

การแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน

นางสาวปรานค์ทิพย์ แก้วเพ็ญกรอ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONVERSION OF PLASTIC WASTES FROM LANDFILL USING PYROLYSIS AND  
GASIFICATION PROCESSES

Miss Prangtip Kaewpengkrow

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering  
Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2010  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดย

กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน

โดย

นางสาวปรารงค์ทิพย์ แก้วเพ็งกรอ

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ดวงเดือน อัจฉรงค์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ดวงเดือน อัจฉรงค์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

ปรารภวิทยุ แก้วเพ็งกรอ : การแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน. (CONVERSION OF PLASTIC WASTES FROM LANDFILL USING PYROLYSIS AND GASIFICATION PROCESSES)  
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล. อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ดวงเดือน อางองค์, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 700-900 °C ที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 – 0.6 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับแกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือแก๊สไฮโดรคาร์บอน การไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้ต่ำ ค่าความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 6.52–9.39 MJ/m<sup>3</sup> ค่าความร้อนสูงสุดเกิดที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงต่อไป และพบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 700 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 86.42 ซึ่งการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำคือ 700 °C จะประหยัดพลังงานมากกว่าที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในการแกซิฟิเคชันพบว่าปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าสูงอยู่ในช่วง 87.23–94.29% ผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวมีปริมาณลดลง ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้นและยังพบว่าค่าความร้อนมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 15.76–19.26 MJ/m<sup>3</sup> มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 900 °C จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม การผลิตแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์แต่ไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นการแปรสภาพทางเคมีด้วยความร้อนของขยะพลาสติกที่ผ่านการฝังกลบโดยกระบวนการแกซิฟิเคชันจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางหนึ่งในการจัดการของเสีย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา...2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

## 5170373021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CATALYST/ GASIFICATION/ LANDFILL / PLASTIC WASTES/  
PYROLYSIS

PRANGTIP KAEWPENKROW: CONVERSION OF PLASTIC WASTES FROM  
LANDFILL USING PYROLYSIS AND GASIFICATION PROCESSES.  
ADVISOR: ASST.PROF. VIBOON SRICHAROENCHAIKUL, Ph.D.CO-  
ADVISOR: DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 112 pp.

Pyrolysis and gasification processes were utilized in order to study the feasibility on production of value added fuels from landfilled plastic wastes. Plastic wastes were converted in a gasifier at 700–900 °C. Equivalence ratio (ER) was varied from 0.4–0.6 with or without addition of Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. Methane was found to be the major gaseous products. The pyrolysis and gasification of plastic wastes without Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst resulted in relatively low H<sub>2</sub> and CO with energy content ranged from 6.52–9.39 MJ/m<sup>3</sup>. The highest LHV obtained from 800°C and equivalence ratio of 0.4 is suitable for further usage as quality fuel gas. The maximum cold gas efficiency of 86.42% occurred at 700°C and equivalence ratios as 0.4, it would be more economical to gasify this plastic waste at lower temperature of 700°C. The residence time is one of important operating variables in the plastics gasification process. There is significant effect observed in amount or composition of gaseous products which a residence time of 1.3 s was found to be optimum in product gas with amounts of H<sub>2</sub> and CO. The presence of the Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst significantly enhanced H<sub>2</sub> and CO production as well as increased gas energy content to 15.76–19.26 MJ/m<sup>3</sup>. Higher temperature resulted in more H<sub>2</sub> and CO and product gas yield which ranged from 87.23–94.29%. The maximum gas yield was achieved when Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst was used at 900°C; it had significant effects on product gas yield, H<sub>2</sub> and CO production, calorific value and cold gas efficiency and no significant effect on reduction of hydrocarbon production. Thus, thermochemical treatment of landfilled plastic wastes using gasification is a very attractive alternative for sustainable waste management.

Department : <u>Environmental Engineering</u>	Student's Signature .....
Field of Study : <u>Environmental Engineering</u>	Advisor's Signature .....
Academic Year : <u>2010</u> .....	Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุลอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่ได้กรุณาใช้เวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาอบรม สั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย ตลอดจนขอบคุณพี่ๆ ผู้ช่วยนักวิจัยของ ดร. ดวงเดือน อางองค์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาและคำแนะนำด้านเทคนิคเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ลูกศิษย์อาจารย์วิบูลย์ สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้ประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมคณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือคำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร.....	5
2.1 ขยะของแข็งจากชุมชน.....	5
2.2 พลาสติก.....	7
2.2.1 สมบัติของพลาสติก.....	9
2.2.2 การผลิตพลาสติกจากก๊าซธรรมชาติและปิโตรเลียม.....	12
2.2.3 ประเภทของพลาสติก.....	14
2.2.4 การสลายตัวของพอลิเมอร์.....	16
2.2.5 การนำพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่.....	17
2.2.6 การนำผลิตภัณฑ์จากการสลายพลาสติกไปใช้ประโยชน์.....	20
2.2.7 ผลกระทบของพลาสติกที่ใช้งานแล้วต่อสิ่งแวดล้อม.....	21
2.3 กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน.....	23
2.3.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....	23
2.3.2 กระบวนการแกซิฟิเคชัน.....	26
2.3.3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	30
2.3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	37

	หน้า
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	39
2.4.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
2.4.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีเคลือบผง.....	41
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.1.1 การเตรียมขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.1.2 การเตรียมเครื่องปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด.....	48
3.1.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	49
3.1.4 การดำเนินการกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน.....	50
3.2 การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์.....	52
3.2.1 การเตรียมขยะพลาสติก.....	52
3.2.2 การเตรียมเครื่องปฏิกรณ์.....	53
3.2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	53
3.2.4 การเตรียมระบบก่อนดำเนินการทดลอง.....	53
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	53
3.3.1 ลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของขยะพลาสติก.....	54
3.3.2 กระบวนการไพโรไลซิสของขยะพลาสติกที่สภาวะต่างๆ.....	54
3.3.3 กระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติกที่สภาวะต่างๆ.....	55
3.3.4 กระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55
3.3.5 วิเคราะห์ปริมาณและลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	59
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะพลาสติก.....	59
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	60
4.1.2 การวิเคราะห์การสลายทางความร้อนของพลาสติก.....	61
4.2 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่ง.....	62
ปฏิกิริยา.....	62



4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	63
4.2.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราสมมูลต่อผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชัน.....	65
4.2.3 ผลของอุณหภูมิจากกระบวนการแกซีฟิเคชันต่อปริมาณแก๊ส สังเคราะห์.....	69
4.2.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	70
4.2.5 ผลขององค์ประกอบของแข็ง (ชาร์) จากกระบวนการไพโรไลซิส..... และแกซีฟิเคชัน.....	75
4.3 ผลของระยะเวลาเก็บกักของแก๊ส (Residence time).....	76
4.4 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันขยะพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	79
4.4.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	80
4.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	81
4.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	84
4.5 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันถุงพลาสติกใหม่.....	87
 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
 รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก .....	97
ภาคผนวก ข.....	101
ภาคผนวก ค.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและปริมาณของขยะมูลฝอยของประเทศไทยปี 2550.....	5
ตารางที่ 2.2 ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	10
ตารางที่ 2.3 ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานของวัสดุต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและ.....	15
ความหนาแน่นสูง.....	
ตารางที่ 2.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและไอน้ำ.....	23
ตารางที่ 2.7 ปฏิกริยาแกซิฟิเคชันของชีวมวล.....	29
ตารางที่ 2.8 ผลกระทบจากกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท.....	31
ตารางที่ 2.9 ผลกระทบจากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2.10 ปัจจัยที่มีผลของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์.....	36
ตารางที่ 2.11 กระบวนการทางความร้อนเคมีในรูปแบบต่างๆ.....	36
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกของงานวิจัยต่างๆ.....	60
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสามัญ.....	73
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลของระบบแกซิฟิเคชันต่อค่าความร้อนของ.....	74
แก๊สผลิตภัณฑ์.....	
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง.....	76
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	80

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตพลาสติกจากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ.....	13
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนขยะพลาสติกหลังจากเก็บและแยก.....	19
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงที่มาของพลาสติกและการรีไซเคิลกลับไปเป็นมोनอเมอร์หรือสารตั้งต้นทางเคมี.....	20
รูปที่ 2.4 กราฟสามเหลี่ยมแสดงกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน.....	25
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเคมีทั่วไปที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แกซีฟิเคชัน.....	27
รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการไพโรไลซิส.....	35
รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ.....	39
รูปที่ 2.8 บทบาทของตัวรองรับต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว .....	41
รูปที่ 3.1 ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของพลาสติกแบบประมาณ (TGA) และเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	48
รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสรูปทรงกระบอก.....	49
รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเข้ากับเตาไฟฟ้าให้ความร้อน.....	50
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ร้อยละก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาและอุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์เหลว.....	50
รูปที่ 3.6 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์.....	51
รูปที่ 3.7 การคัดแยกขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ .....	52
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเดินระบบในกระบวนการไพโรไลซิส .....	57
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเดินระบบในกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	58
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนของพลาสติกชนิดต่างๆและขยะพลาสติก	62
รูปที่ 4.2 ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อดำเนินการทดลองเป็นเวลา 20 นาทีที่ ..... สภาวะต่างกัน.....	63
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก.....	64
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนจากการ..... ไพโรไลซิส .....	65
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันที่อัตราสมมูลต่างๆ ....	66
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราสมมูลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน .....	67

รูปที่ 4.7 ผลของอัตราสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนไฮโดรเจน.....	68
รูปที่ 4.8 ผลของแก๊สสังเคราะห์ต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	69
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อน ต่ำจากกระบวนการไพโรไลซิส.....	71
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อน ต่ำที่ ER: 0.4.....	72
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อน ต่ำที่ ER 0.6.....	72
รูปที่ 4.12 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์เมื่อ..... อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4.....	77
รูปที่ 4.13 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อร้อยละของแก๊สสังเคราะห์.....	78
รูปที่ 4.14 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน.... ของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	79
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni- Mg- La/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	80
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni- Mg- La /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	81
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ของการแกซิฟิเคชัน โดยไม่ใช้ตัวเร่ง.... ปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni- Mg- La /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	82
รูปที่ 4.18 ผลของแก๊สสังเคราะห์ต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	83
รูปที่ 4.19 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพและค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	84
รูปที่ 4.20 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของ..... แก๊สผลิตภัณฑ์.....	86
รูปที่ 4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะต่างๆ.....	86
รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพและค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกถือว่ามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันอย่างมาก เนื่องจากวัสดุอุปกรณ์ส่วนใหญ่ล้วนเป็นพลาสติกเพราะหาใช้ได้ง่าย มีความคงทน ราคาถูก จึงไม่อาจหลีกเลี่ยงปริมาณขยะพลาสติกที่มีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขยะพลาสติกส่วนใหญ่ประกอบด้วย โพลีเอทิลีน (PE) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีสไตรีน (PS) ซึ่งรวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 70 ในขยะพลาสติก ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดขยะพลาสติกมากขึ้นตามไปด้วย วิธีการกำจัดขยะพลาสติกที่นิยมคือการฝังกลบและการเผา ซึ่งในปัจจุบันพื้นที่สำหรับฝังกลบขยะมีไม่เพียงพอกับปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน สำหรับเมืองใหญ่ที่หาพื้นที่ฝังกลบยากและไม่มีพื้นที่ว่างมากพอสำหรับฝังกลบขยะจะนิยมใช้วิธีการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการเผาทิ้ง ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาตรขยะได้สูงประมาณร้อยละ 90 โดยปริมาตรและร้อยละ 75 โดยน้ำหนักแต่จะเกิดเถ้าจากการเผาและยังก่อให้เกิดแก๊สและมลสารที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) ไดออกซิน เป็นต้น (สุวรรณณี จรรยาพูน, 2549) นอกจากนี้ยังต้องทำการบำบัดความเป็นพิษของแก๊สจากการเผาก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ การดำเนินการควบคุมมลพิษมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้การรีไซเคิลพลาสติกจึงจำเป็นอย่างมากซึ่งวิธีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่มีหลายวิธี เช่น การรีไซเคิลด้วยวิธีทางฟิสิกส์คือการใช้เครื่องจักรทำให้พลาสติกที่ใช้แล้วเปลี่ยนไปเป็นพลาสติกใหม่ วิธีนี้จะทำให้พลาสติกที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าเดิมและยังมีขีดจำกัดด้านประสิทธิภาพของเครื่องจักร การรีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมีผลิตภัณฑ์ที่ได้คือสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการรีไซเคิลขยะพลาสติกโดยการสลายตัวด้วยความร้อนสูงเป็นการรีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมีนับว่าเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการแปรสภาพพลาสติกกลับไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถทำการบำบัดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกันหลายชนิด โดยไม่ต้องทำการแยก การรีไซเคิลพลาสติกด้วยวิธีนี้ยังสามารถช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศ ที่เกิดจากการเผาไหม้ในสถานะที่ใช้ออกซิเจนและลดปัญหาพื้นที่ในการฝังกลบไม่เพียงพอเป็นอย่างมาก

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน กระบวนการนี้จะทำให้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงสลายตัวกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและเป็นสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พลาสติกที่นำมารีไซเคิลด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดจากโรงงาน

อุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัย กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการรีไซเคิลพลาสติกที่เป็นพลาสติกผสมมากกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ พลาสติกแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังนั้นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ผสมกัน นอกจากนี้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณลักษณะแตกต่างกันอีกด้วย การสลายตัวด้วยความร้อนอีกวิธีหนึ่งคือกระบวนการแกซิฟิเคชันเป็นการทำให้ขยะเป็นแก๊สโดยทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ โดยสารอินทรีย์ในขยะพลาสติกจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนปริมาณจำกัดเกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบหลักได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และ แก๊สไฮโดรคาร์บอนโดยเรียกแก๊สผสมระหว่ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ว่า แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท นอกจากนี้ยังมีการนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นปิโตรเลียมอีกด้วย

จากปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เฉพาะในกรุงเทพมหานครมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เก็บขนได้วันละ 8,291 ตัน โดยเป็นขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 17 หรือประมาณ 2.4 ล้านตันต่อปี (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2552) การฝังกลบไม่อาจลดปริมาณขยะพลาสติกให้หมดไปได้ ส่วนวิธีการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการเผาแม้ว่าจะเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณขยะได้สูงแต่จะเกิดเถ้าจากการเผาและยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ทำให้ต้องเสียต้นทุนในการบำบัดมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงสนใจนำขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบมาผ่านกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน โดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าขยะพลาสติกก่อให้เกิดปัญหาในการหาหลุมทิ้งขยะ เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีปริมาณมากความหนาแน่นต่ำทำให้เปลืองเนื้อที่ในการฝังกลบ ดังนั้นการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่อออกซิเจน (อัตราสมมูล) ระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (ระยะเวลาพักของแก๊ส) และผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมและปริมาณแก๊สสังเคราะห์ นอกจากนี้จะเป็นแนวทางที่สามารถผลิตพลังงานแล้วยังเป็นแนวทางการจัดการของเสียที่ดีอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรสภาพขยะพลาสติกโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน

1.2.2 ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยได้จากหลุมฝังกลบที่ดำเนินการฝังกลบแล้วเป็นเวลา 20 ปี จากจังหวัดสงขลา

1.3.2 ใช้เครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.85 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 1.85 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตรร่วมกับอะลูมินาบอลเป็นชั้นรองรับ

1.3.3 ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาและแก๊สออกซิเจนเป็นออกซิไดซิ่งแก๊สในการเดินระบบ

1.3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิส โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 700–900 °C

1.3.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่

1.3.5.1 ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 700–900 °C

1.3.5.2 อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อแก๊สเชื้อเพลิงคือ 0.4 และ 0.6

1.3.5.3 ระยะเวลาเก็บกักของแก๊สผลิตภัณฑ์ (residence time) 0.8 และ 1.3 วินาที

1.3.5.4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน

1.3.6 วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ซึ่งแสดงผลร้อยละองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และแก๊สไฮโดรคาร์บอน

1.3.7 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ชาร์) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก

1.3.8 ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโรงงานต้นแบบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติกในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนและสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่างๆ

1.4.2 สามารถนำขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกจากหลุมฝังกลบที่ผสมกันหลายชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้และลดปัญหามลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้และแก๊สเรือนกระจก

1.4.3 สามารถลดปัญหาพื้นที่ฝังกลบที่มีไม่เพียงพอกับปริมาณขยะพลาสติกจำนวนมากและเป็นการสนับสนุนให้เกิดพลังงานทางเลือกอีกวิธีหนึ่งในอนาคต



## บทที่ 2

### การทบทวนเอกสาร

#### 2.1 ขยะของแข็งจากชุมชน

ขยะเป็นของเหลือทิ้งที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ จากอัตราการเพิ่มจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณขยะเพิ่มสูงขึ้นจนก่อให้เกิดปัญหาในเมืองใหญ่ต่างๆ ขยะของแข็งจากชุมชน หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากชุมชน เช่น ที่พักอาศัย ธุรกิจร้านค้า สถานบริการ ตลาดสด สถาบันต่างๆ การกำจัดขยะไม่ว่าจะนำไปฝังกลบนำไปเผาหรือนำไปย่อยก็ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การจัดการขยะอย่างถูกวิธีจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งต้องเข้าใจองค์ประกอบของขยะนั้นๆ โดยทั่วไปประกอบด้วยสิ่งเหล่านี้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและปริมาณของขยะมูลฝอยของประเทศไทยปี 2550 (T. Kaosol, 2009)

องค์ประกอบของขยะ	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
ขยะอินทรีย์	48
กระดาษ	15
พลาสติก	14
แก้ว	5
โลหะ	4
อื่นๆ	14
รวม	100

ในปี 2548 มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นทั่วประเทศประมาณ 14.3 ล้านตัน หรือ 39,221 ตันต่อวัน (ยังไม่รวมข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยก่อนนำมาทิ้งในถัง) โดยเป็นขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 17 คิดเป็น 2.4 ล้านตันต่อปี หรือ 6,000 ตันต่อวัน เฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เก็บขนได้วันละ 8,291 ตัน ในอุตสาหกรรมพลาสติกปริมาณของเสียประเภทพลาสติกมีประมาณ 2.08 ล้านตัน มีการนำเศษพลาสติกกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ประมาณ 0.46 ล้านตัน หรือร้อยละ 22 เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา รวมทั้งสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายจึงทำให้มีปริมาณการใช้พลาสติกเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่อาจแทนที่การใช้บรรจุภัณฑ์ประเภทโลหะ แก้ว และกระดาษ ส่งผลให้มีปริมาณของเสียประเภท

พลาสติกเพิ่มมากขึ้น แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณของเสียประเภทพลาสติกคือการคัดแยกและรวบรวมเพื่อนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2552)

เทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงานความร้อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายเทคโนโลยี ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีจะมีวิธีการและต้นทุนแตกต่างกันไปได้แก่ การเผาทิ้ง เทคโนโลยีแก๊สซิเคชัน กระบวนการไพโรไลซิสและพลาสมาอาร์ค เทคโนโลยีการเผาทิ้งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันมานานและให้ผลค่อนข้างดี ส่วนเทคโนโลยีแก๊สซิเคชันและไพโรไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยมีข้อดีในด้านการกำจัดมลภาวะที่เกิดจากการเผาได้ดีกว่า สำหรับเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่แพร่หลายอยู่ในระหว่างการพัฒนา การกำจัดขยะโดยการเผาทำลายด้วยความร้อนนี้เป็นวิธีการที่จะทำให้ได้พลังงานกลับคืนมาในรูปของความร้อน ซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าการกำจัดขยะแบบอื่น สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้การกำจัดขยะวิธีนี้คือค่าความร้อนของขยะมูลฝอยที่จะส่งเข้ากระบวนการเผา ซึ่งโดยทั่วไปควรมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 2,150 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม หากค่าความร้อนของขยะต่ำกว่านี้จะต้องใช้เงินลงทุนเพิ่มสูงขึ้นนอกจากนี้จะต้องมีปริมาณขยะที่เผาไหม้ได้เป็นสัดส่วนที่สูงเพียงพอ

กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน เป็นกระบวนการทำให้ขยะเป็นแก๊สโดยทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ โดยสารอินทรีย์ในขยะจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนปริมาณจำกัด ทำให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและแก๊สที่ได้จะมีค่าความร้อนต่ำประมาณ 3-5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ) แต่ถ้าใช้ออกซิเจนเป็นแก๊สทำปฏิกิริยาแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าคือ ประมาณ 15-20 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันโดยกระบวนการไพโรไลซิส นอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่กำจัดยากเพราะต้องใช้เวลาย่อยสลายนานนับร้อยปีแล้วยังช่วยลดความยุ่งยากในการหาหลุมทิ้งขยะแห่งใหม่และข้อขัดแย้งกับชุมชนที่อยู่ใกล้บริเวณหลุมฝังกลบ ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและวิกฤติพลังงาน ที่สำคัญบ่อขยะที่เคยสร้างปัญหาที่จะกลายเป็นแหล่งพลังงานไปได้ในที่สุด จากการวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศพบว่าขยะพลาสติกสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดิบและเริ่มมีการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันแล้วในหลายประเทศ ซึ่งสามารถผลิตน้ำมันเบนซินจากขยะพลาสติกและยางได้ถึงร้อยละ 50 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2552)

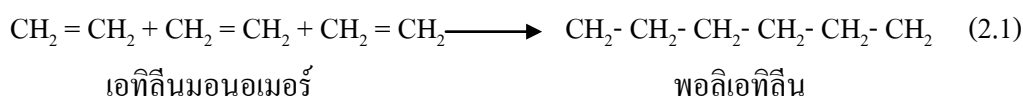
ขยะของแข็งเหล่านี้หากนำไปฝังกลบทันทีจะก่อให้เกิดปัญหาจากแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งสารอันตรายที่ตกค้างอยู่ในบรรจุภัณฑ์ซึ่งสามารถถูกชะออกด้วยน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงควรพิจารณานำขยะของแข็งประเภทต่างๆกลับมาใช้ให้เหมาะสม จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ามีขยะพลาสติกปริมาณมากที่ก่อให้เกิดปัญหาในการหาหลุมทิ้งขยะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีปริมาตรมาก ความหนาแน่นต่ำทำให้เปลืองเนื้อที่ในการฝังกลบ ดังนั้นการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางหนึ่ง ซึ่งเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำพลาสติกหมุนเวียนกลับมา

ใช้ใหม่มีหลายกระบวนการขึ้นอยู่กับลักษณะของพลาสติกนั้นๆดังจะกล่าวต่อไป

## 2.2 พลาสติก

พลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการนำมาแทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง พลาสติกเกิดจากกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลขนาดเล็กมาต่อกันจนมีขนาดเล็กละมาต่อกันเข้าจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเปรียบเสมือนการนำลูกปัดมาเรียงร้อยให้เป็นสายสร้อยซึ่งเรียกว่า การเกิดพอลิเมอร์ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพลาสติกแต่ก็ต้องอาศัยความดันสูง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นให้โมเลกุลขนาดเล็กมายึดต่อเข้าด้วยกัน (อรสา อ่อนจันทร์, 2549)

พอลิเมอร์ หมายถึง สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดจากการรวมกันของโมเลกุลเล็กๆจำนวนมากด้วยพันธะโควาเลนต์ มีโครงสร้างทางเคมีเป็นโมเลกุลโซ่ยาวมีสมบัติเชิงกล เช่น ทนต่อแรงดึงแรงกระแทกได้ดี มีน้ำหนักเบา สามารถนำมาใช้ในลักษณะต่างๆ เช่น ฟิล์ม เส้นใย แผ่น และผลิตภัณฑ์รูปร่างตามต้องการได้ ซึ่งพอลิเมอร์มีทั้งที่มาจากธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเตรียมจากโมเลกุลเล็กๆเรียกว่ามอนอเมอร์ พลาสติกที่สังเคราะห์ทำมาจากน้ำมันและแก๊สในอุตสาหกรรม การกลั่นปิโตรเลียม การเกิดพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดจากโมเลกุลขนาดเล็กที่ยึดต่อกันเป็นโมเลกุลของสารขนาดเล็กที่อยู่ซ้ำๆกันในพอลิเมอร์ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่ปลายสองข้างของโมเลกุล ซึ่งจะเหมือนหรือต่างกันได้หรือมีพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งคู่ในโมเลกุลสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่เหมือนกันหรือต่างกันได้ เพื่อเกิดเป็นโมเลกุลที่มีโซ่ยาวเรียกว่าพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น เอทิลีนมอนอเมอร์เป็นโมเลกุลพื้นฐานของพอลิเอทิลีน

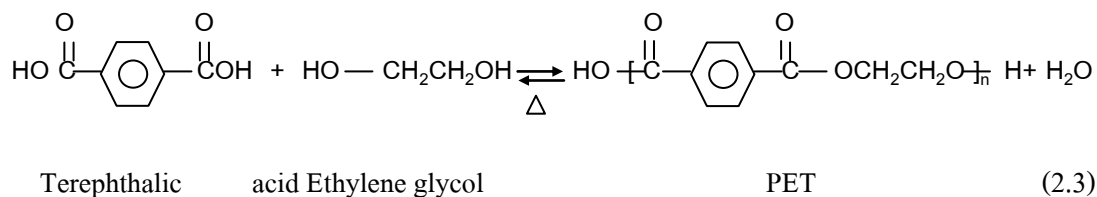


ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมหรือแบบลูกโซ่ คือ มอนอเมอร์ต้องมีพันธะคู่อย่างน้อย 1 คู่ และต้องมีตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อนแสงหรือรังสี ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมเป็นการที่มอนอเมอร์ทุกหน่วยมาต่อกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ โดยไม่มีสิ่งใดหลุดออกมดั่งสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นหรือปฏิกิริยาแบบขั้น คือ มอนอเมอร์ที่เข้าทำปฏิกิริยาต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยากันได้อยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง เช่น พอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีการกำจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกซึ่งก็คือน้ำดังสมการที่ 2.3 (มาลินี

ชัยศุภกิจสินธุ์, 2546)



การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์สามารถแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆดังนี้

- พอลิเมอร์แบบเส้น เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาวโซ่ พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูงมีลักษณะ แข็งขุ่นเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ เช่น พีวีซี พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน เป็นต้น



- พอลิเมอร์แบบกิ่ง เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้น และโซ่ยาว กิ่งที่แตกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลักทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้ มากจึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ ยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



- พอลิเมอร์แบบร่างแห เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแหพอลิเมอร์ ชนิดนี้มีความแข็งแรงและเปราะหักง่าย ตัวอย่างเช่น เบกาไลต์ เมลามีน ใช้ทำถ้วยชาม



### 2.2.1 สมบัติของพลาสติก

พลาสติก หมายถึง วัสดุที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากธาตุพื้นฐาน 2 ชนิด คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อเติมสารบางอย่างลงไปจะทำให้พลาสติกมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น แข็งแกร่ง ทนความร้อน ลื่นและยืดหยุ่น เราอาจสังเคราะห์พลาสติกชนิดต่าง ๆ ได้มากมาย โดยการเติมสารเคมีชนิดต่าง ๆ เข้าไปโดยใช้สัดส่วนและกรรมวิธีที่แตกต่างกัน พลาสติกประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่เรียกว่า พอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากโมเลกุลขนาดเล็กที่มาต่อเข้าด้วยกันเป็นสายยาวเหมือนโซ่ สายโมเลกุลเหล่านี้จะเกี่ยวพันกันทำให้พลาสติกแข็งแรง แต่กว่าจะดึงสายโมเลกุลพลาสติกให้แยกจากกันได้ก็ต้องใช้แรงมากพอสมควร กระบวนการที่ทำให้โมเลกุลขนาดเล็กมาต่อรวมกันเข้าจนมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นเรียกว่า การเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพลาสติก ตัวเร่งปฏิกิริยาจะกระตุ้นให้โมเลกุลขนาดเล็กมายึดต่อเข้าด้วยกันพลาสติกมีโครงสร้างพิเศษ คือ โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันยาวกว่าสารชนิดอื่นมากมายนับเป็นพันเท่า จึงทำให้พลาสติกมีสมบัติหลายๆ อย่างไปพร้อมกันคือสมบัติทางกล พลาสติกจะมีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ทนแรงกระแทกได้ดี มีความทนทานทางกลสูงและยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า สมบัติที่สำคัญของพลาสติกอีกอย่างหนึ่งคือสมบัติทางเคมี ซึ่งพลาสติกมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีจุดหลอมเหลวสูงตั้งแต่ 80-150 °C ที่อุณหภูมิต่ำจะแข็งส่วนใหญ่มิมีความถ่วงเฉพาะต่ำจึงมีน้ำหนักเบาทนกรด ด่างและสารเคมีอื่นๆ โดยมากไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของพลาสติกนับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของพลาสติกชนิดนั้นๆ ว่าเหมาะสมในการนำมาเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อนหรือไม่ การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีมีหลายแบบได้แก่

2.2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของพลาสติกแบบประมาณ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิการทดลองจะทำในระบบปิดเครื่องจะประกอบด้วยเตาเผาที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ บรรยากาศ ความดันและมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปการทดสอบด้วยวิธีนี้จะสามารถทดสอบได้ถึงอุณหภูมิ 1,000 °C และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น การสูญเสียน้ำหนักประกอบ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่

การวิเคราะห์แบบประมาณทำให้ทราบค่าความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นคาร์บอนที่พบในวัสดุซึ่งหลังจากสารระเหยถูกขับออกไปแล้วนอกจากนี้ยังทำให้ทราบร้อยละการเกิดแก้ววัสดุนั้น การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นกลุ่มเทคนิคที่ทำเป็นประจำสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ เซรามิกส์ โลหะและวัสดุทั่วไปอื่น ๆ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อนเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและ

ลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อนที่วัสดุจุดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุซึ่งงานภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา การแสดงผลของการวิเคราะห์มักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลในหน่วยของเปอร์เซ็นต์กับอุณหภูมิ หรือเวลา ข้อมูลที่ได้จะทราบถึงการสลายตัวโดยเส้นกราฟอาจแสดงถึงการระเหยของสารส่วนที่ระเหยได้ โดยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงมวลตาม ในกรณีการเปลี่ยนแปลงแบบหลายขั้นตอน ซึ่งไม่สามารถระบุมวลที่คงที่ระหว่างช่วงของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้ซึ่งสามารถใช้สูตรของการคำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงมวล} = \frac{(\text{มวลเริ่มต้น} - \text{มวลสุดท้าย})}{\text{มวลสุดท้าย}} \times 100 \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติกประเภทต่างๆ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ประเภทของพลาสติก	การวิเคราะห์แบบประมาณ (% โดยน้ำหนัก)				ค่าพลังงาน (Btu/lb)		
	ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า	ที่จุดเก็บ	แห้ง	Dry ash – free
พลาสติกผสม	0.2	95.8	2.0	2.0	14101	14390	16024
พอลิเอทิลีน	0.2	98.5	< 0.1	1.2	18678	18724	18952
พอลิสไตรีน	0.2	98.7	0.7	0.5	16429	16451	16430
พอลิยูรีเทน	0.2	87.1	8.3	4.4	11204	11226	11744
พีวีซี	0.2	86.9	10.8	2.1	9755	9774	9985

2.2.1.2 จุดหลอมตัวของเถ้า คือ จุดที่อุณหภูมิที่เถ้าจากการเผาของวัสดุอยู่ในรูปก้อนของแข็งโดยหลอมละลายและจับตัวกันเป็นก้อน อยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 2000 – 2200 องศาฟาเรนไฮต์ (1100 – 1200 °C)

2.2.1.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยจะรายงานเป็นปริมาณร้อยละของธาตุต่างๆที่ประกอบขึ้นซึ่งจะทำการเผาตัวอย่างในเตาเผาที่บรรจุอยู่ในเครื่องด้วยอุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ตัวอย่างจะถูกออกซิไดซ์และรีดักชันเป็นแก๊สผสมของ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากนั้นใช้ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นแก๊สบริสุทธิ์และวัดปริมาณด้วยตัวตรวจวัดเทอร์โมลคอนดักทีฟเทคเตอร์ (TCD) ประมวลผลออกมาเป็นร้อยละของคาร์บอน ไสโครเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (C, H, N, S) ในคราวเดียวกัน ส่วนออกซิเจนวิเคราะห์แยกแต่ด้วย

หลักการเดียวกัน จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าพลาสติกแต่ละชนิดล้วนมีค่าคาร์บอนที่สูงมากกว่า 60% ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานทางเคมีด้วยความร้อน ตารางที่ 2.3 ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติกประเภทต่างๆ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ประเภทของพลาสติก	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% โดยน้ำหนักแห้ง)					
	C	H	O	N	S	เถ้า
พลาสติกผสม	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
พอลิเอทิลีน	85.2	14.2	-	< 0.1	< 0.1	0.4
พอลิสไตรีน	87.1	8.4	4.0	0.2	-	0.3
พอลิยูรีเทน	63.3	6.3	17.6	6.0	< 0.1	4.3
พีวีซี	45.2	5.6	1.6	0.1	0.1	2.0

2.2.1.4 การวิเคราะห์ค่าพลังงาน เป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยน้ำหนักเมื่อเมื่อวัสดุถูกนำไปเผาเราสามารถวิเคราะห์ได้โดยนำไปเผาในเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ และบันทึกอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนอาจรายงานเป็นหน่วยต่างๆกันเช่น เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/Kg) บีทียูต่อปอนด์ (BTU/lb)

ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานของวัสดุต่างๆ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

องค์ประกอบ	ค่าพลังงาน (Btu/lb)	
	ช่วง	ตัวอย่าง
สารอินทรีย์		
- เศษอาหาร	1500 – 3000	2000
- กระดาษ	5000 – 8000	7200
- กล่องลูกฟูก	6000 – 7500	7000
- พลาสติก	12000 – 16000	14000
- สิ่งทอ	6500 – 8000	7500
- ยาง	9000 – 12000	10000
- หนัง	6500 – 8500	7500
- yard waste	1000 – 8000	2800
- ไม้	7500 – 8500	8000

### 2.2.2 การผลิตพลาสติกจากแก๊สธรรมชาติและปิโตรเลียม

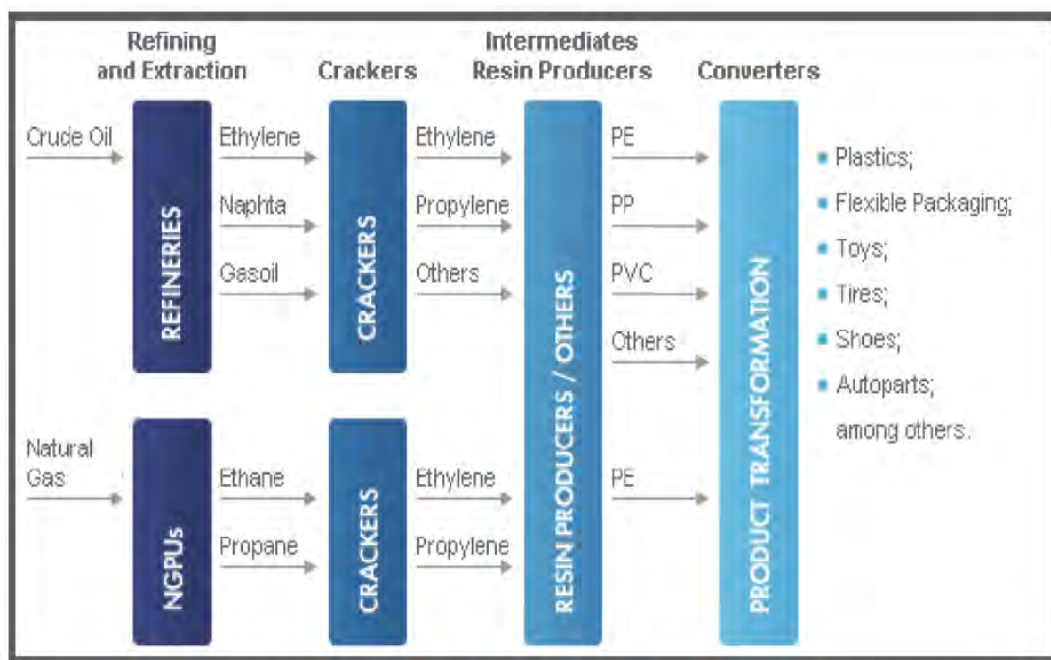
องค์ประกอบพื้นฐานของพลาสติกทุกชนิดนั้นได้มาจากน้ำมันดิบ ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน หรือที่เรียกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารไฮโดรคาร์บอนมีตั้งแต่ชนิดโมเลกุลไม่ซับซ้อน เช่น แก๊สมีเทน ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมกับไฮโดรเจน 4 อะตอม จนถึงน้ำมันดินและยางมะตอย ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยหลายร้อยอะตอมปิโตรเลียมที่ขุดขึ้นมาได้ทั้งน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ จะถูกส่งเข้าโรงกลั่นน้ำมันดิบและโรงแยกแก๊สกระบวนการนี้สามารถสกัดไฮโดรคาร์บอนออกมาได้เป็นส่วนต่างๆมากมายหลายร้อยชนิด ซึ่งรวมไปถึงน้ำมันที่ใช้กับรถยนต์ด้วย จากส่วนต่างๆทั้งหมดนี้แก๊สอีเทนและแก๊สโพรเพนเป็นสองวัตถุดิบเริ่มต้นหลักในการผลิตพลาสติก จากนั้นจะถูกส่งต่อไปเข้าเครื่องแครกเกอร์ที่ใช้ความร้อนสูงเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเอทิลีนและแก๊สโพรพิลีน แก๊สทั้งสองนี้จะถูกส่งต่อไปยังถังปฏิกรณ์ทางเคมีเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ในรูปเบื้องต้นเช่น เป็นผงหรือเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้จากขั้นตอนนี้สามารถนำไปใส่ตัวเติมต่างๆ เช่น สี สารป้องกันรังสียูวีและนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการโดยกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม

แก๊สอีเทน (โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 2 อะตอมกับไฮโดรเจน 6 อะตอม) ถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเอทิลีน เมื่อผ่านการเกิดพอลิเมอร์จะได้พลาสติกที่เรียกว่า พอลิเอทิลีน ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลักชนิดแรกคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พลาสติกชนิดนี้นิยมใช้ทำถุงเย็น ถุงซิป ดอกไม้ พลาสติก หลอดยาสีฟัน และฟิล์มห่อวัสดุรูป เป็นต้น เนื่องจากมีราคาถูกและมีความยืดหยุ่น เหนียว และแข็งแรงพอสมควรและอีกชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เนื่องจากมีสมบัติแข็ง เหนียว ทนต่อสารเคมี และมีค่าการแพร่ผ่านของแก๊สต่ำ จึงมักนำมาใช้ทำขวดน้ำ ขวดนม ขวดยาสระผม ของเล่นเด็ก ภาชนะบรรจุเครื่องสำอาง ฉนวนหุ้มสายไฟ และสายเคเบิล ส่วนแก๊สโพรเพนก็จะรวมกันเป็นพลาสติกที่เรียกว่า พอลิโพรพิลีน ได้ในทำนองเดียวกัน พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่เบาที่สุด มีสมบัติเชิงกลดีมาก เหนียว ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี มีจุดหลอมตัวที่ 165 °C ให้น้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมากมีการนำเอาพอลิโพรพิลีนไปใช้งานในลักษณะเดียวกับพอลิเอทิลีนเมื่อต้องการให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นพอลิโพรพิลีนได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ใช้ทำถุงร้อน ฟิล์มใส ฟิล์มห่อหุ้ม หรือบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน โด๊ส แก้วหรือตะกร้าพลาสติกรูปแบบต่างๆและภาชนะเครื่องใช้ในครัวเรือนรวมถึงกล่องสำหรับใช้กับไมโครเวฟอีกด้วย (อรสา อ่อนจันทร์, 2549)

เอทิลีนเตรียมได้จากกระบวนการกลั่นแก๊สธรรมชาติเหลว หรือแก๊สเหลว เอทิลีนปริมาณ 60% จะผลิตสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและอีก 40% จะได้จากกระบวนการกลั่นทำให้บริสุทธิ์ โดยสารประกอบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแตกตัวจะถูกละลายในแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิประมาณ 950 °C ในเวลาที่ค่อนข้างจำกัดคือประมาณ 0.003-0.1 วินาที จากนั้นหยุดปฏิกิริยาและทำการกลั่นลำดับส่วนที่อุณหภูมิต่ำ จะได้สารประกอบอินทรีย์แต่ละตัวที่มีความ



บริสุทธิ์สูง การเปลี่ยนแปลงชนิดของสารตั้งต้นและสภาวะของปฏิกิริยาจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีส่วนผสมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกันไป โพรพิลีนเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของเอทิลีน โดยกระบวนการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง (นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล, 2548)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตพลาสติกจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ (วลัยพร มุขสุวรรณ, 2551)

สารเคมีอันตรายจำนวนมากถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีน ได้แก่ เบนซีน โครเมียมออกไซด์ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เทอร์-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และเอทิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญ เบนซีนใช้เป็นสารทำละลายในการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ การสูดดมเบนซีนมีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง และอาจทำให้เกิดอาการปวดหัว เหนื่อยล้า นอนไม่หลับ และคลื่นไส้ เป็นต้น บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ใช้เป็นสารที่ทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดสายเป็นเส้นตรงเกิดการจับตัวเป็นพอลิเมอร์ การได้รับสัมผัสสารนี้อาจทำให้เกิดอาการผื่นคันได้เช่น เกิดลักษณะไหม้ที่ผิวหนัง หายใจสั้น ปวดหัว คลื่นไส้ และอาเจียน มีผลการทดลองในสัตว์ที่ชี้บ่งว่าสารนี้ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ใช้ในกระบวนการจับตัวเป็นพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สารนี้จะแสดงอันตรายเฉียบพลันหากกลืนกินเข้าไป หายใจเข้าไป หรือซึมผ่านผิวหนัง โครเมียม (6) ออกไซด์ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจับตัวเป็นพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนทั้งชนิดความหนาแน่นสูงและต่ำ สารนี้มีผลการทดลองในสัตว์ที่บ่งบอกว่าเกี่ยวข้องกับการก่อมะเร็งและก่อการกลายพันธุ์ การทำงานกับสารนี้เป็นเวลานานส่งผลต่อตับและระบบประสาทอย่างรุนแรง ผลกระทบต่อสุขภาพของ

พอลิเอทิลีนของผู้บริโภคคือ ผู้ที่ใช้ถุงพลาสติกที่เป็นสีต่าง ๆ อาจได้รับอันตรายจากเม็ดสีที่เติมเข้าไป ซึ่งมีส่วนผสมของตะกั่วและแคดเมียมสารทั้งสองตัวนี้สามารถแพร่ออกมาจากพลาสติกได้และหากสัมผัสกับสารเหล่านี้อาจเกิดอันตรายได้ ในกรณีตะกั่วอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของระบบประสาทส่วนกลาง หมดสติ ทางเดินหายใจขัดข้อง หัวใจวาย หรืออาจตายได้ ส่วนแคดเมียมมีผลทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อของไตทำให้เกิดภาวะไตอักเสบรุนแรง ข้อควรระวังในการเผาพอลิเอทิลีนคือ การเผาพอลิเอทิลีนจะก่อให้เกิดสารอะซิทัลดีไฮด์และฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งทั้งสองสารนี้ต้องสงสัยว่าจะเป็นสารก่อมะเร็ง (วลัยพร มุขสุวรรณ, 2551)

### 2.2.3 ประเภทของพลาสติก

พลาสติกที่ใช้กันทั่วไปในชีวิตประจำวันที่สำคัญมีอยู่ประมาณ 40-50 ประเภท แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ตระกูลตามสมบัติได้แก่

2.2.3.1 เทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้นๆสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันไปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อนและเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้ สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพหรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปมากนัก เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่มีพันธะเชื่อมโยงโครงสร้างเกิดขึ้นในขณะที่เป็นของแข็ง และยังเป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดประมาณ 90% ของพอลิเมอร์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติก ในประเทศไทยพลาสติกที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตพลาสติกชนิดต่างๆมี 5 ประเภท คือ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทอร์ฟิธาเลต

ในงานวิจัยนี้พลาสติกที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อนเป็นถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งถุงพลาสติกส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นเม็ดพลาสติกที่มีคุณสมบัติแข็งแรง เหนียว ทนทาน ป้องกันความชื้นมิให้ผ่านเข้าออกได้ แต่ให้แก๊สต่างๆ ซึมผ่านได้ ทนกรดและด่างอ่อน ไม่ทนน้ำมันและไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันแก๊สและน้ำมันเบนซิน มีน้ำหนักเบา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.93 ในรูปแผ่นบาง สามารถพับงอได้ดี มีความยืดตัวได้สูง ฉีกขาดยาก เป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก ไม่สามารถทนความร้อนสูง แต่ทนความเย็นได้ถึง -100 องศาฟาเรนไฮต์ เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน แบ่งได้ตามเกรดเป็น 3 ชนิดคือ

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และหีบห่อ เช่น กระจอบของใส่ของ ถุงพลาสติกธรรมดาหรือถุงเย็น ยืดหยุ่นได้พอควร ป้องกันความชื้นผ่านเข้าออกได้ แต่ไม่สามารถป้องกันอากาศผ่านเข้าออกได้ ใช้บรรจุอาหารทั่วไปที่อุณหภูมิปกติ เช่น ผักสด ผลไม้ และอาหารสด โดยแช่แข็งได้ถึง -70 องศาฟาเรนไฮต์ ตลอดจนเป็นวัตถุดิบผลิตของเล่นเด็ก

พลาสติกและฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำวัสดุเคลือบผิว และใช้กับงานขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการเป่า เช่น ขวดพลาสติก คุณสมบัติเด่นของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดนี้คือ มีความเหนียว และคงทน

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะมีลักษณะขุ่นมัว ใช้ผลิตเป็นถุงร้อนมีจุดหลอมเหลวในการผลิตสูงถึงประมาณ 230 องศาฟาเรนไฮต์จึงสามารถบรรจุของร้อนได้ถึงจุดน้ำเดือดในขณะเดียวกันก็สามารถบรรจุของเย็นได้และยังใช้กับงานเป่าขึ้นรูป โดยใช้ทำเป็นขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ ที่ต้องทนต่อแรงดันและต้องมีแรงต้านทานสูง นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านการฉีดขึ้นรูป เช่น ผลิตของเล่นเด็ก และเครื่องใช้ต่างๆ ภายในบ้าน ตลอดจนใช้ทำแผ่นฟิล์ม เชือก ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อ และรางน้ำ ทั้งนี้ ท่อที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงสามารถใช้แทนท่อที่ทำจากพีวีซี เนื่องจากมีความทนทานใกล้เคียงกัน แต่มีราคาถูกกว่า

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เป็นวัสดุที่ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับตัวผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนมีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มากนัก ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็ง และความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกรานได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง (Ashraf, 2009)

ลักษณะสมบัติ	LDPE	HDPE
การตกผลึก (%)	40 – 50	60 – 80
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.915 – 0.94	0.94 – 0.965
ค่ามอดูลัส (N/mm <sup>2</sup> )	~130	1000
จุดหลอมเหลว (°C)	105 – 110	130 – 135
การทนสารเคมี	ดี	ดีมาก

2.2.3.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก พอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนผสมหลายชนิดทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก พลาสติกแบบนี้ เมื่อหลอมตัวเป็นรูปแบบใดจะเป็นรูปแบบนี้อย่างถาวร หมายความว่าถ้าเอามาหลอมใช้ใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ไม่ได้กล่าวคือเกิดการเชื่อมต่อกันไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ เหตุนี้หลังจากพลาสติกเย็นจนแข็งตัว

แล้วจะไม่สามารถทำให้อ่อนได้อีกโดยใช้ความร้อนหากแต่จะสลายตัวทันทีที่อุณหภูมิสูงถึงระดับการทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่างๆ ต้องใช้ความร้อนสูงและโดยมากต้องการแรงอัดด้วยได้แก่ พลาสติกจำพวกที่ทำเป็น ชุดถ้วยชามงาน พลาสติกชนิดพิเศษที่เรียกว่า เมลามีน ซึ่งมีสมบัติทนการแตกแตกและความร้อนได้ดีมาก เวลาถูกประกายไฟจะไม่ลุกไหม้ ที่พบเห็นกันทั่วไปเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะที่ใช้ในครัวเรือนเช่นจานชามถ้วยและช้อน

#### 2.2.4 การสลายตัวของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์จะเกิดการเสื่อมสลายได้เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานานๆ การเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันจะเกิดมากน้อยหรือเร็วช้าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะมีกระบวนการเกิดการเสื่อมสลายที่ไม่เหมือนกันกระบวนการเสื่อมสลายที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจาก 2 สาเหตุ ได้แก่ สภาวะแวดล้อมที่พอลิเมอร์นั้นอยู่และธรรมชาติความทนทานของตัวพอลิเมอร์เอง ตัวอย่างการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ที่พบในชีวิตประจำวันได้แก่ การเสื่อมสลายของเซลลูโลส ในเนื้อไม้ การเสื่อมสภาพของเนื้อยางในยางรถยนต์ การแตกและการเกิดสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ เป็นต้น กระบวนการเสื่อมสลายที่เกิดกับพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ ไว้ดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตหรือการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง การเสื่อมสลายด้วยความร้อนอาจจะเกิดควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันถ้าในสภาวะความร้อนนั้นมีออกซิเจนอยู่ด้วย หรือไม่ก็อาจเกิดการเสื่อมสลายด้วยสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งของสองประการนี้

2.2.4.2 การเสื่อมสลายด้วยแรงกล เกิดจากการให้แรงหรือเป็นการแตกหักทางกายภาพ การขาดของสายโซ่โมเลกุลจะเกิดขึ้นได้มากสำหรับการเสื่อมสลายแบบนี้

2.2.4.3 การเสื่อมสลายที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิก การเสื่อมสลายแบบนี้เกิดจากการให้เสียงที่มีความถี่ที่แน่นอนไปเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นในสายโซ่โมเลกุลและทำให้เกิดการแตกออกของพันธะในสายโซ่โมเลกุล

2.2.4.4 การเสื่อมสลายเนื่องจากการแตกตัวในน้ำ เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับน้ำโดยเฉพาะพอลิเมอร์ในกลุ่มที่สามารถดูดความชื้นได้

2.2.4.5 การเสื่อมสลายทางเคมี เกิดจากการกัดกร่อนของสารเคมี หรือแก๊ส เช่น โอโซน เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกออกของสายโซ่และเกิดออกซิเดชันขึ้น

2.2.4.6 การเสื่อมสลายทางชีวภาพ เป็นลักษณะเฉพาะตัวของพอลิเมอร์บางตัวมีพอลิเมอร์จำนวนไม่มากนักที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเชื้อจุลินทรีย์

2.2.4.7 การเสื่อมสลายเนื่องจากการรับรังสี เกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์

อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ได้รับแสงอาทิตย์ หรือรับการแผ่รังสีที่มีพลังงานสูงเป็นเวลานานๆ โมเลกุลของพอลิเมอร์หรือสารเจือปนที่อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์นั้น จะรับรังสีเข้าไปอย่างเพียงพอที่จะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ลดลง ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ได้รับการแผ่รังสีพลังงานสูงจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกออกของสายโซ่โมเลกุลได้โดยตรง ผลจากการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ด้วยสาเหตุต่างๆ ที่กล่าวมาจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ทั้งทางกายภาพ และทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลทำให้เกิดการลดลงของสมบัติเชิงกลบางตัว เช่นความแข็งแรงต่อการรับแรงดึง การทนทานต่อแรงกระแทก และการยึดตัวที่จุดขาดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์และเกิดการกัดเซาะที่ผิวหน้า ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้แก่ การเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี เช่น การเกิดขึ้นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆเช่น ความไม่อิ่มตัว หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นต้น เมื่อ พอลิเมอร์ต่างๆ เกิดการเสื่อมสลายด้วยความร้อนพร้อมทั้งเกิดออกซิเดชัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญ คือ น้ำหนักโมเลกุลจะลดลง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้หลายเทคนิค ได้แก่ วัดความหนืด วัดการกระเจิงแสงรวมไปถึงใช้เทคนิคทางความร้อน อย่างเช่น เทอร์มอลกราฟิมेटริก การเสื่อมสลายของพอลิเมอร์เกิดจากกลไกการแตกตัวของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถแบ่งได้ เป็น 4 กลไกตามลักษณะการขาดจากสายโซ่ดังนี้

- End – chain scission หรือพอลิเมอร์ไรเซชัน คือ พอลิเมอร์เกิดการแตกตัวจากปลายโซ่ของโมเลกุล ได้เป็นมอนอเมอร์ที่มีขนาดเท่าๆกัน
- Random – chain scission สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกตัวขาดแบบสุ่มได้เป็นโมเลกุลที่ยาวไม่เท่ากัน
- Chain – stripping scission คือเมื่อสายโซ่ขาดจะเกิดการแทนที่ที่หมู่ข้างเคียงของพอลิเมอร์
- Cross – linking เป็นกลไกที่เกิดกับพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงเมื่อได้รับความร้อน (Demirbas, 2004)

### 2.2.5 การนำพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ในสถานะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งนับวันจะลดน้อยลงและมีราคาสูงขึ้นขยะพลาสติกในฐานะพลังงานหมุนเวียนทดแทน เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ผลิตน้ำมันได้เช่นกัน ขยะพลาสติกมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นเดียวกับน้ำมัน เพียงแต่ปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า เช่น ดีเซลจะมีคาร์บอน 12 - 20 ตัว เบนซินมีคาร์บอน 6 - 12 ตัว แต่พลาสติกจะเป็นโซ่ที่ยาวมากมีคาร์บอนเป็นพันเป็นหมื่นขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์นั้นๆ การที่จะเปลี่ยนให้เป็นน้ำมันได้จะต้องตัดโซ่ให้สั้นลงขยะพลาสติกทั่วไปมีหลายประเภท สามารถนำมาผลิตน้ำมันได้แต่อาจให้ผลผลิต

และปริมาณที่ต่างกัน การที่ขยะจะถูกฝังกลบรวมกันและพลาสติกประเภทขวดมักได้รับการแยกออกไปก่อน จึงเหลือเพียงถุงหูหิ้ว และถุงใส่อาหารเป็นหลัก ซึ่งน้ำมันที่ได้จากขวดใสและถุงอาหารทั่วไปจะให้ดีเซลสีขุ่นดำ แต่หากใช้วัตถุดิบประเภทถุงพลาสติกใหม่จะได้น้ำมันเหลืองใส

การนำพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่อาจจัดได้ 4 ประเภท โดยอาศัยแหล่งที่มาของพลาสติกเป็นเกณฑ์ ดังนี้

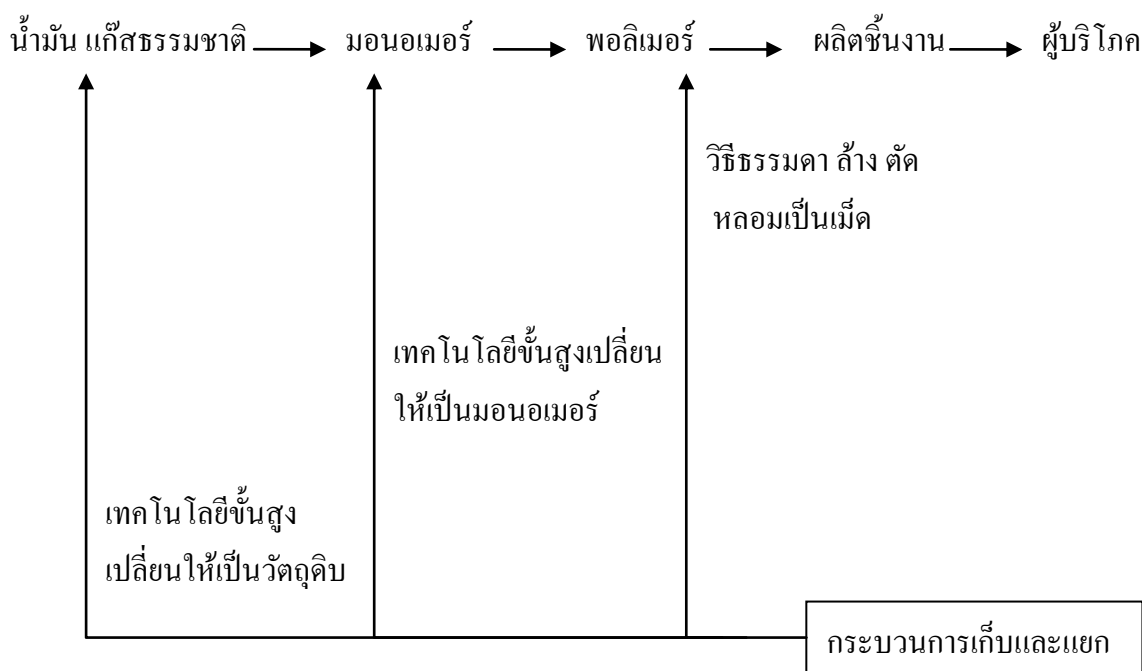
2.2.5.1 การหมุนเวียนกลับมาใช้แบบที่ 1 เป็นการนำเศษพลาสติกที่เป็นของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ได้จากกระบวนการตกแต่งชิ้นงานพลาสติกหรือเศษพลาสติกที่ตกหล่นอยู่ในโรงงานถือว่าเป็นพลาสติกที่ไม่ผ่านการปนเปื้อนมากนัก เมื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยผ่านกระบวนการเช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกใหม่ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะและมีสมบัติเทียบเท่ากับการผลิตที่มาจากเม็ดพลาสติกตั้งต้น ด้วยเหตุที่พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อได้รับความร้อน กระบวนการหลอมเหลวพอลิเมอร์จึงอาศัยหลักการดังกล่าว นำพลาสติกเก่ากลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลายครั้ง โดยรูปร่างผลิตภัณฑ์ชิ้นงานพลาสติกเปลี่ยนไป กระบวนการหลอมเหลวเทอร์โมพลาสติก โดยการนำพลาสติกทิ้งจากผู้บริโภคและเศษขยะพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรมมาหลอมใช้ใหม่อาจผสมกับพลาสติกใหม่หรือเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างพลาสติกที่นำหลอมเหลวส่วนใหญ่มาจากบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีอายุการใช้งานสั้น ชนิดของพลาสติกเหล่านี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทอร์พธาลเตต ปัญหาของการหลอมเหลวได้แก่ สิ่งปนเปื้อน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะมีสี กลิ่นและมีหลายเกรดซึ่งทำให้ค่าดัชนีหลอมเหลวการไหลแตกต่างกัน แต่ข้อเสียนี้สามารถแก้ไขได้โดยผสมเศษพลาสติกเก่านี้กับพลาสติกใหม่หรือนำไปใช้ในลักษณะเคลือบหลายชั้น นอกจากนี้พลาสติกที่ได้จากการหลอมมีสมบัติไม่ดีเท่าพลาสติกใหม่และยังมีราคาแพงกว่าพลาสติกใหม่ การนำพลาสติกหลอมกลับมาใช้ใหม่อาจทำให้พลาสติกสลายตัว ซึ่งสามารถวัดได้จากสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงมีสีเหลืองเกิดขึ้นความหนืดลดลงน้ำหนักโมเลกุลลดลงและสูญเสียความใส

2.2.5.2 การหมุนเวียนกลับมาใช้แบบที่ 2 เป็นการนำพลาสติกที่ผู้บริโภคใช้แล้วทิ้งมาผ่านกระบวนการผลิตขึ้นตอนเดียวหรือหลายขั้นแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่มาจากเม็ดพลาสติกตั้งต้น

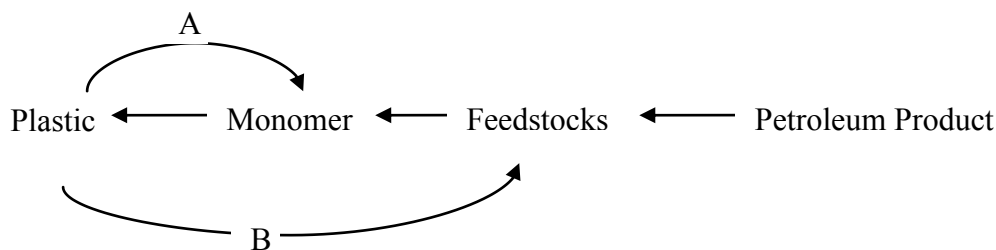
2.2.5.3 การหมุนเวียนกลับมาใช้แบบที่ 3 เป็นการนำตัวทำละลายหรือความร้อนสลายโมเลกุลพลาสติกเพื่อให้ได้สารประกอบเคมีที่มีโครงสร้างแบบง่ายๆ เช่น น้ำมันและแก๊สเพื่อผลิตสารเคมีและเชื้อเพลิงจากเศษพลาสติกที่เป็นของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมหรือของเสียพลาสติกจากแหล่งชุมชน วิธีนี้ไม่ก่อให้เกิดอากาศเป็นพิษแต่ลดขยะพลาสติกได้มาก กระบวนการทางเคมีจัดเป็นการหมุนเวียนพลาสติกกลับมาใช้แบบที่ 3 การสลายพอลิเมอร์ด้วยตัวทำละลายเป็นทางหนึ่งในการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งวิธีนี้การสลายการสลายพอลิเมอร์ด้วยตัวทำละลายได้สารเคมีหรือกระบวนการแยกเป็นปฏิกิริยาเส้นทาง A ดังรูปที่ 2.3 กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการสลาย

พันธะ C – X ผลที่ได้จากปฏิกิริยาเหล่านี้ได้แก่ มอนอเมอร์และ โอลิโกเมอร์ซึ่งนำกลับมาใช้ได้ อีก การแยกวัสดุโดยวิธีนี้จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและเหมาะสมสำหรับจะนำกลับมาใช้ ใหม่ วิธีนี้กระทำโดยการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อกำจัดส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้ ละลายอยู่ในสารละลาย ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวทำละลายผสมของไซลีนกับไซโคลเฮกซาโนนใน การแยกพลาสติกผสม พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิ โพรพิลีน ออกเป็น 3 เฟส หรือการใช้ เอ็นเมทิว 1-2-ไพโรลิไดโนน (NMP) ในการแยกพลาสติก ผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทิลีนเทอร์พะธาเลต ข้อเสียของวิธีนี้ก็คือการเพิ่ม ค่าใช้จ่ายเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนและใช้พลังงานมากกว่าวิธีแห้ง (วิวรรณ ชรรम्मงคล, 2552) การสลายด้วยความร้อนความร้อนสูงพลาสติกจะสลายตัวให้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำคล้าย แนนพทา สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารพื้นฐานทางปิโตรเคมีตามเส้นทาง B ดังรูปที่ 2.3

2.2.5.4 การหมุนเวียนกลับมาใช้แบบที่ 4 เป็นการนำเทคโนโลยีเปลี่ยนเศษพลาสติกที่ เป็นของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมหรือพลาสติกที่เก็บจากแหล่งชุมชนให้เป็นพลังงานโดยการเผา จนเป็นถ่าน (Al-Salem และคณะ, 2009)



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนขยะพลาสติกหลังจากเก็บและแยก (มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์, 2549)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงที่มาของพลาสติกและการรีไซเคิลกลับไปเป็นมอนอเมอร์หรือสารตั้งต้น (มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์, 2549)

### 2.2.6 การนำผลิตภัณฑ์จากการสลายพลาสติกไปใช้ประโยชน์

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นกระบวนการสลายพลาสติกทำให้ได้สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเอทิลีนเป็นส่วนมากเมื่อนำมาผ่านกระบวนการสลายตัวจะได้เอทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งเอทิลีนจัดว่าเป็นสารตั้งต้นหลักสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยปกติสารที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นจะต้องเป็นสารเคมีที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี เตรียมได้ง่ายจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ดังนั้นจึงสามารถจะนำวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเหล่านี้ไปผลิตต่อเนื่องจนเป็นเม็ดพลาสติก โยสังเคราะห์ สารเคลือบผิว และกาวต่างๆ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถือเป็นวัตถุดิบพื้นฐานสำคัญในการผลิตสิ่งอุปโภคบริโภคพื้นฐานของมนุษย์ ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนี้จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขั้นต้นในอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อผลิตสินค้าสำเร็จรูปและสำเร็จรูป กลุ่มโพลิฟินส์ ประกอบด้วย เอทิลีน โพรพิลีน มิกซ์ซีโพ โดยเอทิลีนถือเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสามารถนำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติกและเคมีภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น พอลิเอทิลีนเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิไวนิลคลอไรด์ เอทิลีนไกลคอลและกรดน้ำส้ม เป็นต้น เป็นที่ทราบกันว่าพลาสติกผลิตได้จากน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่แตกต่างกันหลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเราจึงควรทราบถึงองค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบใหญ่ๆ คือ

2.2.6.1 ส่วนประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอะลิฟาติกส์ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบลูกโซ่ปลายเปิด

2.2.6.1.1 นอร์มัลพาราฟิน หรือ อัลเคน สูตรทั่วไป  $C_nH_{2n+2}$  เป็นส่วนผสมหลักในน้ำมันปิโตรเลียมและเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซลีน สารประกอบนอร์มัลพาราฟินไม่มีสมบัติป้องกันการเกาะของเครื่องยนต์ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีคุณภาพต่ำ



2.2.6.1.2 ไอโซพาราฟิน หรือ ไอโซอัลเคน สูตรทั่วไป  $C_nH_{2n+2}$  เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่สาขามีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ดีกว่าอัลคิลพาราฟิน ไอโซพาราฟินเป็นสารประกอบที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม โดยได้จากกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างโดยคะตะลิสต์ , อัลคิลเลชัน , พอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น 2- เมทิลเพนเทน , 2,3- ไดเมทิลเพนเทน เป็นต้น

2.2.6.1.3 โอเลฟิน หรือ อัลคีนสูตรทั่วไป  $C_nH_{2n}$  โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีในน้ำมันดิบ แต่ได้รับจากกระบวนการอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม เช่น กระบวนการแตกตัวเป็นต้น สารประกอบโอเลฟินไม่เสถียรแต่มีคุณสมบัติที่ดีในการเพิ่มคุณภาพป้องกันการเกาะของเครื่องยนต์

#### 2.2.6.2 สารประกอบวงแหวน

2.2.6.2.1 สารประกอบแนฟทีน หรือ ไชโคลอัลเคน สูตรทั่วไป  $C_nH_{2n}$  เป็นสารประกอบอัลเคนประเภทวงและเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเหมือนกับอัลเคนทั่วไป สารประกอบแนฟทีนเป็นส่วนประกอบสำคัญของจากนอร์มัลพาราฟิน เช่น ไชโคลเฮกเซน

2.2.6.2.2 สารประกอบอะโรมาติกหรือเบนซีนอยด์ สูตรทั่วไป  $C_nH_{2n-2}$  มีผสมอยู่ในน้ำมันปิโตรเลียมน้อยมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดี เนื่องจากมีสมบัติป้องกันการเกาะของเครื่องยนต์ได้ดีสามารถเก็บไว้ได้นาน

2.2.6.2.3 ส่วนผสมที่มีปริมาณน้อย เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากมีกลิ่นฉุนแล้วสารประกอบกำมะถันที่อยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงยังทำให้อากาศเป็นพิษ (นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล, 2543)

### 2.2.7 ผลกระทบของพลาสติกที่ใช้งานแล้วต่อสิ่งแวดล้อม

ขยะพลาสติกเป็นขยะของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตัวเองตามธรรมชาติ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกในด้านต่างๆมากมาย ทำให้มีปริมาณของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นแต่ละวันนั้นเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและต่อผู้ที่อาศัยในบริเวณนั้น ชนิดของขยะพลาสติกแบ่งได้เป็น

- เศษพลาสติกที่เหลือจากการตัดแต่งผลิตภัณฑ์ ขยะประเภทนี้จะไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
- เศษพลาสติกที่เหลืออยู่ทางการค้า ซึ่งได้แก่ วัสดุกันกระเทือน หรือวัสดุที่ใช้ในการบรรจุและห่อสินค้า เศษพลาสติกประเภทนี้หาได้ง่ายและมีความบริสุทธิ์สูง
- เศษพลาสติกจากการใช้แล้วของผู้บริโภค ประกอบด้วยภาชนะพลาสติก ฟิล์มและเครื่องใช้ต่างๆ ขยะพลาสติกเหล่านี้มีพลาสติกหลายชนิดปะปนกันอยู่ทำให้แยกออกจากกันลำบาก ค่าใช้จ่ายสูงในการคัดแยก และเมื่อนำมาหลอมเหลวใหม่ไม่สามารถนำมาใช้ในการบรรจุอาหารได้

อีก เมื่อทำการรวบรวมและคัดแยกประเภทพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แล้ว นำไปผ่านกรรมวิธีการผลิต เป็นเม็ดพลาสติกประเภทรีไซเคิลอีกครั้งหนึ่ง

ปัญหาการตกค้างของมูลฝอยจากพลาสติกในสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ตามมาคือ

2.2.7.1 ปัญหาการไม่ย่อยสลายของมูลฝอยพลาสติก เนื่องจากพลาสติกเป็นสารที่ สลายตัวได้ยากไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางเคมี เช่นการละลายน้ำ อิทธิพลของความร้อน แสงหรือ สารเคมี หรือกระบวนการทางกายภาพ เช่น การสึกกร่อน โดยลม หรือกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายของจุลินทรีย์หรือเชื้อรา หากไม่มีการจัดเก็บขยะพลาสติกอย่างเหมาะสมจะก่อให้เกิด ปัญหาการตกค้างของมูลฝอยจากพลาสติกในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้พลาสติกมีความหนาแน่นต่ำ ฉะนั้นอัตราส่วนของปริมาตรต่อน้ำหนักจึงมีค่าสูง แต่เนื่องจากพลาสติกมีน้ำหนักเบามูลฝอยจาก พลาสติกจึงมีปริมาณมากและกินเนื้อที่มาก เมื่อเทียบกับมูลฝอยจากวัสดุอื่นที่มีน้ำหนักเท่ากันทำ ให้ จึงเป็นปัญหาต่อการกำจัดมูลฝอยจากพลาสติกด้วยอีกสาเหตุหนึ่ง

2.2.7.2 ปัญหาต่อระบบการกำจัดขยะพลาสติกโดยทั่วไปในการกำจัดมูลฝอย วิธีการ กำจัดที่ถูกต้องตามหลักวิชาการมีอยู่ 3 วิธี คือการหมักทำปุ๋ย การเผาในเตาเผา และการฝังกลบอย่าง ถูกหลักสุขาภิบาล พลาสติกเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากไม่สามารถกำจัดโดยวิธีการหมักทำปุ๋ยได้จึง ถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบหรือการเผา วิธีการฝังกลบเริ่มมีปัญหาเนื่องจากความต้องการใช้ที่ดิน เป็นจำนวนมากในการฝังกลบมูลฝอยที่มีพลาสติกปนอยู่ ทั้งนี้เพราะพลาสติกเป็นสารที่ย่อยสลายได้ ยากเมื่อฝังกลบลงใต้ดินแล้วจะทำให้สถานที่กำจัดหมดอายุการใช้งานเร็วขึ้น ต้องหาที่กำจัดแห่ง ใหม่อยู่บ่อยครั้ง นอกจากนี้การย่อยสลายพลาสติกในหลุมฝังกลบจะเป็นไปอย่างช้าๆซึ่งอาจก่อให้เกิด ปัญหาการชะล้างของสารเคมีหรือโลหะหนักที่เติมเข้าไปในเนื้อพลาสติกสู่ใต้ดินได้สำหรับการ กำจัดขยะโดยวิธีการเผาในเตาเผานั้นสามารถใช้กำจัดมูลฝอยที่มีพลาสติกปนอยู่ได้แต่ต้องออกแบบเตาเผาพิเศษมีการควบคุมแก๊สพิษที่เกิดจากการเผาอย่างดีหากไม่มีการควบคุมที่ดีอาจก่อให้เกิด ปัญหาเถ้าที่เกิดจากการเผาและปัญหามลพิษทางอากาศได้ เช่นการปนเปื้อนของโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว ดีบุก สังกะสี ไฮโดรเจนคลอไรด์ และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดแก่ ไดออกซิน ฟุน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นหากมีการใช้อุปกรณ์ดักจับสาร มลพิษหรือสครับเบอร์จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

นอกจากนี้ยังมีปัญหาอื่นๆตามมา ได้แก่ เกิดภาวะมลพิษทางสายตา พลาสติกที่ตกค้างตาม ผิวน้ำและในทางเดินน้ำ เช่น แม่น้ำลำคลอง อาจทำให้การจราจรทางน้ำติดขัดได้ หรืออุดตันท่อ ระบายน้ำ เมื่อนำขยะเหล่านั้นไปทำปุ๋ยอินทรีย์แล้วไม่สลายตัวเหมือนขยะอื่นๆ พลาสติกที่ฝังทับถม กันในดินจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการเพาะปลูกคือรากไม้ สามารถชอนไชเข้าไปในดินได้สะดวก ทำให้ต้นไม้ตายได้ซึ่งจะทำให้ผลผลิตทางการเกษตรเสียหาย เมื่อตกค้างอยู่ในทะเลก็จะอยู่ในทะเล เป็นเวลานานและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลได้

## 2.3 กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน

กระบวนการแปรสภาพทางความร้อน ประกอบด้วย การเผาไหม้ การไพโรไลซิสและการผลิตแก๊สหรือแก๊สซิเคชัน (รูปที่ 2.4) โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานเคมีที่ถูกกักเก็บตัวไว้ในชีวมวลตามธรรมชาติ เช่น สารจำพวกเซลลูโลสในต้นไม้และพืช เป็นต้น ให้เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม พลังงานเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ที่สันดาปภายใน หรือการใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบพื้นฐานของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแก๊สซิเคชัน

### 2.3.1 ปฏิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน

ปฏิริยาการเผาไหม้ หมายถึง ปฏิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อทำปฏิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน ในกรณีที่มีออกซิเจนอย่างเพียงพอจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้สมการการเผาไหม้ดังสมการที่ 2.5 ตารางที่ 2.6 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและไอน้ำ (สุพัตรา ชิวรนาคุปต์, 2546)

สมการ ที่	ปฏิริยา	ลักษณะ ปฏิริยา	$\Delta H$		
			Cal/gmole	kJ/gmole	BTU/gmole
2.5	$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2.6	$C + 1/2O_2 \longrightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
2.7	$C + CO_2 \longrightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	73,536
2.8	$CO + 1/2O_2 \longrightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
2.9	$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	58,917
2.10	$C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
2.11	$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

หมายเหตุ

1. ปฏิริยาทดลองที่สภาวะ 1,200 เคลวิน (1,700 °F 927 °C) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์

## 2. เครื่องหมายลบคือ ปฏิกริยาคายความร้อน เครื่องหมายบวก คือ ปฏิกริยาดูดความร้อน

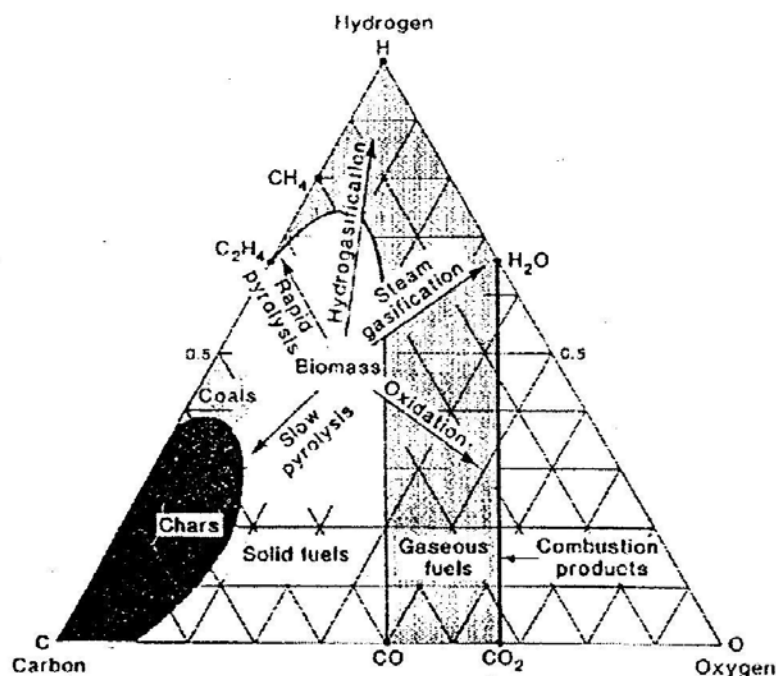
โดยปกติการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ปริมาณของอากาศตามค่ามวลที่คำนวณได้ จำเป็นที่จะต้องใช้ปริมาณของอากาศมากกว่าปริมาณดังกล่าว อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่เกินจากปริมาณของอากาศที่คำนวณได้เรียกว่า ร้อยละของอากาศส่วนเกิน สำหรับกรณีที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ดังสมการที่ 3.6 ปฏิกริยาการเผาไหม้พื้นฐานเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและคาร์บอนกับไอน้ำ สามารถอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆดังการแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

- ปฏิกริยาที่ 2.5 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีออกซิเจนมากเกินพอเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์
- ปฏิกริยาที่ 2.6 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์
- ปฏิกริยาที่ 2.7 คือปฏิกริยาพื้นฐานของการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สโดยคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกริยากับคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่มากเกินพอในอนุภาคของแข็ง เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกริยาของเชื้อเพลิงต่างๆพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกริยาขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 °C เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้
- ปฏิกริยาที่ 2.8 เป็นการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนที่เหลืออยู่ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์
- ปฏิกริยาที่ 2.9 และ 2.10 เป็นการป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกริยากับคาร์บอน ปฏิกริยาที่ 2.9 เรียกว่า วอเตอร์แกซิฟิเคชัน
- ปฏิกริยาที่ 2.11 เป็นปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกริยานี้เรียกว่า วอเตอร์แก๊สชิฟต์ ซึ่งปฏิกริยาเหล่านี้เป็นปฏิกริยาผันกลับได้ (Zhang และคณะ, 2005)

ความร้อนที่ทำให้เกิดปฏิกริยาดูดความร้อนนั้นเป็นได้ทั้งความร้อนที่ให้โดยตรงและความร้อนที่ให้โดยอ้อมทั้งนี้ในกรณีที่เป็นความร้อนที่ให้กับระบบวิเคราะห์ปริมาณและลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้โดยตรงโดยมีสารออกซิแดนซ์ หรือออกซิไดซิ่งแก๊สเป็นอากาศหรือ

ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับชีวมวลและเกิดการเผาไหม้ ทำให้มีการคายความร้อนออกมา โดยที่ 5-15% ของความร้อนนี้ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ในระบบของการผลิตแก๊สแบบให้ความร้อนโดยตรงอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ขึ้นกับอัตราการป้อนออกซิไดซ์แก๊ส สำหรับตัวอย่างการผลิตแก๊สแบบให้ความร้อนโดยอ้อมได้แก่ การผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเป็นการใช้ทรายหรือเซรามิกร้อนเป็นตัวกลาง และใช้อากาศหรือไอน้ำเป็นตัวทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ เมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ แก๊สและทรายหรือเซรามิกที่ร้อนจัดจะเป็นตัวให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทำให้เกิดการไพโรไลซิสต่อไป

อย่างไรก็ตามรูปแบบการแปรสภาพทางความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาและรูปแบบการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในกราฟรูปสามเหลี่ยมรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการผลิตแก๊สหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ จากกระบวนการทางความร้อนนี้จะแปรสภาพตามสัดส่วนของไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งก็คือออกซิไดซ์แก๊สได้แก่ ไอน้ำและอากาศตามลำดับ ส่วนคาร์บอนคือปัจจัยด้านเชื้อเพลิงที่ใส่ลงไป เมื่อสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่อออกซิไดซ์แก๊สเปลี่ยนไปผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น การไพโรไลซิสแบบช้าเป็นสภาวะที่มีออกซิไดซ์แก๊สไม่มากและค่อนข้างคาร์บอน ผลของสภาวะเช่นนี้จะให้ปริมาณถ่านชาร์มาก กระบวนการแกซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน (Ganan และคณะ, 2005) ส่วนการเผาไหม้ต้องการออกซิเจนมากและได้ผลิตภัณฑ์เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยออกซิเจน



รูปที่ 2.4 กราฟสามเหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล

(Probstein and Hicks, 1982)

### 2.3.2 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

แกซีฟิเคชันหรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนสารใดๆ หรือชีวมวล จากสถานะของแข็งหรือของเหลวให้กลายเป็นแก๊ส ในความหมายที่กว้างกว่านั้น คือ การให้ความร้อนเพื่อระเหยซึ่งหมายรวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วย (Protein และ Hicks, 1982) แก๊สที่ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น โดยมีตัวกลางของระบบนำความร้อนเข้าไปสลายพันธะเคมีของชีวมวลเหล่านั้นเรียกว่าออกซิไดซ์แก๊ส ได้แก่ ไอน้ำ ออกซิเจน และอากาศ ทั้งนี้ในการเกิดปฏิกิริยาจะรวมขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดตั้งแต่การเกิดการสลายตัวของวัตถุดิบภายใต้ความร้อนในขั้นต้น และขั้นตอนต่อมาในการสร้างแก๊สจนถึงการปรับปรุงคุณภาพแก๊ส

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีฟิเคชัน (Watanabe และ Otaka, 2006) ขั้นตอนสำคัญของกระบวนการแกซีฟิเคชันได้แก่ การไพโรไลซิสคาร์บอนตามด้วยการแกซีฟิเคชันถ่านชาร์ซึ่งในบางกรณีอาจเกิดการแกซีฟิเคชันน้ำมันชาร์ได้อีกด้วย อุณหภูมิของกระบวนการแกซีฟิเคชันอยู่ในช่วง 800-1000 °C ภายใต้ความดันตั้งแต่ระดับบรรยากาศขึ้นไป ระหว่างการแกซีฟิเคชันเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการแกซีฟิเคชันนอกจากมีปฏิกิริยาที่สำคัญแล้วยังมีแก๊สผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.5

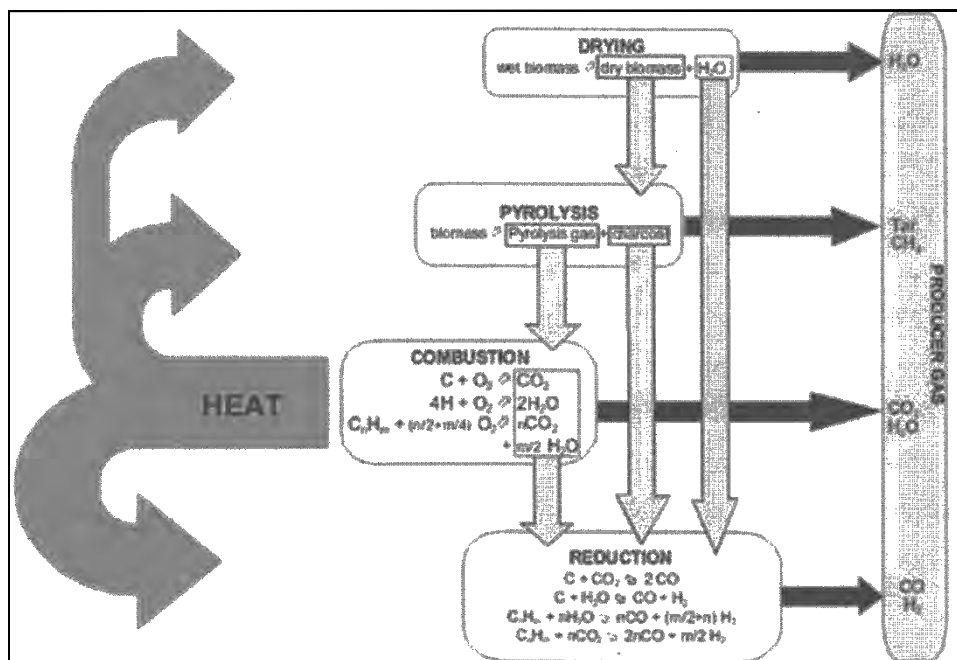
ขั้นตอนการแปรสภาพทางความร้อนเพื่อผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์นี้มีหลายขั้นตอนแต่ละขั้นตอนจะให้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันออกไป ดังนี้

2.3.2.1 การไล่ความชื้น เริ่มตั้งแต่วัตถุดิบได้รับความร้อนจากระบบทำให้น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบระเหยและกลายเป็นไอน้ำเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นเกินจุดเดือดของน้ำ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการแกซีฟิเคชันซึ่งทำวัตถุดิบแห้งพร้อมสลายตัวในขั้นถัดไป

2.3.2.2 ไพโรไลซิส เมื่อวัตถุดิบถูกทำให้แห้งแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตแก๊สขั้นแรกโดยปฏิกิริยาไพโรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เพื่อนำไปใช้ในการสลายองค์ประกอบต่างๆในวัตถุดิบภายใต้สภาวะที่มีอากาศหรือออกซิเจนอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ถือว่าน้อยมาก องค์ประกอบที่ระเหยได้อื่นๆ เกิดการสลายตัวและระเหยกลายเป็นแก๊สอย่างรวดเร็ว เช่น มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ น้ำมันชาร์ ถ่านชาร์ และพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ส่วนของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากการสลายตัวจะเป็นพวกคาร์บอน

และถ้า ในช่วงแรกของปฏิกิริยาไพโรไลซิส แก๊สและไอน้ำจะถูกปล่อยออกมาก่อนที่อุณหภูมิประมาณ 230 °C แต่การสลายตัวอย่างแท้จริงเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400-800 °C ส่งผลให้สารระเหยได้ถูกปล่อยมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 800 °C ขึ้นไป ในขั้นตอนนี้ระดับอุณหภูมิเป็นปัจจัยกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น กล่าวคือปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวโดยส่วนใหญ่ ในทางกลับกันจะได้เป็นแก๊สโดยส่วนใหญ่ที่ระดับอุณหภูมิสูง จากความซับซ้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจึงแตกต่างกันออกไปบริเวณพื้นผิว โดยแก๊สบางตัวเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของถ่านหินหรือแก๊สบางตัวอาจถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของถ่านชาร์ และทำปฏิกิริยากันเมื่อ ได้ผลผลิตจะคล้ายตัวออกจากผิวถ่านหรือบางปฏิกิริยาเกิดในสภาพแก๊ส โดยตรงดังสมการที่ 2.12

2.3.2.3 การเผาไหม้ เป็นขั้นตอนหนึ่งของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยที่วัตถุดิบ ถ่านชาร์ และแก๊สผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนไพโรไลซิสจะเข้าทำปฏิกิริยาไอน้ำเข้าไปในช่วงการเผาไหม้เพื่อเพิ่มสัดส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนในระบบ ช่วงการเผาไหม้ปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาอื่นที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการเผาไหม้ในขั้นนี้จะมีความใกล้เคียงกับปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐานที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศหรือไอน้ำดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเคมีทั่วไปที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แกซีฟิเคชัน (Knoef, 2005)

- ออกซิแกซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ซึ่งให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีพลังงานสูงกว่าการใช้อากาศ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เรียกว่า แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งสามารถให้ความร้อนหรือใช้สังเคราะห์เมทานอล แอมโมเนียและสารเคมีอื่นๆ ปฏิริยาการเกิดแก๊สสังเคราะห์แสดงดังสมการที่ 2.5, 2.7, 2.8, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 และ 2.17

- สตีมแกซิฟิเคชัน เป็นปฏิริยาที่คาร์บอนทำปฏิริยากับไอน้ำ ซึ่งเป็นปฏิริยาดูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้แก่ สมการ 2.9

2.3.2.4 แกซิฟิเคชัน หรือ รีดักชัน ประกอบด้วยปฏิริยาที่หลากหลายขึ้นอยู่กับสารหรือแก๊สที่ใส่เข้าไปในขั้นนี้ เช่น ออกซิเจน อากาศ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ไฮโดรเจน โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิในการเกิดปฏิริยาตั้งแต่ 700 °C ขึ้นไป ซึ่งเป็นการเกิดปฏิริยาระหว่างถ่านชาร์หรือโค้กกับสารหรือแก๊สที่ใส่เข้าไปโดยใช้ความร้อนในการเกิดปฏิริยาเพื่อให้เกิดการสลายตัวไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหลักๆ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยปฏิริยาเคมีที่สำคัญดังนี้

- ออกซิโนไลซิส คือการทำปฏิริยาของคาร์บอนกับแก๊สออกซิเจนเพื่อเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนจำกัด เพราะอากาศที่ป้อนเข้าจากด้านล่างถูกใช้ในระหว่างการเผาไหม้ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

- ไฮโดรจิโนไลซิส คือปฏิริยากับไฮโดรเจน เพื่อให้เกิดมีเทนหรือปฏิริยาการเติมไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.18, 2.19 และ 2.21

- ไฮโดรไลซิส สมการที่ 2.20 เป็นปฏิริยาที่แยกน้ำได้ผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน

- ปฏิริยาวอเตอร์แกซิฟิเคชัน สมการที่ 2.11 เป็นปฏิริยาย้อนกลับได้ของ คาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

- สตีมรีฟอร์มมิง สมการที่ 2.22 สตีมรีฟอร์มมิงหรือการรีฟอร์มมิงด้วยน้ำ คือใช้กระบวนการทางเคมีที่มีไอน้ำซึ่งคือน้ำและความร้อน เป็นตัวเร่งปฏิริยาให้เกิดการแยกตัวของไฮโดรเจนในสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ปฏิริยาทั้งหมดนี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยหลักที่จะกำหนดการเกิดปฏิริยาดังกล่าวคือ อุณหภูมิภายในเตาปฏิริการ



เช่น ถ้าระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ใน บริเวณเผาไหม้ของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไปหรืออุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดการสันดาปและจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นเป็น น้ำมันทาร์

ตารางที่ 2.7 ปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของชีวมวล

ปฏิกิริยา		สมการที่	
$C_m H_n O_o$	$\longrightarrow$	$aC(s) + bH_2O + cCH_4 + dCO + Char$ $+ H_2O + Light\ hydrocarbon + Tar$	2.12
$C_m H_n + (m/2 + n/4) O_2$	$\longrightarrow$	$mCO_2 + n/2H_2O$	2.13
$C_m H_n + m/2 O_2$	$\longrightarrow$	$mCO_2 + n/2 H_2$	2.14
Volatile matter + $O_2$	$\longrightarrow$	$CO_2 + H_2O$	2.15
$CH_4 + 1/2 O_2$	$\longleftrightarrow$	$CO + 2H_2$	2.16
$H_2 + 1/2O_2$	$\longrightarrow$	$H_2O$	2.17
$C + 2H_2$	$\longrightarrow$	$CH_4$	2.18
$CO_2 + 4H_2$	$\longleftrightarrow$	$CH_4 + 2H_2O$	2.19
$C_m H_n + mH_2O$	$\longrightarrow$	$mCO + (n/2 + m)H_2$	2.20
$C + H_2O$	$\longleftrightarrow$	$1/2O_2 + 1/2CH_4$	2.21
$CH_4 + H_2O$	$\longrightarrow$	$CO + 3H_2$	2.22
$CO + 3H_2$	$\longrightarrow$	$CH_4 + H_2O$	2.23

2.3.2.5 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน แกซิฟิเคชันหรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนสารใดๆ หรือวัตถุดิบจากสถานะของแข็งหรือของเหลวให้กลายเป็นแก๊ส ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงหลักๆ ที่ได้ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเรียกแก๊สผสมระหว่ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ว่า แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสมหรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ การใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล ซึ่งนอกจากจะนำไปใช้โดยตรงแล้วยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีก เช่น พอร์มัลดีไฮด์ กรดอะซิติก ไดมethylเอเทอร์หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ในการถลุงเหล็ก ส่วนแก๊สที่แยกจะใช้มาก

ในกระบวนการกลั่นแยกแก๊ส ผลิตภัณฑ์เอมโมเนียและใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารเคมีหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีการนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้เป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นปิโตรเลียมอีกด้วย การใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สสำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ด้วยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว เพื่อนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาในการผลิตกรดอะคริลิก เป็นต้น (วสิน กาจณภู, 2545)

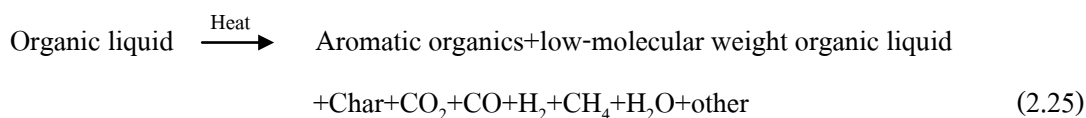
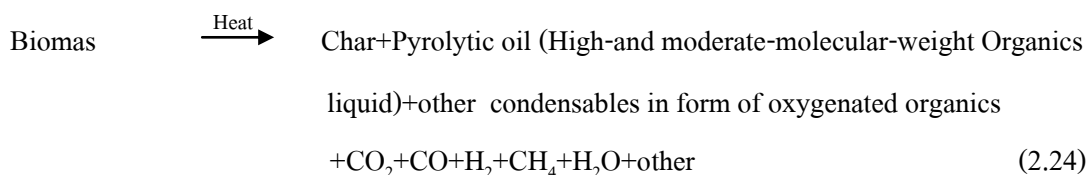
### 2.3.3 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโร เป็นภาษากรีกมีความหมายว่า ความร้อน ไพโรไลซิส จึงหมายถึงการทำปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับความร้อน ในความเป็นจริงนั้นกระบวนการไพโรไลซิสหรือการกลั่นทำลายเป็นกระบวนการที่สารที่จะถูกสลายตัว ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ได้ถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ในที่ที่อับอากาศปราศจากออกซิเจนหรือในที่ที่มีการจำกัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดการสลายของเนื้อวัสดุออกไปเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ชนิดต่างๆ หรือองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม ซึ่งไพโรไลซิสมีความหมายและกระบวนการเดียวกับการเสื่อมสลายด้วยความร้อนนั่นเอง ต่างกันตรงที่การเสื่อมสลายด้วยความร้อนของสารเช่น พอลิเมอร์เป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิการใช้งานซึ่งไม่อาจจะสูงมาก การสลายตัวจึงเป็นไปอย่างช้าๆ เทคโนโลยีการไพโรไลซิสเป็นเทคโนโลยีเก่าที่ใช้กันมานานแล้ว เช่น ใช้ผลิตถ่านจากไม้และสารเคมีบางชนิด ปัจจุบันเทคโนโลยีการไพโรไลซิสกลับมามีบทบาทอีกเนื่องจากมีงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเชื้อเพลิงและพลังงานทางเลือกอื่นด้วยวิธีนี้กันเป็นจำนวนมาก ได้แก่ การไพโรไลซิสขยะเทศบาล การไพโรไลซิสเศษไม้เนื้อไม้เพื่อได้น้ำมันและแก๊สไปเป็นเชื้อเพลิง ความจริงแล้วองค์ประกอบของไม้และขยะเทศบาลล้วนแล้วแต่เป็นพอลิเมอร์เกือบทั้งสิ้น ดังนั้นการเริ่มศึกษาเทคโนโลยีการเสื่อมสลายพอลิเมอร์ด้วยความร้อน จะช่วยให้เข้าใจการแตกโมเลกุลสารขณะไพโรไลซิสดีขึ้น ในการไพโรไลซิสสาร เช่น สารชีวมวลจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่ากระบวนการเสื่อมสลายตามธรรมชาติโดยทั่วไป

อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสมักอยู่ในช่วงระหว่าง 500-1100°C ซึ่งจะมากหรือน้อยแล้วแต่ชนิดและพันธะเคมีที่อยู่ในสารนั้น โมเลกุลของชีวมวลนั้นมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนของ C, H, O, และ N เมื่อทำการให้ความร้อนแล้วอุณหภูมิที่ผิวของชีวมวลจะเพิ่มก่อนแล้วจะเกิดการแพร่ของความร้อนเข้าไปภายในเนื้อของสารชีวมวลอย่างไม่สม่ำเสมอ เป็นเหตุทำให้โมเลกุลต่างๆ ได้รับความร้อนไม่เท่ากัน โมเลกุลจึงเกิดการสั่นและขาดออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดต่างๆ กันมากมายหลายขนาดหากความสม่ำเสมอไม่ได้ และไม่สามารถควบคุมการแตกออกของโมเลกุลได้

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลายเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน ที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มี

การถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อมทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือถ่านชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้คือน้ำมันทาร์ และแก๊สปฏิกริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้บางส่วน ของถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (สินีนาฏ รอดจัน, 2547) เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกริยาต่างๆได้แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อนและถ่านชาร์ซึ่งปฏิกริยาต่างๆของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลแสดงได้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25



การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิเดิม ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิกึ่งที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย ตารางที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแต่ละประเภท

กระบวนการ	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
การไพโรไลซิสแบบเร็ว - อุณหภูมิปานกลาง (~500 °C) - ระยะเวลาที่เชื้อเพลิงเป็นไออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ น้อยกว่า 2 วินาที	75% ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์	12%	13%
การไพโรไลซิสแบบช้า - อุณหภูมิต่ำ - ระยะเวลาที่เชื้อเพลิงเป็นไออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน	30% ส่วนใหญ่เป็นน้ำ	35%	35%
แกซีฟิเคชัน - อุณหภูมิสูง (>800 °C) - ระยะเวลาที่เชื้อเพลิงเป็นไออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน	5% น้ำมันดิน	10%	85%

2.3.3.1 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อการไพโรไลซิส การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่างๆรวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการไพโรไลซิสดังอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์, 2536)

2.3.3.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆ และตามชนิดของชีวมวลนั้น สารแต่ละชนิดเหล่านี้จะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า  $300^{\circ}\text{C}$  จะมีการแตกตัวของพอลิแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิติก ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และถ่านชาร์จำนวนน้อยในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นถ่านชาร์และสารประกอบพีนอลบางส่วนความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อยซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณถ่านชาร์และเชื้อเพลิงอื่นๆที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

2.3.3.1.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง  $200-300^{\circ}\text{C}$  จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อยแก่สที่ได้ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอนและน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง  $300-500^{\circ}\text{C}$  จะมีการสลายตัวที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง  $500-800^{\circ}\text{C}$  จะมีการไล่แก๊สออกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

2.3.3.1.3 อัตราการให้ความร้อน ผลกระทบของอัตราให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ  $20^{\circ}\text{C}$  ต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่วไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีอุณหภูมิมากกว่า  $103-105^{\circ}\text{C}$  ต่อวินาที การไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นถ่านชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ถ่านชาร์จำนวนน้อยมาก

2.3.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมีผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศิริสุข, 2541)

#### 2.3.3.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์

ประกอบหลัก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควันเพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตปูนและซีเมนต์หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหย สารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

#### 2.3.3.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ

อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยด้วยหมู่เอทิลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5$ - $C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิดแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า  $200^{\circ}C$  ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน

เอทิลเบนซีน ไชลีน

- น้ำมันช่วงกลาง ช่วงอุณหภูมิ  $200$ - $250^{\circ}C$  ได้แก่ ฟีนอล ไพรีดีน

- น้ำมันแอนทราซีน ช่วงอุณหภูมิ  $300$ - $350^{\circ}C$  ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน

- พีทซ์ ช่วงอุณหภูมิมากกว่า  $350^{\circ}C$  ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไซ

ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

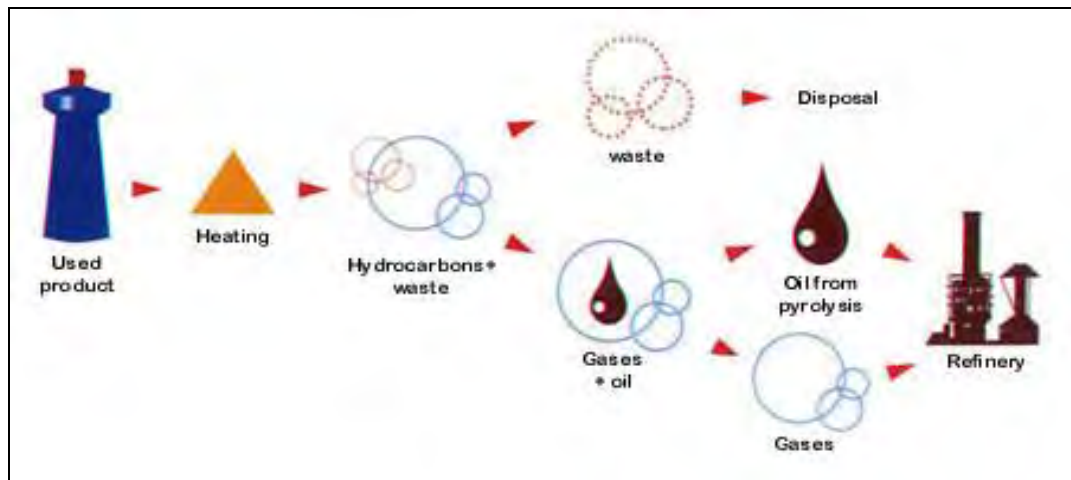
#### 2.3.3.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์

โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้

2.3.3.3 กระบวนการไพโรไลซิสพลาสติก ขยะพลาสติกทั่วไปมีหลายประเภทสามารถนำมาผลิตน้ำมันได้แต่อาจให้ผลผลิตและปริมาณที่ต่างกัน การที่ขยะจะถูกฝังกลบรวมกันและพลาสติกประเภทขดมกได้รับการแยกออกไปก่อน จึงเหลือเพียงถุงหูหิ้ว และถุงใส่อาหารเป็นหลัก ซึ่งน้ำมันที่ได้จากขดใสและถุงอาหารทั่วไปจะให้ดีเซลสีขุ่นดำ แต่หากใช้วัสดุประเภทพลาสติกใหม่จะได้น้ำมันเหลืองใส การไพโรไลซิสพลาสติกเป็นการสลายพอลิเมอร์โดยใช้ความร้อนสูง อุณหภูมิเริ่มตั้งแต่ 200–1000 °C กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำคือน้อยกว่า 400 °C ที่อุณหภูมิปานกลางคือ 400–600 °C และที่อุณหภูมิสูงคือมากกว่า 600 °C ในสภาวะไม่มีออกซิเจนหรือสูญญากาศ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่พลาสติกน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อให้ได้สารน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น ของเหลวและแก๊ส ซึ่งจะสลายตัวให้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำคล้ายเนฟทา คือมีสารประเภทอะโรมาติกมาก ส่วนอะโรมาติกมีอยู่บ้างส่วนใหญ่ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน นิยมใช้วิธีนี้กับพลาสติกที่เกิดผ่านกลไกการเติมด้วยอนุมูลอิสระหรือไอออน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารพื้นฐานทางปิโตรเคมีโดยใช้ความร้อน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ผลผลิตที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่เกิดผ่านกลไกแบบเติมเมื่อได้รับความร้อน ( มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์, 2546)แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลลัพธ์จากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (Buekens, 2009)

ชนิดพลาสติก	รูปแบบการสลายตัวด้วยความร้อน	ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ	ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง
พอลิเอทิลีน	แตกตัวแบบสุ่ม	พาราฟิน	แก๊ส และน้ำมันเบา
พอลิโพรพิลีน	แตกตัวแบบสุ่ม	โอเลฟิน	แก๊ส และน้ำมันเบา
พอลิไวนิลคลอไรด์	- ทำลายไฮโดรคลอริกที่สายโซ่ - การขจัดไฮโดรเจน, - ปฏิกิริยาไซคลิกเซชัน	ไฮโดรคลอริก (< 300 °C) เบนซีน	โทลูอิน (> 300 °C)
พอลิสไตรีน	แตกตัวที่ปลายสายโซ่	สไตรีนและมอนอเมอร์	สไตรีนมอนอเมอร์
พอลิเอทิลีนเทอร์พะธาเลต	ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน	กรดเบนโซอิก และไวนิลเทเรพทาเลต	-



รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการไพโรไลซิสพลาสติก

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในกระบวนการ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการสลายตัวด้วยความร้อนและความเสถียรของสารตั้งต้นและปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิมากกว่า  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นการผลิตแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเหนียวมาก อัตราการไพโรไลซิสสูงกว่ามีแนวโน้มการเกิดของแข็งสูงกว่าผลิตภัณฑ์ขั้นที่สองมากกว่าและเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน กระบวนการไพโรไลซิสพลาสติกส่วนมากเริ่มต้นที่ประมาณ  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับพอลิเมอร์ที่สลายตัวง่าย การเริ่มการไพโรไลซิสของพลาสติกที่มีการเติมแต่งเช่น สารคงตัว สารเติมแต่งพลาสติกและสี ส่วนมากกระบวนการเกิดที่อุณหภูมิปานกลาง ( $400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

ตารางที่ 2.10 ปัจจัยที่มีผลของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (Buckens, 2009)

ปัจจัย	ผลกระทบ
องค์ประกอบทางเคมีของเรซิน	ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของกระบวนการไฟโรไลซิสเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบของเรซิน และกลไกการสลายตัวของเรซิน
อุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนของการไฟโรไลซิส	การทำงานที่อุณหภูมิสูงและอัตราการให้ความร้อนสูงทำให้การแตกออกของพันธะเพิ่มขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก
ระยะเวลาการไฟโรไลซิส	ระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงขั้นที่สองของผลิตภัณฑ์ขั้นแรกที่ยาวนานกว่า ทำให้เกิดชาร์ และทาร์มากขึ้น
ชนิดของเตาปฏิกรณ์	เป็นตัวตัดสินคุณภาพของการส่งผ่านความร้อน การกวนผสม ระยะเวลาในเฟสที่เป็นแก๊สและของเหลว และการหลุดกลายไปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นแรก
สภาวะความดัน	ความดันที่ลดต่ำลงของปฏิกิริยาเกิดเป็นถ่านชาร์
แก๊สที่ทำปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน หรือ ไฮโดรเจน)	ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน เจือจางผลิตภัณฑ์และมีอิทธิพลต่อจุดสมดุล อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของปฏิกิริยา
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์
สารเติมแต่ง	โดยทั่วไปจะระเหยหรือสลายตัว ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.11 กระบวนการทางความร้อนเคมีในรูปแบบต่างๆ

กระบวนการ	ผลิตภัณฑ์ในขั้นต้น	การนำไปประยุกต์ใช้
การเผาไหม้	ความร้อน	ความร้อน
แกซิฟิเคชัน	แก๊ส	แก๊สเชื้อเพลิง
ไฟโรไลซิสแบบทั่วไป	แก๊ส ของเหลว ของแข็ง	แก๊สเชื้อเพลิง น้ำมันเชื้อเพลิง ถ่าน
ไฟโรไลซิสแบบเร็ว	ได้ของเหลวเป็นส่วนใหญ่	น้ำมันเชื้อเพลิง หรือพลังงานทดแทน
ไฟโรไลซิสแบบช้า	ได้ของแข็งเป็นส่วนใหญ่	ถ่าน



### 2.3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

หลักการทั่วไปถือเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ป้อนวัตถุดิบจากด้านบน วัตถุดิบจะเคลื่อนลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งจะถูกละลายตัวและเผาไหม้หมดไปกลายเป็นเถ้าในช่วงล่างสุด สำหรับเครื่องผลิตแก๊สแบบนี้ในเครื่องจะมีตัวรองรับเชื้อเพลิงอยู่ จึงเปรียบเสมือนว่าเชื้อเพลิงนั้นอยู่กับที่ตลอดเวลาวัตถุดิบจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งจะถูกละลายตัวและเผาไหม้หมดไปกลายเป็นเถ้าในช่วงล่างสุด เมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของอากาศหรือออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปภายในเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งนั้นสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ได้ 4 บริเวณโดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกริยา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ซึ่งประกอบด้วย

- บริเวณเผาไหม้ บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงสัมผัสกับสารออกซิแดนซ์ที่ถูกป้อนเข้าไปในเตา ซึ่งอาจเป็นอากาศ ออกซิเจน หรือออกซิเจนผสมกับไอน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกันระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 900 – 1200 °C ความร้อนที่เกิดในบริเวณเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคายความร้อน ในบริเวณที่เกิดการรีดักชันและไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาในบริเวณนี้คือความร้อนและเถ้า

- บริเวณที่เกิดการรีดักชัน คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้จะไหลผ่านบริเวณที่เกิดการรีดักชัน ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ อุณหภูมิบริเวณนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 600 – 700 °C ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น สามารถทำได้โดยการฉีดไอน้ำเข้าไปซึ่งไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

- บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิส บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่มีการสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง โดยความร้อนในบริเวณนี้เป็นความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 400 – 600 °C แก๊สที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์มีทั้งแก๊สที่เผาไหม้ได้และแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน นอกจากนี้ยังได้ของแข็งในรูปของถ่านชาร์

- บริเวณที่อบแห้ง ในบริเวณนี้อุณหภูมิจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ โดยอุณหภูมิในบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 100 – 135 °C

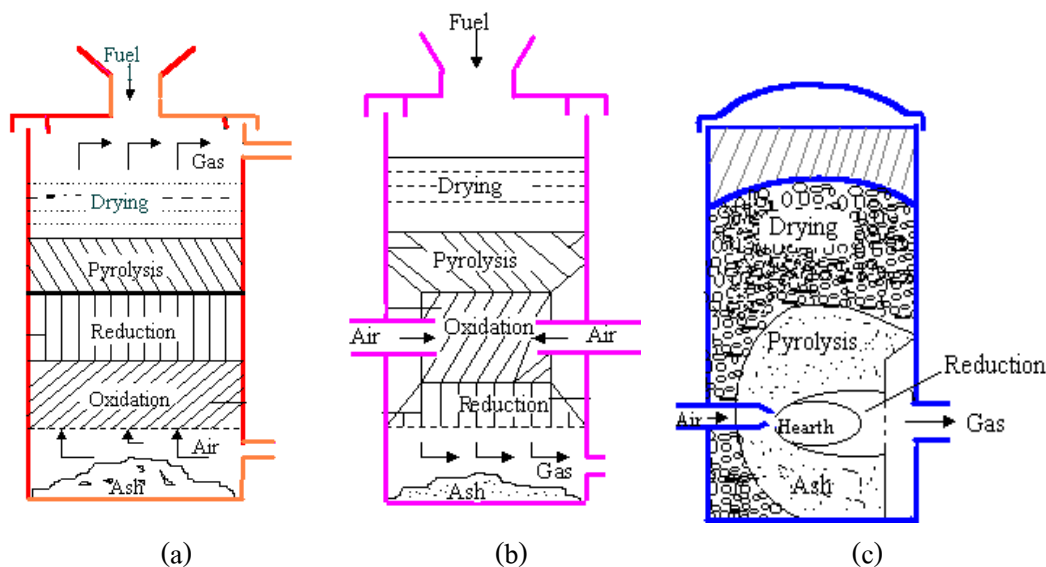
ข้อดีของเตาปฏิกรณ์แบบนี้คือ มีการสัมผัสโดยตรงกับแก๊สร้อน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนสูงสุดและมีการสูญเสียความร้อนน้อย ปัญหาที่พบคือการเยิ้มและการเกาะติดกันเป็นก้อนของวัตถุดิบ ทำให้เกิดการอุดตันในชั้นรองรับหรือเบด เตาปฏิกรณ์แบบนี้เมื่อแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเมื่อเทียบกับการไหลเคลื่อนของเชื้อเพลิงจะสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดคือ

2.3.4.1. เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น เครื่องปฏิกรณ์นี้เป็นแบบที่ใช้เป็นแบบแรกและใช้ง่ายที่สุดโดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาปฏิกรณ์และอากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างผ่านตะแกรงดังแสดงในรูปที่ 2.7 (a) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นเรียกนี้ว่าบริเวณเผาไหม้ เมื่ออากาศเข้าไปบริเวณนี้ก็จะเกิดปฏิกิริยาได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงและจะถูกส่งผ่านไปยังบริเวณที่เกิดการรีดักชันซึ่งมีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนหลังจากนั้นแก๊สจะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิงและกลั่นสลาย ในช่วงอุณหภูมิ 200–500 °C จากนั้นแก๊สจะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ขึ้น เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น ดังนั้นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาปฏิกรณ์นี้จะมีปริมาณน้ำมันทาร์มาก ซึ่งอาจมากถึง 20% ของน้ำมันทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวล ข้อดีของเตาปฏิกรณ์แบบนี้คือ ติดตั้งง่ายและมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง กระบวนการนี้สามารถผลิตแก๊สได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้อุณหภูมิลดลง

2.3.4.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลลง เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.7 (b) ผ่านบริเวณเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากบริเวณเผาไหม้จะถูกรีดิวส์ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ซึ่งอยู่เหนือตะแกรงในชั้นของบริเวณด้านบนของบริเวณเผาไหม้มีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส การแตกตัวนี้จะเกิดอุณหภูมิกึ่งที่ในช่วง 800–1000 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C ปฏิกิริยาอุคความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (Reed และ Das, 1988)

2.3.4.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลตามขวาง การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ได้จะไหลขวางกับเตาปฏิกรณ์ซึ่งเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงมากถึง 2000 °C จึงจำเป็นต้องมีน้ำหล่อเย็นอยู่ข้างนอก ลักษณะชั้นปฏิกิริยาโดยเฉพาะบริเวณเผาไหม้และบริเวณรีดักชันจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นจะผลิตแก๊สได้อย่างรวดเร็วและแปรผันง่าย ปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่ที่กึ่งกลางของเตาผลิตแก๊สแต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้น เมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น จุดสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้คือการออกแบบรูปร่างของปลายท่อ มีความสำคัญต่อความเร็วของอากาศเมื่อเข้าทำปฏิกิริยาและขอบเขตของบริเวณเผาไหม้ซึ่งปกติความเร็วอากาศจะมีค่าสูงและเกิดการเผาไหม้สูงโปรคิวเซอร์แก๊สที่ออกจากเตาผลิตจะมีอุณหภูมิสูงและสิ่งปนเปื้อนสูง ปกติบริเวณรีดักชันมีขนาดเล็กจึงทำให้มีระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นการเปลี่ยนรูป

คาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นโปรคิวเซอร์แก๊สจะมีค่าความร้อนต่ำแต่เมื่อป้อนอากาศที่ความเร็วสูงมากจะมีผลต่อองค์ประกอบโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยอัตราการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์สูงเนื่องจากปฏิกิริยาเข้าใกล้ภาวะสมดุล



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (a) เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลลง (b) และ เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลตามขวาง (c)

## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

ตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบน โมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี มีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา สารที่เติมลงไปในการเกิดปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ซึ่งในขณะเดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง ความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง

### 2.4.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น โดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2.4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี

สถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อผสมนี้เนื่องจากความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุที่มีรูพรุนสูง สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนวัสดุที่มีความพรุนสูง (High Porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

- การถ่ายโอนมวลสารจากของไหลภายนอกไปยังผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
- การแพร่มวลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- การดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- ผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลุดจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุน
- การถ่ายโอนมวลสารของผลิตภัณฑ์ออกสู่ของไหล

#### 2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

##### 2.4.2.1 สปีชีส์ที่ว่องไว เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริงซึ่งอาจ

ประกอบด้วยสปีชีส์ที่ว่องไวเพียงอย่างเดียว แต่กรณีที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวดำจะนิยมใช้วิธีเคลือบลงบนตัวรองรับ

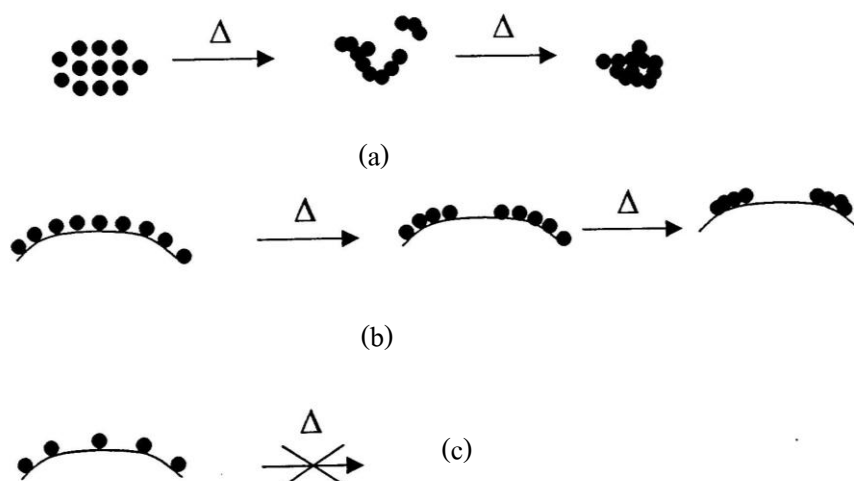
##### 2.4.2.2 ตัวรองรับ มักเป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูง หน้าที่หลักของตัวรองรับ

คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่สปีชีส์ที่ว่องไว บางกรณีจะเกิดปฏิกิริยากันระหว่างตัวรองรับและสปีชีส์ที่ว่องไว ซึ่งทำให้สปีชีส์ที่ว่องไว มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปเลือกใช้ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ การเลือกตัวรองรับพิจารณาได้จากการมีลักษณะที่ต้องการของตัวรองรับ รวมทั้งผลทางด้านเคมีและสมบัติทางกายภาพก็มีความสำคัญ ได้แก่ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ มีสมบัติเชิงกลที่ทนต่อการขัดสี มีความแข็งแรงและทนต่อแรงกด มีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ควรเสถียรภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้เพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่และมีราคาต่ำ สิ่งที่สำคัญของตัวรองรับนอกจากจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสปีชีส์ที่ว่องไวแล้ว ในบางครั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของสปีชีส์ที่ว่องไวด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่

ในอุตสาหกรรมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะรองรับ ด้วยเหตุผลที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีดังต่อไปนี้

- เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดหาหรือเตรียมขึ้นได้ง่ายและปลอดภัย
- สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกลางเป็นของเหลวที่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการกรอง
- อนุภาคที่เป็นโลหะอยู่แยกกันอย่างอิสระเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงไม่ทำให้อนุภาคโลหะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่
- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ตัวรองรับอาจเป็นโปรโมเตอร์ได้อีกด้วย โดยส่วนข้อดีอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนั้นๆ และระบบของปฏิกิริยาได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ ชนิดของโปรโมเตอร์และตัวพุง เป็นต้น

2.4.2.3 ตัวโปรโมเตอร์ เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ช่วยให้สปีชีส์ที่ว่องไวทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่น ลดการ sintering และการ fouling



รูปที่ 2.8 บทบาทของตัวรองรับต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว (a) ไม่มีตัวรองรับ active species หลอมตัวกันได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (b) active species ความเข้มข้นสูงบนพื้นผิวของตัวรองรับ ยังมีโอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูง (c) active species ความเข้มข้นต่ำบนพื้นผิวของตัวรองรับ โอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันมีน้อย (ปรางค์เนตร เฟื่องฟูง, 2550)

### 2.4.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝัง (impregnation)

วิธีนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะนำตัวรองรับที่เป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาสัมผัสกับสารละลายที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่โดยแบ่งเป็น 2 วิธีคือ การเคลือบฝังแบบ

เปียกและการเคลือบฝังแบบแห้ง ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเคลือบฝังแบบเปียก นั้น ตัวรองรับจะถูกแช่ในสารละลายที่เหมาะสมที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่ โดยทั่วไปมักเป็นสารละลายของน้ำ จากนั้นค่อยๆทำการระเหยตัวทำละลายออกจนหมด เพื่อให้สปีชีส์ที่ว่องไวตกค้างอยู่บนตัวรองรับ ในระหว่างการระเหยนี้อาจมีการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับ pH ของสารละลายไปพร้อมๆกัน ข้อดีของวิธีการนี้คือตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับสปีชีส์ที่ว่องไวสม่ำเสมอ แต่อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป อัตราส่วนของเกลือที่ตกตะกอนบนตัวรองรับมักจะแตกต่างกันไปจากสัดส่วนความเข้มข้นในสารละลาย

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรารักษ์เนตร เฟื่องฟูง (2550) ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันในการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจน โดยใช้พลาสติกพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีนเป็นเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของออกซิเจนต่อองค์ประกอบของแก๊สและปริมาณของแก๊สที่ได้ โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์และร้อยละของออกซิเจนระหว่าง 0 - 40 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 850 °C ร้อยละของไอน้ำ 50 และร้อยละของค่าอัตราการไหลรวมที่ 100 ในทุกภาวะการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์จะทำให้แก๊สที่ได้มีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากโคโลไมต์จะไปกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันนาร์ จึงทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของออกซิเจนทำให้ได้แก๊สปริมาณมากขึ้น โดยแก๊สที่ได้มีปริมาณร้อยละ 51 และจากการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพลาสติกแต่ละชนิดด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกพบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุดคือที่ 480 °C และพอลิสไตรีนจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำสุดคือที่ 420 °C

Demirbas (2004) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ขยะพลาสติกที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ประเภท คือ พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน ภายใต้สภาวะไพโรไลซิส ขยะพลาสติกสลายตัวเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นแก๊สของเหลวและของแข็งที่เหลือ ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีจุดเดือดสูงกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนปกติ สารที่ได้มาในขั้นนี้นำมาใช้เป็นแก๊สโซลีน นอกจากนี้ยังเป็นสารเคมีตั้งต้นรวมถึงเบนซีน โทลูอีน และสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิสไตรีนได้ผลผลิตของเหลวสูงกว่า ส่วนพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สสูงกว่า

ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตรวจวัดโดยใช้เฟรมไอออนไนเซชันดีเทกเตอร์ (FID)

Angyal และคณะ (2007) ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนซึ่งเป็นทางหนึ่งที่ทำให้ได้สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจากของเสียพอลิเมอร์ คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสลายตัวของของเสียพอลิเมอร์ที่ผสมกัน ได้แก่ พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนในถังปฏิกรณ์แนวนอน ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 510-520 °C ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 15-30 นาที ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากพอลิสไตรีนและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ด้วย ผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของพอลิเมอร์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าความเข้มข้นของพอลิสไตรีนมีผลต่อปริมาณและคุณภาพของการสลายผลิตภัณฑ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิสไตรีนในวัตถุดิบทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และอัตราการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของพอลิสไตรีนที่สูงกว่ามีผลิตภัณฑ์เบาสูงขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของแนพตามีความเข้มข้นของอะโรมาติกสูงขึ้นด้วย ลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับพอลิสไตรีนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีข้อดีคือสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

Lee และคณะ (2007) ศึกษาของเหลวที่ได้จากการเผาแบบไพโรไลซิสของขยะพลาสติกที่อุณหภูมิต่างกัน และศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์เหลว ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างพลาสติกแต่ละชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน ผสมกันในสัดส่วน 3 : 2 : 3 : 1 ซึ่งทำการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) ตัวอย่างจะได้รับความร้อนถึง 700 °C ที่อัตรา 10 °C ต่อนาที การสลายตัวของพลาสติกจะเกิดในถังปฏิกรณ์แบบแบดซ์ที่อุณหภูมิต่ำคือ 350°C และที่อุณหภูมิสูงคือ 400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ นำมาวิเคราะห์ปริมาณและคุณสมบัติโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่ตรวจวัดโดยใช้เฟรมไอออนไนเซชันดีเทกเตอร์และแมสสเปกโตรมิเตอร์ ของเหลวที่ได้จำแนกตามคุณสมบัติของโมเลกุลคือ น้ำหนักและโครงสร้างของโมเลกุลเป็น 4 ประเภทได้แก่ พาราฟิน โอเลฟิน แนพทีน และอะโรมาติก (PONA) จากการศึกษาพบว่าลำดับในการสลายตัวของพลาสติกคือ พอลิสไตรีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในการสลายตัวที่อุณหภูมิ 350°C และ 400°C ผลิตภัณฑ์ลำดับแรกที่ได้คืออะโรมาติกมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100 ซึ่งเกิดจากการตัดขาดที่ปลายโซ่ของโมเลกุล ขณะที่ผลิตภัณฑ์โอเลฟินและพาราฟินมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง โดยมีการตัดขาดของสายโซ่

แบบสุ่ม ผลิตภัณฑ์โอเลฟินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 120 เช่นเดียวกับแนฟทีน อุณหภูมิการสลายตัวที่ 350°C และ 400°C จะได้สารประกอบโอเลฟินเป็นผลิตภัณฑ์หลักเมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 343 นาที และ 83 นาทีตามลำดับ

Soongprasit และคณะ (2007) ศึกษาการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันของพอลิเมอร์เชิงประกอบเอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ และยางธรรมชาติจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ทำการแปรสภาพให้กลายเป็นเชื้อเพลิงโดยอาศัยความร้อนจากการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ อุณหภูมิที่ใช้แปรสภาพทางความร้อนอยู่ในช่วง 500-1000 °C ซึ่งพบว่าใช้เวลาเล็กน้อยในการทำให้อุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ งานวิจัยนี้ทำการแปรสภาพภายใต้สภาวะบรรยากาศที่แตกต่างกันคือ ที่แก๊สอาร์กอน 100% และแก๊สอาร์กอน 99%ต่อแก๊สออกซิเจน 1% นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของพลังงานคลื่นไมโครเวฟและปริมาณของซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อทำการเปรียบเทียบการให้ความร้อนแบบทั่วไปและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ พบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์จากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมี ไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ สูงกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไป

Chiemchaisri และคณะ (2009) ทำการทดลองนำของเสียจากบ่อขยะมาทำให้เป็นประโยชน์ โดยทำเป็นเชื้อเพลิงจากขยะซึ่งผลิตเป็นก้อนกลมเพื่อใช้ในระบบแกซิฟิเคชัน ขยะเหล่านี้จะถูกนำมาทดสอบเบื้องต้นสำหรับองค์ประกอบทางฟิสิกส์และลักษณะสมบัติทางเคมี ซึ่งประกอบด้วยพลาสติกมากถึง 24.6 – 44.8% ส่วนใหญ่เป็นพอลิเอทิลีนในรูปถุงพลาสติก ทำการแยกขยะพลาสติกออกจากองค์ประกอบอื่นๆ ผ่านการคัดแยกด้วยมือและเครื่องสกรีนหลังจากการแยกมีขยะเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้นถึง 82.9 – 89.7 % จากนั้นขยะพลาสติกที่แยกแล้วถูกนำมาผสมกับสารรวมตัวและเปลี่ยนรูปเป็นเชื้อเพลิงก้อนกลม พลาสติกที่บรรจุอยู่ในก้อนเชื้อเพลิงจากขยะสูงสุดคือ 55% เพื่อรักษาความแข็งแรงทางฟิสิกส์และปริมาณคลอรีนที่มีได้สูงสุด ก้อนเชื้อเพลิงจากขยะจะถูกทดลองในเตาปฏิกรณ์แบบไหลลง แก๊สที่ได้ให้พลังงานเฉลี่ย 1.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร แก๊สเย็นที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพ 66% ต้นทุนการผลิตพลังงานจากกระบวนการนี้คือ 0.05 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโวลต์

Kantarelis และคณะ (2009) ทำการศึกษาพลังงานจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อนของขยะพลาสติกผสมโดยกระบวนการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง (H T S G) และกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง (H T P) ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็น



พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา จากการเปรียบเทียบพบว่า HTSG เป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (64 % โดยปริมาตร และ  $13 \text{ MJ/Nm}^3$ ) มากกว่า HTP เนื่องจากได้แก๊สไฮโดรเจนสูงกว่าและเกิดทาร์ปริมาณน้อยกว่า

Chunfei และคณะ (2009) ทำการทดลองการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการไพโรไลซิส-แกซิฟิเคชัน ของโพลีโพรพิลีน โดยใช้ไนเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และกระบวนการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีไอน้ำในระบบโดยใช้ปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไนเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Al หรือ Ni-Mg-Al ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 48.8 เป็น 57.7 % โดยน้ำหนัก และปริมาณของน้ำในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1.2 เป็น 1.3 (g water/ g PP) เมื่ออัตราส่วนของ Ni-Al เพิ่มขึ้นจาก 1:4 เป็น 1:1 หลังกระบวนการไพโรไลซิส-แกซิฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Al ถูกลดลงไปเป็นโลหะไนเกิล พบจากการวิเคราะห์ด้วย XRD และ TGA การมี Mg เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Al มีความสำคัญกับการเพิ่มปริมาณของปฏิกิริยากับน้ำและปรับปรุงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดถ่าน coke ถึงแม้ว่าจะไม่ได้มีความสำคัญในการปรับปรุงการผลิตไฮโดรเจน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Al หรือ Ni-Mg-Al ที่ทำการเผาที่  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำเมื่อเทียบกับการเผาที่  $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$  การแทนที่ Mg ด้วย Cu ในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-Al มีความสำคัญกับการลดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไฮโดรเจน

Chunfei และคณะ (2010) ทำการศึกษการผลิตไฮโดรเจนจาก PP, PS, HDPE และขยะพลาสติกผสมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส-แกซิฟิเคชันสองขั้นตอน ทำการทดลองการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 800 หรือ  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-Al และที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของพลาสติกมีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และการผลิตไฮโดรเจน ทำการวิเคราะห์การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-Al โดยเทคนิค TPO และ SEM พบว่าแก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน ( 11.2 % wt ของพลาสติก ) โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PP ( 59.6 %wt) และ HDPE (53.5%) และขยะพลาสติก (45.5%) และยังได้น้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส – แกซิฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ PS การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-Al ในกระบวนการไพโรไลซิส – แกซิฟิเคชันพลาสติกช่วยปรับปรุงการผลิตไฮโดรเจนให้ดีขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ PS พบว่ามีการผลิตไฮโดรเจนต่ำที่สุดคือ 0.155 และ 0.196 (g  $\text{H}_2$ /g PS) ที่อุณหภูมิ 800 และ  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ พบถ่านโค้กสะสมอยู่มากบนตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส – แกซิฟิเคชันของ PP กับขยะพลาสติกเมื่อเทียบกับการสตีมไพโรไลซิส – แกซิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ PS และ HDPE

Sancho และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาระบวนการแกซีฟิเคชันของขยะโพลีพรอพิลีน 100% วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทาร์โดยการเติมโคโลไมต์และโอลิวีนในตัวรองรับของแกซีไฟเออร์ พบว่าโคโลไมต์มีความว่องไวกว่าโอลิวีนเมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน (30% โดยน้ำหนัก) ปริมาณของทาร์ลดลงจาก 92% เมื่อใช้โคโลไมต์ ในขณะที่ปริมาณทาร์ลดลง 40% เมื่อใช้โอลิวีน แต่โคโลไมต์มีปัญหาจาก plugging การทำความสะอาดแก๊ส เนื่องจากปริมาณของอนุภาค แต่ไม่เกิดขึ้นกับโอลิวีน ดังนั้นจึงใช้โอลิวีนเป็นวัสดุรองรับในเครื่องปฏิกรณ์ตัวรองรับซึ่งเป็นวัสดุแข็งถูกทดสอบด้วยโอลิวีน 100 %wt ผลที่ได้เป็นไปในทางที่ดี พบว่าปริมาณทาร์ที่ได้จากทางออกคือ  $2 \text{ g/nm}^3$  LHV เท่ากับ  $6 \text{ MJ/Nm}^3$  และแก๊สที่ได้คือ  $6 \text{ Nm}^3/\text{kd}_{\text{daf}}$

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการแปรสภาพขยะพลาสติกในกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแกซีฟิเคชัน เป็นทางหนึ่งที่ทำให้ได้สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจากของเสียพลาสติก และสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่กำจัดยากและยังช่วยลดความยุ่งยากในการหาหลุมทิ้งขยะแห่งใหม่ การแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางหนึ่ง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิ ปริมาณออกซิไดซิ่งแก๊ส ระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการและศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการนำขยะพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากหลุมฝังกลบที่ดำเนินการฝังกลบแล้วเป็นเวลา 20 ปีจากหลุมฝังกลบแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อนโดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองและเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงสลายตัวกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงและเป็นสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและวิกฤติพลังงาน โดยมีขั้นตอนการศึกษาและวิธีการทดลองดังนี้

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.2 การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.3 การดำเนินการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

##### 3.3.1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของขยะพลาสติกแบบประมาณและแบบแยกธาตุ

##### 3.3.2 ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะต่างๆ

##### 3.3.3 ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติกที่สภาวะต่างๆ

##### 3.3.4 ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 การเตรียมขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย

##### 1. ขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบจากจังหวัดสงขลา

##### 2. เครื่องชั่งมวลสาร

##### 3. อุปกรณ์บดตัดพลาสติก

##### 4. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของพลาสติกแบบประมาณ (TGA) ยี่ห้อ

METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851°

##### 5. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของพลาสติกแบบแยกธาตุ CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 series II)

##### 6. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Automatic Bomb Calorimeter; Leco model C-350



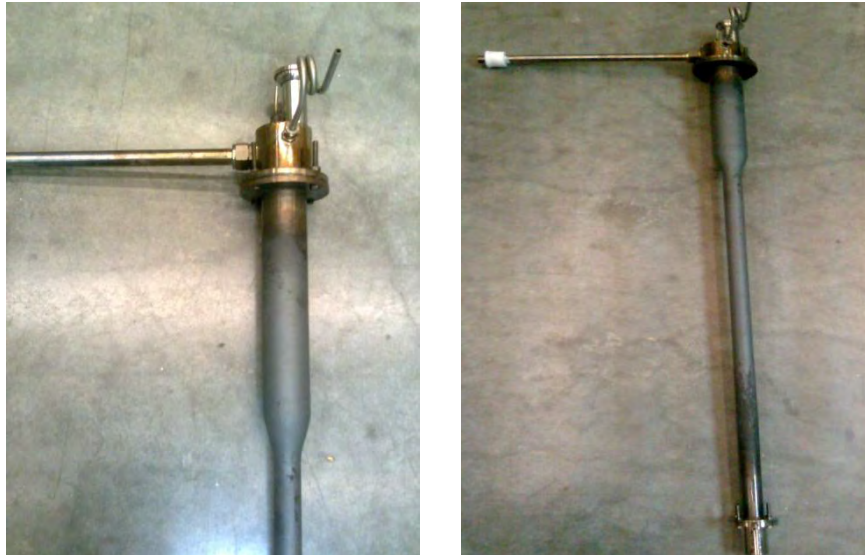
รูปที่ 3.1 ขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของพลาสติกแบบประมาณ และเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน

### 3.1.2 การเตรียมเตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด

1. อะลูมินาบอล ขนาด 1 มิลลิเมตร จากบริษัทเซอร์นิก อินเตอร์เนชันแนล จำกัด
2. เครื่องปฏิกรณ์สเตนเลสรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1.85 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 2.45 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร
3. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์
4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สผลิตภัณฑ์ (Bubble flow meter)
5. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน (Rotameter)
6. ชุดอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งจากปฏิกิริยา (cyclone)
7. อุปกรณ์สกัดน้ำมันดินและควบแน่นผลิตภัณฑ์เหลว (condensers)
8. อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสรูปทรงกระบอก



รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบเข้ากับเตาไฟฟ้าให้ความร้อน

### 3.1.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

1. นิกเกิลไนเตรท (Ni (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) จากบริษัท Fluka
2. แมกนีเซียมไนเตรด (Mg (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) จากบริษัท Fluka
3. แลนทานัมไนเตรด (La (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) จากบริษัท Merck
4. ตัวรองรับอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
5. แก๊สไฮโดรเจน 99.5%

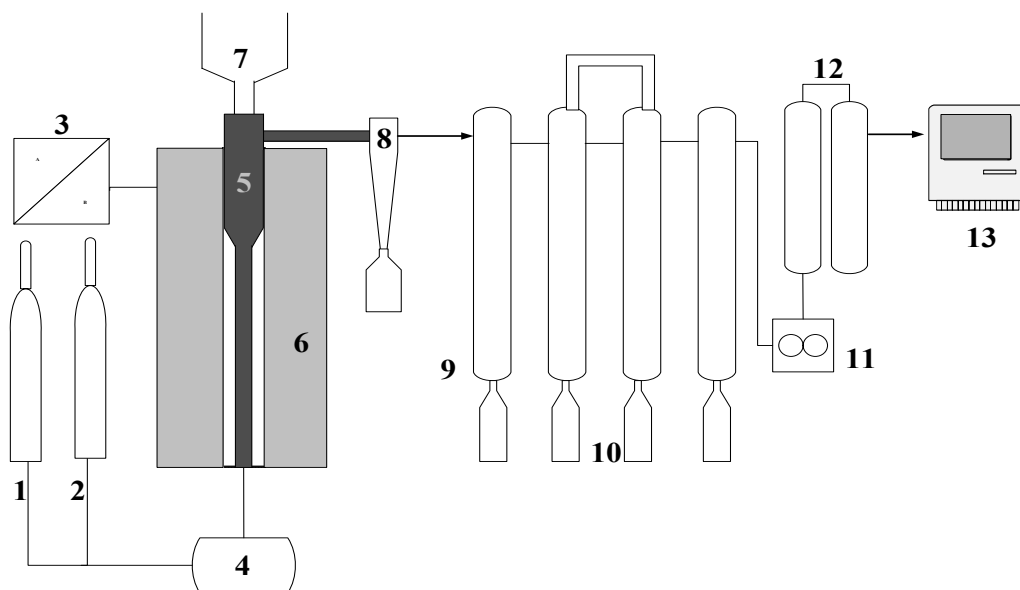
6. ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนและปั่นกวน
7. เตาเผาให้ความร้อนสูง
8. อุปกรณ์บดและคัดขนาด

### 3.1.4 การดำเนินการกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน

1. เตาปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด
2. เครื่องวิเคราะห์ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา MRU GmbH รุ่น SWG-200 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงผลร้อยละประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง
3. แก๊สออกซิเจน 99.5%
4. แก๊สไนโตรเจน 99.99%



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ร้อยละแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาและอุปกรณ์  
ควมแน่นผลิตภัณฑ์เหลว



รูปที่ 3.6 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์

- (1) แก๊สไนโตรเจน 99.99 %
- (2) แก๊สออกซิเจน 99.5 %
- (3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- (4) เครื่องอุ่นให้ความร้อนแก๊สก่อนทำปฏิกิริยา
- (5) เครื่องปฏิกรณ์พร้อมชั้นเบด
- (6) เตาเผาให้ความร้อน
- (7) อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องปฏิกรณ์
- (8) อุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งจากปฏิกิริยา
- (9) ชุดอุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์เหลว
- (10) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างของเหลว
- (11) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สผลิตภัณฑ์
- (12) ชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สผลิตภัณฑ์ (Washer)
- (13) เครื่องวิเคราะห์หรือยละเอียดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา

หลักการดำเนินงานของระบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อนและการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ใช้อะลูมินาบอลขนาด 1 มิลลิเมตรเป็นวัสดุรองรับในเครื่องปฏิกรณ์ ขยะพลาสติกจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องตามอัตราเร็วที่กำหนด ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะบรรจุอะลูมินาบอลเป็นชั้นเบดปริมาณ 85 กรัม ซึ่งมีความสูงประมาณ 10 เซนติเมตรของเครื่องปฏิกรณ์ ในการเดินระบบใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาและแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยทำปฏิกิริยาจากทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของแก๊สออกซิเจน ซึ่งขยะ



พลาสติกที่ป้อนเข้าไปและได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเมอร์กลายเป็นแก๊สเคลื่อนตัวขึ้นด้านบนของเตาปฏิกรณ์ ผ่านอุปกรณ์ดักจับฝุ่นของแข็งจากปฏิกิริยาก่อนจะผ่านอุปกรณ์ควบแน่นเพื่อให้แก๊สผลิตภัณฑ์เย็นลง แก๊สบางส่วนจะถูกควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์เหลวซึ่งเก็บไว้วิเคราะห์ห้องปฏิบัติการต่อไป ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์หรือละลายแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาซึ่งทำให้ทราบร้อยละของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน

### 3.2 การเตรียมวัตถุดิบและเตาปฏิกรณ์

#### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมขยะพลาสติก

ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขยะชุมชนที่ดำเนินการฝังกลบแล้วเป็นเวลา 20 ปีจากหลุมฝังกลบขยะแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลา โดยทำการคัดแยกเฉพาะถุงพลาสติกต่างๆ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งเหมือนถุงพลาสติกทั่วไปที่ผ่านการใช้งานแล้วปะปนกันส่วนใหญ่เป็นถุงพลาสติกทั้งชนิดที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิโพรพิลีนปนเปื้อนดิน ก่อนนำไปทำการทดลองต้องทำการบดตัดขยะพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงมีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร และผสมเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราเร็ว 1 กรัมต่อนาที



รูปที่ 3.7 การคัดแยกขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ



### 3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเตาปฏิกรณ์

นำเครื่องเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1.85 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 2.45 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร ต่อเข้ากับเตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลางสำหรับเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ชุดอุปกรณ์ควมแน่น ชุดอุปกรณ์ป้องกันวัตถุติด ภายในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุอะลูมินาขนาด 1 มิลลิเมตรซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นเบรคความร้อนที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ต่อชุดอุปกรณ์ไฮโดรเจนเพื่อดักจับฝุ่นจากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊ส อุปกรณ์อุ่นแก๊สขาเข้า (pre-heater) ดังรูปที่ 3.6

### 3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

- เตรียมสารละลายอิมแพกแนนต์ (impregnant) โดยการละลายนิกเกิล

ไนเตรด ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีปริมาณนิกเกิลร้อยละ 10 แลนทานัมไนเตรด ( $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ปริมาณแลนทานัมร้อยละ 5 แมกนีเซียมไนเตรด ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ปริมาณแมกนีเซียมร้อยละ 5

- เมื่อได้สารละลายอิมแพกแนนต์ที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จึงใส่อะลูมินา

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นตัวรองรับ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาอบให้ละเอียด จากนั้นนำไปเคลือบในเตาเผาที่

ให้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

- นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาอบและคัดขนาดให้มีขนาดเท่ากับ 15 ไมโครเมตร

จากนั้นจึงนำไปรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3.2.4 ขั้นตอนการเตรียมระบบก่อนดำเนินการทดลอง

หลังจากต่อเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ต่างๆเข้ากับเตาเผาให้ความร้อน ต่อท่อแก๊สขาเข้ากับเตาปฏิกรณ์ในการทดลองนี้ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา โดยวัดอัตราการไหลของแก๊สที่เข้าระบบด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล ส่วนการเดินระบบแก๊สพีเคชันให้ต่อท่อแก๊สออกซิเจนเข้าอีกทางหนึ่งกับสามทางร่วมเพื่อรับแก๊สออกซิเจนและแก๊สพา จากนั้นตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนด ตั้งเวลาเครื่องอุ่นแก๊สขาเข้าตามเวลาที่ดำเนินการทดลองและตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนด

## 3.3 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วยความร้อน เพื่อเปลี่ยนขยะพลาสติกที่ผ่านการใช้งานและการฝังกลบแล้วมาสลายตัวเป็นสารตั้งต้นสำหรับใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งจะทำให้การทดลองที่สภาวะที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

### 3.3.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของขยะพลาสติก

3.3.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า วิเคราะห์น้ำหนักของพลาสติกที่สูญเสียเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851°

3.3.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 series II)

3.3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าความร้อน (lower heating value: LHV) ด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter; Leco model C-350

### 3.3.2 ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของขยะพลาสติกที่สภาวะต่างๆ

ขั้นตอนการเดินระบบ เมื่อต่อเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ต่างๆเข้ากับเตาเผาให้ความร้อน ตั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามกำหนดที่ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 700 800 และ 900 °C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

3.3.2.1 ชั่งขยะพลาสติกที่เตรียมไว้ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร ชุกละ 1 กรัม ตามจำนวน ที่ทำการทดลอง

3.3.2.2 นำเครื่องปฏิกรณ์ที่ภายในบรรจุอะลูมินาบอลขนาด 1 มม. ต่อเข้ากับเตาเผาให้ความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆ เปิดแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ให้มีระยะเวลาพักในเครื่องปฏิกรณ์คงที่คือ 0.8 วินาที พร้อมทั้งเปิดสวิตซ์เตาเผาให้ความร้อน

3.3.2.3 เมื่ออุณหภูมิถึงตามที่กำหนดจากนั้นป้อนขยะพลาสติกที่เตรียมไว้ เข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ครั้งละ 1 กรัม ทุกๆนาที่อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที

3.3.2.4 บันทึกค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเครื่องวิเคราะห์แก๊สขณะดำเนินการทดลองทุกนาที

3.3.2.5 วัดอัตราการไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแก๊สผลิตภัณฑ์

3.3.2.6 เมื่อป้อนวัตถุดิบจนครบตามที่กำหนดแล้ว ปิดสวิตซ์เตาเผาให้ความร้อน และทิ้งเครื่องปฏิกรณ์ให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง ก่อนจะเก็บกากของแข็งที่เหลือจากปฏิกิริยามาชั่งน้ำหนักและเก็บผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มาชั่งน้ำหนัก

3.3.2.7 วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) หลังผ่านปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็งแบบประมาณ

### 3.3.3 ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของขยะพลาสติกที่สถานะต่างๆ

3.3.3.1 เมื่อต่อเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ต่างๆเข้ากับเตาเผาให้ความร้อน ป้อนแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 700 800 และ 900 °C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับกระบวนการไพโรไลซิส โดยเมื่อนำเครื่องปฏิกรณ์ที่ภายในบรรจุอะลูมินาบอลขนาด 1 มม. ต่อเข้ากับเตาเผาให้ความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆ เปิดแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา และป้อนแก๊สออกซิเจนในอัตราส่วนของออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงหรืออัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และ 0.6 เข้าเครื่องปฏิกรณ์ให้มีระยะเวลาพักในเครื่องปฏิกรณ์คงที่คือ 0.8 วินาที พร้อมทั้งเปิดสวิตซ์เตาเผาให้ความร้อน และวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) หลังผ่านปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็งแบบประมาณเช่นเดียวกับกระบวนการไพโรไลซิส

3.3.3.2 เมื่อได้สถานะที่เหมาะสมแล้ว โดยเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สและคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลากัก โดยลดอัตราการไหลของแก๊สพาลง เพื่อเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เป็น 1.3 วินาที

3.3.3.3 ทำการทดลองโดยใช้ถุงพลาสติกใหม่ป้อนเข้าระบบแทนขยะพลาสติกที่สถานะที่เหมาะสมเพื่อเปรียบเทียบลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้

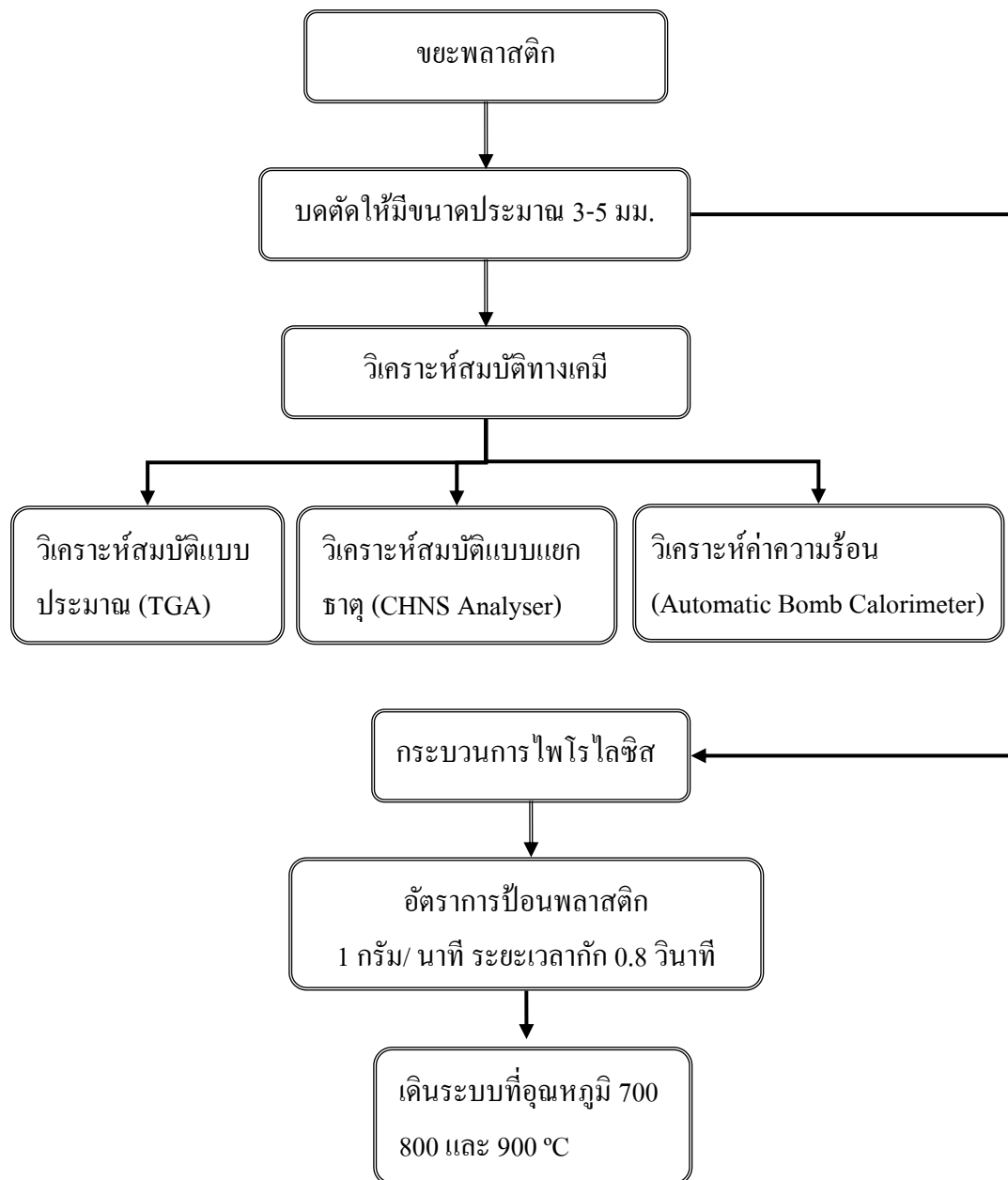
### 3.3.4 ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของขยะพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาพัก จึงทำการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาพักของแก๊สที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 700-900 °C ในอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1: 0.5 เมื่อได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีอิมเพกเนตแล้วจึงนำมาผสมกับขยะพลาสติก ก่อนที่จะนำไปป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์และดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการกระบวนการแกซีฟิเคชัน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

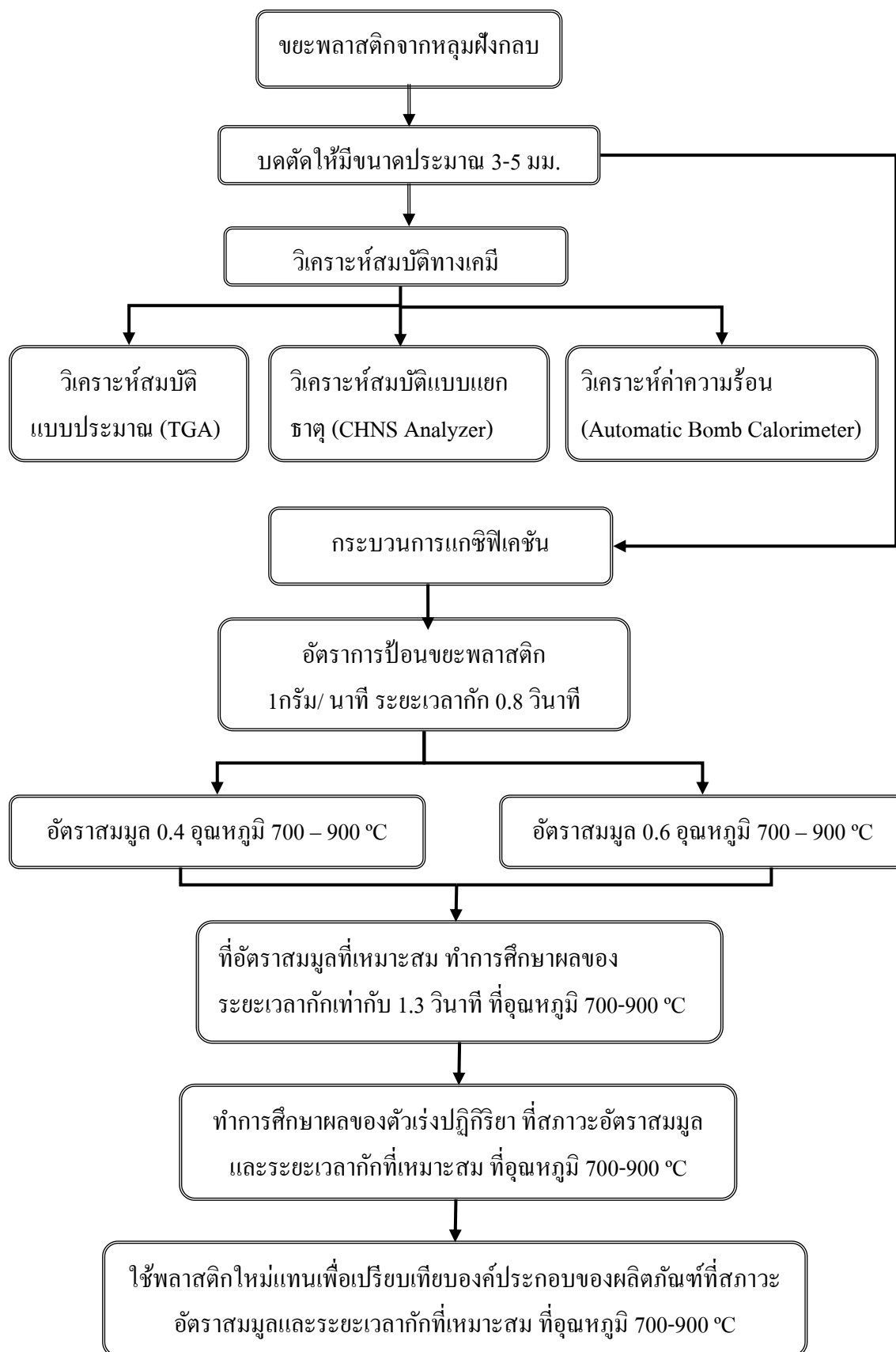
### 3.3.5 วิเคราะห์ปริมาณและลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองมีทั้งถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์เหลว และแก๊สผลิตภัณฑ์ สำหรับของแข็งที่เหลือจากปฏิกิริยานำมาชั่งน้ำหนัก แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดเป็นร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน ส่วนผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลองมีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ต่อได้ ประกอบกับผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทดลองเป็นแก๊ส จึงไม่ได้สนใจนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้สนใจผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันของขยะพลาสติก ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดปริมาณผลิตภัณฑ์สูงสุด ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้พบว่ามีทั้งกากของแข็งจากปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์เหลว และแก๊สผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยมุ่งเน้นที่ผลิตภัณฑ์เหลวและแก๊สผลิตภัณฑ์ ถ่านชาร์จากการทดลองจึงวิเคราะห์โดยการหาความต่างของน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์พร้อมทั้งเบดก่อนและหลังการทดลอง ส่วนปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ทำการวัดด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล โดยบันทึกปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลต่อเวลา ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการเดินระบบวิเคราะห์โดยการหาความต่างของน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์กับผลิตภัณฑ์เหลวที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบสัดส่วนของผลิตภัณฑ์เหลวกับถ่านชาร์และแก๊สผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.8 แผนภาพขั้นตอนการเดินระบบในกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 4.8 แผนภาพขั้นตอนการเดินระบบในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติกที่ผ่านการฟีกกลบจากหลุมฝังกลบแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณของเสียประเภทพลาสติกโดยการคัดแยกและรวบรวมเพื่อนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่ กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับการพัฒนาขึ้นมามีข้อดีในการกำจัดมลภาวะที่เกิดจากการเผาโดยทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ป้อนวัตถุดิบจากด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ วัตถุดิบจะเคลื่อนลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งจะถูกสลายตัวและเผาไหม้หมดไปกลายเป็นเถ้าในช่วงล่างสุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน โดยการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติก ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราสมมูล (Equivalence ratio) และระยะเวลาที่เกิดผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการเพิ่มแก๊สสังเคราะห์และลดแก๊สไฮโดรคาร์บอน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา โดยมีแลนทานัมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวสนับสนุน ( $10\text{Ni}5\text{La}_2\text{O}_3.5\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1: 0.5

#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะพลาสติก

ขยะพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและการสลายตัวของพลาสติกก่อนนำมาทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของขยะพลาสติก โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ การวิเคราะห์แบบประมาณทำให้ทราบค่าความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นคาร์บอนที่พบในวัสดุซึ่งหลังจากสารระเหยถูกขับออกไปแล้ว นอกจากนี้ยังทำให้ทราบร้อยละการเกิดเถ้าของวัสดุนั้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ เช่น พอลิเมอร์ ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของขยะพลาสติกเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยจะรายงานเป็นปริมาณร้อยละของธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (C, H, N, S)

#### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีซึ่งแสดงการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีปริมาณสารระเหยสูงถึงร้อยละ 98.00 โดยน้ำหนัก ปริมาณความชื้นต่ำมากเพียงร้อยละ 0.01 เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ติดอยู่กับถุงขยะพลาสติก ซึ่งผ่านการฝังกลบเป็นเวลานานหลายปีเกิดการสลายตัวทางธรรมชาติเหลือเพียงส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ จึงทำให้ขยะที่นำมาใช้มีความชื้นต่ำ (Chiemchaisri และคณะ, 2009) และยังพบว่ามีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวที่ต่ำมากคือร้อยละ 1.4 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่ามีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงถึงร้อยละ 66.70 และร้อยละ 12.50 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเหล่านี้สามารถสลายตัวกลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบแยกธาตุทำให้ทราบปริมาณของ C, H, N, S จะเห็นว่าขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 66.70 ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาแปรสภาพทางเคมีเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ จึงลดการเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไม่พบไนโตรเจนดังนั้นจึงลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่เป็นมลพิษทางอากาศได้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกของงานวิจัยต่างๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	งานวิจัย				
	ขยะพลาสติกในงานวิจัยนี้	พลาสติกที่ไม่ผ่านการฝังกลบ	Chiemchaisri และคณะ (2009)	He และคณะ (2009)	Wu และคณะ (2010)
การวิเคราะห์แบบประมาณ					
ความชื้น	0.01	-	3.46	0.02	-
สารระเหย	98.00	98.40	72.99	99.85	96.30
คาร์บอนคงตัว	0.50	0.70	-	0.00	1.10
เถ้า	1.40	2.00	27.01	0.15	2.60
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ					
คาร์บอน	66.70	77.50	-	85.81	77.10
ไฮโดรเจน	12.50	14.20	-	13.86	11.50
ออกซิเจน <sup>a</sup>	20.20	7.87	-	0.00	11.20
ไนโตรเจน	0.00	0.00	-	0.12	0.20
ซัลเฟอร์	0.60	0.43	0.21	0.06	-
ค่าความร้อน (MJ/kg)	49.60	75.50	40.99	38.04	-

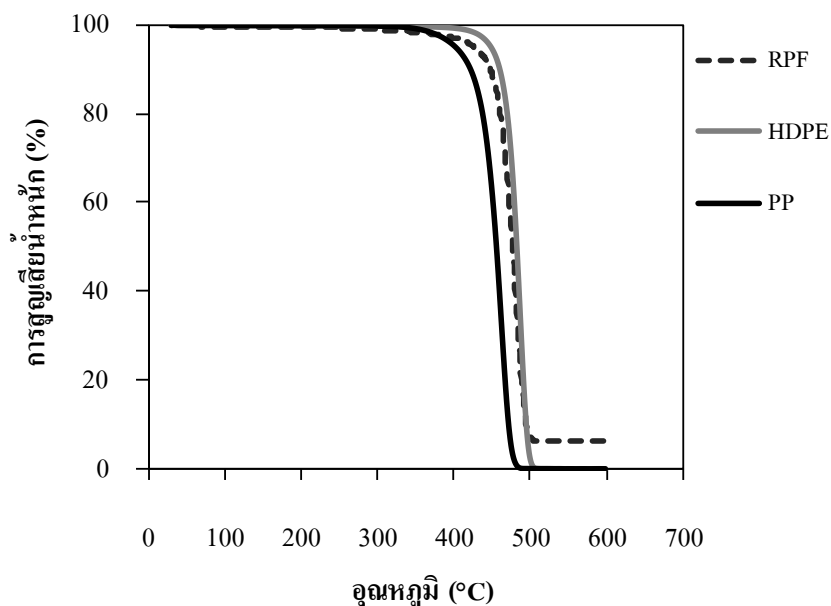


จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขยะพลาสติกและพลาสติกใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยพบว่าปริมาณสารระเหยสูง มีปริมาณความชื้น เถ้าและคาร์บอนคงตัวที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวัตถุดิบในงานวิจัยอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะสามารถแปรสภาพเปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มาก เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าความร้อนสูงถึง 49.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของวัตถุดิบ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆแล้วพบว่าขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนที่สูงมาก จากงานวิจัยของ Lee และคณะ (2006) พบว่าค่าความชื้นที่ต่ำของขยะพลาสติกทำให้อุณหภูมิระหว่างดำเนินการทดลองคงที่มากกว่าเศษไม้ (woodchip) เนื่องจากปริมาณน้ำต่ำและมีค่าความร้อนที่สูงกว่า

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขยะพลาสติกที่ผ่านการฟังกลบเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chiemchaisri และคณะ (2009) ที่ทำการทดลองโดยศึกษาองค์ประกอบทางฟิสิกส์และลักษณะสมบัติทางเคมีของขยะจากหลุมฝังกลบในจังหวัดนนทบุรีพบว่า ประกอบด้วยพลาสติกมากถึงร้อยละ 24.60–44.80 ส่วนใหญ่เป็นขยะพอลิเอทิลีนในรูปถุงพลาสติก เมื่อผ่านการคัดแยกด้วยมือและเครื่องสกรีนหลังจากการแยกมีขยะพลาสติกเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 82.90–89.70 ซึ่งส่วนที่เหลือมาจากการปนเปื้อนของดินบนผิวหน้าของพลาสติก มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4.1 จากตารางจะเห็นว่าปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการผสมวัตถุดิบกับรากของมันสำปะหลังเพื่ออัดเป็นก้อนกลม สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ผ่านขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นก้อน แต่ทำการลดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์เท่านั้น ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายและขั้นตอนในส่วนที่ต้องทำการขึ้นรูปได้

#### 4.1.2 การวิเคราะห์การสลายทางความร้อนของพลาสติก

การสลายตัวทางความร้อนของพลาสติกชนิดต่างๆและขยะพลาสติกแสดงดังรูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณเพื่อศึกษาสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของขยะพลาสติก (RPF) ที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ได้แก่ HDPE, PP โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) โดยวัดปริมาณจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน การทดลองเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 600 °C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 °C ต่อนาที เพื่อศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนต่อพฤติกรรมการสลายตัวของเชื้อเพลิง จากรูปที่ 4.1 พบว่าการสลายตัวของขยะพลาสติกมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส มีการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนอย่างรวดเร็วขององค์ประกอบในพลาสติก การสลายตัวทางความร้อนของขยะพลาสติกเริ่มที่อุณหภูมิ 400 °C พบว่าการสูญเสียน้ำหนักอย่างช้าๆ จากอุณหภูมิ 350 °C จนถึง 600 °C ซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 450 °C



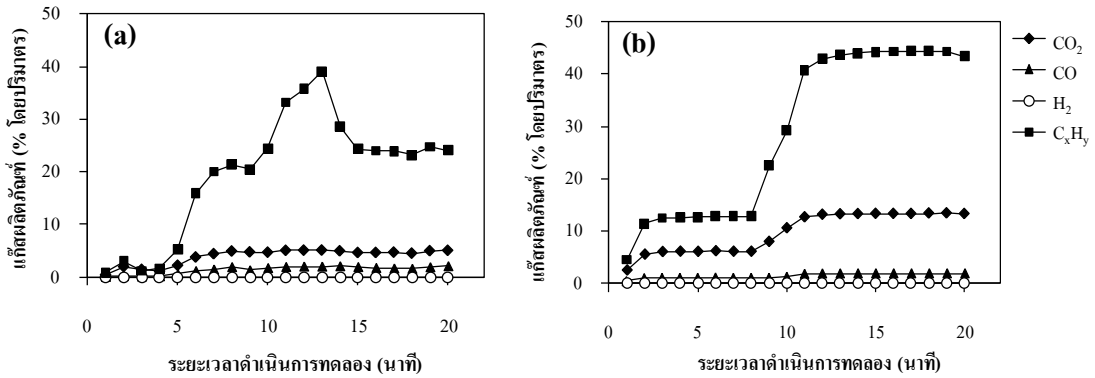
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนของพลาสติกชนิดต่างๆและขยะพลาสติก

ซึ่งพฤติกรรมการสลายตัวของพลาสติกที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกแต่ละชนิด โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและขยะพลาสติกสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิพรอพิลีน เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเป็นโซ่ตรงและสั้นทำให้เกาะตัวกันได้ดี เมื่อเปรียบเทียบการสลายตัวของขยะพลาสติก (RPF) กับพลาสติกชนิดอื่นจะเห็นว่าพฤติกรรมการสลายตัวใกล้เคียงกับ HDPE แต่สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างขยะพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยผ่านการฝังกลบมาเป็นเวลานานก่อนจึงสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพลาสติกประเภท HDPE นอกจากนี้ที่บริเวณช่วงท้ายของกราฟจะเห็นว่ามีส่วนที่เหลืออยู่ที่ไม่มีการสลายตัว เนื่องจากมีวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ติดอยู่กับพื้นผิวของขยะพลาสติกที่ผ่านการฝังกลบมาเป็นเวลานาน

#### 4.2 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราสมมูล (ER) เท่ากับศูนย์ในกระบวนการไพโรไลซิสและอัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และ 0.6 ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ซึ่งทั้งสองกระบวนการทำทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 700–900 °C ที่ระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์หรือระยะเวลาพักของแก๊ส (residence time) เท่ากับ 0.8 วินาที โดยมีอัตราการไหลของแก๊สรวมเท่ากับ 13 ลิตรต่อนาที ทำการทดลองในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed) ที่มีการไหลของแก๊สแบบไหลขึ้น (up draft) เพื่อทำการศึกษาสภาวะเหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกันที่ระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาที ซึ่งมีอัตราการไหลรวมของแก๊สเท่ากับ 7 ลิตรต่อนาที ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ

จะนำไปทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆขณะดำเนินการทดลอง ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือแก๊สไฮโดรคาร์บอน เมื่อระยะเวลาในการดำเนินการทดลองเพิ่มขึ้นแก๊สผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดนาทีที่ 13 และค่อนข้างคงที่หลังจากนั้นเนื่องจากแก๊สที่เกิดขึ้นถึงจุดสมดุลภายในระบบ

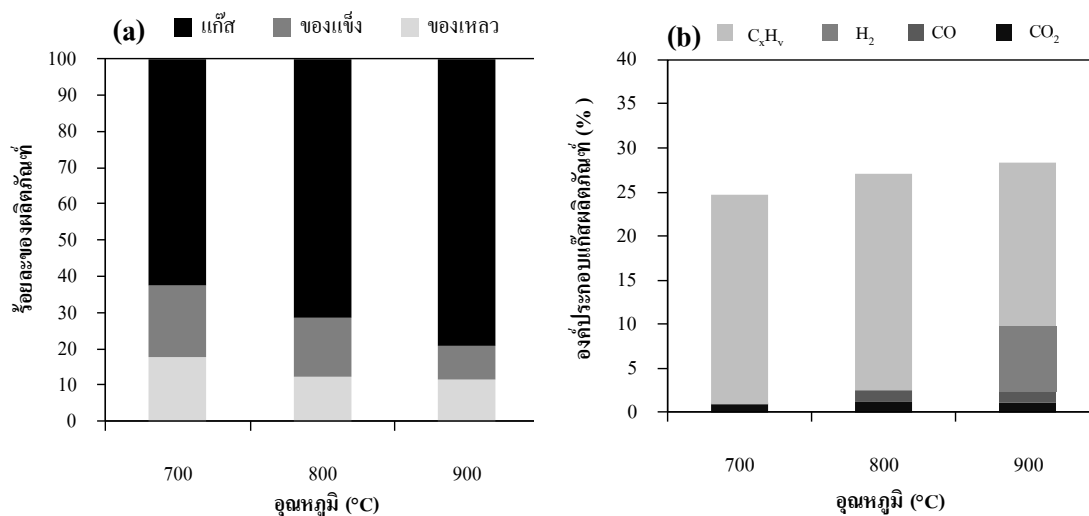


รูปที่ 4.2 ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อดำเนินการทดลองเป็นเวลา 20 นาทีที่สภาวะต่างกัน (a) ที่อุณหภูมิ 800°C, ER 0.4 ระยะเวลาพัก 0.8 วินาที (b) ที่อุณหภูมิ 700°C, ER 0.4 ระยะเวลาพัก 1.3 วินาที

#### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส

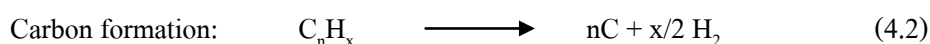
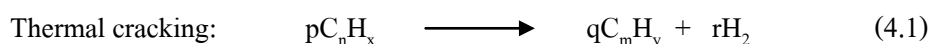
ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0 (ER: 0) ต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700–900 °C ที่ระยะเวลาพักของแก๊ส 0.8 วินาที พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 °C ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 62.65 เป็นร้อยละ 79.29 ปริมาณของเหลวลดลงเล็กน้อยและของแข็ง (ชาร์) มีปริมาณลดลงจากร้อยละ 19.49 เป็นร้อยละ 9.10 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 900°C แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากขยะพลาสติกถูกแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กที่อุณหภูมิสูงกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวได้จากการระเหยของพลาสติกและควบแน่นกลับมาซึ่งมีปริมาณเพียงร้อยละ 11.61–17.86 และของแข็งที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยามีปริมาณร้อยละ 9–19 ใกล้เคียงกับปริมาณของเหลว จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สทั้งนี้เนื่องจากขยะพลาสติกที่ใช้มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำสามารถสลายตัวได้เกือบหมดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C ดังนั้นจึงเกิดแก๊สได้ในสัดส่วนที่มากกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Gas Analyzer) ซึ่งทำให้ทราบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และไฮโดรคาร์บอน (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) ซึ่งรายงานผลในรูปมีเทน (CH<sub>4</sub>) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือชาร์ ซึ่ง

ได้จากกระบวนการจะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวไม่ได้มีการนำมาวิเคราะห์ เนื่องจากมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ต่อไปได้



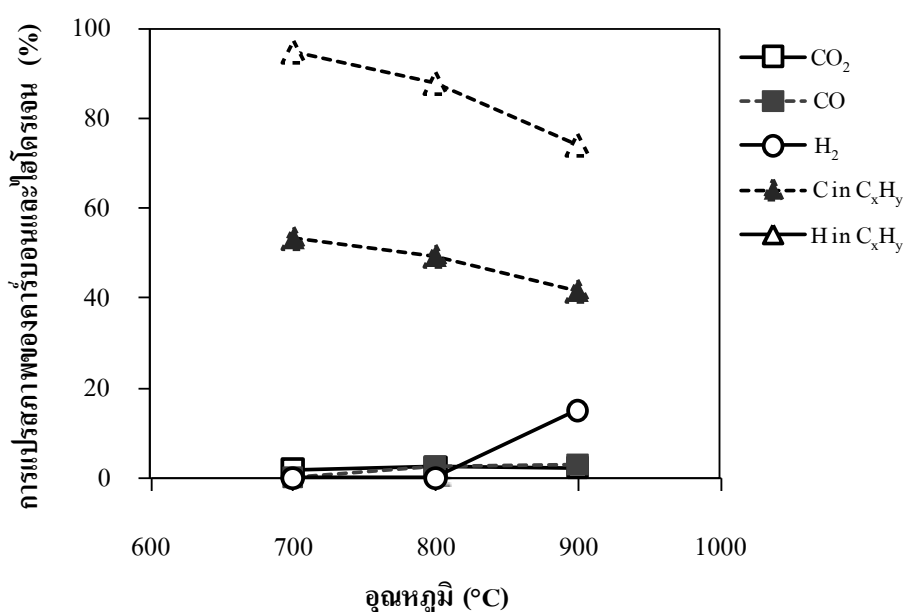
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก (ER: 0)

จากรูปที่ 4.3 (a) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งปริมาณลดลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.2 (b) พบว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์หลักมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 18.54–24.60 โดยมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 700 °C แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นปริมาณสูงเนื่องจากการกลไกการสลายตัวซึ่งโดยทั่วไปเป็นกลไกการตัดของสายโซ่พอลิเมอร์แบบสุ่ม (Kantarelis และคณะ, 2009) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลง และมีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเล็กน้อยเพียงร้อยละ 0.83–1.23 และ 0.11–1.31 ตามลำดับ เนื่องจากมีเพียงออกซิเจนจากวัตถุุดิบและที่ค้างในระบบเท่านั้นซึ่งไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 7.50 เนื่องจากพลาสติกสามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C ไม่พบไฮโดรเจนอยู่เลย แสดงให้เห็นว่าวัตถุุดิบสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนได้ที่อุณหภูมิสูง (Wu และคณะ, 2010) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาความร้อน



จากรูปที่ 4.4 แสดงร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนในพลาสติกซึ่งเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สชนิดต่างๆพบว่าการแปรสภาพของพลาสติกเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูง ซึ่ง

การแปรสภาพของคาร์บอนจากวัตถุดิบเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีค่าร้อยละ 46.89–59.43 และการแปรสภาพของไฮโดรเจนจากวัตถุดิบเป็นไฮโดรคาร์บอนมีค่าสูงถึงร้อยละ 89.16–98.80 โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 700 °C จะเห็นว่าการแปรสภาพของไฮโดรเจนเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด เนื่องจากในพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสูง อีกทั้งโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งสามารถสลายตัวและก่อตัวได้อย่างรวดเร็ว จากผลการทดลองจะเห็นว่าการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนแก๊สมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลง และมีองค์ประกอบของแก๊สชนิดอื่นๆเพิ่มสูงขึ้น

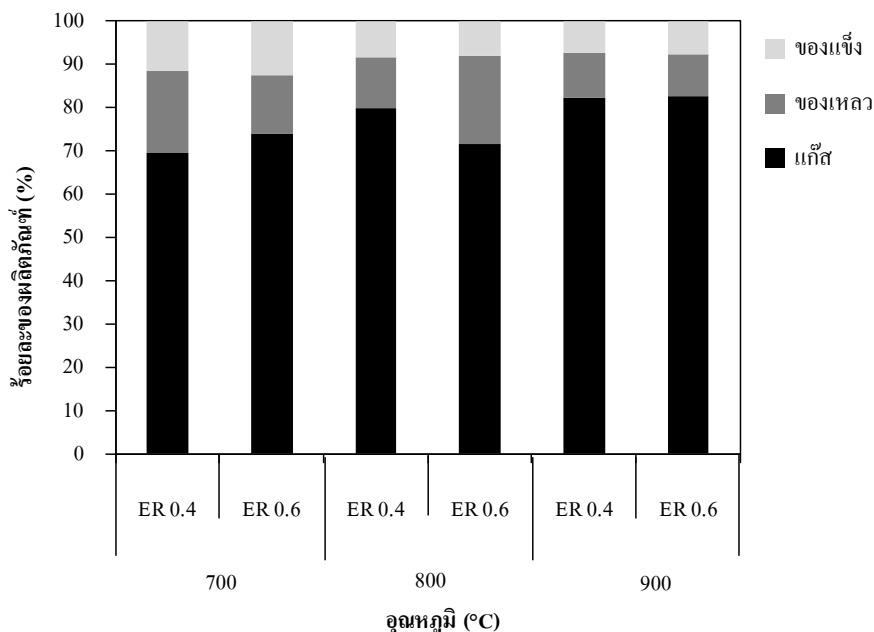


รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนจากการไพโรไลซิส

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิจึงอัตราสมมูล (ER) ต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิจึงอัตราสมมูลต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแกซิฟิเคชันขยะพลาสติก ทำการทดลองกระบวนการแกซิฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700–900 °C และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นออกซิไดซิงแก๊ส ทำการทดลองเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (อัตราสมมูล:ER) เปรียบเทียบกันที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และ 0.6 อัตราการไหลของแก๊สรวม 13 ลิตรต่อนาทีและมีระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time) เท่ากับ 0.8 วินาที พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวมีสัดส่วนที่น้อยกว่าเช่นเดียวกับกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันไม่ชัดเจน ที่อัตราสมมูล 0.4 ปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าร้อยละ 69.64–79.85 และที่อัตราสมมูล 0.6 ปริมาณของ

แก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 71.71–82.69 ของเหลวและของแข็ง (ชาร์) มีปริมาณลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.5

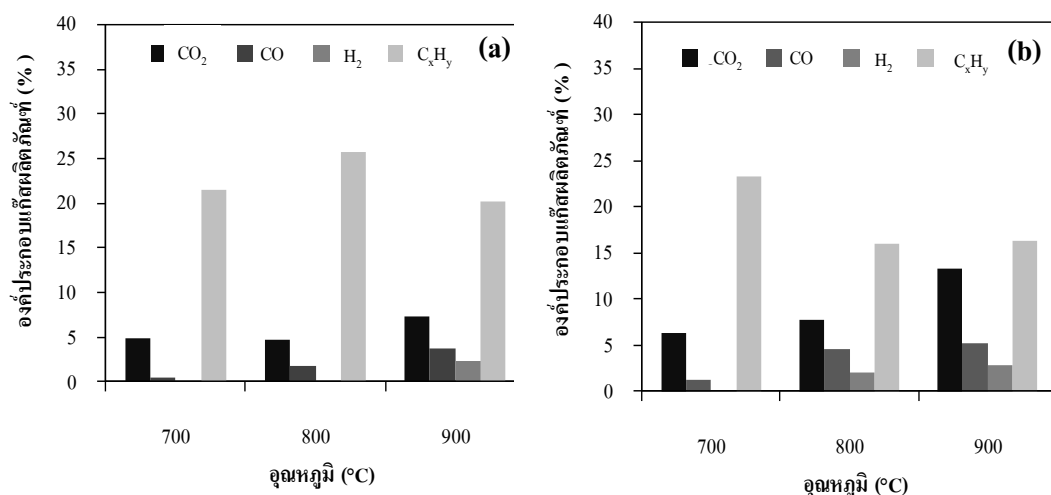


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแก๊สไพเคชันที่อัตราสมมูลต่างๆ

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราสมมูลเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณโดยรวมของผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิด ในขณะที่อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลไม่ชัดเจนกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแก๊สไพเคชัน สำหรับถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกต่อไปเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราสมมูลทั้งสองได้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก เช่นเดียวกับการไพโรไลซิส โดยที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 แก๊สไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณร้อยละ 20.23–25.68 และมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 °C ส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์อื่นๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งพบคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 4.65–7.38 คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิ 900 °C มีปริมาณร้อยละ 3.69 และ 2.25 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าวัตถุดิบที่ผ่านความร้อนสามารถเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการที่ 4.1 ในขณะที่อัตราสมมูล 0.6 พบว่ามีปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นไม่มากซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.25 เป็นร้อยละ 2.88 แต่พบคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6.4–13.33 และร้อยละ 1.25–5.20 ตามลำดับ เนื่องจากมีออกซิเจนเป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานดังสมการที่ 4.4 และจะเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาที่ 4.5 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไปในอนุภาคของแข็งเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ดังสมการที่ 4.5



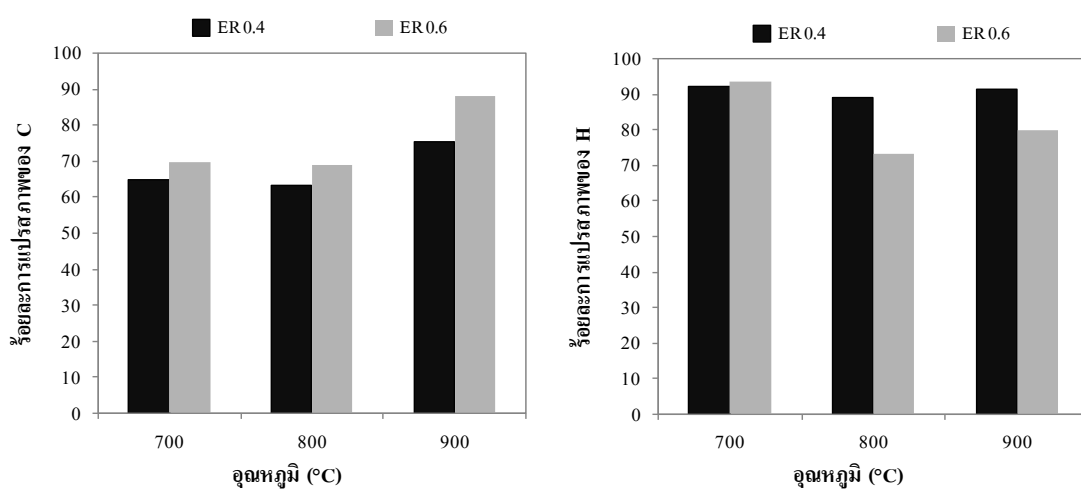
จากการทดลองจะเห็นว่าอัตราสมมูลมีผลต่อปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยเมื่อเพิ่มอัตราสมมูลจาก 0 เป็น 0.4 และ 0.6 ทำให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากมีออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาซึ่งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากงานวิจัยของ Lee และคณะ (2006) ซึ่งพบว่าแกซิฟิเคชันโดยใช้แก๊สออกซิเจนทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการแกซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำ นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kantarelis และคณะ (2009) ที่พบว่าแกซิฟิเคชันเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการนำขยะพลาสติกมาใช้สำหรับการผลิตพลังงานมากกว่าการไพโรไลซิสเนื่องจากเกิดคาร์ต่ำกว่าและได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์มี



รูปที่ 4.6 ผลของอัตราสมมูลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน (a) ER: 0.4 (b) ER: 0.6

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับกับงานวิจัยของ Wu และคณะ (2010) ที่ได้ทำการศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกขยะพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 และ 850 °C โดยใช้ไอน้ำเป็นแหล่งกำเนิดออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850 °C สูงกว่าที่อุณหภูมิ 800 °C ในการไพโรไลซิส-แกซิฟิเคชันพลาสติกทุกชนิดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาแก๊สไฮโดรคาร์บอน จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีชัดเจนที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการแกซิฟิเคชันแต่อาจขึ้นอยู่กับอัตราสมมูล เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของแก๊สไฮโดรคาร์บอนกันที่

อัตราสมมูล 0.4 และ 0.6 พบว่าที่อัตราสมมูลน้อยกว่าจะมีแก๊สไฮโดรเจนสูงกว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 20.23–25.68 ในขณะที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.6 มีค่าร้อยละ 16.69–23.37 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dalai และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษาการแก๊ซิฟิเคชัน RDF ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่พบว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ชัดว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแต่อาจขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไอน้ำต่อของเสียหรืออัตราการผลิตของแก๊สพา เมื่อคำนวณหาการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน พบว่าที่อุณหภูมิ 700 °C การแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นว่าที่อัตราสมมูลเป็น 0.4 การแปรสภาพเป็นคาร์บอนของวัตถุดิบสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



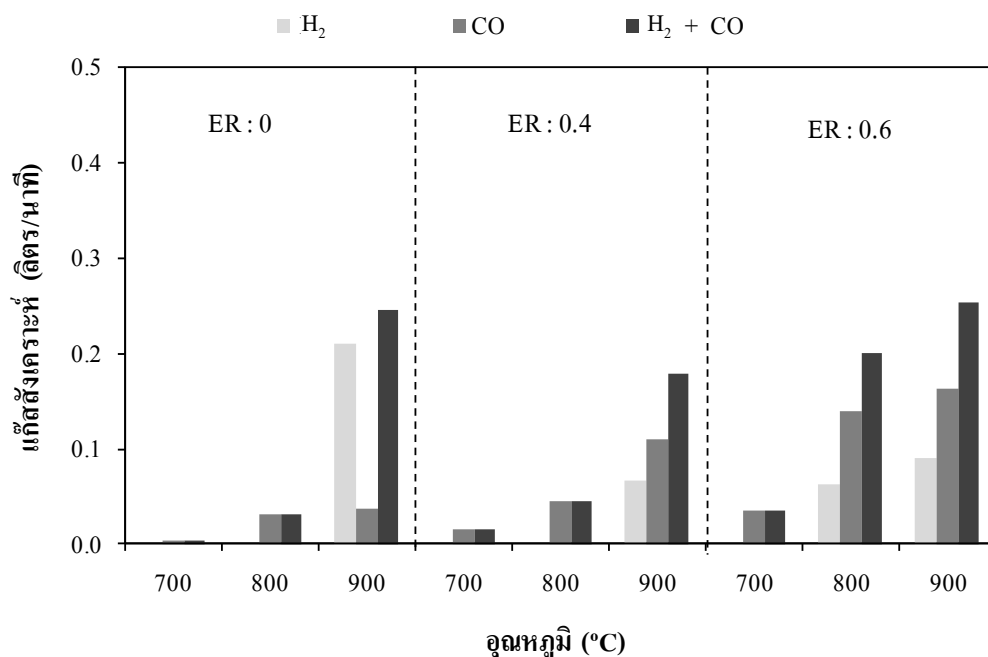
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราสมมูลต่อการแปรสภาพของคาร์บอนไฮโดรเจน (a) ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอน (b) ร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจน

ในขณะที่การแปรสภาพเป็นไฮโดรเจนลดลงที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.6 เนื่องจากโมเลกุลของวัตถุดิบสามารถแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากขึ้น และแปรสภาพเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้ลดลง ดังนั้นร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจนจึงลดลงแต่ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการแปรสภาพคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อัตราสมมูลต่างๆ จะเห็นว่าอุณหภูมิมิผลไม่มากในการแปรสภาพของพลาสติกทำให้มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากโดยที่อัตราสมมูล 0.4 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 700–900 °C ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 65.00–75.40 และร้อยละการแปรสภาพไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 91.50–92.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการแก๊ซิฟิเคชันคือที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 เนื่องจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.6



#### 4.2.3 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการแกซิฟิเคชันต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ได้มีหลายชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอน โดยเรียกแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ว่า แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสมหรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ ดังนั้นแก๊สสังเคราะห์จึงเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความสนใจเมื่อพิจารณาแก๊สสังเคราะห์จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 – 900 °C ที่อัตราสมมูลต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 900 °C มีปริมาณของแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิต่ำๆ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.003 – 0.225 ลิตรต่อนาที เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงแก๊สผลิตภัณฑ์สามารถแตกตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ He และคณะ (2009) ที่ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณและองค์ประกอบแก๊สสังเคราะห์จากการแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกโพลีเอทิลีน พบว่าปริมาณแก๊ส



รูปที่ 4.8 ผลของแก๊สสังเคราะห์ต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 °C ไม่พบแก๊สไฮโดรเจนอยู่เลย นอกจากที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.6 พบปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่การไพโรไลซิสเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำมากเนื่องจากไม่มีออกซิเจนช่วยทำปฏิกิริยาแต่ เกิดแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราสมมูลทั้งสองจะเห็นว่าเมื่ออัตราสมมูลเพิ่มขึ้น หรือปริมาณออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Dalai และคณะ

(2008) ที่ทำการศึกษากการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากการแกซีฟิเคชัน RDF ซึ่งพบว่าอัตราส่วนของไอน้ำต่อของเสีย (steam/waste ratio) มีผลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้

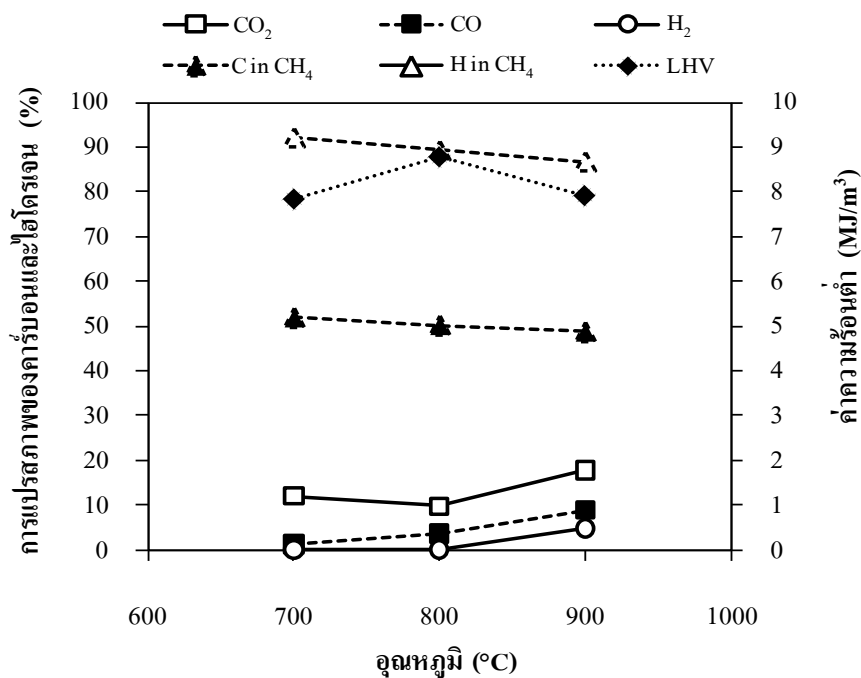
#### 4.2.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

ค่าความร้อนต่ำ (LHV) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้สำหรับวัดความร้อนโดยตรงและพลังงานที่จะนำไปใช้ประโยชน์ของแก๊สผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนเป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยน้ำหนักเมื่อวัสดุถูกนำไปเผาเราสามารถวิเคราะห์ได้โดยนำไปเผาในเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมการที่ 4.6 ทำให้ทราบค่าความร้อนต่ำแบบไม่รวมแก๊สพาและค่าความร้อนต่ำรวมแก๊สพาดังสมการที่ 4.7

$$\text{Lower heating value (LHV, MJ/m}^3\text{)} = \frac{(12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4)}{(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4)} \quad (4.6)$$

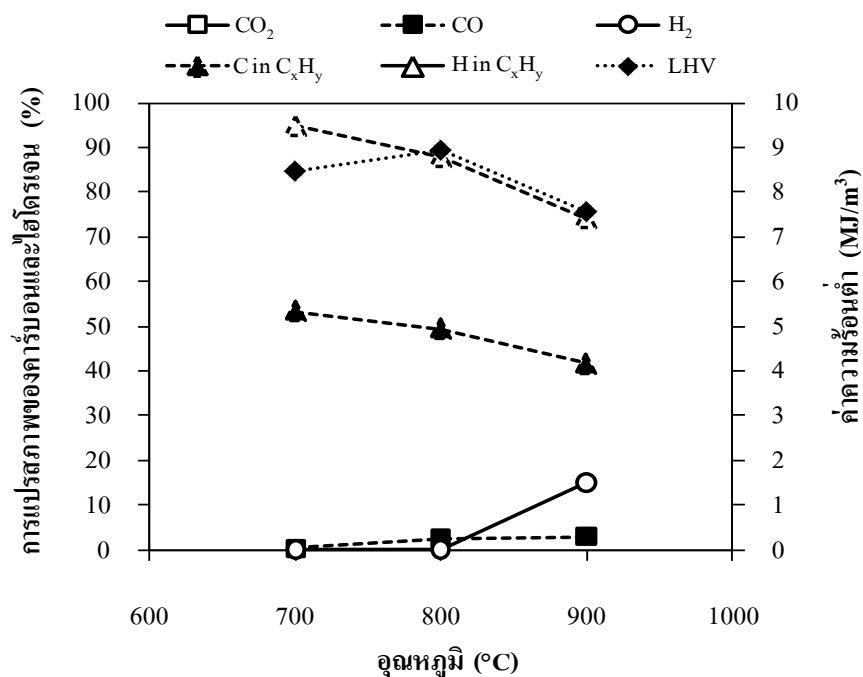
$$\text{Lower heating value (LHV, MJ/m}^3\text{)} = \frac{(12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4)}{(\text{total gas})} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  คือปริมาตรของ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  (แก๊สไฮโดรคาร์บอน) ที่ได้ต่อนาที่ จากการทดลองพบว่าค่าความร้อนต่ำโดยรวมแก๊สพาของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันที่อัตราสมมูลต่างๆอยู่ในช่วง 6.52 – 9.39 MJ/m<sup>3</sup> ในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 ถึง 900 °C ค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่ 800 °C มีค่าความร้อนสูงที่สุดถึง 8.95 MJ/m<sup>3</sup> เนื่องจากมีปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูง จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าความร้อนต่ำเพิ่มสูงขึ้นตามร้อยละการแปรสภาพของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่ามีปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 800 °C เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้พลาสติกเกิดการสลายกลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้มาก ที่อุณหภูมิ 900 °C ค่าความร้อนที่ได้มีค่าต่ำลงเนื่องจากการแปรสภาพเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลง ขณะที่แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าความร้อนที่ได้จึงลดลงจาก 8.95 MJ/m<sup>3</sup> เป็น 7.58 MJ/m<sup>3</sup> ส่วนค่าความร้อนที่ไม่รวมแก๊สพามีค่าสูงกว่าค่าความร้อนที่รวมแก๊สพาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 18.00–33.34 MJ/m<sup>3</sup> เนื่องจากค่าความร้อนที่ได้ไม่ถูกเจือจางด้วยแก๊สไฮโดรเจนจึงทำให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูง

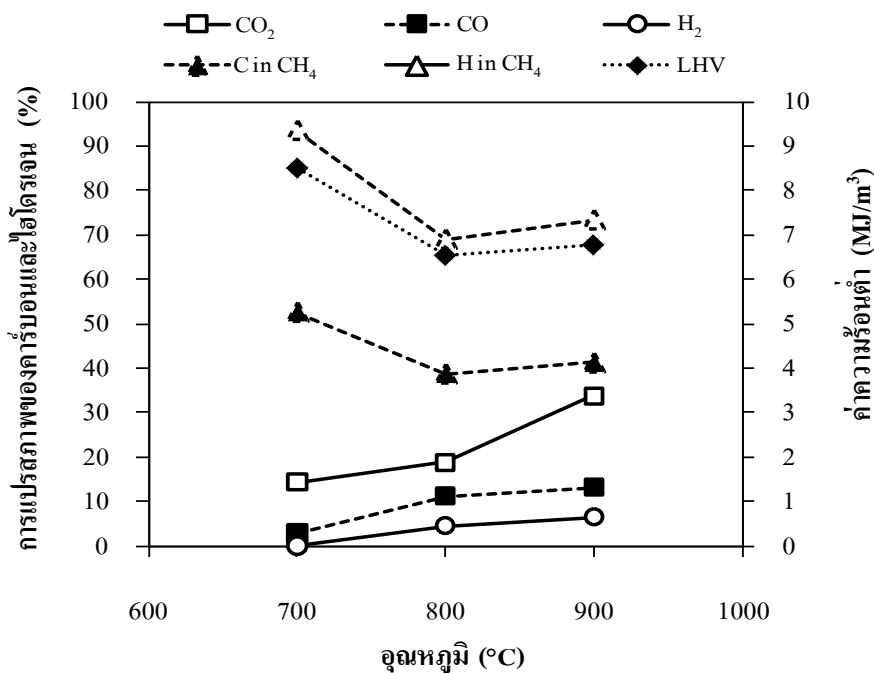


รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อนต่อที่ ER: 0

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์จากการแก๊สซิเคชันที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และ 0.6 ค่าความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 6.79–9.39 MJ/m<sup>3</sup> ค่าความร้อนสูงสุดที่ 9.39 MJ/m<sup>3</sup> เกิดที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าความร้อนต่อที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับแปรสภาพของพลาสติกเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน จากสมการที่ 4.6 จะเห็นว่าหากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากจะส่งผลทำให้ค่าความร้อนต่อที่คำนวณได้มีค่ามากตามไปด้วย เนื่องจากเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง จากผลการทดลองพบว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราสมมูลหรืออัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อวัตถุดิบเพิ่มสูง ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dalai และคณะ (2008) ที่พบว่าปริมาณของมีเทนลดลงเมื่ออัตราส่วนของไอน้ำต่อของเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความร้อนต่อของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มเดียวกับปริมาณของมีเทน จากรูปที่ 4.11 แสดงการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อนต่อที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.6 พบว่าการแปรสภาพเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนของวัตถุดิบลดลง และการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่าที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 เนื่องจากมีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า ดังนั้นค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ที่อุณหภูมิการแก๊สซิเคชันที่อุณหภูมิต่ำกว่าและอัตราสมมูลต่ำกว่าจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อนต่ำ  
ที่ ER: 0.4



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนและค่าความร้อนต่ำ  
ที่ ER 0.6

ในการแกซีฟิเคชันโดยใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยานั้นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าแก๊สที่เกิดจากการใช้อากาศ แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะให้ค่าความร้อนประมาณ 3.30–5.60 MJ/m<sup>3</sup> จัดว่าเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นค่าความร้อนต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับ

อุตสาหกรรมขนาดเล็กได้ (ปรารักษ์เนตร เฟื่องฟูง, 2550) ส่วนแก๊สที่มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 9.30–20.50 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งจัดเป็นค่าความร้อนปานกลาง จากการทดลองค่าความร้อนของแก๊สที่ได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 9.39 MJ/m<sup>3</sup> จึงจัดว่าเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความร้อนของพลาสติกชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสามัญ ซึ่งจะเห็นว่าขยะพลาสติกที่นำมาเป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าขยะพลาสติกเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมในการนำมาแปรสภาพทางความร้อน

ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของพลาสติกเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสามัญ (Williams, 1997)

รายการ	ค่าความร้อน ( Calorific value, MJ/kg)
โพลีเอทิลีน (PE)	43.30 – 46.50
โพลีพรอพิลีน (PP)	46.50
โพลีสไตรีน (PS)	41.90
กลีเซอริน	46.50
Gas oil	45.20
น้ำมันหนัก	42.50
ปิโตรเลียม	42.30
ขยะพลาสติกผสมจากบ้านเรือน	31.80
ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย	49.60

นอกจากค่าความร้อนที่สามารถบอกถึงคุณภาพของแก๊สที่ผลิตได้แล้ว ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (% cold gas efficiency) เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่บอกถึงคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เช่นกัน การคำนวณร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.8 ซึ่งต้องมีค่าเข้าใกล้ 100 จะสามารถบอกได้ว่าที่สภาวะนั้นสามารถแปรสภาพวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดีหรือไม่ ซึ่งจะบอกถึงปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพด้านพลังงาน

$$\eta_{LHV} = (\sum LHV_i \times V_i) / (LHV_{feed} \times M) \times 100 \quad (4.8)$$

เมื่อ  $LHV_i$  (MJ/m<sup>3</sup>) คือค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ  $V_i$  (m<sup>3</sup>) ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น  $LHV_{feed}$  (MJ/kg) คือ ค่าความร้อนของวัตถุดิบ และ  $M$  (kg) คือ มวลของวัตถุดิบ จากการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 59.74 – 83.57 ค่าสูงที่สุดเกิดที่อุณหภูมิ 700 °C ที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 เนื่องจากมีปริมาณของแก๊สขาออกสูง ประกอบกับที่อุณหภูมิต่ำกว่ามีปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่สูง ค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณจึงมีค่ามากซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ 4.8 อย่างไรก็ตามอาจเกิดความผิดพลาดบางประการร่วม

ด้วย ได้แก่ การวัดอัตราการไหลของแก๊สออกคลาดเคลื่อน อัตราการป้อนวัตถุดิบไม่คงที่ เป็นต้น จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่าความร้อนของพลาสติกชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสามัญที่ใช้ทั่วไป จะเห็นว่าค่าความร้อนของพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เหมาะสมในการนำมาแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิง ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลของระบบแกซิฟิเคชันต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

งานวิจัย	ระบบที่ดำเนินการทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	วัตถุดิบ	ค่าความร้อน (LHV)	ประสิทธิภาพของแก๊ส (% Cold gas efficiency)
งานวิจัยนี้	ไพโรไลซิส, แกซิฟิเคชัน	700–900	Waste PE from landfill	6.52–9.39 MJ/m <sup>3</sup>	60.28–91.16
Chiemchaisri และคณะ (2009)	แกซิฟิเคชัน	504–604	RDF (Waste PE from landfill)	1.76 MJ/m <sup>3</sup>	66.00
Dalai และคณะ (2008)	สตีมแกซิฟิเคชัน	675–775	RDF (Refuse derive fuel)	9.00–14.00 MJ/m <sup>3</sup>	-
Lee และคณะ (2006)	แกซิฟิเคชัน	800–850	RPF (Refuse plastic fuel)	11.98 MJ/Nm <sup>3</sup>	-
He และคณะ (2009)	กะตะไลติกแกซิฟิเคชัน	700–900	Waste PE	11.31–12.44 MJ/Nm <sup>3</sup>	39.90–60.67

จากงานวิจัยของ Chiemchaisri และคณะ (2009) ที่ได้ทำการทดลองนำขยะพลาสติกจากบ่อขยะมาทำเป็นก้อนกลมโดยผสมกับรอกมันสำปะหลัง ซึ่งทำการทดลองแกซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์แบบไหลลงที่อุณหภูมิเฉลี่ย 604 °C พบว่าแก๊สที่ได้มีค่าพลังงานเฉลี่ย 1.76 MJ/m<sup>3</sup> และมีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับร้อยละ 66.00 ซึ่งมีการประเมินขั้นต้นในการนำ RDF นี้มาใช้เป็นพลังงานและพบว่ามีการใช้จ่ายในการผลิตเป็น RDF เพียง 0.05 USD/kWh เมื่อเทียบกับแก๊สธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิงและดีเซลแล้วพบว่ามีความต่ำกว่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานจากขยะของแข็ง จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการนำขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบมาผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อผลิตพลังงาน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยต่างๆพบว่า ค่าความร้อนที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าค่อนข้างสูง แม้ว่าจะไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไอน้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยา ทั้งนี้อาจ

เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการแปรสภาพมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้แปรสภาพทางความร้อนโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน จากการผ่านการฝั่งกลบมาเป็นเวลานานจึงทำให้มีความชื้นที่ต่ำและสลายตัวได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกหรือขยะพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านการฝั่งกลบ

#### 4.2.5 ผลขององค์ประกอบของแข็ง (ชาร์) จากการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน

ในการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิต่างๆจะเกิดผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ ของแข็ง (ชาร์) ของเหลวและแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สจะถูกระบายแบบออนไลน์ผ่านเครื่องวิเคราะห์แก๊สตลอดการทดลองซึ่งทำให้ทราบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีลักษณะเป็นของเหลวใส ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเป็นน้ำจากการควบแน่นของคอนเดนเซอร์ ซึ่งมีปริมาณที่น้อยมากจนไม่สามารถเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ได้ อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ได้สนใจผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ต่อ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจากการไพโรไลซิสพบว่ามีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเยือก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของแข็งจากการแกซิฟิเคชันที่อัตราสมมูลทั้งสองมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดงเยือกครวมอยู่กับเศษผงสีเทาซึ่งอาจเป็นเศษดินที่ติดมากับขยะพลาสติกที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้นจึงได้นำของแข็งที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่เหลือด้วยเครื่อง TGA ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ถ่านชาร์ที่ผ่านการไพโรไลซิสมีปริมาณสารระเหยที่ค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 3.80–7.20 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารตั้งต้นที่ผ่านการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันได้แปรสภาพไปเป็นแก๊สเกือบทั้งหมด ถ่านชาร์ที่เหลือมีค่าคาร์บอนคงตัวเพียงร้อยละ 0.01–1.60 และพบว่าการไพโรไลซิสมีค่าคาร์บอนคงตัวที่เหลือในถ่านชาร์มากกว่าการแกซิฟิเคชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นเถ้าสูงมากกว่าร้อยละ 90 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนจากขยะพลาสติกที่นำมาผ่านการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันได้แปรสภาพไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้เกือบทั้งหมด ของแข็งที่เหลือเป็นเถ้าจากการทดลองซึ่งไม่สามารถนำมาผ่านการแปรสภาพได้อีก

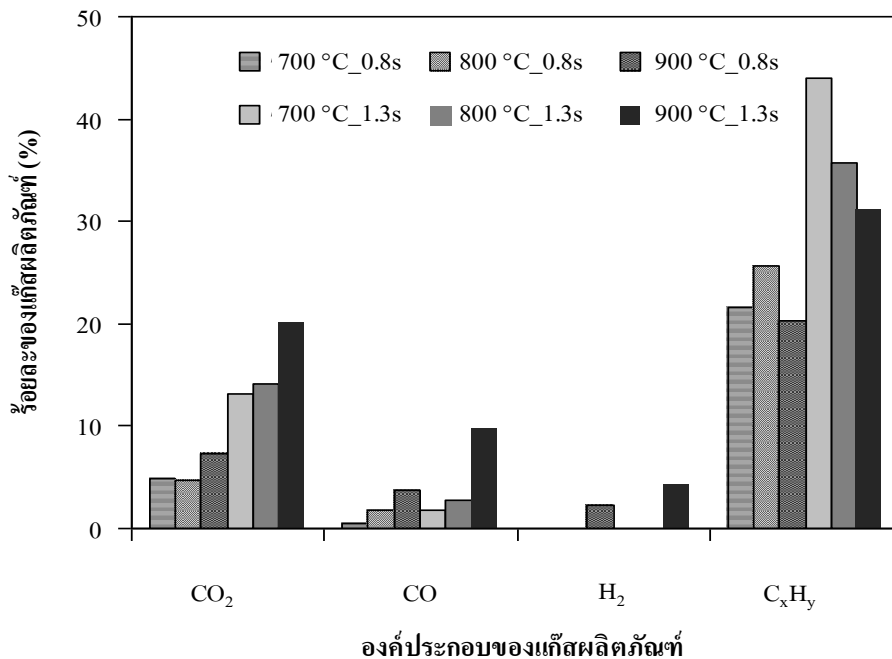
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของแข็ง

อุณหภูมิ (°C)	อัตรา สมมูล (ER)	การวิเคราะห์แบบประมาณ (% โดยน้ำหนัก)		
		สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
700	0	3.80	1.10	95.10
	0.4	4.06	0.05	95.89
	0.6	7.20	0.08	92.72
800	0	2.10	0.90	97.00
	0.4	4.70	0.06	96.24
	0.6	6.90	0.00	93.10
900	0	5.20	1.60	93.20
	0.4	3.60	0.06	96.34
	0.6	3.80	0.01	96.19

#### 4.3 ผลของระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time)

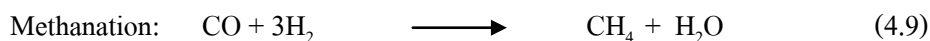
จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์หรือ ระยะเวลาพักของแก๊ส (residence time) พบว่าที่อัตราสมมูล 0.4 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดใน กระบวนการแก๊สเฟส ดังนั้นจึงทำการทดลองเปรียบเทียบผลของระยะเวลาพักเก็บของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ โดยเพิ่มระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จาก 0.8 วินาทีเป็น 1.3 วินาทีโดย การลดอัตราการไหลของแก๊สรวมจาก 13 ลิตรต่อนาทีเป็น 8.8 ลิตรต่อนาที เมื่อพิจารณาที่อัตรา สมมูล 0.4 แสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปพบว่าปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นทุกชนิดและยังได้ ไฮโดรคาร์บอนแก๊สเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 20.23–25.68 เป็นร้อยละ 31.23–44.00 ทั้งนี้เนื่องจากมีระยะเวลาในการแตกตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นก่อนที่จะออกจากระบบไปกับ แก๊สพา การลดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สพาจะทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้น เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เล็กน้อยจากร้อยละ 2.25 เป็นร้อยละ 4.20 ที่อุณหภูมิ 900 °C และคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.51 – 3.69 เป็นร้อยละ 1.82 – 9.68 ทั้งนี้ปริมาณแก๊สทั้งสองมีปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างไม่ชัดเจนนักอาจเนื่องจากปริมาณออกซิไดซ์ซึ่งแก๊สที่ร่วมทำปฏิกิริยาเท่าเดิม จึงไม่ได้ เกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมากนัก





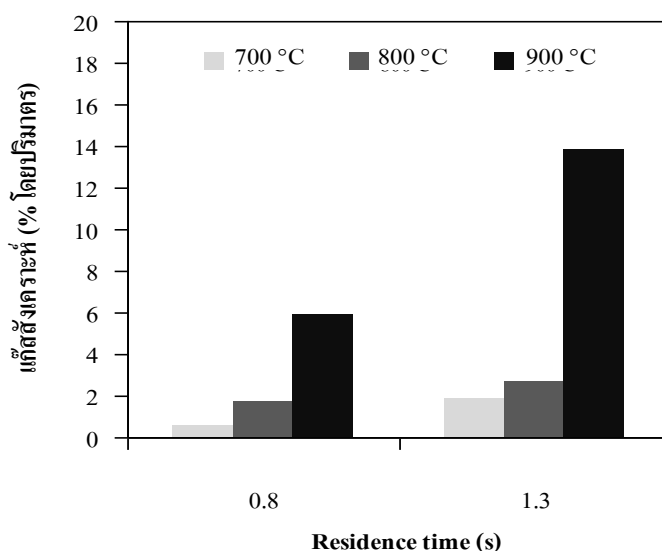
รูปที่ 4.12 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อร้อยละขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์เมื่ออัตราสมมูลเท่ากับ 0.4

เมื่อพิจารณาการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 1000 °C ) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ มีเทน ไฮโดรคาร์บอน และสารอินทรีย์ต่างๆ ในขณะที่แก๊สสังเคราะห์ผลิตได้จากการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 1200 °C) หรือการแกซิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงและปริมาณมีเทนต่ำ จากการทดลองปริมาณแก๊สมีเทนที่สูงอาจเกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องของ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ 4.9 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของมีเทนสูงคือแก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ (Synthetic Natural gas: SNG) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับแก๊สธรรมชาติแต่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการการมีเทนเนชันของส่วนที่เหลือของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนสูง (Boerrigter และ Rauch, 2005)



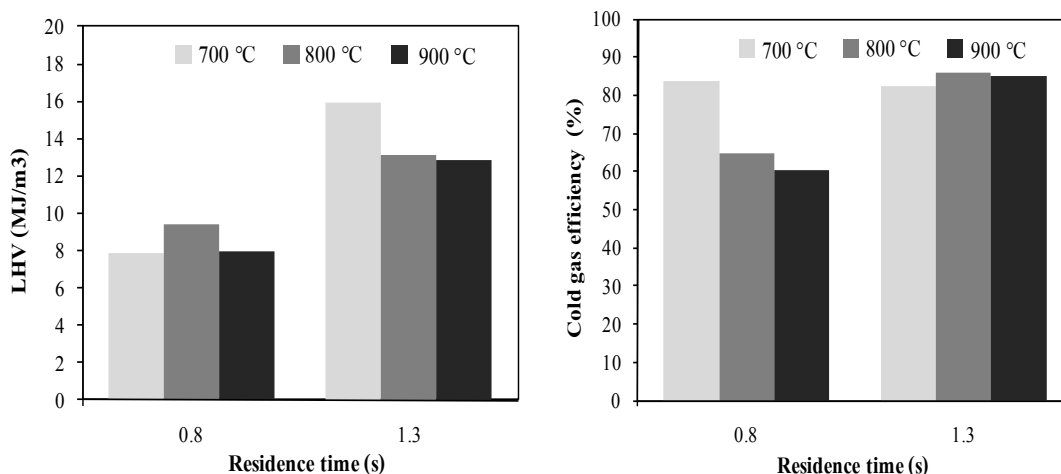
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าที่ระยะเวลาพักของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 1.3 วินาทีปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นเกือบทุกชนิด ยกเว้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C แต่มีปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งเป็นไปได้ตามสมการที่ 4.9 อย่างไรก็ตามปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าที่ระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาทีมีความเหมาะสมในการผลิตแก๊สมากกว่าที่ 0.8 วินาที ข้อดีอีกอย่างหนึ่งที่ได้

จากการเพิ่มระยะเวลาพักเก็บของแก๊สคือ ลดปริมาณแก๊สพาที่ใส่เข้าไปในระบบทำให้ค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น และสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อีกทางหนึ่ง ในขณะที่งานวิจัยของ Dalai และคณะ (2008) พบว่าอัตราการไหลของแก๊สพาที่แตกต่างกันไม่มีผลอย่างสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของวัตถุดิบและระบบที่ใช้ในการแกซีฟิเคชันแตกต่างจากงานวิจัยนี้ผลการทดลองที่ได้จึงไม่สอดคล้องกัน



รูปที่ 4.13 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อร้อยละของแก๊สสังเคราะห์

เมื่อพิจารณาแก๊สสังเคราะห์ที่ระยะเวลาพักของแก๊สต่างกัน พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0.8 เป็น 1.3 วินาที ปริมาณแก๊สสังเคราะห์มีปริมาณสูงขึ้นจากร้อยละ 0.50–5.94 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 1.82–13.87 โดยปริมาตร ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละของแก๊สสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ระยะเวลาพักของแก๊สเป็น 0.8 วินาทีพบว่าเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 31.90–71.80 และพบว่าปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 900°C จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาพักของแก๊สผลิตภัณฑ์มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนั้นระยะเวลาพักของแก๊สจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการแกซีฟิเคชันขยะพลาสติกในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนและประสิทธิภาพของแก๊สที่ระยะเวลาพักต่างกัน พบว่าค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับปริมาณของไฮโดรคาร์บอนแก๊สที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.14 ผลของระยะเวลาพักของแก๊สต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

#### 4.4 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์หรือระยะเวลาพักของแก๊ส พบว่าที่ระยะเวลาเท่ากับ 1.3 วินาที ร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดโดยปริมาตรและคุณภาพของแก๊สที่ได้สูงกว่าที่ระยะเวลาพักเท่ากับ 0.8 วินาที ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อแก๊สผลิตภัณฑ์จากการแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ จึงทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของขยะพลาสติก ที่อัตราสมมูล 0.4 ระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาที ซึ่งพบว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการแกซิฟิเคชัน เมื่อพิจารณาผลของกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าทำให้ได้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะไปกระตุ้นให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ซึ่งได้รับความสนใจมากกว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ เช่น นิกเกิลจึงเป็นแนวทางที่ดีที่จะแปรสภาพแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเป็นแก๊สสังเคราะห์

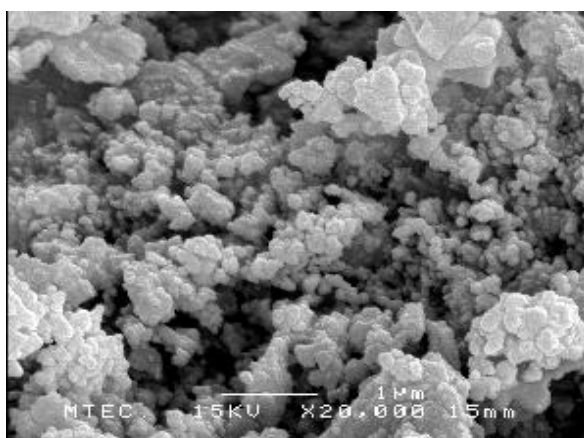
##### 4.4.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินัมออกไซด์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าอะลูมินามีค่าพื้นที่ผิว BET ไม่สูงเนื่องจากอะลูมินาที่ใช้ศึกษาอยู่ในรูปของแอลฟา-อะลูมินา ซึ่งมีราคาถูก มีความเสถียรสูงไม่เปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงและใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีแมกนีเซียมออกไซด์และแลนทานัมเป็น โปรโมเตอร์หรือตัวสนับสนุนที่ช่วยให้โลหะนิกเกิลทำงานได้ดีขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำการเตรียมตัวเร่ง

ปฏิกิริยาโดยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ ถูกรีดด้วยแก๊สไฮโดรเจนภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนนำไปใช้

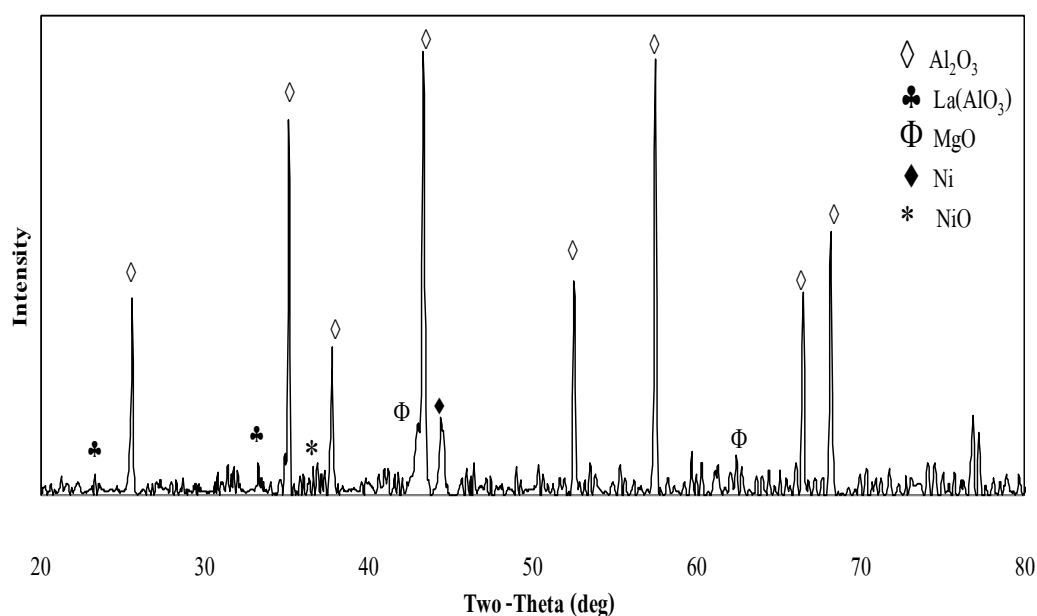
สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	ขนาดอนุภาค ( $\mu m$ )
$Al_2O_3$	7.39	7.55
Ni-Mg-La/ $Al_2O_3$	7.74	14.91

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอะลูมินาที่ใช้ศึกษาอยู่ในรูปของแอลฟาอะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวไม่สูง เมื่อผ่านการฝังตัวพบว่ามีความพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นเนื่องจากนิกลีต แมกนีเซียมและแลนทานัม ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวรองรับอะลูมินาจึงทำให้มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเคลือบฝังมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ดังรูปที่ 4.15 พบว่าลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและเป็นรูพรุน มีการเกาะตัวของนิกลีตกระจายทั่วพื้นผิว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโลหะนิกลีตเป็นสปีชีส์ที่ว่องไวที่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มปริมาณ แก๊สไฮโดรเจนและปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวม ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนของชีวมวลหรือพลาสติก (Wu และคณะ, 2009) นอกจากนี้ยังมีแมกนีเซียมและแลนทานัมเป็น โปรโมเตอร์หรือตัวสนับสนุนที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยรวมทั้งหมด (Martinez และคณะ, 2003)



รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/ $Al_2O_3$

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยเครื่อง x-ray diffraction (XRD) ดังรูปที่ 4.16 พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบตำแหน่งพิกของนิกเกิล (Ni) ที่มุม 2θ เท่ากับ 44.40 ไม่สูงนัก พบตำแหน่งพิกแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่มุม 2θ เท่ากับ 42.99 พบตำแหน่งพิกแลนทานัมอะลูมิเนียมออกไซด์ (La(AlO<sub>3</sub>)) ที่มุม 2θ เท่ากับ 52.52 ซึ่งเป็นพิกที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีปริมาณเพียงร้อยละ 5 และพบตำแหน่งพิกอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มุม 2θ เท่ากับ 45.96 ซึ่งพบว่าเป็นพิกที่สูงที่สุดเนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของตัวเร่งปฏิกิริยา



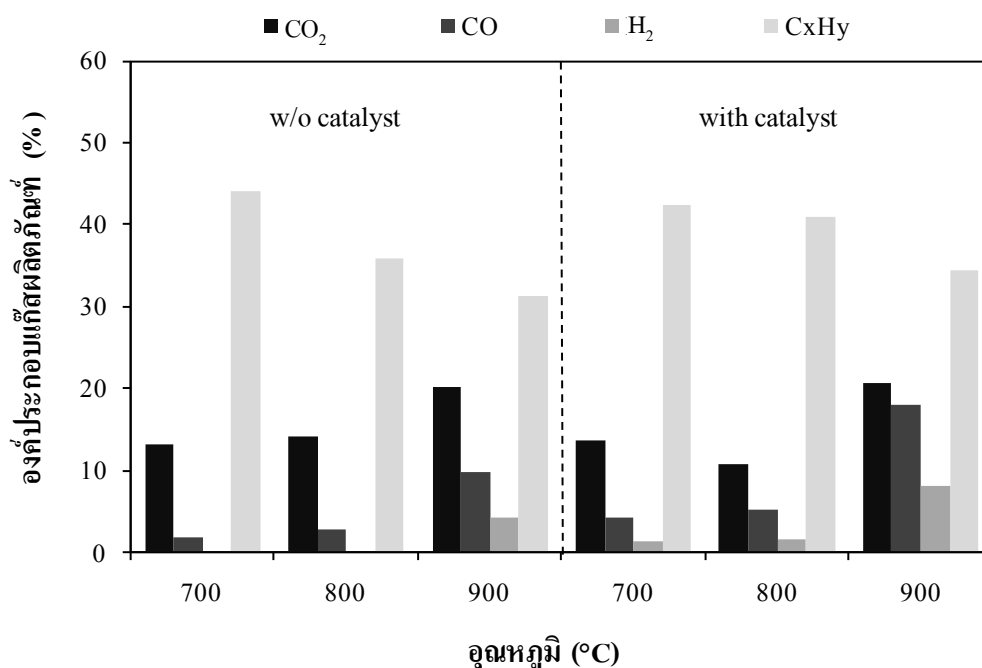
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### 4.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแกซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของขยะพลาสติกได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ จากรูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างการแกซิฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและการแกซิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาที ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อปริมาณพลาสติก 1 กรัม พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 62.25–82.69 เป็นร้อยละ 87.23–94.29 ผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจน (Wu และคณะ, 2009) และแก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าการแกซิฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่พบว่ามีสูงจากร้อยละ 1.82–9.68 เป็นร้อยละ 4.14–17.92 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงดังสมการที่ 4.10 (บุปผา พุทธสวัสดิ์, 2549)



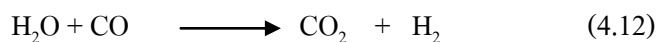
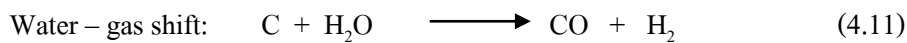
จากสมการที่ 4.10 โลหะนิกเกิลจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นนิกเกิลคาร์ไบด์ ( $\text{NiC}_x$ ) และไฮโดรเจนโดยนิกเกิลจะทำปฏิกิริยาต่อกับไอน้ำได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการป้อนไอน้ำเข้าระบบ จึงพบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมีปริมาณสูงขึ้นไม่มากนัก



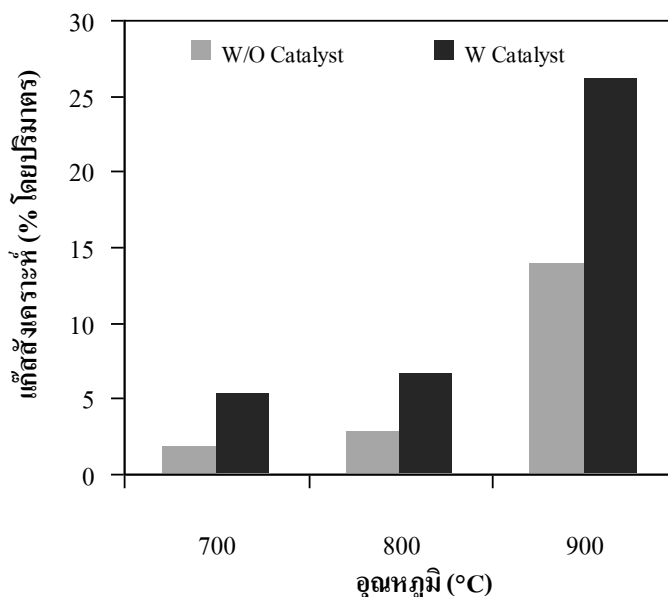
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ของการแก๊สซิฟิเคชัน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนยังคงมีค่าสูงถึงร้อยละ 34.30–42.28 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไม่ได้มีผลต่อการแตกตัวของแก๊สมีเทนมากนัก แต่มีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมและปริมาณแก๊สสังเคราะห์ จากรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละของแก๊สสังเคราะห์โดยปริมาตรที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาที ซึ่งพบว่าปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 0.027–0.216 ลิตรต่อนาที เป็น 0.091–0.418 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 900 °C เพิ่มขึ้นจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 48.19–70.33 จากผลการทดลองพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ He และคณะ (2009) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบแก๊สจากการแก๊สซิฟิเคชันขยะ โพลีเอทิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจะผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่า โดยมีปริมาณของแก๊สสังเคราะห์สูงสุดถึงร้อยละ 65 โดยโมลที่อุณหภูมิ 900 °C จากการทดลองยังพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ยังคงเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ไม่ได้มี

ผลต่อการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งอาจเนื่องมาจากวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการแกซิฟิเคชันมี ปริมาณความชื้นที่น้อยมากเพียงร้อยละ 0.01 ประกอบกับสถานะที่ทำการแกซิฟิเคชันไม่ได้มีการ เพิ่มไอน้ำให้กับระบบ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังสมการที่ 4.11 และ 4.12 จึงเกิดขึ้นน้อย



จากงานวิจัยของ Wu และคณะ (2010) พบว่าการป้อนไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยาสามารถแปรสภาพเป็นแก๊สไฮโดรเจนได้มากกว่า นอกจากนี้ Song และคณะ (2010) ได้เติมไอน้ำเข้าไปใน กระบวนการแกซิฟิเคชันเชื้อเพลิงขยะพลาสติก (RPF) ทำให้การผลิตไฮโดรเจนและ คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 10–20 % ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีเทนที่เกิดขึ้นจากการแกซิฟิเคชันจะแปรสภาพของมีเทนไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อพิจารณางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่การแกซิฟิเคชันขยะพลาสติกหรือพอลิเมอร์ ชนิดต่างๆ จะมีการใช้ไอน้ำร่วมกับออกซิเจน ในการแกซิฟิเคชันและพบว่าองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้เป็นแก๊สไฮโดรเจนและ คาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังพบปริมาณแก๊สมีเทนที่ค่อนข้างต่ำ จึงอาจสรุปได้ว่าระบบนี้ไม่ เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติก ดังนั้นจึงควรปรับปรุงระบบให้สามารถป้อน ไอน้ำเข้าระบบได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ในทางตรงกันข้ามพบว่ามีความเหมาะสมในการผลิต แก๊สมีเทนหรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความร้อนสูงจากขยะพลาสติกที่ผ่านการฝังกลบ

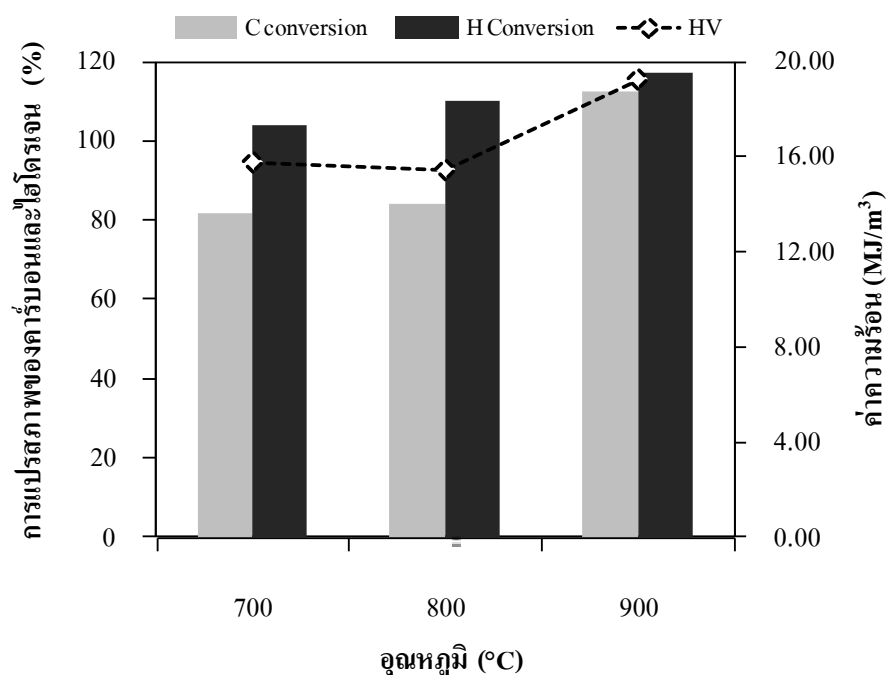


รูปที่ 4.18 ผลของแก๊สสังเคราะห์ต่อกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-La/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### 4.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 ค่าความร้อนที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 15.43–19.26 MJ/m<sup>3</sup> ค่าความร้อนสูงสุดเกิดที่อุณหภูมิ 900 °C จากรูปที่ 4.19 แสดงการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่างๆและค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์จะเห็นว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C เนื่องจากยังคงมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงจึงส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สสูงขึ้นตามไปด้วย จากงานวิจัยของ Song และคณะ (2010) ที่ทำการศึกษการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกโดยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับถ่านหินคุณภาพต่ำพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาทำให้ปริมาณของแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮโดรคาร์บอน

เมื่อพิจารณาร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีค่าร้อยละการแปรสภาพของไฮโดรเจนเกินร้อย ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากการวัดอัตราการไหลขาออกผิดพลาด เนื่องจากแก๊สพาในระบบที่สภาวะการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำ จึงเกิดความผิดพลาดในการวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออกได้ง่าย ในขณะที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนที่สูงขึ้นเนื่องมาจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นนั่นเอง ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆแต่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ดึงที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

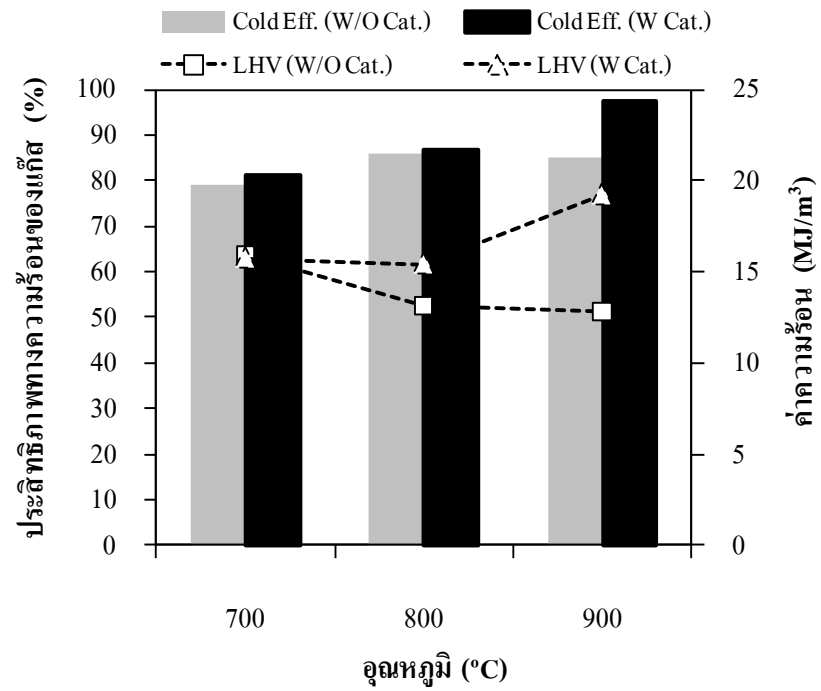


รูปที่ 4.19 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแปรสภาพและค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

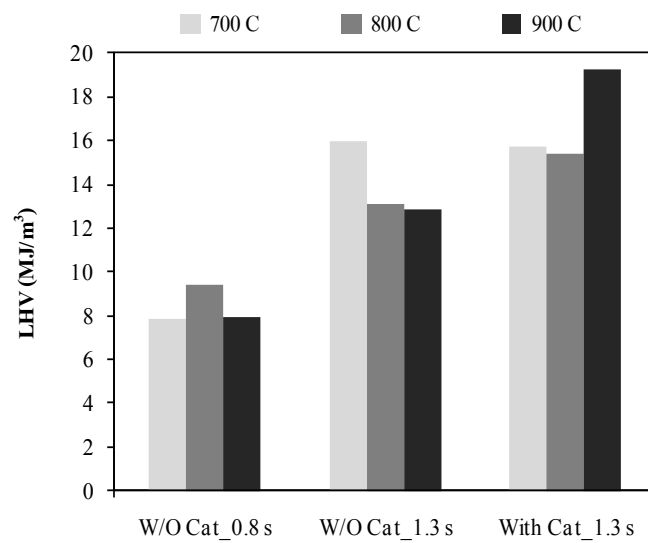


จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์กับค่าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกับค่าความร้อนของแก๊ส เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการแก๊สพีเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนซึ่งพบว่ามีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C ถึงร้อยละ 97.70 ในขณะที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ 700 °C และ 800 °C มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ He และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากการแก๊สพีเคชันของขยะพลาสติกโพลีเอทิลีนและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่อุณหภูมิ 700–900 °C พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 11.31–12.44 MJ/m<sup>3</sup> มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณมีเทนลดลง และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 39.90–60.67 และยังพบว่ามีปริมาณแก๊สมีเทนเพียงร้อยละ 9.94–21.44 ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สามารถสรุปได้ว่าการแก๊สพีเคชันโดยใช้ไอน้ำร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการป้อนไอน้ำให้กับระบบดังนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จึงไม่ใช่แก๊สสังเคราะห์ จากรูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการทดลองต่างกันที่อัตราสมมูล 0.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิผลอย่างมีชัดเจนต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ระยะเวลาพักของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลอย่างชัดเจนต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเพิ่มสูงขึ้นจาก 7.86–9.39 MJ/m<sup>3</sup> เป็น 12.83–15.95 MJ/m<sup>3</sup> และเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเป็น 15.43–19.26 MJ/m<sup>3</sup> เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ช่วยการแตกตัวของแก๊สมีเทนแต่มีส่วนเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และแก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบแก๊สพีเคชันที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงใกล้เคียงกันกับที่อุณหภูมิสูง เมื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าของเตาเผาให้ความร้อนที่มีกำลังไฟฟ้า 12600 วัตต์ พบว่าในการเดินระบบต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ในช่วง 68.04–113.4 MJ ในขณะที่พลังงานที่ได้จากการแก๊สพีเคชันมีค่าในช่วง 0.38–0.57 MJ ซึ่งพบว่าให้พลังงานที่ใกล้เคียงกันเมื่อคิดจากปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นทั้งหมดแต่พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการเดินระบบแตกต่างกันมาก ดังนั้นการเดินระบบที่อุณหภูมิ 700 °C จึงช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับระบบได้มากกว่า ในขณะที่อุณหภูมิสูงและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบและการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นสภาวะที่เกิดแก๊สสังเคราะห์มากกว่าซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



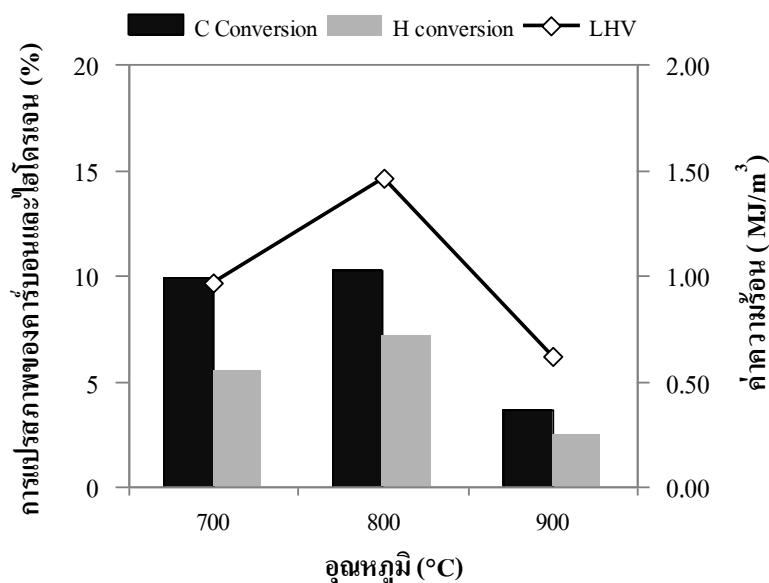
รูปที่ 4.20 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะต่างๆ

#### 4.5 กระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันของพลาสติกที่ไม่ผ่านการฝังกลบ

เพื่อศึกษาผลของการแกซิฟิเคชันของพลาสติกใหม่ จึงทำการทดลองแกซิฟิเคชันโดยใช้ถุงพลาสติกใหม่ที่ไม่ผ่านการฝังกลบแทนการใช้ถุงขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ โดยทำการทดลองที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และระยะเวลาพักของแก๊สเท่ากับ 1.3 วินาที ที่อุณหภูมิ 700–900 °C พบว่าไม่สามารถอธิบายผลการทดลองได้ เนื่องจากในการดำเนินการทดลองไม่สามารถป้อนวัตถุดิบลงสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากวัตถุดิบมีน้ำหนักเบาและเกิดไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างวัตถุดิบและอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ ทำให้วัตถุดิบอุดตันบริเวณปากทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเริ่มเดินระบบเพียง 5–10 นาที ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับวัตถุดิบที่เป็นพลาสติกจากหลุมฝังกลบได้ จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจนกับค่าความร้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C มีค่าความร้อนสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากสามารถป้อนวัตถุดิบได้มากที่สุด จึงพบปริมาณแก๊สสูงสุดส่งผลให้มีค่าความร้อนและการแปรสภาพสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะใดเหมาะสมที่สุด และไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดลองที่ใช้ขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบได้



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อการแปรสภาพและค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการแปรสภาพขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ โดยกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งซึ่งมีการไหลของแก๊สเป็นแบบไหลขึ้นและทำการป้อนวัตถุดิบแบบต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 กรัมต่อนาที โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนของออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง (อัตราสมมูล) ระยะเวลาพักของแก๊ส และผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อแก๊สผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน พบว่าอุณหภูมิมิผลต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์แต่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ไม่มาก ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือแก๊สไฮโดรคาร์บอน ผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้และยังพบว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งที่นำวิเคราะห์องค์ประกอบมีปริมาณสารระเหยที่ต่ำมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคาร์บอนจากวัตถุดิบได้แปรสภาพไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้เกือบทั้งหมด

5.1.2 ผลของอัตราสมมูลของกระบวนการแกซิฟิเคชัน พบว่าการเพิ่มอัตราสมมูลจาก 0.4 เป็น 0.6 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีออกซิเจนมากเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทางตรงกันข้ามแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราสมมูลเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราสมมูลจึงมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

5.1.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราสมมูลต่อค่าความร้อนต่ำและประสิทธิภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าความร้อนต่ำ (LHV) อยู่ในช่วง 6.52–9.39 MJ/m<sup>3</sup> สภาวะที่แก๊สมีค่าความร้อนมีค่ามากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุด ดังนั้นค่าความร้อนต่ำที่ได้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอน และสภาวะที่แก๊สมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีที่สุด (Cold gas efficiency) คือที่อุณหภูมิ 700 °C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิผลกับค่าความร้อนของแก๊สอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.1.4 ผลของระยะเวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์หรือระยะเวลาพักของแก๊ส พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของแก๊สพาทำให้ระยะเวลาพักเพิ่มขึ้นจาก 0.8 วินาทีเป็น 1.3 วินาที ส่งผลให้ปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณของแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็น 12.83–15.95 MJ/m<sup>3</sup> เนื่องจากมีระยะเวลาในการ

แตกตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะเวลาพักของแก๊สจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น

5.1.5 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยสภาวะการทดลองที่อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 และระยะเวลาพักของแก๊ส 1.3 วินาที พบว่าปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจนและแก๊สสังเคราะห์มีปริมาณเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นสภาวะที่แก๊สสังเคราะห์มีปริมาณสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าแก๊สไฮโดรคาร์บอนยังมีปริมาณสูงขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีผลต่อการเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และแก๊สสังเคราะห์แต่ไม่มีผลต่อการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอน

5.1.6 ผลจากการใช้พลาสติกที่ไม่ผ่านการฝังกลบแทนพลาสติกจากหลุมฝังกลบในการทดลอง พบว่าไม่สามารถเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของแก๊สได้ เนื่องจากไม่สามารถป้องกันวัตถุดิบลงสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากวัตถุดิบมีน้ำหนักเบาและเกิดไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างวัตถุดิบและอุปกรณ์ป้องกันวัตถุดิบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ ให้สามารถประยุกต์ใช้ในระบบอื่น เช่น ฟลูอิดไคซ์เบด หรือการป้อนไอน้ำในการทำปฏิกิริยาร่วมกับอากาศ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์

5.2.2 ควรศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ เช่น อัตราการป้อนวัตถุดิบ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขยะพลาสติก

5.2.3 ควรศึกษาการแกซีฟิเคชันของขยะพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น โดโลไมต์และโลหะอัลคาไลน์ชนิดอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์

5.2.4 ควรปรับปรุงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลให้ท่อแก๊สขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้แก๊สไหลเข้าได้สะดวกและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ลดความดันในระบบและวัดอัตราการไหลได้แม่นยำยิ่งขึ้น

5.2.5 ควรปรับปรุงระบบการลดขนาดขยะพลาสติกให้มีประสิทธิภาพ เพื่อที่ขยะพลาสติกจะได้มีขนาดที่สม่ำเสมอช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์

5.2.6 เนื่องจากระบบการป้อนวัตถุดิบไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติ จึงทำให้อัตราการป้อนวัตถุดิบไม่คงที่ซึ่งเกิดความผิดพลาดจากผู้ดำเนินการทดลองได้ง่าย จึงควรปรับปรุงระบบการป้อนวัตถุดิบให้มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบป้อนวัตถุดิบยังมีข้อจำกัดอยู่ คือเกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่ายกับพลาสติกใหม่ จึงเป็นปัญหาในการป้อนวัตถุดิบลงสู่เครื่องปฏิกรณ์ จึงควรปรับเปลี่ยนวัสดุของอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบที่ใช้ให้สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบหลายชนิด

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ชูศักดิ์ โทกษานุทรานนท์. 2536. การคาร์บอนไนซ์เหล็กในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฉัตรชัย ธนศรีสุข. 2541. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล. 2542. การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้วในเครื่อง  
ปฏิบัติการแบบเบตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล. 2543. กระบวนการเคมีอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะ  
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บุปผา พุทธสวัสดิ์. 2549. การผลิตแก๊สไฮโดรเจนเข้มข้นจากแก๊สฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา  $Ni/K_2CO_3/Al_2O_3$ . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรารงค์เนตร เพ็ญพุ่ม. 2550. แก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจน.  
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. 2546. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. 2549. พลาสติกในสิ่งแวดล้อมและการรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพฯ : ภาควิชา  
เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วัลย์พร मुखสุวรรณ. พลาสติกในชีวิตประจำวัน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[www.chemtrack.org](http://www.chemtrack.org). [2009, July 22]
- วสิน กางนุก. 2545. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากก๊าซสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สฟิเคชันและตัวดูด  
ซับทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวรรณ ธรรมมงคล. พลาสติกรีไซเคิล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.mwa.co.th/download/prd01/article/rds/recycle.pdf>. [2009, June 5]

- สิทธิศักดิ์ อุปริงศ์. 2535. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ของเตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สินีนาฏ รอดจัน. 2547. ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพัตรา ชีวธนาคุปต์. 2546. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพงษ์ คล้ายพุ่มก. 2545. การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุวรรณณี จรรยาพูน. 2549. การกำจัดมูลฝอยและของเสียอันตราย. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พลังงานจากขยะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET13.pdf>. [2552, มกราคม 10]
- อรสา อ่อนจันทร์. มหัศจรรย์พลาสติก[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_8\\_2549\\_plastic-5.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_8_2549_plastic-5.pdf). [2009, June 5]
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2538. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Al-Salem, S.M., Lettieri, P., and Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management 29: 2625–2643.
- Angyal, A., Miskolczi, N., and Bartha, L. 2007. Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 79: 409-414.
- Ashraf, G.S. Environmental Waste Management and Plastics Recycling - An Overview [online]. Available from: [www.khwarzimid.org/takveen/plastics\\_recycle.pdf](http://www.khwarzimid.org/takveen/plastics_recycle.pdf). [2009, May 25]

- Bacaicoa, P.G., Mastral, J.F., Ceamanos, Berruero, J. C. and Serrano, S. 2008. Gasification of biomass/high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier. Bioresource Technology 99: 5485–5491.
- Boerrigter, H., and Rauch, R. 2005. Handbook biomass gasification Mepple: Netherlands.
- Buekens, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics [online]. Available from: [http://www.sutlib2.sut.ac.th/sut\\_contents/H108759.pdf](http://www.sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H108759.pdf). [2009, May 29].
- Buekens, A.G., and Huang, H. 1998. Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. Resources Conservation and recycling 23 : 163-181.
- Carlos, L.P., and Chase, H.A. 2001. Microwave-Induced Pyrolysis of Plastic Wastes. Ind. Eng. Chem. Res 40: 4749-4756.
- Chiemchaisri, C., Charnnok, B., and Visvanathan, C. 2009. Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system. Bioresource Technology
- Dalai, A.K., Batta, N., Eswaramoorth, I., and Schoenau, J. 2009. Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production. Waste Management 29: 252–258.
- Demirbas, A. 2004. Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 72: 97-102.
- Domínguez, A., Fernández, Y., Fidalgo, B., Pis, J.J., and Menéndez, J.A. 2008. Bio-syngas production with low concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from microwave-induced pyrolysis of wet and dried sewage sludge. Chemosphere 70: 397-403.
- Dou, B., Park, S., Lim, S., Yu, T.U., and Hwang, J. 2007. Pyrolysis Characteristics of Refuse Derived Fuel in a Pilot-Scale Unit. Energy & Fuels 21: 3730–3734.
- Fidalgo, B., Fernandez, Y., Domínguez, A., Pis, J.J., and Menéndez, J.A. 2008. Microwave-assisted pyrolysis of CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mixtures over activated carbon. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 82: 158–162.
- Ganan, J., et al 2005. Energy Production by means of gasification process of residuals sourced in Extremadura (Spain). Journal of Renewable Energy 30: 1795-1769.



- He, M., et al 2009. Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition. International journal of hydrogen energy 34: 1342–1348.
- Heyerdahl, P., et al. Distributed Biomass Conversion [online]. Available from:  
[http://ruraladvantage.org/pdf/microwave\\_pyrolysis.pdf](http://ruraladvantage.org/pdf/microwave_pyrolysis.pdf). [2009, July 15]
- Kantarelis, E., Donaj, P., Yang, W., and Zabaniotou, A. 2009. Sustainable valorization of plastic wastes for energy with environmental safety via High-Temperature Pyrolysis (HTP) and High-Temperature Steam Gasification (HTSG). Journal of Hazardous Materials 167: 675–684.
- Kaosol, T. 2009. Sustainable Solutions for Municipal Solid Waste Management in Thailand. World Academy of Science, Engineering and Technology 60
- Kirubakaran, V., et al. 2009. A review on gasification of biomass. Renewable and Sustainable Energy Review 13: 179-186.
- Knoef, H.A.M. 2005. Handbook biomass gasification Mepple: Netherlands.
- Lee, S.H., Choi, K.B., Lee, J.G., and Kim, J.H. 2006. Gasification characteristics of combustible wastes in a 5 ton/day fixed bed gasifier. Korean J. Chem. Eng 23(4): 576-580.
- Lee, K.H., and Shin, D.H. 2007. Characteristics of liquid product from the pyrolysis of waste plastic mixture at low and high temperatures : Influence of lapse time of reaction. Waste Management 27: 168-176.
- Martínez, R., Romero, E., García, L., and Bilbao, R. 2003. The effect of lanthanum on Ni–Al catalyst for catalytic steam gasification of pine sawdust. Fuel Processing Technology 85: 201– 214
- Ministerial Regional Forum on Environment and Health. 2007. Waste management in Thailand, Thailand.
- Miskolczi, N., Bartha, L., Deak, G., and Jover, B. 2004. Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. Polymer Degradation and Stability 86: 357-366.
- Okuwaki, A. 2004. Feedstock of recycling plastics in japan. Polymer degradation and stability 85: 981-988.

- Probstein, R.F., and Hicks, R.E. 1982. Synthesis Fuels. USA: McGraw-Hill.
- Ponzio, A. Kalisz, S., and Blasiak, W. 2005. Effect of operating conditions on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste. Fuel Processing Technology 87: 223–233.
- Reed, T.B., and Das, A. 1988. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems Colorado: U.S. Department of Energy.
- Soongpravit, K., Aht-Ong, D., and Sricharoenchaikul, V. Microwave induced thermal conversion of Ethylene -Vinyl Acetate copolymer/Natural rubber composite from shoe sole scrap. [online]. Available from: [www.energy-based.nrct.go.th](http://www.energy-based.nrct.go.th). [2009, Jun 10]
- Song, H.J., Lee, J., Gaur, A., Park, J.J., and Park, J.W. 2010. Production of gaseous fuel from refuse plastic fuel via co-pyrolysis using low-quality coal and catalytic steam gasification. J Mater Cycles Waste Manag 12: 295–301.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S.A. 1993. Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues Singapore: McGraw-Hill, Inc.,
- Tsuji, T., and Hatayama, A. 2009. Gasification of waste plastics by steam reforming in a fluidized bed. J Mater Cycles Waste Manag 11:144–147.
- Watanabe, H., and Otaka, M. 2006. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. Journal of Fuel 85: 1935-1943.
- Williams, P.T., and Williams, E.A. 1999. Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 51: 107–126.
- Wu, C., and Williams, P.T. 2009. Investigation of Ni-Al, Ni-Mg-Al and Ni-Cu-Al catalyst for hydrogen production from pyrolysis–gasification of polypropylene. Applied Catalysis Environmental 90: 147–156.
- Wu, C., and Williams, P.T. 2010. Pyrolysis–gasification of plastics, mixed plastics and real-world plastic waste with and without Ni–Mg–Al catalyst. Fuel 89: 3022–3032.
- Wu, C., and Williams, P.T. 2010. Pyrolysis–gasification of post-consumer municipal solid plastic waste for hydrogen production. International journal of hydrogen energy 35: 9 4 9-9 5 7.

- Xiao, R., Jin, B., Zhou, H., Zhong, Z., and Zhang, M. 2007. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. Energy Conversion and Management 48: 778–786.
- Xianhua, W., Hanping, C., Kai, L., Jingai, S., and Haiping, Y. 2008. The Influence of Microwave Drying on Biomass Pyrolysis. Energy & Fuels 22: 67-74.
- Yatsun, A.V., Konovalov, P.N., and Konovalov, N.P. 2008. Gaseous Products of Microwave Pyrolysis of Scrap Tires. Solid Fuel Chemistry 42: 187-191.
- Zhang, R., Cummer, K., Suby, A., and Brown, R.C. 2005. Biomass- derived hydrogen from an air-blown gasification. Journal of Fuel Processing Technology 86: 861-874.

ภาคผนวก

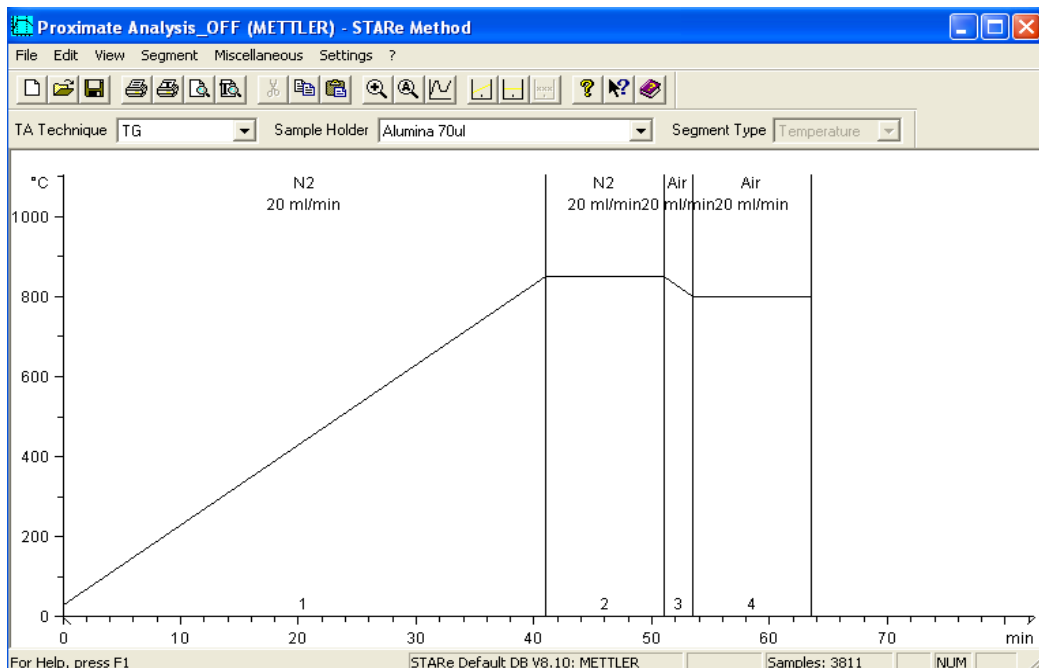
## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์โดยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA 851<sup>o</sup> การแสดงผลของการวิเคราะห์หนักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวล (mass change; $\Delta m$ ) ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิ (temperature;T) หรือเวลา (time;t) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 โดยการใช้งานส่วนใหญ่มักใช้วิเคราะห์ การสลายตัวทางความร้อน (decomposition) และ เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกในการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุคิบแบบประมาณ รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่านชาร์) จากการทดลองซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

#### 1. สร้าง Conditions ที่ต้องการ

- 1.1 เมื่อเปิดโปรแกรม star software เข้า Function เลือก method window แล้วเลือก TG และเลือก Sample Holder ตามขนาดของ pan ที่ใช้โดยปกติจะใช้ Aliminium standard 70 ul
- 1.2 เลือก dynamic segment จะขึ้นหน้าจอของ dynamic segment ใต้ start Temperature (ตามอุณหภูมิที่ต้องการเริ่ม) โดยเริ่มที่ 25 °C End Temperature (ตามอุณหภูมิที่ต้องการ run ไปถึง) สิ้นสุดที่ 850 °C อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)
- 1.3 เลือกแก๊สและใส่ flow rate ของแก๊ส ที่ต้องการใช้ แล้ว double click ที่ คำว่า air เพื่อเปลี่ยน เป็น แก๊สที่ใช้ (เช่น N<sub>2</sub> (เลือกแก๊สที่ต้องการใช้) และเปลี่ยน Flow rate โดยปกติใช้ 20-50 ml) แล้วจึง Save method เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะได้กราฟดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดง Condition ในการทดลอง

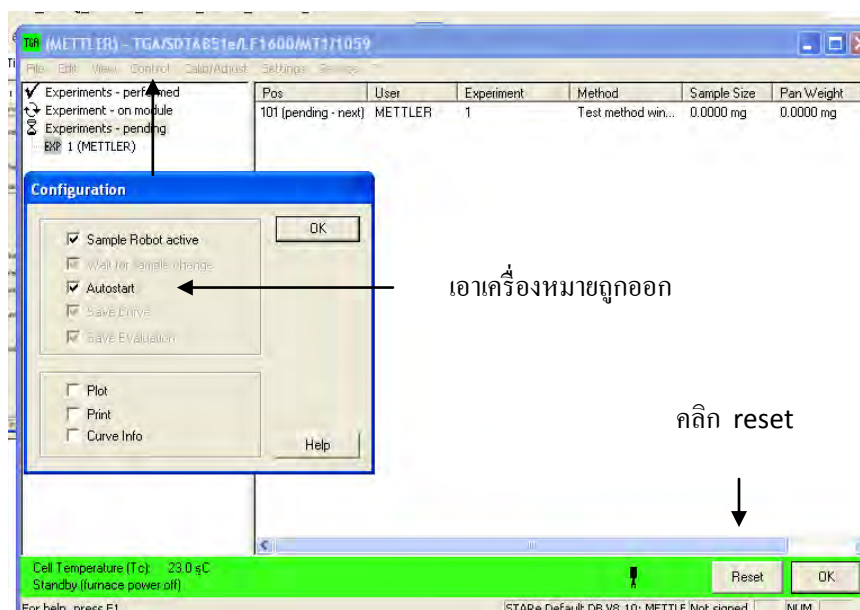
## 2. Run Sample

เมื่อเปิดโปรแกรม star software เลือก control configuration คลิกเอาเครื่องหมายถูกหน้า auto start ออกแล้วเลือก reset

2.1 วาง pan เปล่าลงในถาดใส่ pan (การ run blank curve นั้นต้องมั่นใจว่าคลิกเลือก run blank curve ใน method ของเราที่ save ไว้แล้ว ถ้ายังไม่แน่ใจก็ทำตามขั้นตอนดังนี้

2.2 เปิดโปรแกรม star software เลือก function

- experiment window
- select method (เลือก method ที่เรา save ไว้) จะขึ้น condition ตามที่เราตั้งไว้)
- คลิก run blank curve
- เลือกแถบ module เป็นสีฟ้า
- position เลือก 101 (ถ้าวางในตำแหน่ง 1 ของจาน)
- click sent experiment



รูปที่ 2 หน้าจอแสดงผลเมื่อกำหนดค่าต่างๆก่อนทำการทดลอง

2.3 วาง pan บนจาน [เท่ากับจำนวน sample ที่ต้องการ run ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 2 ของจาน (ตำแหน่งที่ 1 เป็น blank) และใส่ชื่อตัวอย่างตามที่ต้องการ run แล้วกด sent experiment (ซึ่งน้ำหนัก pan ก่อน run sample ต้องชั่งน้ำหนัก panเปล่าที่จะใส่ sample ก่อนทุกครั้ง)

2.4 ชั่ง pan โดย

- เลือกรายการที่ส่งการทดลองมาให้เป็นแถบสีน้ำเงินเข้ม
- Click ขวาตรงแถบสีที่เลือก จากนั้นเลือก weight in auto
- คลิกที่ช่อง pan กด OK ( เครื่องจะชั่งหีบ pan ไปชั่งรอนกว่านาฬิกาทราย จะหายไปจากจอ)

- ทำแบบนี้ทุกรายการ ที่ส่งการทดลองมา (ซึ่งครบทุก pan แล้ว)

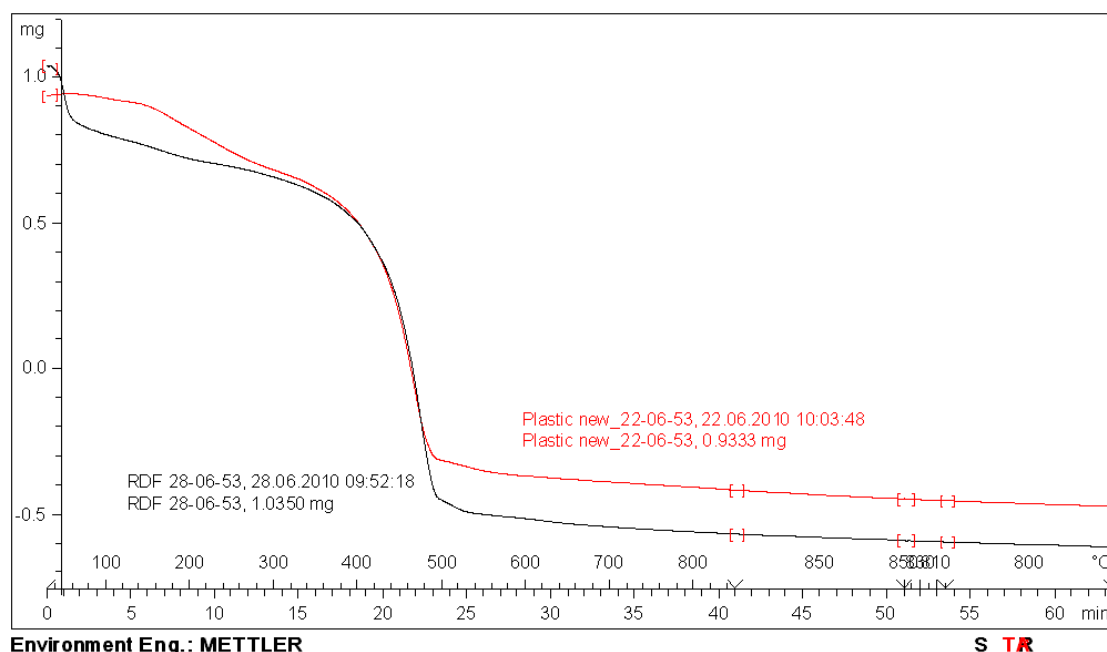
2.5 หีบ pan ที่ชั่งแล้วมาใส่ sample ตอนหีบ pan ออกมาต้องจำไว้ว่าหีบ pan ออกมาจากตำแหน่งไหนของจาน) แล้วต้องวางกลับตำแหน่งเดิมของจาน ถ้าวางผิดตำแหน่งจะได้น้ำหนัก pan เปลี่ยนไป

2.6 Control เลือก Configuration ดึงให้หมีเครื่องหมายถูกหน้า auto start เพื่อให้ robot หีบ ตัวอย่างอัตโนมัติ ต่อเนื่อง

2.7 Control เลือก start experiment เครื่องจะหีบ pan ที่มี sample ไปทดลองเองอัตโนมัติจนครบทุกตัว

ข้อมูลที่ได้จะทราบถึง decomposition เพราะเป็นการถึงอุณหภูมิที่เริ่มต้นการทดสอบ โดยเส้นกราฟอาจแสดงถึงการระเหยของสารส่วนที่สามารถระเหยได้ โดยจากการทดลองการเปลี่ยนแปลงมวลเนื่องจากการให้ความร้อนเข้าไปทำการสลายตัวของวัสดุก็สามารถแสดง

- ค่า Volatile organic content (VOC) โดยการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เวลาคงที่เป็นเวลาทั้งสิ้น 10 นาที
- แสดงค่า Fixed carbon โดยการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวล
- แสดงค่า Ash โดยการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวล
- แสดงค่า Char yield โดยการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบไปจนถึง อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟผลการวิเคราะห์ห้ขยะพลาสติกจากเครื่อง TGA



## ภาคผนวก ข

### การคำนวณ

#### 1. การคำนวณการวิเคราะห์แบบประมาณ

1.1 คำนวณความชื้น ร้อยละของค่าความชื้นคำนวณที่ 100°C โดยคิดจากน้ำหนักของวัตถุที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังสมการ

$$\% \text{ ความชื้น} = \left( \frac{\text{มวลเริ่มต้น} - \text{มวลที่ } 100^{\circ}\text{C}}{\text{มวลเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

1.2 ร้อยละสารระเหย คำนวณหลังจากมวลที่ลดลงหลังจากค่าความชื้น จนถึงค่าที่ 850°C หลังคงที่ 10 นาที

$$\% \text{ สารระเหย} = \left( \frac{\text{มวลที่ } 100^{\circ}\text{C} - \text{มวลที่ } 850^{\circ}\text{C}}{\text{มวลเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

1.3 ร้อยละคาร์บอนคงตัว คำนวณค่าที่ 850°C ลดลงจนถึง 800°C

$$\% \text{ คาร์บอนคงตัว} = \left( \frac{\text{มวลที่ } 850^{\circ}\text{C} - \text{มวลที่ } 800^{\circ}\text{C} (\text{ค่าแรก})}{\text{มวลเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

1.4 ร้อยละเถ้า คำนวณค่าที่ 800°C จนถึงค่าที่คงที่

$$\% \text{ เถ้า} = \left( \frac{\text{มวลที่ } 800^{\circ}\text{C} \text{ ค่าแรก} - \text{มวลที่ } 800^{\circ}\text{C} \text{ ค่าสุดท้าย}}{\text{มวลเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

## 2. การคำนวณอัตราการป้อนก๊าซพาและก๊าซออกซิเจน

### 2.1 ระยะเวลาพัก

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์} &= 0.188 \text{ ลิตร} \\ \text{ก๊าซที่เข้าระบบทั้งหมด} &= 13 \text{ ลิตร/ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } t = V/Q, \quad t &= (0.188 \times 60) / 13 \\ t &= 0.87 \text{ วินาที} \end{aligned}$$

### 2.2 อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน

$$\begin{aligned} \text{ความชื้น} &= 0\% \\ \text{คาร์บอนในขยะพลาสติก} &= 66.7\% \\ \text{ป้อนตัวอย่างเข้าสู่ระบบ} &= 1 \text{ กรัม/นาที} \\ \text{คาร์บอนเข้าสู่ระบบ} &= 0.67 \text{ กรัมคาร์บอน/ นาที} \\ &= 0.67 / 12 \\ &= 0.06 \text{ โมล/ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรก๊าซที่ } 25 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad V_1 &= 0.06 / 24.45 \text{ โมล/ลิตร} \\ &= 1.36 \text{ ลิตร/ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ } 700 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad V_2 & \text{ คำนวณจาก } V_1/T_1 = V_2/T_2 \\ \text{เมื่อ} \quad T_1 &= 298 \text{ K} \\ T_2 &= 973 \text{ K} \\ V_2 &= (1.36 \times 973) / 298 \\ &= 4.4 \text{ ลิตร/ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ก๊าซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าระบบที่ } 25 \text{ }^{\circ}\text{C} & \\ &= 13 - 4.4 = 8.56 \text{ ลิตร/ นาที} \\ &= (8.56 / 973) \times 298 \\ &= 2.62 \text{ ลิตร/ นาที} \end{aligned}$$

ที่อุณหภูมิอื่น ๆ จำนวนเช่นเดียวกัน ได้ค่าแสดงดังตาราง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาตร N <sub>2</sub> ที่ 25 °C (ลิตร/นาที)
700	2.62
800	2.25
900	1.94

### 2.3 อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณ O}_2 \text{ ที่ป้อนเข้าระบบ} &= \text{mole C/min} \times \text{ER} \times 24.45 \\
 &= 0.06 \times 0.2 \times 24.45 \\
 &= 0.27 \text{ ลิตร/ นาที}
 \end{aligned}$$

ที่อุณหภูมิอื่น ๆ จำนวนเช่นเดียวกัน ได้ค่าแสดงดังตาราง

อุณหภูมิ (°C)	Total gas feed @25	0.4		0.6	
		N <sub>2</sub> l/min	O <sub>2</sub> l/min	N <sub>2</sub> l/min	O <sub>2</sub> l/min
700	2.62	2.07	0.55	1.80	0.82
800	2.25	1.70	0.55	1.43	0.82
900	1.94	1.39	0.55	1.12	0.82

### 3. การคำนวณการแปรสภาพเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจน

ธาตุ	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	g /min	mole /min
คาร์บอน	66.7	0.67	0.056
ไฮโดรเจน	12.5	0.13	0.13

#### 3.1 % การแปรสภาพคาร์บอนของพลาสติก จำนวนที่ 800 °C : ER 0.4

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น} &= (\% \text{ gas} \times \text{gas out})/100 \\
 &= (4.65 \times 2.6)/100 \\
 &= 0.12 \text{ l/min}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{โมลคาร์บอนต่อนาที} &= 0.12/24.45 \\ &= 0.0049 \text{ mol C/min} \\ \% \text{ การแปรสภาพคาร์บอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์} &= (0.0054/0.049) \times 100 \\ &= 8.9 \% \end{aligned}$$

**3.2** % การแปรสภาพไฮโดรเจน คำนวณที่ 800 °C : ER 0.4

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น} &= (\% \text{ gas} \times \text{gas out})/100 \\ &= (25.68 \times 2.6)/100 \\ &= 0.6677 \text{ l/min} \\ \text{โมลคาร์บอนต่อนาที} &= 0.6677/24.45 \\ &= 0.0273 \text{ mol C/min} \\ \text{CH}_4 \text{ 1 โมลมี H 4 โมล} & \\ \text{CH}_4 \text{ 0.028 โมลมี H 4} \times 0.0273 &= 0.1092 \text{ mol C/min} \\ \% \text{ การแปรสภาพไฮโดรเจนเป็นมีเทน} &= (0.1093 / 0.125) \times 100 \\ &= 87.39 \% \end{aligned}$$

#### 4. การคำนวณค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์

##### 4.1 ค่าความร้อน (LHV)

$$\begin{aligned} \text{HHV} &= 49.6 \text{ MJ/kg} \\ \text{LHV} &= \text{HHV} - 2.395 m_w ; \text{ MJ/kg} \\ \text{LVH feed} &= 47.02 \\ \text{LHV} &= (12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4) / (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4) \\ \text{LHV} &= (12.64 \times \text{CO} + 10.8 \times \text{H}_2 + 35.72 \times \text{CH}_4) / \text{Total gas} \end{aligned}$$

เมื่อ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  คือปริมาตรของ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  (แก๊สไฮโดรคาร์บอน) ที่ได้ต่อนาที (l/min) ดังนั้นที่สภาวะการทดลอง 800°C อัตราสมมูลเท่ากับ 0.4 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= [(12.64 \times 0.04) + (10.8 \times 0) + (35.72 \times 0.67)] / 2.6 \\ &= 9.39 \text{ MJ/m}^3 \end{aligned}$$

#### 4.2 การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Cold gas efficiency)

การคำนวณร้อยละประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง ซึ่งต้องมีค่าเข้าใกล้ 100 จะสามารถบอกได้ว่าที่สภาวะนั้นสามารถแปรสภาพวัตถุดิบไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดีหรือไม่

$$\eta_{LHV} = (\sum LHV_i \times V_i) / (LHV_{feed} \times M) \times 100$$

เมื่อ  $LHV_i$  คือค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ ( $MJ/m^3$ )  $V_i$  ปริมาตรแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ( $m^3$ )  $LHV_{feed}$  คือ ค่าความร้อนของวัตถุดิบ ( $MJ/kg$ ) และ  $M$  คือมวลของวัตถุดิบ ( $kg$ )

$$\begin{aligned} \eta_{LHV} &= (9.39 \times 0.052) / (47.02 \times 0.016) \times 100 \\ &= 64.90 \% \end{aligned}$$

#### 4.3 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการให้ความร้อนกับระบบ

คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการให้กับระบบของเตาเผาให้ความร้อนที่มีกำลังไฟฟ้า 12600 วัตต์ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 °C ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า (จูล)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{เวลา (วินาที)} \\ &= 12600 \text{ วัตต์} \times 7200 \text{ วินาที} \\ &= 90,720,000 \text{ J} \\ &= 90.72 \text{ MJ} \end{aligned}$$

คำนวณพลังงานที่ได้จากการแกซีฟิเคชัน โดยคิดที่อุณหภูมิ 800 °C, ER 0.4

$$\text{พลังงานจากการเดินระบบ} = 9.39 \text{ MJ/m}^3 \times 0.052 \text{ m}^3 = 0.49 \text{ MJ}$$

### 5. การคำนวณตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 5.1 ปริมาณ Ni ร้อยละ 10 ที่ต้องการเตรียมบนตัวรองรับอะลูมินา

คิดจากร้อยละ 10 ของ Ni บนตัวรองรับ  $Al_2O_3$  100 กรัม ดังนั้น ตัวรองรับ  $Al_2O_3$  100 กรัม มี Ni 10 กรัม ต้องตัด Ni 10 กรัมจาก  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 290.71 g/mol

มี Ni 58.71 กรัม จาก  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  290.81 กรัม

ถ้าต้องการ Ni 10 กรัม จาก  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O = (10 \times 290.81)/58.71$

ดังนั้นต้องตัด  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O = 49.53$  กรัม

### 5.2 ปริมาณ La ร้อยละ 5 ที่ต้องการเตรียมบนตัวรองรับอะลูมินา

ตัวรองรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  100 กรัม มี La 5 กรัม

ต้องตัด La 5 กรัมจาก  $\text{La}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  433.01 g/mol

มี La 138.91 กรัม จาก  $\text{La}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  433.01 กรัม

ถ้าต้องการ La 5 กรัมจาก  $\text{La}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = (5 \times 433.01) / 138.91$

ดังนั้นต้องตัด  $\text{La}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 15.58$  กรัม

### 5.3 ปริมาณ Mg ร้อยละ 5 ที่ต้องการเตรียมบนตัวรองรับอะลูมินา

ตัวรองรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  100 กรัม มี Mg 5 กรัม

ต้องตัด Mg 5 กรัมจาก  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  256.31 g/mol

มี Mg 24.3 กรัม จาก  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  256.31 กรัม

ถ้าต้องการ Mg 5 กรัมจาก  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = (5 \times 256.31) / 24.3$

ดังนั้นต้องตัด  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 52.74$  กรัม

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงผลร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์

	ER	Temp	% gas avg.				Flow gas out (l/min)	Total Vol.gas (L)
			CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>		
Residence time = 0.8s	0	700	0.83	0.11	0.00	23.7	2.8	56.00
		800	1.23	1.26	0.00	24.60	2.5	50.00
		900	1.00	1.31	7.50	18.54	2.8	56.00
	0.4	700	4.95	0.51	0.00	21.52	3.0	60.00
		800	4.65	1.71	0.00	25.68	2.6	52.00
		900	7.38	3.69	2.25	20.23	2.5	50.00
	0.6	700	6.40	1.25	0.00	23.37	2.8	56.00
		800	7.83	4.64	2.07	16.08	3.0	60.00
		900	13.33	5.20	2.88	16.29	3.15	63.00
Residence time = 1.3s	W/O Cat.0.4	700	13.20	1.82	0.00	44.00	1.40	28.00
		800	14.06	2.71	0.00	35.75	1.54	30.80
		900	20.13	9.68	4.20	31.23	1.56	31.20
	With Cat. 0.4	700	13.57	4.14	1.20	42.28	1.70	34.00
		800	10.62	5.08	1.49	40.95	1.85	37.00
		900	20.68	17.92	8.19	45.09	1.67	33.40
	plastic new 0.4	700	5.05	0.83	0.63	2.21	1.52	30.40
		800	4.50	2.40	2.21	2.57	1.35	27.00
		900	2.1	1.07	1.12	1.00	1.1	22.00

ตารางที่ 2 ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

	ER	Temp	CO <sub>2</sub>		CO		H <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>	
			Vol. l/min	mol C/min	Vol. l/min	mol C/min	Vol. l/min	mol H/min	Vol. l/min	mol C/min
<b>Residence time = 0.8s</b>	0	700	0.0232	0.0010	0.0031	0.0001	0.0000	0.0000	0.6636	0.0271
		800	0.0308	0.0013	0.0315	0.0013	0.0000	0.0000	0.6150	0.0252
		900	0.0280	0.0013	0.0367	0.0015	0.2100	0.0086	0.5191	0.0212
	0.4	700	0.1485	0.0061	0.0154	0.0006	0.0000	0.0000	0.6456	0.0264
		800	0.1209	0.0049	0.0445	0.0018	0.0000	0.0000	0.6677	0.0273
		900	0.2214	0.0091	0.1107	0.0045	0.0675	0.0028	0.6069	0.0248
	0.6	700	0.1792	0.0073	0.0350	0.0014	0.0000	0.0000	0.6544	0.0268
		800	0.2349	0.0096	0.1392	0.0057	0.0621	0.0025	0.4824	0.0197
		900	0.4199	0.0172	0.1638	0.0067	0.0907	0.0037	0.5131	0.0210



ตารางที่ 2 (ต่อ) ร้อยละการแปรสภาพของคาร์บอนและไฮโดรเจน

	ER	Temp	CO <sub>2</sub>		CO		H <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>	
			Vol. l/min	mol C/min	Vol. l/min	mol C/min	Vol. l/min	mol H/min	Vol. l/min	mol C/min
Residence time = 1.3s	W/O Cat.0.4	700	0.1848	0.0076	0.0255	0.0010	0.0000	0.0000	0.6160	0.0252
		800	0.2165	0.0089	0.0417	0.0017	0.0000	0.0000	0.5506	0.0225
		900	0.3140	0.0128	0.1510	0.0062	0.0654	0.0027	0.4872	0.0199
	With Cat. 0.4	700	0.2307	0.0137	0.0704	0.0042	0.0204	0.0015	0.7188	0.0504
		800	0.1965	0.0094	0.0940	0.0029	0.0276	0.0008	0.7576	0.0294
		900	0.3454	0.0080	0.2993	0.0038	0.1368	0.0011	0.7530	0.0310
	plastic new 0.4	700	0.0768	0.0141	0.0126	0.0122	0.0096	0.0056	0.0336	0.0308
		800	0.0608	0.0031	0.0324	0.0005	0.0298	0.0004	0.0347	0.0014
		900	0.0231	0.0025	0.0118	0.0013	0.0123	0.0012	0.0110	0.0014

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของแก๊สผลิตภัณฑ์

	ER	Temp	Total Vol.gas (m <sup>3</sup> )	feed (kg)	LHV (MJ/m <sup>3</sup> ) ไม่รวมก๊าซ พา	LHV (MJ/m <sup>3</sup> ) รวมก๊าซพา	$\eta$ LHV
Residence time = 0.8s	0	700	0.045	0.011	34.41	8.48	73.45
		800	0.045	0.011	33.02	8.95	77.84
		900	0.056	0.014	26.91	7.58	64.45
	0.4	700	0.060	0.012	28.81	7.86	83.57
		800	0.052	0.016	29.30	9.39	64.90
		900	0.060	0.017	23.65	7.94	60.28
	0.6	700	0.056	0.014	27.42	8.51	72.36
		800	0.060	0.014	21.40	6.55	59.74
		900	0.063	0.010	18.00	6.79	90.94
Residence time = 1.3s	W/O Cat.0.4	700	0.028	0.012	27.02	15.95	82.58
		800	0.031	0.010	24.97	13.11	85.89
		900	0.031	0.010	19.67	12.83	85.15
	With Cat.0.4	700	0.034	0.014	25.75	15.76	81.38
		800	0.037	0.014	26.54	15.43	86.73
		900	0.033	0.014	20.96	19.26	97.70
	plastic new 0.4	700	0.030	0.004	11.04	0.96	15.56
		800	0.027	0.004	12.50	1.46	20.96
		900	0.022	0.003	11.60	0.61	9.57

ตารางที่ 4 ปริมาตรของแก๊สสังเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ

	ER	Temp	gas produced (L)				H <sub>2</sub> /CO
			CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> + CO	sum gas species	
Residence time = 0.8s	0	700	0.003	0.000	0.003	0.003	0.00
		800	0.032	0.000	0.032	0.032	0.00
		900	0.037	0.210	0.247	0.247	5.73
	0.4	700	0.015	0.000	0.015	0.015	0.00
		800	0.044	0.000	0.044	0.044	0.00
		900	0.111	0.068	0.178	0.178	0.61
	0.6	700	0.035	0.000	0.035	0.035	0.00
		800	0.139	0.062	0.201	0.201	0.45
		900	0.164	0.091	0.255	0.255	0.55
Residence time = 1.3s	w/o Cat.0.4	700	0.027	0.000	0.027	0.027	0.00
		800	0.046	0.000	0.046	0.046	0.00
		900	0.151	0.065	0.216	0.216	0.43
	With Cat. 0.4	700	0.070	0.020	0.091	0.091	0.29
		800	0.101	0.030	0.130	0.130	0.29
		900	0.287	0.131	0.418	0.418	0.46
	plastic new 0.4	700	0.013	0.010	0.022	0.022	0.76
		800	0.032	0.030	0.062	0.062	0.92
		900	0.012	0.012	0.024	0.024	1.05

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรานค์ทิพย์ แก้วเพ็ญกรอ เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2529 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551