในระดับความเข้มข้นต่ำ ที่เกิดจากการสลายตัวของกลีเซอรอลเมื่อ

ได้รับความร้อน ในทางกลับกันในสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 150-160 องศาเซลเซียส จะสามารถเกิดอะโครลีนได้ ดังนั้นปฏิกิริยาในการสังเคราะห์กลีเซอรอลจึงควรเตรียมในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นเบส จากสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดกลีเซอรอลจึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร สีและเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.2.3 การสังเคราะห์กลีเซอรอล

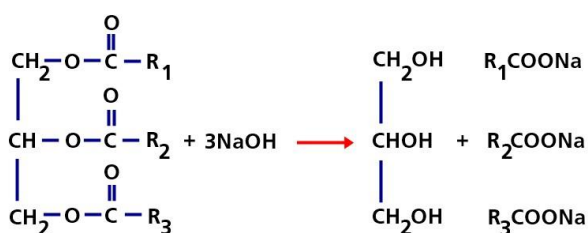
กลีเซอรอล สามารถแบ่งออก 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลสังเคราะห์ สำหรับกลีเซอรอลดิบในธรรมชาติมักจะไม่พบอยู่ในรูปอิสระ แต่จะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยวิธีในการผลิตกลีเซอรอลดิบในทางอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น ผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของน้ำมันจากพืชและไขมันจากสัตว์ โดยมีกรดหรือเบสเจือจางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือผลิตจากการสังเคราะห์ทางเคมีโดยใช้วัตถุดิบทางปิโตรเคมี หรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ในการผลิตสบู่จากกรดไขมัน หรือเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ในการผลิตไบโอดีเซล โดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ทั้งสามหมู่ของกรดไขมันจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นเอสเทอร์ ซึ่งปริมาณกลีเซอรอลที่พบในไขมันและน้ำมันจะอยู่ระหว่างร้อยละ 8 ถึง 14 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมัน เป็นต้น ในขณะที่กลีเซอรอลสังเคราะห์จะทำได้จากการสังเคราะห์โพพร ฟีน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตกลีเซอรอลด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การหมักน้ำตาลและปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของคาร์โบไฮเดรต แต่กระบวนการเหล่านี้จะไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม โดยกลีเซอรอลที่ผลิตได้ในตอนแรกจะอยู่ในรูปกลีเซอรอลดิบ ซึ่งประกอบด้วยน้ำและสิ่งเจือปนในปริมาณมาก แต่เมื่อนำกลีเซอรอลดิบไปผ่านกระบวนการกลั่นจนเป็นของเหลวที่มีรสหวาน ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น จะได้เป็นกลีเซอรอลที่บริสุทธิ์ ซึ่งจะปราศจากสารพิษ จึงมีคุณสมบัติในการเก็บความชื้นและคุณสมบัติในการทำละลาย (Solvent properties) ตัวอย่างวิธีการสังเคราะห์กลีเซอรอล มีดังนี้ [17-19]

- 1) สังกะหราก์ลีเซอรอลจากการแตกตัวของน้ำมันจากพืชและไขมันจากสัตว์ด้วยความดันสูง

วิธีนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1854 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เริ่มจากน้ำมันหรือไขมันจะถูกบ้อนเข้าไปสู่อุณหภูมิแล้วเกิดการแตกตัวแบบไหลสวนทาง ที่ความดัน 5 ถึง 6 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายกลีเซอรอลในน้ำร้อยละ 15 ซึ่งเรียกว่า สวีทวอเตอร์ (Sweet water)

- 2) สังกะหราก์ลีเซอรอลจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการแตกตัวของไขมันและน้ำมันในการผลิตสบู่ โดยนำมาทำปฏิกิริยากับเบส จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ซึ่งเป็นวิธีการที่รู้จักแรกเริ่มดังรูปที่ 2.4



ไขมันและน้ำมัน + ด่าง \rightarrow กลีเซอรอล + สบู่

รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) [20]

- 3) สังกะหราก์ลีเซอรอลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ และใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ของกรดหรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล และมีกลีเซอรอลเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่เลือกใช้ โดยปฏิกิริยานี้เป็นการแทนที่หมู่ของแอลกอฮอล์ในเอสเทอร์ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดคล้ายกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) แตกต่างกันที่จะใช้แอลกอฮอล์แทนน้ำในการเกิดปฏิกิริยา

4) สังเคราะห์กลีเซอรอลจากปฏิกิริยาการหมักน้ำตาล

เป็นปฏิกิริยาการผลิตกลีเซอรอลโดยการหมักแอลกอฮอล์ ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1858 โดย Paster โดยการหมักจะถูกรบกวนในขั้นกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต (Glyceraldehyde-3-phosphate) ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะได้เป็นกลีเซอรอลฟอสเฟต โดยจะได้ผลผลิตของกลีเซอรอลร้อยละ 25 ซึ่งกระบวนการนี้ไม่เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรม

5) สังเคราะห์กลีเซอรอลจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอเนต (Hydrogenation of carbonate)

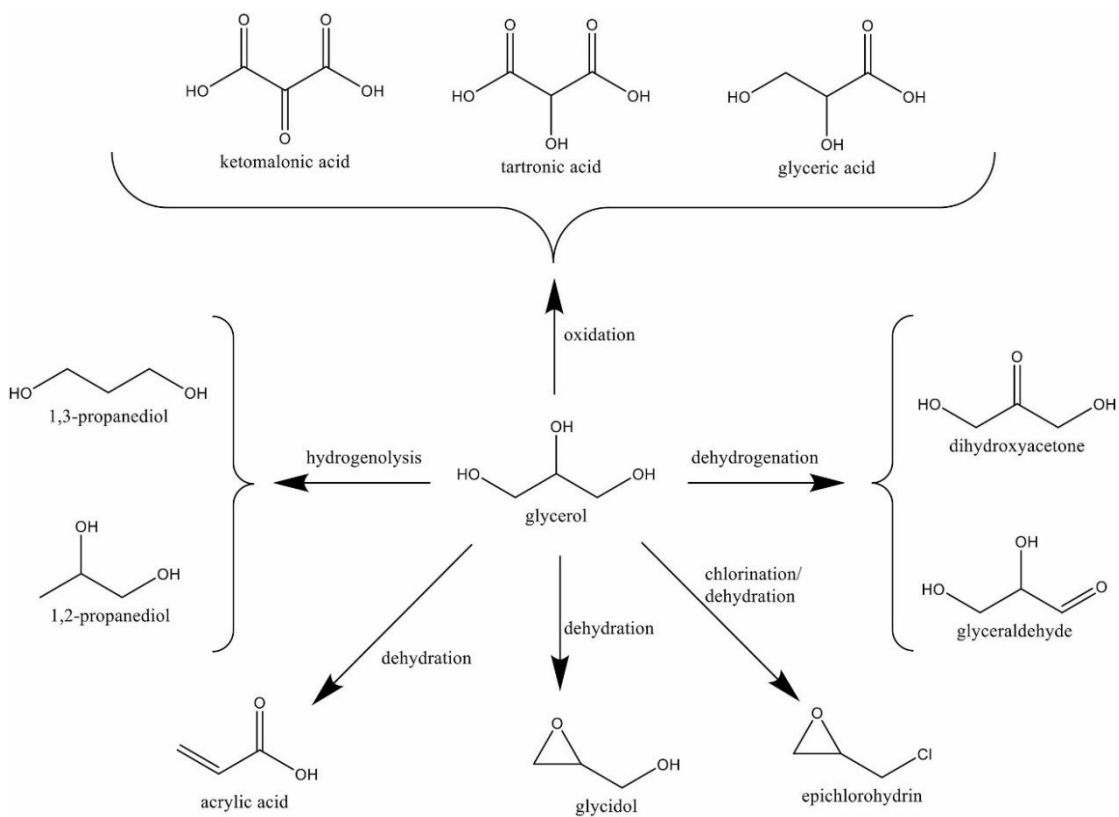
เป็นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของพอลิแอลกอฮอล์ เช่น เซลลูโลส แป้ง หรือน้ำตาล ทำให้เกิดสารผสมของกลีเซอรอล และสามารถทำการแยกกลีเซอรอลออกมาได้ด้วยการกลั่น

นอกจากที่กล่าวมานี้ยังมีกระบวนการอื่น เช่น การสังเคราะห์กลีเซอรอลโดยใช้เอนไซม์ไลเปสจากกระบวนการแตกตัวไขมันและน้ำมัน และการสังเคราะห์กลีเซอรอลของสาหร่ายทะเลโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

2.2.4 การนำกลีเซอรอลจากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลมาใช้ในทางเคมี

เนื่องมาจากปัญหาราคาน้ำมันดิบที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ต้องการหาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่เพิ่มขึ้น หนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจคือการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้ง จะเกิดกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ร้อยละ 10-20 ของปริมาณไบโอดีเซลทั้งหมด กลีเซอรอลจึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น โดยกลีเซอรอลดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมไบโอดีเซลจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มและมีความเข้มข้นอยู่ที่ร้อยละ 40 ถึง 85 ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ส่วนใหญ่กลีเซอรอลดิบจะถูกกำจัดทิ้ง โดยจัดว่าเป็นขยะอุตสาหกรรม และเนื่องจากกระบวนการทำให้บริสุทธิ์นั้นมีต้นทุนที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอลดิบ ตลอดจนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า จึงมีศึกษาเพื่อหาวิธีการเปลี่ยนแปลงกลีเซอรอลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบอื่นด้วยต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก เช่น นำกลีเซอรอลดิบที่เหลือใช้มาทำปฏิกิริยากลิเซโรไลซิส (Glycerolysis) เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นโมโนกลีเซอไรต์หรือผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อทำให้มีความบริสุทธิ์ นอกจากเพิ่มมูลค่า

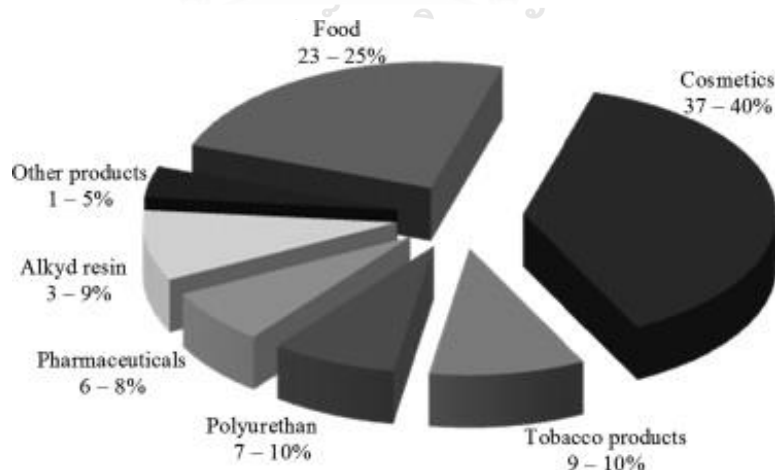
ได้แล้วยังทำให้สามารถนำกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.5 ยกตัวอย่าง เช่น การใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรด เช่น กรดคีโตมาโลนิก (Keto malonic acid), กรดทาร์โทรนิก (Tartronic acid), กรดกลีเซอริก (Glyceric acid) ผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) นอกจากนี้ยังใช้ทำการสังเคราะห์กลีเซอรอลดีไฮด์ (Glyceraldehyde) ผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) เป็นต้น [21]



รูปที่ 2.5 เส้นทางการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นสารเคมี

2.2.5 ประโยชน์ของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยส่วนมากถูกนำไปใช้ในกลุ่มเครื่องสำอางถึงร้อยละ 40 เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางประเภทครีมและโลชั่นเพื่อทำให้ผิวชุ่มชื้นและนุ่มนวล (Moisturizers) รองลงมานำไปใช้เป็นส่วนผสมในอาหารประมาณร้อยละ 25 เช่น สารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภทมาการีน น้ำสลัด และลูกกวาด นอกจากนี้ยังใช้กลีเซอรอลรักษาความชื้นให้กับยาสูบและเป็นส่วนผสมในไส้กรอง ทำให้บุหรี่ติดไฟช้าถึงร้อยละ 10, ใช้เป็นส่วนผสมของยาหลายชนิด (Pharmaceuticals) ประมาณร้อยละ 8, และตัวอย่างอื่นเช่น การใช้กลีเซอรอลเป็นสารเก็บรักษาความชื้น (Humectant), เป็นสารเสริมสภาพของพลาสติกชนิดที่ช่วยเก็บรักษาความอ่อนนุ่มและความเหนียว, ใช้เป็นสารอิมัลชัน (Emulsion), สารละลายกลีเซอรอลฟีนอล (Glycerolphenol) ใช้ในการล้างหู, ใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแห้งแข็งตัวในหลอด, ใช้เป็นสารลดการสูญเสียความชื้น, เป็นตัวทำละลายที่ให้รสหวาน (Sweetener) เช่น ใช้ในน้ำยาบ้วนปากและหมากฝรั่ง, ใช้เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) เนื่องจากมีความเหนียวสูงและไม่เปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ, ใช้กลีเซอรอลเป็นสารประกอบในซีเมน, เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ในยางรถถนน เซรามิกและกาว เป็นต้น การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลจำแนกเป็นสัดส่วนได้ดังรูปที่ 2.6 [22]



รูปที่ 2.6 การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่างๆเฉลี่ยจากทั่วโลก

2.3 พลาสติก (Plastic)

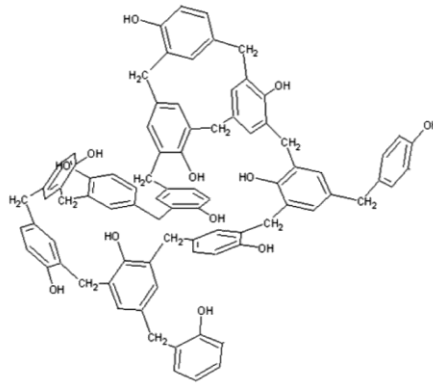
พลาสติก หมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์ (Polymer) และสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ เช่น สีย้อม (Pigment) สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) และฟิลเลอร์ (Filler) พลาสติกเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารประกอบอินทรีย์ พลาสติกโดยทั่วไปสังเคราะห์จากปิโตรเคมี แต่ในปัจจุบันมีพลาสติกที่ทำจากทรัพยากรหมุนเวียนมากขึ้น อย่างเช่น ทำจากกรดพอลิแลคติกที่ได้จากข้าวโพด หรือเอทานอลที่ได้จากอ้อย เป็นต้น พลาสติกเป็นสารประกอบพอลิไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆกัน ต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาว ประกอบด้วยธาตุหลักสำคัญ 2 ชนิด คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน มีสมบัติหลักคือ มีความเสถียร สลายตัวยาก มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้าที่ดี ส่วนมากอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ทำให้สามารถหลอมขึ้นรูปเป็นของแข็งรูปทรงต่างๆได้ง่าย จึงมีการนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่หลากหลาย เช่น ถุงพลาสติก ขวดน้ำ ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์และท่อประปา เป็นต้น ปัจจุบันมีปริมาณการผลิตพลาสติกทั่วโลกมากถึง 359 ล้านตัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกหลากหลายรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้งานมากขึ้น ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ทำจากวัสดุทางชีวภาพบางชนิดก็ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ แม้พลาสติกจะเป็นวัสดุที่มีประโยชน์หลากหลาย แต่ความคงทนของพลาสติกก็นำมาซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมเช่นกัน เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่จะไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้เอง ในระยะหลังจึงพยายามหาวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวมากขึ้น เช่น เพิ่มอัตราการรีไซเคิลพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือนำกลับมาใช้ซ้ำ และมีการรณรงค์ให้ลดการใช้พลาสติก เป็นต้น [23]

2.3.1 ที่มาของพลาสติก

เริ่มมีการสังเคราะห์พลาสติกชนิดแรกของโลกในปี ค.ศ. 1863 เมื่อบริษัทผลิตลูกบิลเลียดในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ประกาศหาวัสดุทดแทนงาช้างเพื่อใช้ในการทำลูกบิลเลียด ต่อมาช่างไม้ชาวอเมริกาชื่อ John Wesley Hyatt พยายามค้นหาวัสดุที่สามารถนำมาใช้แทนงาช้าง โดยค้นพบจากการทำยาสมานแผลหกชื่อ คอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งมีส่วนผสมของไนโตรเซลลูโลสที่

ละลายอยู่ในอีเทอร์และแอลกอฮอล์ โดยเมื่อทิ้งไว้พบว่ายาแห้งเป็นแผ่นและมีความเหนียว Hyatt จึงทำการทดลองต่อจนพบว่าหากเติมการบูรลงไปในของผสมอีเทอร์จะได้วัสดุใหม่ที่ต่อมาเรียกว่า เซลลูลอยด์ (Celluloid) เนื่องจากมีสมบัติทนทานต่อน้ำมัน น้ำและกรด ไม่มีสี จึงทำให้มีสีสันสวยงามได้ง่ายและมีราคาไม่สูง จึงนิยมนำมาทำเป็นลูกบิลเลียดและคีย์เปียโนแทนการใช้งาช้าง หรือทำหวีแทนกระดูกสัตว์ นอกจากนี้ยังนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับและฟิล์มภาพยนตร์ จึงถือว่าเซลลูลอยด์เป็นพลาสติกกึ่งสังเคราะห์ชนิดแรกของโลกที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของ เซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติและนับเป็นจุดเริ่มต้นของอุตสาหกรรมพลาสติก แต่เนื่องจาก เซลลูลอยด์เป็นพลาสติกที่ติดไฟง่ายและสามารถระเบิดได้หากมีปริมาณหมู่ไนโตร ($-NO_2$ group) สูง จึงไม่เป็นที่นิยมในเวลาต่อมา [24]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1907 นักเคมีชื่อ นายลีโอ เบคแลนด์ (Leo Baekeland) ได้ค้นพบวิธีการผลิตเบคไลต์ (Bekelite) มีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 2.7 [25] เบคไลต์เป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดแรกของโลกขึ้นจากสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ และฟีนอล เบคไลต์เป็นพลาสติกแข็ง, ทนความร้อนได้ดีและสามารถขึ้นรูปให้มีรูปร่างต่างๆได้ตามแบบแม่พิมพ์โดยใช้ความร้อน ทำให้มีสีสันสวยงามได้และมีราคาไม่แพง ในช่วงแรกเบคไลต์ถูกนำมาทำเป็นฉนวนเคลือบสายไฟและชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ต่อมามีการพัฒนาใช้เป็นสารเคลือบผิวและผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีคุณภาพและทนทานต่อความร้อนเป็นพิเศษ ต่อมาในช่วงทศวรรษที่ 30-40 ปี ค.ศ. 1942 ช่วงที่เกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 เบคไลต์ถูกนำมาผลิตเป็นโทรศัพท์, แวนตาสำหรับนักบินและด้ามอาวุธที่มีสีดำ โดยหลังจากสงครามสิ้นสุดลงเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection mold) ได้ถูกพัฒนาขึ้น และกำเนิดพลาสติกชนิดใหม่ขึ้น อย่างเช่น ไนลอน (Nylon), ไวนิล (Vinyl) หรืออะคริลิก (Acrylic) นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1935 มีการค้นพบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) โดย Reginald Gibson และ Eric Fawcett หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1939 เกออร์จชาวเยอรมันชื่อ Eduard Simon ได้ค้นพบพอลิสไตรีน (Polystyrene) ต่อมาในปี ค.ศ. 1951 นักเคมีชาวอเมริกันชื่อ Paul Hogan และ Robert Banks ทำการค้นพบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) ภายใต้ชื่อการค้า Marlex และยังได้ค้นพบพอลิโพรพิลีน (Polypropylene)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเบคิลไลด์

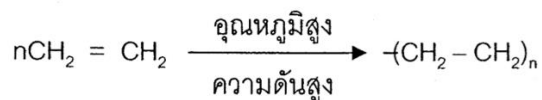
พลาสติกที่ใช้กันทั่วไปในรูปของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ส่วนมากจะมีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียม รวมถึงน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่อยู่ใต้ผิวดินและมีความสำคัญต่อชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ต่างๆ ซึ่งปิโตรเลียมจะอยู่ในสถานะเป็นแก๊ส ของเหลวหรือของแข็งนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน รวมถึงจำนวนหรือการจัดเรียงตัวของคาร์บอนในโมเลกุล โดยทั่วไปสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนไม่เกิน 4 อะตอม จะมีสถานะเป็นแก๊ส ถ้ามีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 5-19 อะตอม จะมีสถานะเป็นของเหลวและถ้ามีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 20 อะตอม จะมีสถานะเป็นของแข็ง โดยสามารถแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดิบในแต่ละสถานะออกเป็นส่วนต่างๆ ได้โดยใช้การกลั่นลำดับส่วน ซึ่งพบว่าปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวเกินกว่าความต้องการใช้งานอยู่มาก แต่กลับมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายสั้นที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าอยู่น้อย จึงต้องนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกินความต้องการมาผ่านกระบวนการแยกสลาย เพื่อตัดความยาวสายโซ่ให้สั้นลง จะได้เป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็ก เช่น เอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเม็ดพลาสติกได้

2.3.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) หมายถึงสารประกอบที่มีหน่วยเล็กๆ หลายหน่วยมาเชื่อมต่อกัน กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมวลโมเลกุลสูง ซึ่งหน่วยย่อยหรือโมเลกุลเริ่มต้นนั้นเรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) โดยพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกัน (Repeating unit) จะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น เช่น พลาสติก โดยอาศัยมอนอเมอร์ที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนผ่านปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่า ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือปฏิกริยาเคมีที่ทำให้มอนอเมอร์ เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทำปฏิกริยาในตำแหน่งที่เป็นพันธะคู่เกิดการต่อกันเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว ภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกริยา, อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์ออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1) การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบต่อเติม (Addition polymerization)

ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบต่อเติมหรือรวมตัว เป็นการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่ไม่อิ่มตัว คือมีพันธะคู่หรือพันธะสามอยู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล เช่น เอทิลีน โพรพิลีนและสไตรีน มาทำปฏิกริยาซึ่งกันและกันจนได้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการทำปฏิกริยาเริ่มต้นจากโมเลกุลที่มีพันธะคู่หรือพันธะสามจะถูกให้ความร้อนและใช้ตัวเร่งปฏิกริยา (Catalyst) ที่เหมาะสม ทำให้พันธะคู่แตกออกกลายเป็นพันธะเดี่ยว ซึ่งอิเล็กตรอนที่เหลือจะมีความว่องไวในการสร้างพันธะหรือทำปฏิกริยายึดติดกับพันธะที่แตกออกของโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกันต่อไป เกิดการต่อกันทีละโมเลกุลจนได้โมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้น จนกระทั่งมอนอเมอร์หมด การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้จะไม่มีการสูญเสียของอะตอม ทำให้ไม่มีผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้น โดยจำนวนอะตอมของธาตุในหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์เท่ากับจำนวนอะตอมในโมเลกุลของมอนอเมอร์ ตัวอย่างพลาสติกที่เกิดจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น **รูปที่ 2.8** เป็นการเกิดปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมจากเอทิลีนมอนอเมอร์กลายเป็นพอลิเอทิลีน เมื่อใช้อุณหภูมิและความดันสูง โดย n คือจำนวนโมเลกุลของมอนอเมอร์



n คือ จำนวนโมเลกุลของมอนอเมอร์

รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิเอทิลีน

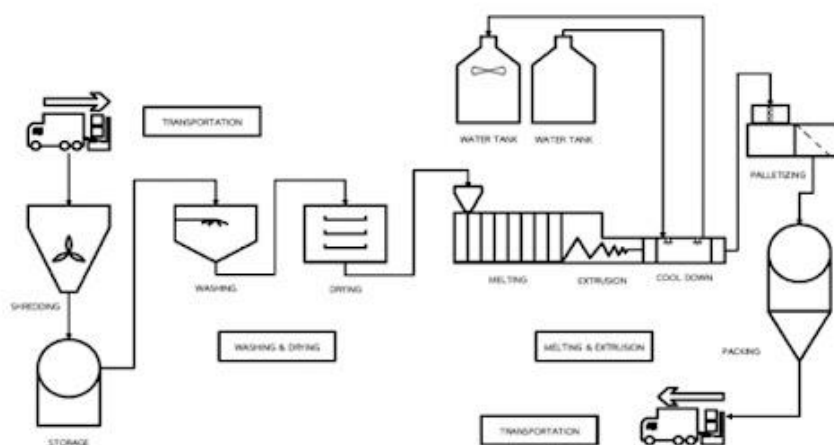
2) การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบขั้นหรือควบแน่น เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่าหนึ่งหมู่ ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและมีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันอย่างน้อยสองหมู่อยู่ที่ปลายสุดของโมเลกุล หรืออาจเกิดจากมอนอเมอร์เพียงหนึ่งชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกันอย่างน้อยสองหมู่ที่ปลายสุดของโมเลกุล ที่สามารถทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่ฟังก์ชันอย่างต่อเนื่องทั้งสองด้าน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์วิธีนี้ส่วนใหญ่จะเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำ (H_2O), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), แอมโมเนีย (NH_3) และเมทานอล (CH_3OH) เป็นผลพลอยได้ (By product) เป็นสาเหตุให้มีจำนวนอะตอมของธาตุในหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์น้อยกว่าจำนวนอะตอมในโมเลกุลของมอนอเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นนี้ มักจะมีโครงสร้างเป็นแบบตาข่ายหรือร่างแห ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงมาก เปราะและหักง่าย หรือสามารถโค้งงอได้เล็กน้อย ตัวอย่างพลาสติกที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการควบแน่น ได้แก่ ไนลอนและพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น [26]

2.3.3 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

เม็ดพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก **ดังรูปที่ 2.9** เริ่มต้นจากการนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งได้จากกลั่นลำดับส่วนออกมาจากน้ำมันดิบมาทำปฏิกิริยากันจนได้เป็นสายโซ่ยาว ที่เรียกว่า พอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย โดยพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้นี้ จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกและนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆต่อไป ยกตัวอย่างเช่น การผลิตเม็ดพลาสติกชนิด

พอลิเอทิลีน (Polyethylene) โดยเริ่มต้นจากการนำแก๊สเอทิลีนที่ถูกกลั่นออกมาจากแก๊สธรรมชาติ แล้วนำไปเก็บในถังปฏิกิริยา พร้อมเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเข้าไป จะเกิดปฏิกิริยากลายเป็น โมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมากเข้ามาต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวขึ้นเกิดเป็น พอลิเอทิลีน ที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวด ถุง และของเล่น เป็นต้น [27]



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก [28]

2.3.4 ประเภทของพลาสติก

สามารถแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อนออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงพลาสติก

1) เทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพอลิเมอร์ที่โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้นๆ เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด เนื่องจากสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด โดยเมื่อพลาสติกได้รับความร้อนหรือผ่านการอัดแรงดันสูงจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถคลายเค้นที่ไปมาได้ง่ายขึ้น และเมื่อเย็นลงจะเกิดการแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและแข็งตัวนี้สามารถเกิดกลับไปมาได้ โดยที่ไม่ทำลายโครงสร้างเดิม

พลาสติกประเภทนี้สามารถทำการขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างต่างๆตามต้องการ ในขณะที่พลาสติกถูกทำให้อ่อนตัวและไหลได้ด้วยความร้อนและความดัน หลังจากที่พลาสติกไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นตัว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยการบดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่พลาสติกประเภทนี้มีข้อเสียและข้อจำกัดของการใช้งานคือ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรง ตัวอย่างของพลาสติกในประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน เป็นต้น

2) เทอร์โมเซตติงพลาสติก

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นแบบร่างแห พันธะระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงมากและมีความเสถียร พลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ จึงหลอมเหลวได้เพียงในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ทำให้มีรูปร่างที่ถาวร เนื่องจากมีการเชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Cross linking) และไม่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้หลังจากพลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้ว จะไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้อีกด้วยการใช้ความร้อน แต่พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออกทันทีเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้เกิดการสลายตัวและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ คุณสมบัติของพลาสติกประเภทนี้คือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี ทนความร้อนและความดัน คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว และเมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก ตัวอย่างเทอร์โมเซตติงพลาสติก เช่น เมลามีน พอลิเอสเทอร์ พอลิยูรีเทน เป็นต้น [29]

2.3.5 การเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นพลังงาน

ขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบในอุดมคติสำหรับการแปลงเป็นพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ที่สามารถช่วยในการจัดการขยะพลาสติกในประเทศกำลังพัฒนา แต่การประยุกต์นำมาใช้นั้นมีความซับซ้อนและต้องพิจารณาปัจจัยบางประการ ตัวอย่างเช่น การบังคับใช้มาตรฐานและการตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่ปัญหาด้านสาธารณสุข รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการลงทุนสูง โดยขยะพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ขยะพลาสติกที่สามารถจัดการได้

อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้วิธี เช่น การผลิตเชื้อเพลิงแข็ง, การผลิตความร้อนโดยการเผา, การรีไซเคิลวัสดุโดยเตาหลอมเหลวและเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานผ่านการแปรสภาพเป็นแก๊สหรือการทำให้เป็นของเหลว และขยะพลาสติกที่ไม่สามารถจัดการได้ เช่น โดยการเผาไหม้อย่างง่ายและโดยการฝังกลบ เป็นต้น ขยะพลาสติกจากในครัวเรือนจะสามารถผลิตพลังงานได้เพียงเล็กน้อยตามข้อกำหนดโดยรวมของไฟฟ้าประมาณร้อยละ 5 ซึ่งข้อดีของการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่นั้นนำไปสู่วิวัฒนาการของวัสดุใหม่ที่มีมูลค่าเพิ่มจากขยะพลาสติกผ่านกระบวนการบำบัดที่หลากหลายและมีการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นพลังงาน โดยเส้นทางการเปลี่ยนจากขยะพลาสติกไปเป็นพลังงานอย่างง่ายเป็น ดังรูปที่ 2.10 [30]



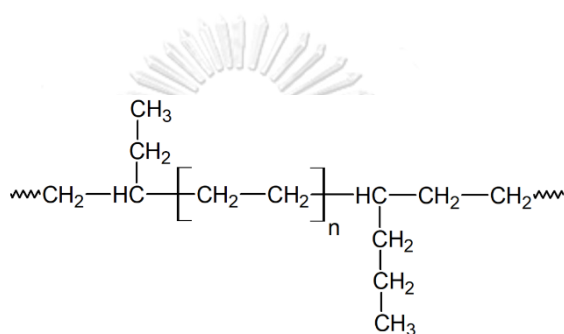
รูปที่ 2.10 เส้นทางการเปลี่ยนขยะพลาสติกไปเป็นพลังงาน

2.3.6 ชนิดของพลาสติก

2.3.6.1) พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE) เป็นพลาสติกชนิดที่มีลักษณะขุ่น มีคุณสมบัติหลักคือ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความเหนียว ทนความร้อนได้ดี ทนต่อแรงดึงปานกลาง ใสน้ำซึมผ่านได้

เล็กน้อย แต่อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ จัดเป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ, ฟิล์ม, ถัง, ถังเย็น, ขวด, แทนรองรับสินค้า เป็นต้น ประเภทของพอลิเอทิลีนถูกจำแนกออกเป็นหลายชนิด ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปอย่างเช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene) เป็นต้น พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 [31] โดยที่ n คือ จำนวนโมเลกุลของหน่วยซ้ำหรือเอทิลีนมอนอเมอร์



รูปที่ 2.11 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน

1) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene หรือ HDPE) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรงที่ค่อนข้างแข็งแต่สามารถยืดได้ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลค่อนข้างสูง จึงมีความแข็งแรง ไม่เปราะแตกง่าย มีสีขาวขุ่น ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะทำให้มีสีส่นสวยงาม ยกเว้นขวดที่ใช้บรรจุน้ำดื่ม ซึ่งจะมีความขุ่นกว่าขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต โดยข้อดีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง คือ มีราคาถูก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนต่อแรงดึง ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อสารเคมีได้ดี จึงนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุสารเคมี อย่างเช่น น้ำยาทำความสะอาด, แชมพูสระผม, แป้งเด็กและถุงพลาสติก นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้นได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ทำขวดนมเพื่อรักษาอายุของนมให้นานขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยังสามารถรีไซเคิลนำไปหลอมกลับมาใช้ได้ใหม่ เช่น ทำไม้เทียม เพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน เป็นต้น

2) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene หรือ LDPE) เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งแสง นิ่ม มีความเหนียว สามารถยืดหยุ่นได้ดี มีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติคือ ทนต่อสารเคมีที่เป็นกรดและด่างได้ดี ทนความร้อนได้ นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร, ถุงใส่ขนมปังและถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร โดยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสามารถนำไปรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนำไปผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะหรือถังขยะ เป็นต้น โดยตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นทรงกลมมนและมีความขุ่น เป็นดังรูปที่ 2.12



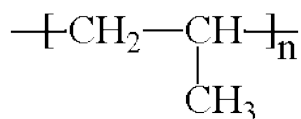
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการทดลอง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.6.2 พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งกว่าพอลิเอทิลีน มีคุณสมบัติคือ ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ทนต่อสารเคมี ความร้อนสูงและน้ำมัน เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีมาก ใสน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย สามารถทำให้มีสีสวยงามได้ และส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้ทำภาชนะและถุงพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนความร้อน, แผ่นและหลอดดูดพลาสติก เป็นต้น และพอลิโพรพิลีนสามารถรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นกล่องแบตเตอรี่รถยนต์, ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชนและกรวยสำหรับน้ำมัน เป็นต้น พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนจะมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.13 [32] โดยที่ n คือจำนวนโมเลกุลของหน่วยซ้ำหรือโพรพิลีนมอนอเมอร์

และตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นทรงกลมมนและมีความใส เป็นดังรูปที่ 2.14



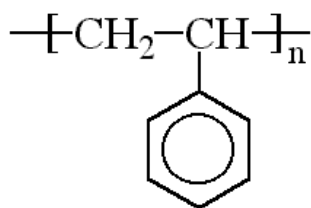
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

2.3.6.3 พอลิสไตรีน

พอลิสไตรีน (Polystyrene หรือ PS) เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งใส เปราะบางและแตกง่าย มีสมบัติคือ ทนต่อกรดและด่าง ใส่น้ำและอากาศซึมผ่านได้พอสมควร นิยมใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงานและภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น นอกจากนี้มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร ซึ่งโฟมจะมีน้ำหนักที่เบามาก เนื่องจากประกอบด้วยพอลิสไตรีนประมาณร้อยละ 2-5 เท่านั้น และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัดหรือของใช้อื่นๆ พลาสติกชนิดพอลิสไตรีนจะมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.15 [33] โดยที่ n คือจำนวนโมเลกุลของหน่วยซ้ำหรือสไตรีนมอนอเมอร์ และตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แต่ละเม็ดมีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นท่อนสั้นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความใส เป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 โครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.2 ประเภท คุณสมบัติและตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของพลาสติกชนิดต่างๆ

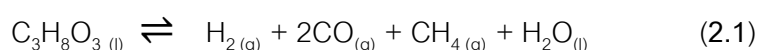
ชนิดของพลาสติก	ประเภทของพลาสติก	สมบัติบางประเภท		ตัวอย่างการใช้ประโยชน์
		สีของเปลวไฟเมื่อเผาไหม้	ข้อสังเกตอื่น	
พอลิเอทิลีน	เทอร์โมพลาสติก	น้ำเงินขอบเหลือง เปลวไฟจะไม่ดับเอง, มีกลิ่นคล้ายกับพาราฟิน,	เกิดรอยเมื่อโดนขีด, จะไม่ละลายในสารละลายทั่วไป	ถุง, ภาชนะ, फिल्मถ่ายภาพ, ของเล่นเด็ก
พอลิโพรพิลีน	เทอร์โมพลาสติก	น้ำเงินขอบเหลือง ค่อนข้างขาว, มีกลิ่นคล้ายกับพาราฟิน	ไม่เกิดรอยเมื่อโดนขีด, ไม่แตก	ชิ้นส่วนรถยนต์, บรรจุภัณฑ์อาหาร
พอลิสไตรีน	เทอร์โมพลาสติก	เหลือง, มีเขม่าเเยะ, มีกลิ่นคล้ายกับแก๊สจุดตะเกียง	เปราะ, จะละลายได้ในคาร์บอนเตตระคลอไรด์และโทลูอีน	อุปกรณ์ไฟฟ้า, เลนส์, โฟม, อุปกรณ์กีฬา

จากตารางที่ 2.2 สรุปประเภท คุณสมบัติและตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน ซึ่งพลาสติกทั้งสามชนิดนี้จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกและยกตัวอย่างสมบัติบางประเภทนอกเหนือจากที่กล่าวมา รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากนำไปใช้ประโยชน์จากพลาสติกเหล่านี้ เช่น พอลิเอทิลีน นิยมใช้ทำถุง, ภาชนะ, फिल्मถ่ายภาพและของเล่นเด็ก ส่วนพอลิโพรพิลีน ใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์, บรรจุภัณฑ์อาหาร และพอลิสไตรีน จะใช้ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า, เลนส์, โฟม, อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น

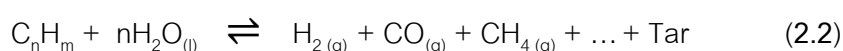
2.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส ถือเป็นกระบวนการสำหรับการรีไซเคิลทางความร้อนของพลาสติกหรือเป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีโดยใช้ความร้อน (Thermochemical decomposition) ที่เหมาะสมวิธีหนึ่งในการเปลี่ยนพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สได้มากกว่ากระบวนการอื่นเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเป็นการทำลายพันธะเคมีในโครงสร้างของพลาสติกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 800 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็นของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) และส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการนี้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกสลาย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามสถานะของผลิตภัณฑ์ คือ ผลิตภัณฑ์แก๊สหรือสารระเหย ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นหรือทาร์ (Tar) และผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือชาร์ (Char) โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น การเกิดไพโรไลซิสอย่างง่ายของกลีเซอรอลและพลาสติกเป็นดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 [34]

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกลีเซอรอล (Glycerol pyrolysis) ดังในสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของพลาสติก (Plastic pyrolysis) ดังในสมการที่ 2.2



2.5 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ไฮโดรเจน ในภาษาละตินเรียก ไฮโดรเจเนียม (Hydrogenium) เป็นธาตุแรกในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ H ไฮโดรเจนเป็นอโลหะและมีอิเล็กตรอนตัวนอกสุด (Valence electron) เพียงตัวเดียว มีเลขอะตอมเท่ากับ 1 ซึ่งไฮโดรเจนอะตอมจะประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ภายในนิวเคลียสประกอบด้วยโปรตอน, นิวตรอนและมีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนอก ไฮโดรเจนมีอยู่สามไอโซโทป ขึ้นกับจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนที่ต่างกัน ดังนี้

- โปรเทียม (Protium หรือ ^1H) เป็นไอโซโทปที่พบมากที่สุดของไฮโดรเจน มีจำนวนโปรตอน 1 โปรตอน แต่ไม่มีนิวตรอน มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 1.0078

- ดิวเทอเรียม (Deuterium) มีจำนวนโปรตอน 1 โปรตอน จำนวนนิวตรอน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 2.0141

- ทริเทียม (Tritium) มีจำนวนโปรตอน 1 โปรตอน จำนวนนิวตรอน 2 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 3.0161

ไฮโดรเจนมักจะอยู่ในรูปของแก๊สที่มีโมเลกุล 2 อะตอม มีสูตรโมเลกุลเป็น H_2 ซึ่งมีความไวไฟสูง ถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงอนาคต เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเมื่อเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจนจะเกิดเพียงไอน้ำเป็นผลพลอยได้ ซึ่งมีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงชนิดอื่น ที่ให้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) จึงส่งผลกระทบต่อตรงทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้น (Global warming) [35]

2.5.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุพบได้มากที่สุด เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและมีน้ำหนักเบา ถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีความไวต่อไฟสูงและจะเผาไหม้ในอากาศที่มีช่วงความเข้มข้นกว้างมากระหว่างร้อยละ 4 ถึง 75 โดยปริมาตร จึงมีคุณสมบัติเป็นเหมือนเชื้อเพลิง เนื่องจากไฮโดรเจนไม่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อน แต่อาจจะทำให้โลหะบางชนิดเปราะได้เมื่ออุณหภูมิและความดันสูง ส่วนใหญ่จะไม่ค่อยพบไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ดังนั้นไฮโดรเจนจึงต้องถูกผลิตขึ้นมา โดยส่วนมากไฮโดรเจนสามารถทำปฏิกิริยาได้กับธาตุชนิดอื่นๆแล้ว

อยู่ในรูปของสารประกอบ โดยที่พบมากที่สุดมักอยู่ในโมเลกุลของน้ำ สารประกอบอินทรีย์และในสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ ไฮโดรเจนมีพลังงานพันธะหรือแรงยึดระหว่างโมเลกุลเท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นเมื่อต้องการให้โมเลกุลของไฮโดรเจนเกิดการทำปฏิกิริยา จึงต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะระหว่างอะตอมเพื่อทำลายความแข็งแรงในการยึดโมเลกุล เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น [36]

2.5.2 ความสามารถในการติดไฟของไฮโดรเจน

ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 4 ถึง 74 ในอากาศและพลังงานในการจุดเพียงแค่อเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการลุกไหม้เป็นไฟอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการระเบิดที่อาจจะเกิดขึ้น จึงต้องกำจัดแหล่งที่อาจจะก่อให้เกิดประกายไฟขึ้น เช่น ประกายไฟจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประจุไฟฟ้า เปลวไฟหรือบริเวณที่มีความร้อนสูง ซึ่งไฮโดรเจนที่ปนอยู่ในอากาศในระดับที่ติดไฟได้สามารถระเบิดและลุกไหม้เป็นเปลวไฟสีน้ำเงินจางๆ หรือแทบจะมองไม่เห็น

2.5.3 ข้อดีของพลังงานไฮโดรเจน

ข้อดีของการใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานที่สะอาด จึงนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ของยานพาหนะ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากระบบการเผาไหม้น้ำมันธรรมดาเป็นการเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจนนั้น ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ดีขึ้น จะสามารถลดการสร้างแก๊สพิษ อย่างเช่น CO, CO₂, NO_x, VOCs, SO_x, แก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น และเขม่าควันสู่สภาพแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดการเกิดภาวะเรือนกระจกของโลกและช่วยลดการบางลงของชั้นโอโซน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์นี้จัดว่าเป็นก๊าซสำคัญที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวถึงร้อยละ 50 และอีกร้อยละ 50 คือก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) และเขม่าควันที่เหลือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีข้อดีในด้านของเศรษฐกิจคือ ใช้เป็นอีกทางออกหนึ่งเพื่อลดการขึ้นตรงของเศรษฐกิจกับราคาน้ำมัน เนื่องจากในแต่ละประเทศจะมีแหล่งพลังงานเบื้องต้นเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจนเดิมอยู่แล้ว [37]

2.5.4 การนำไฮโดรเจนไปใช้ประโยชน์

มีการนำไฮโดรเจนไปผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการบ้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะรวมตัวกันก่อให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้า ความร้อนและน้ำ ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการส่งจรวดขึ้นไปในอวกาศ โดยควันสีขาวที่พุ่งออกมาคือ น้ำ และในปัจจุบันไฮโดรเจนส่วนมากผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuels) เช่น แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียมในกระบวนการกลั่นน้ำมัน ส่งผลให้เชื้อเพลิงฟอสซิลลดน้อยลง จึงมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตจะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้โดยตรงจากน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนและสามารถแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากน้ำเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ และเมื่อเกิดการสลายก็จะได้น้ำกลับมาเป็นผลผลิตอีก ซ้ำเป็นวัฏจักรหมุนเวียนไปเช่นนี้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนสามารถใช้เป็นผลพลอยได้ในอุตสาหกรรมทางเคมี เพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรคาร์บอน, กรดฟอร์มิก, กรดไฮโดรคลอริก, โพลีเอทิลีน, เมทาคริลิต, เมทานอลและแอมโมเนียที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวทำละลายและสารตั้งต้นที่สำคัญอื่นๆ เช่น พอร์มาลดีไฮด์, กรดอะซิติก, เมทิล เทอร์ค-บิวทิลอีเทอร์และยูเรีย นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารจะใช้ไฮโดรเจนเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เติมไฮโดรเจน เช่น มากา린และไขมันที่เติมไฮโดรเจน เป็นต้น ดังนั้นพลังงานจากไฮโดรเจนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานแบบเดิมได้ [38]

2.5.5 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermal process), กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrolytic process) และกระบวนการทางชีวเคมี (Photolytic process) [39, 40]

1) กระบวนการทางความร้อนเคมี (Thermo-chemical process)

เป็นการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีการทางเคมีโดยใช้ความร้อน โดยวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้จะเป็นพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น พลาสติก แก๊สธรรมชาติ ชีวมวล ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ ที่ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), มีเทน (CH_4) และน้ำ (H_2O) จากนั้นจะผ่านกระบวนการอื่นเพิ่มเติมเพื่อทำให้ได้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ตัวอย่างวิธีการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กระบวนการ

ทางความร้อนเคมี เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งในปัจจุบันการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจากแก๊สธรรมชาติเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันแพร่หลายในเชิงพาณิชย์มากที่สุด

2) กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolytic process)

กระบวนการนี้เป็นการนำไฟฟ้ามาใช้เพื่อแยกน้ำออก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน (O_2) ซึ่งไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการนี้จะไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างของแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้า เช่น พลังงานหมุนเวียน (Renewable sources) หรือพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

3) กระบวนการชีวเคมี (Biophotolysis or Photolytic process)

กระบวนการนี้จะใช้พลังงานแสงหรือแสงแดดจากธรรมชาติ เพื่อแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการทางชีวภาพของสาหร่ายเซลล์เดียวและแบคทีเรียในการแยกน้ำได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน เช่น Photobiological water splitting, Photoelectrochemical water splitting เป็นต้น

2.6 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกลีเซอรอล

ประโยชน์ของกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล นอกจากจะนำไปใช้โดยตรงในอุตสาหกรรมต่างๆ แล้ว ยังมีความน่าสนใจในการนำมาใช้ในด้านของเชื้อเพลิง เนื่องจากกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีความบริสุทธิ์ต่ำ ทำให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่ต่ำ หากจะนำกลีเซอรอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงด้วยการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อนจะทำให้กลีเซอรอลสลายตัวได้สารพิษชนิดหนึ่งที่เรียกว่า อะโครลีน (Acrolein) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นวิธีการนำกลีเซอรอลดิบมาใช้ประโยชน์ในด้านของเชื้อเพลิง โดยการนำมาผลิตเป็นไฮโดรเจน ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอลได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังไม่ทำให้เกิดมลพิษที่จะผลต่อกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลสามารถทำได้จากกระบวนการต่างๆ ดังนี้ กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis), กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming), กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation), กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Auto-thermal reforming), กระบวนการเอเค

วียสเฟสรีฟอร์มมิง (Aqueous-phase reforming หรือ APR), กระบวนการซูเปอร์คริติคัลวอเตอร์รีฟอร์มมิง (Supercritical water reforming หรือ SCWR) และกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (Biochemical conversion process) [41]

2.7 รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ถือเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีการลงทุนไม่สูงมาก สามารถทำได้ง่ายและได้ผลผลิตไฮโดรเจนที่สูง โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นแก๊สธรรมชาติ สารอินทรีย์ หรือเอทานอลหมักจากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น กระบวนการนี้เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับแก๊สธรรมชาติหรือสารอินทรีย์ อุณหภูมิที่ในช่วงประมาณ 700-1,100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์หรือซินแก๊ส (Synthesis gas หรือ Syngas) คือแก๊สที่ผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยจากการศึกษาของงานวิจัยนี้จะใช้กลีเซอรอล ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและถือเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเพื่อผลิตเป็นไฮโดรเจน โดยสรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติก ได้เป็นสมการต่างๆ ดังนี้

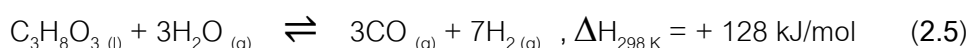
ปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอลจะเป็นดังสมการที่ 2.3



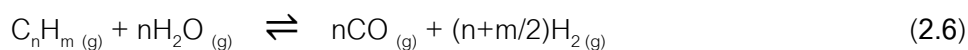
ปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สชิฟ (Water - Gas Shift reaction) เป็นดังสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงรวมของกลีเซอรอลจะเป็นดังสมการที่ 2.5



ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของพลาสติกหรือไฮโดรคาร์บอนเป็นดัง**สมการที่ 2.6**

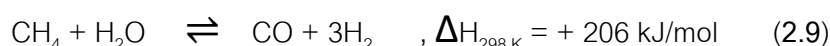


ในกระบวนการนี้จะเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญขึ้นนั่นคือจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวน 3 โมล และไฮโดรเจนจำนวน 4 โมล ดัง**สมการที่ 2.3** และปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water - Gas Shift reaction) เป็นปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่เหลืออยู่ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดัง**สมการที่ 2.4** ดังนั้นปฏิกิริยารวมของการเกิดรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลดัง**สมการ 2.5** พบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอลจำนวน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับไอน้ำจำนวน 3 โมล จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนจำนวน 7 โมล และคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวน 3 โมล ตามสัดส่วนกับปริมาณสัมพัทธ์ของปฏิกิริยา และจาก**สมการที่ 2.6** การเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของพลาสติกหรือไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic process) ปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สามารถเกิดได้ดีขึ้น แม้ว่าปฏิกิริยานี้จะให้ปริมาณไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลักค่อนข้างมาก แต่ยังมีผลพลอยได้จากปฏิกิริยา อย่างคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีประสิทธิภาพลดลง อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำในการผลิตไฮโดรเจนยังเป็นที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากได้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนสูงถึงร้อยละ 95 นอกจากนี้อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล อย่างปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation reaction) ดัง**สมการที่ 2.7** และ **2.8** โดยมีเทนเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูง และอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งร่วมด้วย เพื่อให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงของมีเทน (Methane dry reforming) ดัง**สมการที่ 2.9** และ **2.10** โดยจาก**สมการที่ 2.3-2.6** และ **2.9** พบว่ามีคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นมาร่วมด้วย ดังนั้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยาไอน้ำ นั่นคือการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (WGS reaction) เพื่อให้ได้ไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ใน**สมการที่ 2.4**

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation reaction)



ปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิงของมีเทน (Methane dry reforming)

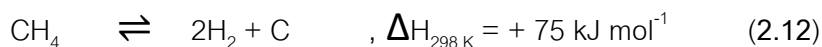


นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงหลายอย่างเกิดขึ้นที่สามารถส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโค้กหรือการสะสมของคาร์บอนขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Formation of coke) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เป็นดังสมการที่ 2.11 - 2.14

ปฏิกิริยา CO disproportionation หรือ Boudouard ดังสมการที่ 2.11



ปฏิกิริยาการสลายตัวของมีเทน (Methane decomposition หรือ Methane cracking) ดังสมการที่ 2.12



ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide reduction) ดังสมการที่ 2.13



ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide reduction) ดังสมการที่ 2.14



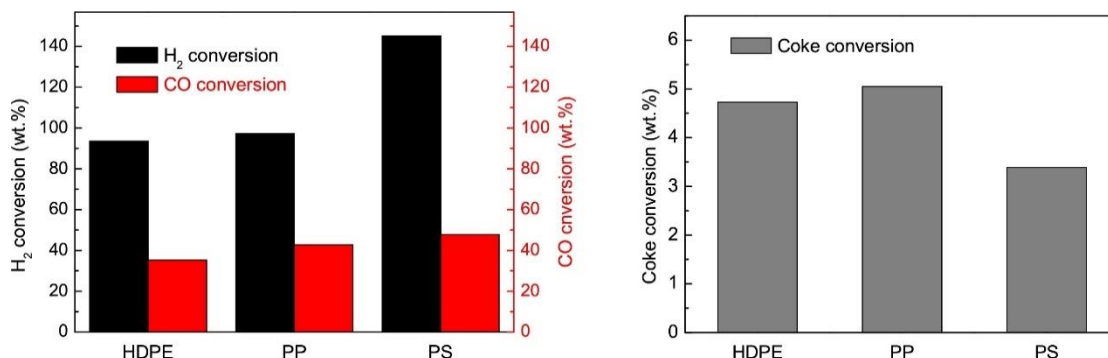
ไฮโดรเจนที่ใช้ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่ได้มาจากการผลิตโดยกระบวนการดังกล่าวเป็นหลัก ปฏิกริยาทั้งหมดเป็นปฏิกริยาที่สามารถย้อนกลับได้และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกริยาที่เหมาะสมร่วมด้วย จากสมการเคมีแสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาที่ 2.7 และ 2.8 เป็นปฏิกริยาแบบดูดความร้อน (Endothermic reaction) และความสามารถในการเกิดปฏิกริยาถูกควบคุมด้วยอิทธิพลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนสูง ซึ่งจำเป็นต้องทำปฏิกริยาที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้นทุนในการผลิตไฮโดรเจนสูงตามไปด้วย [2, 6, 42-44]

2.8 ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิล/อลูมินา (Ni/Al_2O_3)

ตัวเร่งปฏิกริยาที่พบมากที่สุดสำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล นิยมเตรียมจากโลหะหลักหลายชนิดเพื่อใช้เป็นเฟสที่ว่องไว (Active phase) นั่นคือนิกเกิล (Ni) และพวกโลหะมีตระกูลอย่าง Pt, Ir, Ru, Rh และ Pd เป็นต้น มักพบการใช้นิกเกิลที่อยู่บนส่วนรองรับ อย่างอลูมินา (Alumina : Al_2O_3), คาร์บอน (Carbon) หรืออลูมินาที่ถูกลดด้วยซีเรียม (Cerium), แลนทานัม (Lanthanum), แมกนีเซียม (Magnesium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium) โดยแกมมา-อะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ถือเป็นตัวรองรับ (Support) พื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับรองรับตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เนื่องจากมีความเสถียรเชิงกล, พื้นที่ผิวสูงปานกลาง, ความต้านทานต่อการเผาในช่วงอุณหภูมิกว้างและระดับการกระจายตัวของโลหะสูง แต่มีข้อเสียคือจะส่งเสริมให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและได้เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นกรดของอลูมินา จากการศึกษาพบว่านิกเกิล มีความสามารถในการทำลายพันธะ C-C, C-H และ O-H สูงและส่งเสริมการเกิดปฏิกริยาวอเตอร์แก๊สชิฟท์ให้เปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แต่สามารถยับยั้งการแตกแยกของพันธะ C=O และการเกิดไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของ CO หรือ CO_2 ซึ่งจะนำไปสู่การก่อตัวของอัลเคนหรือสารประกอบที่มีขั้วมากขึ้น นอกจากนี้นิกเกิลมีข้อดีคือ มีราคาไม่แพงและสามารถหาได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะมีตระกูลตัวอื่น (Noble metals) ทำให้ตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้นิกเกิลจึงเป็นที่นิยมสำหรับปฏิกริยานี้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิล/อลูมินาด้วยวิธีการอิมเพรเกชัน (Impregnation) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยานี้ เนื่องจากมีขั้นตอนในการเตรียมที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นในการรวมโปรโมเตอร์ตัวเร่งปฏิกริยาที่แตกต่างกัน แต่ตัวเร่งปฏิกริยานี้ยังมีข้อเสียคือ สามารถเกิดการเสื่อมสภาพ (Deactivation) โดยการเกิดการสะสมของคาร์บอน (Carbon formation) และการเผาผนึก (Sintering) ของอนุภาคโลหะ [45]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yao และคณะ [46] ตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ สามแบบที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วม วิธีอิมเพกเนชันและวิธีโซล-เจลสำหรับไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของขยะพลาสติก โดยทำการศึกษาอิทธิพลของวิธีการไหลตุนิกเกิล (Ni) ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งใช้วัสดุตั้งต้นเป็นพลาสติกสามชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) ซึ่งเป็นขยะพลาสติกที่พบมากที่สุดจากทั่วโลกและเปรียบเทียบกับการผลิตซินแก๊ส จากผลการศึกษาประสิทธิภาพโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลที่เตรียมโดยวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน พบว่ามีความสัมพันธ์กับความพรุน (Porosity), การกระจายตัวของโลหะ (Metal dispersion) และประเภทของการสะสมของโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา ความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและการกระจายตัวของนิกเกิลได้ถูกปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้วิธีโซล-เจล ทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 305.21 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดอนุภาคนิกเกิลเฉลี่ย 15.40 นาโนเมตร ซึ่งมีความสามารถสูงสุดในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามที่ทำการตรวจสอบ และพบว่าประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิผลน้อยที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากการตกตะกอนร่วม ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของนิกเกิลที่สม่ำเสมอและการสะสมของโค้กอสถูฐานบนตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้รูปที่ 2.17 เป็นการแปลงสภาพของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และโค้ก เมื่อใช้ชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินาที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (Ni/Al-Sg) พบว่าประเภทของพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนนั้น เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวมากขึ้นในสภาวะที่ตรวจสอบ ทำให้ได้ผลผลิตของไฮโดรเจนและโค้กสูง อย่างไรก็ตามความสามารถในการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่มีตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเห็นผลได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ที่ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้นและเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งโดยรวมแล้วการผลิตซินแก๊สสูงสุดนั้นทำได้จากพลาสติกชนิดพอลิสไตรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินาที่เตรียมด้วยโซล-เจล ที่ทำการผลิตไฮโดรเจนได้ถึง 62.26 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก และคาร์บอนมอนอกไซด์ 36.10 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก



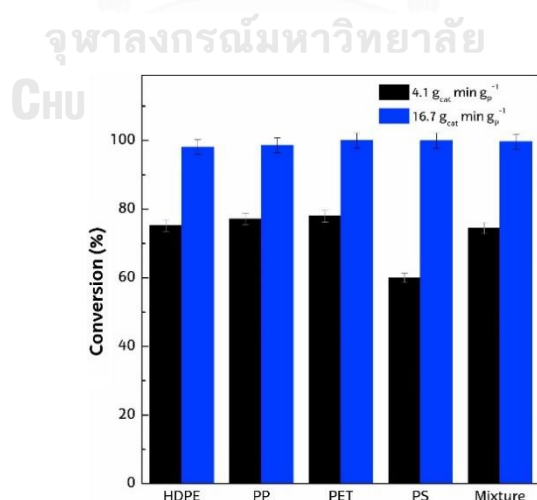
รูปที่ 2.17 การแปลงสภาพของ H₂, CO และ Coke เมื่อใช้ชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (Ni/Al-Sg)

Barbarias และคณะ [47] ประยุกต์ใช้และศึกษาประสิทธิภาพของระบบปฏิกิริยาของขั้นตอนนั้นคือ ไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่ง โดยประเมินการผลิตไฮโดรเจนจากพลาสติกชนิดต่างๆ อย่างพอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) พอลิสไตรีน (PS) ที่มีองค์ประกอบและส่วนผสมของพลาสติกที่ต่างกัน (ในอัตราส่วน HDPE: 48, PP: 35, PS: 9 และ PET: 8 ร้อยละโดยปริมาตร) ซึ่งทำการบ้อนพลาสติกโดยใช้ระบบแบบต่อเนื่อง สอดคล้องกับอัตราการบ้อนของไอน้ำต่อพลาสติกเป็น 4 ในขั้นตอนไพโรไลซิสถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดชนิด Conical spouted ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเกิดรีฟอร์มมิ่งของสารระเหยจากไพโรไลซิสถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การกำหนดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แยกกันทั้ง 2 สายการผลิตนี้ได้ถูกพัฒนาในขั้นตอนการรีฟอร์มมิ่งของสารระเหยพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE) จากไพโรไลซิส และงานวิจัยนี้อธิบายอิทธิพลขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสที่ได้จากพลาสติกชนิดต่างๆ ที่มีต่อขั้นตอนการเกิดรีฟอร์มมิ่ง, การแปลงสภาพ, ผลได้ของผลิตภัณฑ์และพฤติกรรมการณ์เสื่อมสภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งในขั้นตอนไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งจะถูกวิเคราะห์โดยออนไลน์แก๊สโครมาโทกราฟีและไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในพฤติกรรมการณ์เกิดรีฟอร์มมิ่งของพลาสติก โดย HDPE และ PP และ PS ถูกแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้อย่างสมบูรณ์เพื่อบ้อนเข้าสู่ขั้นตอนรีฟอร์มมิ่ง ในขณะที่ PET จะมีการผลิตสารตกค้างที่เป็นของแข็ง และจากตารางที่ 2.3 พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจะสูงขึ้นในกรณีของพอลิเอทิลีน (37.3 ร้อยละโดยปริมาตร)

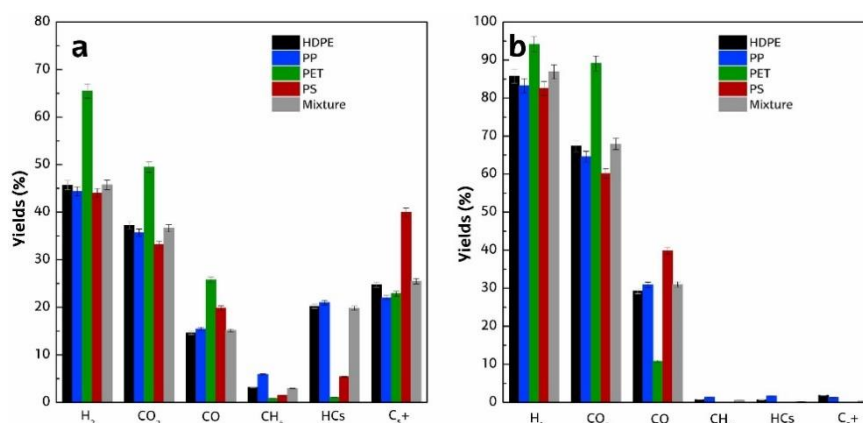
พอลิโพรพิลีน (34.8 ร้อยละโดยปริมาตร) ตามด้วยพอลิสไตรีน (29.1 ร้อยละโดยปริมาตร) และต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดสำหรับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (18.2 ร้อยละโดยปริมาตร) นอกจากนี้รูปที่ 2.18 การแปลงสภาพ และรูปที่ 2.19 ผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เวลาเป็นศูนย์ในขั้นตอนรีฟอร์มมิ่งเมื่อป้อนชนิดพลาสติกที่แตกต่างกันและส่วนผสมของพลาสติกเข้าสู่ขั้นตอนไพโรไลซิสสำหรับสองช่วงเวลาที่ศึกษา (a) 4.1 และ (b) 16.7 $\text{g}_{\text{cat}}\text{min g}_p^{-1}$ พบว่า PET ให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุดในช่วง 16.7 $\text{g}_{\text{cat}}\text{min g}_p^{-1}$ หลังจากทำการประเมินวิวัฒนาการของการแปลงสภาพและการกระจายผลิตภัณฑ์ตามเวลาบนสตรีมสำหรับพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ศึกษา และอัตราการเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสัมพันธ์กับปริมาณและสัณฐานวิทยาของโค้กที่สะสมอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาของการรีฟอร์มมิ่ง ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งมีความเหมาะสมสำหรับการลดปัญหาในการดำเนินงานให้น้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงดำเนินการในระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.3 การผลิตไฮโดรเจนจากไพโรไลซิสรีฟอร์มมิ่งของชนิดพลาสติกที่แตกต่างกันและส่วนผสมของพลาสติกที่ต่างกัน

Feed	HDPE	PP	PET	PS	Mixture
H ₂ production (wt%)	37.3 ± 0.8	34.8 ± 0.7	18.2 ± 0.4	29.1 ± 0.6	32.5 ± 0.7



รูปที่ 2.18 การแปลงสภาพที่เวลาเป็นศูนย์ในขั้นตอนรีฟอร์มมิ่งเมื่อป้อนชนิดพลาสติกที่แตกต่างกันและส่วนผสมของพลาสติกเข้าสู่ขั้นตอนไพโรไลซิส

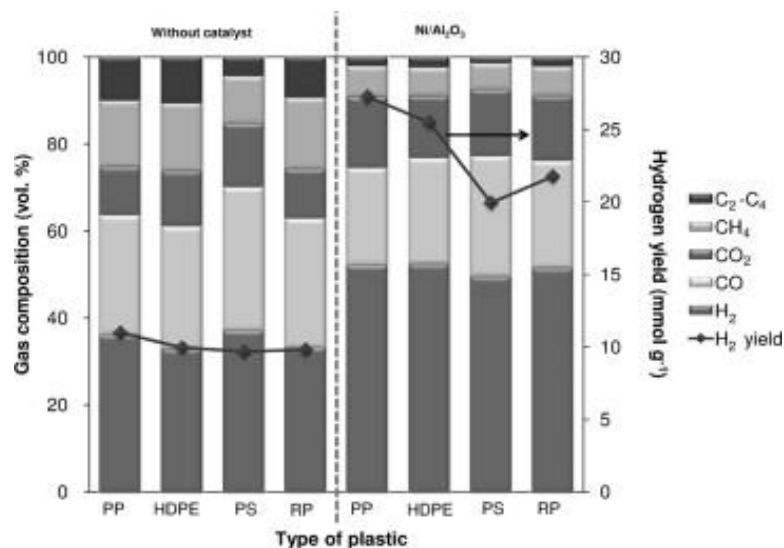


รูปที่ 2.19 ผลได้ที่เวลาเป็นศูนย์บนสตริมในไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงของชนิดพลาสติกที่แตกต่างกัน สำหรับสองช่วงเวลาที่ศึกษา (a) 4.1 และ (b) 16.7 $\text{g}_{\text{cat}}\cdot\text{ming}_p^{-1}$

Lima และคณะ [48] เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-based ที่เตรียมโดยวิธีการอิมเพกเนชันและวิธีการตกตะกอนร่วมในการผลิตไฮโดรเจนโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา Ni ที่รองรับและตกตะกอนร่วมจะถูกส่งเสริมโดย Mg นอกจากนี้ได้ประเมินอิทธิพลของขั้นตอนการรีดักชันต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล ซึ่งคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแสดงโดย XRD, SBET, TPR, NH_3 -TPD, TPO และ SEM หรือ TEM การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดำเนินการในช่วงตั้งแต่ 500 ถึง 650 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดท่อ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สถูกวิเคราะห์โดยแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการอิมเพกเนชันมีขนาดของผลึก Ni^0 เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ Ni ถูกอิมเพกบนอลูมินาเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่บางส่วนของ Ni ด้วย Mg นั้นจะลดขนาดของผลึก, ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ Ni, ลดความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มความเสถียร ส่งผลให้เกิดปริมาณคาร์บอนลดลงและเพิ่มความต้านทานต่อการเผาผลาญ (Sintering) ของ Ni และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการตกตะกอนร่วมจะมีขนาดผลึกต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการอิมเพกเนชัน นอกจากนี้ความสามารถในการเลือกไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ถูกรีดิวซ์แสดงความสามารถในการเลือกไฮโดรเจนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกรีดิวซ์ก่อนหน้านี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ถูกรีดิวซ์ที่ถูกอิมเพกด้วย Ni ร้อยละ 20 แสดงให้เห็นถึงการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดถึงร้อยละ 55 ที่อุณหภูมิ 650 องศา

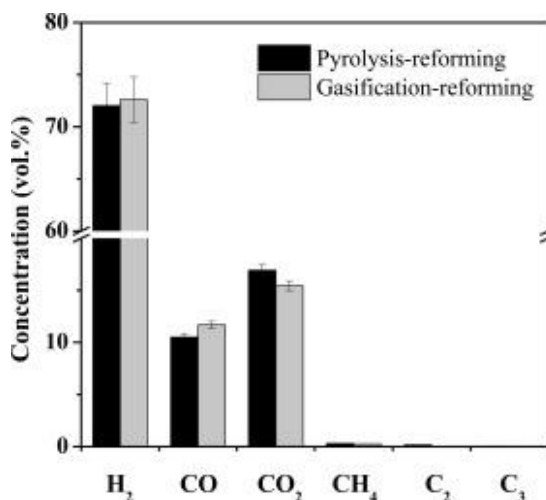
เซลเซียส และตัวอย่างที่ไม่ถูกรีดิวซ์ที่เตรียมโดยการตกตะกอนร่วม แสดงขนาดผลึก Ni^0 ที่เล็กกว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นขั้นตอนรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงไม่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้

Alvarez และคณะ [49] ศึกษา co-pyrolysis/gasification ของชีวมวลและพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลการทำงานร่วมกันระหว่างวัสดุทั้งสองนี้ เพื่อเพิ่มการผลิตและความเข้มข้นของไฮโดรเจน โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณพลาสติกและชนิดของพลาสติกที่ป้อนและการมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจน เมื่อตรวจสอบการเพิ่มพลาสติกในไพโรไลซิสด้วยไอน้ำ/การทำให้เป็นแก๊สของชีล้อยไม้ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพื่อเพิ่มการผลิตไฮโดรเจน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนชีวมวล/พลาสติกในวัตถุดิบเริ่มต้น โดยนำพอลิโพรพิลีน 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักมาผสมกับชีล้อยไม้ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เพื่อตรวจสอบผลกระทบของประเภทพลาสติก, ส่วนผสมของสารชีวมวล 80 ร้อยละโดยน้ำหนักและ 20 ร้อยละโดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน, พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง, พอลิสไตรีนหรือส่วนผสมของพลาสติก ผลการทดลองดังรูปที่ 2.20 พบว่าการเติมพอลิโพรพิลีนเพิ่มผลผลิตของแก๊สและไฮโดรเจนอย่างเห็นได้ชัด พบว่าได้ผลผลิตแก๊สที่สูงขึ้น (56.9 ร้อยละโดยน้ำหนัก) และความเข้มข้นและการผลิตไฮโดรเจนที่สูงขึ้น (36.1 ร้อยละโดยปริมาตรและ 10.98 มิลลิโมล H_2 ต่อกรัม ตามลำดับ) นอกจากนี้ผลผลิตและความเข้มข้นของ CO และ CO_2 ลดลง เมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 20 โดยน้ำหนัก และการมีตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ผลผลิตแก๊สและการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีความสามารถในการทำลายพันธะ C-C และเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แก๊สและปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ทำให้เกิดปริมาณโค้กที่ต่ำมาก (น้อยกว่า 1 ร้อยละโดยน้ำหนักในทุกกรณี) ซึ่งวัสดุคาร์บอนที่สะสมไว้เป็นชนิดเส้นใย (filamentous) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สของชีล้อยไม้และพลาสติก



รูปที่ 2.20 องค์ประกอบของแก๊สและการผลิตไฮโดรเจนสำหรับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน

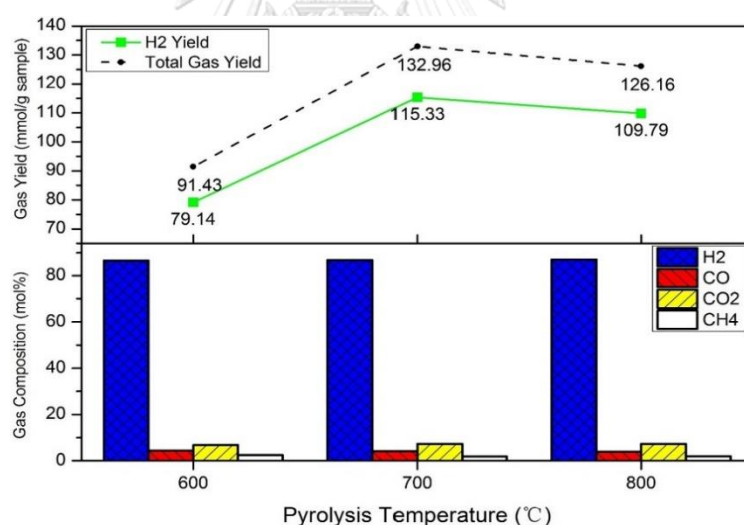
Erkiaga และคณะ [50] ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ไนโตรเจนและไอน้ำเป็นสารฟลูอิดซ์ และทำการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองดังรูปที่ 2.21 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่ง มีผลผลิตคาร์บอนและ C₂₊ ไฮโดรคาร์บอนสูงกว่า เนื่องจากไม่ได้ถูกเปลี่ยนรูปอย่างสมบูรณ์ และให้ผลผลิตไฮโดรเจนถึงร้อยละ 81.5 แต่ยังต่ำกว่าที่ได้จากแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับรีฟอร์มมิ่งที่สูงถึงร้อยละ 83 เพียงเล็กน้อยแต่ทำให้สามารถใช้ต้นทุนต่ำกว่าและใช้เทคโนโลยีที่ประหยัดพลังงานได้มากกว่า สำหรับการนำพลาสติก โดยการนำไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งนั้น มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในซินแก๊สที่ได้เป็น 71.5 และ 10.2 โดยปริมาตร ตามลำดับ แต่เนื่องจากพบว่าปริมาณไค้กสะสมอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่า ทำให้เกิดการอุดตัน โดยไค้กจะไปขัดขวางการไหลของสารระเหยผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด โดยใช้แก๊สไนโตรเจนและไอน้ำเป็นสารฟลูอิดซ์สำหรับการกำจัดไค้กอย่างต่อเนื่องและการทำงานที่ต่อเนื่องเป็นเวลานาน



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ในกระบวนการไพโรไลซิส-รีฟอร์มมิงและแก๊สซิฟิเคชัน-รีฟอร์มมิง

Chai และคณะ [51] ศึกษาเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันของพลาสติกเหลือทิ้งและชีวมวล นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบสภาพการทำงานที่เหมาะสมของไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันของพลาสติกและชีวมวลสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่ดีขึ้น งานวิจัยนี้จะใช้พลาสติกบริสุทธิ์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และชีวมวลอย่างขี้เลื่อยสน เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทดลอง ดังนี้ ปริมาณนิกเกิลที่โหลด อัตราส่วนการรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของชีวมวลกับพลาสติก คุณสมบัติไพโรไลซิส คุณสมบัติรีฟอร์มมิง และอัตราการฉีดน้ำ ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-CaO-C โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิฟิเคชัน โดยทั่วไปนิกเกิลจะถูกใช้เป็นแกนหลัก เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลิตแก๊สที่สูงขึ้น และสามารถติดบนส่วนรองรับต่างๆ เช่น อลูมินา (Al₂O₃), โคบอลต์ (Co), โฟมเซรามิก เป็นต้น เนื่องจากสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพที่เฉพาะเจาะจงของตัวรองรับที่แตกต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงสามารถปรับเปลี่ยนให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้ การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่นี้ ทำให้ผลผลิตและองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูงขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันของพลาสติกผสมและชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการเร่ง

ปฏิกิริยาและมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง จึงส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน ทั้งองค์ประกอบและผลได้ของไฮโดรเจนสูงขึ้น มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและเกิดไค้กต่ำ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบสภาวะการทำงานโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้สำหรับไพโรไลซิส ร่วมกับแก๊สซีพีเคชั่นของชีวมวลและพลาสติก จากรูปที่ 2.22 พบว่าสภาวะการทำงานที่ใช้ปริมาณ นิกเกิล 10 ร้อยละโดยปริมาตร, อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อคาร์บอนเป็น 5 ต่อ 5, อัตราส่วนของชีวมวลต่อพลาสติกเป็น 5 ต่อ 5, อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 600 องศาเซลเซียส และอัตราการฉีดน้ำ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง นั้นเป็นสภาวะการทำงานที่เหมาะสม พบว่าองค์ประกอบและผลได้ของไฮโดรเจนสูงถึง 86.74 ร้อยละโดยโมลและ 115.33 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ และองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊ส มีค่าเพียง 7.31 ร้อยละโดยโมล งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงแนวทางใหม่สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากการไพโรไลซิสร่วมกับแก๊สซีพีเคชั่นของพลาสติกเหลือทิ้งและชีวมวล



รูปที่ 2.22 องค์ประกอบและผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน (ทั้ง 3 กรณี : บรรจุ Ni 10 ร้อยละโดยปริมาตร, CaO:C = 5:5, ชีวมวล:พลาสติก = 5:5, อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 600 องศาเซลเซียส, น้ำ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกลีเซอรอล

- 1) กลีเซอรอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร
- 2) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 3) เครื่องกวนสาร (Stirrer)
- 4) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

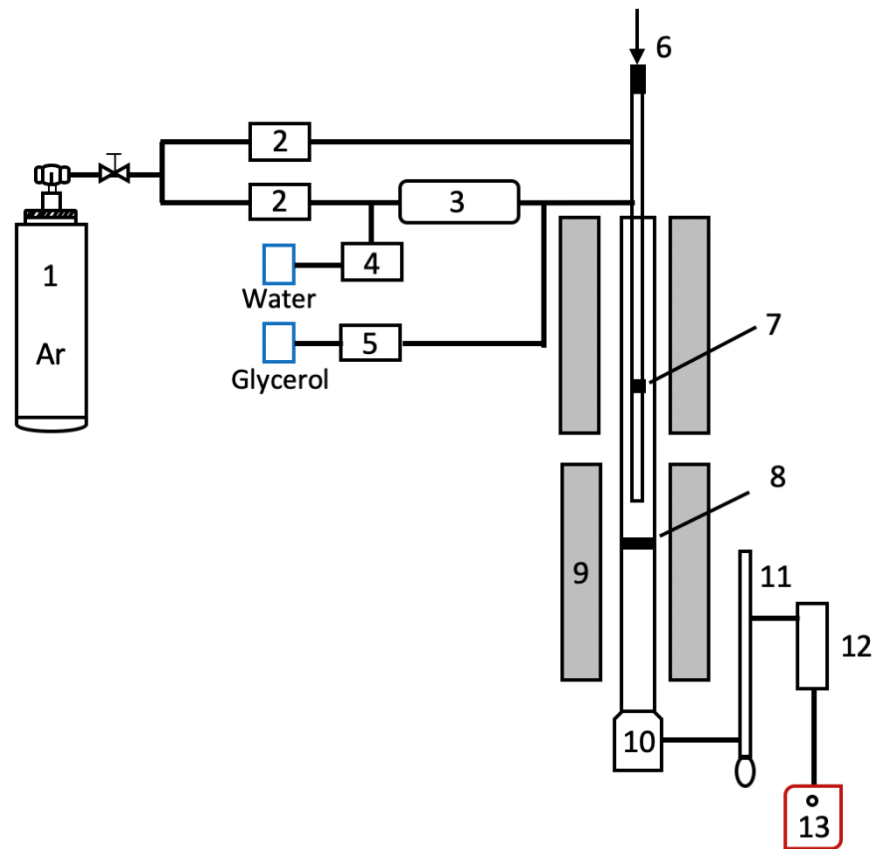
3.1.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- 1) นิกเกิลไนเตรต-6-ไฮเดรต (Nickel nitrate-6-hydrate)
- 2) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 3) แกมมา-อลูมินา (γ -Alumina)
- 4) เครื่องกวนสารและให้ความร้อน (Magnetic stirrer with hotplate)
- 5) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 6) ตู้อบแห้งสาร (Dryer)
- 7) เตาเผา (Calcination furnace)

3.1.3 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

- 1) อาร์กอนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร
- 2) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- 3) เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam generator)

- 4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- 5) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple)
- 6) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น
- 7) ปัมสำหรับปั๊มกลีเซอรอล (HPLC pump)
- 8) ปัมสำหรับปั๊มน้ำ (Peristaltic pump)
- 9) เตาเผาชนิดท่อ (Tube furnace)
- 10) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส (Bubble flow meter)
- 11) อุปกรณ์ดักจับทาร์ (Tar trap)
- 12) ซิลิกาเจล (Silica gel)
- 13) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่างขนาดหนึ่งลิตร (Gas bag)
- 14) สารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร
- 15) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)
- 16) ท่อซิลิโคน (Silicone tube) สำหรับบรรจุเม็ดพลาสติก
- 17) เม็ดพลาสติกชนิด PE, PP และ PS
- 18) เครื่องควบคุมการนำพาแก๊ส (Carrier gas)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

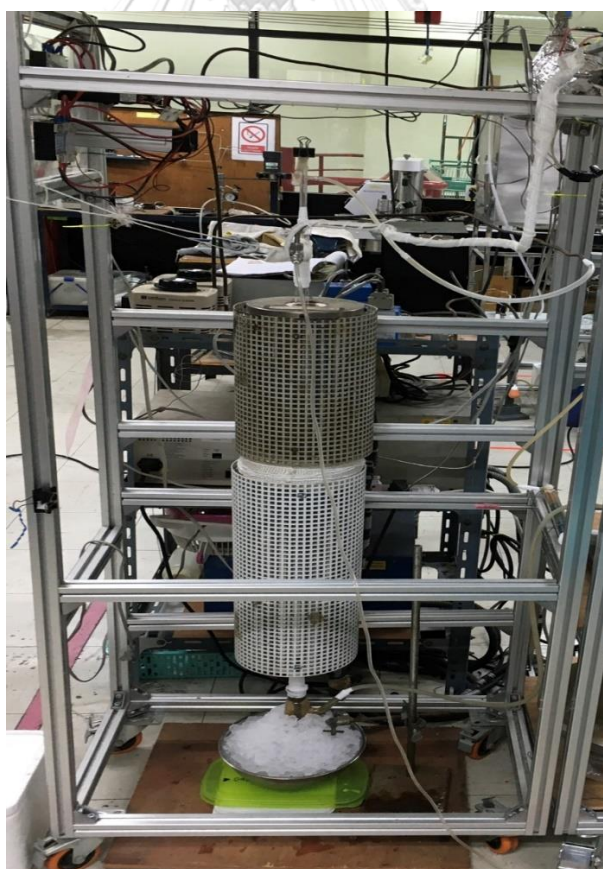
มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้: (1) ถังแก๊สอาร์กอน, (2) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล, (3) เครื่องผลิตไอน้ำ, (4) ปั๊มน้ำ, (5) ปั๊มกลีเซอรอล, (6) ท่อซิลิโคนบรรจุพลาสติก, (7) ชั้นบรรจุไอควอตซ์, (8) ชั้นสำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา, (9) เตาะเผาชนิดท่อ, (10) อุปกรณ์ดักจับทาร์, (11) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สชนิดฟองแก๊ส, (12) ซิลิกาเจล, (13) ถังเก็บแก๊สตัวอย่าง

3.2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น (Two-stage fixed-bed reactor) โดยจะแยกออกเป็น ส่วนบนและส่วนล่าง ส่วนด้านบนจะปลดปล่อยสารระเหยของพลาสติกจากกระบวนการเกิดไพโรไลซิสและส่วนด้านล่างเป็นการเกิดกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ในการทดลองนี้จึงทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิปลดปล่อยสารระเหยของพลาสติก

(Devolatile temperature) และอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming temperature) ที่ใช้อุณหภูมิแตกต่างกันได้

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ท่อควอตซ์ 2 ท่อที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.2 ท่อควอตซ์ขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 9 มิลลิเมตร และความยาว 65 เซนติเมตร ซึ่งเป็นท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน โดยพลาสติกจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผ่านปลายเปิดด้านบน และปลายท่อด้านบนจะมีปลายเปิดด้านข้างสำหรับป้อนแก๊สตัวพา (carrier gas) ที่ความยาว 30 เซนติเมตร จากปลายเปิดด้านล่าง และมีจุดคอดของท่อควอตซ์เพื่อเป็นที่รองรับพลาสติกที่ป้อนเข้ามาและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่บริเวณนี้ ส่วนท่อที่สองจะเป็นท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอกเท่ากับ 18 มิลลิเมตร และความยาวของท่อ 90 เซนติเมตร ด้านบนของท่อจะมีปลายเปิดหนึ่งทางสำหรับป้อนไอน้ำและกลีเซอรอลเข้าสู่ภายในกระบวนการ มีความยาว 30 เซนติเมตร จากปลายท่อด้านล่างและมีจุดคอดของท่อควอตซ์เพื่อเป็นที่รองรับตัวเร่งปฏิกิริยาและจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำที่บริเวณนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายยกลิเซอรอล

นำกลีเซอรอลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยปริมาตรผสมกับน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นทำการกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที ให้สารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้เป็นสารละลายยกลิเซอรอลมีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) จะสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิมเพกเนชัน (Impregnation) โดยสารตั้งต้น (Precursor) ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ นิกเกิลไนเตรต-6-ไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และ แกมมา-อลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) และใช้ตัวทำละลายเป็นที่ปราศจากไอออน ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีดังต่อไปนี้

- 1) ชั่งแกมมา-อลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) 10 กรัม ผสมกับสารละลายนิกเกิลไนเตรต ที่เตรียมจากนิกเกิลไนเตรต-6-ไฮเดรต ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) หนัก 4.95 กรัม ที่ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน
- 2) ทำการกวนและระเหยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำของแข็งที่ได้ไปการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนด
- 5) หลังจากอุณหภูมิของเตาเผาลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำนิกเกิล/อลูมินาที่ได้ ออกจากเตาเผาและเก็บในเดซิเคเตอร์ (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น

3.3.3 ขั้นตอนการทดลองสำหรับใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น

- 1) เตรียมท่อควอตซ์สำหรับใช้เป็นท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยบรรจุควอตซ์รูลด์ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในบริเวณจุดคอดของท่อควอตซ์ขนาดใหญ่ จากนั้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

ปริมาณ 1 กรัม ลงไป หรือบรรจุเม็ดอลูมินาชนิดกลม (Alumina ball) 1 กรัม ลงไปในกรณีที่ศึกษาภาวะที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2) บรรจุควอทซ์มวลปริมาณ 0.05 กรัม ลงในบริเวณจุดคอดของท่อควอตซ์ขนาดเล็ก เพื่อแยกสารที่เกิดจากไพโรไลซิสออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารที่อาจจะเกิดขึ้นจากการทดลองจะติดอยู่ที่บริเวณนี้

3) เตรียมเม็ดพลาสติก (Plastic pellet) ปริมาณ 0.2 กรัม บรรจุลงในท่อซิลิโคน (Silicone tube) และสวมท่อซิลิโคนเข้ากับปลายเปิดด้านบนสุดของท่อควอตซ์ขนาดเล็ก โดยใช้คัลปีหนีบโลหะ (Metal binder) เพื่อป้องกันการร่วงหล่นของเม็ดพลาสติกก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยจะปลดออกเมื่อต้องการเริ่มทำการทดลอง

4) ประกอบท่อควอตซ์ทั้งสองขนาดเข้าด้วยกันและติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเตาเผาชนิดท่อ อุปกรณ์ดักจับสารที่ด้านล่างและสายป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ท่อ ดังรูปที่ 3.2

5) ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที โดยวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออกด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดฟองแก๊สเพื่อตรวจสอบการรั่ว

6) ป้อนไอน้ำเข้าสู่ระบบเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (Peristaltic pump) ด้วยอัตราการป้อนเข้าของน้ำเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที

7) เปิดเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างทั้ง 2 เตาพร้อมกัน โดยเตาส่วนบนเป็นส่วนที่เกิดไพโรไลซิส จะถูกตั้งอุณหภูมิคงไว้ที่ 700 องศาเซลเซียส ในทุกการทดลอง และเตาเผาส่วนล่างจะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำของไอระเหยกับสารร่วมแก๊สฟลายและปฏิกิริยาของไอระเหยกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำการศึกษาอุณหภูมิรีดอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส

8) จับเวลา 30 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงที่กำหนด เพื่อไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์และกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา

9) เมื่อครบ 30 นาที ใช้อาร์กอนเป็นแก๊สตัวพาที่มีอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที จับเวลา 10 นาที เพื่อให้ไอน้ำกระจายตัวทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ และเติมไอน้ำแข็งลงไปบริเวณอุปกรณ์ดักจับทาร์

10) หลังจากครบ 10 นาที นำสารละลายกลีเซอรอลที่เตรียมไว้ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (HPLC pump) ด้วยอัตราการไหล 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที และปลดคลิกหนีบโลหะออกเพื่อป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่ระบบ พร้อมเริ่มจับเวลาและเก็บแก๊สตัวอย่างทันที โดยแก๊สตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อกำจัดทาร์และน้ำที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ไปยังอุปกรณ์ดักจับทาร์ที่อยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์

11) วัดปริมาณแก๊สตัวอย่างด้วยการวัดอัตราการไหลแบบฟองอากาศ

12) แก๊สตัวอย่างจะผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นก่อนที่แก๊สตัวอย่างจะถูกเก็บเข้าถุงเก็บแก๊ส โดยจะทำการเก็บแก๊สตัวอย่างทุกๆ 5 นาที โดยใช้ถุงเก็บแก๊สขนาด 1 ลิตร เป็นเวลา 30 นาที และนำแก๊สตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

13) เมื่อครบ 30 นาทีแล้ว ปิดเตาเผา ปิดวาล์วแก๊ส ปิดปั๊มที่ป้อนไอน้ำและกลีเซอรอลเข้าสู่ระบบ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากเตาเผา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของพลาสติกชนิดต่างๆ

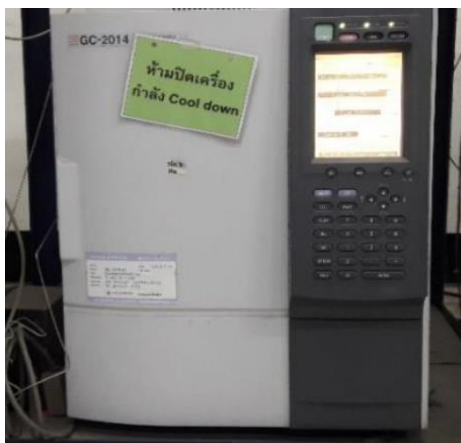
พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้สามชนิด ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบแยกธาตุองค์ประกอบ (Ultimate analysis) โดยจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHN element analyzer โดยรุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ CHN-2000 ของ Leco โดยองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้คือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน ส่วนองค์ประกอบของออกซิเจนเกิดจากการตุลมวลสารบนสมมติฐานว่า ปริมาณที่เหลือทั้งหมดของผลวิเคราะห์นั้นคือปริมาณของออกซิเจน

3.4.2 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography: GC)

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างแม่นยำ โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีถูกใช้สำหรับวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เพื่อระบุองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยคือรุ่น Shimadzu GC-2014 ดังรูปที่ 3.3 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าดังตารางที่ 3.1

■ หลักการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

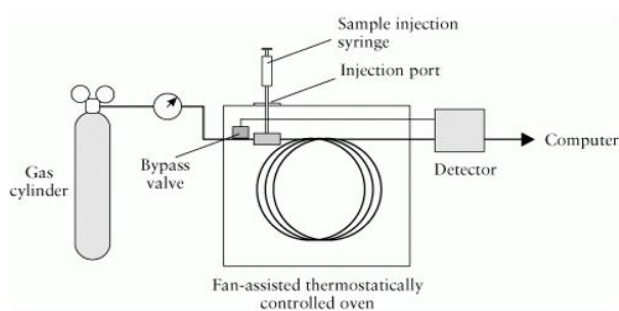
เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แก๊สตัวพา (Carrier gas), ระบบนำเข้าสู่สารตัวอย่าง (Injection system), คอลัมน์ (Column), ตู้อบ (Oven), ตัวตรวจวัด (Detector) และเครื่องบันทึกสัญญาณ (Recorder) ดังรูปที่ 3.4 หลักการทำงานจะอาศัยการกระจายตัวของสารระหว่างภูมิภาคที่แตกต่างกันคือ ภูมิภาคเคลื่อนที่และภูมิภาคคงที่ โดยภูมิภาคเคลื่อนที่ที่เป็นแก๊สเรียกว่า แก๊สตัวพา ซึ่งจะไหลตลอดเวลาขณะทำการวิเคราะห์สาร ส่วนภูมิภาคคงที่จะเป็นของเหลวหรือของแข็งที่เคลือบอยู่บนของแข็งบรรจุในคอลัมน์หรือของเหลวเคลือบอยู่ที่ผนังด้านในคอลัมน์ เริ่มจากเมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอ แก๊สตัวพาจะนำสารตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ โดยองค์ประกอบของสารจะถูกแยกภายในคอลัมน์ ซึ่งบรรจุภูมิภาคคงที่ จากนั้นจะเข้าสู่ตัวตรวจวัด ซึ่งความสามารถในตัวตรวจวัดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจวัดที่เลือกใช้ ซึ่งตัวอย่างชนิดของตัวตรวจวัดที่ใช้กับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เช่น ตัวตรวจวัดชนิดเฟรมไอออไนเซชัน (Flame ionization : FID), ตัวตรวจวัดชนิดอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Electron capture : ECD), ตัวตรวจวัดแบบแมสสเปกโทรเมตรี (Mass spectrometry), ตัวตรวจวัดชนิดเปลวไฟโตเมตริก (Flame Photometric Detector : FPD หรือ Nitrogen-Phosphorus detector : NPD) และตัวตรวจวัดชนิดเทอร์มอลคอนดักทีวิตี (Thermal conductivity : TCD) ซึ่งใช้เป็นตัวตรวจวัดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สตัวอย่าง

ชนิดของแก๊สดำพา (Carrier gas)	อาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์ (Column type)	Unibeads C packed column
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของคอลัมน์ (Column temperature)	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์	10.33 นาที
ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

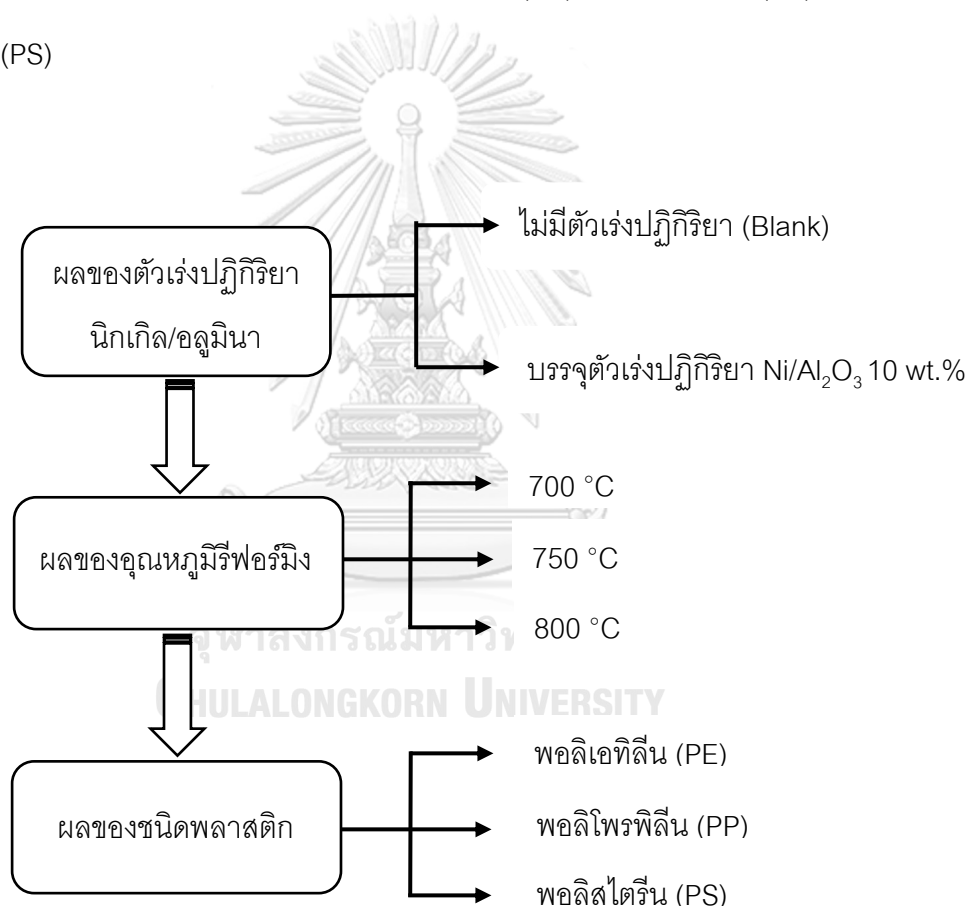


รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

ในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำกลีเซอรอลและพลาสติกที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ขั้นตอนการทดลองดังแสดงตามแผนผังรูปที่ 3.5 มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้

1. เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา
2. อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งที่ 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส
3. ชนิดของพลาสติกที่บ้อน ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ตัวแปรที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งภายใต้ภาวะการทำงานที่เหมาะสมและชนิดของพลาสติก ที่ส่งผลต่อผลผลิตของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

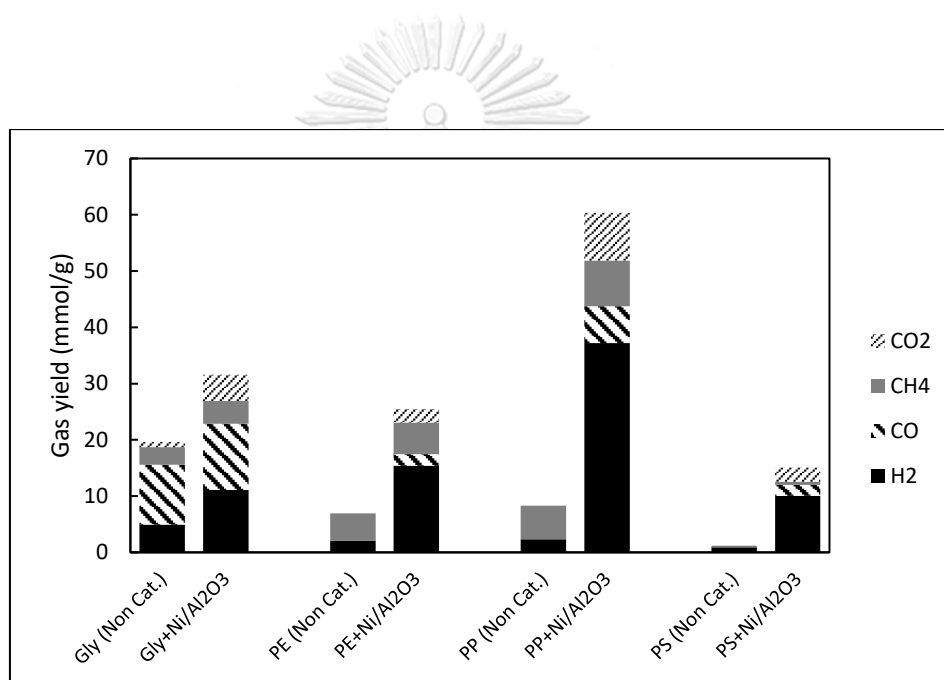
1. เปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
2. ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล
3. ผลของชนิดพลาสติกต่ออัตราการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen evolution rate) จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 750 องศาเซลเซียส
4. วิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา หลังจากที่ผ่านมาการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล

4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา

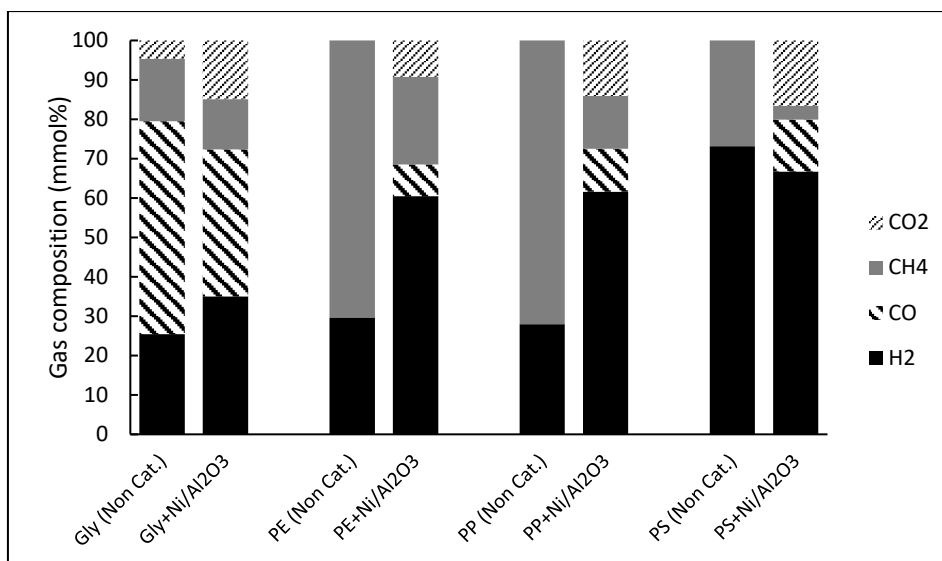
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอล นิยมเตรียมจากโลหะมีตระกูลอย่างนิกเกิล (Ni) จากการศึกษาค้นคว้าพบว่านิกเกิลมีความสามารถในการทำลายพันธะ C-C, C-H และ O-H สูงและส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แก๊สซิฟในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้ นอกจากนี้พบว่าการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้นิกเกิลที่อยู่บนส่วนรองรับต่างๆ อย่าง แกมมา-อะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนรองรับที่เหมาะสม เนื่องจากอะลูมินามีคุณสมบัติคือ มีความเสถียรเชิงกล, พื้นที่ผิวสูงและช่วยในการกระจายตัวของนิกเกิล ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินา (Ni/Al_2O_3) ที่ถูกเตรียมโดยใช้วิธีการอิมเพกเนชัน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเตรียมได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ จึงมีความน่าสนใจสำหรับใช้เร่งการเกิดปฏิกิริยาของไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลหรือพลาสติกแต่ละชนิด ที่ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบในสภาวะที่ไม่มีกับเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินาเข้าไป โดยทำการทดลองภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้นที่มีสภาวะการทดลองเดียวกัน คือ ใช้กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร, พลาสติก 0.2 กรัม, บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3 1 กรัม ใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสและอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งที่ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่อนาที เมื่อป้อนวัตถุดิบตั้งต้นเป็นกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับเป็นเวลา 30 นาที

โดยการทดลองเริ่มจากเบดส่วนแรกจะเป็นชั้นตอนที่เกิดไพโรไลซิส ซึ่งพลาสติกที่ถูกป้อนเข้าสู่ในส่วนนี้ จะเกิดการสลายตัวแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารระเหยเหมือนกันทั้งเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นสารระเหยและทาร์จะเข้าสู่เบดส่วนที่สองเป็นชั้นที่เกิดรีฟอร์มมิ่งต่อไป และจากผลการทดลองเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณน้อยมากเทียบกับเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่วนที่หายไปอาจเป็นโมเลกุลที่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลวอื่นหรือทาร์ได้ โดยสารระเหยหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ได้จากไพโรไลซิสของพอลิสไตรีนอาจต้องการพลังงานปฏิกิริยาที่สูงกว่าในการแตกสลาย เมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่น ดังนั้นจึงได้ทาร์และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งน้อยกว่าสำหรับพอลิสไตรีน เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน

จากการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 700 องศาเซลเซียส จะเป็นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จากในกรณีที่บ่อนกีสเซอร์อลเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาอาจส่งผลทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งออกซิเจนมีความว่องไวในการช่วยทำให้เกิดการแตกตัวได้มากกว่าไอน้ำ จึงเป็นแหล่งกำเนิดทำให้เกิดอนุมูลของไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการผสมกีสเซอร์อลเข้าไปในการเกิดปฏิกิริยาดังจะทำให้ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีผลผลิตดีกว่าการใช้ไอน้ำเพียงอย่างเดียว



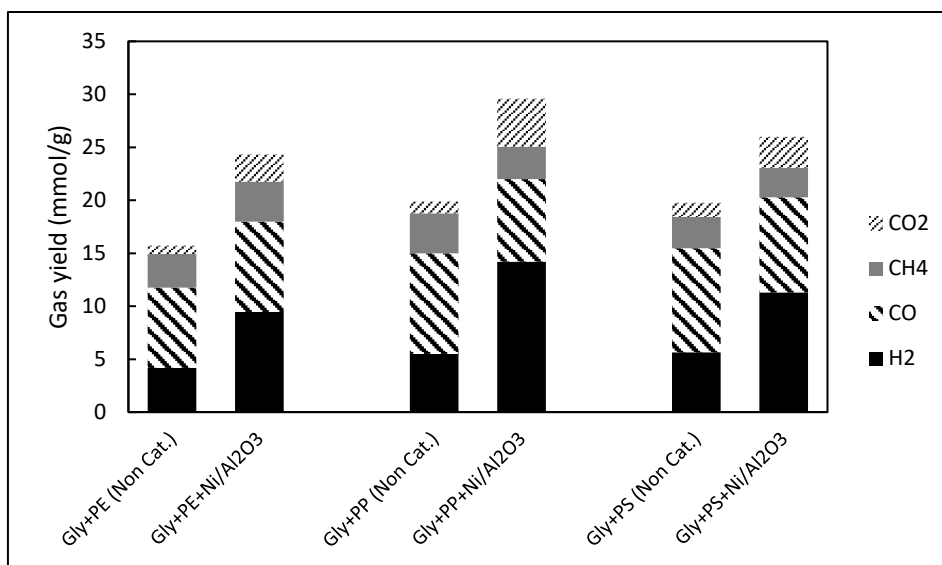
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 700 องศาเซลเซียส เมื่อบ่อนกีสเซอร์อล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ



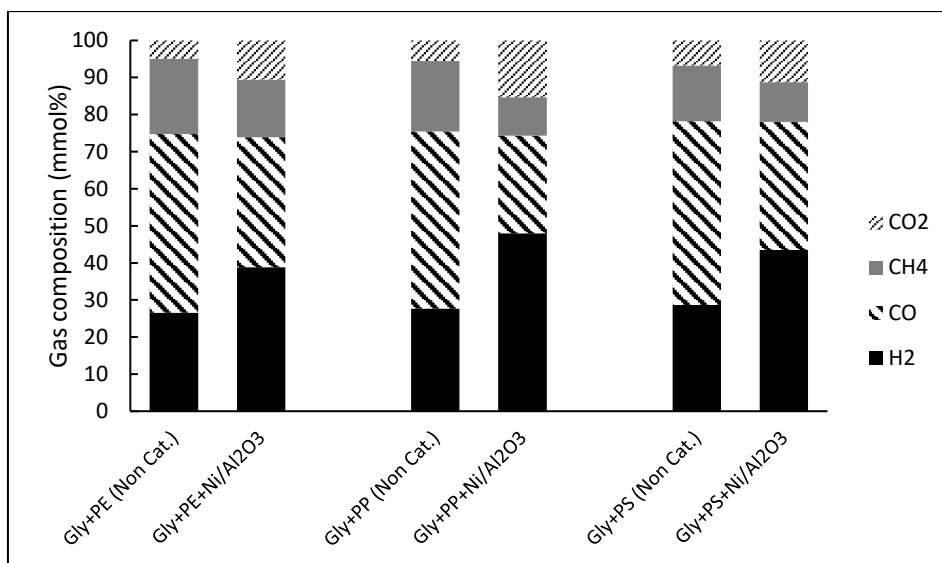
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 เมื่อป้อนวัตถุดิบตั้งต้นเดียว จากการทดลองที่ไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา พบว่าผลได้ของไฮโดรเจนสูงสุดมาจากพอลิโพรพิลีน ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 2.32 เป็น 37.21 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเป็นสายโซ่ตรงที่มีกิ่งหรือมีหมู่เมทิลที่สามารถเกิดการแตกสลายและเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นไฮโดรเจนได้ง่ายกว่า สำหรับกลีเซอรอลและพลาสติกชนิดอื่น ผลได้ของไฮโดรเจนค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยผลได้ของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 4.95 เป็น 11.06 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอล ของพอลิเอทิลีนมีเพิ่มขึ้นจาก 2.06 เป็น 15.4 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 0.9 เป็น 10.04 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิสไตรีน ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 25.43 เป็น 35.03 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 29.66 เป็น 60.47 ร้อยละโดยมิลลิโมล และของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 27.98 เป็น 61.65 ร้อยละโดยมิลลิโมล แต่ของพอลิสไตรีนนั้นลดลงจาก 73.15 เป็น 66.74 ร้อยละโดยมิลลิโมล ตามลำดับ โดยองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูงสุดทั้งเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยาได้จากพอลิสไตรีน และจากผลของพลาสติกทั้งสามชนิด เมื่อไม่มีตัวเร่ง

ปฏิกิริยา พบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเลย แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น รวมถึงมีเทนที่ลดลง ซึ่งเป็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่ส่งผลต่อพลาสติก โดยทำให้พลาสติกสามารถเกิดรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส



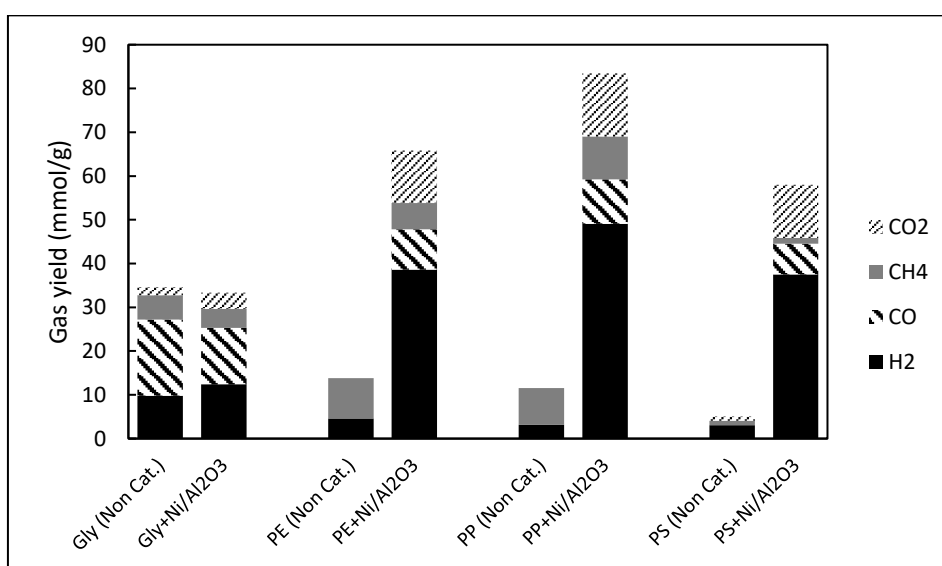
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและ มีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ



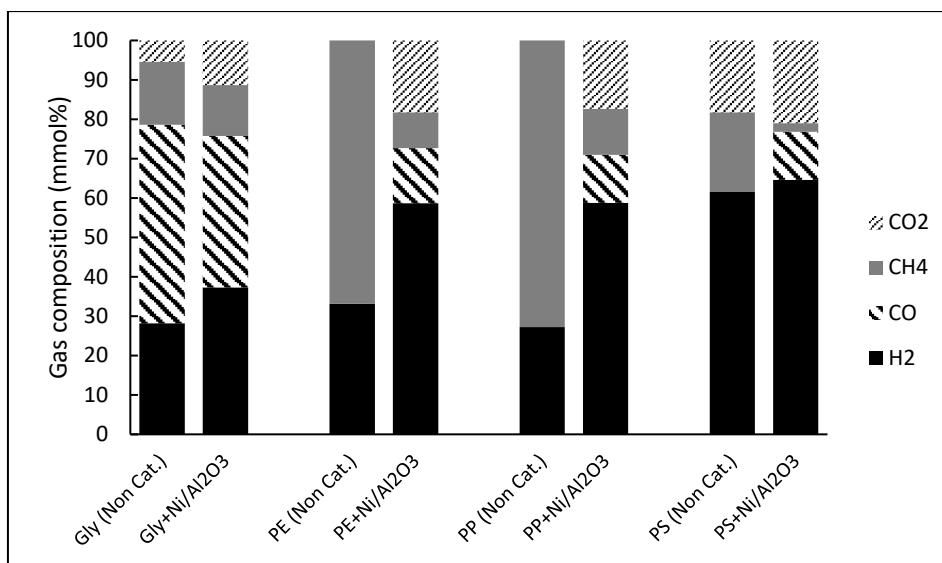
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อป้อนกลีเซอรอลอย่างต่อเนื่องร่วมกับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน อย่างกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีน, กลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีน หรือกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาจะส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับพลาสติกเพิ่มมากขึ้นและแสดงถึงผลของการทำงานร่วมกันได้ดีเทียบกับเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยายังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตไฮโดรเจน โดยผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 4.17 เป็น 9.45 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีน จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 5.5 เป็น 14.2 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิโพรพิลีน และจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 5.66 เป็น 11.3 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิสไตรีน ตามลำดับ นอกจากนี้องค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 26.57 เป็น 38.84 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 27.7 เป็น 47.99 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 28.63 เป็น 43.49 ร้อยละโดย

มิลลิโมล ตามลำดับ โดยองค์ประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนลดลง เป็นผลจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ผลผลิตของไฮโดรเจนสูงสุดได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700 องศาเซลเซียส



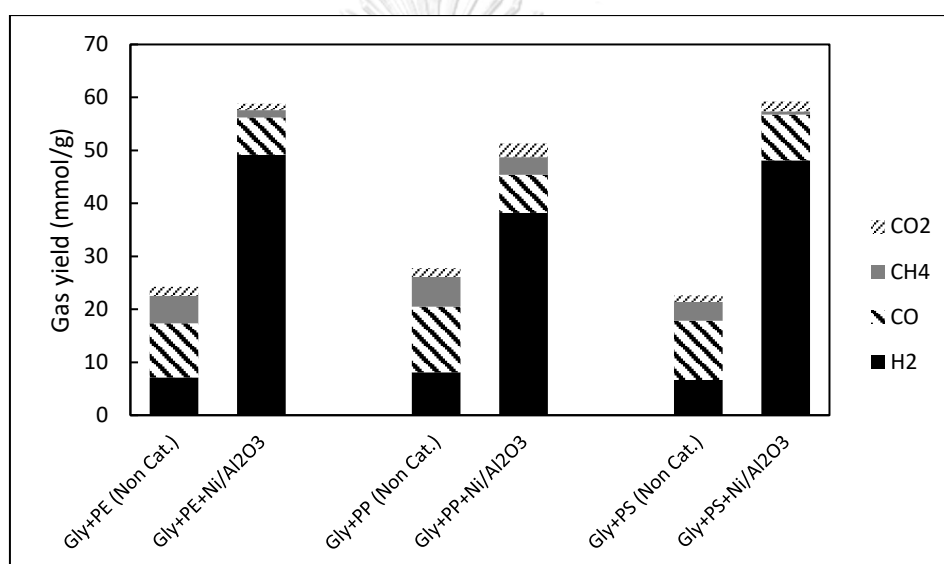
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและ มีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ



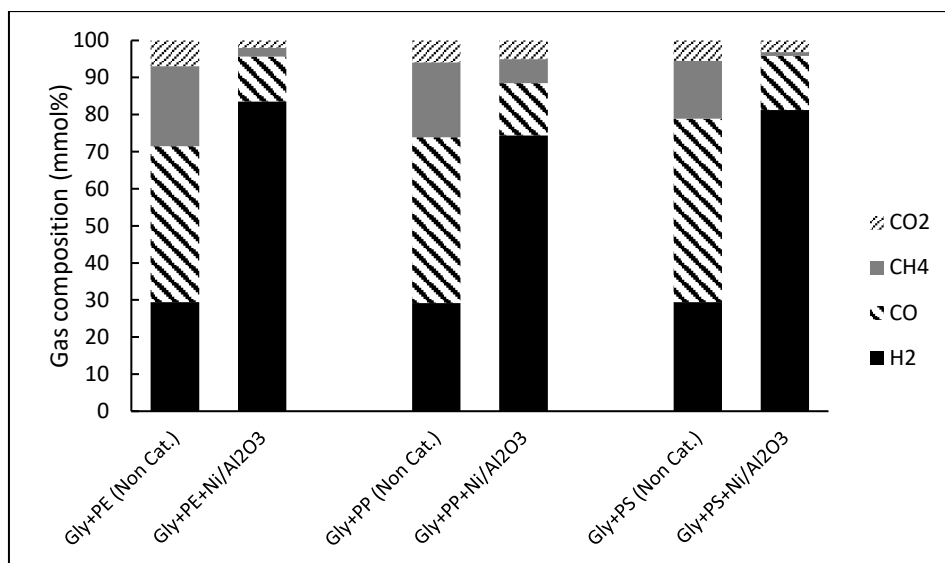
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาผลของกลีเซอรอลหรือพลาสติกแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา โดยผลได้ของไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 9.77 เป็น 12.45 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอล ของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 4.59 เป็น 38.64 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิเอทิลีน ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 3.15 เป็น 49.04 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 3.09 เป็น 37.48 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิสไตรีน ตามลำดับ ดังนั้นผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นมากกว่าพลาสติกชนิดอื่น และจากรูปที่ 4.6 พบว่าองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 28.21 เป็น 37.31 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 33.15 เป็น 58.70 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 27.27 เป็น 58.75 ร้อยละโดยมิลลิโมล และของพอลิสไตรีนนั้นเพิ่มขึ้นจาก 61.50 เป็น 64.63 ร้อยละโดยมิลลิโมล ตามลำดับ ด้วยองค์ประกอบและโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงที่คล้ายคลึงกันของสารระเหยที่ได้มาจากพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน ส่งผล

ให้มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนสอดคล้องใกล้เคียงกัน แต่น้อยกว่าที่ได้จากพอลิสไตรีนที่มีวงเบนซีน และจากผลของพอลิสไตรีน เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเริ่มมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น นั่นคือพอลิสไตรีนมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำมากกว่าพลาสติกชนิดอื่น ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน ที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนไพโรไลซิสจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีความเสถียรกว่าพลาสติกชนิดอื่นและสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า จึงส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟและปฏิกิริยาริฟอร์มมิงกับไอน้ำ [49]



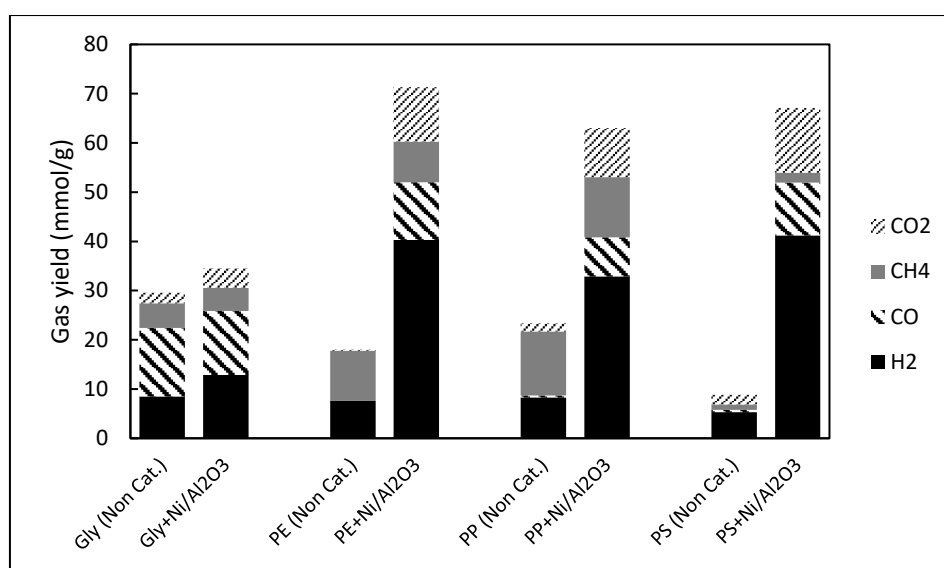
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/ริฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ



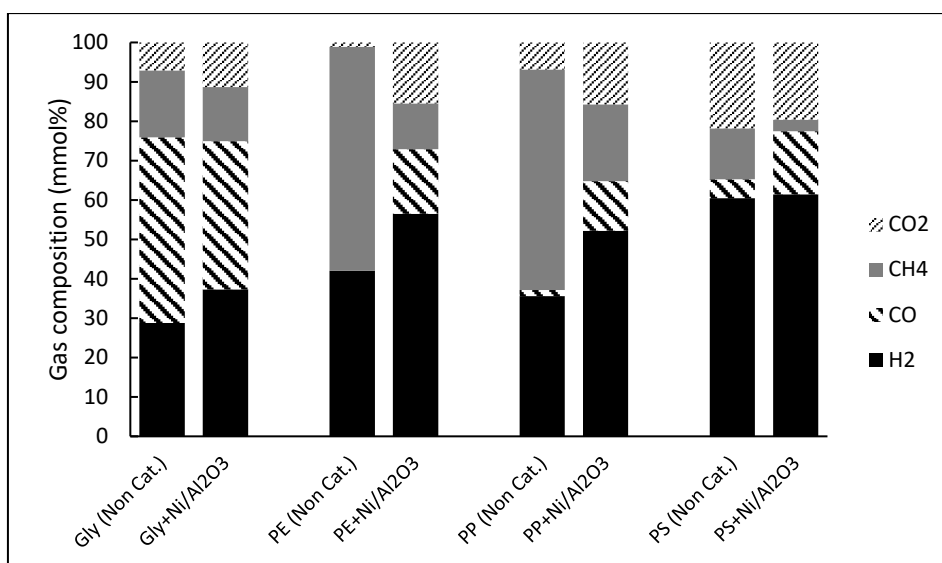
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อป้อนกลีเซอรอลร่วมกับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 7.13 เป็น 49.13 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 8.08 เป็น 38.18 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิโพรพิลีน และจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 6.66 เป็น 48.12 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิสไตรีน ตามลำดับ นอกจากนี้องค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 29.4 เป็น 83.58 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 29.16 เป็น 74.41 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 29.46 เป็น 81.24 ร้อยละโดยมิลลิโมล ตามลำดับ และพบว่าผลได้และองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนสูงกว่าที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนไม่มากนัก เนื่องจากสารระเหยที่ได้จากพอลิสไตรีน ส่วนใหญ่จะเป็นอะโรมาติก

ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสารประกอบนี้อาจเกิดการแตกสลายหรือมีการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้น้อยกว่าไฮโดรคาร์บอนเชิงเส้นของพอลิเอทิลีน เนื่องจากมีพลังงานพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่สูงกว่า ดังนั้นกลีเซอรอลกับพอลิเอทิลีนให้องค์ประกอบและผลได้ของไฮโดรเจนสูงที่สุดถึง 83.58 ร้อยละโดยมิลลิโมล และ 49.13 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีน ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส



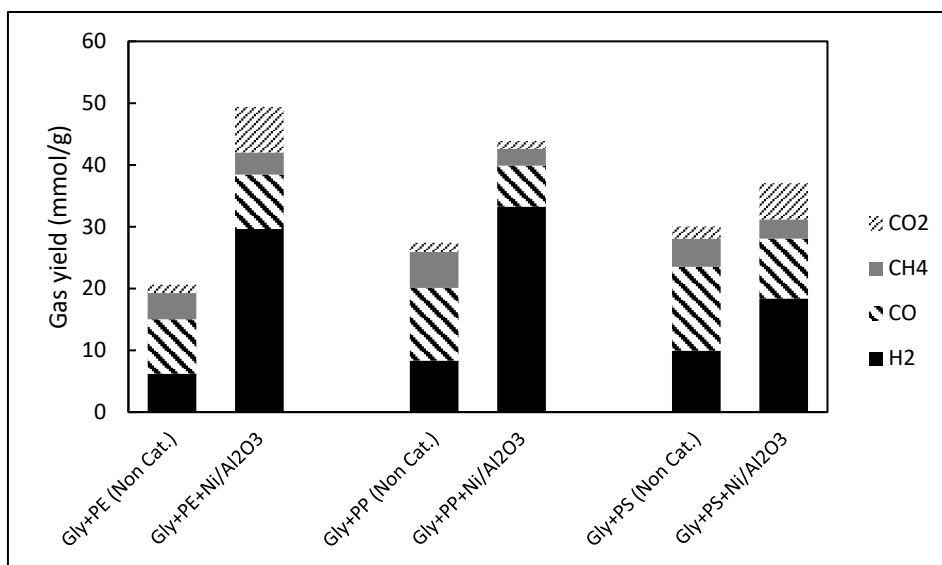
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ



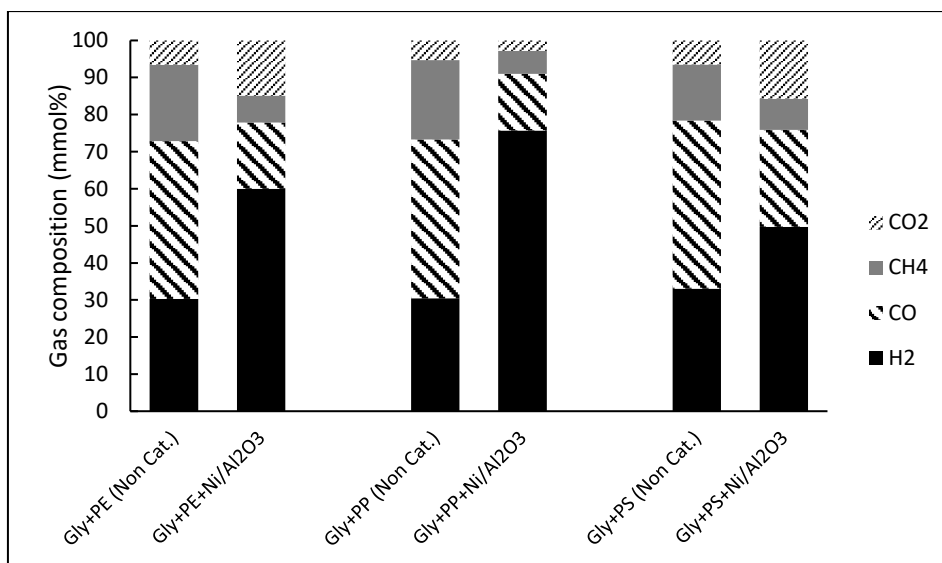
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกาลีเซอรอล, พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาผลได้และองค์ประกอบของกาลีเซอรอลและพลาสติกแต่ละชนิดที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของไฮโดรเจนจากกาลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 8.50 เป็น 12.86 มิลลิโมลต่อกรัมของกาลีเซอรอล ของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 7.57 เป็น 40.30 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิเอทิลีนของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 8.30 เป็น 32.87 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 5.32 เป็น 41.21 มิลลิโมลต่อกรัมของพอลิสไตรีน ตามลำดับ ดังนั้นผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน นอกจากนี้องค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกาลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 28.76 เป็น 37.30 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 42.01 เป็น 56.50 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 35.56 เป็น 52.19 ร้อยละโดยมิลลิโมล และของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 60.47 เป็น 61.45 ร้อยละโดยมิลลิโมล ตามลำดับ และจากผลของพอลิโพรพิลีน เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเริ่มมีคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่ง

ปฏิกิริยาพอลิस्टาไทริน ตามด้วยพอลิโพรพิลีน สามารถทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ง่ายกว่าพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่เป็นโซ่ตรงและมีความเสถียรกว่า และเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลได้และองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีเทนลดลง ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ



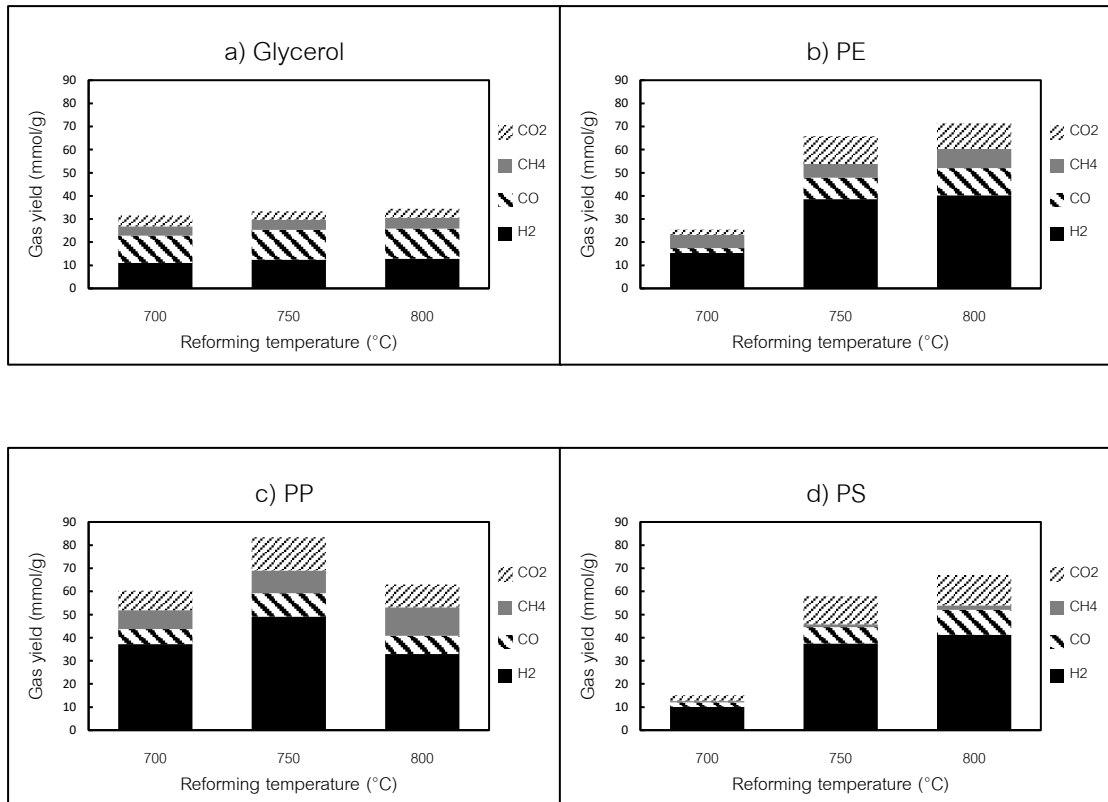
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยาNi/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อน Glycerol/PE, Glycerol/PP หรือ Glycerol/PS ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 เมื่อป้อนกลีเซอรอลร่วมกับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน พบว่าผลได้ของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 6.24 เป็น 29.63 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีน จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 8.35 เป็น 33.23 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิโพรพิลีน และจากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 9.94 เป็น 18.39 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิสไตรีน และจากรูป 4.12 พบว่าองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 30.29 เป็น 60.02 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจาก 30.48 เป็น 75.74 ร้อยละโดยมิลลิโมล ของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจาก 33.09 เป็น 49.69 ร้อยละโดยมิลลิโมล ตามลำดับ โดยผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามผลของคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนลดลง เมื่อใช้กลีเซอรอลกับพอลิเอทิลีน และกลีเซอรอลกับพอลิสไตรีน ดังนั้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ผลผลิตของไฮโดรเจนสูงสุดได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีน ตามด้วยกลีเซอรอลร่วมกับพอลิเอทิลีนและกลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีนต่ำที่สุด ตามลำดับ ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 800 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ดัง

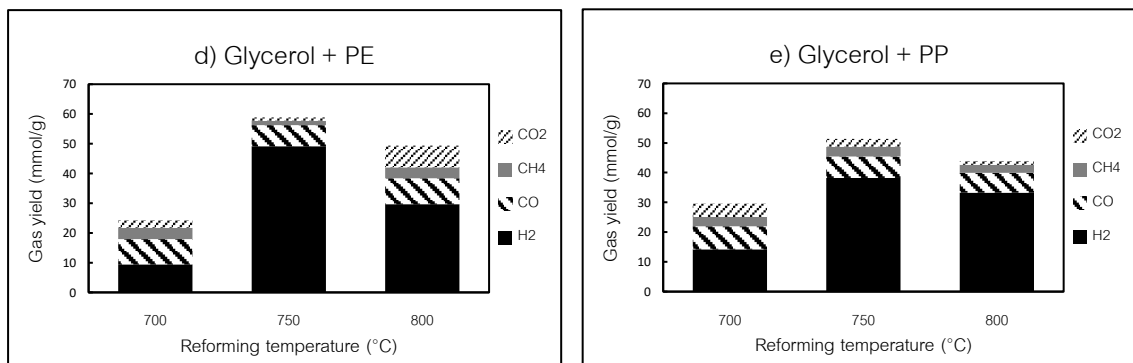
กล่าวสามารถอธิบายได้จากสารประกอบแอลเคนและแอลคีนที่ได้จากการเกิดไพโรไลซิสของกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน ซึ่งทั้งสองเป็นสารประกอบไฮโดคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายคลึงกันนั้นมากกว่าพอลิสไตรีน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกส์ หลังจากผ่านขั้นตอนการเกิดไพโรไลซิส สารประกอบแอลเคนและแอลคีนเหล่านี้จะมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ง่ายกว่าในขั้นตอนการรีฟอร์มมิง และนำไปสู่อัตราการเกิดโค้กที่ลดลง

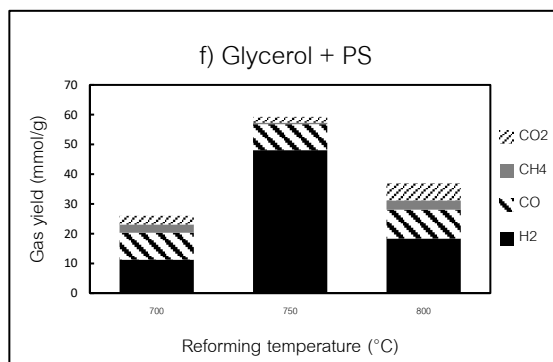
4.2 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิง

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของกลีเซอรอลและพลาสติกโดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H_2) รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift reaction) ที่ส่งเสริมให้เกิดผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้ โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำนั้นจะเกิดขึ้นภายในส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอุณหภูมิรีฟอร์มมิง โดยกำหนดให้อุณหภูมิไพโรไลซิสคงที่ที่ 700 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3 เมื่อป้อนวัตถุดิบตั้งต้นเป็น (a) กลีเซอรอล (b) พอลิเอทิลีน (PE) (c) พอลิโพรพิลีน (PP) (d) พอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ ทั้งหมดจะถูกดำเนินการในสภาวะเดียวกัน: ใช้กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร, พลาสติก 0.2 กรัม, บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา 1 กรัม, อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่าผลผลิตของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่สูงขึ้น จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ส่งผลต่อพฤติกรรมในการดูดความร้อนของการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จึงทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผลให้สมดุลเคลื่อนไปข้างหน้าและทำให้เกิดผลผลิตไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ เมื่อบ้อน (a) กลีเซอรอล (b) พอลิเอทิลีน (PE) (c) พอลิโพรพิลีน (PP) (d) พอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ





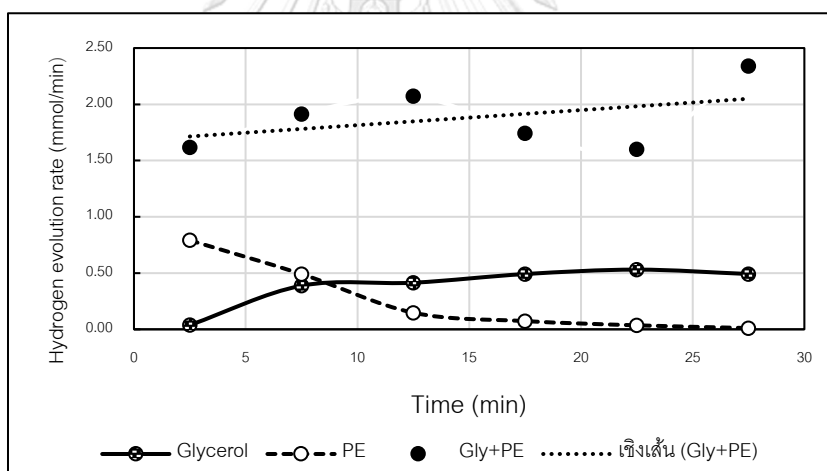
รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส/รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ เมื่อป้อน (d) Glycerol/PE (e) Glycerol/PP (f) Glycerol/PS

จากผลการทดลองดัง**รูปที่ 4.14** ผลผลิตของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดต่างๆ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิรีฟอร์มมิงสูงขึ้น จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและผลได้ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อป้อนกลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกทั้งสามชนิด แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 750 เป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์รวมจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลอลูมินาที่ใช้ อาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เกิด Sintering และพบว่าที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิง ทำให้เกิดผลผลิตของไฮโดรเจนสูงสุด โดยเป็นผลมาจากบทบาทของปฏิกิริยาออกเทอร์แก๊สซิฟและปฏิกิริยาการสลายตัวของพลาสติกและกลีเซอรอล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจึงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาไปข้างหน้าไปสู่การผลิตไฮโดรเจนมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำกว่าอย่าง 700 องศาเซลเซียสนั้น อาจจะเป็นอุณหภูมิที่ยังไม่สูงพอที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ซึ่งปฏิกิริยาโดยรวมเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

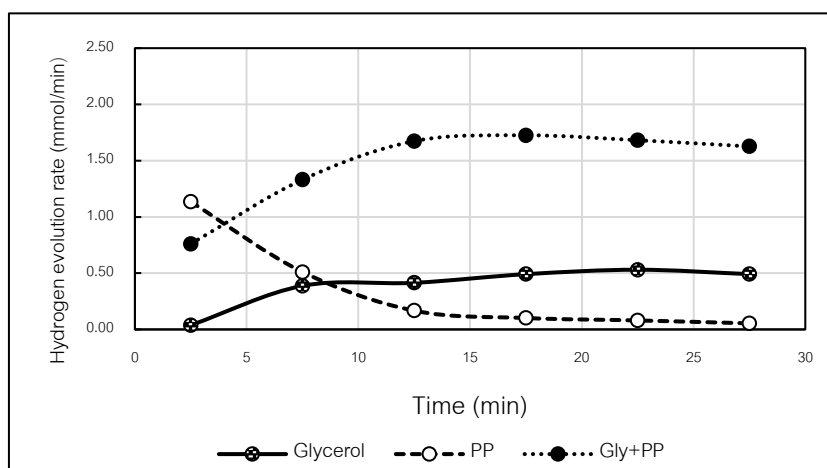
4.3 ผลของชนิดพลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่ทำการบ้อนเข้าสู่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น ในส่วนนี้เป็นส่วนที่จะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสขึ้น โดยไพโรไลซิสถือเป็นกระบวนการรีไซเคิลทางเคมีด้วยความร้อนและเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการนำมาผลิตพลังงานที่มีประโยชน์จากพลาสติกเหลือใช้ ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดที่พบในชีวิตประจำวันนั้น แต่ละชนิดจะมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของชนิดพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยเลือกชนิดที่สามารถพบได้ทั่วไป ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP) และ พอลิสไตรีน (PS) ทั้งหมดถูกดำเนินการภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้ดีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร, พลาสติก 0.2 กรัม, บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา 1 กรัม, อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส, ใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 750 องศาเซลเซียสและอัตราการบ้อนเข้าของน้ำ 0.2 มิลลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

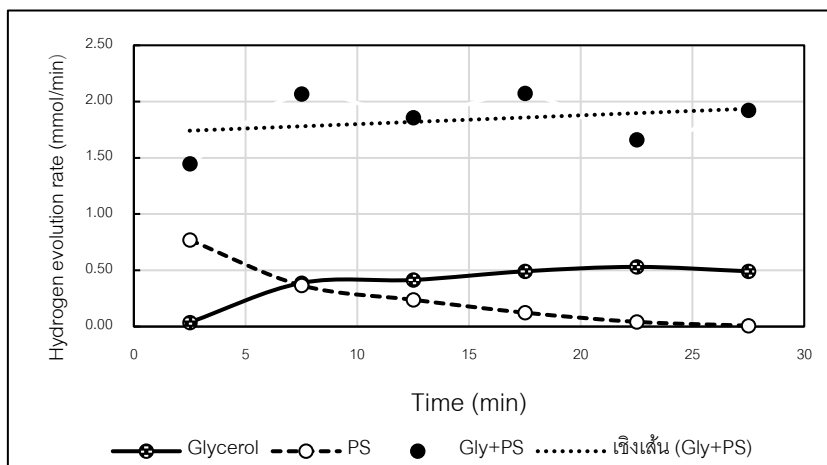
a)



b)



c)



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H_2 evolution rate กับเวลา (นาที) จากการทำปฏิกิริยาไฟโรไลซิสรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติกแต่ละชนิด (a) PE, (b) PP, (c) PS ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 750 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 อัตราการเกิดไฮโดรเจน (Hydrogen evolution rate) กับเวลาที่สัมพันธ์กันระหว่างการทำปฏิกิริยาไฟโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน อย่าง a) พอลิเอทิลีน (PE) b) พอลิโพรพิลีน (PP) และ c) พอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีนมีแนวโน้มที่สูงค่อนข้างใกล้เคียงกัน การเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของพลาสติกแต่ละชนิดร่วมกับกลีเซอรอล พบว่ามีผลที่เสริมกันอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเกิดไฮโดรเจนที่สูงขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาของกลีเซอรอลหรือพลาสติกชนิดต่างๆเพียงอย่างเดียว ซึ่งคาดเดาว่าอาจมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารระเหยจากพลาสติกและกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา และแสดงถึงผลของพลาสติกและกลีเซอรอลที่สามารถทำงานร่วมกันได้ดี ซึ่งส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งและการผลิตไฮโดรเจน แม้ว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนจะต่ำกว่าเล็กน้อยในกรณีที่ป้อนกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีน แต่วิวัฒนาการสุทธินั้นดีกว่า นอกจากนี้ผลจากการนี้ใช้กลีเซอรอลร่วมกับพอลิสไตรีน บ่งชี้ว่ามีความเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของพอลิสไตรีนกับกลีเซอรอลในระหว่างกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟโรไลซิสของพอลิสไตรีนจะเกิดปฏิกิริยาได้น้อย

กว่าในกระบวนการไพโรไลซิสของทั้งพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน และจากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์สารระเหยของพอลิเอทิลีนที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิสส่วนใหญ่ มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนสายตรง สารประกอบเหล่านี้จึงมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อขั้นตอนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำมากขึ้นและนำไปสู่อัตราการเกิดโค้กที่ลดลง

4.4 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาหลังจากการทำปฏิกิริยา

จากงานวิจัยนี้ที่ทำการทดลองโดยใช้นิกเกิล/อลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของกลีเซอรอล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้มักจะเกิดการสะสมของคาร์บอนหรือโค้ก (Coke) ขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือในบริเวณที่เป็นกรดของอลูมินา โดยการสะสมของคาร์บอนจะเกิดมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ชนิดของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ไอน้ำและอัตราส่วนของน้ำต่อกลีเซอรอล และจากที่ทำการศึกษสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของพลาสติก อย่างพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน พบว่าพอลิสไตรีนมีโอกาสที่จะเกิดการสะสมคาร์บอนมากกว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน เนื่องจากความเป็นอะโรมาติกส์ของพอลิสไตรีนมีแนวโน้มที่จะผลิตโดยอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอนมากกว่าอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน จึงทำให้เกิดเศษคาร์บอนตกค้างที่สูงกว่า แต่พลาสติกอาจเกิดการสะสมของคาร์บอนในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งได้ง่ายกว่าและมีโอกาสที่ไปดูดซับ (Absorb) บนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า จึงทำให้เกิดโค้กได้ง่ายกว่าในกรณีใช้พลาสติก

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาก่อนและหลังจากที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการอิมเพกเนชัน ก่อนที่นำไปใช้ทำการทดลอง พบว่าจะมีลักษณะเป็นเม็ดสีเขียวดังรูปที่ 4.16 แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา หลังจากผ่านการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว ที่เกิดขึ้นภายในส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชนิดสองชั้น พบว่าจะมีสีที่เปลี่ยนไปเป็นเม็ดสีฟ้า เนื่องจากนิกเกิล/อลูมินาจะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปอยู่ในรูปของนิกเกิล/อลูมินิต เป็นดังรูปที่ 4.17 และการ

ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา หลังจากที่ผ่านมาการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อป้อน
 วัตถุดิบตั้งต้นเป็นกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวหรือการใช้กลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดต่างๆ
 พบว่าจะมีสีที่เปลี่ยนไปเป็นเม็ดสีดำ หรือที่เรียกว่าการเกิดโค้กขึ้นดังรูปที่ 4.18

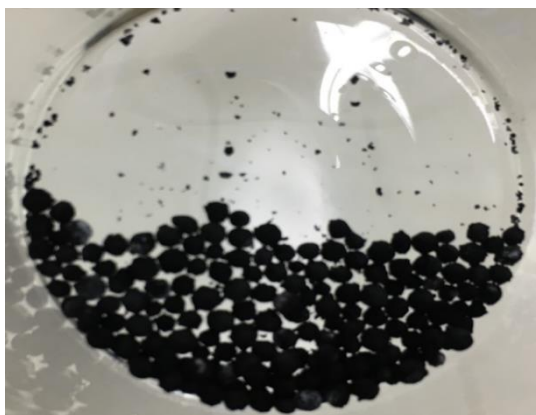


รูปที่ 4.16 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาก่อนที่นำไปใช้ทำการทดลอง



รูปที่ 4.17 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาหลังการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

เมื่อป้อนพลาสติก



รูปที่ 4.18 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาหลังการเกิดปฏิกิริยาฟอริงด้วยไอน้ำ เมื่อป้อน

กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวหรือการใช้กลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจน โดยแสดงการเปรียบเทียบเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ต่อมาศึกษาผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งกับไอน้ำที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา และศึกษาผลของพลาสติกสามชนิด โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาต่อผลได้และองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล ที่ใช้อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่งในช่วง 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบเมื่อไม่มีและมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมีผลได้และองค์ประกอบที่สูงกว่าในการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจนในทุกกรณีที่ป้อนวัตถุดิบตั้งต้น ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนพลาสติกชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว พบว่าผลได้และองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อป้อนกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวหรือพลาสติกแต่ละชนิดร่วมกับกลีเซอรอล พบว่าผลได้และองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนมีแนวโน้มลดลง แต่คาร์บอนไดออกไซด์ยังคงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานและคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาของพลาสติกและกลีเซอรอล รวมถึงส่งเสริมให้เกิดการทำงานร่วมกันได้ดี เนื่องจากสามารถช่วยให้พลาสติกสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เพิ่มขึ้นและช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนที่มีแหล่งกำเนิดมาจากกลีเซอรอล ซึ่งออกซิเจนจะสามารถช่วยทำให้เกิดการแตกตัวได้ดีกว่า นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีอลูมินาทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับที่ช่วยให้การกระจายตัวของนิกเกิลดี

ขึ้น จึงถือเป็นการส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกเทอร์แกสซิฟได้ดีขึ้น ดังนั้นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาถือว่าประสบความสำเร็จสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากส่งผลให้เกิดผลผลิตไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลของอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้อุณหภูมิไพโรไลซิสคงที่ที่ 700 องศาเซลเซียส โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ภายใต้สภาวะการดำเนินงานเดียวกัน

จากการทดลองที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิงในช่วง 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนวัตถุดิบเดี่ยวแต่ละชนิด พบว่าผลได้และองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 และ 800 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนกลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดทั้งสามชนิด พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนมีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ป้อนวัตถุดิบตั้งต้นเดี่ยว พบว่าผลได้ของไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิรีฟอร์มมิงที่สูงขึ้น แต่สำหรับกรณีที่ป้อนกลีเซอรอลร่วมกับชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกันพบว่าผลได้ของไฮโดรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากบทบาทของปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส นั้นเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอล

5.1.3 ผลของชนิดพลาสติก งานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกสามชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน เนื่องจากพลาสติกทั้งสามชนิดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถหลอมได้เมื่อได้รับความร้อน มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและพบได้ง่ายโดยทั่วไป ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ที่อุณหภูมิรีฟอร์มมิง 750 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าผลผลิตไฮโดรเจนจากพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีนค่อนข้างสูงใกล้เคียงกัน และจากการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงของพลาสติกแต่ละชนิดร่วมกับกลีเซอรอลพบว่า มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเกิดไฮโดรเจนที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีป้อนกลี

เซอรอลหรือพลาสติกแบบเดี่ยว เนื่องจากอาจมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารระเหยจากพลาสติกกับกลีเซอรอลขึ้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา ซึ่งส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาฟรีฟอร์มิงและการผลิตไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าในกรณีที่บ่อนกลีเซอรอลร่วมกับพอลิโพรพิลีนจะมีอัตราการเกิดไฮโดรเจนที่ต่ำกว่าเล็กน้อย แต่อัตราการเกิดโดยรวมนั้นค่อนข้างดี

ดังนั้นผลสรุปของงานวิจัยนี้ พบว่าผลได้และองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ได้จากกลีเซอรอลร่วมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับฟรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำที่สูงสุดเป็น 49.13 มิลลิโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีน และ 83.58 ร้อยละโดยมิลลิโมล ที่อุณหภูมิฟรีฟอร์มิง 750 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการฟรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติกนั้นมีข้อดีอยู่มากและส่งผลให้ผลผลิตของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินายังมีข้อเสียคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้อาจเกิดการเสื่อมสภาพ (Deactivation) และอาจส่งเสริมให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและโค้กขึ้นในบริเวณที่เป็นกรดของอลูมินา ซึ่งจะส่งผลต่อผลผลิตของแก๊สผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงควรศึกษาและปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่มีประสิทธิภาพส่งเสริมปฏิกิริยาการเกิดไพโรไลซิสร่วมกับฟรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำของกลีเซอรอลและพลาสติก รวมถึงส่งผลทำให้มีปริมาณการเกิดทาร์ที่ลดลง และยับยั้งการสะสมของคาร์บอนโดยลดความเป็นกรดของอลูมินาเพิ่มเติม อย่างเช่น การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

บรรณานุกรม

1. Yus, M.S., J.; Herguio, J.; Menendez, M., *Glycerol steam reforming with low steam/glycerol ratio in a two-zone fluidized bed reactor*. Catalysis Today, 2018. **299**: p. 317-327.
2. Macedo, M.S.S., M.A.; Madeira, L.M., *Process intensification for hydrogen production through glycerol steam reforming*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **146**: p. 111151.
3. Ahamed, A.L., L.; Chan, W.P.; Tan, P.C.K.; Yip, N.T.X.; Bobacka, J.; Veksha, A.; Yin, K.; Lisak, G., *In situ catalytic reforming of plastic pyrolysis vapors using MSW incineration ashes*. Environmental Pollution, 2021. **276**: p. 116681.
4. Dou, B.D., V.; Rickett, G.; Blakeman, N.; Williams, P.T.; Chen, H.; Ding, Y.; Ghadiri, M., *Hydrogen production by sorption-enhanced steam reforming of glycerol*. Bioresource Technology, 2009. **100**(14): p. 3540-3547.
5. Feng, P.H., K.; Xu, Q.; Qi, W.; Xin, S.; Wei, T.; Liao, L.; Yan, Y., *Ni supported on the CaO modified attapulgite as catalysts for hydrogen production from glycerol steam reforming*. International Journal of Hydrogen Energy, 2020. **45**(15): p. 8223-8233.
6. Adhikari, S.F., S.; Haryanto, A., *Production of hydrogen by steam reforming of glycerin over alumina-supported metal catalysts*. Catalysis Today, 2007. **129**(3-4): p. 355-364.
7. Wang, C.D., B.; Jiang, B.; Song, Y.; Du, B.; Zhang, C.; Wang, K.; Chen, H.; Xu, Y., *Sorption-enhanced steam reforming of glycerol on Ni-based multifunctional catalysts*. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(22): p. 7037-7044.
8. Sanchez, E.A.D.A., M.A.; Comelli, R.A., *Hydrogen production from glycerol on Ni/Al₂O₃ catalyst*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(11): p. 5902-5907.
9. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. ไบโอดีเซลในประเทศไทย. 2016; Available from: http://www.eppo.go.th/royal/m1700_0020.html.

10. Rao, V.N.M., T.J.; Cheralathan, K.K.; Sakar, M.; Hussain, C.M.; Kumari, M.M.; Shankar, M.V., *11 - Emerging trends in photocatalytic transformation of biomass-derived glycerol into hydrogen fuel and value-added chemicals*. Handbook of Smart Photocatalytic Materials, 2020: p. 227-246.
11. จำกัด, บ.ส.ค. รวบรวมเรื่อง "กลีเซอริน (Glycerin)". 2021; Available from: <https://marumothai.com/article/รวบรวมเรื่อง-กลีเซอริน/>.
12. Tokyo Chemical Industry Co., L. *Glycerol [for Electrophoresis]*. 2021; Available from: <https://www.tcichemicals.com/TH/en/p/G0316>.
13. บางจากไบโอฟูเอล. กลีเซอริน. 2016; Available from: <http://www.bangchakbiofuel.co.th/products/glycrin>.
14. Pagliaro, M.C., R., *Sustainable Production of Glycerol*. 2016.
15. PubChem. *Glycerol*. 2020; Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glycerol>.
16. Ayoub, M.A., A.Z., *Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(5): p. 2671-2686.
17. Silva, J.M.S., M.A.; Madeira, L.M., *Challenges and strategies for optimization of glycerol steam reforming process*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **42**: p. 1187-1213.
18. Adhikari, S.F., S.D.; Haryanto, A., *Hydrogen production from glycerol: An update*. Energy Conversion and Management, 2009. **50**(10): p. 2600-2604.
19. Dumbrava, I.-D.C., C.-C.; Lucaci, A.I.; Cormos, A.-M., *CFD modelling of supercritical water reforming of glycerol for hydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. **46**.
20. CP-Meiji. *Saponification*. 2015; Available from: <https://www.cpmeiji.com/meijitensai/home/home/contact>.
21. Ciriminna, R.P., C.D.; Rossi, M.; Pagliaro, M., *Understanding the glycerol market*. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014. **116**(10): p. 1432-1439

22. Quispe, C.A.G.C., C.J.R.; Carvalho, J.A., *Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 27: p. 475-493.
23. (MTEC), ศ. พลาสติก. Available from: <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/what-is-plastic/plastic-history.html>.
24. Bellis, M. *A Brief History of the Invention of Plastics*. 2020; Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-plastics-1992322>.
25. Usahanunth, N.T., S., *The transformation of waste Bakelite to replace natural fine aggregate in cement mortar*. Case Studies in Construction Materials, 2017. 6: p. 120-133.
26. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ก. วิชาเคมี – ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน. 2014; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=aiqWbFDmdUA>.
27. Watana Brand Packing System Co., L. กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก. 2015; Available from: <https://www.watanabhand.co.th/กว่าจะเป็นเม็ดพลาสติก/>.
28. วิจัยและนวัตกรรม, ก.ว. การจัดการผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของอุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติกชนิด PE และ PP. 2015; Available from: http://164.115.28.46/thaiexen/search_detail/result/9788.
29. Pornchaloempong, P.R., N. *Plastics*. Food Network Solution; Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1635/plastic-พลาสติก>.
30. Sharma, B.G., Y.; Sharma S.; Shekhar, S., *Inherent roadmap of conversion of plastic waste into energy and its life cycle assessment: A frontrunner compendium*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. 146: p. 111070.
31. Omnexus. *Polyethylene (PE)*. Available from: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>.
32. Center, P.S.L. *Polypropylene*. 2003; Available from: <https://pslc.ws/macrog/pp.htm>.
33. Center, P.S.L. *Polystyrene*. 2003; Available from: <https://www.pslc.ws/macrog/styrene.htm>.

34. Barbarias, I.L., G.; Amutio, M.; Artetxe, M.; Alvarez, J.; Arregi, A.; Bilbao, J.; Olazar, M., *Steam reforming of plastic pyrolysis model hydrocarbons and catalyst deactivation*. Applied Catalysis A: General, 2016. **527**: p. 152-160.
35. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ห. พลังงานไฮโดรเจน. 2013; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/288_23-25.pdf.
36. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ไฮโดรเจน (*Hydrogen*). 2014.
37. Chouhan, K.S., S.; Kumar, S.; Kumar, S. , *Simulation of steam reforming of biogas in an industrial reformer for hydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. **46**(53): p. 26809-26824
38. (มหาชน), P.E.E.S.บ.ป.จ. พลังงานไฮโดรเจน. 2017; Available from: <https://blog.pttexpresso.com/hydrogen-energy-new-choices/>.
39. McCay, M.H.S., S., *22 - Hydrogen: An Energy Carrier*. Future Energy (Third Edition) Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet, 2020: p. 475-493.
40. Bhawna; Sharma, S., *Metal based catalysts for hydrogen production reactions*. Materials today: Proceedings, 2021. **46**.
41. Wang, Y.C., M.; Yang, Z.; Liang, T.; Liu, S.; Zhou, Z.; Li, X. , *Bimetallic Ni-M (M = Co, Cu and Zn) supported on attapulgite as catalysts for hydrogen production from glycerol steam reforming*. Applied Catalysis A: General, 2018. **550**: p. 214-227.
42. Ismaila, A.C., H.; Shao, Y.; Xu, S.; Jiao, Y.; Chen, X.; Gao, X.; Fan, X., *Renewable hydrogen production from steam reforming of glycerol (SRG) over ceria-modified γ -alumina supported Ni catalyst*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020. **28**(9): p. 2328-2336.
43. Speight, J.G., *Chapter 15 - Hydrogen Production*. Heavy Oil Recovery and Upgrading, 2019: p. 657-697.
44. Gao, K.S., A.; Iliuta M.C. , *Development of residue coal fly ash supported nickel catalyst for H₂ production via glycerol steam reforming*. Applied Catalysis B: Environmental, 2021. **291**: p. 119958.

45. Qingli, X.Z., Z.; Kai, H.; Shanzhi, X.; Chuang, M.; Chenge, C.; Huan, Y.; Yang, Y.; Yongjie, Y., *Ni supported on MgO modified attapulgite as catalysts for hydrogen production from glycerol steam reforming*. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. **46**(54): p. 27380-27393.
46. Yao, D.Y., H.; Chen, H.; Willams, P., *Co-precipitation, impregnation and so-gel preparation of Ni catalysts for pyrolysis-catalytic steam reforming of waste plastics*. Applied Catalysis B: Environmental, 2018. **239**: p. 565-577.
47. Barbarias, I.L., G.; Artetxe, M.; Arregi, A.; Bilbao, J.; Olazar, M., *Valorisation of different waste plastics by pyrolysis and in-line catalytic steam reforming for hydrogen production*. Energy Conversion and Management, 2018. **156**: p. 575-584.
48. Lima, D.S.C., C.O.; Perez-Lopez, O.W. , *Hydrogen production by glycerol steam reforming over Ni based catalysts prepared by different methods*. Biomass and Bioenergy, 2019. **130**: p. 105358.
49. Alvarez, J.K., S.; Wu, C.; Yoshioka, T.; Bilbao, J.; Olazar, M.; Williams P.T. , *Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification*. International Journal of Hydrogen Energy, 2014. **39**(21): p. 10883-10891.
50. Erkiaga, A.L., G.; Barbarias, I.; Artetxe, M.; Amutio, Maider.; Bilbao, J.; Olazar, M. , *HDPE pyrolysis-steam reforming in a tandem spouted bed-fixed bed reactor for H₂ production*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015. **116**: p. 34-41.
51. Chai, Y.G., N.; Wang, M.; Wu, C., *H₂ production from co-pyrolysis/gasification of waste plastics and biomass under novel catalyst Ni-CaO-C*. Chemical Engineering Journal, 2020. **382**: p. 122947.

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณผลได้และองค์ประกอบของแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณผลได้และความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ในแก๊สผลิตภัณฑ์จากการทดลองในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3 โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

- สารละลายกลีเซอรอล (เข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)		
- ปริมาณพลาสติก	0.2197	กรัม
- อุณหภูมิไพโรไลซิส	700	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิรีฟอร์มมิ่ง	800	องศาเซลเซียส
- เวลาในการทดลอง	30	นาที
- ช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างแต่ละจุดเก็บแก๊ส	5	นาที
- อัตราการป้อนเข้าของแก๊สอาร์กอน	40	มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการป้อนเข้าของน้ำ	0.2	มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการป้อนเข้าของสารละลายกลีเซอรอล	0.05	มิลลิลิตรต่อนาที
- รัศมีภายในของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส	0.5	เซนติเมตร
- ช่วงความสูงที่พิจารณาในการวัดอัตราการไหลของแก๊ส	10	เซนติเมตร

ขั้นตอนการคำนวณ

1. คำนวณปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที

สารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อคิดอัตราการป้อนเข้าของกลีเซอรอลจะได้เป็น 0.025 มิลลิลิตรต่อนาที

จากสูตร $\rho = \frac{m}{V}$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของกลีเซอรอล (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

m คือ มวลของกลีเซอรอล (กรัม)

V คือ ปริมาตรของกลีเซอรอล (มิลลิลิตร) ในเวลา 1 นาที

$$m = \rho V = (1.26 \text{ g/cm}^3) \times (0.025 \text{ mL})$$

$$m = 0.0315 \text{ g}$$

ดังนั้นในเวลา 30 นาที ปริมาณกลีเซอรอลที่ถูกป้อนเข้าเท่ากับ $0.0315 \text{ g} \times 30 \text{ min} = 0.945 \text{ กรัม}$

2. คำนวณปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์

ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับปริมาตรในช่วงที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สในอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่มีรัศมีภายใน 0.5 เซนติเมตร ในช่วงความสูง 10 เซนติเมตร ดังสมการ

$$V = \frac{\pi \times (0.5)^2 \times 10 \times T \times 60}{Y}$$

โดย V คือ ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)

Y คือ ระยะเวลาเฉลี่ยของฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านความสูง 10 เซนติเมตร (นาที)

T คือ ระยะเวลาที่เก็บแก๊สตัวอย่าง (นาที)

ตารางที่ ก1 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

ถุงเก็บแก๊สที่	ที่เวลา (นาที)	ระยะเวลาเฉลี่ย (วินาที)	ปริมาตรแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิเมตร)
1	5	4.10	$471 \times 5 / 4.10 = 574.39$
2	10	5.29	$471 \times 5 / 5.29 = 445.18$
3	15	5.59	$471 \times 5 / 5.59 = 421.29$
4	20	5.39	$471 \times 5 / 5.39 = 436.92$
5	25	4.77	$471 \times 5 / 4.77 = 493.71$
6	30	7.32	$471 \times 5 / 7.32 = 321.72$

3. การคำนวณร้อยละความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแก๊สผลิตภัณฑ์

ร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณได้จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ GC ของแก๊สมาตรฐานร้อยละ 1 โดยปริมาตร ดังที่แสดงในตารางที่ ก2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มข้นของแก๊สผลิตภัณฑ์ถุงที่หนึ่ง ดังแสดงตารางที่ ก3

ตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐานด้วยเทคนิค GC

องค์ประกอบของแก๊ส	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้น
ไฮโดรเจน (H ₂)	25519.7	1
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1325.8	1
มีเทน (CH ₄)	4534.3	1
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	1534.6	1

ตารางที่ ก3 การคำนวณปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	พื้นที่	ร้อยละความเข้มข้นเทียบกับ	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
แก๊สมาตรฐาน (โดยปริมาตร)			
ไฮโดรเจน	619221.8	$619221.8/25519.7 = 24.26$	$24.26 \times 574.39/100 = 139.35$
คาร์บอนมอนอกไซด์	10659.4	$10659.4/1325.8 = 8.04$	$8.04 \times 574.39/100 = 46.18$
มีเทน	41912.9	$41912.9/4534.3 = 9.24$	$9.24 \times 574.39/100 = 53.07$
คาร์บอนไดออกไซด์	9378.8	$9378.8/1534.6 = 6.11$	$6.11 \times 574.39/100 = 35.10$

4. การคำนวณความเข้มข้นรวมขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก4 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	จำนวนโมลรวมของทุกแก๊ส (มิลลิโมล)	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยปริมาตร)
ไฮโดรเจน	38.71	$38.71 / 51.10 \times 100 = 75.74$
คาร์บอนมอนอกไซด์	7.78	$7.78 / 51.10 \times 100 = 15.22$
มีเทน	3.18	$3.18 / 51.10 \times 100 = 6.23$
คาร์บอนไดออกไซด์	1.43	$1.43 / 51.10 \times 100 = 2.81$
รวม	51.10	100

5. การคำนวณหาผลได้ขององค์ประกอบต่างๆ ในแก๊สผลิตภัณฑ์

ปริมาณผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในแก๊สผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณได้จากจำนวนโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์หารด้วยน้ำหนักของกลีเซอรอลและพลาสติกที่ถูกบ้อน ภายใต้สมมติฐานของแก๊สอุดมคติ ดังสมการ

$$PV = nRT$$

โดย P คือ ความดัน (atm)

V คือ ปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์ (มิลลิลิตร)

n คือ จำนวนโมลของแก๊สแต่ละองค์ประกอบ (มิลลิโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 0.082057

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

ผลการคำนวณผลได้ขององค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์ถุงที่หนึ่ง ที่ได้รับการทดลองโดยไฟโรไลซิสร่วมกับรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของพลาสติกและกลีเซอรอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$ แสดงดังตารางที่ ก5

ตารางที่ ก5 การคำนวณผลได้ขององค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่หนึ่ง

องค์ประกอบของแก๊ส	ปริมาตรของแก๊ส (มิลลิลิตร)	จำนวนโมล (มิลลิลิตร)	จำนวนโมลต่อกรัมของกลีเซอรอลและ พลาสติก (มิลลิโมลต่อกรัม)
ไฮโดรเจน	139.35	$(1 \times 139.35) / (0.082057 \times 298) = 5.70$	$5.70 / (0.9450 + 0.2197) = 4.90$
คาร์บอนมอนอกไซด์	46.18	$(1 \times 46.18) / (0.082057 \times 298) = 1.89$	$1.89 / (0.9450 + 0.2197) = 1.62$
มีเทน	53.07	$(1 \times 53.07) / (0.082057 \times 298) = 2.17$	$2.17 / (0.9450 + 0.2197) = 1.86$
คาร์บอนไดออกไซด์	35.10	$(1 \times 35.10) / (0.082057 \times 298) = 1.44$	$1.44 / (0.9450 + 0.2197) = 1.24$
รวม	273.70	11.20	9.62

6. การคำนวณผลได้รวมขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก6 การคำนวณร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบภายในแก๊สผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบของแก๊ส	จำนวนโมลรวมของทุกแก๊ส	จำนวนโมลต่อกรัมกลีเซอรอลและพลาสติก
	(มิลลิโมล)	(มิลลิโมลต่อกรัม)
ไฮโดรเจน	38.71	$38.71 / 1.1647 = 33.24$
คาร์บอนมอนอกไซด์	7.78	$7.78 / 1.1647 = 6.68$
มีเทน	3.18	$3.18 / 1.1647 = 2.73$
คาร์บอนไดออกไซด์	1.43	$1.43 / 1.1647 = 1.23$
รวม	51.10	43.88

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวพัชรพร วิบูลย์วิมลรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	7 มกราคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สาขาวิชาปรีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 2 ซอยวัดผนาคาม ถนนประชาชื่น เขตบางซื่อ แขวงบางซื่อ จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10800



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY