

แกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

นางสาว เอกพร แจ่มกระจ่าง

ศูนย์วิทยพัทยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STEAM/O<sub>2</sub> GASIFICATION OF MIXED PLASTIC IN FIXED BED REACTOR

Miss Ekaporn Jamkrajang



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมในเครื่อง  
ปฏิกรณ์เบดนิ่ง

โดย

นางสาว เอกพร แจ่มกระจ่าง

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

เอกพร แจ่มกระจ่าง : แก๊ซซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมในเครื่องปฏิกรณ์  
เบดนิ่ง. (STEAM/O<sub>2</sub> GASIFICATION OF MIXED PLASTIC IN FIXED BED REACTOR)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.เลอสรวง เมฆสุด, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :  
ผศ.ดร. ประพันธ์ คุชฌารา, 125 หน้า.

แก๊ซซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้ในการแปรสภาพขยะพลาสติกให้อยู่ในรูปของ  
เชื้อเพลิงแก๊สที่มีประสิทธิภาพ โดยในปัจจุบันพบว่าขยะพลาสติกสามารถใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการ  
แก๊ซซิฟิเคชันได้ เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง อย่างไรก็ตามขยะพลาสติกมักประกอบด้วยพลาสติกหลาย  
ชนิดปะปนกัน และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพลาสติกผสมดังกล่าวมีการเกิดอันตรกิริยาในระหว่าง  
กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่าง  
กระบวนการแก๊ซซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม ทั้งกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
NiO/dolomite ภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที โดย  
พลาสติกที่นำมาศึกษา ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
(LDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) นอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทำการวิเคราะห์หาอิทธิพลของ  
ชนิดพลาสติกที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยผลการทดลองแก๊ซ  
ซิฟิเคชันพลาสติกชนิดเดี่ยวทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง  
สามารถผลิตแก๊สได้มากที่สุด ในขณะที่พอลิสไตรีนสามารถผลิตแก๊สได้ต่ำที่สุด ส่วนการแก๊ซซิฟิเคชัน  
พลาสติกผสมสองชนิดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีนผสมอยู่ด้วยจะให้  
ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีสัดส่วนน้อยมาก อย่างไรก็ตามการใช้พอลิสไตรีนในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่  
มากกว่าครึ่ง ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการผลิตแก๊ส โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน และ  
คาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับพลาสติกที่มีพอลิสไตรีนผสมอยู่  
ก่อให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการผลิตแก๊สแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ  
คาร์บอนไดออกไซด์อย่างเห็นได้ชัดอีกด้วย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่อนิสิต.....เอกพร แจ่มกระจ่าง.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 
ปีการศึกษา.....2553.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... 

# # 5172565623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS : GASIFICATION / MIXED PLASTIC / INTERACTION

EKAPORN JAMKRAJANG : STEAM/O<sub>2</sub> GASIFICATION OF MIXED PLASTIC IN  
FIXED BED REACTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. LURSUANG  
MEKASUT, Dr. Ing., THESIS COADVISOR : ASST.PROF. PRAPAN  
KUCHONTHARA, Ph.D., 125 pp.

Gasification is one of promising ways to obtain useful gaseous fuel from plastic wastes. Plastic waste is considered as a good feedstock for the gasification, due to its high calorific value. Typically, plastic waste is a mixture of various types of plastics. There are a previous literatures mentioned about interaction of mixed plastic during thermal decomposition processes. This research attempted to explore interaction of mixed plastic in steam/O<sub>2</sub> gasification with and without the presence of NiO/dolomite catalyst. Experiments were carried out in a drop tube fixed bed reactor at 850°C for 60 min. Four types of plastics, including HDPE, LDPE, PP and PS, were used in this work. Moreover, effect of plastic type on gas yield and gas composition was investigated. The results of gasification of a single plastic with and without catalyst indicated that HDPE gave the highest gas yield while PS gave the lowest. In case of gasification of mixed plastic, the mixture with the presence of PS exhibited less gas production. However, the presence of PS more than half showed positive interaction on overall gas production, especially H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. Moreover, the positive interaction was observed to become more dominant when NiO/dolomite catalyst was used.

Department : .....Chemical Technology..... Student's Signature : *Ekaporn Jamkrajang*...  
Field of Study : ....Chemical Technology.... Advisor's Signature : *L. S. U.*...  
Academic Year : ..... 2010..... Co-advisor's Signature : *Prapan Kuchonthara*...

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อย่างเอาใจใส่ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก โครงการพัฒนา บัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำ วิทยานิพนธ์ ทุนสนับสนุนกลุ่มวิทยานิพนธ์เพื่อการตีพิมพ์เผยแพร่ และผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความ สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ในการสร้างซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดลองและ ห้องปฏิบัติการ และที่ขาดไม่ได้เลยคือ ขอขอบคุณพี่ สุภชิตา เกริกไกววัล สำหรับคำแนะนำ ข้อคิดเห็น และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ยาย และตาผู้เป็นที่รัก รวมถึงญาติพี่น้องและ ครอบครัวสุขสวัสดิ์ สำหรับอ้อมกอดและกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ ตลอดจนให้การสนับสนุนจนสำเร็จ การศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนสำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือและ คำแนะนำที่ดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ขยะมูลฝอยชุมชน.....	5
2.2 พลาสติก.....	7
2.3 เทคโนโลยีการรีไซเคิลพลาสติก.....	15
2.4 หลักการแปรรูปพลาสติก.....	19
2.5 กระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	20
2.6 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	26
2.7 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	27
2.8 การทำแก๊สให้สะอาด.....	30
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	47
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	52

บทที่	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง.....	52
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1 อิทธิพลของชนิดพลาสติก.....	56
4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์.....	63
4.3 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ และออกซิเจนของพลาสติกผสม.....	71
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก.....	106
ภาคผนวก ข.....	108
ภาคผนวก ค.....	111
ภาคผนวก ง.....	115
ภาคผนวก จ.....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซท.....	9
2.2	ชนิด สูตรโครงสร้าง อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting point temperature, $T_m$ ) ของพลาสติก.....	15
2.3	สิ่งเจือปนในแก๊สและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด.....	30
2.4	ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ.....	39
3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	50
ก1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก.....	106
ก2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก.....	106
ข1	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ.....	108
ค1	ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard).....	111
ค2	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	112
ง1	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพอลิพรอพิลีน.....	115
จ1	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	117
จ2	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	118
จ3	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	119
จ4	จ4 ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	120
จ5	จ5 ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite).....	121
จ6	จ6 ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite)..	122

ตารางที่		หน้า
๑7	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:3 ร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite).....	123
๑8	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 3:1 ร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite).....	124



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1	สัดส่วนของขยะพลาสติกที่พบในประเทศไทย..... 7
2.2	พลาสติก..... 9
2.3	พอลิเอทิลีนเทอแรพลาเลตและสัญลักษณ์..... 11
2.4	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์..... 11
2.5	พอลิไวนิลคลอไรด์และสัญลักษณ์..... 12
2.6	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์..... 13
2.7	พอลิพรอพิลีนและสัญลักษณ์..... 13
2.8	พอลิสไตรีนและสัญลักษณ์..... 14
2.9	พลาสติกอื่นๆ และสัญลักษณ์..... 15
2.10	แผนผังประเภทของการรีไซเคิล..... 18
2.11	ปฏิกิริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซิฟิเคชัน..... 20
2.12	เตาผลิตแก๊สแบบต่าง ๆ..... 29
2.13	บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว..... 34
2.14	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์..... 37
2.15	การดูดซับลักษณะต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ..... 40
2.16	แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation..... 42
3.1	แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง..... 48
3.2	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง..... 49
3.3	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 49
4.1	ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที..... 56
4.2	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที..... 57

ภาพประกอบที่	หน้า
4.3 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	58
4.4 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน พลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	60
4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	62
4.6 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	63
4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	64
4.8 อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	66
4.9 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	67
4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	68

ภาพประกอบที่	หน้า
4.11 อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	70
4.12 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	72
4.13 การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE).....	74
4.14 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	76
4.15 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	78
4.16 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	80

ภาพประกอบที่	หน้า
4.17 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	82
4.18 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	84
4.19 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	87
4.20 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	89
4.21 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	90
4.22 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	92

ภาพประกอบที่	หน้า
4.23	
เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สเอทิลีนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	93
ก1	
การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนแก่พลาสติก ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	107
ก2	
อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของพลาสติก ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	107
ข1	
ผลการวิเคราะห์ธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับด้วยเทคนิค EDX.....	109
ข2	
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%NiO/dolomite ด้วยเทคนิค XRD.....	110
ค1	
โครมาโทแกรมของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard).....	111

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศไทยทั้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้พลังงานของประชากรในช่วงที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ส่งผลให้มีความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และในขณะเดียวกันยังส่งผลให้เกิดปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากการสำรวจของกระทรวงพลังงาน พบว่าปัจจุบันมีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นทั่วประเทศมากถึง 14 ล้านตันต่อปี และในจำนวนนี้มีขยะประเภทพลาสติกตกค้างในระบบมากถึง 1 ใน 3 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด และมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พลาสติกเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์มากมาย นอกจากนี้พลาสติกยังสามารถรีไซเคิลได้ง่ายและมีราคาถูก เมื่อพลาสติกหมดอายุการใช้งานแล้ว จะกลายเป็นขยะ ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในระยะเวลาอันสั้น และหากนำไปกำจัดด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การเผาทำลาย และการฝังกลบ ก็จะเป็นการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

การนำเอาขยะพลาสติกกลับมาหมุนเวียนใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยกระบวนการเคมีเชิงความร้อน (Thermochemical process) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก ทั้งยังทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งในรูปของสารป้อนและพลังงานด้วย กระบวนการเคมีเชิงความร้อนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแกซิฟิเคชัน (Gasification) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนผสมกันอยู่หลายชนิด ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการกลั่นแยกก่อนที่จะนำไปใช้งานได้ ในขณะที่กระบวนการแกซิฟิเคชันนั้นสามารถแปรสภาพขยะพลาสติกให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊สที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ประกอบกับการที่พลาสติกเป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับขยะชุมชนชนิดอื่น ดังนั้นการแปรรูปพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อผลิตพลังงานจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติกดังกล่าวได้



กระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นกระบวนการในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วนของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน พลาสติก และชีวมวล ในเตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ที่มีการป้อนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (Gasifying agent) เช่น ออกซิเจน อากาศ หรือไอน้ำ ในปริมาณที่จำกัดเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วย มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ด้วย ซึ่งเชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ หรือใช้เป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสารเคมีที่สำคัญ เป็นต้น ดังนั้นการนำขยะพลาสติกจากแหล่งทิ้งขยะชุมชนมาเป็นสารป้อนสำหรับผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะพลาสติกที่ประเทศไทยกำลังประสบอยู่

อย่างไรก็ตามการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากขยะพลาสติกยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร เนื่องจากให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สต่ำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบในพลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารระเหยได้ (Volatile) มากถึงร้อยละ 95 จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวมากกว่าแก๊ส การใช้ภาวะดำเนินการที่เหมาะสมและตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยสามารถปรับปรุงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สให้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำแกซีฟิเคชันของพลาสติกผสมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สต่ำกว่าค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักจากผลการแกซีฟิเคชันพลาสติกแต่ละชนิด ดังนั้นความเข้าใจต่ออันตรกิริยาเชิงเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สจากขยะพลาสติกจากแหล่งทิ้งขยะชุมชน

โครงการวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับดีไลไมต์ นอกจากนี้ยังวิเคราะห์อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดเพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการวางแผนทางการคัดแยกชนิดของขยะพลาสติกก่อนนำมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊สอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม
2. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับไดโลไมต์ต่ออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของพลาสติกทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้
2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation)
3. ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาแกซีพีเคชั่นเม็ดพลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)
4. ศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกชนิดเดียวและพลาสติกผสมด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
5. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแตกตัวของทาร์และอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
6. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

## 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการวิจัย
3. วางแผนการทำวิจัย

4. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite) ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation)
5. ทำการทดลองแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนพลาสติกทั้งในกรณีชนิดเดียว และผสมสองชนิด ด้วยอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
6. ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการสลายตัวของพลาสติก โดยทำการทดลองแกซีฟิเคชันพลาสติกดังเช่นข้อที่ 5 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์
7. วิเคราะห์องค์ประกอบและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี
8. อธิบายอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในสารป้อน
9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

มีองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการวางแผนทางในการคัดแยกชนิดของขยะพลาสติกก่อนนำมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊สอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ขยะมูลฝอยชุมชน (Municipal Solid Waste)

##### 2.1.1 นิยาม

ขยะมูลฝอยชุมชน หมายถึง เศษของเหลือใช้ที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของคนในชุมชน รวมถึงเศษวัสดุก่อสร้าง โดยไม่รวมของเสียอันตรายและขยะมูลฝอยติดเชื้อ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ขยะอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “ขยะเปียก” เช่น เศษอาหาร เศษพืชผัก เปลือกผลไม้ เป็นต้น ขยะพวกนี้มีความชื้นสูง และสามารถเน่าเปื่อยง่าย
2. ขยะที่ย่อยสลายได้ยาก หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “ขยะแห้ง” เช่น กระดาษ กระจกพลาสติก ขวดแก้ว กระจังโลหะ เศษผ้า เศษไม้ ยาง เป็นต้น ขยะพวกนี้เน่าเปื่อยได้ยากหรืออาจไม่เน่าเปื่อย

##### 2.1.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยชุมชน

องค์ประกอบและคุณสมบัติของขยะมูลฝอยในแต่ละชุมชนก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของภูมิอากาศ และพฤติกรรมทางเศรษฐกิจสังคม วิถีชีวิต ตลอดจนอุปนิสัยและแบบแผนในการบริโภคของแต่ละชุมชน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

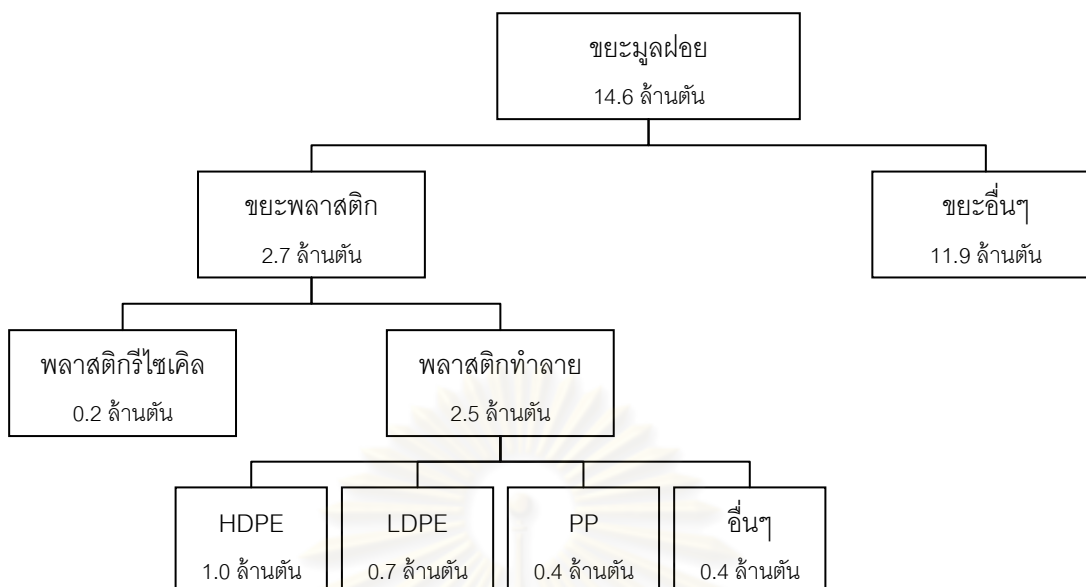
1. เศษอาหาร และเศษผัก ผลไม้ (garbage)
2. กระดาษ (paper)
3. พลาสติกและโฟม (plastic and foam)
4. ยาง (rubber)
5. หนัง (leather)
6. ผ้า (textile)
7. ไม้ (wood)

8. แก้ว (glass)
9. โลหะ (metal)
10. หิน และกระเบื้อง (stone and ceramic)

### 2.1.3 ปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทย (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

จากการสำรวจของกระทรวงพลังงานในปี พ.ศ. 2551 พบว่าปัจจุบันมีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นทั่วประเทศมากถึง 14 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ 40,000 ตันต่อวัน ในขณะที่ขีดความสามารถในการกำจัดขยะไม่ว่าจะเป็นการรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การฝังกลบ การส่งเข้าเตาเผา ก็ยังไม่สามารถจัดการกับปัญหาขยะได้ทั้งหมด ซึ่งในจำนวนนี้มีขยะพลาสติกตกค้างในระบบมากถึงร้อยละ 30 ของขยะที่รอการกำจัด ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าปริมาณการใช้พลาสติกในปัจจุบันมีการใช้ในปริมาณที่สูง และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคต เนื่องจากมีการใช้พลาสติกเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์มากมาย ไม่ว่าจะเป็นใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ในครัวเรือน เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์การเรียน ชิ้นส่วนรถยนต์ แทบทุกอย่างที่เราสัมผัสในชีวิตประจำวัน ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับพลาสติกแทบทั้งสิ้น เมื่อพลาสติกหมดอายุการใช้งานแล้วจะกลายเป็นขยะ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้ย่อยสลายได้ยากและต้องใช้เวลาอันนับร้อยปี แม้ว่าจะมีความพยายามศึกษาถึงวิธีการกำจัดขยะพลาสติกที่มีประสิทธิภาพ แต่ก็ยังไม่สามารถจัดการได้ทั้งหมด ทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา

รูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นข้อมูลจากศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระบุว่าขยะพลาสติกทั้งหมดที่พบในประเทศไทยมีประมาณ 2.7 ล้านตัน และมีขยะพลาสติกถึง 2.5 ล้านตันที่ถูกนำไปทำลาย แต่เนื่องจากการทำลายด้วยวิธีการเผาทำให้เกิดมลพิษ จึงเลือกใช้วิธีฝังกลบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งขยะพลาสติกที่ถูกทำลายนั้นประกอบด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) คิดเป็นร้อยละ 39.54 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) คิดเป็นร้อยละ 29.20 พอลิพรอพิลีน (PP) คิดเป็นร้อยละ 16.10 และส่วนที่เหลือเป็นพลาสติกชนิดอื่นๆ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15.16 โดยมีขยะพลาสติกเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลคิดเป็นปริมาณเพียง 0.2 ล้านตันเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องการคัดแยก การทำความสะอาด รวมไปถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และราคาตลาดที่ไม่แน่นอน



รูปที่ 2.1 สัดส่วนของขยะพลาสติกที่พบในประเทศไทย

## 2.2 พลาสติก (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์)

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น ในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์คุ้นเคยและใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้ล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัดุดิบใหม่ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ

### 2.2.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของพลาสติก

พลาสติกจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ มีสมบัติอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนจึงทำให้สามารถหลอมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายหลายรูปแบบ และยังเป็นวัสดุเอนกประสงค์ที่มีประโยชน์สามารถใช้แทนวัสดุอื่นได้นานับประการ ซึ่งประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น การศึกษาชนิดของพลาสติกทำได้โดยการตรวจสอบสมบัติบางประการ เช่น ความเหนียว ความแข็ง ความทนทานต่อการขีดข่วน ความหนาแน่น การละลาย

และการเผาไหม้ เป็นต้น พลาสติกต่างชนิดกันย่อมมีสมบัติแตกต่างกัน และจะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์หรือตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น เฮกเซน (Hexane) โทลูอีน (Toluene) ไชลีน (Xylene)

## 2.2.2 ประเภทและการใช้งาน

หากแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อน เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

### 2.2.2.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ซึ่งอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) และหลอมเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ทำให้เทอร์โมพลาสติกสามารถไหลตัวได้เมื่อมีการให้ความร้อนและความเค้น (stress) กับพอลิเมอร์นั้น นอกจากนี้พอลิเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกยังสามารถแข็งตัวกลับมาเป็นของแข็งหรือบางครั้งอาจมีลักษณะคล้ายยางเมื่อมันเย็นตัวลง เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างแบบสองมิติเท่านั้น ดังนั้นพอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถหลอมกลับมาใช้งานใหม่ (recycle) ได้หลายครั้ง อย่างไรก็ตามการผ่านกระบวนการทางความร้อนในแต่ละครั้งจะทำให้คุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ของพอลิเมอร์ลดลง

### 2.2.2.2 เทอร์โมเซต (Thermosetting)

นอกเหนือจากเทอร์โมพลาสติกแล้ว เทอร์โมเซตเป็นพอลิเมอร์อีกประเภทหนึ่งซึ่งสามารถอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและสามารถทำให้ไหลตัวภายใต้การใส่แรงเค้นเพียงครั้งเดียวเท่านั้น พอลิเมอร์ชนิดนี้เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วจะไม่สามารถหลอมตัวกลับเป็นของเหลวหรือไหลตัวใหม่ได้อีกเมื่อมันได้รับความร้อนเป็นครั้งที่สอง นั่นคือความร้อนทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดปฏิกิริยาการสุก (curing reaction) เทอร์โมเซตเมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลขึ้นเป็นร่างแห (network) ที่แข็งแรง ซึ่งพันธะเหล่านี้จะเชื่อมโยงแต่ละโมเลกุลเข้าด้วยกันกลายเป็นโครงสร้างสามมิติหรือมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (network of molecules) โครงสร้างดังกล่าวรักษาให้เทอร์โมเซตมีความคงทนต่อการหลอมตัวอีก

ครั้ง การให้ความร้อนกับพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซตซึ่งผ่านการขึ้นรูปแล้วจะทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดการไหม้กลายเป็นถ่าน หรือในบางกรณีเทอร์โมเซตอาจเกิดการเสื่อมสลาย (degradation) ซึ่งเรามักได้กลิ่นไหม้จากวงจรไฟฟ้าเมื่อมีไฟฟ้าลัดวงจรเกิดขึ้น

การแบ่งประเภทของพลาสติก นอกจากจะพิจารณาสมบัติของพลาสติกเมื่อถูกความร้อนแล้วยังต้องพิจารณาจากความหนาแน่น ลักษณะการติดไฟ และการละลายในตัวทำละลายอื่นๆ ซึ่งสามารถแยกความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซต
1. เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่ง	1. เป็นพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห
2. อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	2. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน
3. ต้องทำให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ	3. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์	4. เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์
5. นำมารีไซเคิลโดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้

### 2.2.3 ความหมายของพลาสติก

คำว่า "พลาสติก" และ "พอลิเมอร์" มีความหมายเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "พอลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ เช่น ถัง งาน และชิ้นพลาสติก วัสดุสังเคราะห์และท่อที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พลาสติก

(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)



### 2.2.3.1 ขอบเขตที่ใช้สำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก มี 3 ชนิดคือ

1. ผง (Powder)
2. เม็ด (Pellet & Garnule)
3. ของเหลว (Liquid)

### 2.2.3.2 พลาสติกมีแหล่งกำเนิดจาก 5 แหล่งคือ

1. ผลิตผลทางการเกษตร เช่น เซลลูโลสในเตตรต, เซลลูโลสอะซิเตต
2. ผลิตผลทางการเกษตรและน้ำมัน ซึ่งมีน้อยมาก เช่น พูราน
3. น้ำมันและถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งใช้ผลิตพลาสติกชนิดต่างๆ ได้มากที่สุด เช่น พอลิเอทิลีน, พอลิสไตรีน
4. น้ำมันและสินแร่ เช่น Polyvinyl Butyral , Polyvinyl Carbazole
5. สินแร่มีน้อย เช่น Calcium Aluminum Silicate

อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมแทบทั้งสิ้น หรือประมาณร้อยละ 90 และน้ำมันปิโตรเลียมที่ผลิตพลาสติกใช้เพียงร้อยละ 1 ของน้ำมันที่ผลิตได้รวมกันทั่วโลก พลาสติกแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นต่างกัน จึงมีการใช้สัญลักษณ์เพื่อช่วยในการเลือกพลาสติกชนิดต่างๆ และช่วยในการแยกพลาสติกในกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเราสามารถแยกชนิดของพลาสติกได้ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 2.2.4 ชนิดของพลาสติก

### 2.2.4.1 พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET)

พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (PET) มีสัญลักษณ์คือ 1 เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความใส มองทะลุได้ มีความแข็งแรงทนทานและเหนียว ทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย ป้องกันการผ่านของแก๊สได้ดี มีอุณหภูมิหลอมเหลว 250-260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.38-1.39 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดน้ำปลา ขวดน้ำมันพืช และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ขวดพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สได้เป็นอย่างดีจึงใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำอัดลม แสดงดังรูปที่ 2.3 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน หรือเส้นใยสำหรับเล่นสกี

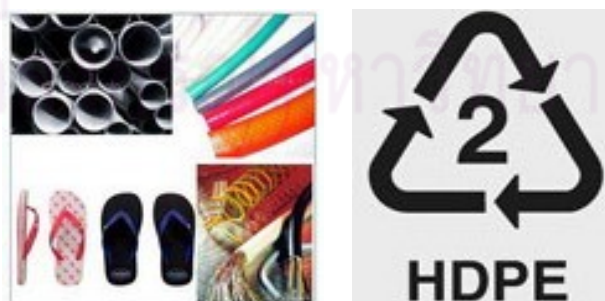


รูปที่ 2.3 พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตและสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

#### 2.2.4.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สัญลักษณ์คือ 2 เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง โครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรง ค่อนข้างแข็ง มีความเหนียวไม่แตกง่าย ทนสารเคมี มีอุณหภูมิหลอมเหลว 130 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.95-0.92 ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ถูร้อนชนิดขุ่น ขวดนม รองเท้า ส่วนใหญ่ทำให้มีสีสันทสวยงาม แสดงดังรูปที่ 2.4

นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี และสามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นขวดต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน



รูปที่ 2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

### 2.2.4.3 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride), PVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) สัญลักษณ์คือ 3 เป็นพลาสติกที่มีลักษณะแข็งแรง และสามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ มีสีใสสวยงาม มีอุณหภูมิหลอมเหลว 75-90 องศาเซลเซียส เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก เช่น ท่อพีวีซี สายยาง แผ่นฟิล์มห่ออาหาร ใช้ทำสายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ขวดใส่แชมพูสระผมแสดงดังรูปที่ 2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นพลาสติกที่มีสมบัติหลากหลาย สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกมาก เช่น ประตู หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม นอกจากนี้พอลิไวนิลคลอไรด์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ หรือม่านพลาสติก



รูปที่ 2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์และสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

### 2.2.4.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สัญลักษณ์คือ 4 เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความเหนียว ยืดตัวได้ในระดับหนึ่ง ส่วนใหญ่ มีความใส มองเห็นได้ อุณหภูมิหลอมเหลว 110 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.92-0.94 นิยมนำมาใช้ทำแผ่นฟิล์ม ห่ออาหาร ถุงใส่ขนมปัง และขวดยาหรือขวดน้ำกั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้วหรือถังขยะ



รูปที่ 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

#### 2.2.4.5 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

พอลิพรอพิลีน (PP) สัญลักษณ์คือ 5 เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ มีความแข็งและเหนียว คงรูป ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความร้อนและสารเคมี ทำให้มีสีสันสวยงามได้ มีอุณหภูมิหลอมเหลว 160-170 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90-0.91 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารในครัวเรือน เช่น ถ้วยร้อนชนิดใส อุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด ก่อง ถัง ตะกร้า หรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น จาน ชาม แสดงดังรูปที่ 2.7 นอกจากนี้พอลิพรอพิลีนสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นก่องแบตเตอรี่รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับน้ำมัน



รูปที่ 2.7 พอลิพรอพิลีนและสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

#### 2.2.4.6 พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

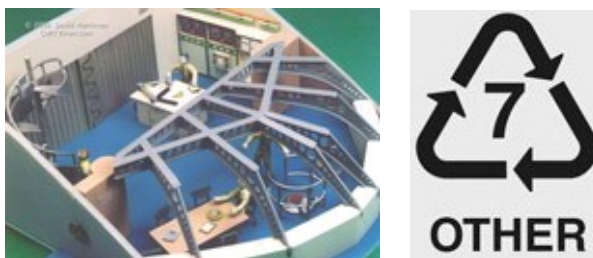
พอลิสไตรีน (PS) สัญลักษณ์คือ 6 เป็นพลาสติกที่มีความใส แข็งแต่เปราะ แตกง่าย ราคาถูก มีอุณหภูมิหลอมเหลว 70-115 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90-0.91 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องไอศกรีม ตลับเทปเพลง กล่องโฟม แสดงดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากพอลิสไตรีนเปราะและแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักที่เบามาก ซึ่งประกอบด้วยพอลิสไตรีนประมาณร้อยละ 2-5 เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง นอกจากนี้พอลิสไตรีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัด หรือของใช้อื่นๆ



รูปที่ 2.8 พอลิสไตรีนและสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

#### 2.2.4.7 พลาสติกอื่นๆ (Others)

ปัจจุบันเรามีพลาสติกหลายชนิดให้เลือกใช้ พลาสติกที่ใช้ในครัวเรือนส่วนใหญ่สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อหลอมใช้ใหม่ได้ การมีสัญลักษณ์ตัวเลข ทำให้เราสามารถแยกพลาสติกออกเป็นชนิดต่างๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น สำหรับพลาสติกในกลุ่มที่ 7 เป็นพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พลาสติกอื่นๆ และสัญลักษณ์  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

นอกจากมีตัวเลขระบุแล้ว ควรใส่สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษระบุชนิดของพลาสติกนั้นๆ ไว้ เพื่อสะดวกในการแยกและนำกลับมารีไซเคิล เช่น พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ซึ่งชนิดและสูตรโครงสร้างสามารถแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิด สูตรโครงสร้าง อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting point temperature,  $T_m$ ) ของพลาสติก

พลาสติก	สูตรโครงสร้าง	สูตรโมเลกุล	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต, PET		$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	75	260
พอลิเอทิลีน, PE		$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$	-80	144-152
พอลิไวนิลคลอไรด์, PVC		$(\text{CH}_2-\text{CHCl})_n$	82	100-260
พอลิพรอพิลีน, PP		$(\text{C}_3\text{H}_6)_n$	-10	-160
พอลิสไตรีน, PS		$(\text{C}_8\text{H}_8)_n$	95	240

### 2.3 เทคโนโลยีการรีไซเคิลพลาสติก

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้อย่างมากมาย จากปริมาณการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะนอกจากจะช่วย

ลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย การพัฒนาทางเทคโนโลยี การรีไซเคิลพลาสติกในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling)

### 2.3.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ

เป็นการนำเศษพลาสติกประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อน ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือการขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่างๆ

### 2.3.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอม และขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค ดังนี้

#### 2.3.2.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกคือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลงปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในเกรดพรีเมียมสูงสุด และมีราคาถูกลงเรื่อยๆ ไม่คุ้มต่อการลงทุน ซึ่งมีสาเหตุสำคัญมาจากมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก อนุภาคเล็กๆ หรือ เศษแก้วทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือ มีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการ

หลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง

### 2.3.2.2 การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification)

เนื่องจากเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดกรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า Compatibilizer

### 2.3.2.3 การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Co-extrusion and Co-injection molding)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุดิยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนวิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดี

## 2.3.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

### 2.3.3.1 การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical recycling)

เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลในโครงสร้างพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerization) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกจะได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูง



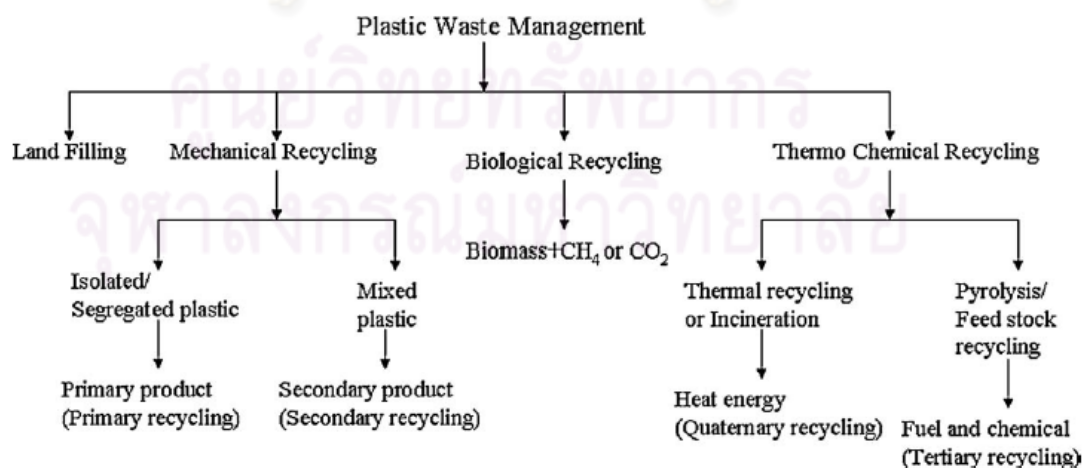
### 2.3.3.2 การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

โครงสร้างของพอลิเมอร์สามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน เรียกว่า Thermolysis แบ่งออกได้ 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจนบางส่วน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

### 2.3.4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ

พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

แม้ว่าทุกวันนี้การรีไซเคิลพลาสติกยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก แต่ก็กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่เราให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะสามารถจัดการขยะที่เป็นพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง อย่างไรก็ตามพลาสติกเพทที่จะนำมารีไซเคิลทางความร้อนก็ควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก



รูปที่ 2.10 แผนผังประเภทของการรีไซเคิล (Panda et al., 2010)

## 2.4 หลักการแปรรูปพลาสติก

### 2.4.1 ไพโรไลซิสหรือคาร์บอนไนเซชัน (Pyrolysis หรือ Carbonization)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะจำกัดปริมาณออกซิเจน โดยภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว คือ ถ่านชาร์ (Char coal) และการไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันดินหรือทาร์ (Tar) น้ำมัน (Oil) ถ่านชาร์ (Charcoal) และผลิตภัณฑ์แก๊ส ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน ( $C_1-C_4$ ) เป็นหลัก

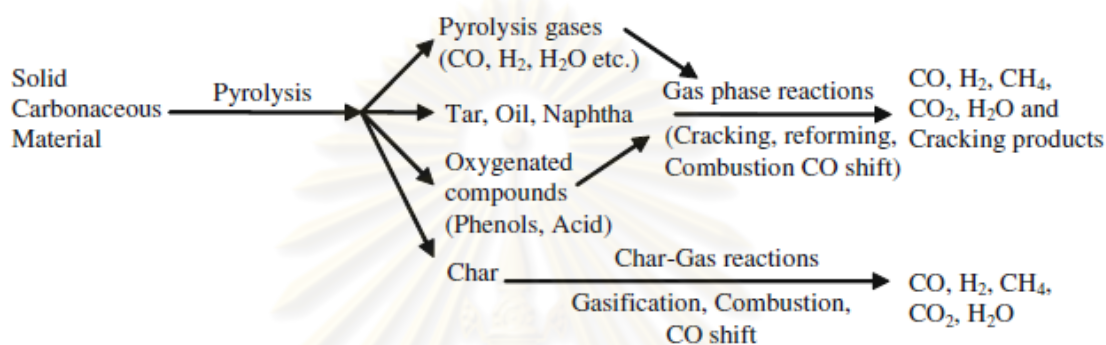
### 2.4.2 การเผาไหม้ (Combustion)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้า ภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการใช้อากาศที่จุน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือคาร์บอน (C)

### 2.4.3 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

เป็นกระบวนการการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักกับอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ส่วนใหญ่ใช้ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิช่วง 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันดินหรือทาร์ (tar) ผลิตภัณฑ์ของแข็งถ่านชาร์ (char coal) และผลิตภัณฑ์แก๊ส (producer gas) โดยทั่วไปเชื้อเพลิงแข็งเหล่านี้จะมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน แต่อาจแตกต่างกันตรงสัดส่วนผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

กระบวนการแกซีฟิเคชันประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกเป็นการไพโรไลซิสของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (solid carbonaceous material) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นภายในระยะเวลาอันสั้น และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส ทาร์ และถ่านชาร์ ส่วนขั้นที่สองเป็นการแกซีฟิเคชันทาร์ โดยการทำปฏิกิริยาสันดาปต่อที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ถ่านชาร์ยังทำปฏิกิริยากับอากาศ ออกซิเจนหรือไอน้ำ ทำให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซีฟิเคชัน (Ahmed et al., 2009)

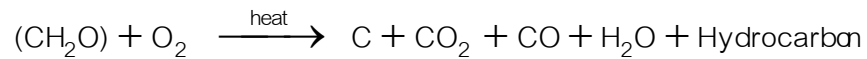
## 2.5 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

### 2.5.1 นิยาม

กระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วนของเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ชีวมวล รวมทั้งพลาสติก โดยใช้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ที่มีสารป้อนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (Gasifying agent) เช่น ออกซิเจน อากาศ หรือไอน้ำ ในปริมาณที่จำกัดเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วย มีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ

## 2.5.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้เป็น

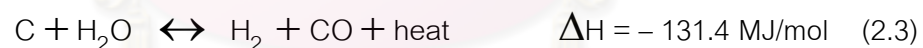


นอกจากนี้ยังมีปฏิกริยาทุติยภูมิ (Secondary reaction) ที่เกิดต่อเนื่อง ได้แก่

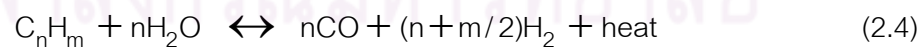
- ถ่านชาร์และไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นปฏิกริยาคายความร้อน ซึ่งสามารถนำความร้อนที่ได้จากปฏิกริยาดังกล่าวมาเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ปฏิกริยาอื่นๆ ได้ด้วย



- ปฏิกริยา Water gas ซึ่งเป็นปฏิกริยาเกิดขึ้นระหว่างถ่านชาร์หรือคาร์บอนกับไอน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน



- ปฏิกริยา Reforming ด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Steam reforming of hydrocarbon) เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



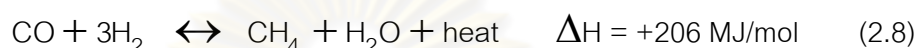
- ปฏิกริยา Boudouard (Boudouard) ซึ่งเป็นปฏิกริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านชาร์หรือคาร์บอนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน



- ปฏิกิริยาชิฟท์ ( Water Gas Shift) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



- ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สมีเทน (Methanation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



ปฏิกิริยาที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งปัจจัยหลักที่กำหนดการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว คือ อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ถ้า residence time ในบริเวณ hot zone ของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไป หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดการสั่นดาบและจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นที่บริเวณ reduction zone เป็นทาร์

รูปแบบการใช้งานเชื้อเพลิงแก๊ส (เช่น ให้ความร้อนโดยตรง ผลิตไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ) จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊ส การกำจัดปริมาณของทาร์และฝุ่นละอองในเชื้อเพลิงแก๊ส ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดสัดส่วนขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊ส คือ ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ สภาวะความดันและอุณหภูมิ และคุณลักษณะสารป้อน ซึ่งคุณลักษณะของสารป้อนจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านเคมีความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ในแง่ประสิทธิภาพของระบบ และคุณภาพของเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้ เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้สามารถนำไปเผาในกังหันแก๊ส เครื่องยนต์สันดาปภายในหรือหม้อน้ำ

### 2.5.2.1 แก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศ (Air Gasification)

เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สพลังงานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การที่มีไนโตรเจนปริมาณมากน้อยเพียงใด ที่จะไปเจือจางเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้ เชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวเหมาะสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อจุดประสงค์ในการใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เครื่องมือควรมีการออกแบบใช้ในการเผาไหม้น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติที่ง่าย ในการนำไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข ในการเดินเตาผลิตแก๊สและประสิทธิภาพทั้งหมดของการ

เปลี่ยนให้ใกล้เคียงกับการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 70-80 ถ้าใช้เครื่องมือที่ออกแบบดี สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ เชื้อเพลิงแก๊สจะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้ง กังหันแก๊ส (Gas turbine) และเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator)

### 2.5.2.2 แก๊สซิฟิเคชันด้วยออกซิเจน (Oxygen Gasification)

เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ จะให้เชื้อเพลิงแก๊สที่มีพลังงานสูงกว่าการใช้อากาศ เชื้อเพลิงแก๊สนี้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจน หรือเรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) เพราะว่าแก๊สนี้สามารถให้ความร้อนหรือใช้สังเคราะห์เมทานอล แอมโมเนียและสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ใช้มีราคาสูง และยังต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกในการแยกออกซิเจนจากอากาศ

### 2.5.2.3 แก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (Steam Gasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำเชื้อเพลิงแก๊ส

### 2.5.2.4 แก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carboxygasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

### 2.5.2.5 แก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตแก๊สมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดซัลฟิวไรด์ที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่ต้องการให้เกิดในการแก๊สฟายมาก แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากจะมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม

### 2.5.2.6 ปฏิกริยาชิฟท์ (Water Gas shift reaction)

เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

### 2.5.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำและสารระเหย รวมทั้งแก๊สต่างๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยทาร์และซาร์จะเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น (Devi et al., 2005 และ Asadullah et al., 2009) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันมี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)

#### 2.5.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือน และอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

#### 2.5.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นทาร์ องค์ประกอบของทาร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความซับซ้อน และมีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5 - C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

1. น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน
2. น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
3. น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250–300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนพทาซีน
4. น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300–350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแอนทีน
5. พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไซ ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

#### สมบัติทางเคมีของทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly oxygenate pyrolyzate ไปเป็น Less oxygenate pyrolyzate และมีความคงที่ของอุณหภูมิมากกว่า (Thermally highly aromatic structure stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก

#### 2.5.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า



## 2.6 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส

ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สซิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

### 2.6.1 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value gas or Low Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ  $3.3-5.6 \text{ MJ/m}^3$  ( $90-150 \text{ Btu/SCF}$ ) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของท่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้ (Donald et al., 1988)



### 2.6.2 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value gas or Medium Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าความร้อนประมาณ  $9.3-20.5 \text{ MJ/m}^3$  ( $250-550 \text{ Btu/SCF}$ ) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน (Partial oxidation) การที่ไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สูงขึ้น

### 2.6.3 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value gas or High Btu gas)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้เทียบเท่ากับแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas, SNG) โดยส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นแก๊สมีเทนเกือบบริสุทธิ์ โดยเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการเกิดมีเทน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ



## 2.7 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasifiers)

เมื่อแบ่งเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊สตามทิศทางการไหลของแก๊ส เทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

### 2.7.1 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลขึ้นของแก๊สสังเคราะห์ (Updraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้เป็นแบบที่ใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเครื่อง ส่วนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน และ/หรือไอน้ำ) จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างและไหลขึ้นสวนทางกับเชื้อเพลิง แสดงในรูปที่ 2.12 (ก) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า Combustion zone หรือ Oxidation zone เมื่ออากาศผ่านเข้าไปที่บริเวณ Combustion zone จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับแก๊สร้อนที่มาจาก Combustion zone ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะถูกส่งผ่านไปยัง Reduction zone ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ขึ้นต่อไป

เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกิริยามีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและทาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับเชื้อเพลิงแก๊สที่เกิดขึ้น ดังนั้นเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นจะมีปริมาณของทาร์มาก บางครั้งอาจถึงร้อยละ 20 ของทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น มีอุณหภูมิต่ำและไม่สูงนักและมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและทาร์มาก ทำให้มีค่าความร้อนมากจำเป็นต้องมีหน่วยทำความสะอาดเชื้อเพลิงแก๊สก่อนนำเชื้อเพลิงไปหมუნกักเก็บแก๊ส ข้อดีหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น คือ ติดตั้งง่ายและมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

### 2.7.2 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์ (Downdraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดทาร์ในเชื้อเพลิงแก๊สโดยเฉพาะอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง แสดงในรูปที่ 2.12 (ข) ผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณของการเผาไหม้แก๊สที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้จะถูกรีดิวส์ ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อยขณะเดียวกันในชั้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และทาร์ที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ร้อน ทำให้ทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดอุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิริยาาคูดความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของทาร์ลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของทาร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) และเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จะสะอาดกว่า

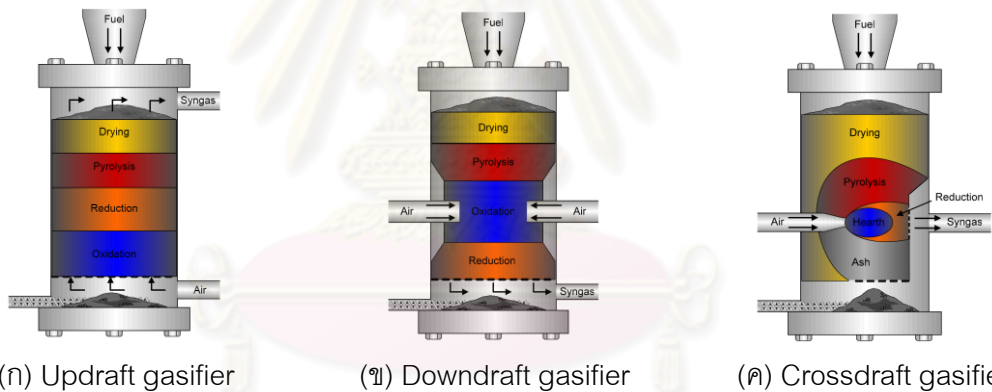
การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยเตาผลิตแก๊สที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์นี้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสำหรับเชื้อเพลิงที่ได้ (มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30) เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณทาร์ต่ำ ดังนั้นเตาผลิตแก๊สดังกล่าวจึงเหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 500 กิโลวัตต์

### 2.7.3 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลแบบขวาง (Crossdraft gasifier)

เชื้อเพลิงถูกป้อนทางด้านบน ส่วนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (Gasifying agent) จะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างและไหลผ่านเชื้อเพลิง ได้แก๊สสังเคราะห์ทางด้านตรงข้าม แสดงในรูปที่ 2.12 (ค) อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดที่อยู่ในแนวราบ ส่วนบริเวณ Combustion จะอยู่ถัดหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณ Reduction แก๊สที่ออกจากบริเวณนี้แล้วจะเป็นบริเวณสลายทาร์ และทาร์ที่ได้จากบริเวณการกลั่นสลายนี้จะผ่านบริเวณ Reduction ก่อนที่ออกสู่ภายนอกทำให้ทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ส่งผลให้เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณทาร์ต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิกายในเตาไหลขวางมีอุณหภูมิสูงมาก รุกอากาศที่เข้าไปเตาและตะแกรงต้องใช้เวลาทำความร้อนที่ดีหรือมีการหล่อเย็นที่ดี

### 2.7.4 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed gasifiers)

ปัญหาที่เกิดจากการใช้เตาผลิตแก๊สทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น คือ เกิดเถ้าหลอมเหลวเป็น สแลก (Slag) อยู่ด้านล่างซึ่งส่งผลให้ความดันลด และมีการเผาไหม้ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้หลักการของฟลูอิไดซ์เบด โดยการป้อนกระแสแก๊ส เรียกว่าสารฟลูอิไดซ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศ จะถูกป้อนที่ด้านล่างสุดของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้นจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการฟลูอิไดซ์แล้วจะเกิดฟองอากาศขึ้นในทรายและเบดเริ่มลอยขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า Bubbling Fluidized Bed (BFB) และถ้าความเร็วสูงขึ้นอีก ทรายบางส่วนจะหลุดลอยออกไป ไชโคลนจึงถูกติดตั้งเพื่อนำทรายกลับมาในขณะที่แก๊สจะไหลผ่านไชโคลนออกไปทางด้านบน และกลับมาป้อนเข้าที่ด้านล่างของเบดอีกครั้ง ลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) แสดงในรูปแบบที่ 2.12 (ง)



(ก) Updraft gasifier (ข) Downdraft gasifier (ค) Crossdraft gasifier



(ง) Bubble and Circulating Fluidized bed gasifier

รูปที่ 2.12 เตาผลิตแก๊สแบบต่าง ๆ

## 2.8 การทำแก๊สให้สะอาด (Gas Cleaning)

การทำเชื้อเพลิงแก๊สที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส ให้สะอาดนับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำเชื้อเพลิงแก๊สมาเผาไหม้ในกังหันแก๊ส เนื่องจากการกำจัดและป้องกันปัญหาด้านมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดปัญหาการเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเนื่องจากการกัดกร่อนของแก๊สกรด หรือการสึกกร่อนด้วยอนุภาคของแข็ง

เชื้อเพลิงแก๊สที่ออกจากเตาผลิตแก๊สจะมีสารเจือปน แสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งปริมาณของสารเจือปนนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแก๊สฟิเคชันและลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ใช้

ตารางที่ 2.3 สิ่งเจือปนในแก๊สและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, 2552 : ออนไลน์)

Contaminant	Examples	Problems	Cleanup method
Particulates	Ash, Char, Fluid bed materials	Erosion	Filtration, Scrubbing
Alkali metals	Sodium and Potassium compounds	Hot corrosion	Cooling, Condensation, Filtration, Adsorption
Fuel nitrogen	Mainly NH <sub>3</sub> and HCN	NO <sub>x</sub> formation	Scrubbing, SCR
Tars	Refractory aromatics	Clog ตัวกรอง, Difficult to burn, Deposit internally	Tar cracking, Tar removal
Sulfur, chlorine	H <sub>2</sub> S, HCl	Corrosion, emissions	Lime or dolomite scrubbing or absorption

### 2.8.1 Hot Gas Cleanup for Particulate

ในเชื้อเพลิงแก๊สจะมีอนุภาคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ที่มีขนาดเล็กมากซึ่งกำจัดออกได้ยากด้วยไซโคลน มีรายงานว่าไม่สามารถลดปริมาณของอนุภาคให้น้อยกว่า 5-30 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรได้โดยใช้ไซโคลนประสิทธิภาพสูง แต่ควรใช้การกรองโดย Sintered metal or ceramic filters

## 2.8.2 การแตกตัวทาร์ (Tar Cracking)

ความเข้มข้นของทาร์ในเชื้อเพลิงแก๊สจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่แก๊สฟายซึ่งความเข้มข้นของทาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณทาร์จะเป็นฟังก์ชันของชนิดของเตาผลิตแก๊ส และภาวะที่ดำเนินการนอกจากนี้ปริมาณและลักษณะเฉพาะของทาร์จะขึ้นกับเชื้อเพลิงด้วย มีรายงานว่าทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟายไม่มีปริมาณมากกว่าทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟายถ่านหิน ซึ่งทาร์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อเกิดเป็นเขม่าซึ่งจะทำให้ตัวกรองอุดตัน ซึ่งวิธีการกำจัดทาร์มี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์หรือนิกเกิล และการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) โดยวิธีออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือการสัมผัสกับความชื้นโดยตรง

### 2.8.2.1 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

มีรายงานว่าวิธีการกำจัดทาร์โดยวิธีการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมาก โดยสามารถเปลี่ยนทาร์ได้มากกว่าร้อยละ 99 โดยใช้โคบอลต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทฐานนิกเกิล (Nickel based) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

ปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ค่อยพบในตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เป็นการเกาะของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถ Reactivate ได้โดยคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแก๊สฟายเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงขึ้น

### 2.8.2.2 การแตกตัวด้วยความร้อน

ทาร์ที่ได้จากชีวมวลจะสลายตัวด้วยความร้อนยากกว่าทาร์ที่ได้จากถ่านหิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะกำจัดทาร์ด้วยวิธีบำบัดด้วยความร้อนอย่างเดียว มีหลายวิธีในการกำจัดทาร์โดยการแตกตัวด้วยความร้อน เช่น

1. เพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาที่บริเวณ Freeboard ในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไบล์แบบหมุนเวียน แต่วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วน
2. สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนพื้นผิว เป็นการลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วนเช่นกัน

3. ออกซิเดชันเพียงบางส่วนโดยเติมอากาศหรือออกซิเจน วิธีนี้จะทำให้ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพลดลง และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเติมออกซิเจน วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส และเป็นระบบแกซีฟิเคชันด้วยออกซิเจน

### 2.8.3 การกำจัดทาร์ (Tar Removal)

วิธี Water scrubbing ถือได้ว่าเป็นวิธีกำจัดทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง ทาร์และสิ่งเจือปนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีปัญหามากในการกำจัดทาร์ โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดทาร์ ในการกำจัดทาร์จำเป็นต้องใช้วิธีจับทางกายภาพให้ทาร์รวมตัวกัน (Agglomeration) หรือจับตัวกัน มากกว่าจะใช้เพียงการลดอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าทาร์จากชีวมวลนั้นรวมตัวกันยาก และจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดที่ยุ่งยากซับซ้อนในการกำจัดให้ได้ถึงร้อยละ 90

### 2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

คำว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คะตะ (cata) หมายถึง หัก (down) และไลไซน์ (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (spit or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลผลิตระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสถานะทรานสิชัน (transition state theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนสารผลผลิต คือ ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาต่ำลงนั่นเอง

### 2.9.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แต่พอจะแบ่งออกได้ดังนี้

#### 2.9.1.1 สปีชีส์ที่ว่องไว (active species)

เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วยสปีชีส์ที่ว่องไวล้วนๆ แต่ในกรณีที่สปีชีส์ที่ว่องไวเป็นสารที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวต่ำจะนิยมใช้วิธีเคลือบสปีชีส์ที่ว่องไวลงบนตัวรองรับ

#### 2.9.1.2 ตัวรองรับ (support)

มักเป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูงหน้าที่หลักของตัวรองรับ คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่สปีชีส์ที่ว่องไว นอกจากนี้ในบางกรณีจะมีอันตรกิริยา (interaction) เกิดขึ้นระหว่างตัวรองรับกับสปีชีส์ที่ว่องไว ซึ่งทำให้สปีชีส์ที่ว่องไวมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่ในบางกรณีตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาด้วย เช่น ในกรณีของ bi-functional catalyst

#### 2.9.1.3 ตัวโปรโมเตอร์ (promoter)

เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง แต่ช่วยให้สปีชีส์ที่ว่องไวทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่น ไปลดการ sintering และ fouling ลง

### 2.9.2 ตัวรองรับ (catalyst supports)

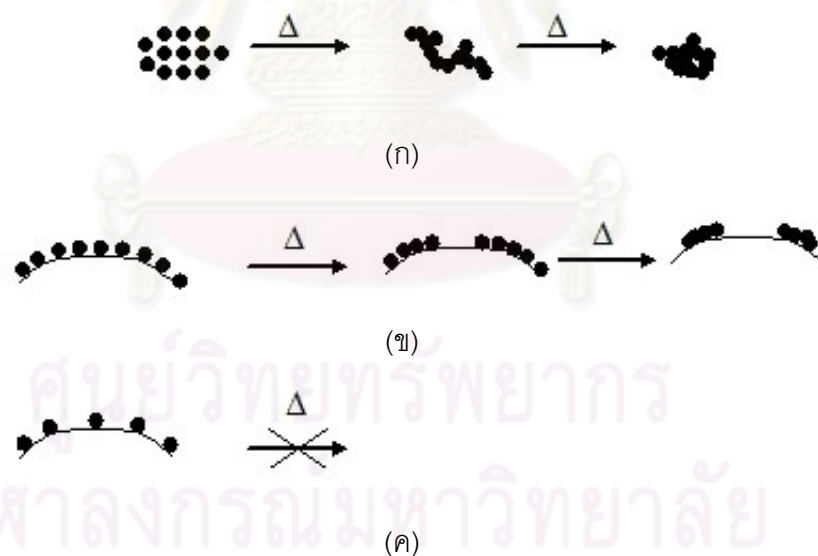
ตัวรองรับ คือ สารที่เฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น โลหะแพลทินัม สำหรับการใช้ประโยชน์สูงสุด หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อ่อน แต่อย่างไรก็ตามตัวรองรับอาจจะแสดงความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาและสภาวะของปฏิกิริยา และอาจจะทำปฏิกิริยาไปบางส่วนกับส่วนประกอบอื่นๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการผลิต เช่นเดียวกันตัวรองรับสามารถช่วยทำให้โครงสร้างที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยามีความเสถียร



การเลือกตัวรองรับจะพิจารณาจากการมีลักษณะที่ต้องการของตัวรองรับ รวมทั้งผลทางด้านเคมีและสมบัติทางกายภาพก็มีความสำคัญ

1. เชื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
2. มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ เช่น ทนต่อการขีดสี มีความแข็ง และทนต่อแรงกด
3. เสถียรภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้เพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (regeneration)
4. พื้นที่ผิว (ปกติต้องการพื้นที่ผิวสูง)
5. มีรูพรุน ประกอบด้วย ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายของขนาดรูพรุน
6. ราคาต่ำ

สิ่งที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับนอกจากจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของสปีชีส์ที่ว่องไว แล้วยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของของสปีชีส์ที่ว่องไวด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว :

- (ก) เมื่อไม่มีตัวรองรับ สปีชีส์ที่ว่องไวจะหลอมรวมตัวกันได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน
- (ข) สปีชีส์ที่ว่องไวมีความเข้มข้นสูงบนพื้นผิวของตัวรองรับ ยังมีโอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูง
- (ค) สปีชีส์ที่ว่องไวมีความเข้มข้นต่ำบนพื้นผิวของตัวรองรับ ทำให้โอกาสที่จะหลอมรวมตัวกันมีน้อย (ธราธร มงคลศรี)

### 2.9.2.1 โดโลไมต์ (Dolomite – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

โดโลไมต์ประกอบด้วย  $\text{CaCO}_3$  ร้อยละ 54.35  $\text{MgCO}_3$  ร้อยละ 45.65 หรือ  $\text{MgO}$  ร้อยละ 21.7  $\text{CaO}$  ร้อยละ 30.4  $\text{CO}_3$  ร้อยละ 47.9 โดโลไมต์เป็นแร่ที่เกิดจากตะกอนของ แคลเซียมและแมกนีเซียมทับถมกัน มีความแข็ง 2.5-4 ความถ่วงจำเพาะ 2.85

### 2.9.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (metal supported catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไปข้างหน้า (forward rate) พร้อมกันกับเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ (reverse rate) ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเข้าสู่สมดุลเคมี (chemical equilibrium) ได้เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) ของปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นสมดุลเคมีเดียวกัน

ในอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบนตัวรองรับ ด้วยเหตุผลที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดหาหรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะอยู่แยกกันอย่างเป็นอิสระเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงไม่ทำให้อนุภาคโลหะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ตัวรองรับอาจเป็นตัวโปรโมเตอร์ (promoter) ได้อีกด้วย โดยส่วนข้อดีอื่นๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนั้นๆ และระบบของปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ ชนิดของโปรโมเตอร์ และตัวพุง เป็นต้น

### 2.9.4 โลหะนิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่เดียวกับโลหะโนเบล (nobel metal) เช่น พาราเดียม (Pd) และทองคำขาว (Pt) เป็นต้น นิกเกิลเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number) 28 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 58.69 ความหนาแน่น (density) 8.910 กรัม/มิลลิลิตร จุดหลอมเหลว (melting point) 1445 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 2900 องศาเซลเซียส อิเล็กตรอน

เน็กกะติวิตี (electron negativity) 1.8 oxidation state 2.3 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ (Ar)  $3d^0 4s^2$  นิกเกิลในรูปที่เป็นก้อนของแข็งไม่สามารถติดไฟได้ แต่เมื่อทำให้เป็นเส้นลวดนิกเกิลจะสามารถติดไฟเองได้ ส่วนเม็ดขนาดเล็กของนิกเกิลจะสามารถที่จะติดไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อสัมผัสอากาศ

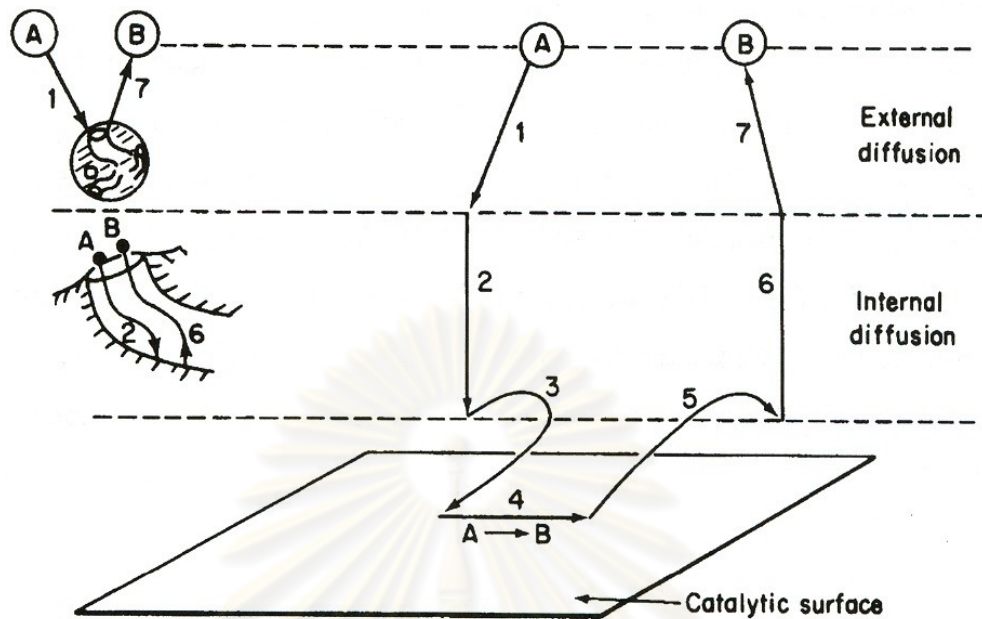
### 2.9.5 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหลที่ไหลผ่าน

ขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี และอาจกล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนที่ต้องมีในการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนขั้นตอนที่ 1, 2, 6 และ 7 นั้นเป็นขั้นตอนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเพียงแค่ขั้นตอนของการแพร่ของสาร เมื่อใดก็ตามที่ขั้นตอนของการแพร่นี้ช้ากว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีนั้นจะถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ (diffusion limited or mass transport limited) เมื่อใดก็ตามที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดยการแพร่ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ถูกใช้งานเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ถูกแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิหพันธ์ (วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา)

การควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาเนื่องจากการแพร่ของสารนั้นเกิดได้ 2 ที่ด้วยกัน คือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจากของเหลวหรือแก๊สที่ไหลอยู่รอบๆ ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามายังพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา (external mass transfer limitation) และการแพร่จากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (internal mass transfer limitation)

ความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยามายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ถ้าหากของไหลไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะบาง ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปได้ง่ายขึ้น และทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าของไหลไหลช้า ชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่ก็จะมีความหนามาก ทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลำบากปฏิกิริยาจะเกิดน้อยลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้งานไม่เต็มความสามารถ แต่ถ้าใช้ความเร็วที่สูงเกินไป เวลาที่สารตั้งต้นมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะลดลง ปฏิกิริยาก็จะเกิดน้อยลง

ขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วของขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารตั้งต้น ถ้าหากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ โอกาสที่สารตั้งต้นจะ

แพร่เข้าไปถึงแกนกลางจะลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้น ตำแหน่งที่ว่องไว (active sites) ที่อยู่บริเวณตอนกลางจะไม่ถูกใช้งาน และถ้าตำแหน่งที่ว่องไว เหล่านี้เป็นโลหะมีค่า (เช่น Pt, Au, Ag) ก็จะเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นในกรณีของปฏิกิริยาคายความร้อนหรืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ ตำแหน่งที่ว่องไวจะอยู่เฉพาะบริเวณผิวนอก เท่านั้น การลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนทำได้โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก

ขั้นตอนการดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไว เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพราะการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น จำเป็นต้องมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่สารตั้งต้นมีมากกว่าหนึ่งชนิด จะเกิดการแข่งกันการดูดซับบนพื้นผิว ถ้าหากสารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถเกาะลงบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารตั้งต้นอีกตัวหนึ่งมาก ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของสารที่เกาะได้น้อยจะมีค่าต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมปริมาณของสารตั้งต้นแต่ละตัวที่อยู่บนพื้นผิวควรมีปริมาณที่พอเหมาะ

### 2.9.6 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งกับตัวสารตั้งต้นที่เป็นแก๊ส ในกรณีที่เป็นระบบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยานี้เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) และแก๊สเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate)

การดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งลักษณะความแข็งแรงของการดูดซับและจำนวนชั้นการดูดซับ แสดงดังตารางที่

2.4

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ  
(วิทยา เรื่องพหุวิสุทธิ, 2534 :13)

ลักษณะ	การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
เอนทาลปีของการดูดซับ ( $-\Delta H_{ads}$ ) (กิโลจูลต่อโมล)	400-800	8-20
พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )	มีค่าน้อย	มีค่าเป็นศูนย์
อุณหภูมิการดูดซับ	ขึ้นกับค่าพลังงานกระตุ้น โดยปกติมีค่าต่ำ	ขึ้นกับจุดเดือดของสาร โดยปกติมีค่าต่ำ
จำนวนชั้นการดูดซับ	ไม่เกิน 1 ชั้น	เกิน 1 ชั้นได้

### 2.9.6.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดบนผิวของของแข็งเนื่องจากแรงแวนเดอวาลส์ (van der waals forces) แรงนี้รวมถึงแรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrostatic attraction) แรงดึงดูดที่เกิดจากแรงของความเป็นขั้วถาวร (dipole moment) ของโมเลกุล และรวมถึงแรงดึงดูดเนื่องจากการเหนี่ยวนำของโมเลกุลจนเกิดเป็นขั้ว จากการกระจายของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) ที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar atoms or molecules) เรียกแรงเหล่านี้ว่า แรงดึงดูดของขั้วเหนี่ยวนำ (induced dipolar attraction) แรงเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเท่านั้น

### 2.9.6.2 การดูดซับทางเคมี

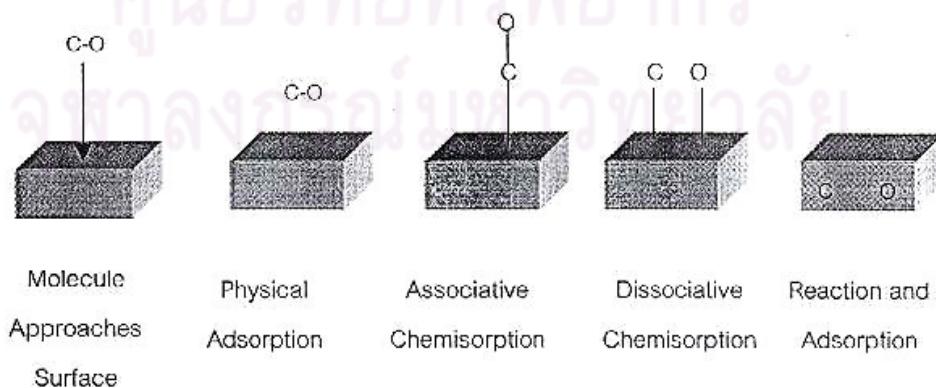
เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยช่องว่างของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ จะดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (rearrangement) โดยอิเล็กตรอน

การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ คือการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (associative chemisorption) และการดูด

ซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (dissociative chemisorption) แสดงดังรูปที่ 2.15 พิจารณาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวพวยงแอลฟาอะลูมินา บนโลหะทองแดงและโลหะนิกเกิลพบว่าไม่เกิดพันธะเคมีขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแอลฟาอะลูมินา แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากตัวพวยงอะลูมินาไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้นแทน พลังงานของการดูดซับระหว่างโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์เหลวบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น การเกิดการดูดซับทางเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะทองแดง เป็นการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะทองแดงมีพลังงานมากกว่าพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ แต่ไม่มากพอที่จะทำให้ลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีการดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะนิกเกิล อันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะมีมากพอที่จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนแตกออก ดังสมการ



จากการเกิดการดูดซับทางเคมีแบบแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนนิกเกิล นำไปสู่การเตรียมมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการ



รูปที่ 2.15 การดูดซับลักษณะต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ

## 2.9.7 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (preparation of supported metal catalysts)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามักมีด้วยกันหลายขั้นตอน สามารถแบ่งขั้นตอนการเตรียมได้ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase การเตรียมสารตั้งต้นและ active phase ทำได้ด้วยกันหลายวิธี ที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธีคือวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเคลือบฝัง (impregnation) การเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมนั้น active phase และ support precursor จะถูกผสมเข้าด้วยกันในรูปแบบสารละลาย จากนั้นจะทำการระเหยเอาตัวทำละลายออกเพื่อให้ของผสมตกตะกอนออกมา ข้อดีของวิธีนี้คือการกระจายตัวของ active phase เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
2. การล้าง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา
3. การอบแห้ง โดยมากมักอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ให้น้ำออกจากโครงสร้าง
4. การจัดรูปโดยรูปทรงที่นิยมใช้อาจเป็นเม็ดเล็กๆ (granule) ทรงกลม (sphere) เม็ดแบน (tablet) วงแหวน (ring) หรือทรงกระบอก (cylinder)
5. การเผาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ คือ
  - เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน (binder) สารหล่อลื่น รวมทั้งอ็อกไซด์และไฮดรอกไซด์ที่ไม่เสถียรและระเหยได้ง่าย
  - อุณหภูมิที่ใช้ควรสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมตัวของผลึกด้วยความร้อนมากเกินไป (excessive sintering) ถ้าเกิดสภาพนี้แล้วจะลดความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาลดลง และยังเป็นสาเหตุจำกัดการแพร่กระจาย (diffusional limitation) อันเนื่องจากขนาดของรูพรุนเล็กลง

แต่สาเหตุที่สำคัญที่สุด คือ ต้องการเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยทั่วไปการเลือกอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเผานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

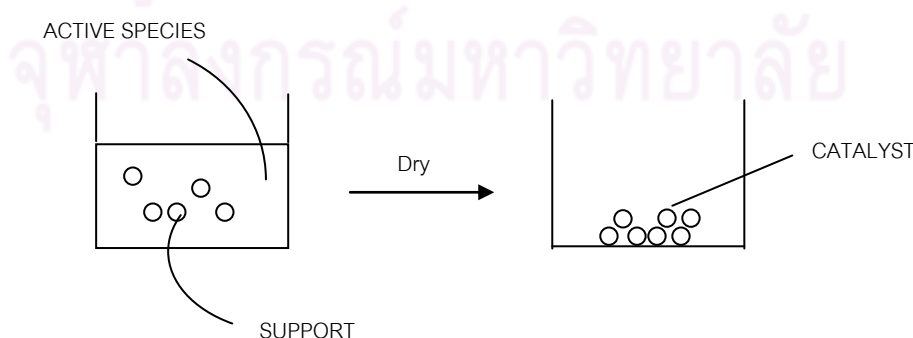


การเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังเป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันมากที่สุดใน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะ เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้โลหะออกไซด์เกาะบนตัว ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมการกระจายตัวของเกลือโลหะให้อยู่เพียงแคผิว นอกหรือแพร่เข้าไปถึงภายในของตัวรองรับได้

### 2.9.7.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝัง (impregnation)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดใน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะนำเอาตัวรองรับซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาสัมผัสกับสารละลายที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ ชนิดเปียก (wet impregnation) และชนิดแห้ง (dry impregnation)

ในการเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation) นั้น ตัวรองรับจะถูกแช่ลงในสารละลายที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นสารละลายของน้ำ จากนั้นจะค่อยๆ ทำการระเหยตัวทำละลายออกจนหมด เพื่อให้สปีชีส์ที่ว่องไวตกค้างอยู่บนตัวรองรับ แสดงดังรูปที่ 2.16 ในระหว่างการระเหยนี้อาจมีการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับ pH ของสารละลายไปพร้อมกัน ข้อดีของวิธีการนี้ คือ ตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับสปีชีส์ที่ว่องไวสม่ำเสมอ แต่อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป อัตราส่วนของเกลือที่ตกตะกอนบนตัวรองรับมักจะแตกต่างไปจากสัดส่วนความเข้มข้นในสารละลาย



รูปที่ 2.16 แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation (ธราธร มงคลศรี)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P.T. Williams และ E.A. Williams (1999) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบด พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่ที่ได้จากการไพโรไลซิส คือ ไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน ( $C_1-C_4$ ) ซึ่งผลได้ของแก๊สจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ในขณะที่น้ำมันและไขที่ได้จากการทดลองจะประกอบด้วย แอลเคน แอลคีน และแอลคาไดอิน เป็นหลัก ซึ่งผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่ามีสารประกอบอะโรมาติกและ Polycyclic aromatic hydrocarbon อยู่ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้องค์ประกอบที่สลายตัวไปแล้วสามารถเกิดปฏิกิริยาการปิดวงได้

P.T. Williams และ E.A. Williams (1999) ศึกษาการไพโรไลซิสพลาสติกผสม รวมถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกหลัก คือพอลิสไตรีน (PS) ต่อพลาสติกชนิดอื่นๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนเทอแรพธาเลต (PET) โดยพลาสติกแต่ละชนิดจะถูกนำไปไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทำนายอันตรกิริยาที่จะเกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสพลาสติกผสมในอัตราส่วน 1:1 พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสพลาสติกแต่ละชนิด ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน ( $C_1-C_4$ ) และจากการวิเคราะห์น้ำมันและไข (oil and wax) พบว่าน้ำมันและไขที่เกิดจากพลาสติกพอลิแอลคีน ซึ่งได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) จะให้องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น แอลเคน แอลคีน และแอลคาไดอิน ในขณะที่พอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอแรพธาเลต (PET) ซึ่งมีหมู่อะโรมาติกอยู่ในโครงสร้างก็ได้แสดงให้เห็นถึงสารประกอบอะโรมาติกในน้ำมันเช่นกัน และสำหรับผลการไพโรไลซิสพลาสติกผสมร่วมกับพอลิสไตรีน (PS) พบว่าผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นมากกว่าที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกที่ละชนิด อีกทั้งยังผลได้ของน้ำมันยังมีค่าที่ลดลง อย่างไรก็ตามการผสมพอลิสไตรีน (PS) เข้าร่วมทำปฏิกิริยากับพลาสติกชนิดดังกล่าว ทำให้น้ำมันที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกและ Polycyclic aromatic hydrocarbon มากขึ้นด้วย

F. Pinto และคณะ (2003) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันร่วมของถ่านหิน ชีวมวลและพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลื่อนที่ด้วยอากาศและไอน้ำ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 750-850 องศาเซลเซียส ทำให้ความเข้มข้นของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนลดลง ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้ปริมาณทาร์และไฮโดรคาร์บอนลดลง ส่วนการเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนลดลงเนื่องจากไอน้ำไปช่วยการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มมิง

N. Miskolczi และคณะ (2004) ศึกษาผลของอุณหภูมิ และโครงสร้างของพลาสติก ที่มีต่อโครงสร้างและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของพลาสติกผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน และเอทิลีน-พรอพิลีน โคพอลิเมอร์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจะทำให้ร้อยละผลได้ของไอระเหย (Volatile) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งไอระเหยที่ได้จะมีสารประกอบอะโรมาติกผสมอยู่ด้วย โดยความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งคาดว่าสารประกอบอะโรมาติกดังกล่าวน่าจะมาจากปฏิกิริยาการเกิดวงอะโรมาติก (Aromatization) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

A. Angyal และคณะ (2007) ศึกษาผลของความเข้มข้นของพอลิสไตรีนที่มีต่อร้อยละผลได้และลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีน ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเบา (Light oil) มีร้อยละของผลได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิสไตรีน ซึ่งอธิบายได้ว่าแรดิคัลที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีนในเบื้องต้นนั้นไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ที่ยังไม่สลายตัวและริเริ่มให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวในเวลาต่อมา นอกจากนี้แรดิคัลดังกล่าวจะแพร่ไปยังโมเลกุลของพอลิพรอพิลีนและทำการดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลดังกล่าว ซึ่งเป็นการสนับสนุนการสลายตัวของโมเลกุลพอลิพรอพิลีน แต่เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส กลับพบว่าร้อยละผลได้และองค์ประกอบของแก๊สไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพอลิสไตรีนในสารป้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่มาจากพอลิพรอพิลีน ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง (Aliphatic Hydrocarbon) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนเป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบอะโรมาติก

R. Xiao และคณะ (2007) ศึกษาผลของ equivalence ratio, fluidization velocity และ ความสูงของเบดต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของพอลิพรอพิลีนในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่า equivalence ratio มีผลต่อ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณของเชื้อเพลิงแก๊สเพิ่มขึ้น ทาร์และซาร์มีปริมาณที่ลด น้อยลง ส่วน fluidization velocity และความสูงของเบดมีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันน้อย จาก การทดลองเชื้อเพลิงแก๊สได้มีค่าความร้อนในช่วง 5.2-11.4 MJ/Nm<sup>3</sup> และมีทาร์ต่ำ

ปรารค์เนตร เฟื่องฟูง และคณะ (2007) ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ ออกซิเจน ปริมาณไอน้ำในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิใน เครื่องปฏิกรณ์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 5 สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สออกมาได้มากที่สุด การใช้ปริมาณออกซิเจนและปริมาณไอน้ำ ที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของการแกซีฟิเคชันลดน้อยลง โดยปริมาณที่เหมาะสมคือ ประมาณ 15 ml/min และไม่เกินร้อยละ 60 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนความสูงของตัวเร่ง ปฏิกิริยานั้นจะพบว่าเมื่อมีความสูงที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สได้มากขึ้น และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์นั้นพบว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นอย่างมาก

I.I. Ahmed และ A.K. Gupta (2009) ศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจาก พอลิสไตรีน พบว่าเมื่อทำไพโรไลซิสพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิ 700°C จะได้อ้อยละผลได้ของไฮโดรเจน มากกว่ากรณีของแกซีฟิเคชันที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ มากกว่า 800°C ขึ้นไป กลับพบว่ากรณีของแกซีฟิเคชันจะให้ไฮโดรเจนที่มากกว่ากรณีของไพโรไล ซิสถึงสามเท่าทั้งในแง่ของร้อยละผลได้และปริมาณความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

M. He และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากของเสียพอลิเอทิลีนโดยแก ซีฟิเคชันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับแกรมมาอะลูมินา (NiO/□-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำต่อของเสียพอลิเอทิลีน เท่ากับ 1.33 พบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 94.52 เป็น 145.23 โดยน้ำหนัก ทาร์และซาร์ลดลงร้อยละ 12.94, 19.15 เป็น 2.62, 12.65 ตามลำดับ ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ (H<sub>2</sub>+CO) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.25 เป็น 64.35 โดยโมล แก๊สไฮโดรเจน จากร้อยละ 16.92 เป็น 36.98 โดยโมล แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากร้อยละ 20.33 เป็น 27.37

โดยโมล ค่า Cold gas efficiency จากร้อยละ 39.90 เป็นร้อยละ 60.67 อัตราส่วนแก๊สสังเคราะห์ ( $H_2/CO$ ) อยู่ในช่วง 0.83-1.35 ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวมีศักยภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงในกระบวนการฟิชเชอร์โทรป

C. Wu และ P.T. Williams (2010) ศึกษาอิทธิพลของชนิดพลาสติกต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นสารป้อนซึ่งทำปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mg-Al ที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชันแบบสองขั้นตอน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยปรับปรุงการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยเฉพาะกรณีที่มีไอน้ำเข้าร่วมในปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามพอลิสไตรีน (PS) ได้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่น้อยที่สุด ทั้งในกรณีที่ใช้อุณหภูมิ 800 และ 850 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพอลิสไตรีน (PS) จะให้สัดส่วนของน้ำมันเป็นมากที่สุด โดยกรณีที่ใช้ไอน้ำเข้าร่วมปฏิกิริยากลับให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้ ซึ่งอธิบายได้ว่าไอน้ำที่เข้าทำปฏิกิริยาไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) นั้นเอง

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การผลิตพลังงานจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการแกซิฟิเคชันนั้นถือเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อทำการแกซิฟิเคชันพลาสติกผสมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิด ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวมีการศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของพลาสติกในกระบวนการแกซิฟิเคชันอยู่น้อยมาก จะมีก็แต่การศึกษาอันตรกิริยาของพลาสติกในกระบวนการไพโรไลซิสนั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการใช้พลาสติกผสม รวมถึงผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง นอกจากนี้ยังศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการคัดแยกชนิดของขยะพลาสติกก่อนนำมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อให้ได้มาซึ่งผลได้ของเชื้อเพลิงแก๊สที่สูงที่สุด

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับไดโกลไมต์

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับไดโกลไมต์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการเคลือบฝัง (impregnation) โดยมีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

1. เครื่องให้ความร้อน (hot plate)
2. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
3. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)
5. ปิเปต (pipette) ขนาด 25 และ 10 มิลลิลิตร
6. แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)
7. ช้อนตักสาร (spatula)
8. หลอดหยด (dropper)
9. โกร่งบดและที่บด (mortar and pestle glazed)
10. ถ้วยกระเบื้อง (crucible)
11. เตาอบ (oven)
12. เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace)

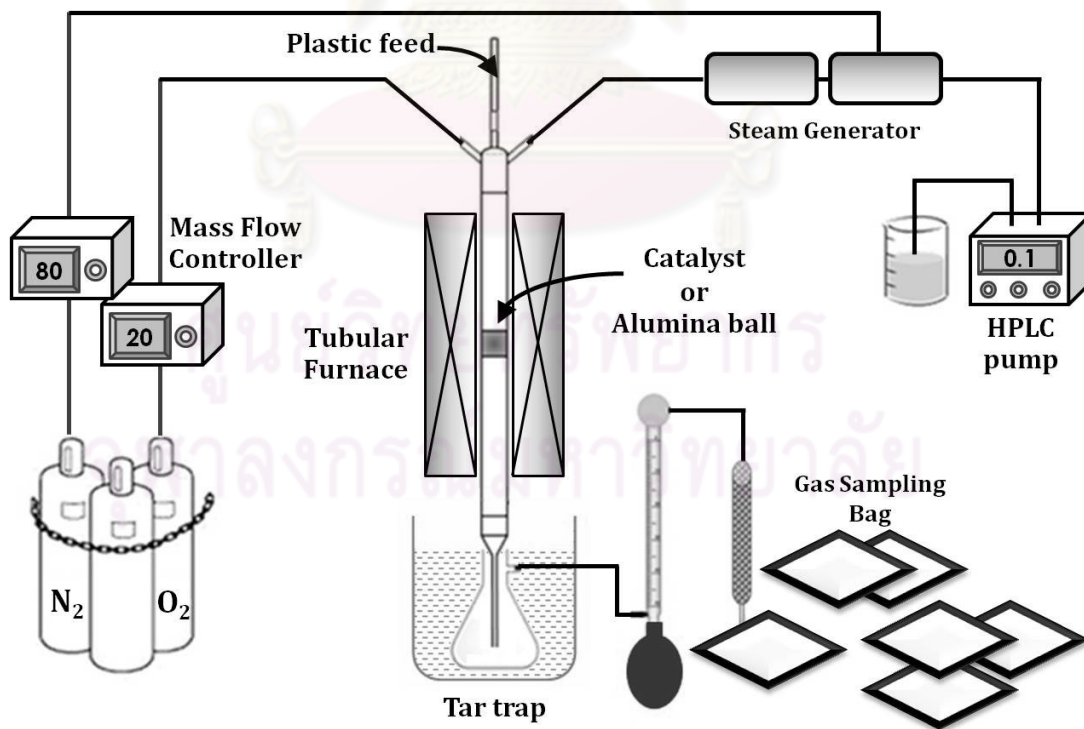
##### 3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง (drop tube fixed bed reactor)

เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ใช้ในการทดลองนี้ ถูกแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

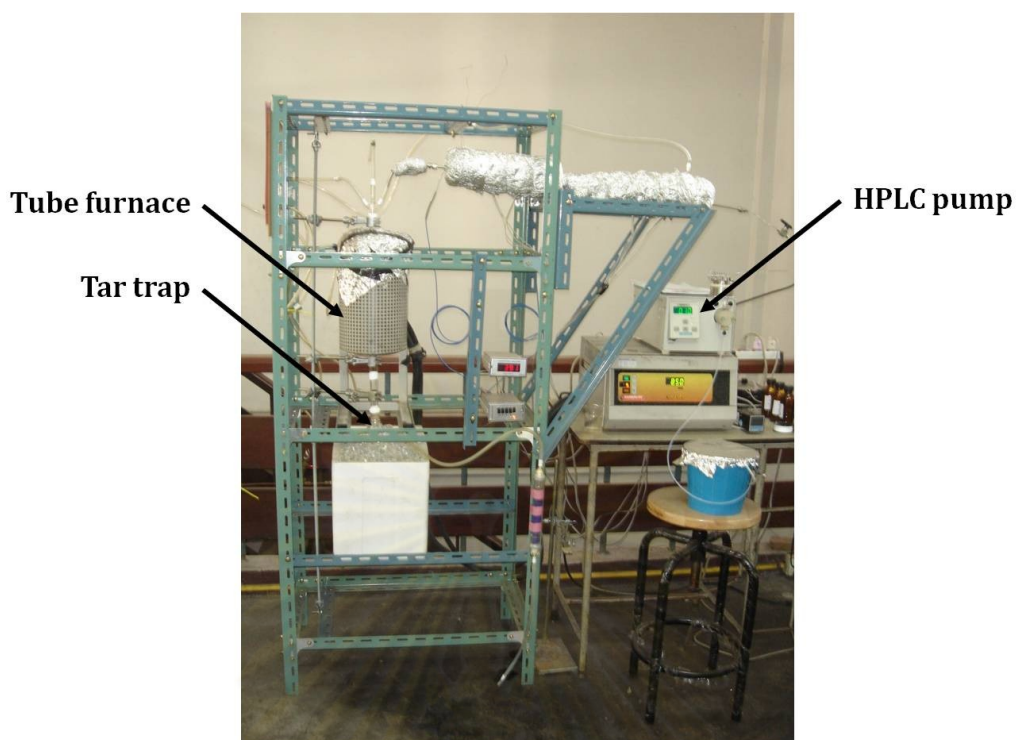
1. เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายนอก 22 มิลลิเมตร และสูง 450 มิลลิเมตร โดยที่บริเวณกึ่งกลางท่อมีการสอดแก้วเพื่อใช้รองรับวัสดุเบด

2. เครื่องควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ยี่ห้อ Kofloc DPM-3 ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจน ให้มีอัตราการไหล 80 และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
3. HPLC pump ยี่ห้อ Lab Alliance Series 1 ทำหน้าที่ปั้มน้ำเข้าสู่ระบบเพื่อผลิตไอน้ำ ด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งทำให้ได้ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร
4. เทอร์โมคัพเพิล (thermocouple) ชนิด K
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) สำหรับผลิตไอน้ำ
6. เครื่องให้ความร้อน (tube furnace) ในการเกิดปฏิกิริยา ยี่ห้อ Carbolite
7. เครื่องควบคุมแรงดันของสารระเหยง่าย ทำจากแก้ว สูง 30 เซนติเมตร
8. คอลัมน์วัดความชื้นที่บรรจุด้วยซิลิกาเจล
9. ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (gas sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

### 3.1.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ยี่ห้อ Shimadzu GC-2014 ดังรูปที่ 3.3 โดย  
 ภาชนะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.00 mm ยาว 2 เมตร
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	50 และ 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน

โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatograph) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา (carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม (chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (recorder) โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (injector port)
4. คอลัมน์ (column)
5. ดีเทคเตอร์ (detector)
6. เครื่องบันทึก (recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

### 3.1.3.1 แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (flow rate) ให้คงที่ โดยอัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียม และอาร์กอน

### 3.1.3.2 คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์จะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

### 3.1.3.3 ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใด ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (high sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (selectivity)
- มีเสถียรภาพ (stability) และความเที่ยง (reproducibility)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบเทอร์มอลคอนดักติวิตี

ดีเทคเตอร์แบบเทอร์มอลคอนดักติวิตี สามารถวิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วย จะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์ แล้วดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. เม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS)
2. นิกเกิลอะซีเตต ( $\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) จาก บริษัท Carlo erba
3. โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )
4. ซิลิกาเจล จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
5. แก๊สไนโตรเจน 99.5% จาก บริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
6. แก๊สออกซิเจน 99.95% จาก บริษัท TIG

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวรองรับโดโลไมต์

นำโดโลไมต์มาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเก็บในโถดูดความชื้น (desiccator)

#### 3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์โดยวิธีเคลือบฝัง

1. เตรียมสารละลายอิมเพรกแนนต์ (impregnant) โดยการละลายนิกเกิลอะซีเตตในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (มีนิกเกิลคิดเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)

2. นำสารละลายอิมเพกแนนต์ที่เตรียมได้มาผสมกับตัวรองรับโดโลไมต์ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งคนตลอดเวลาจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะข้นเหนียว
3. จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปแคลไซน์ในเตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (5% NiO/dolomite)
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นไปอัดรีดเป็นแท่ง และตัดให้มีความยาวประมาณ 1-3 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อไป

### 3.3.3 การเตรียมตัวอย่างพลาสติก

ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 สองส่วน คือ พลาสติกชนิดเดี่ยว และพลาสติกผสมสองชนิด โดยมีการเตรียมดังนี้

1. นำเม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาทูปและตัดให้มีขนาด 1x1 มิลลิเมตร
2. ชั่งตัวอย่างพลาสติกหนัก 0.100 กรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับพลาสติกผสมสองชนิดจะใช้อัตราส่วนการผสมเป็น 1:3 1:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก

### 3.3.4 การแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำและออกซิเจนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ใส่ quartz wool รองรับบริเวณกึ่งกลางท่อ จากนั้นบรรจุอะลูมินาบอล (alumina ball) จนมีความสูง 2.5 เซนติเมตร
2. ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1
3. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
4. เปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งใช้เป็นแก๊สพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เปิดแก๊สออกซิเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เปิดสวิตช์เครื่องให้ความร้อน จนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ตั้ง

ทิ้งไว้ 20 นาที จึงเปิดปั้มน้ำด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อผลิตไอน้ำ ร้อยละ 52 โดยปริมาตร

7. รอจนระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ จึงปล่อยเม็ดพลาสติกกลงมาจากทางด้านบนของเครื่อง ปฏิกรณ์
8. เก็บแก๊สที่ได้จากการทดลองด้วยถุงเก็บแก๊ส ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ว นำผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและสัดส่วนของแก๊สแต่ละ ชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
9. ปิดเครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา

### 3.3.5 การแก๊สพีเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำและออกซิเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ใส่ quartz wool รองรับบริเวณกึ่งกลางท่อ จากนั้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite) จนมีความสูง 2.5 เซนติเมตร (น้ำหนัก 4.70 กรัม)
2. ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1
3. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
4. เปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งใช้เป็นแก๊สพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เปิดแก๊สออกซิเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เปิดสวิตช์เครื่องให้ความร้อน จนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ตั้ง ทิ้งไว้ 60 นาที จึงเปิดปั้มน้ำด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อผลิตไอน้ำ ร้อยละ 52 โดยปริมาตร
7. รอจนระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ จึงปล่อยเม็ดพลาสติกกลงมาจากทางด้านบนของเครื่อง ปฏิกรณ์
8. เก็บแก๊สที่ได้จากการทดลองด้วยถุงเก็บแก๊ส ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ว นำผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและสัดส่วนของแก๊สแต่ละ ชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
9. ปิดเครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

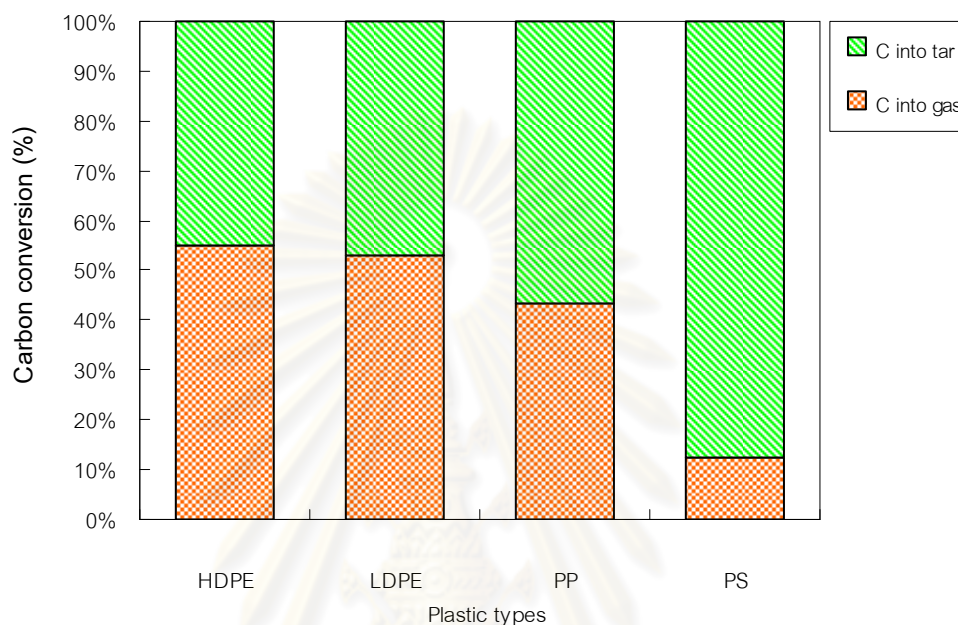
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยพลาสติกที่นำมาศึกษามี 4 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนของขยะพลาสติกที่มีอยู่ในประเทศไทย อีกทั้งพลาสติกดังกล่าวยังมีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยในการทดลองได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนการผสมพลาสติกที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส รวมถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite) ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส รวมถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม และเพื่อเป็นการลดปัจจัยภายนอกที่มาจากการใช้ขยะพลาสติกจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เม็ดพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาใช้ในการศึกษาแทน

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ อิทธิพลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ส่วนที่ 2 คืออิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อการผลิตแก๊สของพลาสติกแต่ละชนิดและพลาสติกผสม และส่วนที่ 3 คืออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.1 อิทธิพลของชนิดพลาสติก

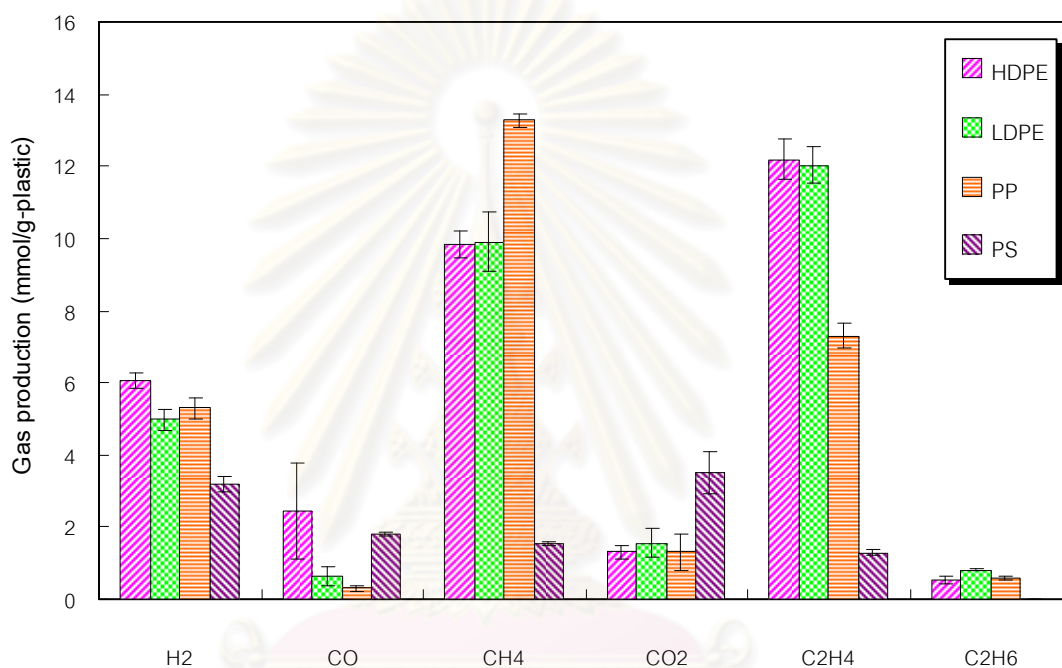
### 4.1.1 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกแต่ละชนิดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในพลาสติกเป็นแก๊สค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนเป็นทาร์หรือสารระเหยง่ายที่ควบแน่นได้นั้นค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีองค์ประกอบของสารระเหยง่ายสูง (ปรารค์เนตร เฟืองฟุง, 2550) โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายพันธะด้วยความร้อน ซึ่งอาจจะไม่ว่องไวในการสลายตัวต่อเพื่อแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของทาร์ โดยจากรูปจะเห็นว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 55 ในขณะที่พอลิสไต

รีน (PS) มีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่ำที่สุด คือประมาณ 13 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแรดิคัลอิสระ (Free radicals) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีน (PS) ในช่วงเริ่มต้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยารีพอลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ที่อุณหภูมิสูงต่อกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ หรือ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในทาร์นั่นเอง

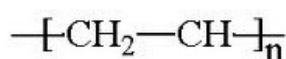


รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

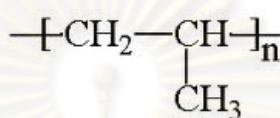
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.2 พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะหลอมตัวและสลายตัวได้เป็นไฮโดรคาร์บอนและทาร์ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) คือแก๊สเอทิลีน มีเทน และ



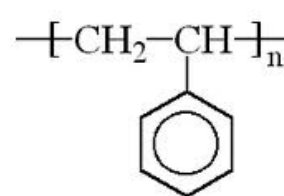
ไฮโดรเจน โดยสังเกตได้ว่าในกรณีของพอลิพรอพิลีน (PP) นั้นจะให้แก๊สมีเทนมากกว่าพลาสติกตัวอื่นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่พอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิดให้แก๊สเอทิลีน และไฮโดรเจนมากที่สุด สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกซิฟิเคชันพอลิสไตรีน (PS) คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยสังเกตได้ว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซิฟิเคชันพอลิสไตรีน (PS) นั้นมีปริมาณโดยรวมค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณของแก๊สที่ได้จากกรณีของพอลิเอทิลีน



(ก) พอลิเอทิลีน (PE)



(ข) พอลิพรอพิลีน (PP)



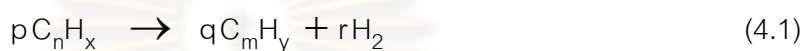
(ค) พอลิสไตรีน (PS)

รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

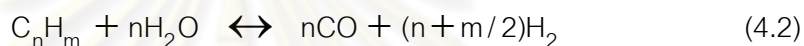
เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ที่แสดงดังรูปที่ 4.3 สามารถอธิบายได้ว่า พันธะ C-C ในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเป็นพันธะที่อ่อนที่สุดในโครงสร้าง และสามารถเกิดการแตกออกของสายโซ่ (Chain scission หรือ Depolymerization) ในระหว่างกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน เกิดเป็นแรดิคัลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งแรดิคัลดังกล่าวจะพยายามทำตัวให้อยู่ให้รูปที่เสถียร (Stabilization) อันนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนพันธะคู่ หรือสารประกอบแอลคีน (Williams and Williams, 1999 และ Siddiqui and Redhwi, 2009) อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเอทิลีน (PE) ไม่มีหมู่ข้างเคียง เหมือนกับพอลิพรอพิลีน (PP) ดังนั้นโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้มากกว่า ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สเอทิลีนเกิดขึ้นได้มากกว่า สำหรับกรณีของพอลิพรอพิลีน (PP) สังเกตได้ว่าในโครงสร้างมีหมู่เมทิล ( $-\text{CH}_3$ ) ซึ่งทำหน้าที่เป็นหมู่ข้างเคียง (side group) เพิ่มมาจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีน ซึ่งคาร์บอนที่อยู่บริเวณกิ่งก้านจะมีความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) ที่ต่ำกว่าคาร์บอนในสายโซ่หลัก จึงส่งผลให้หมู่เมทิลมีโอกาสถูกขจัดออก (elimination) ได้ง่ายในระหว่างการสลายตัวด้วยความร้อน (McNeill, 1997 และ Miskolczi et al., 2004) แล้วเกิดเป็นแก๊สมีเทน ดังนั้นสัดส่วนของแก๊สมีเทนจึงเกิดขึ้นมากกว่ากรณีของพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิด สำหรับแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal

cracking) ของไฮโดรคาร์บอน และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ดังสมการ (4.1) และ (4.2) และสำหรับกรณีของพอลิस्टไตรีน (PS) การที่มีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นมากที่สุด คาดว่ามาจากการที่ไฮโดรคาร์บอน และ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิस्टไตรีนสามารถทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ดังสมการ (4.2)-(4.5) (Pinto et al., 2002 และ Wu and Williams, 2010)

Thermal cracking :



Steam reforming of hydrocarbon :



Water gas reaction :

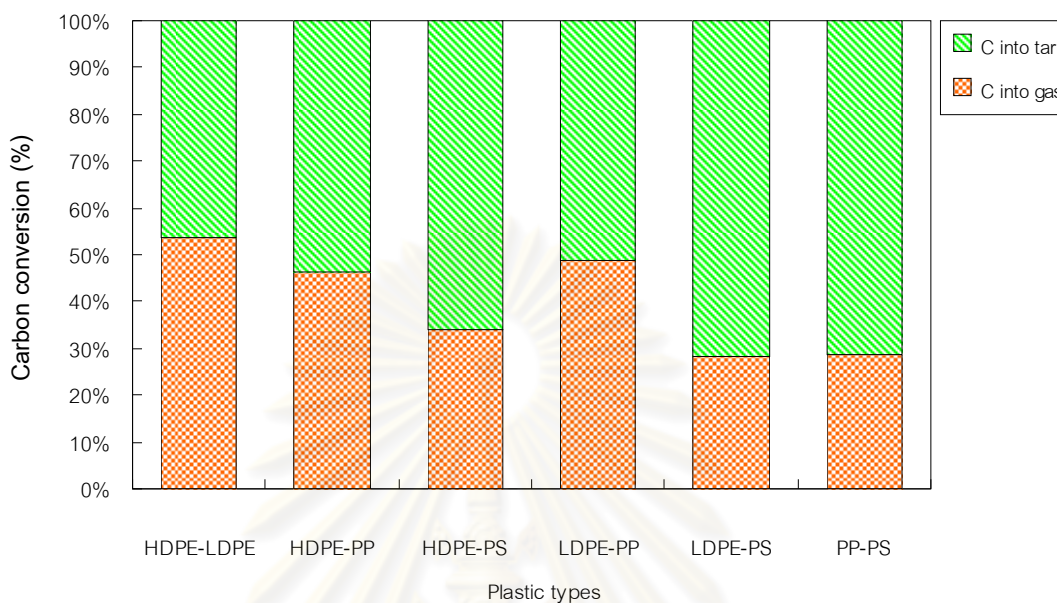


Oxidation :



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1.2 การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

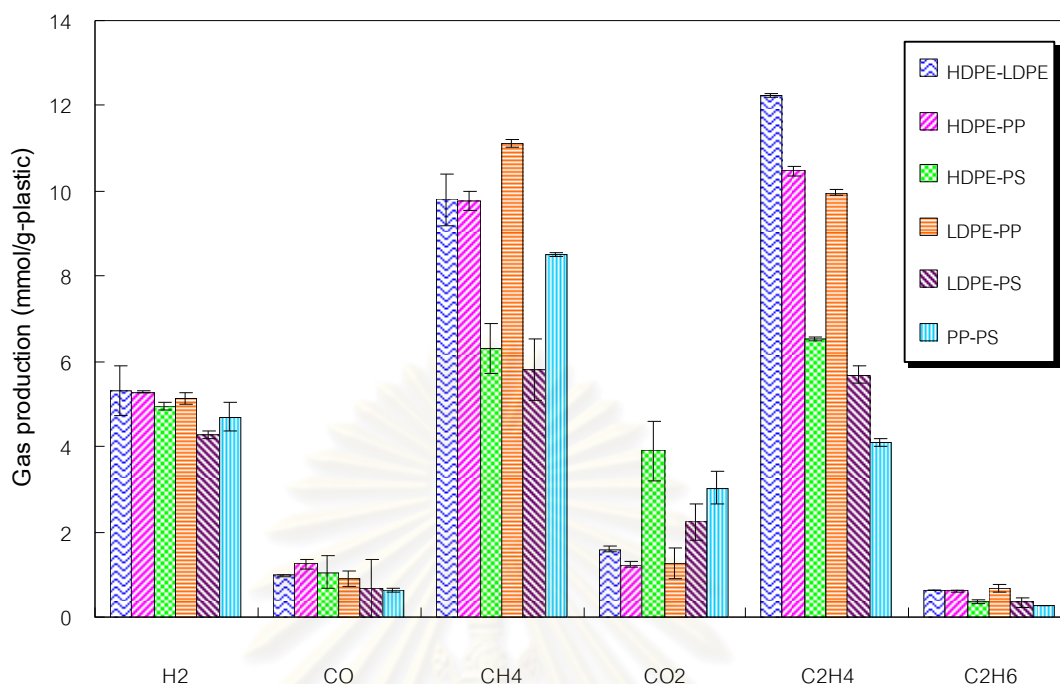


รูปที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในพลาสติกมีการเปลี่ยนเป็นทาร์มากกว่าแก๊ส เช่นเดียวกับการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดเดี่ยวดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วย จะให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ โดยจากรูปจะเห็นว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สของพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วยมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 30 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวว่พอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมจะช่วยสนับสนุนการสลายตัวด้วยความร้อนของพลาสติกอื่นๆ ให้กลายเป็นน้ำมันที่มี  $C_5-C_{15}$  และสารประกอบอะโรมาติก (Koo et al., 1991, Williams and Williams, 1999 และ Angyal et al., 2007) อย่างไรก็ตามเมื่อมีไอน้ำเข้าร่วมปฏิกิริยาโดย

ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกลับพบว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาการปิดวงและปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบอะโรมาติก (Cyclization and Aromatization) เกิดเป็นน้ำมันที่ประกอบด้วยอะโรมาติกเป็นจำนวนมาก (ทาร์) ในขณะที่การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิดให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนมากที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดเดียว คือ ร้อยละ 55

จากรูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ และผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมทั้ง 6 คู่ คือ แก๊สเอทิลีน มีเทน และไฮโดรเจน เช่นเดียวกับการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดเดียวดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยสังเกตได้ว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วย จะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สเอทิลีน และมีเทน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Williams and Williams, 1999 และ Miskolczi et al., 2004) พบว่าการไพโรไลซิสพลาสติกผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) กับพลาสติกจำพวกพอลิแอลคีน จะให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่ประกอบด้วยอะโรมาติก และแก๊สแอลคีน ซึ่งได้แก่ โพรพีน และบิวทีน เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามพันธะคู่ในแอลคีนดังกล่าวมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ประกอบด้วยอะโรมาติกเกิดมากขึ้น รวมถึงคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำ (Water gas) ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าคู่ผสมระหว่างพลาสติกจำพวกพอลิแอลคีน จะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สเอทิลีน มีเทน และไฮโดรเจน ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิแอลคีนดังกล่าวสามารถเกิดการแตกออกของสายโซ่ (Random-chain scission และ End-chain scission) ในระหว่างการสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง เกิดเป็นแรดิคัลหรือไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งมีบางส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน

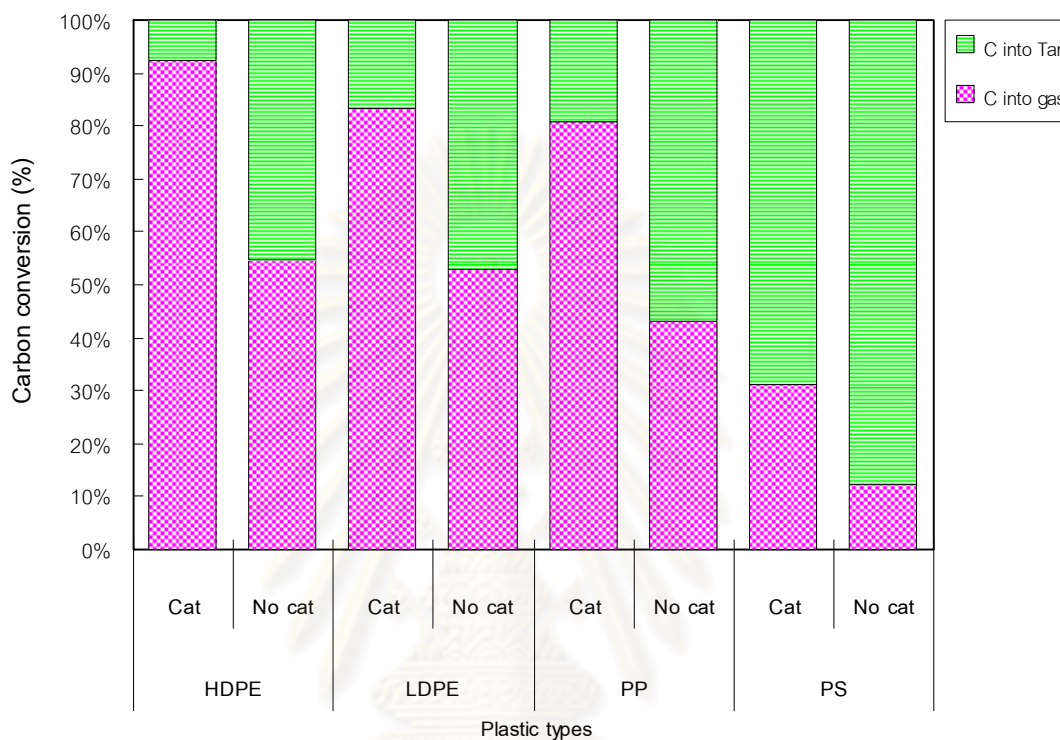


รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแก๊สพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิด ในอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas) นั้น มีสัดส่วนค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับแก๊สเอทีดีน และมีเทน อีกทั้งยังมีทาร์เกิดขึ้นในระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแก๊สพีเคชั่นพลาสติกโดยปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ไอน้ำและออกซิเจนที่เข้าร่วมในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น การแตกตัวทาร์ ออกซิเดชัน รีฟอร์มมิง และ Water gas ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการแตกตัวทาร์และสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำและออกซิเจน (ปรารงค์เนตร เพ็องฟุ้ง, 2550 และ อนุวรรตน์ เกตุคง, 2552) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่คาดว่าจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นในระบบ รวมถึงเพิ่มสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์

### 4.2.1 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

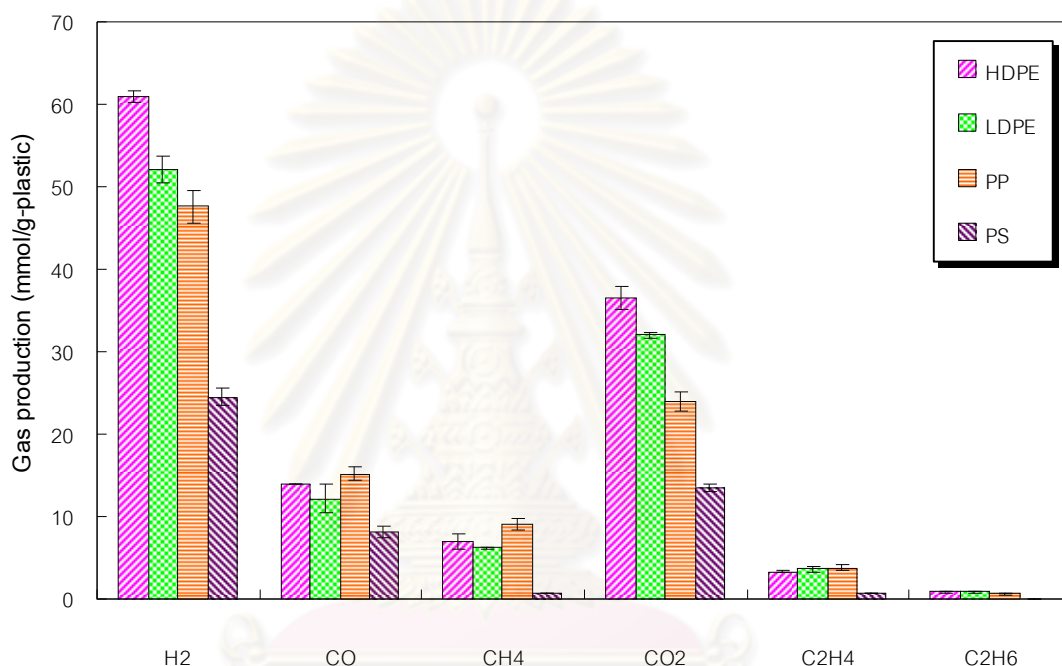
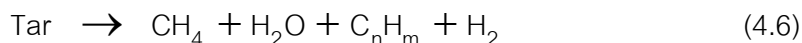


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและทาร์ (Tar cracking) ได้ โดยทำให้ไฮโดรคาร์บอนและทาร์เกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแก๊สไฮโดรเจน มีเทน และ

ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบามากขึ้น ดังสมการ (4.6) (Asadullah et al., 2002, Lv et al., 2004 และ He et al. 2009)

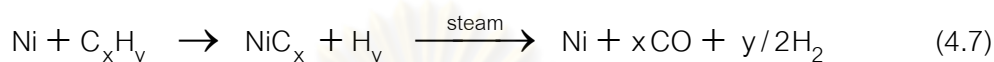
Tar cracking :



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

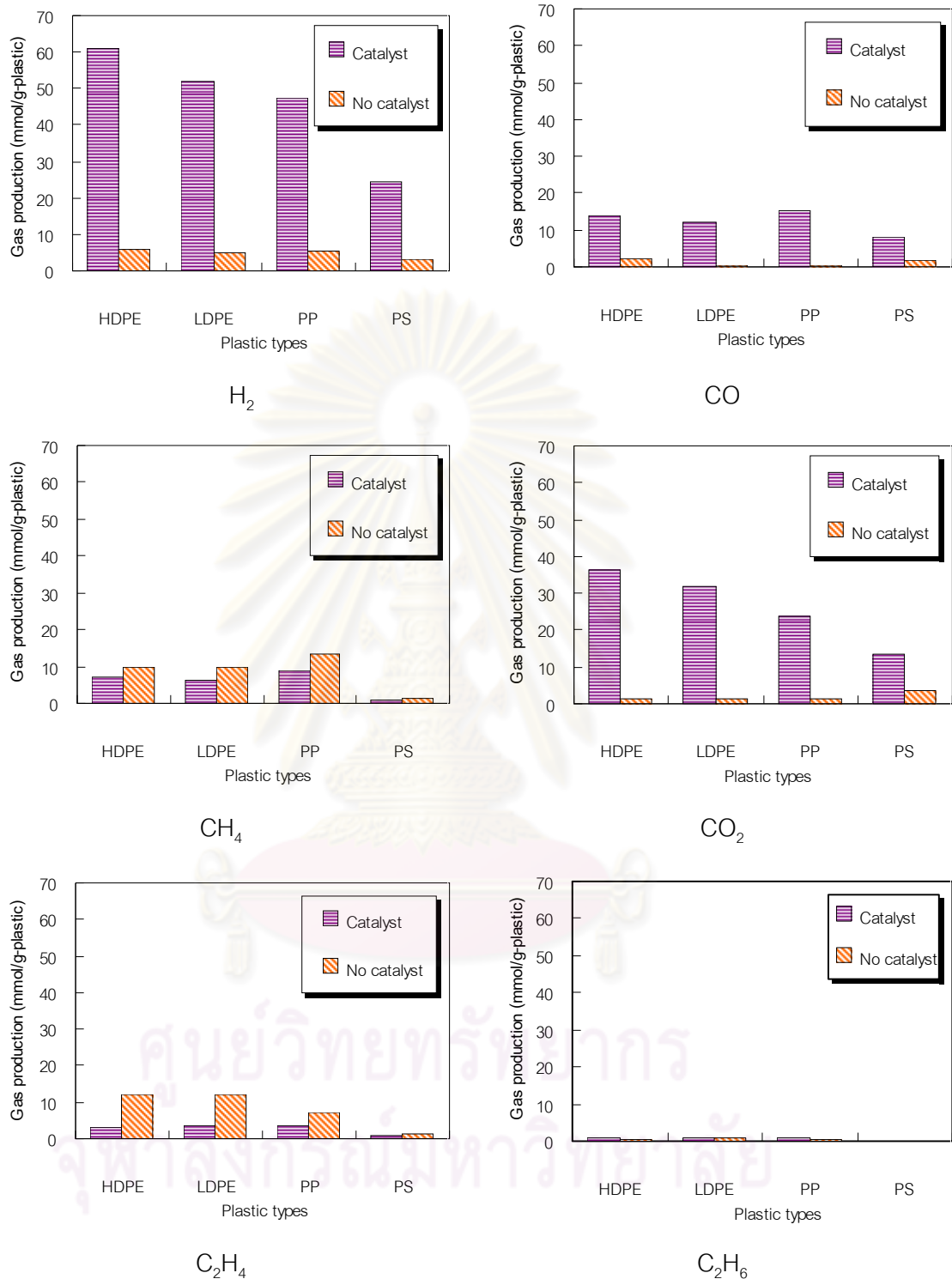
จากรูปที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที พบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังกล่าวเปรียบเทียบกับกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (รูปที่ 4.2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและทาร์ให้เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สจากพลาสติกแต่ละชนิดได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบผลการแกซีฟิเคชันระหว่างกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลได้ดังสมการ



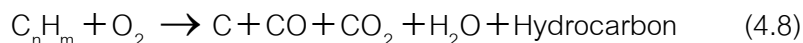
จากสมการ (4.7) โลหะนิกเกิลจะช่วยให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้เป็นนิกเกิลคาร์ไบด์ ( $\text{NiC}_x$ ) และแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นนิกเกิลคาร์ไบด์จะทำปฏิกิริยาต่อกับไอน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (อนวรรตน์ เกตุคง, 2552) ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 8-10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์นอกจากจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวยังมีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและแก๊สมีเทนได้ดังสมการ (4.2) (4.8) และ (4.9) (Yamazaki et al., 1996 และ He et al., 2009) ส่งผลให้เกิดการลดลงของสัดส่วนไฮโดรคาร์บอน ซึ่งได้แก่ แก๊สมีเทน เอทิลีน และอีเทน สำหรับสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น พบว่ามีการเพิ่มขึ้นประมาณ 5-50 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (4.7) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวยังสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ (4.10) จึงส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีสัดส่วนที่น้อยกว่าซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน (Partial oxidation) และปฏิกิริยาชิฟท์ (Water gas shift) ร่วมกับไอน้ำภายใต้สภาวะที่ใช้ในการทดลองแล้วเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ



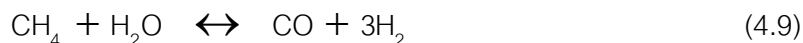


รูปที่ 4.8 อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการแก๊สพิกัดพลาสติกชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

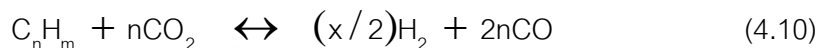
Oxidation :



Steam reforming of methane :



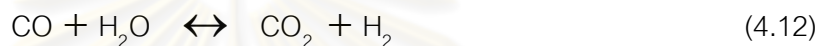
CO<sub>2</sub> reforming :



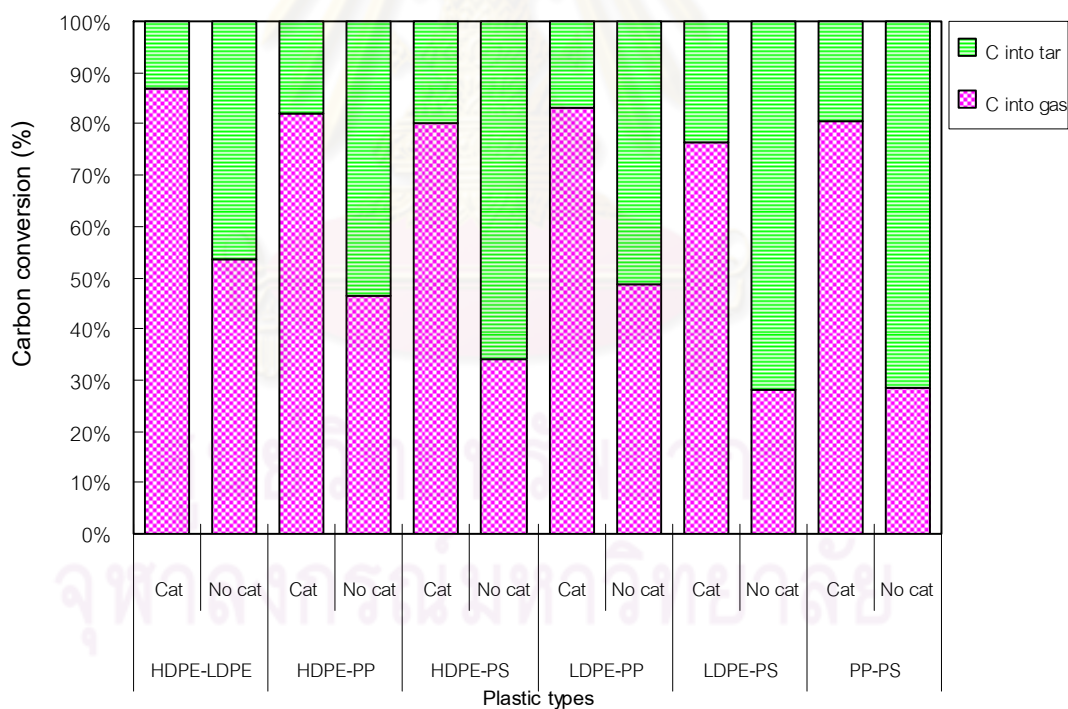
Partial oxidation of CO :



Water gas shift :

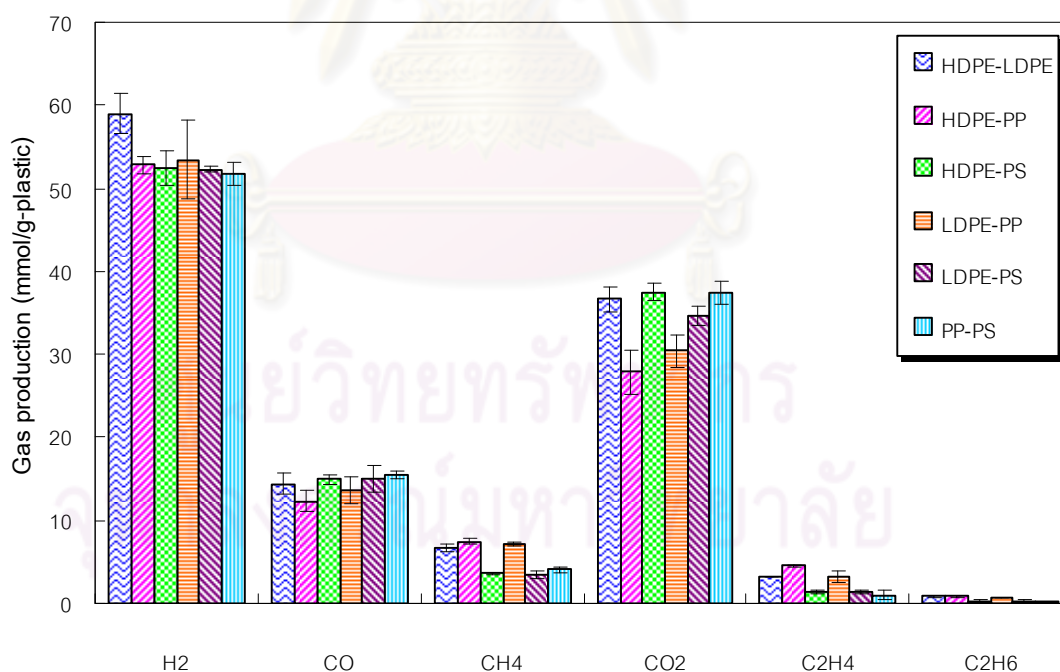


#### 4.2.2 การแกซซิฟิเคชันพลาสติกผสมร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซซิฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลการแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น และทาร์มีปริมาณลดลงในทุกคู่พลาสติก แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและทาร์ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สของพลาสติกทุกคู่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณร้อยละ 77-87 โดยที่คู่พลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิดให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สมากที่สุด อีกทั้งยังสังเกตได้ว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วย จะให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5-3 เท่า ในขณะที่พลาสติกที่ไม่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วยมีการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6-1.8 เท่า จากกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

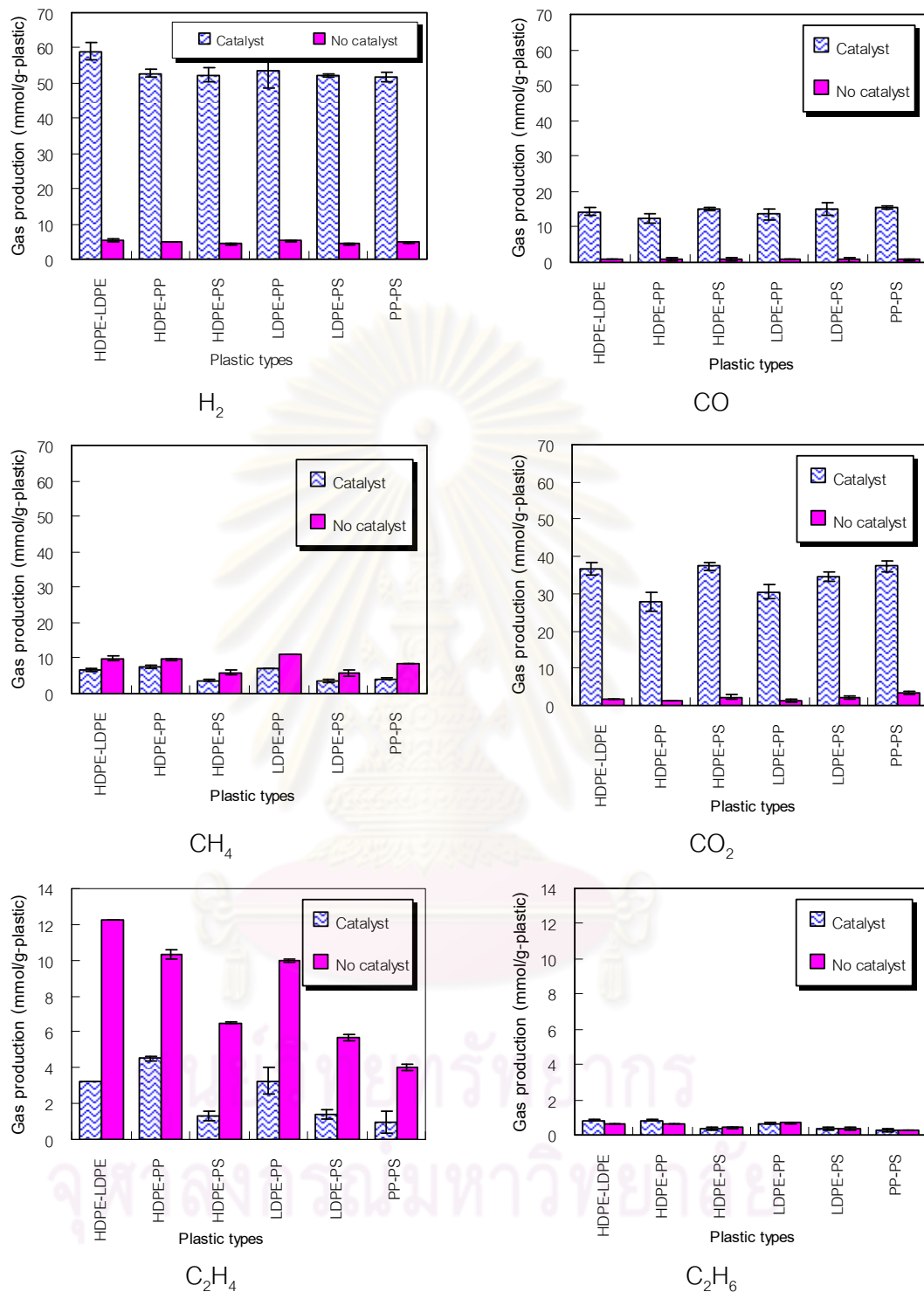
จากรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์มีปริมาณเพิ่มขึ้นกว่าการแกซีฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและทาร์ให้เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ดี เช่นเดียวกับการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดเดียวกันที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมไปถึงปฏิกิริยาเชิงเร่งด้วยไอน้ำ ซึ่งได้แก่ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของแก๊สมีเทน และปฏิกิริยาซิฟท์ ดังสมการ (4.8) (4.9) และ (4.12) ตามลำดับ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากจะอธิบายด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของแก๊สมีเทนแล้ว ยังสามารถอธิบายได้ว่าคาร์บอน (C) บางส่วนที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำออกซิเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านปฏิกิริยา Water gas (4.3) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (4.5) หรือปฏิกิริยาบาวดาต (4.14) ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์นั่นเอง

Carbon formation :



Boudouard :





รูปที่ 4.11 อิทธิพลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อองค์ประกอบ

ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการแก๊สซิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดในอัตราส่วน 1:1

ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร

และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

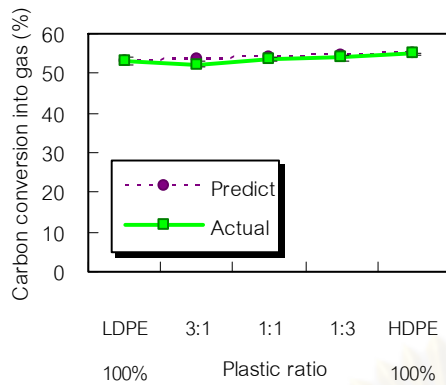
### 4.3 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม

สำหรับการศึกษานันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดในการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ (3:1 1:1 และ 1:3) นั้น ได้มาจากการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการคำนวณค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากกรณีการทดลองแกซีฟิเคชันด้วยพลาสติกชนิดเดียว ซึ่งจะแบ่งพิจารณาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิดออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ ดังนี้

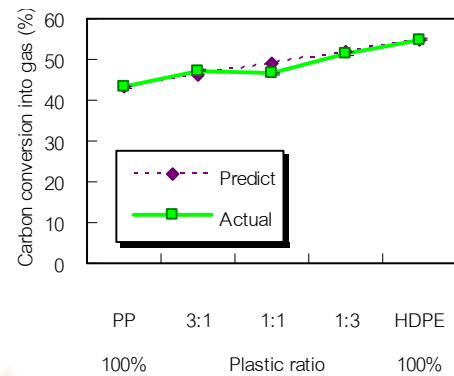
#### 4.3.1 การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.3.1.1 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

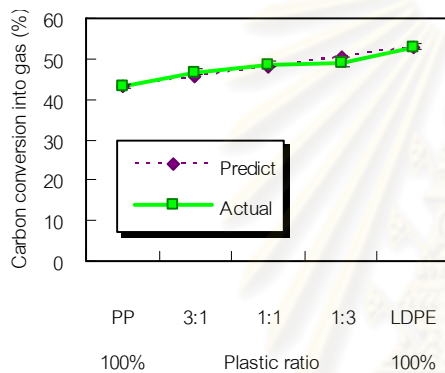
เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการใช้ของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าพลาสติกบางคู่มีการเกิดอันตรกิริยาต่อกัน โดยสังเกตจากการเบี่ยงเบนของเส้นกราฟที่ได้จากผลการทดลองจริงกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคู่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ อย่างไรก็ตามคู่พลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับพอลิโพรพิลีนพบว่ามีอันตรกิริยาเกิดขึ้นน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งคู่พลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในทุกอัตราส่วนการผสม แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก) ซึ่งอธิบายได้ว่าพลาสติกทั้งสองชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายคลึงกันมาก จึงมีโอกาที่จะเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้น้อย



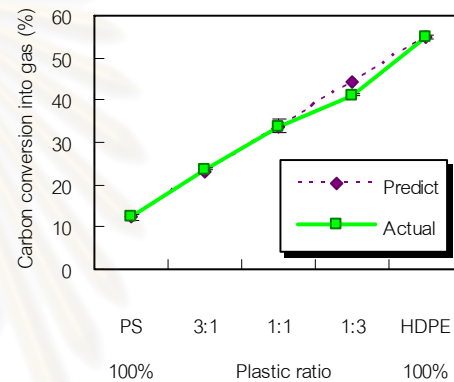
(ก) LDPE:HDPE



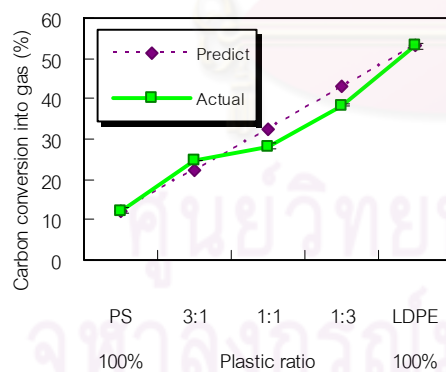
(ข) PP:HDPE



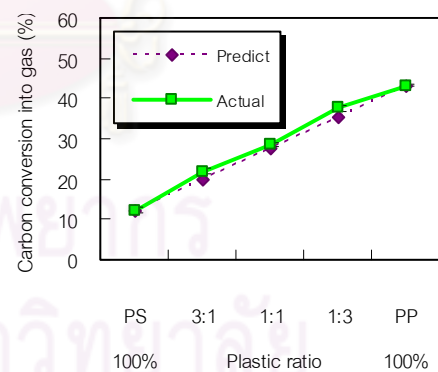
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



(ฉ) PS:PP

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

สำหรับคู่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมทุกคู่ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.12 (ง) (จ) และ (ฉ) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผลการคำนวณที่ได้จากกรณีการแกซีฟิเคชันด้วยพลาสติกชนิดเดียว อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Koo et al., 1991 และ Kruse et al., 2005) ที่อธิบายว่าการมีพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมจำพวกพอลิแอลคีนนั้น จะช่วยสนับสนุนการสลายตัวของพลาสติกดังกล่าวให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส และของเหลว ภายในระยะเวลาที่สั้นลง อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมมากขึ้น จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของน้ำมันที่มีองค์ประกอบเป็นวงอะโรมาติก (small and large aromatic hydrocarbons) มากขึ้น อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมมีมากกว่าครึ่ง ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสม เป็นการส่งเสริมให้มีปริมาณของแรดิคัลขนาดเล็กที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีน (PS) สามารถแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของพอลิแอลคีนดังกล่าวแล้วเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) และการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer) (Predel and Kaminsky, 2000) ระหว่างแรดิคัลของพอลิเมอร์ทั้งสองได้มากขึ้น ซึ่งช่วยสนับสนุนการแตกตัวของพลาสติกดังกล่าวให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงนั่นเอง

สำหรับกรณีคู่ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) กับพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มีอัตราส่วน 1:3 พบว่าเกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นอิทธิพลมาจากการที่พอลิพรอพิลีน (PP) มีสัดส่วนมากกว่าพอลิสไตรีน (PS) จึงมีโอกาสที่แรดิคัลขนาดเล็กอันเกิดจากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน (PP) สามารถแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของพอลิสไตรีน (PS) แล้วเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) จากแรดิคัลของพอลิสไตรีน (PS) ซึ่งส่งผลให้อัตราการสลายตัวของพลาสติกดังกล่าวดีขึ้น (Kruse et al., 2005)

สำหรับคู่พลาสติกที่มีพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมอยู่ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ดังรูปที่ 4.12 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผลการคำนวณที่ได้จาก



การทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ในพลาสติกผสมมีมากกว่าครึ่ง ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ในพลาสติกผสม เป็นการส่งเสริมให้มีปริมาณของแรติคัลขนาดเล็กที่เกิดจากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน (PP) สามารถแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ได้มากขึ้น ซึ่งช่วยสนับสนุนการแตกตัวของพลาสติกดังกล่าวให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิดมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอันเกิดจากการจัดเรียงโครงสร้างของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบ ทำให้สายโซ่สามารถเรียงตัวกันในช่องว่างภายในโครงผลึกได้อย่างหนาแน่น ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ (intermolecular force) เข้าด้วยกันภายในโครงผลึกอย่างแข็งแรง (ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล, 2546) ดังนั้นพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิดจึงมีโอกาสนในการแตกตัวเป็นแรติคัลได้ยากกว่าพอลิสไตรีน (PS) และพอลิพรอพิลีน (PP)



รูปที่ 4.13 การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

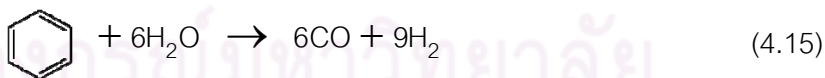
#### 4.3.1.2 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากกรณีการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพลาสติกแต่ละคู่ได้แสดงให้เห็นถึงอันตร

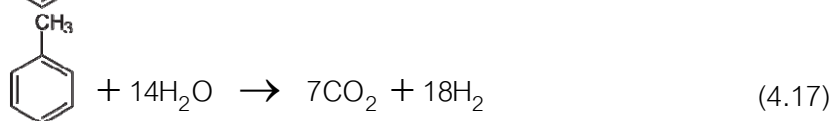
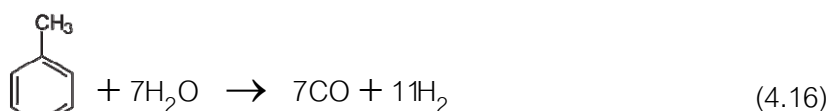
กิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ที่เป็ยเบนไปจากค่าที่คำนวณได้จากกรณีการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียวอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ผลของแก๊สเอทิลีนและอีเทนกลับไม่แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่อย่างใด

เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อ นาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ มีการเกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้พอลิสไตรีน (PS) ในอัตราส่วนที่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หรือแรดิคัลที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกของพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ สามารถเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Koo et al., 1991, Bockhorn, 1999, Williams and Williams, 1999 และ Siddiqui and Redhwi, 2009) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของพลาสติกผสมดังกล่าวประกอบด้วย เบนซีน โทลูอิน เอทิลและเมทิลเบนซีน แนพทาลีน และ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะเกิดการสลายตัวต่อด้วยไอน้ำเพื่อเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน ผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของมีเทน ปฏิกิริยาซิฟท์ และปฏิกิริยา Water gas ดังสมการ (4.3) (4.4) (4.9) (4.12) และ (4.15)-(4.18) (Kantarelis et al., 2010)

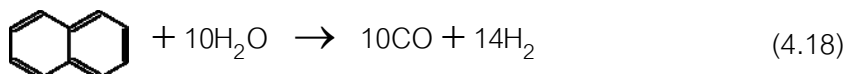
Steam reforming of benzene :

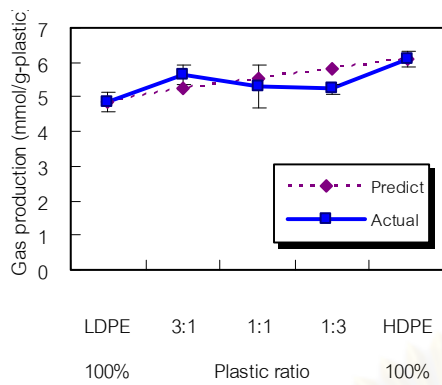


Steam reforming of toluene :

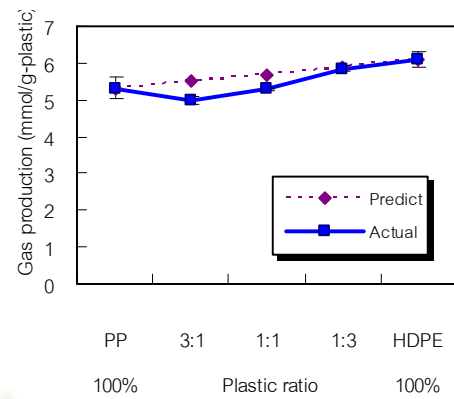


Steam reforming of naphthalene :

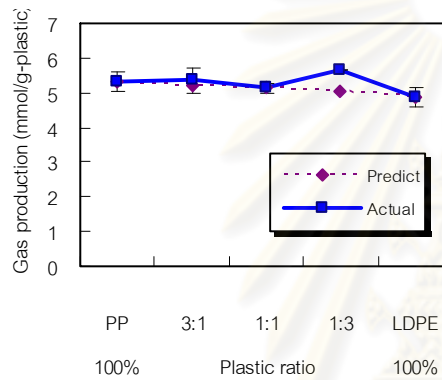




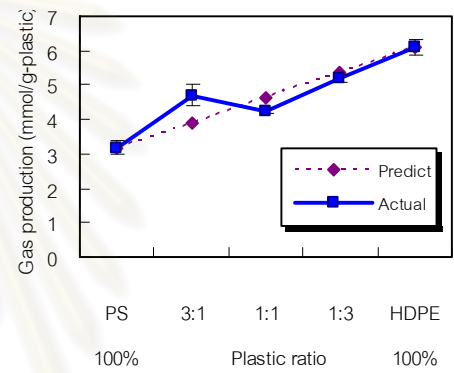
(ก) LDPE:HDPE



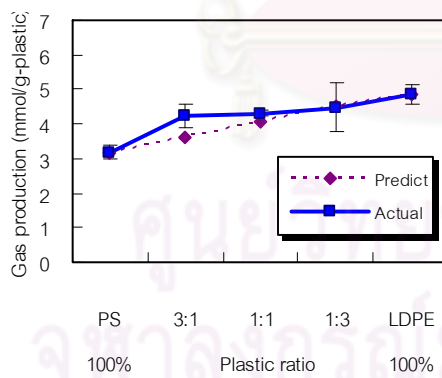
(ข) PP:HDPE



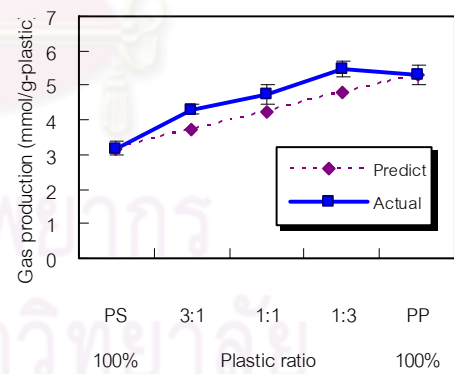
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE

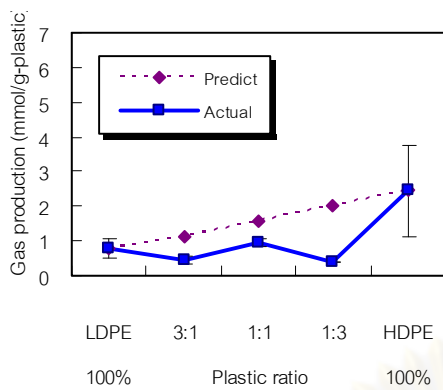


(ฉ) PS:PP

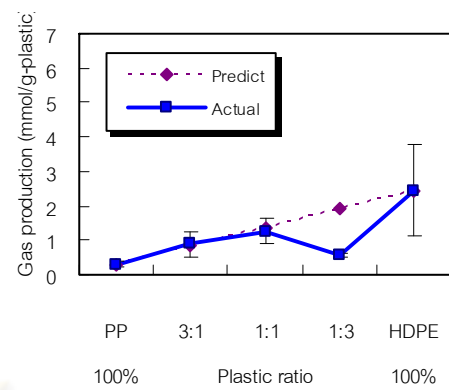
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

นอกจากนี้ยังพบว่าพลาสติกที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมอยู่ก็มีการเกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน ดังรูป 4.14 (ก) (ค) และ (จ) โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มากที่สุด ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่หลวมกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งมากกว่า ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่น้อยกว่า ดังนั้นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จึงมีโอกาสเกิดการสลายตัวในขั้นการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกได้มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผสมกับพลาสติกชนิดเดียวกัน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับพอลิพรอพิลีน (PP) พบว่าคู่ที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมอยู่จะก่อให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกที่มากกว่าคู่ที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมอยู่

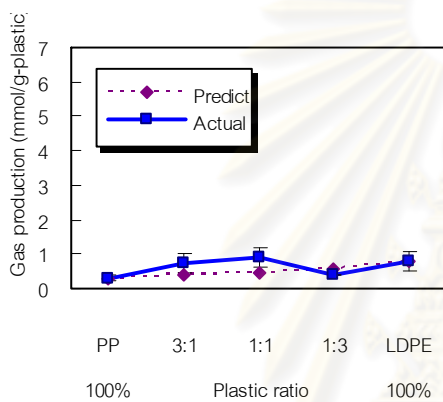
เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแก๊สซิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าพลาสติกที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มาก ได้ก่อให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงลบต่อการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลทางด้านโครงสร้างของพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่มาก จึงทำให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้ยาก ส่งผลให้เกิดแรดิคัลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งยากแก่การแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาการตั้งไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Faravelli et al., 2003) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไอน้ำ ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน และปฏิกิริยาซิฟท์ ดังสมการ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ดังจะกล่าวต่อไป



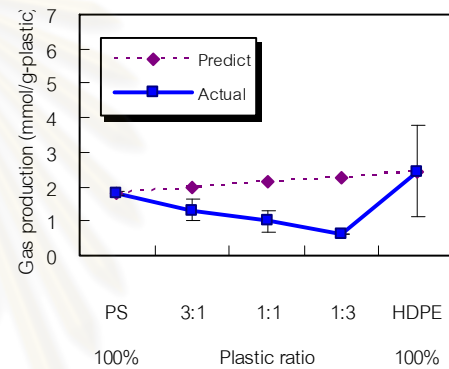
(ก) LDPE:HDPE



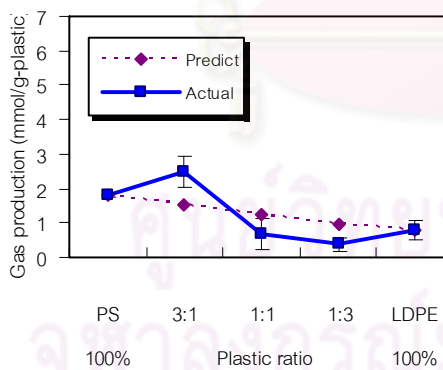
(ข) PP:HDPE



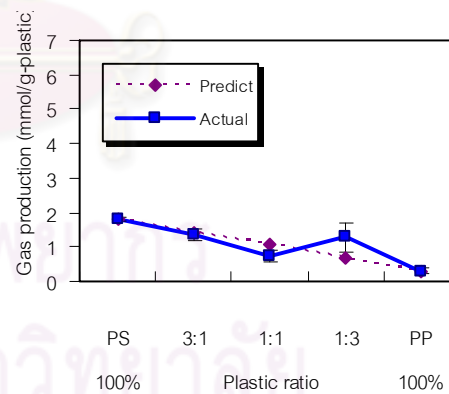
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



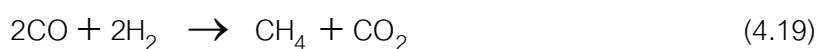
(ฉ) PS:PP

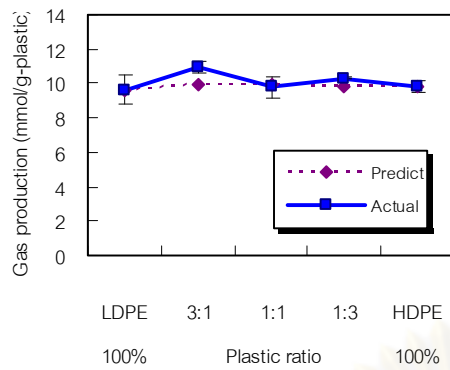
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพิกซ์พลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ในพลาสติกผสมทุกคู่ ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังรูป 4.16 (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ในพลาสติกผสมมีมากกว่าครึ่ง ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงลบต่อสัดส่วนของแก๊สมีเทน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Bockhorn et al., 1999) ได้กล่าวว่าเนื่องจากพอลิพรอพิลีน (PP) มีโครงสร้างที่เป็นกิ่ง จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกมีความซับซ้อนมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการใช้อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มาก จะส่งผลให้เกิดแรดิคัลที่มีความซับซ้อนในปริมาณมาก และยากต่อการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของพอลิเอทิลีน (PE) หรืออาจก่อให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาในการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก

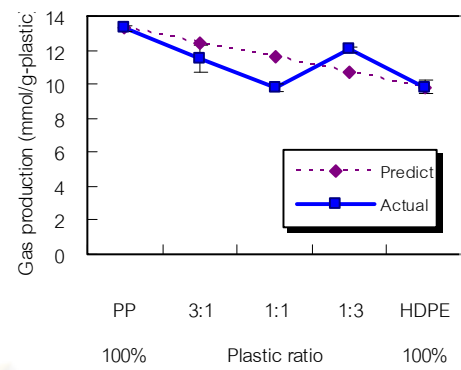
ในขณะที่พลาสติกผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) กับพอลิสไตรีน (PS) มีการเกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ทุกอัตราส่วนการผสม ซึ่งอธิบายได้ว่าแรดิคัลขนาดเล็กที่เกิดจากการสลายตัวในช่วงแรกของพลาสติกทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของกันและกัน แล้วเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Kruse et al., 2005 และ Walendziewski, 2005) อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการแตกตัวต่อที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการสลายพันธะ C-C ที่บริเวณปลายสายโซ่ (End-chain scission) แล้วเกิดเป็นแก๊สมีเทน นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นจากผลที่คำนวณได้นั้นมาจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นสลายตัวในช่วงแรกสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน ผ่านปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) ดังสมการ (4.19) และ (4.20)

Methanation :

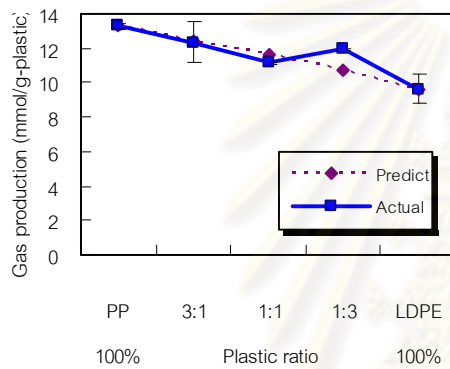




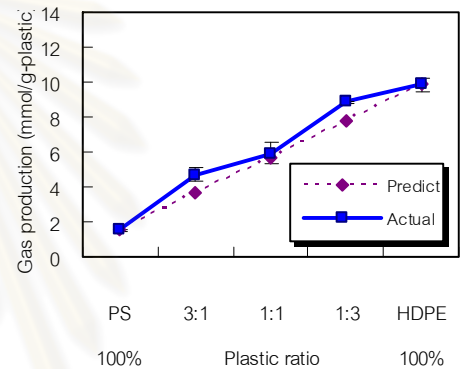
(ก) LDPE:HDPE



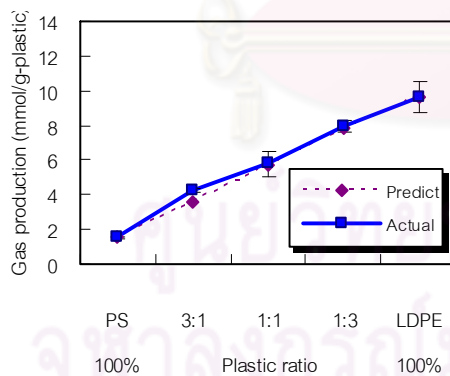
(ข) PP:HDPE



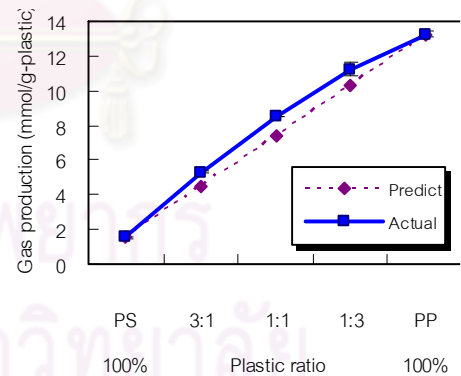
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



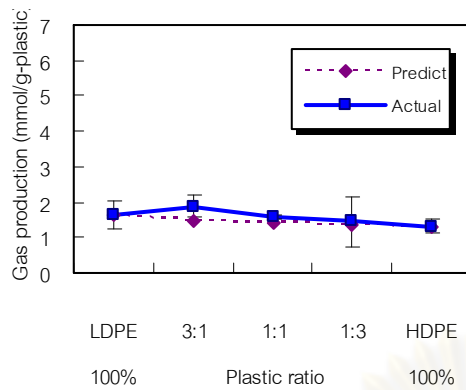
(ฉ) PS:PP

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ  
 ในกระบวนการแก๊สพีเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร  
 และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

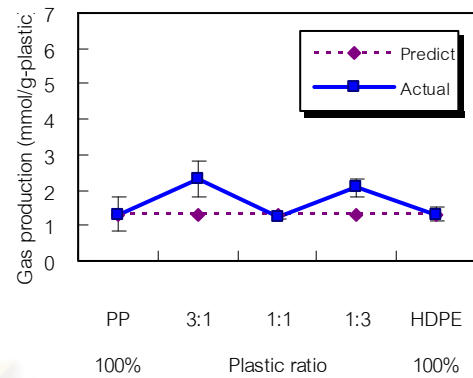
เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อวินาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมทุกคู่ ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังรูป 4.17 (ง) (จ) และ (ข) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมมีมากกว่าครึ่ง ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกอย่างเห็นได้ชัดต่อสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลในแง่ของการแพร่ของแรดิคัลขนาดเล็กเพื่อเข้าไปเกิดอันตรกิริยาดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นอย่างมากของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกรณีพลาสติกที่มีพอลิสไตรีนผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มากนั้น ส่งผลให้รั้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนของพลาสติกผสมในกรณีดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว สอดคล้องกับการลดลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮโดรเจน แสดงให้เห็นว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวในขั้นแรกสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไอน้ำ ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาซิฟท์ ดังสมการ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนนั่นเอง

จากการทดลองแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมแต่ละคู่ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะสังเกตได้ว่าคู่พลาสติกผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิพรอพิลีน (PP) ได้ก่อให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ในทุกอัตราส่วน ซึ่งส่งผลให้รั้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนที่ได้จากคู่พลาสติกผสมดังกล่าวเกิดอันตรกิริยาเชิงบวกด้วย ดังนั้นการคัดแยกชนิดของพลาสติก ให้เหลือแต่พอลิสไตรีน (PS) และพอลิพรอพิลีน (PP) ก่อนนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊สจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการแปรรูปเชื้อเพลิงแก๊สอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สมากกว่าที่คาดการณ์ไว้

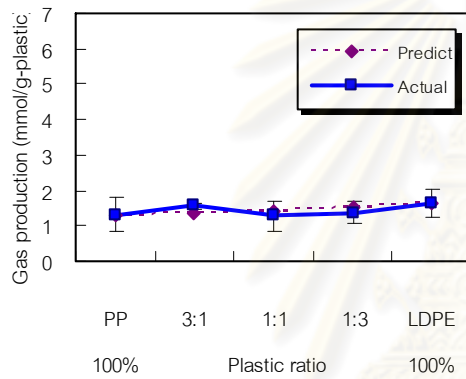




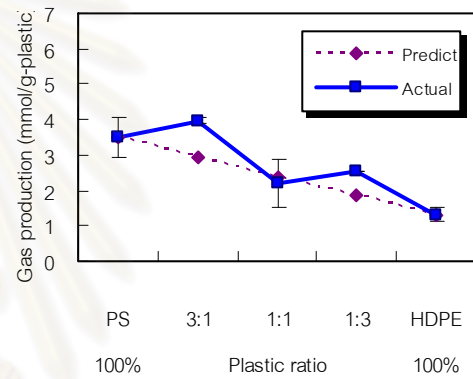
(ก) LDPE:HDPE



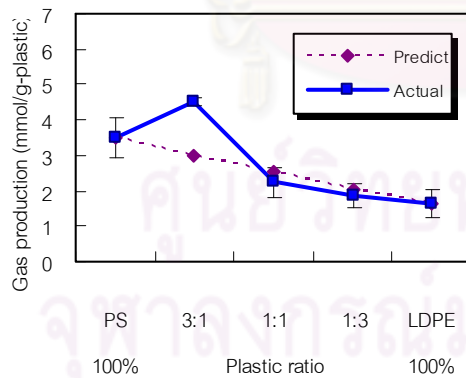
(ข) PP:HDPE



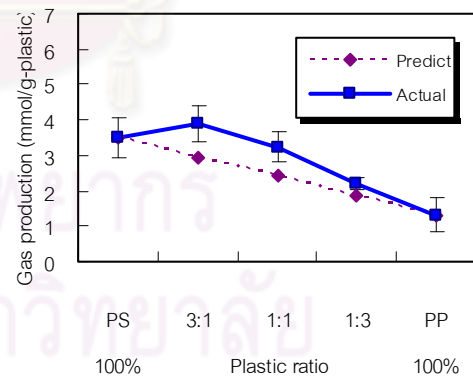
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



(ฉ) PS:PP

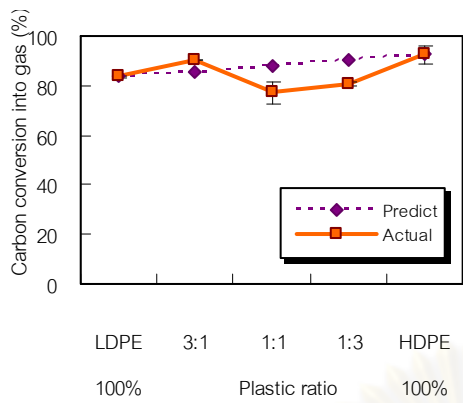
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.3.2 การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

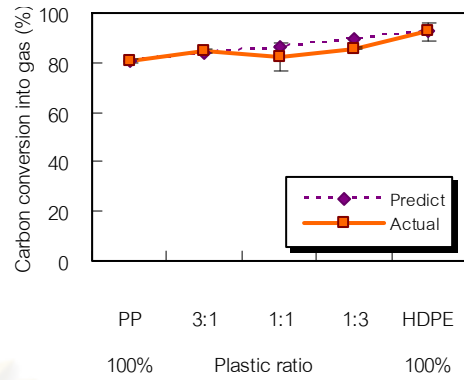
##### 4.3.2.1 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าพลาสติกทุกคู่มีการเกิดอันตรกิริยาต่อกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟของผลการทดลองจริงที่มีการเบี่ยงเบนออกจากเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีอิทธิพลอย่างมากต่ออันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่ละชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคู่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมอยู่

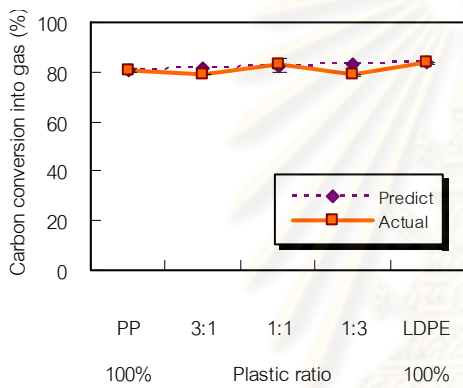
ในกรณีของพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ พบว่าการใช้อัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมที่มากกว่าหนึ่งส่วน (1:1 และ 3:1) ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.18 (ง) (จ) และ (ฉ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรคาร์บอนและทาร์ที่เกิดจากการใช้พอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่มากกว่าข้างต้น สามารถถูกเร่งให้เกิดการแตกตัวอย่างมีประสิทธิภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโคโลไมต์ ผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ (Tar cracking) ออกซิเดชัน (Oxidation) และรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ในขณะที่การใช้พอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่ต่ำกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าใกล้เคียงกับผลที่คำนวณได้ นอกจากนี้การใช้พอลิสไตรีน (PS) ในอัตราส่วนที่มาก ยังส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกอย่างเห็นได้ชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสม เป็นการส่งเสริมให้มีปริมาณของแรติคัลขนาดเล็กที่เกิดจากการแตกตัวของพอลิสไตรีน (PS) ในขั้นตอนการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก สามารถแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของพอลิแอลคีนดังกล่าวแล้วเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจน



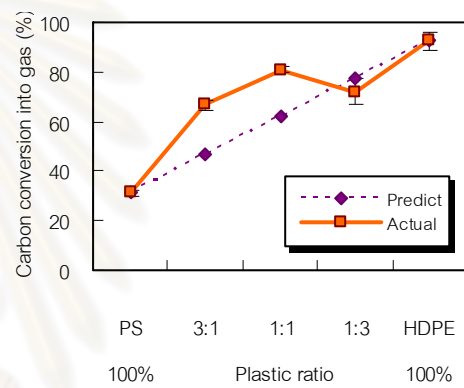
(ก) LDPE:HDPE



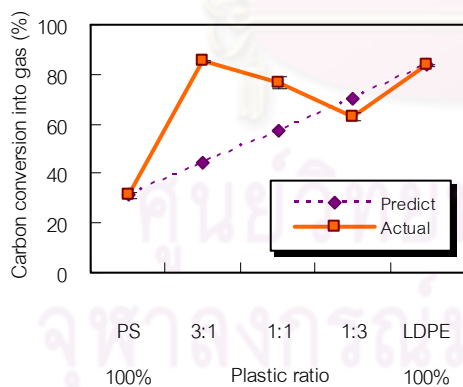
(ข) PP:HDPE



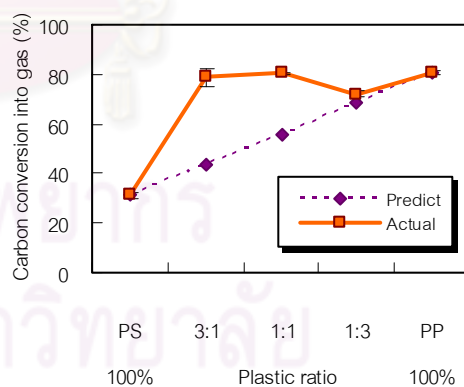
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



(ฉ) PS:PP

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริง กับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพิกซ์พลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

ระหว่างแรติคัลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ และออกซิเจน ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สนั่นเอง

สำหรับกรณีของพลาสติกที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมอยู่ พบว่าการใช้อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในพลาสติกผสมที่มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะกรณีที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมอยู่สามในสี่ของพลาสติกผสมทั้งหมด ดังรูป 4.18 (ก) (ข) และ (ง) แสดงให้เห็นว่าไฮโดรคาร์บอนและทาร์ ที่เกิดจากการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วนที่มากขึ้น สามารถถูกเร่งให้เกิดการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ โดยเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สของกรณีพลาสติกที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมอยู่สามส่วน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 25-30 จากกรณีที่ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่สามส่วนนั้น มีการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40-60 จากกรณีที่ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ชี้ให้เห็นว่าการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงลบอย่างเห็นได้ชัดต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยสามารถอธิบายได้ว่าการที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพลาสติกที่มีการจัดเรียงโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ ทำให้สายโซ่สามารถเรียงตัวกันในช่องว่างภายในโครงผลึกได้อย่างหนาแน่น ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ภายในโครงผลึกอย่างแข็งแรง ดังนั้นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จึงมีโอกาสเกิดการแตกตัวเป็นแรติคัลได้ยากกว่าพลาสติกอื่นๆ ในช่วงแรกของการสลายตัวด้วยความร้อน จึงส่งผลให้แรติคัลที่เกิดจากการแตกตัวของพลาสติกดังกล่าวยากแก่การแพร่เข้าไปยังโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เพื่อเกิดอันตรกิริยาต่อกันระหว่างแรติคัลของพอลิเมอร์

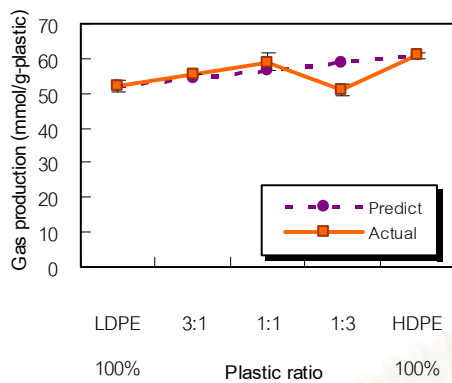
#### 4.3.2.2 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองจริงกับการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสม

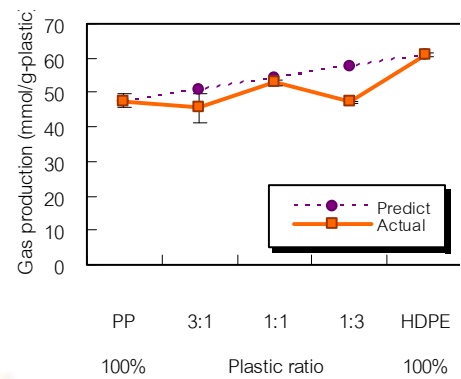
ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ พบว่าพลาสติกแต่ละคู่ได้แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และเอทิลีน ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าที่คำนวณได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียวอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ผลของแก๊สเอเทนกลับไม่แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกแต่อย่างใด

เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลกราคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รัอยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่มากกว่าหนึ่งส่วนได้ก่อให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.19 (ง) (จ) และ (ฉ) นอกจากนี้อันตรกิริยายังเป็นไปในเชิงบวกมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดอันตรกิริยานั้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับไอน้ำและออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยา Water gas แล้วเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนนั่นเอง

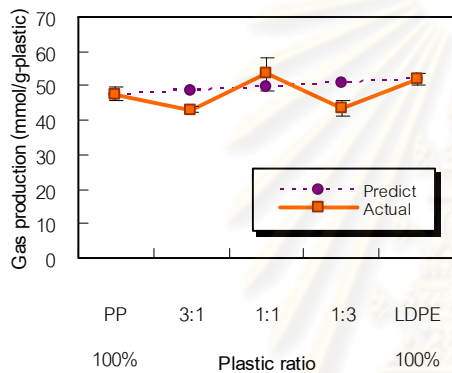
ในขณะที่คู่ผสมระหว่างพลาสติกพอลิเอทิลีน ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) ได้ก่อให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงลบต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะกรณีที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกที่ต่างกันมากๆ (1:3 และ 3:1) จะสังเกตเห็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งอธิบายได้ว่าการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกของพลาสติกพอลิเอทิลีนก่อให้เกิดแรดิคัลที่ประกอบด้วยพันธะ C-C ขนาดใหญ่ ซึ่งยากแก่การแพร่เข้าไปเกิดอันตรกิริยาในโครงสร้างของพลาสติกอีกชนิด อีกทั้งการหมุน (rotation) ของแรดิคัลดังกล่าวได้ก่อให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Faravelli et al., 2003) ส่งผลให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้น้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้



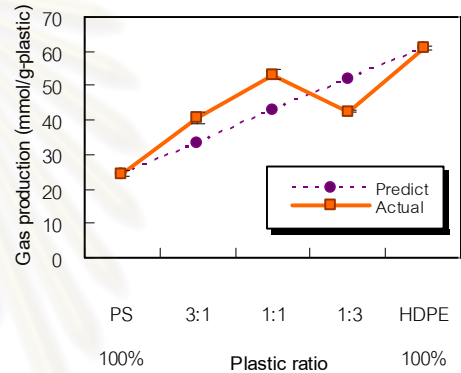
(ก) LDPE:HDPE



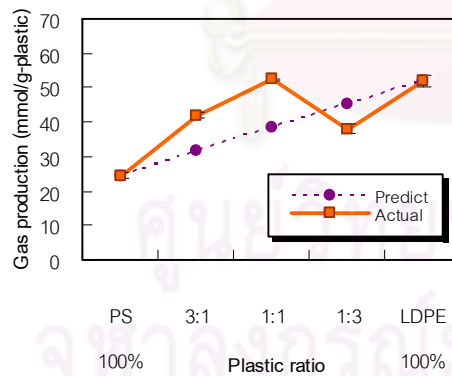
(ข) PP:HDPE



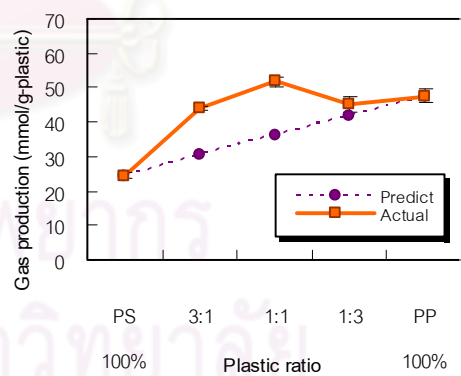
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE

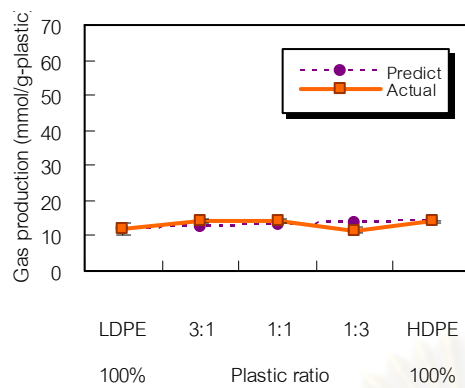


(ฉ) PS:PP

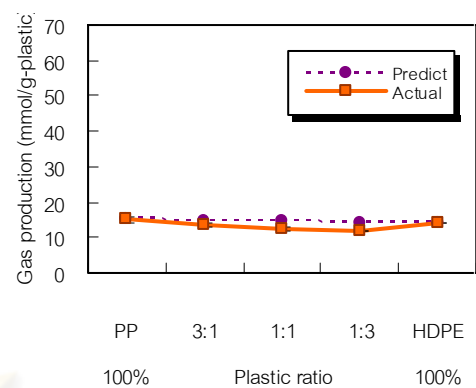
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพีเคซินพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่ามีเพียงคู่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่เท่านั้นที่มีอันตรกิริยาต่อการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้อัตราส่วนของพอลิสไตรีน (PS) ที่มากกว่าหนึ่งส่วน ได้ก่อให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอธิบายได้ว่าที่อัตราส่วนดังกล่าวส่งผลให้มีแรดิคัลที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกๆของพลาสติกมีปริมาณมากพอที่จะเกิดอันตรกิริยาผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจนระหว่างแรดิคัลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับไอน้ำและออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน และปฏิกิริยา Water gas เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากค่าที่คาดการณ์ว่า ได้ส่งผลให้ระยะเวลาการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่คาดการณ์ไว้ด้วย

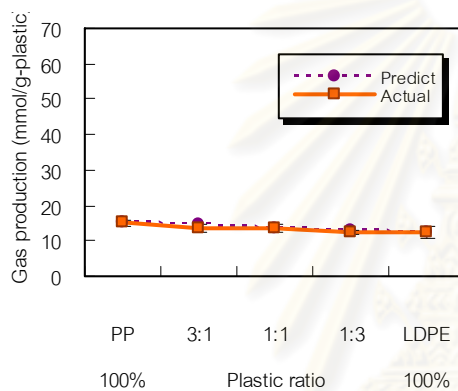
เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีพีเคชั่นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับบนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่ามีเพียงคู่พลาสติกผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) กับพอลิสไตรีน (PS) เท่านั้นที่มีการเกิดอันตรกิริยาเชิงลบต่อกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สมีเทนที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกอาจถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการแตกตัวด้วยไอน้ำผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สมีเทนลดลง ในขณะที่แก๊สไฮโดรเจนมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น



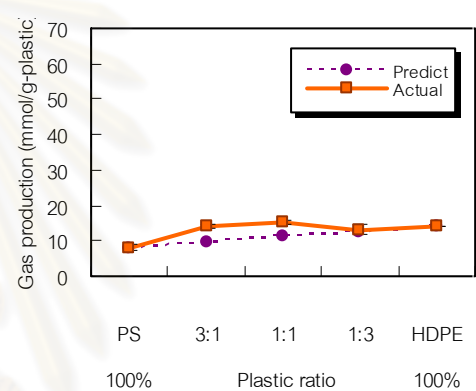
(ก) LDPE:HDPE



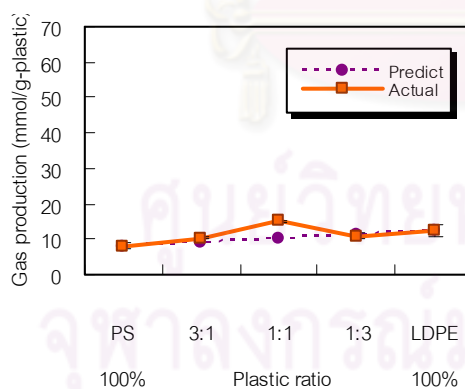
(ข) PP:HDPE



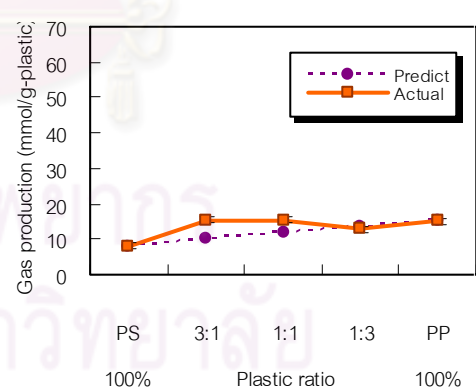
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



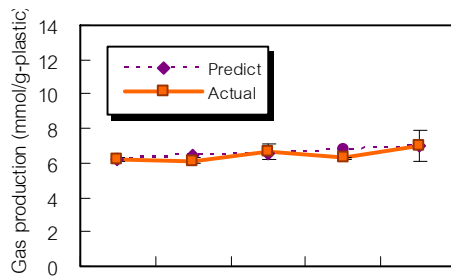
(จ) PS:LDPE



(ฉ) PS:PP

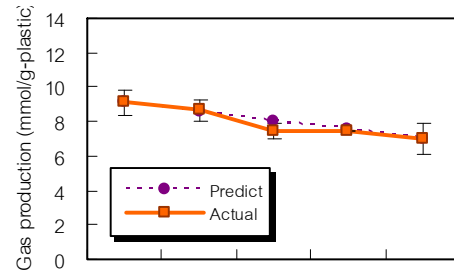
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สซิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที





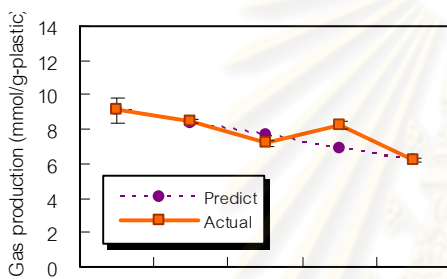
LDPE 100% 3:1 1:1 1:3 HDPE 100%  
Plastic ratio

(ก) LDPE:HDPE



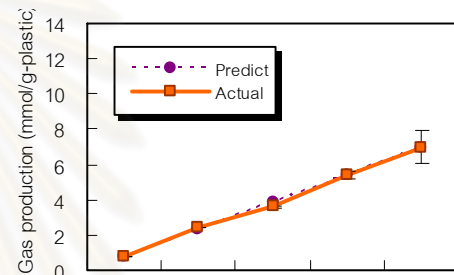
PP 100% 3:1 1:1 1:3 HDPE 100%  
Plastic ratio

(ข) PP:HDPE



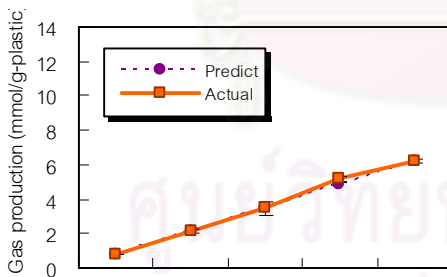
PP 100% 3:1 1:1 1:3 LDPE 100%  
Plastic ratio

(ค) PP:LDPE



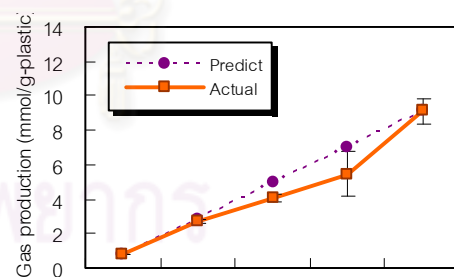
PS 100% 3:1 1:1 1:3 HDPE 100%  
Plastic ratio

(ง) PS:HDPE



PS 100% 3:1 1:1 1:3 LDPE 100%  
Plastic ratio

(จ) PS:LDPE



PS 100% 3:1 1:1 1:3 PP 100%  
Plastic ratio

(ฉ) PS:PP

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแก๊สพิกซ์พลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

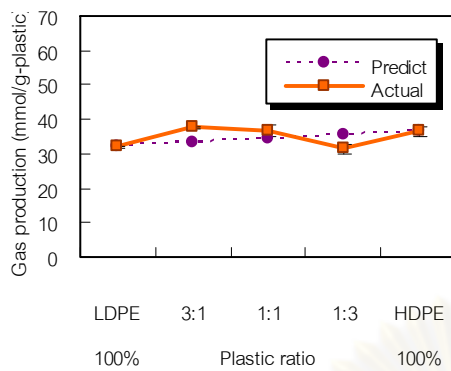
ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร

และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

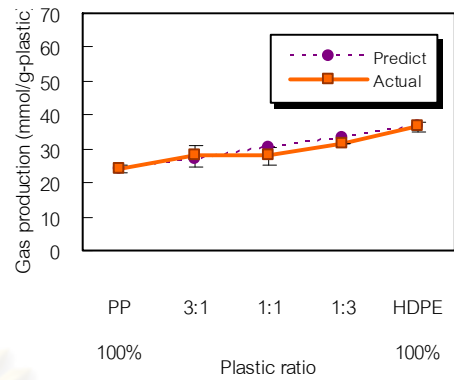
เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่มากกว่าหนึ่งส่วนได้ก่อให้เกิดอันตรายที่เชิงลบต่อการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ดังรูป 4.22 (ง) (จ) และ (ฉ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลในแง่ของการแพร่ของแรดิคัลในปริมาณมากเพื่อเข้าไปเกิดอันตรายระหว่างแรดิคัลของพลาสติกทั้งสองชนิด ผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน และการถ่ายโอนไฮโดรเจนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิสไตรีนเพียงหนึ่งส่วนผสมกับพอลิแอลคีนสามส่วนกลับพบว่าเกิดอันตรายที่เชิงลบต่อการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พอลิแอลคีนในอัตราส่วนที่มากได้ก่อให้เกิดแรดิคัลที่มีขนาดใหญ่และหน่วงการเกิดปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนและการถ่ายโอนไฮโดรเจน นอกจากนี้มีความเป็นไปได้ว่าแรดิคัลดังกล่าวมีโครงสร้างที่ยากต่อการแตกตัวด้วยไอน้ำและออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้

อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัดมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากค่าที่คาดการณ์ว่า ได้ส่งผลให้ระยะการเปลี่ยนของคาร์บอนของพลาสติกผสมเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่คาดการณ์ไว้ด้วย

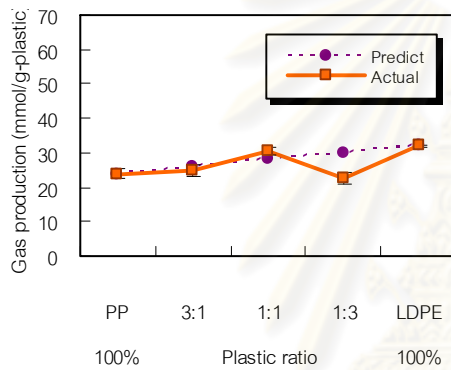
เมื่อพิจารณาสัดส่วนแก๊สเอทิลีนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองด้วยพลาสติกชนิดเดียว ในกระบวนการแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ 3:1 1:1 และ 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มาก ได้ก่อให้เกิดอันตรายที่เชิงลบอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จากอันตรายดังกล่าวสามารถเกิดการแตกตัวด้วยไอน้ำและออกซิเจนแล้วเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้



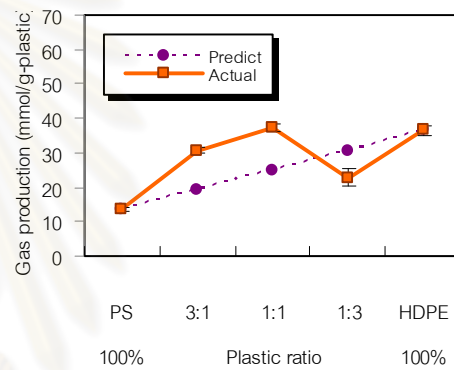
(ก) LDPE:HDPE



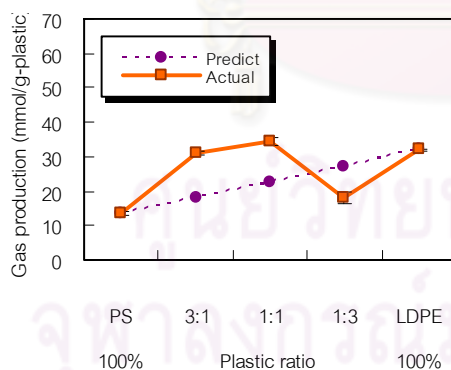
(ข) PP:HDPE



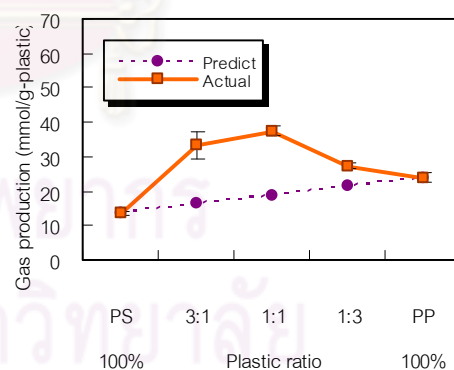
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE

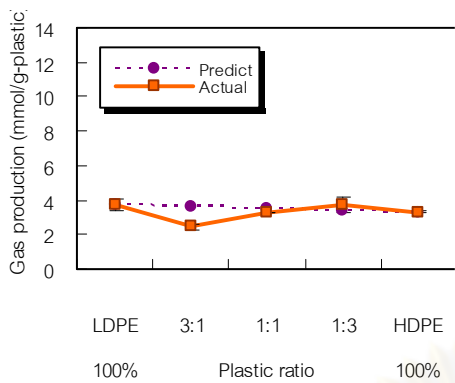


(จ) PS:LDPE

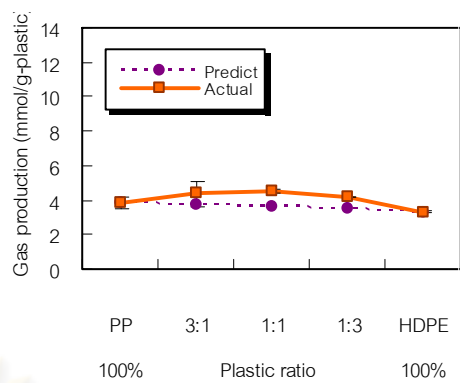


(ฉ) PS:PP

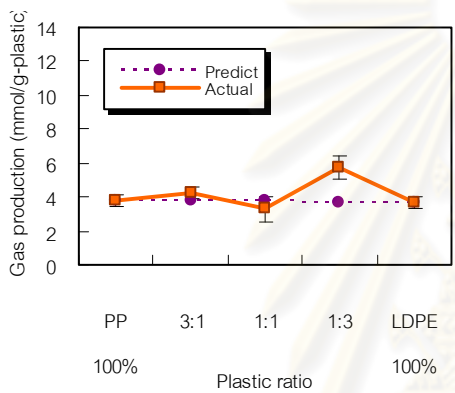
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที



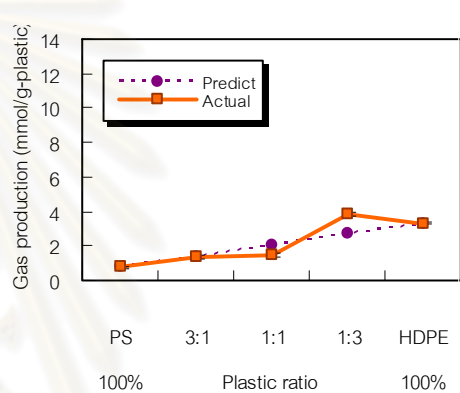
(ก) LDPE:HDPE



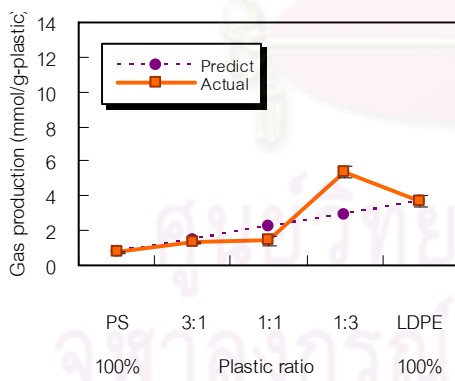
(ข) PP:HDPE



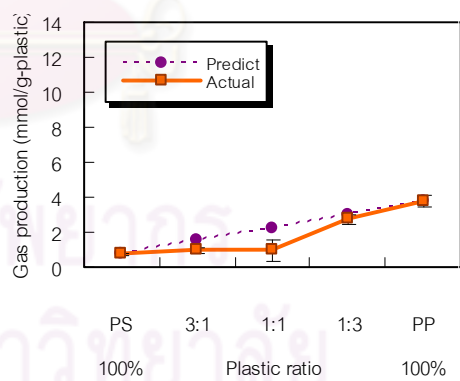
(ค) PP:LDPE



(ง) PS:HDPE



(จ) PS:LDPE



(ฉ) PS:PP

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสัดส่วนของแก๊สเอทิลีนที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการคำนวณ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่มีพอลิแอลคีนผสมอยู่ พบว่าการใช้พลาสติกดังกล่าวในอัตราส่วนที่มากได้ก่อให้เกิดอันตรายภายในเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สเอทธิลีนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าผลิตภัณฑ์บางส่วนที่ได้จากอันตรายภายในช่วงแรก มีโครงสร้างทางเคมีที่เอื้อต่อการแตกตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดแก๊สเอทธิลีนที่มีค่ามากกว่าที่คาดการณ์ไว้นั่นเอง

จากการทดลองแกซีพีเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมแต่ละคู่ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ จะสังเกตได้ว่าคู่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) อยู่ในอัตราส่วนที่มากกว่าหนึ่งในสี่ส่วนได้ก่อให้เกิดอันตรายที่น่าสนใจต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส กล่าวคือแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีการเกิดอันตรายภายในเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากคู่พลาสติกผสมดังกล่าวเกิดอันตรายภายในเชิงบวกอย่างมากด้วย ในขณะที่แก๊สเอทธิลีนเกิดอันตรายภายในเชิงลบอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน ดังนั้นการใช้พอลิสไตรีน (PS) ผสมกับพลาสติกพอลิแอลคีนในอัตราส่วนที่มากกว่าหนึ่งในสี่ส่วนเข้าร่วมเกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการแปรรูปเชื้อเพลิงแก๊สที่มีประสิทธิภาพ เพราะนอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นในระบบแล้วยังช่วยเพิ่มสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการมากกว่าที่คาดการณ์ไว้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติก ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลของชนิดพลาสติก

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สามารถผลิตแก๊สได้มากที่สุด รองลงมา คือ พอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) โดยร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส คือ ร้อยละ 55 54 43 และ 13 ตามลำดับ

ในการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดจากพลาสติกพอลิเอทิลีน คือ แก๊สเอทธิลีน มีเทน และไฮโดรเจน โดยพอลิพรอพิลีน (PP) ให้แก๊สมีเทนมากที่สุด ในขณะที่พอลิเอทธิลีน (PE) ทั้งสองชนิดให้แก๊สเอทธิลีน และไฮโดรเจนมากที่สุด ส่วนพอลิสไตรีน (PS) จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สน้อยที่สุดในทุกกรณี ยกเว้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

โครงสร้างที่แตกต่างกันของพลาสติกแต่ละชนิด มีผลต่อองค์ประกอบและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การสลายตัวของโครงสร้างที่ประกอบด้วยวงอะโรมาติกของพอลิสไตรีน (PS) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติกขนาดเล็ก

ไปจนถึงสารประกอบอะโรมาติกที่มีความซับซ้อน เช่น เบนซีน โทลูอีน เอทิล- และ เมทิลเบนซีน แนพทาซีน และ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) เป็นต้น

#### 5.1.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์

การแกซีฟิเคชันพลาสติกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณต่ำ และมีทาร์หรือสารระเหยง่ายที่ควบแน่นได้สูง แต่เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าร่วมในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นถึง 1.5-2.5 เท่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำได้เป็นอย่างดี

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สามารถผลิตแก๊สได้มากที่สุด รองลงมา คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส คือ ร้อยละ 92 84 81 และ 31 ตามลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังช่วยเพิ่มสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 5.1.3 ผลของการใช้พลาสติกผสม

การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่ด้วย จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีสัดส่วนน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้พอลิสไตรีน (PS) ในอัตราส่วนที่มาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำมันที่มีสารประกอบอะโรมาติก ในขณะที่

พลาสติกผสมพอลิแอลคีน จะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่มากกว่า และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สของพลาสติกทุกคู่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่คู่พลาสติกระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิดสามารถผลิตแก๊สได้มากที่สุด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 88 ของการเปลี่ยนของคาร์บอน ในขณะที่พลาสติกที่มีพอลิสไตรีน (PS) ผสมอยู่สามารถผลิตแก๊สได้เพิ่มขึ้นประมาณ 2.5-3 เท่า จากกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 5.1.4 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสม

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการแกซีฟิเคชันพลาสติกผสม ถูกพิจารณาว่าเกิดขึ้นของการสลายตัวด้วยความร้อนของพลาสติกในช่วงแรก ผ่านปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) และปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer) โดยที่โครงสร้างของพลาสติกที่แตกต่างกัน มีผลอย่างยิ่งต่อการเกิดอันตรกิริยาดังกล่าว

การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้พอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกต่อการผลิตแก๊สอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่พลาสติกพอลิแอลคีนมีการเกิดอันตรกิริยาต่อกันน้อยมากหรือแทบไม่เกิดเลย

การแกซีฟิเคชันพลาสติกผสมสองชนิดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้พอลิสไตรีน (PS) ในพลาสติกผสมด้วยอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงบวกต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาในเชิงลบต่อการผลิตแก๊สดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน



การใช้พอลิสไตรีน (PS) ผสมกับพลาสติกพอลิแอลคีนในอัตราส่วนที่มากกว่าครึ่งเข้าร่วมเกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการแปรรูปเชื้อเพลิงแก๊สที่มีประสิทธิภาพ เพราะนอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นในระบบแล้วยังช่วยเพิ่มสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ต้องการมากกว่าที่คาดการณ์ไว้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงกระบวนการโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ เช่น ฟลูอิโดซ์เบด ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้
2. ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการตัดแปลงหรือเปลี่ยนชนิดของตัวรองรับ ให้สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดและฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
3. ควรมีระบบในการดักจับทาร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของทาร์ที่ได้จากการทดลอง
4. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิในการเผา (Calcination) การนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปรีดิวซ์ก่อนนำมาใช้ แล้วเปรียบเทียบสมบัติและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้
5. ติดตั้งระบบการกวนผสมพลาสติกก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อสนับสนุนการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพลาสติก ในขั้นตอนการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก
6. ศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อสนับสนุนการเกิดอันตรกิริยาในขั้นตอนการสลายตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ธรรมา มงคลศรี. หลักมูลทางวิศวกรรมปฏิกิริยาตัวเร่ง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

ปรารงค์เนตร เฟื่องฟูง. แก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. พอลิเมอร์เบื้องต้น 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2546.

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, กรม. การผลิตพลังงานจากขยะชุมชน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.energy.go.th> [2552, กันยายน 9].

พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. การผลิตพลังงานจากขยะชุมชน. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน, 2549.

วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คະຕະไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกกรีไซเคิล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.thaiwasteexchange.net/knowledge/pdf/file\\_dc7ae9b2f0ec467dd7ae4d7f9f9e290e.pdf](http://www.thaiwasteexchange.net/knowledge/pdf/file_dc7ae9b2f0ec467dd7ae4d7f9f9e290e.pdf) [2552, กันยายน 1].

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. แปลงขยะไร้ค่าเป็นน้ำมัน ทางออกวิกฤตพลังงาน. นโยบายพลังงาน 80 (เมษายน-มิถุนายน 2551): 8-12.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. พลาสติก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic.html) [2552, กันยายน 7].

## ภาษาอังกฤษ

- Ahmed, I. and Gupta, A.K. Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper. Applied Energy 86 (2009): 1813-1821.
- Ahmed, I.I. and Gupta, A.K. Hydrogen production from polystyrene pyrolysis and gasification: Characteristics and kinetics. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009): 6253-6264.
- Ahmed, S., Aitani, A., Rahman, F., Al-Dawood, A. and Al-Muhaish, F. Decomposition of hydrocarbons to hydrogen and carbon. Applied Catalysis a-General 359 (2009): 1-24.
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P. and Baeyens, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management 29 (2009): 2625-2643.
- Angyal, A., Miskolczi, N. and Bartha, L. Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 79 (2007): 409-414.
- Asadullah, M., Zhang, S., Min, Z.H., Yimsiri, P. and Li, C.Z. Importance of Biomass Particle Size in Structural Evolution and Reactivity of Char in Steam Gasification. Industrial & Engineering Chemistry Research 48 (2009): 9858-9863.
- Aznar, M.P., Caballero, M.A., Sancho, J.A. and Frances, E. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. Fuel Processing Technology 87 (2006): 409-420.
- Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, U. and Schwaller, D. Kinetic study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 48 (1999): 93-109.
- Cardona, S.C. and Corma, A. Kinetic study of the catalytic cracking of polypropylene in a semibatch stirred reactor. Catalysis Today 75 (2002): 239-246.
- Devi, L., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G., van Paasen, S.V.B., Bergman, P.C.A. and Kiel, J.H.A. Catalytic decomposition of biomass tars: use of dolomite and untreated olivine. Renewable Energy 30 (2005): 565-587.
- Donald, L.K. Biomass for Renewable Energy, Fuel, and Chemicals. London: Academic Press, 1988.

- Encinar, J.M. and Gonzalez, J.F. Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes. Kinetic study. Fuel Processing Technology 89 (2008): 678-686.
- Garcia-Bacaicoa, P., Mastral, J.F., Ceamanos, J., Berrueto, C. and Serrano, S. Gasification of biomass/high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier. Bioresource Technology 99 (2008): 5485-5491.
- Garforth, A.A., Ali, S., Hernandez-Martinez, J. and Akah, A. Feedstock recycling of polymer wastes. Current Opinion in Solid State & Materials Science 8 (2004): 419-425.
- He, M.Y., Xiao, B., Hu, Z.Q., Liu, S.M., Guo, X.J. and Luo, S.Y. Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009): 1342-1348.
- Kaminsky, W., Schlesselmann, B. and Simon, C. Olefins from Polyolefins and Mixed Plastics by Pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 32 (1995): 19-27.
- Kaminsky, W. and Zorriquetta, I.J.N. Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 79 (2007): 368-374.
- Kantarelis, E., Donaj, P., Yang, W. and Zabaniotou, A. 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 (2009): 675-684.
- Kruse, T.M., Levine, S.E., Wong, H.W., Duoss, E., Lebovitz, A.H., Torkelson, J.M. and Broadbelt, L.J. Binary mixture pyrolysis of polypropylene and polystyrene: A modeling and experimental study. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 73 (2005): 342-354.
- Lin, Y.H. and Yen, H.Y. Fluidised bed pyrolysis of polypropylene over cracking catalysts for producing hydrocarbons. Polymer Degradation and Stability 89 (2005): 101-108.

- Lv, P.M., Xiong, Z.H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y. and Zhu, J.X. An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. Bioresource Technology 95 (2004): 95-101.
- Mastellone, M.L. and Arena, U. Olivine as a tar removal catalyst during fluidized bed gasification of plastic waste. Aiche Journal 54 (2008): 1656-1667.
- McIlveen-Wright, D.R., Pinto, F., Armesto, L., Caballero, M.A., Aznar, M.P., Cabanillas, A., Huang, Y., Franco, C., Gulyurtlu, I. and McMullan, J.T. A comparison of circulating fluidised bed combustion and gasification power plant technologies for processing mixtures of coal, biomass and plastic waste. Fuel Processing Technology 87 (2006): 793-801.
- McNeill, I.C. Thermal degradation mechanisms of some addition polymers and copolymers. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 40-1 (1997): 21-41.
- McNeill, I.C. Thermal degradation of polystyrene in different environments. Angewandte Makromolekulare Chemie 247 (1997): 179-195.
- Miskolczi, N., Bartha, L., Deak, G. and Jover, B. Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. Polymer Degradation and Stability 86 (2004): 357-366.
- Miskolczi, N., Bartha, L., Deak, G., Jover, B. and Kallo, D. Thermal and thermo-catalytic degradation of high-density polyethylene waste. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 72 (2004): 235-242.
- Murata, K., Sato, K. and Sakata, Y. Effect of pressure on thermal degradation of polyethylene. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71 (2004): 569-589.
- Panda, A.K., Singh, R.K. and Mishra, D.K. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. Renewable & Sustainable Energy Reviews 14 (2010): 233-248.
- Pinto, F., Franco, C., Andre, R.N., Miranda, M., Gulyurtlu, I. and Cabrita, I. Co-gasification study of biomass mixed with plastic wastes. Fuel 81 (2002): 291-297.

- Predel, M. and Kaminsky, W. Pyrolysis of mixed polyolefins in a fluidised-bed reactor and on a pyro-GC/MS to yield aliphatic waxes. Polymer Degradation and Stability 70 (2000): 373-385.
- Serrano, D.P., Aguado, J., Escola, J.M. and Rodriguez, J.M. Influence of nanocrystalline HZSM-5 external surface on the catalytic cracking of polyolefins. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 74 (2005): 353-360.
- Siddiqui, M.N. and Redhwi, H.H. Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products. Fuel Processing Technology 90 (2009): 545-552.
- Simon, C.M., Kaminsky, W. and Schlesselmann, B. Pyrolysis of polyolefins with steam to yield olefins. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 38 (1996): 75-87.
- Singh, B. and Sharma, N. Mechanistic implications of plastic degradation. Polymer Degradation and Stability 93 (2008): 561-584.
- Sutton, D., Kelleher, B. and Ross, J.R.H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. Fuel Processing Technology 73 (2001): 155-173.
- Walendziewski, J. Continuous flow cracking of waste plastics. Fuel Processing Technology 86 (2005): 1265-1278.
- Williams, P.T. and Slaney, E. Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. Resources Conservation and Recycling 51 (2007): 754-769.
- Williams, P.T. and Williams, E.A. Interaction of plastics in mixed-plastics pyrolysis. Energy & Fuels 13 (1999): 188-196.
- Williams, P.T. and Williams, E.A. Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 51 (1999): 107-126.
- Wu, C. and Williams, P.T. Investigation of Ni-Al, Ni-Mg-Al and Ni-Cu-Al catalyst for hydrogen production from pyrolysis-gasification of polypropylene. Applied Catalysis B-Environmental 90 (2009): 147-156.
- Wu, C.F. and Williams, P.T. Hydrogen Production from the Pyrolysis-Gasification of Polypropylene: Influence of Steam Flow Rate, Carrier Gas Flow Rate and Gasification Temperature. Energy & Fuels 23 (2009): 5055-5061.

- Wu, C.F. and Williams, P.T. Ni/CeO<sub>2</sub>/ZSM-5 catalysts for the production of hydrogen from the pyrolysis-gasification of polypropylene. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009): 6242-6252.
- Wu, C.F. and Williams, P.T. Hydrogen production by steam gasification of polypropylene with various nickel catalysts. Applied Catalysis B-Environmental 87 (2009): 152-161.
- Wu, C.F. and Williams, P.T. Pyrolysis-gasification of plastics, mixed plastics and real-world plastic waste with and without Ni-Mg-Al catalyst. Fuel 89 (2010): 3022-3032.
- Wu, C.F. and Williams, P.T. Investigation of coke formation on Ni-Mg-Al catalyst for hydrogen production from the catalytic steam pyrolysis-gasification of polypropylene. Applied Catalysis B-Environmental 96 (2010): 198-207.
- Wu, C.F. and Williams, P.T. Pyrolysis-gasification of post-consumer municipal solid plastic waste for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010): 949-957.
- Xiao, R., Jin, B.S., Zhou, H.C., Zhong, Z.P. and Zhang, M.Y. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. Energy Conversion and Management 48 (2007): 778-786.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### สมบัติของพลาสติก

#### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

ตาราง ก1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก (ปรารงค์เนตร, 2550)

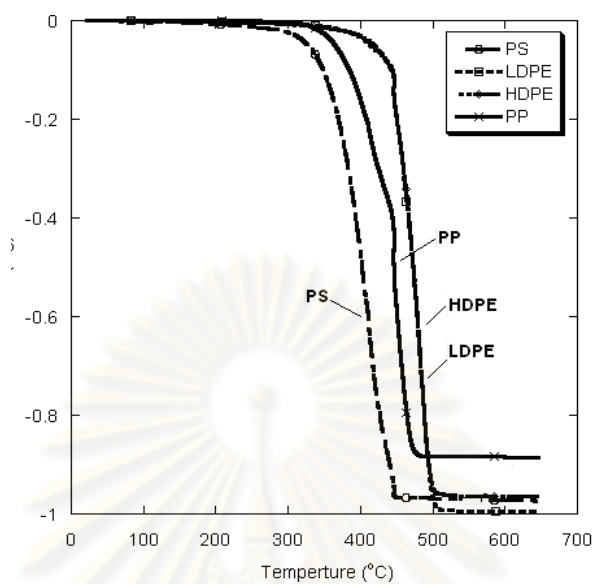
ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
PS	-	99.8	0.2
LDPE	-	100	-
HDPE	-	100	-
PP	-	100	-

#### 2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

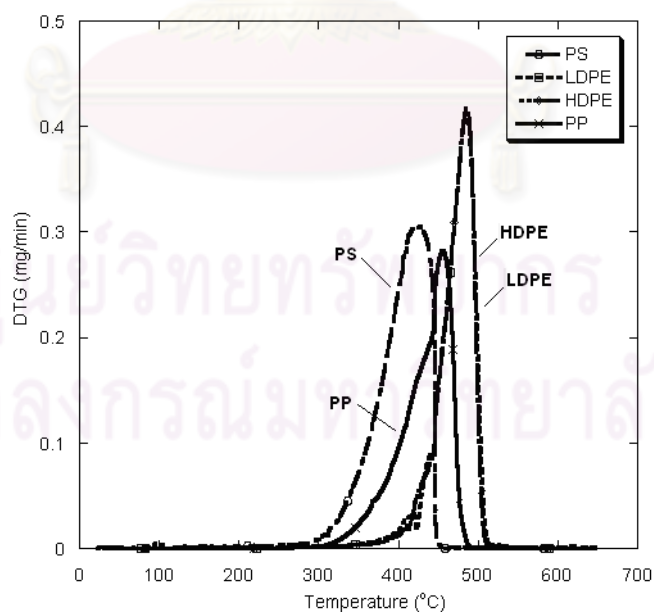
ตาราง ก2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก (ปรารงค์เนตร, 2550)

ชนิดของเชื้อเพลิง	ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน
PS	92.00	8.00	-	-
LDPE	85.56	14.44	-	-
HDPE	85.40	14.60	-	-
PP	85.19	14.81	-	-

### 3. การสลายตัวทางความร้อนของพลาสติก



รูป ก1 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนแก่พลาสติก  
ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที  
และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ปรารงค์เนตร, 2550)



รูป ก2 อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของพลาสติก  
ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที  
และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ปรารงค์เนตร, 2550)

## ภาคผนวก ข

### สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ

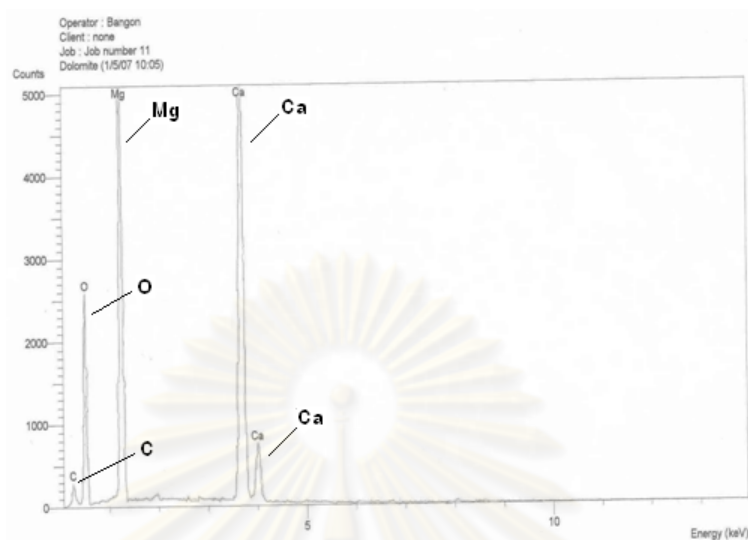
#### 1. สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตาราง ข1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ (ปรารงค์ เนตร, 2550)

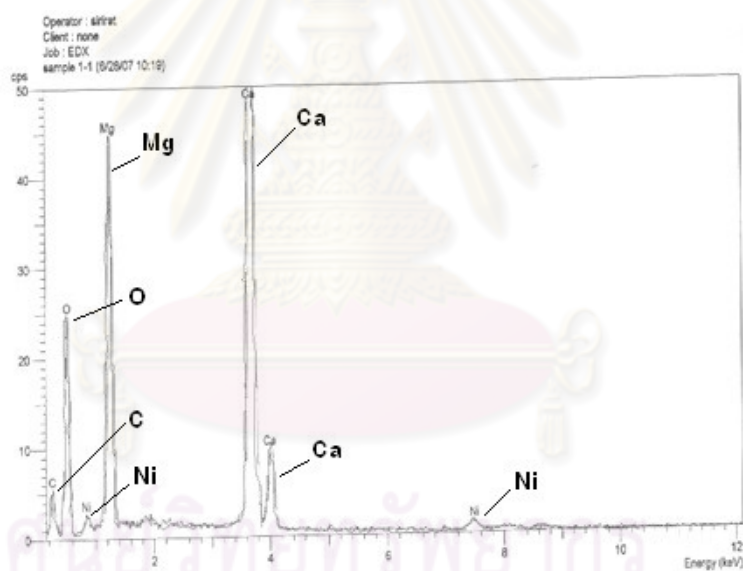
สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
Calcined dolomite	22.82	0.096
5%NiO/dolomite	17.34	0.058

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. สมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา



(ก)

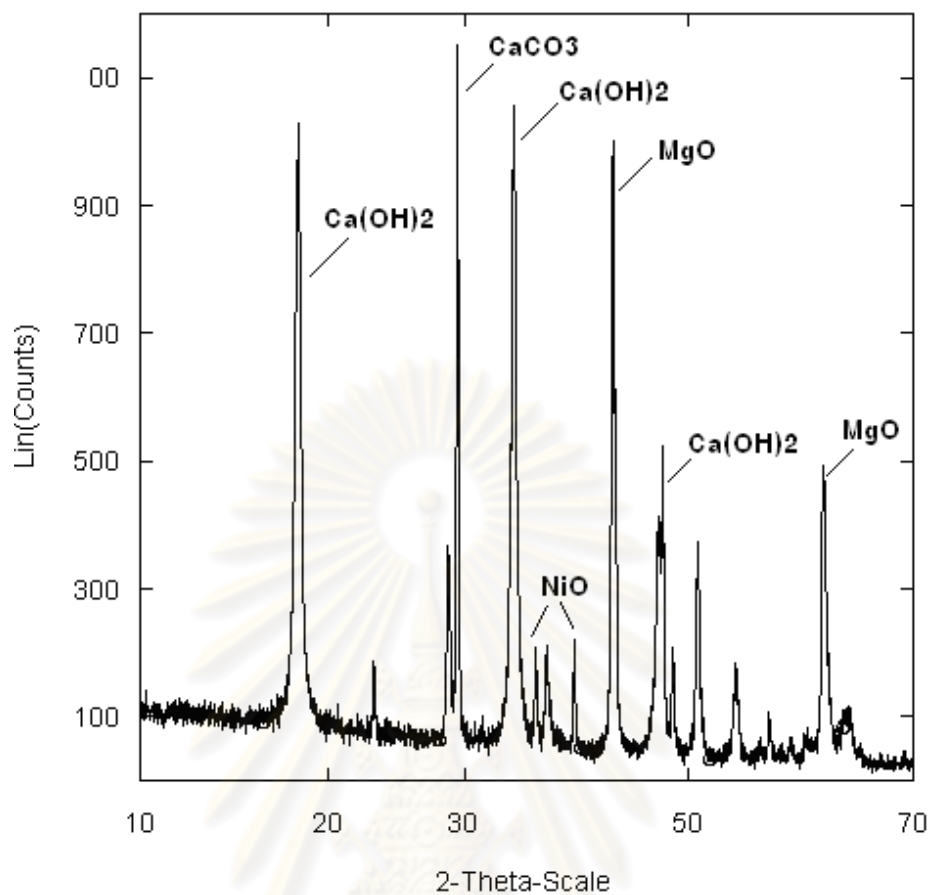


(ข)

รูป ข1 ผลการวิเคราะห์ธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับด้วยเทคนิค EDX

(ก) Calcined dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (ข) 5%NiO/dolomite

(ปรารงค์เนตร, 2550)

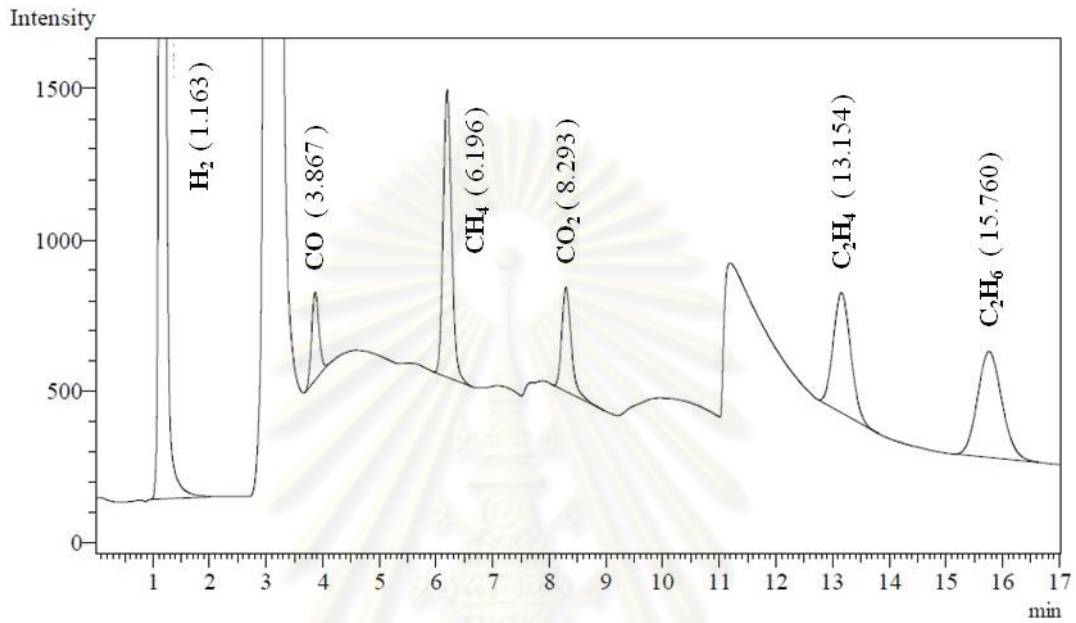


รูป ข2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%NiO/dolomite ด้วยเทคนิค XRD  
(ปรารงค์เนตร, 2550)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด



รูป ค1 โครมาโทแกรมของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard)

ตาราง ค1 ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard)

ตัวมาตรฐาน	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			% balance in N <sub>2</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
H <sub>2</sub>	50711.50	50334.70	50523.10	1.00
CO	2656.80	2634.00	2645.40	1.00
CH <sub>4</sub>	14801.70	9797.30	12299.50	1.00
CO <sub>2</sub>	3624.20	4055.00	3839.60	1.00
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	8669.80	8499.60	8584.70	1.00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	10583.10	10380.20	10481.65	1.00

ตัวอย่างเช่น แก๊สพีเคชั่น พลาสติกหนัก 0.1003 กรัม ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของ  
ไอน้ำ 52 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของแก๊สรวม 100 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊ส 10 นาที/ถุง

ดังนั้น ปริมาตรที่เก็บ 1000 มิลลิลิตร/ถุง

ตาราง ค2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

(ก) ถุงที่ 1 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			%	mmol/g <sub>sample</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
H <sub>2</sub>	443254.60	492876.20	468065.40	9.27	37.78
CO	6657.90	7654.80	7156.35	2.71	11.03
CH <sub>4</sub>	13977.00	13963.00	13970.00	1.18	4.83
CO <sub>2</sub>	12665.40	13029.00	12847.20	3.35	13.67
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5092.80	4760.50	4926.65	0.57	2.34
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1104.90	1178.50	1141.70	0.11	0.44

(ข) ถุงที่ 2 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			%	mmol/g <sub>sample</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
H <sub>2</sub>	88858.50	79230.90	84044.70	1.66	6.78
CO	1209.20	992.20	1100.70	0.42	1.70
CH <sub>4</sub>	2291.20	1304.70	1797.95	0.14	0.59
CO <sub>2</sub>	10352.20	11744.20	11048.20	2.88	11.73
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1193.70	547.00	870.35	0.10	0.41
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	203.10	122.70	162.90	0.02	0.06

(ค) ถูที่ 3 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			%	mmol/g <sub>sample</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
H <sub>2</sub>	8152.50	6005.20	7078.85	0.14	0.57
CO	72.50	44.90	58.70	0.02	0.09
CH <sub>4</sub>	182.10	73.30	127.70	0.01	0.04
CO <sub>2</sub>	1487.70	1614.50	1551.10	0.40	1.65
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	43.40	0.00	21.70	0.00	0.01
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(ง) ถูที่ 4 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			%	mmol/g <sub>sample</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
H <sub>2</sub>	691.10	392.20	541.65	0.01	0.04
CO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CH <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	233.80	195.60	214.70	0.06	0.23
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(จ) ถูที่ 5 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)			%	mmol/g <sub>sample</sub>
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
H <sub>2</sub>	87.50	34.70	61.10	0.00	0.00
CO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CH <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	45.40	50.70	48.05	0.01	0.05
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ = ถังที่ 1 + ถังที่ 2 + ถังที่ 3 + ถังที่ 4 + ถังที่ 5

องค์ประกอบแก๊ส	mmol/g <sub>sample</sub>
H <sub>2</sub>	45.18
CO	12.82
CH <sub>4</sub>	5.46
CO <sub>2</sub>	27.33
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.76
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.51



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การคำนวณ

#### 1. ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในพลาสติก (Carbon conversion)

ตัวอย่างเช่น แกซีพีเคชั่น พอลิพรอพิลีน (PP) หนัก 0.1003 กรัม ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

น้ำหนักพลาสติก 0.1003 กรัม

ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนในพลาสติก (พอลิพรอพิลีน) เท่ากับ 85.19

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในพลาสติก (พอลิพรอพิลีน) เท่ากับ

$$0.1003 \times \frac{85.19}{100} = 0.09 \text{ กรัม}$$

ตาราง ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพอลิพรอพิลีน

องค์ประกอบแก๊ส	mmol
H <sub>2</sub>	0.51
CO	0.04
CH <sub>4</sub>	1.32
CO <sub>2</sub>	0.10
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.76
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.06

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส CO เท่ากับ } 0.04 \times \frac{12}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส CO}_2 \text{ เท่ากับ } 0.10 \times \frac{12}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส } \text{CH}_4 \text{ เท่ากับ } 1.32 \times \frac{12}{1000} = 0.20 \text{ กรัม}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส } \text{C}_2\text{H}_4 \text{ เท่ากับ } 0.76 \times \frac{24}{1000} = 0.20 \text{ กรัม}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส } \text{C}_2\text{H}_6 \text{ เท่ากับ } 0.06 \times \frac{24}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$$

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ( $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$ ) เท่ากับ 0.04 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น น้ำหนักคาร์บอนในทาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในพลาสติก} - \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส} \\ &= 0.09 - 0.04 \text{ กรัม} \\ &= 0.05 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนในแก๊ส เท่ากับ } \frac{0.04}{0.09} \times 100 = 44.44$$

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนในทาร์ เท่ากับ } \frac{0.05}{0.09} \times 100 = 55.56$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE NO catalyst	H <sub>2</sub>	6.23	5.93	6.08	54.88	45.12
	CO	3.38	1.51	2.44		
	CH <sub>4</sub>	10.11	9.58	9.84		
	CO <sub>2</sub>	1.17	1.44	1.31		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	11.80	12.58	12.19		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.47	0.60	0.54		
LDPE NO catalyst	H <sub>2</sub>	4.68	5.03	4.86	53.47	46.53
	CO	0.88	0.71	0.79		
	CH <sub>4</sub>	8.94	10.31	9.62		
	CO <sub>2</sub>	1.30	2.02	1.66		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12.63	11.85	12.24		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.78	0.79	0.78		
PP NO catalyst	H <sub>2</sub>	5.52	5.10	5.31	43.22	56.78
	CO	0.26	0.36	0.31		
	CH <sub>4</sub>	13.39	13.15	13.27		
	CO <sub>2</sub>	1.67	0.97	1.32		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	7.06	7.55	7.31		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.54	0.64	0.59		
PS NO catalyst	H <sub>2</sub>	3.34	3.03	3.19	12.33	87.67
	CO	1.84	1.78	1.81		
	CH <sub>4</sub>	1.50	1.57	1.53		
	CO <sub>2</sub>	3.90	3.08	3.49		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.24	1.35	1.30		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.03	0.00	0.01		

ตาราง ๑2 ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE NO catalyst	H <sub>2</sub>	4.89	5.74	5.31	53.52	46.48
	CO	0.98	0.95	0.97		
	CH <sub>4</sub>	9.37	10.24	9.80		
	CO <sub>2</sub>	1.63	1.54	1.59		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12.28	12.22	12.25		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.65	0.62	0.63		
HDPE : PP NO catalyst	H <sub>2</sub>	5.32	5.26	5.29	46.44	53.56
	CO	1.33	1.17	1.25		
	CH <sub>4</sub>	9.63	9.94	9.78		
	CO <sub>2</sub>	1.28	1.19	1.23		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10.39	10.56	10.48		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.62	0.61	0.62		
HDPE : PS NO catalyst	H <sub>2</sub>	5.00	4.87	4.94	33.91	66.09
	CO	0.77	1.32	1.04		
	CH <sub>4</sub>	6.72	5.90	6.31		
	CO <sub>2</sub>	4.38	3.42	3.90		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6.58	6.50	6.54		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.40	0.34	0.37		
LDPE : PP NO catalyst	H <sub>2</sub>	5.23	5.02	5.13	48.60	51.40
	CO	1.02	0.79	0.90		
	CH <sub>4</sub>	11.06	11.19	11.12		
	CO <sub>2</sub>	1.01	1.53	1.27		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.92	10.00	9.96		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.63	0.73	0.68		
LDPE : PS NO catalyst	H <sub>2</sub>	4.23	4.36	4.30	28.13	71.87
	CO	0.20	1.15	0.67		
	CH <sub>4</sub>	6.33	5.30	5.81		
	CO <sub>2</sub>	1.93	2.55	2.24		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.55	5.83	5.69		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.44	0.28	0.36		
PP : PS NO catalyst	H <sub>2</sub>	4.94	4.45	4.70	28.58	71.42
	CO	0.67	0.60	0.64		
	CH <sub>4</sub>	8.50	8.55	8.52		
	CO <sub>2</sub>	2.76	3.31	3.04		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.04	4.18	4.11		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.28	0.28	0.28		

ตาราง ๑3 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:3 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.43	5.85	5.64	52.36	47.64
	CO	0.35	0.50	0.43		
	CH <sub>4</sub>	10.67	11.19	10.93		
	CO <sub>2</sub>	2.09	1.66	1.88		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	11.56	10.81	11.18		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.77	0.95	0.86		
HDPE : PP N0 catalyst	H <sub>2</sub>	4.92	5.06	4.99	47.38	52.62
	CO	1.16	0.64	0.90		
	CH <sub>4</sub>	10.92	12.04	11.48		
	CO <sub>2</sub>	2.66	1.93	2.30		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	8.87	8.88	8.88		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.55	0.67	0.61		
HDPE : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	4.48	4.92	4.70	23.71	76.29
	CO	1.54	1.09	1.31		
	CH <sub>4</sub>	4.44	4.96	4.70		
	CO <sub>2</sub>	3.91	4.04	3.98		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.83	3.48	3.66		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.24	0.30	0.27		
LDPE : PP N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.62	5.11	5.36	46.72	53.28
	CO	0.53	0.94	0.74		
	CH <sub>4</sub>	13.16	11.53	12.35		
	CO <sub>2</sub>	1.64	1.52	1.58		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	8.17	9.08	8.63		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.62	0.67	0.64		
LDPE : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	4.49	4.01	4.25	24.83	75.17
	CO	2.81	2.15	2.48		
	CH <sub>4</sub>	4.34	4.19	4.27		
	CO <sub>2</sub>	4.59	4.45	4.52		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.29	3.78	3.54		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.18	0.18	0.18		
PP : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	4.40	4.23	4.32	21.98	78.02
	CO	1.48	1.24	1.36		
	CH <sub>4</sub>	5.25	5.32	5.29		
	CO <sub>2</sub>	4.24	3.56	3.90		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.77	2.89	2.83		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.17	0.18	0.17		

ตาราง ๑4 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.33	5.13	5.23	53.91	46.09
	CO	0.38	0.39	0.39		
	CH <sub>4</sub>	10.33	10.30	10.32		
	CO <sub>2</sub>	1.95	0.94	1.44		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	11.34	12.22	11.78		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.75	0.84	0.80		
HDPE : PP N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.91	5.80	5.86	51.48	48.52
	CO	0.55	0.63	0.59		
	CH <sub>4</sub>	12.14	11.89	12.02		
	CO <sub>2</sub>	2.24	1.90	2.07		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10.22	10.28	10.25		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.75	0.69	0.72		
HDPE : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.29	5.10	5.19	41.15	58.85
	CO	0.63	0.63	0.63		
	CH <sub>4</sub>	8.91	8.81	8.86		
	CO <sub>2</sub>	2.54	2.53	2.54		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	8.25	8.44	8.34		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.57	0.57	0.57		
LDPE : PP N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.65	5.66	5.66	49.15	50.85
	CO	0.41	0.40	0.40		
	CH <sub>4</sub>	11.91	11.96	11.93		
	CO <sub>2</sub>	1.15	1.60	1.38		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.75	10.09	9.92		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.71	0.74	0.72		
LDPE : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	4.97	3.98	4.48	38.38	61.62
	CO	0.52	0.25	0.38		
	CH <sub>4</sub>	8.23	7.71	7.97		
	CO <sub>2</sub>	2.11	1.65	1.88		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	8.02	8.49	8.25		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.55	0.59	0.57		
PP : PS N0 catalyst	H <sub>2</sub>	5.57	5.38	5.48	37.91	62.09
	CO	1.31	1.27	1.29		
	CH <sub>4</sub>	11.59	10.85	11.22		
	CO <sub>2</sub>	2.31	2.12	2.22		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.92	5.90	5.91		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.42	0.48	0.45		

ตาราง ๑5 ข้อมูลการทดลองแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite)

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	61.34	60.37	60.86	92.42	7.58
	CO	14.01	13.94	13.98		
	CH <sub>4</sub>	7.64	6.34	6.99		
	CO <sub>2</sub>	37.50	35.49	36.49		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.40	3.26	3.33		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.89	0.76	0.83		
LDPE NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	50.94	53.21	52.07	83.50	16.50
	CO	11.00	13.41	12.21		
	CH <sub>4</sub>	6.26	6.15	6.21		
	CO <sub>2</sub>	32.30	31.70	32.00		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.91	3.45	3.68		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.94	0.82	0.88		
PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	49.06	46.22	47.64	80.62	19.38
	CO	14.61	15.79	15.20		
	CH <sub>4</sub>	8.59	9.64	9.11		
	CO <sub>2</sub>	24.85	23.08	23.96		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.58	4.03	3.81		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.76	0.58	0.67		
PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	23.74	25.18	24.46	31.20	68.80
	CO	7.65	8.64	8.15		
	CH <sub>4</sub>	0.79	0.80	0.80		
	CO <sub>2</sub>	13.09	13.85	13.47		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.78	0.69	0.74		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.03	0.00	0.01		



ตาราง ๑6 ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite)

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	60.69	57.28	58.99	86.83	13.17
	CO	15.26	13.53	14.39		
	CH <sub>4</sub>	7.01	6.38	6.69		
	CO <sub>2</sub>	37.74	35.61	36.68		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.26	3.23	3.25		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.87	0.81	0.84		
HDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	52.08	53.57	52.83	82.08	17.92
	CO	11.48	13.18	12.33		
	CH <sub>4</sub>	7.17	7.74	7.46		
	CO <sub>2</sub>	26.04	29.67	27.86		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.62	4.45	4.54		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.78	0.85	0.81		
HDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	52.15	54.52	53.33	80.48	19.52
	CO	15.13	15.29	15.21		
	CH <sub>4</sub>	3.56	3.61	3.59		
	CO <sub>2</sub>	36.26	37.84	37.05		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.52	1.40	1.46		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.29	0.42	0.36		
LDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	50.18	56.76	53.47	83.05	16.95
	CO	12.46	14.80	13.63		
	CH <sub>4</sub>	7.27	7.08	7.17		
	CO <sub>2</sub>	29.04	31.75	30.39		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.80	2.76	3.28		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.65	0.68	0.67		
LDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	52.55	51.98	52.26	76.52	23.48
	CO	16.24	13.89	15.06		
	CH <sub>4</sub>	3.76	3.14	3.45		
	CO <sub>2</sub>	33.77	35.40	34.58		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.62	1.21	1.41		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.41	0.28	0.34		
PP : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	50.74	52.79	51.76	80.37	19.63
	CO	15.13	15.89	15.51		
	CH <sub>4</sub>	4.24	3.87	4.05		
	CO <sub>2</sub>	36.40	38.36	37.38		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.38	0.55	0.97		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.29	0.17	0.23		

ตาราง ๑7 ข้อมูลการทดลองแกซีฟิเคชันพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 1:3 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite)

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	55.34	55.58	55.46	90.24	9.76
	CO	14.60	13.86	14.23		
	CH <sub>4</sub>	6.01	6.29	6.15		
	CO <sub>2</sub>	37.76	37.50	37.63		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.35	2.60	2.47		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.68	0.68	0.68		
HDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	42.56	48.55	45.55	84.82	15.18
	CO	13.83	13.14	13.49		
	CH <sub>4</sub>	9.11	8.24	8.67		
	CO <sub>2</sub>	25.64	30.29	27.97		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.84	3.87	4.36		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.73	0.69	0.71		
HDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	42.05	39.66	40.85	66.75	33.25
	CO	14.33	13.74	14.04		
	CH <sub>4</sub>	2.43	2.45	2.44		
	CO <sub>2</sub>	31.36	30.07	30.71		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.43	1.26	1.35		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.18	0.19	0.18		
LDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	42.73	43.59	43.16	79.08	20.92
	CO	14.11	12.50	13.30		
	CH <sub>4</sub>	8.54	8.35	8.44		
	CO <sub>2</sub>	23.42	25.86	24.64		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.43	3.95	4.19		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.69	0.74	0.72		
LDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	43.58	44.60	44.09	85.21	14.79
	CO	11.59	11.95	11.77		
	CH <sub>4</sub>	1.97	1.81	1.89		
	CO <sub>2</sub>	49.33	49.85	49.59		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.42	0.39	0.41		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.06	0.06	0.06		
PP : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	43.39	44.27	43.83	78.68	21.32
	CO	14.30	13.19	13.75		
	CH <sub>4</sub>	2.37	2.53	2.45		
	CO <sub>2</sub>	38.96	44.59	41.77		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.63	0.40	0.51		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.11	0.10	0.10		

ตาราง ๑๘ ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั้นพลาสติกผสม 2 ชนิดด้วยอัตราส่วน 3:1 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite)

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE : LDPE NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	50.03	52.33	51.18	80.57	19.43
	CO	10.94	12.35	11.65		
	CH <sub>4</sub>	6.26	6.35	6.30		
	CO <sub>2</sub>	32.33	30.43	31.38		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.37	4.08	3.72		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.74	0.74	0.74		
HDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	47.33	47.11	47.22	85.84	14.16
	CO	11.85	11.79	11.82		
	CH <sub>4</sub>	7.49	7.46	7.47		
	CO <sub>2</sub>	31.76	31.81	31.79		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.19	4.16	4.17		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.81	0.81	0.81		
HDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	42.35	42.68	42.51	71.85	28.15
	CO	14.23	12.13	13.18		
	CH <sub>4</sub>	5.22	5.56	5.39		
	CO <sub>2</sub>	20.88	24.50	22.69		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.93	3.79	3.86		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.61	0.72	0.66		
LDPE : PP NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	41.89	45.10	43.49	78.78	21.22
	CO	11.90	12.63	12.26		
	CH <sub>4</sub>	8.41	8.07	8.24		
	CO <sub>2</sub>	21.51	23.66	22.58		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6.22	5.25	5.74		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.78	0.77	0.78		
LDPE : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	37.12	38.98	38.05	63.24	36.76
	CO	11.67	10.27	10.97		
	CH <sub>4</sub>	5.30	5.06	5.18		
	CO <sub>2</sub>	16.74	19.12	17.93		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.09	5.58	5.33		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.62	0.57	0.60		
PP : PS NiO/dolomite catalyst	H <sub>2</sub>	43.37	46.86	45.12	71.91	28.09
	CO	12.15	13.45	12.80		
	CH <sub>4</sub>	4.52	6.38	5.45		
	CO <sub>2</sub>	27.80	26.78	27.29		
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.97	2.55	2.76		
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.50	0.51	0.51		

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเอกพร แจ่มกระจ่าง เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย