

ผลของตัวรองรับต่อแกซีฟิเคชันของพลาสติกบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

นางสาวรุ่งทิพย์ สิริमितานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF SUPPORT ON GASIFICATION OF PLASTICS OVER NICKEL CATALYST

Miss Runthip Sirimittanon

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของตัวรองรับต่อแกซีพีเคชั่นของพลาสติกบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล
โดย	นางสาว รุ่งทิพย์ สิริमितตานนท์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดธारा

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดธारा)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

รุ่งทิพย์ สิริमितตานนท์ : ผลของตัวรองรับต่อแก๊สฟิเคชันของพลาสติกบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล. (EFFECTS OF SUPPORT ON GASIFICATION OF PLASTICS OVER NICKEL CATALYST) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.เลอสรวง เมฆสุด, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 126 หน้า.

นิกเกิลถือว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการแก๊สฟิเคชันของพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเร่งปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วยไอน้ำ อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลมักประสบปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกาะตัวของคาร์บอนและการหลอมรวมกันของโลหะบนตัวรองรับ โดยชนิดของตัวรองรับมีผลต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของตัวรองรับต่างๆ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) และทัลค์ (Talc) ต่อแก๊สฟิเคชันของพลาสติกบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที โดยพลาสติกที่นำมาศึกษา ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาสามารถผลิตแก๊สจากพอลิเอทิลีนทั้งชนิดความหนาแน่นสูงและต่ำได้มาก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกาเหมาะสมสำหรับผลิตแก๊สจากพอลิโพรพิลีน ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับทัลค์เหมาะสมกับการผลิตแก๊สจากพอลิสไตรีนมากกว่าตัวรองรับตัวอื่น คาดว่าเป็นผลจากมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ที่จะทำให้โครงสร้างอะโรมาติกมีโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาในรูพรุนได้มากกว่า นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ พบว่าอุณหภูมิในการแคลไซน์สูงทำให้ประสิทธิภาพในการสลายตัวของพลาสติกต่ำลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวลดลงและยังพบอีกว่าตัวรองรับอะลูมินาและทัลค์สามารถเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับนิกเกิลออกไซด์ ส่วนตัวรองรับซิลิกาเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จากการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้ง พบว่าปริมาณแก๊สที่ได้ลดลง เนื่องการเกิดการเสื่อมสภาพจากการหลอมรวมตัวขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์

ภาควิชาเคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272507323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : GASIFICATION / NICKEL CATALYST / PLASTICS

RUNGTHIP SIRIMITANON : EFFECTS OF SUPPORT ON GASIFICATION OF PLASTICS OVER NICKEL CATALYST. ADVISOR : ASSOC.PROF. LURSUANG MEKASUT, Dr. Ing., CO-ADVISOR : ASST.PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 126 pp.

Ni catalysts have been known as effective catalysts in plastic gasification, especially catalysis in steam reforming reaction. This research attempted to investigate effects of various supports including Al_2O_3 , SiO_2 and Talc over nickel catalyst on steam/ O_2 gasification of different types of plastic. Experiments were carried out in a drop tube fixed bed reactor at 850°C for 60 min. Four types of plastic, including HDPE, LDPE, PP and PS, were used in this work. The results revealed that $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst was suitable to gasification of both HDPE and LDPE. In case of PP gasification, it found that NiO/SiO_2 catalyst showed higher activity than other Ni-based catalysts. Nevertheless, NiO/Talc catalyst showed a good activity on gasification of PS due to larger pore size more assisted in decomposition of aromatic compound in pores. Moreover, influence of calcination temperature was studied. It found that higher calcination temperature resulted in decreasing of catalytic activity due to loss of specific surface area and also strong metal-support interaction. Finally, Ni-supported catalysts were carried out for 6 times to examine their stability. It revealed that increase in activity test up to 6 times resulted in decrease in activity because of deactivation by sintering of Ni and solid transformation of catalyst

Department : Chemical technology Student's Signature

Field of Study : Chemical technology Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

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

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ทุนสนับสนุนกลุ่มวิทยานิพนธ์เพื่อการตีพิมพ์เผยแพร่ และผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ในการสร้างซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ผู้เป็นที่รัก รวมถึงญาติพี่น้องและครอบครัว สำหรับกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ ตลอดจนให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนสำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

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.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
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.....	46
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	49
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	49
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	54

บทที่	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง.....	54
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้.....	58
4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับต่างๆ.....	61
4.3 ผลของพลาสติก.....	70
4.4 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์.....	77
4.5 เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	94
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก.....	111
ภาคผนวก ข.....	113
ภาคผนวก ค.....	117
ภาคผนวก ง.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สารบัญญัตราจ

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.....	42
3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	52
4.1	ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้.....	58
ก1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก.....	111
ก2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก.....	111
ข1	ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard).....	113
ข2	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	114
ค1	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพอลิสไตรีน	117
ง1	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	119
ง2	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ -600.....	120
ง3	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO ₂ -600.....	121
ง4	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600.....	122
ง5	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ -950.....	123
ง6	ข้อมูลการทดลองแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO ₂ -950.....	124

ตารางที่		หน้า
ง7	ข้อมูลการทดลองแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-950.....	125

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 สัดส่วนของขยะพลาสติกที่พบในประเทศไทย.....	7
2.2 พลาสติก.....	9
2.3 พอลิเอทิลีนเทอแรพธาเลตและสัญลักษณ์.....	11
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์.....	11
2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์และสัญลักษณ์.....	12
2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์.....	13
2.7 พอลิพรอพิลีนและสัญลักษณ์.....	13
2.8 พอลิสไตรีนและสัญลักษณ์.....	14
2.9 พลาสติกอื่นๆ และสัญลักษณ์.....	15
2.10 แผนผังประเภทของการรีไซเคิล.....	18
2.11 ปฏิกริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซิฟิเคชัน.....	20
2.12 เตาผลิตแก๊สแบบต่าง ๆ.....	29
2.13 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว.....	34
2.14 ลักษณะโครงสร้างของซิดิกา.....	36
2.15 กลไกการเกิดปฏิกริยาของตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์.....	40
2.16 การดูดซับลักษณะต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ.....	43
2.17 แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation.....	46
3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง.....	50
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	51
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	51
4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิล.....	59
4.2 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิล.....	60

ภาพประกอบที่	หน้า
4.3 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	62
4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	63
4.5 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	64
4.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	65

ภาพประกอบที่	หน้า
4.7 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	66
4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	67
4.9 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	68
4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	69
4.11 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ เคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที.....	70
4.12 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	71

ภาพประกอบที่	หน้า
4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
4.14 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO ₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74
4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO ₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	75
4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	76
4.17 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	77
4.18 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	78
4.19 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	80
4.20 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	83

ภาพประกอบที่	หน้า
4.21 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	84
4.22 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	86
4.23 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	87
4.24 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	89
4.25 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อ นาที.....	90

ภาพประกอบที่	หน้า
4.26 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	92
4.27 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al ₂ O ₃ , NiO/SiO ₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	93
4.28 ผลเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ (a) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), (b) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), (c) พอลิพรอพิลีน (PP) และ (d) พอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	96
4.29 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al ₂ O ₃ , (b) NiO/SiO ₂ และ (c) NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	98
4.30 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al ₂ O ₃ และ (b) NiO/SiO ₂ ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	100
4.31 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	101

ภาพประกอบที่	หน้า	
4.32	รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....	102
ก1	การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนแก่พลาสติก ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	112
ก2	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่ออุณหภูมิของพลาสติก ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	112
ข1	โครมาโทแกรมของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard).....	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ขยะจัดว่าเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขยะที่มาจากพลาสติก นับวันยิ่งเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณขยะทั่วประเทศ 14 ล้านตันต่อปี หรือวันละ 40,000 ตัน โดยเป็นขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 17 หรือประมาณ 2.4 ล้านตันต่อปี หรือ 6,000 ตันต่อวัน ซึ่งส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้อีกในลักษณะต่างๆกัน และอีกส่วนหนึ่งถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการต่างๆ การนำขยะพลาสติกไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบเป็นวิธีที่สะดวกแต่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะโดยธรรมชาติพลาสติกถูกย่อยสลายได้ยาก จึงทับถมอยู่ในดิน ซึ่งอาจมีปัญหากับแหล่งน้ำใต้ดินหากมีการจัดการที่ไม่ดี และเกิดข้อขัดแย้งกับชุมชนที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณหลุมฝังกลบ ส่วนการเผาขยะพลาสติกก็ก่อให้เกิดมลภาวะ และเป็นอันตรายอย่างมาก วิธีการแก้ปัญหาขยะพลาสติกที่ได้ผลดีที่สุดคือ การแปรรูปขยะพลาสติกให้เป็นพลังงาน ที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและวิกฤติพลังงาน

การแปรรูปขยะพลาสติกให้เกิดประโยชน์ด้วยกระบวนการเคมีเชิงความร้อน (Thermochemical process) เป็นกระบวนการรูปแบบหนึ่งที่อาศัยความร้อนและปฏิกิริยาเคมีในการแปรรูปพลังงานเคมี ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการเคมีเชิงความร้อนที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแกซิฟิเคชัน (Gasification) แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนผสมกันอยู่หลายชนิด ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการกลั่นแยกก่อนจะนำไปใช้งานได้ ในขณะที่แกซิฟิเคชันสามารถแปรรูปขยะพลาสติกให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊สที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ดังนั้นการแปรรูปพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อผลิตพลังงานจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกและยังเป็นเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติกอีกด้วย

แกซิฟิเคชันถือเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยหลักการเผาไหม้ในภาวะที่มีอากาศจำกัด เช่น ถ่านหิน พลาสติก และชีวมวล โดยใช้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ที่มีการป้อนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (Gasifying agent)

เช่น ออกซิเจน อากาศ หรือไอน้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H₂) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วย มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งเชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ หรือใช้เป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสารเคมีที่สำคัญ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามองค์ประกอบในพลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารระเหยได้ (Volatile) มากถึงร้อยละ 95 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลวมากกว่าแก๊ส จึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีร่วมกับแกซีฟิเคชัน เป็นวิธีการหนึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพของแก๊สที่ได้ โดยทั่วไป ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น โดยเมื่อช่วยทำปฏิกิริยาแล้วตัวมันเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร และไม่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ และสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการแตกตัวของวัตถุดิบได้ ทำให้ปริมาณและผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เพิ่มขึ้น

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ที่สามารถลดปริมาณน้ำมันนํ้ามันดิบ บนตัวรองรับชนิดต่างๆ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกาและทัลคัม ที่เพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ นิกเกิลออกไซด์ ทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- นำข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของพลาสติกทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาจากงานวิจัยก่อนหน้า
- เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับต่างๆ ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation)

3. ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแตกตัวของน้ำมันทาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)
6. วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลองด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ X-ray diffraction (XRD)

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการวิจัย
3. วางแผนการทำวิจัย
4. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 และ 950 องศาเซลเซียส
5. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 และ 950 องศาเซลเซียส
6. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับทัลคัม ด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 และ 950 องศาเซลเซียส
7. ศึกษาแกซีฟิเคชันพลาสติก ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
8. วิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี
9. วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลอง
 - วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด (BET)
 - วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างบนพื้นผิวตัวเร่ง (XRD)
10. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการแปรรูปขยะพลาสติกต่างๆ เป็นเชื้อเพลิงแก๊สให้ได้ปริมาณที่สูงที่สุด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างฐานความรู้เกี่ยวกับแก๊สฟิเคชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกต่างๆ อีกด้วย

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

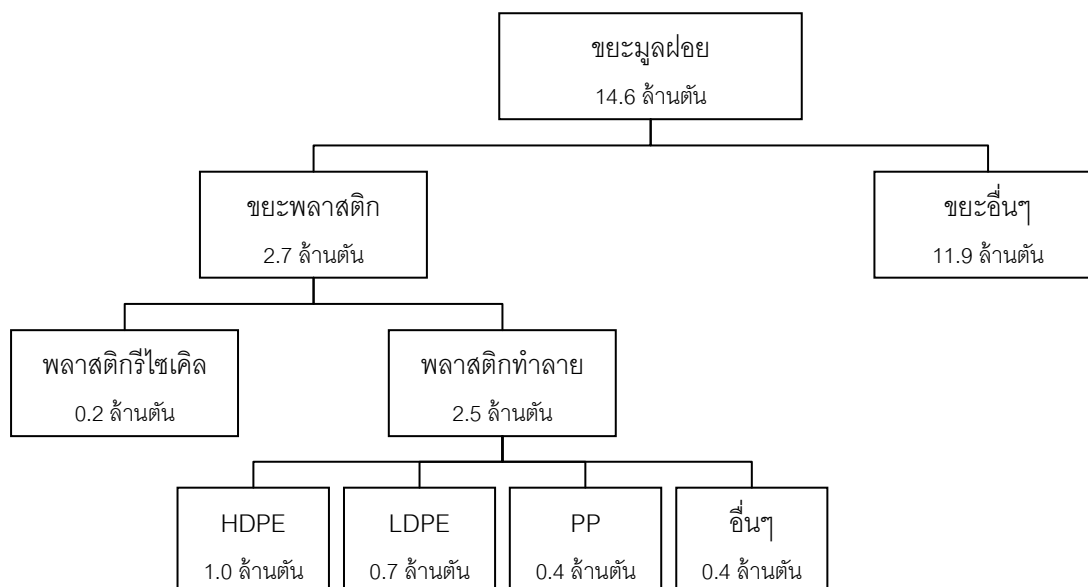
1. เศษอาหาร และเศษผัก ผลไม้ (Garbage)
2. กระดาษ (Paper)
3. พลาสติกและโฟม (Plastic and foam)
4. ยาง (Rubber)
5. หนัง (Leather)
6. ผ้า (Textile)
7. ไม้ (Wood)

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

ภาพที่ 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



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนของขยะพลาสติกที่พบในประเทศไทย

2.2 พลาสติก (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์)

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น ในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์คุ้นเคยและใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้นี้ล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ๆ 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 แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เฮกเซน (Hexane) โทลูอีน (Toluene) ไซลีน (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

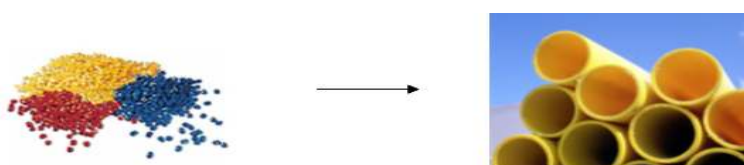
การแบ่งประเภทของพลาสติก นอกจากจะพิจารณาสมบัติของพลาสติกเมื่อถูกความร้อนแล้วยังต้องพิจารณาจากความหนาแน่น ลักษณะการติดไฟ และการละลายในตัวทำละลายอื่นๆ ซึ่งสามารถแยกความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซต
1. เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกิ่ง	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 สารพลาสติกไซเซออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ เช่น ถัง จาน และชิ้นพลาสติก วัสดุสังเคราะห์และท่อที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 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 แสดงดังภาพที่ 2.3 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอนหรือเส้นใยสำหรับเล่นสกี



ภาพที่ 2.3 พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตและสัญลักษณ์
(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 ถังร้อนชนิดขุ่น ขวดนม รองเท้า ส่วนใหญ่ทำให้มีสีสันทสวยงาม แสดงดังภาพที่ 2.4

นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดี และสามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นขวดต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน



ภาพที่ 2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

2.2.4.3 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride), PVC)

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



ภาพที่ 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 ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.6 นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหูหิ้วหรือถังขยะ



ภาพที่ 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

2.2.4.5 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

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



ภาพที่ 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 แสดงดังภาพที่ 2.8 เนื่องจากพอลิสไตรีนเปราะและแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักที่เบามาก ซึ่งประกอบด้วยพอลิสไตรีนประมาณร้อยละ 2-5 เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง นอกจากนี้พอลิสไตรีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัด หรือของใช้อื่นๆ



ภาพที่ 2.8 พอลิสไตรีนและสัญลักษณ์
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550 : ออนไลน์)

2.2.4.7 พลาสติกอื่นๆ (Others)

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



ภาพที่ 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

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้อย่างมากมาจากการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ 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 โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาตัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ 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)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดี

2.3.3 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

2.3.3.1 การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical recycling)

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

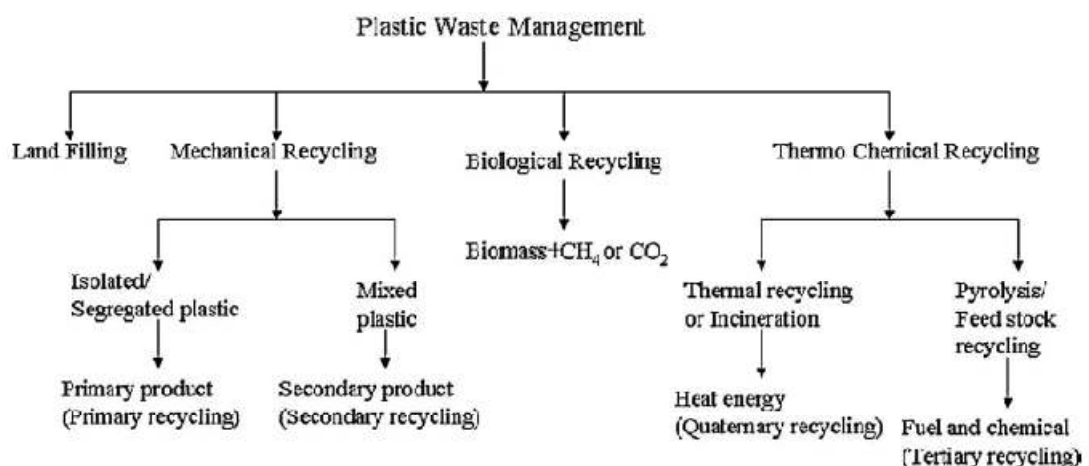
2.3.3.2 การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

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



ภาพที่ 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

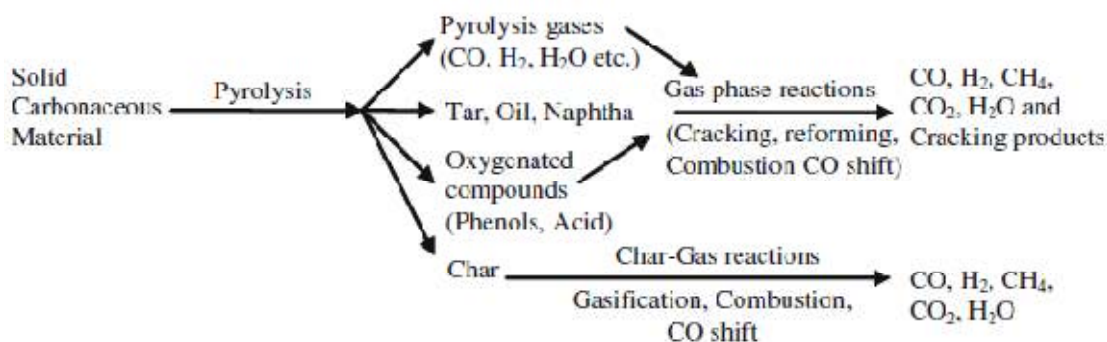
2.4.2 การเผาไหม้ (Combustion)

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

2.4.3 แกซิฟิเคชัน (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 แสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซีฟิเคชัน (Ahmed et al., 2009)

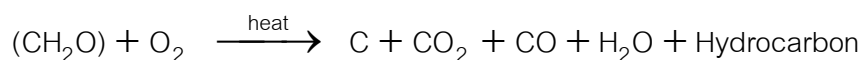
2.5 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

2.5.1 นิยาม

กระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส โดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วน of เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ชีวมวล รวมทั้งพลาสติก โดยใช้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ที่มีการป้อนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (Gasifying agent) เช่น ออกซิเจน อากาศ หรือไอน้ำ ในปริมาณที่จำกัดเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H₂) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วย มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ

2.5.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้เป็น

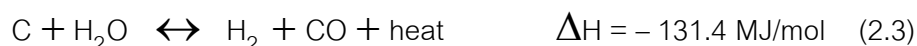


นอกจากนี้ยังมีปฏิกริยาทุติยภูมิ (Secondary reaction) ที่เกิดต่อเนื่อง ได้แก่

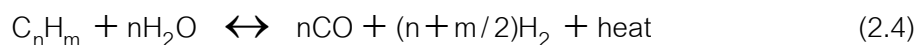
- ถ่านชาร์และไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นปฏิกริยาคายความร้อน ซึ่งสามารถนำความร้อนที่ได้จากปฏิกริยาดังกล่าวมาเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ปฏิกริยาอื่นๆ ได้ด้วย



- ปฏิกริยา Water gas ซึ่งเป็นปฏิกริยาเกิดขึ้นระหว่างถ่านชาร์หรือคาร์บอนกับไอน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน



- ปฏิกริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Steam reforming of hydrocarbon) เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



- ปฏิกริยาบาวดาต (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 สภาพความดันและอุณหภูมิ และคุณลักษณะสารป้อน ซึ่งคุณลักษณะของสารป้อนจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านเคมีความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ในแง่ประสิทธิภาพของระบบ และคุณภาพของเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้ เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้สามารถนำไปเผาในกังหันแก๊ส เครื่องยนต์สันดาปภายในหรือหม้อน้ำ

2.5.2.1 แก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศ (Air gasification)

เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สพลังงานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การที่มีไนโตรเจนปริมาณมากน้อยเพียงใด ที่จะไปเจือจางเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้ เชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวเหมาะสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อจุดประสงค์ในการใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เครื่องมือควรมีการออกแบบใช้ในการเผาไหม้ น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติที่ง่ายในการนำไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข 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 และยังต้องการสิ่งที่ยำนวยประโยชน์ในการแยกออกซิเจนจากอากาศ

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 และเกิดข้างลงที่อุณหภูมิสูง 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 เบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไชลีน
2. น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรีดีน
3. น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250–300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนพทาซีน
4. น้ำมันแอนทาซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300–350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน พีแนพทีน
5. พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไซ ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

สมบัติทางเคมีของทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของทาร์ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนสูง (Highly oxygenate pyrolyzate) ไปเป็นทาร์ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนต่ำ (Less oxygenate pyrolyzate) และมีความคงที่ของอุณหภูมิมากกว่า 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

ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

2.6.1 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low heating value gas or low BTU gas)

เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/m³ (90-150 BTU/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของท่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้ (Donald et al., 1988)



2.6.2 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas or medium BTU gas)

เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m³ (250-550 BTU/SCF) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน (Partial oxidation) การที่ไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สูงขึ้น

2.6.3 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas or high BTU gas)

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



2.7 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasifiers)

เมื่อแบ่งเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊สตามทิศทางการไหลของแก๊ส เทียบกับการไหลเคลื่อนของเชื้อเพลิง สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

2.7.1 เตาผลิตแก๊สที่มีการไหลขึ้นของแก๊สสังเคราะห์ (Updraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้เป็นแบบที่ใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเครื่อง ส่วนสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยา (อากาศ ออกซิเจน และ/หรือไอน้ำ) จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างและไหลขึ้นสวนทางกับเชื้อเพลิง แสดงในรูปที่ 2.12 (ก) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) หรือบริเวณการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าไปที่บริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับแก๊สร้อนที่มาจากบริเวณการเผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะถูกส่งผ่านไปยังบริเวณการเกิดรีดักชัน (Reduction zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ขึ้นต่อไป

เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและทาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับเชื้อเพลิงแก๊สที่เกิดขึ้น ดังนั้นเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นจะมีปริมาณของทาร์มาก บางครั้งอาจถึงร้อยละ 20 ของทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น มีอุณหภูมิต่ำและไม่สูงนักและมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและทาร์มาก ทำให้มีค่าความร้อนมากจำเป็นต้องมีหน่วยทำความสะอาดเชื้อเพลิงแก๊สก่อนนำเชื้อเพลิงไปหมุนกังหันแก๊ส 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

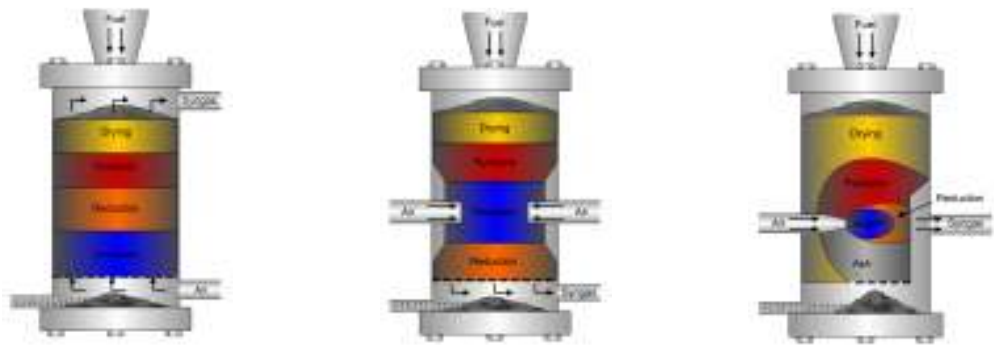
การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยเตาผลิตแก๊สที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์นี้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสำหรับเชื้อเพลิงที่ได้ (มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30) เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณทาร์ต่ำ ดังนั้นเตาผลิตแก๊สดังกล่าวจึงเหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 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 รุกอากาศที่เข้าไปเตาและตะแกรงต้องใช้เวลาดูดความร้อนที่ดีหรือมีการหล่อเย็นที่ดี

2.7.4 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed gasifiers)

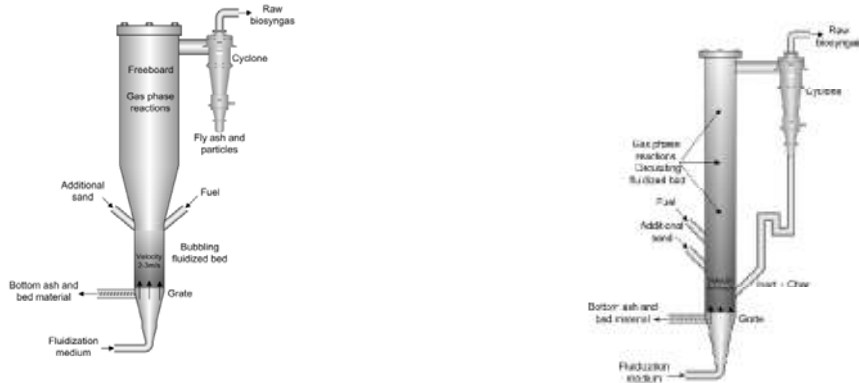
ปัญหาที่เกิดจากการใช้เตาผลิตแก๊สทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น คือ เกิดเถ้าหลอมเหลวเป็น สแลก (Slag) อยู่ด้านล่างซึ่งส่งผลให้ความดันลด และมีการเผาไหม้ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้หลักการของฟลูอิไดซ์เบด โดยการป้อนกระแสแก๊ส เรียกว่าสารฟลูอิไดซ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศ จะถูกป้อนที่ด้านล่างสุดของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้น จนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการฟลูอิไดซ์แล้วจะเกิดฟองอากาศขึ้นในทราายและเบดเริ่มลอยขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า Bubbling Fluidized Bed (BFB) และถ้าความเร็วสูงขึ้นอีก ทราายบางส่วนจะหลุดลอยออกไป ไชโคลนจึงถูกติดตั้งเพื่อนำทราายกลับมาในขณะที่แก๊สจะไหลผ่านไชโคลนออกไปทางด้านบน และกลับมาป้อนเข้าที่ด้านล่างของเบดอีกครั้ง ลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) แสดงในภาพที่ 2.12 (ง)



(ก) Updraft gasifier

(ข) Downdraft gasifier

(ค) Crossdraft gasifier



(ง) Bubble and Circulating Fluidized bed gasifier

ภาพที่ 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 ₃ and HCN	NO _x formation	Scrubbing, SCR
Tars	Refractory aromatics	Clog ตัวกรอง, Difficult to burn, Deposit internally	Tar cracking, Tar removal
Sulfur, chlorine	H ₂ S, HCl	Corrosion, emissions	Lime or dolomite scrubbing or absorption

2.8.1 ระบบกำจัดอนุภาคจากแก๊สร้อน (Hot gas cleanup for particulate)

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

2.8.2 การแตกตัวทาร์ (Tar cracking)

ความเข้มข้นของทาร์ในเชื้อเพลิงแก๊สจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่แก๊สฟลายซึ่งความเข้มข้นของทาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณทาร์จะเป็นฟังก์ชันของชนิดของเตาผลิตแก๊ส และภาวะที่ดำเนินการนอกจากนี้ปริมาณและลักษณะเฉพาะของทาร์จะขึ้นกับเชื้อเพลิงด้วย มีรายงานว่าทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายไม่มีปริมาณมากกว่าทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟลายถ่านหิน 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 ได้โดยคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแก๊สฟลายเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงขึ้น

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 การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้อย่างถูกต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความรวดเร็ว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลผลิตผลระหว่างปฏิกิริยา (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)

มักเป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูง หน้าที่หลักของตัวรองรับ 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

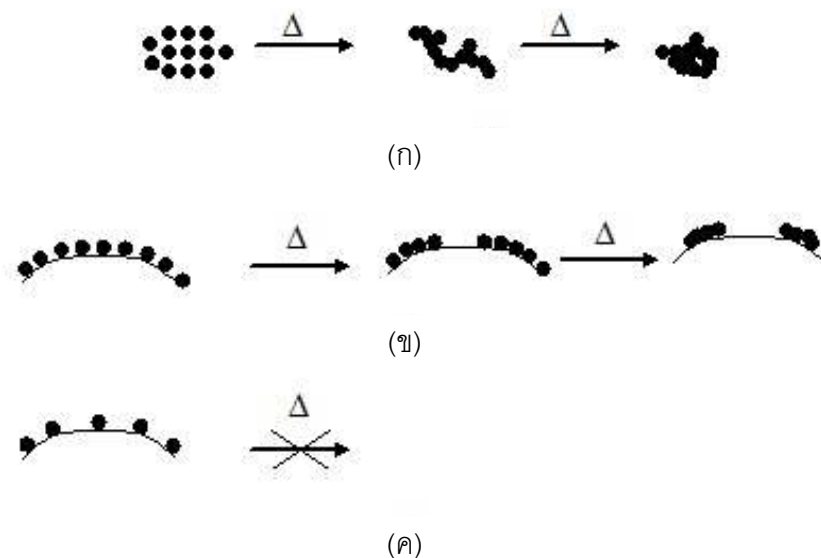
2.9.2 ตัวรองรับ (Catalyst supports)

ตัวรองรับ คือ สารที่เฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น โลหะแพลทินัม สำหรับการใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด 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 แล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของของสปีชีส์ที่ว่องไวด้วย ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของสปีชีส์ที่ว่องไว :

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

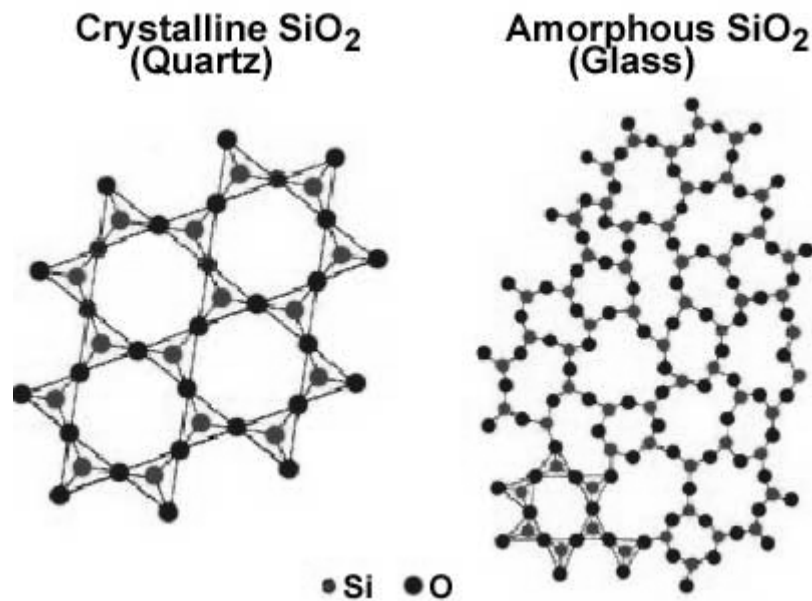
2.9.2.1 อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากราคาไม่แพง มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง (จุดหลอมเหลวสูงเกินกว่า 2000 องศาเซลเซียส) โครงสร้างที่สำคัญของอะลูมินาที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือเฟสแกมมาอะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างนี้มีพื้นที่ผิวสูงและมีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งที่เคยได้รับความนิยม แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้กันเนื่องจากมีความเป็นกรดสูงกว่า $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ อย่างไรก็ตามมีปฏิกิริยาบางอย่างที่ต้องการสภาพที่เป็นกรดของตัวรองรับในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาฟรีฟอร์มิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งปฏิกิริยาเริ่มแรกจะเกิดขึ้นบนโลหะ จากนั้นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนตัวมาทำปฏิกิริยาต่อบนพื้นผิวของตัวรองรับที่มีความเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จึงเรียกว่า bi-functional catalyst หมายถึง ตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาด้วย ปัจจุบันการเพิ่มความเป็นกรดของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ทำโดยการเติมไอออน เช่น คลอไรด์หรือฟลูออไรด์เข้าไปในโครงสร้าง

$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เป็นโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูง (ส่วนมากอยู่ในช่วง 200-300 m^2/g) แต่ถ้าได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบ δ และที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1100 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นรูปแบบ θ และกลายเป็นรูปแบบ α ในที่สุด จะทำให้โครงสร้างเกิดการพังตัว เปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีรูพรุนกลายเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นและมีพื้นที่ผิวลดลง สำหรับปฏิกิริยาทั่วไป อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยามักจะไม่เกินช่วง 500-600 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงระหว่างการ regenerate (เช่นการเผาไค้ก) อาจมีอุณหภูมิสูงผิดปกติได้

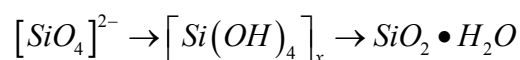
2.9.2.2 ซิลิกา (SiO_2)

ซิลิกามีสูตรทั่วไปคือ SiO_2 ประกอบด้วย อะตอมซิลิกอนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน จำนวน 4 อะตอม ซึ่งใช้ร่วมกับซิลิกอนอะตอมอื่น ซิลิกาเป็นสารที่เฉื่อย ไม่มีพิษ ใช้เป็นตัวดูดความชื้น ตัวดูดซับและใช้เป็นวัสดุในการบรรจุคอลัมน์ในโครมาโตกราฟี ถ้าซิลิกาที่มีความเป็นผลึกสูง เช่น ควอทซ์ จะมีลักษณะโครงสร้างดังในภาพที่ 2.14 (ก) โดยซิลิกาจะจับกับออกซิเจน 4 อะตอม แต่ถ้าตกผลึกเร็วจะทำให้การจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์ ดังภาพที่ 2.14 (ข) ซึ่งเป็นลักษณะของอสัณฐาน



ภาพที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา (ก) แบบเป็นผลึก และ (ข) แบบเป็นอสัณฐาน

ซิลิกามีหลายรูป แต่โครงสร้างที่มีความพูนมาก ได้แก่ ซิลิกาเจล ซึ่งเตรียมได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เรียกว่าวอเตอร์กลาส (Water glass) ซึ่งประกอบด้วย Na_2SiO_4 และ Na_2SiO_3 เมื่อทำให้กลายเป็นกรดซิลิซิก (Silicic acid) ซึ่งมีสูตรคือ $\text{Si}(\text{OH})_4$ จะเกิดการพอลิเมอไรเซชันเกิดพันธะ Si-O-Si ขึ้น กลายเป็นซิลิกาที่มีน้ำ (Hydrated silica) อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถกำจัดโมเลกุลของน้ำออกไปได้โดยการให้ความร้อน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ เรียกว่า ซิโรเจล (Xerogel) หรือ ซิลิกาพูน (Porous silica) หรือซิลิกาเจล ซึ่งที่ผิวหน้าจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol groups, Si-OH) และอาจมีน้ำที่ดูดซับแบบกายภาพอยู่ โมเลกุลของน้ำสามารถกำจัดได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 150-200 องศาเซลเซียส ถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก หมู่ไฮดรอกซิลจะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่ซิลอกเซน (Siloxane, Si-O-Si)



ซิลิกาในรูปอื่นๆ เช่น 1) ซิลิกาที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ (Colloidal Silica) 2) คีเซลเกอร์ (Kieselguhr หรือ Diatomaceous Earth) จากเปลือกของไดอะตอม (Diatoms) ซึ่งเป็นพืชน้ำจืดโบราณสายพันธุ์ใกล้เคียงกับพวกสาหร่ายประกอบด้วยซิลิกาประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ ถ้าต้องการนำซิลิกาจากไดอะตอมมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ต้องผ่านกระบวนการทำให้

บริสุทธิ์ก่อน 3) ฟุ้งซิลิกา (Fumed Silica) เป็นซิลิกาซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงที่ไม่พอรุน เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ SiCl_4 ในเปลวไฟของออกซิเจนและไฮโดรเจน

2.9.2.3 ทัลค์ (Talc)

ทัลค์ หรือเรียกว่าทัลค์มัม มีชื่อทางเคมีว่าไฮดรอกซิลแมกนีเซียมซิลิเกต (Hydrous magnesium silicate: $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) รูปผลึกระบบโมโนคลินิก ลักษณะของผลึกเป็นแผ่นหนารูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนและรูปหกเหลี่ยม เป็นสารประกอบของแมกนีเซียมซิลิเกตและน้ำ เป็นวัตถุดิบแมกนีเซียมตามธรรมชาติที่มีราคาถูก แมกนีเซียมบริสุทธิ์หรือแมกนีเซียมสังเคราะห์จะมีราคาแพงกว่ามาก แผ่นแร่มีเนื้อสमानแน่น บางทีก็มีลักษณะแผ่นเป็นรัศมี แนวแตกเรียบสมบูรณ์ ลักษณะที่เป็นแผ่นบางๆ จะโค้งงอได้แต่กลับไม่ได้อ่อน ความถ่วงจำเพาะ 2.7-2.8 วาวแบบมุกและแบบน้ำมันฉาบ สีเขียวออบเปิด เทา ขาว หรือสีน้ำเงิน สำหรับหินสบู่ (Soapstone) จะมีสีเทาแก่หรือเขียว ลื่นมือทัลค์มักจะเป็นแร่ทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการผุสลายแปรสภาพของแร่แมกนีเซียมซิลิเกต เช่น โอลิวีน ไพรอกซีนและแอมฟิโบล ทัลค์อาจพบเกิดเป็นส่วนประกอบของหินแปรพวกชีสต์ เช่น ทัลค์ชีสต์ ในประเทศไทยมีการกำเนิดสัมพันธ์กับหินเซอร์เพนทีไนต์และแร่คลอไรต์ในบริเวณที่มีหินอัลตราเมฟิก ทัลค์ หรือแมกนีเซียมซิลิเกต นิยมใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดิน ซึ่งเผาในอุณหภูมิสูง แมกนีเซียมมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีอัตราขยายตัวต่ำเมื่อโดนเผาผ่านความร้อน ดังนั้นจึงสามารถสะท้อนความร้อนได้ดี (Thermal shock resistance) เหมาะสำหรับผสมเนื้อดินที่ทำผลิตภัณฑ์ ประเภทหม้ออบและภาชนะถ้วยชามที่ใช้ในเตาอบ แต่ทัลค์มีข้อเสีย คือ มีอุณหภูมิในการเผาจำกัด หรือมีช่วงอุณหภูมิในการเผาแคบ ถ้าเผาเกินอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะยุบตัวเสียรูปทรงได้ง่าย และการที่เนื้อดินมีอัตราการขยายตัวต่ำมาก ทำให้เคลือบเข้ากันได้ยาก เนื้อดินที่ผสมทัลค์ที่เผาในอุณหภูมิต่ำ 1100 องศาเซลเซียส มีการขยายตัวต่ำแต่มีความพอรุนตัวสูง เมื่อใช้งานไปนานๆ เคลือบจะเกิดรอยแตกร้าวได้ (Delay crazing) โดยปกติในเนื้อดินที่เผาในอุณหภูมิต่ำ จะใช้ทัลค์คู่กับหินปูนเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อดิน ลดการแตกรายของน้ำเคลือบ และการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน ถ้าเผาอุณหภูมิต่ำกว่า 1200 องศาเซลเซียส

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. สามารถใช้ได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด 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/มิลลิเมตร จุดหลอมเหลว (Melting point) 1445 องศาเซลเซียส จุดเดือด (Boiling point) 2900 องศาเซลเซียส อิเล็กโตรอนเน็กกะติวิตี (Electron negativity) 1.8 oxidation state 2.3 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ (Ar) $3d^8 4s^2$ นิกเกิลในรูปที่เป็นก้อนของแข็งไม่สามารถติดไฟได้ แต่เมื่อทำให้เป็นเส้นลวดนิกเกิลจะสามารถติดไฟเองได้ ส่วนเม็ดขนาดเล็กของนิกเกิลจะสามารถที่จะติดไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อสัมผัสอากาศ

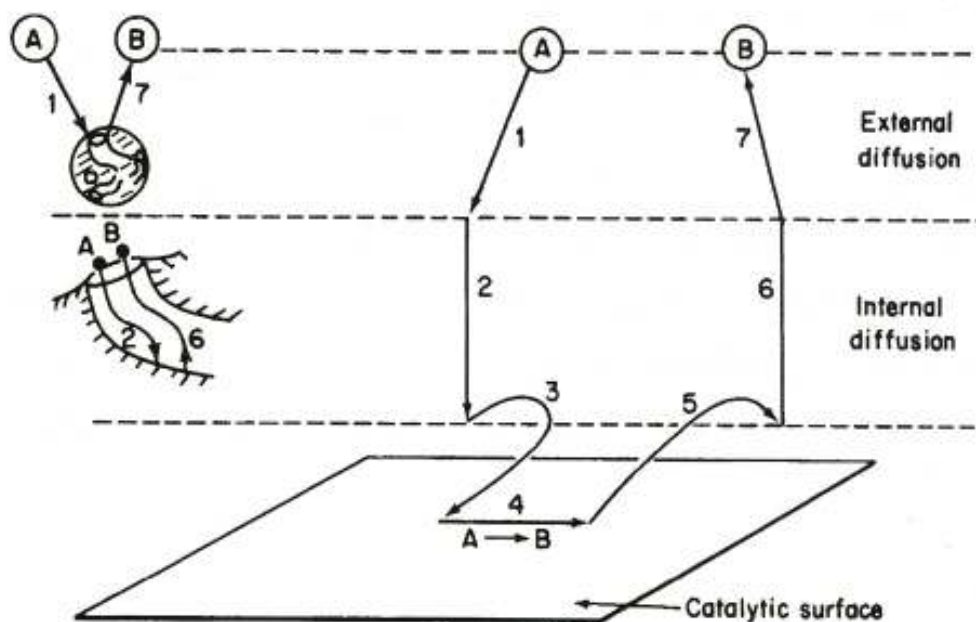
2.9.5 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่างไว้ในการทำปฏิกิริยา (Active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่างไว้
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่างไว้ในการทำปฏิกิริยา
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 ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ถูกแสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา)

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 ดังนั้นตำแหน่งที่ว่องไว (Active sites) ที่อยู่บริเวณตอนกลางจะไม่ถูกใช้งาน และถ้าตำแหน่งที่ว่องไวเหล่านี้เป็นโลหะมีค่า (เช่น Pt, Au, Ag) ก็จะเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นในกรณีของปฏิกิริยาคายความร้อนหรืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ ตำแหน่งที่ว่องไวจะอยู่เฉพาะบริเวณผิวนอกเท่านั้น การลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนทำได้โดยการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก

ขั้นตอนการดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไว เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวพิพันธ์ เพราะการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวพิพันธ์นั้น จำเป็นต้องมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่สารตั้งต้นมีมากกว่าหนึ่งชนิด จะเกิดการแข่งกันการดูดซับบนพื้นผิว ถ้าหากสารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถเกาะลงบนพื้นผิวได้ดีกว่าสารตั้งต้นอีกตัวหนึ่งมาก ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยเพราะความเข้มข้นของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของสารที่เกาะได้น้อยจะมีค่าต่ำ ที่สภาวะที่เหมาะสมปริมาณของสารตั้งต้นแต่ละตัวที่อยู่บนพื้นผิวควรมีปริมาณที่พอเหมาะ

2.9.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งกับตัวสารตั้งต้นที่เป็นแก๊ส ในกรณีที่เป็นระบบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิพันธ์ (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

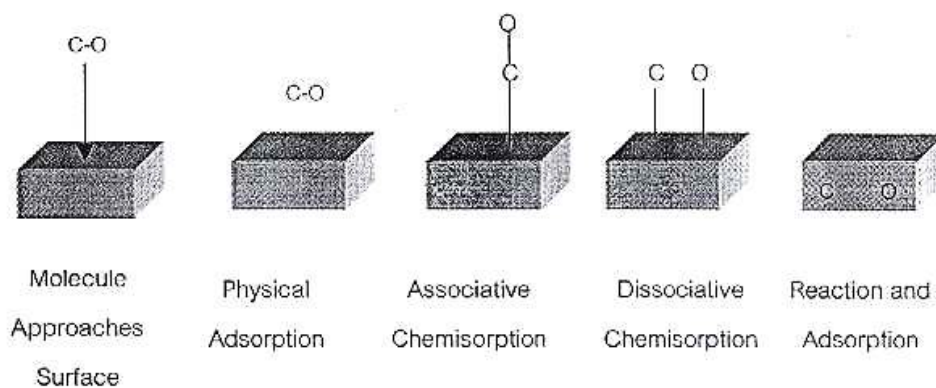
เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยช่องว่างของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ จะดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (Rearrangement) โดยอิเล็กตรอน

การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ คือการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (Associative chemisorption) และการดูด

ซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (Dissociative chemisorption) แสดงดังภาพที่ 2.16 พิจารณาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวพวยงแอลฟาอะลูมินา บนโลหะทองแดงและโลหะนิกเกิลพบว่าไม่เกิดพันธะเคมีขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแอลฟาอะลูมินา แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากตัวพวยงอะลูมินาไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้นแทน พลังงานของการดูดซับระหว่างโมเลกุลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์เหลวบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น การเกิดการดูดซับทางเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะทองแดง เป็นการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะทองแดงมีพลังงานมากกว่าพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ แต่ไม่มากพอที่จะทำให้ลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีการดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะนิกเกิล อันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะมีมากพอที่จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนแตกออก ดังสมการ



จากการเกิดการดูดซับทางเคมีแบบแตกโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนนิกเกิล นำไปสู่การเตรียมมีเทนด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการ



ภาพที่ 2.16 การดูดซับลักษณะต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวของแข็งชนิดต่างๆ

2.9.7 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (Preparation of supported metal catalysts)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีด้วยกันหลายขั้นตอน 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. การจัดรูปโดยรูปทรงที่นิยมใช้อาจเป็นเม็ดเล็ก ๆ (Granule) ทรงกลม (Sphere) เม็ดแบน (Tablet) วงแหวน (Ring) หรือทรงกระบอก (Cylinder)
5. การเผาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ คือ
 - เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน (Binder) สารหล่อลื่น รวมทั้งอิมบอนบวกและอิมบอนลบที่ไม่เสถียรและระเหยได้ง่าย
 - อุณหภูมิที่ใช้ควรจะสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (Incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมตัวของผลึกด้วยความร้อนมากเกินไป (Excessive sintering) ถ้าเกิดสภาพนี้แล้วจะลดความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาลดลง และยังเป็นสาเหตุจำกัดการแพร่กระจาย (Diffusional limitation) อันเนื่องมาจากขนาดของรูพรุนเล็กลง

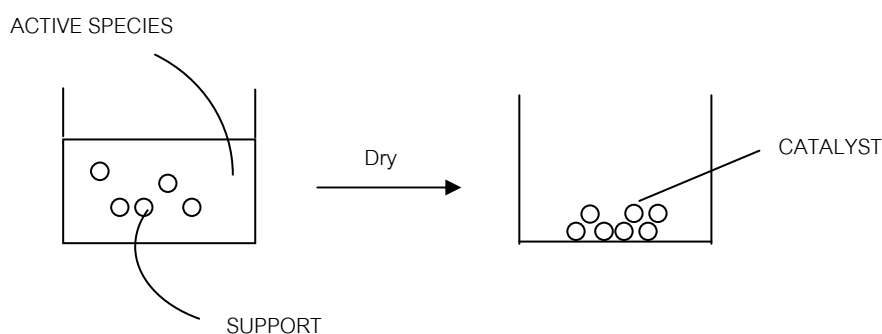
แต่สาเหตุที่สำคัญที่สุด คือ ต้องการเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยทั่วไปการเลือกอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเผานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

การเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังเป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันมากที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะ เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้โลหะออกไซด์เกาะบนตัว ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมการกระจายตัวของเกลือโลหะให้อยู่เพียงแคผิว นอกหรือแพร่เข้าไปถึงภายในของตัวรองรับได้

2.9.7.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะนำเอาตัวรองรับซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาสัมผัสกับสารละลายที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ ชนิดเปียก (Wet impregnation) และชนิดแห้ง (Dry impregnation)

ในการเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) นั้น ตัวรองรับจะถูกแช่ลงในสารละลายที่มีสปีชีส์ที่ว่องไวละลายอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นสารละลายของน้ำ จากนั้นจะค่อยๆ ทำการระเหยตัวทำละลายออกจนหมด เพื่อให้สปีชีส์ที่ว่องไวตกค้างอยู่บนตัวรองรับ แสดงดังภาพที่ 2.17 ในระหว่างการระเหยนี้อาจมีการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับ pH ของสารละลายไปพร้อมกัน ข้อดีของวิธีการนี้ คือ ตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับสปีชีส์ที่ว่องไวสม่ำเสมอ แต่อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป อัตราส่วนของเกลือที่ตกตะกอนบนตัวรองรับมักจะแตกต่างไปจากสัดส่วนความเข้มข้นในสารละลาย



ภาพที่ 2.17 แสดงการเตรียมด้วยวิธี wet impregnation (ธราธร มงคลศรี)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kantarelis และคณะ (2009) ศึกษาผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์จากไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของขยะพลาสติกประเภทสายไฟฟ้า พบว่าเมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส ทั้งสองกระบวนการให้ค่า mass loss สูงสุด คือ ร้อยละ 92 และ 88.6 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยอุณหภูมิต่อการแตกสลายของน้ำมันทาร์ คือ อุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง ซึ่งไพโรไลซิสมีปริมาณของน้ำมันทาร์มากกว่าแกซีฟิเคชัน ดังนั้นแกซีฟิเคชันจึงเป็นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สได้ดีกว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณน้ำมันทาร์ต่ำ มีปริมาณของไฮโดรเจนมาก และปริมาณแก๊สสังเคราะห์มาก คือ ร้อยละ 64 โดยปริมาตร ที่สูงกว่าไพโรไลซิส

Wu และ William (2010) ศึกษาผลของปริมาณแก๊สและแก๊สไฮโดรเจนจากพลาสติก PP, PS, HDPE และขยะพลาสติก โดยใช้ไพโรไลซิส-แกซีฟิเคชันทั้งที่มีและไม่มี Ni-Mg-Al เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณแก๊สที่ได้จาก PS คือ ร้อยละ 11.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่า PP คือ ร้อยละ 59.6 โดยน้ำหนัก HDPE คือ ร้อยละ 53.5 โดยน้ำหนัก และขยะพลาสติก คือ 45.5 wt% และยังมีปริมาณน้ำมันทาร์สูงสุดในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไอน้ำลงในกระบวนการ ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น ซึ่ง PS มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนน้อยที่สุด เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมประสิทธิภาพลง เนื่องจากเกิดการเกาะตัวของไค้บนตัวเร่งปฏิกิริยา

Lee และคณะ (2009) ศึกษาผลของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จากไพโรไลซิส แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ และการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 ในแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ที่มีต่อปริมาณแก๊ส

ไฮโดรเจนจากขยะพลาสติก พบว่าปริมาณของแก๊สที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.02 เป็น 39.1 โดยปริมาตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 เป็น 1,000 องศาเซลเซียส สำหรับไพโรไลซิส โดยการเติมไอน้ำในแกซิฟิเคชันทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 39.1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 57.4 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำในแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้นกว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

Sancho และคณะ (2008) ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ในแกซิฟิเคชันพลาสติก PP ด้วยอากาศ ต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ และปริมาณน้ำมันทาร์ พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโดโลไมต์ ทำให้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น โดยปริมาณน้ำมันทาร์ลดลงสูงถึงร้อยละ 92 เมื่อเทียบกับแกซิฟิเคชันโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เนื่องจากโดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีน้ำหนักเบา จึงเกิดการฟุ้งกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ทำให้คาร์ที่ได้มีการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาอีกชนิดหนึ่ง คือ โอลิวีน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความแข็ง เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์ โดยปริมาณน้ำมันทาร์ลดลงจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 40

He และคณะ (2009) ศึกษาผลของอุณหภูมิจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร่วมกับไอน้ำในแกซิฟิเคชันของเสียจาก PE ที่มีต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำในแกซิฟิเคชันมีปริมาณแก๊สที่ได้สูงกว่าไพโรไลซิส ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้น ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น โดยปริมาณน้ำมันทาร์และชาร์ลดลง ปริมาณแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

Williams และ Williams (1999) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีต่อผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์แบบ พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่ที่ได้จากการไพโรไลซิส คือ ไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน ($\text{C}_1\text{-C}_4$) ซึ่งผลได้ของแก๊สจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ในขณะที่น้ำมันและไขที่ได้จากการทดลองจะประกอบด้วย แอลเคน แอลคีน และแอลคาไดอิน เป็นหลัก ซึ่งผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700

องศาเซลเซียส พบว่ามีสารประกอบอะโรมาติกอยู่ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้องค์ประกอบที่สลายตัวไปแล้วสามารถเกิดปฏิกิริยาการปิดวงได้

ปรารงค์เนตร เฟื่องฟุ้ง (2007) ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณออกซิเจน ปริมาณไอน้ำในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สออกมาได้มากที่สุด การใช้ปริมาณออกซิเจนและปริมาณไอน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของการแกซีฟิเคชันลดน้อยลง โดยปริมาณที่เหมาะสมคือ ประมาณ 15 มิลลิลิตรต่อนาที่ และไม่เกินร้อยละ 60 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะพบว่าเมื่อมีความสูงที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สได้มากขึ้น และอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์นั้นพบว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นอย่างมาก

Ahmed และ Gupta (2009) ศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากพอลิสไตรีน พบว่าเมื่อทำไพโรไลซิสพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละผลได้ของไฮโดรเจนมากกว่ากรณีของแกซีฟิเคชันที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป กลับพบว่ากรณีของแกซีฟิเคชันจะให้ไฮโดรเจนที่มากกว่ากรณีของไพโรไลซิสถึงสามเท่าทั้งในแง่ของร้อยละผลได้และปริมาณความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นจะเห็นว่า การผลิตพลังงานจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการแกซีฟิเคชันนั้นถือเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับต่างชนิดจะให้ผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่ต่างกัน นอกจากนี้พลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป จึงทำให้ปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่ต่างกันอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งของพลาสติก คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) ที่ใช้มากในปัจจุบัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้ได้มาซึ่งผลได้ของเชื้อเพลิงแก๊สที่สูงที่สุด

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ (อะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์)

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ (อะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์) ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) โดยมีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

1. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
2. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
3. บีกเกอร์ (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)

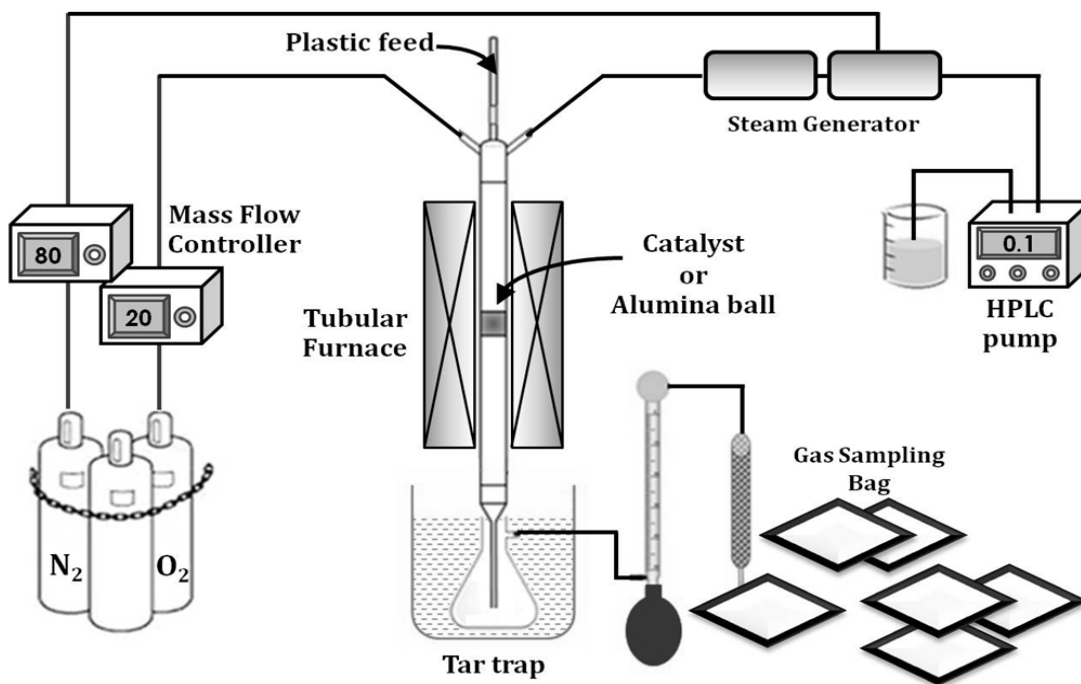
3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง (Drop tube fixed bed reactor)

เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ใช้ในการทดลองนี้ ถูกแสดงดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

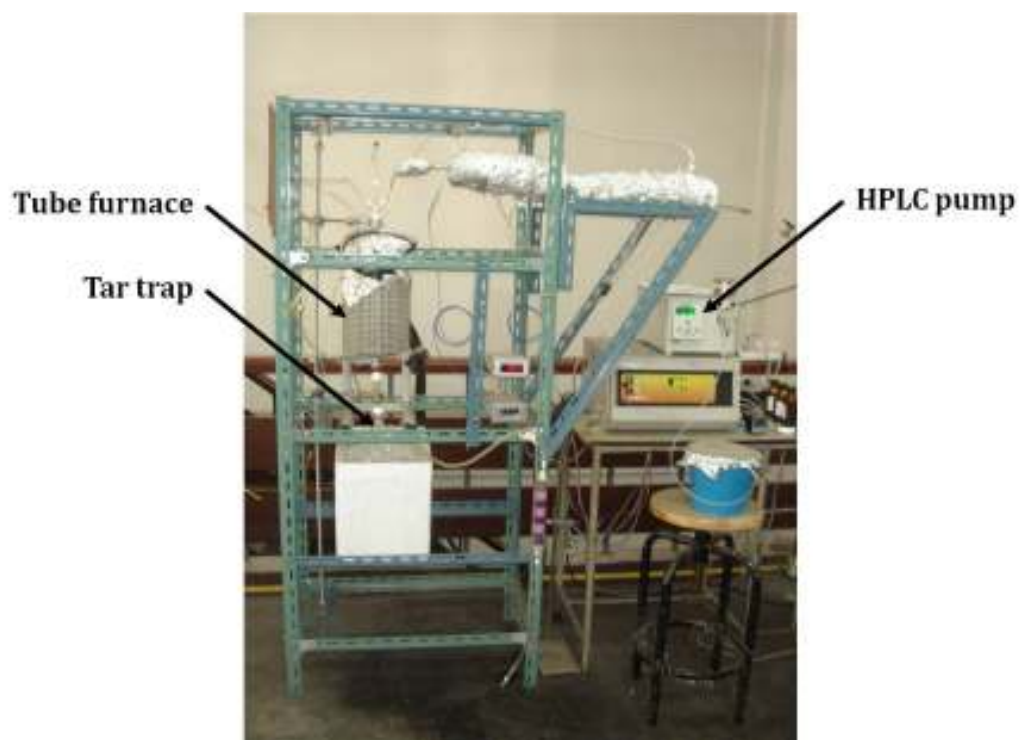
1. เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ทำจากแก้วควอทซ์ (Quartz) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อ

ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 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. คอลัมน์ดูดความชื้นที่บรรจุด้วยซิลิกาเจล
9. ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (Gas sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

3.1.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu GC-2014 ดังภาพที่ 3.3 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.00 มิลลิเมตร 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) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (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. อะลูมินา (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร จากบริษัท Sumitomo Chemical
4. ซิลิกา
5. ไฮดรอกไซด์แมกนีเซียมซิลิเกต ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) หรือทัลค์ จากบริษัท SR Lab
6. ซิลิกาเจล จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
7. แก๊สไนโตรเจน 99.5% จาก บริษัท แพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
8. แก๊สออกซิเจน 99.95% จาก บริษัท TIG

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ (อะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์) โดยวิธีเคลือบฝัง

1. เตรียมสารละลายอิมเพรกแนนต์ (Impregnant) โดยการละลายนิกเกิลอะซีเตตในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (มีนิกเกิลคิดเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)
2. นำสารละลายอิมเพรกแนนต์ที่เตรียมได้มาผสมกับตัวรองรับชนิดต่างๆ (อะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส พร้อมทั้ง

คนตลอดเวลาจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะขุ่นเหนียว

3. จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มาบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปแคลไซน์ในเตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส หรือที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา ($\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) หรือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา (NiO/SiO_2) ยกเว้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับทัลค์ (NiO/Talc) ต้องนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นไปอัดรีดเป็นแท่งและตัดให้มีความยาวประมาณ 1-3 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่อไป

3.3.2 การแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำและออกซิเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำเม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) มาทุบและตัดให้มีขนาดประมาณ 1x1 มิลลิเมตร
2. ชั่งตัวอย่างพลาสติกหนัก 0.10 กรัม เพื่อเตรียมปล่อยลงในเครื่องปฏิกรณ์
3. ใส่ quartz wool รองรับบริเวณกึ่งกลางท่อ จากนั้นบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับต่างๆ (อะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์) หนัก 1.76 กรัม และเติมอะลูมินาบอล จนมีความสูง 2.5 เซนติเมตร
4. ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1
5. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
6. เปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งใช้เป็นแก๊สพาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที
7. เปิดแก๊สออกซิเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที
8. เปิดสวิตช์เครื่องให้ความร้อน จนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ 60 นาที จึงเปิดปั๊มไอน้ำด้วยอัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อผลิตไอน้ำร้อยละ 52 โดยปริมาตร
9. รอจนระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ จึงปล่อยเม็ดพลาสติกลงมาจากทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

10. เก็บแก๊สที่ได้จากการทดลองด้วยถุงเก็บแก๊ส ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
11. ปิดเครื่องปั้มน้ำ เครื่องให้ความร้อนสำหรับผลิตไอน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และเครื่องให้ความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยพลาสติกที่นำมาศึกษามี 4 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) ที่มีปริมาณมากในขยะพลาสติกของประเทศไทย อีกทั้งยังมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานด้วยโดยการทดลองได้ศึกษาผลของตัวรองรับ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกา (SiO_2) และไฮดรอกไซด์แมกนีเซียมซิลิเกตหรือทัลค์ (Talc) ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนของคาร์บอน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ และเสถียรภาพ (Stability) ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล พร้อมทั้งศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (BET) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา (XRD) และวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา (TPR)

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้ด้วยเทคนิค BET, XRD และ TPR ส่วนที่ 2 คือการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา, ซิลิกา และทัลค์ต่อการแกซีฟิเคชันของพลาสติก ส่วนที่ 3 คือการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่อการแกซีฟิเคชันพลาสติก และส่วนที่ 4 การทดสอบเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อการแกซีฟิเคชันพลาสติก

การแสดงผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดสัญลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา, ซิลิกา หรือทัลค์ กำหนดสัญลักษณ์เป็น $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, NiO/SiO_2 หรือ NiO/Talc โดยตัวเลขที่กำกับแสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -950 สำหรับการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และ $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -600 สำหรับการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้

การวิเคราะห์ปริมาณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้ ด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET) แสดงดังตารางที่ 4.1 จากตารางพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/SiO₂ เมื่อผ่านเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ภายใต้บรรยากาศของอากาศจาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงอย่างมากจาก 111.18 และ 401.58 เหลือเพียง 50.67 และ 15.24 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดการรวมตัว (Sintering) ของโลหะ निकเกิดออกไซด์หรืออาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างโลหะ निकเกิดออกไซด์กับตัวรองรับได้ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc เมื่อผ่านการแคลไซน์ภายใต้บรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 23.85 เป็น 72.43 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับ การแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ทัลคเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของผลึกไฮดร็อกไซด์แมกนีเซียมซิลิเกต กลายเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น (สุชาร์ตัน พัวเจริญ, 2552)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้

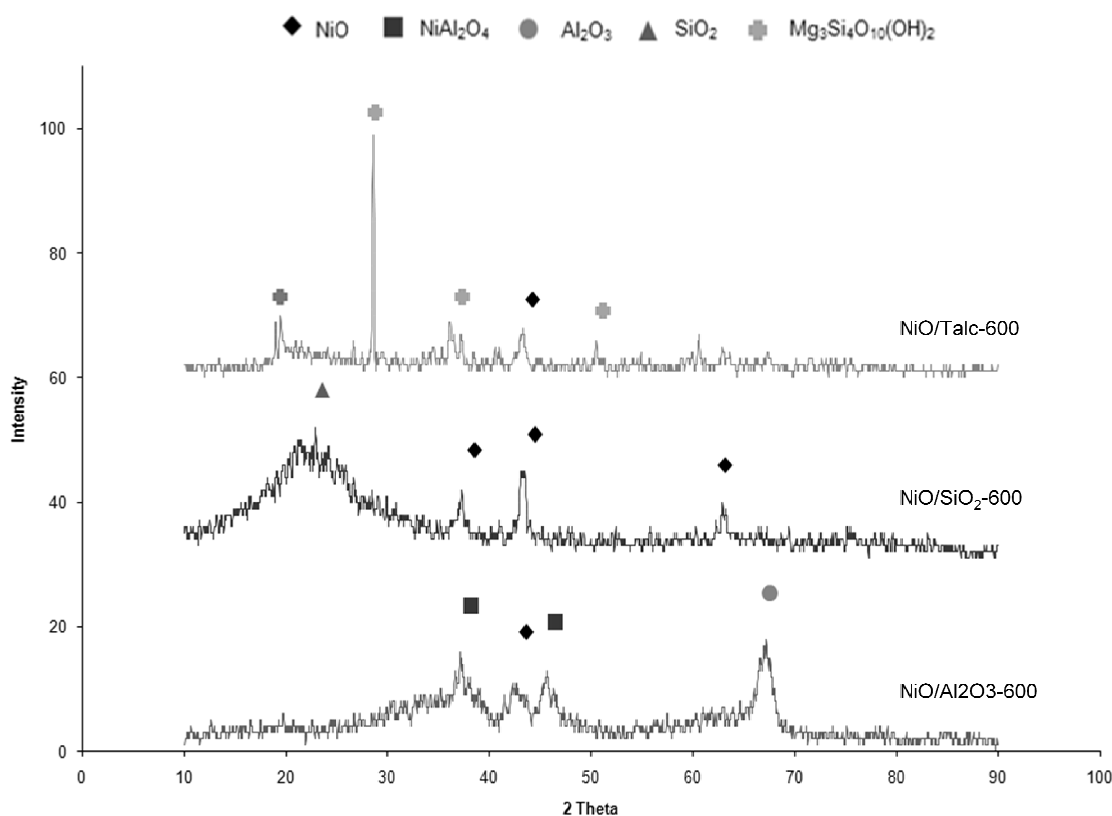
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตร/ กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	ขนาดผลึก NiO (nm) ^a
Al ₂ O ₃	119.03	0.2297	77.2	*N.A.
NiO/Al ₂ O ₃ -600	111.18	0.2185	60.97	4.36
NiO/Al ₂ O ₃ -950	50.67	0.1860	131.80	16.40
^b SiO ₂	520.13	0.7824	N.D.	N.A.
NiO/SiO ₂ -600	401.58	0.5877	45.34	11.55
NiO/SiO ₂ -950	15.24	0.0222	84.40	12.57
^c Talc	7.10	0.0143	N.D.	N.A.
NiO/Talc-600	23.85	0.1141	216.79	13.78
NiO/Talc-950	72.43	0.3472	190.07	6.30

a คำนวณจากสมการของ Scherrer (Kumar et al., 2009)

b ข้อมูลผลิตภัณฑ์จาก www.merck.co.th

c ข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ของ สุชาร์ตัน พัวเจริญ, 2552

N.A. = ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากไม่ปรากฏผลึกของ NiO

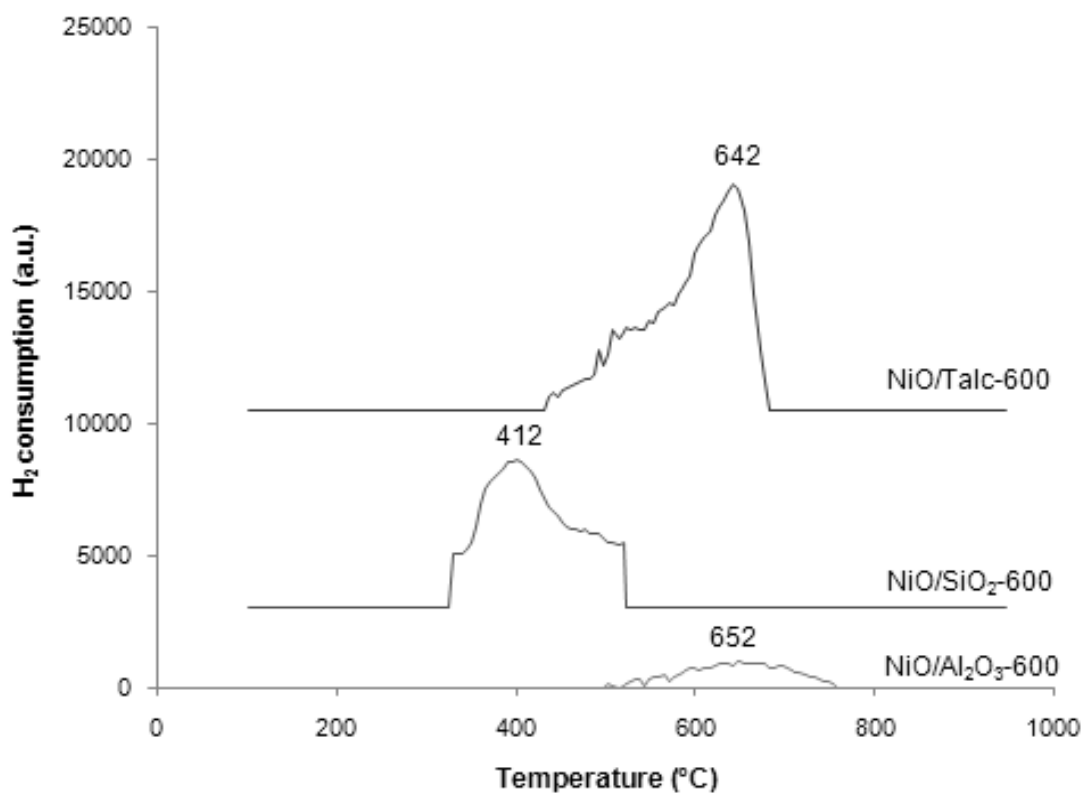


ภาพที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แสดงดังภาพที่ 4.1 จากรูปพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-600 จะปรากฏพีคที่แสดงถึงผลึกนิกเกิลอะลูมิเนต (NiAl₂O₄) ขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 37.4° และ 45.5° นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ตำแหน่ง 42.3° และปรากฏพีคของผลึกอะลูมินา (Al₂O₃) ขึ้นที่ 2θ เท่ากับ 66.7° กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂-600 พบว่าพีคที่แสดงถึงผลึกนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 37.3°, 43.3° และ 62.92° ส่วนผลึกซิลิกา (SiO₂) ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 21.46° กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600 ปรากฏพีคที่แสดงถึงผลึกไฮดรอกไซด์แมกนีเซียมซิลิเกต (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) ขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.46°, 28.6°, 37.2°, และ 51.1° นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่แสดงถึงผลึกนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ตำแหน่ง 43.3° ด้วย

การวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Temperature programmed reduction (TPR) แสดงดังภาพที่ 4.2 จากรูปพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา

NiO/Al₂O₃-600 จะปรากฏพีคการรีดักชันที่อุณหภูมิ 652 องศาเซลเซียส แสดงถึงการรีดักชันขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่มีแรงกระทำที่แข็งแกร่งกับตัวรองรับอะลูมินา (Al₂O₃) ในรูปของนิกเกิลอะลูมิเนต (NiAl₂O₄) (Zhang et al., 2002) กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂-600 จะปรากฏพีคการรีดักชันที่อุณหภูมิ 412 องศาเซลเซียส แสดงถึงการรีดักชันของโลหะนิกเกิลออกไซด์อิสระ (Free NiO) หรือนิกเกิลออกไซด์ที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนกับตัวรองรับซิลิกา (SiO₂) (Ni²⁺ → Ni⁰) และกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600 จะปรากฏพีคการรีดักชันที่อุณหภูมิ 642 องศาเซลเซียส แสดงถึงการรีดักชันของโลหะนิกเกิลออกไซด์อิสระ (Free NiO) หรือนิกเกิลออกไซด์ที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนกับตัวรองรับทัลค์ (Talc) (Ni²⁺ → Ni⁰) (Swierczynski et al., 2007) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)



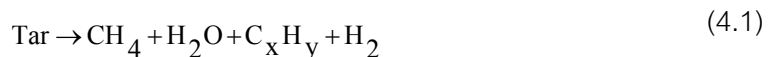
ภาพที่ 4.2 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับต่างๆ

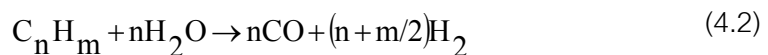
4.2.1 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

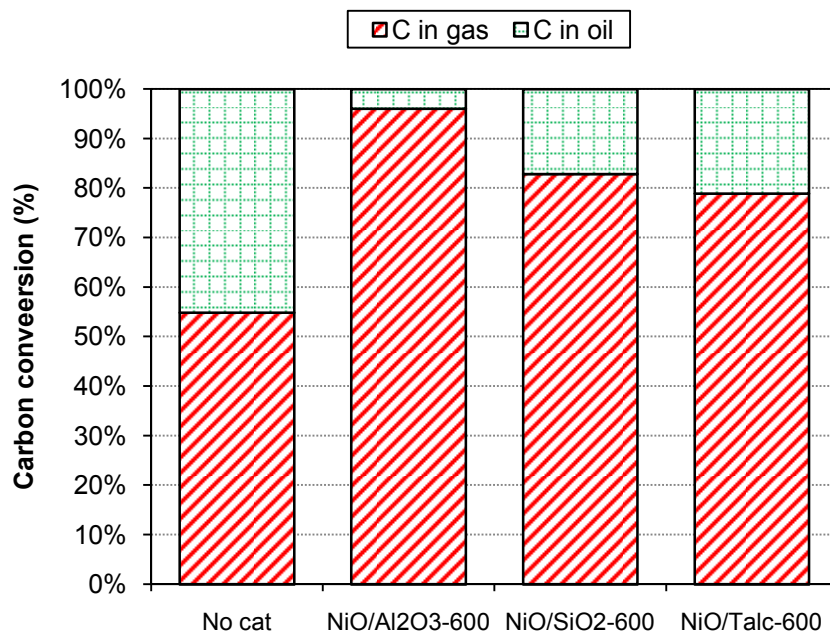
ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.3 พิจารณาเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่เคลือบ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ เพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สได้สูงสุดถึง 96.06 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สอยู่ที่ 82.88 และ 78.94 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc โดยจะทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบามากขึ้น

Tar cracking:



Steam reforming of hydrocarbon :





ภาพที่ 4.3 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

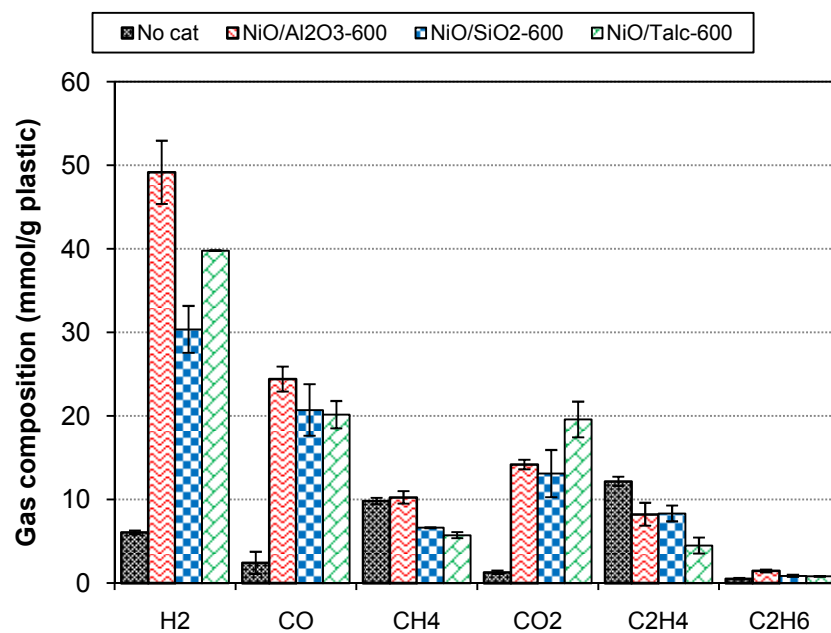
เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงผลเชิงบวกต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 49.2 และ 24.45 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 19.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก สามารถอธิบายได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ มีคุณสมบัติช่วย

เร่งปฏิกิริยา Water gas ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ดังสมการที่ (4.3) - (4.5)

Water gas reaction :



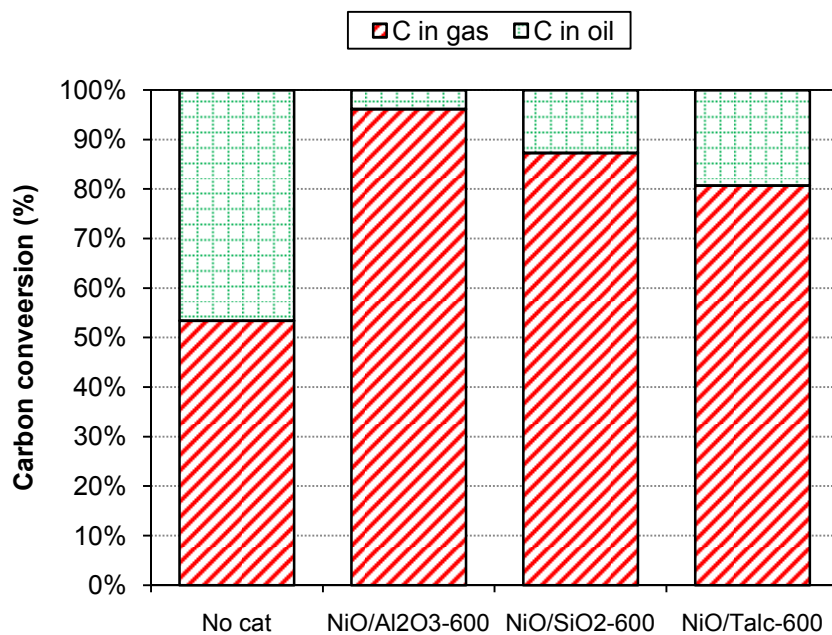
Oxidation :



ภาพที่ 4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแก๊สพิกเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รัอยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

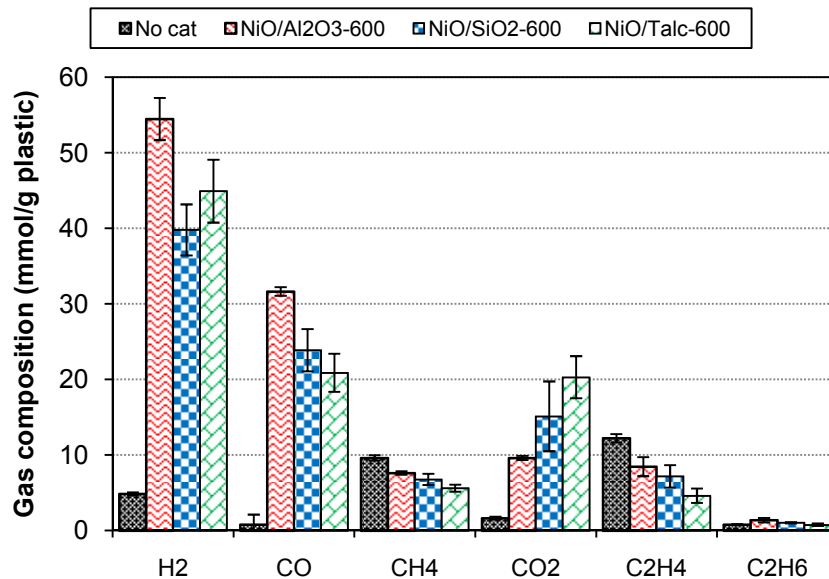
4.2.2 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.5 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่แคลไซน์ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, NiO/SiO_2 และ NiO/Talc พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุดถึง 96.2 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 และ NiO/Talc จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเป็น 87.32 และ 80.73 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 และ NiO/Talc ส่งผลให้น้ำมันทาร์ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ($\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, NiO/SiO_2 และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

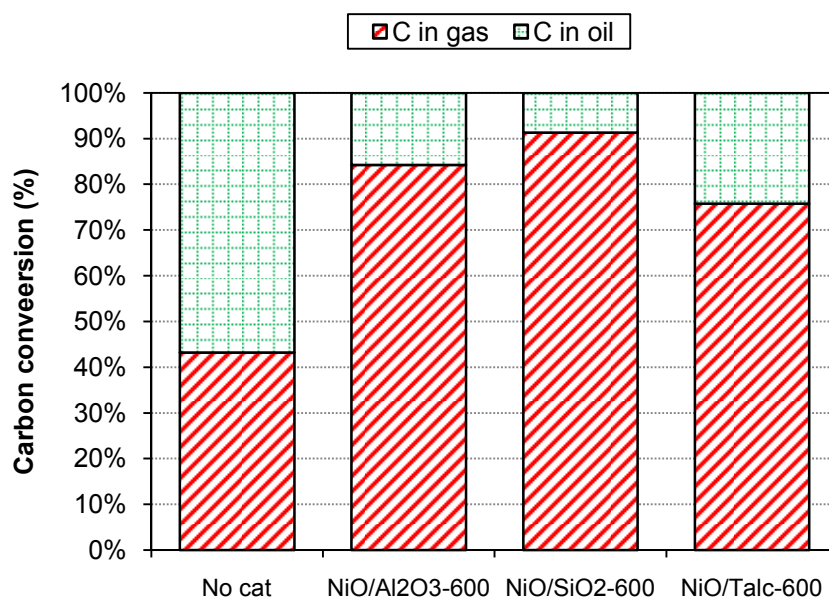
เมื่อพิจารณาผลของการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงผลเชิงบวกต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 54.51 และ 31.66 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 20.31 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับผลของการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนไม่มีอิทธิพลต่อการแกซิฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล



ภาพที่ 4.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

4.2.3 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP)

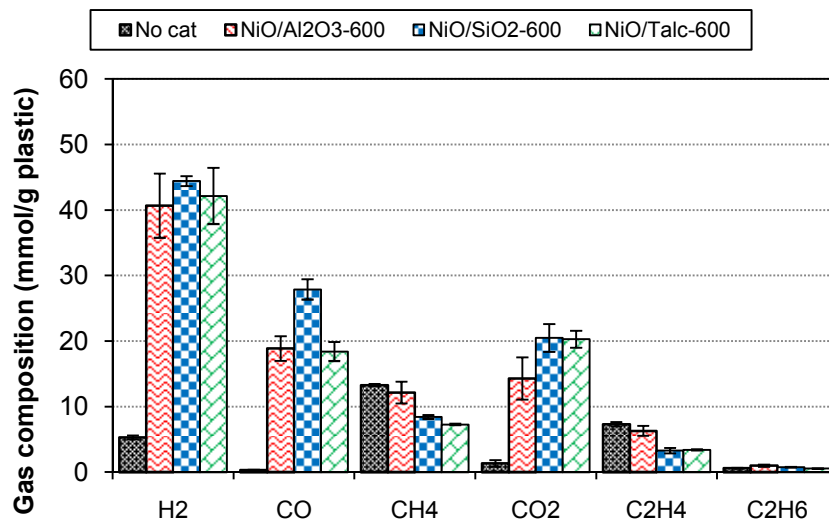
ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที แสดงดังภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่เคลือบ 600 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล จะทำให้อัตราการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ จะทำให้อัตราการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุดถึง 91.31 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/Talc จะทำให้อัตราการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเป็น 84.25 และ 75.77 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และปฏิกิริยาฟรีฟอร์มิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/Talc



ภาพที่ 4.7 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซต์ที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงผลเชิงบวกต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 44.41, 27.89 และ 20.48 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ มีคุณสมบัติช่วยเร่งปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.3), (4.4) และ (4.6)

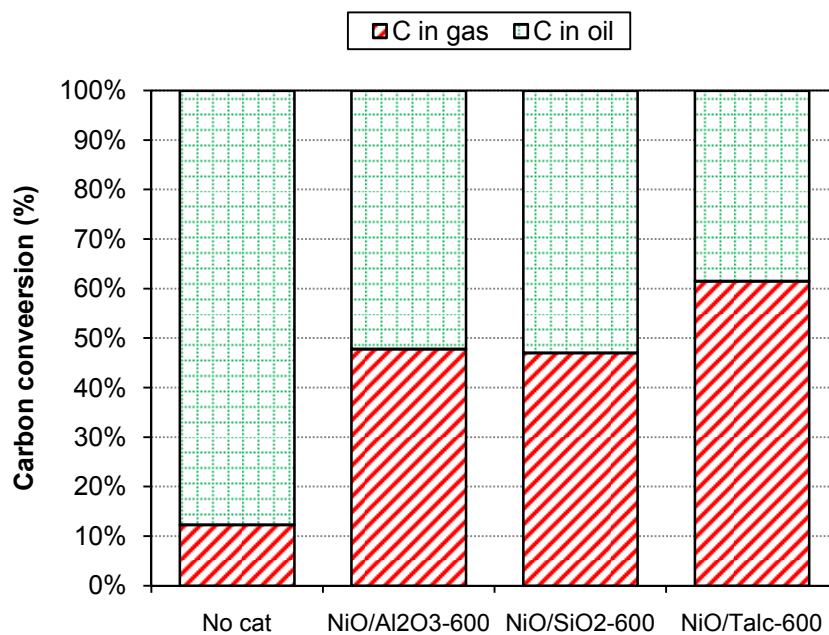
Methane steam reforming :



ภาพที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ แคลไซต์ที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

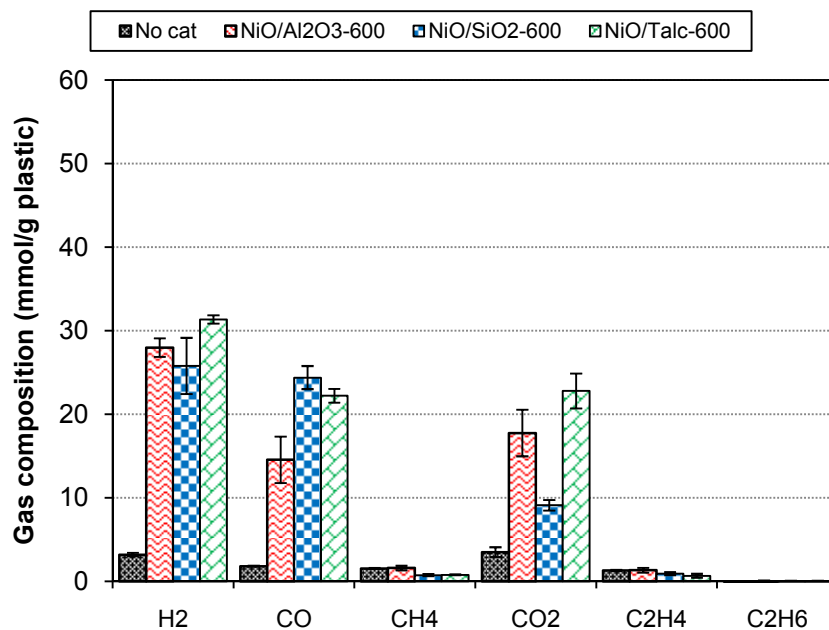
4.2.4 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS)

ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่แคลไซน์ 600 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุดถึง 61.53 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/SiO₂ จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเป็น 47.79 และ 47.07 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และปฏิกิริยาฟรีฟอร์มิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/SiO₂



ภาพที่ 4.9 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับชนิดต่างๆ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

เมื่อพิจารณาผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงผลเชิงบวกต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวรองรับชนิดต่างๆ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 31.34 และ 22.78 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc มีคุณสมบัติช่วยเร่งปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ดังสมการที่ (4.3) - (4.5) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 24.39 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.6) ได้ดี

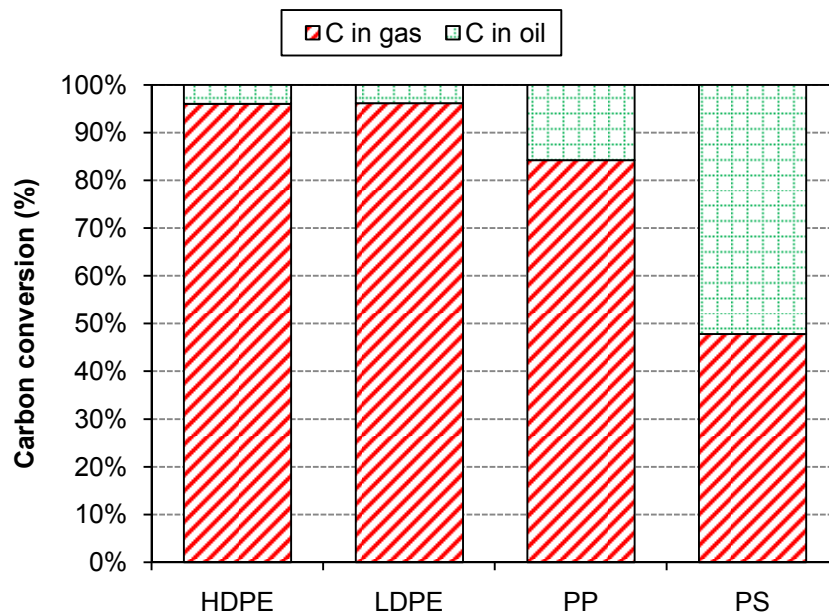


ภาพที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเคลือบตัวรองรับชนิดต่างๆเคลือบที่ 600 องศาเซลเซียส (NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3 ผลของชนิดพลาสติก

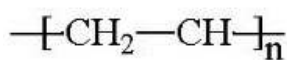
4.3.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา

ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 96.06 และ 96.20 ตามลำดับ ในขณะที่พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส คือ 84.25 และ 47.79 ตามลำดับ โดยพอลิสไตรีน (PS) มีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแรดคัลอิสระ (Free radicals) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีน (PS) ในช่วงเริ่มต้นสามารถทำปฏิกิริยารีพอลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ที่อุณหภูมิสูงต่อกลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในทาร์

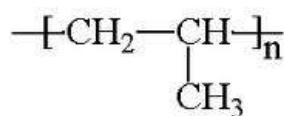


ภาพที่ 4.11 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

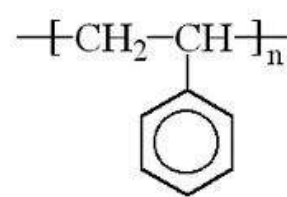
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ดังภาพที่ 4.13 พบว่า การแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) สูงถึง 54.51, 31.66 และ 8.46 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ โดยปริมาณแก๊สมีเทน (CH_4) จะพบมากในการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะพบมากในการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) คือแก๊สไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) โดยสังเกตได้ว่าในกรณีของพอลิพรอพิลีน (PP) นั้นจะให้แก๊สมีเทนมากกว่าพลาสติกตัวอื่นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกซีพีเคชั่นพอลิสไตรีน (PS) คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยสังเกตได้ว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพอลิสไตรีน (PS) นั้นมีปริมาณโดยรวมค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณของแก๊สที่ได้จากกรณีของพอลิเอทิลีน



(ก) พอลิเอทิลีน (PE)



(ข) พอลิพรอพิลีน (PP)

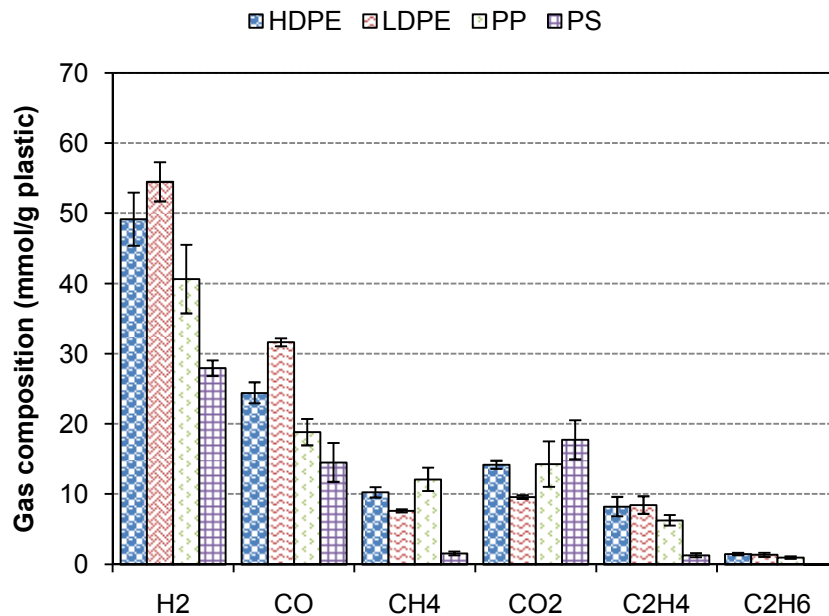


(ค) พอลิสไตรีน (PS)

ภาพที่ 4.12 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ที่แสดงดังภาพที่ 4.12 สามารถอธิบายได้ว่า พันธะ C-C ในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเป็นพันธะที่อ่อนที่สุดในโครงสร้าง และสามารถเกิดการแตกออกของสายโซ่ (Chain scission หรือ Depolymerization) ในระหว่าง

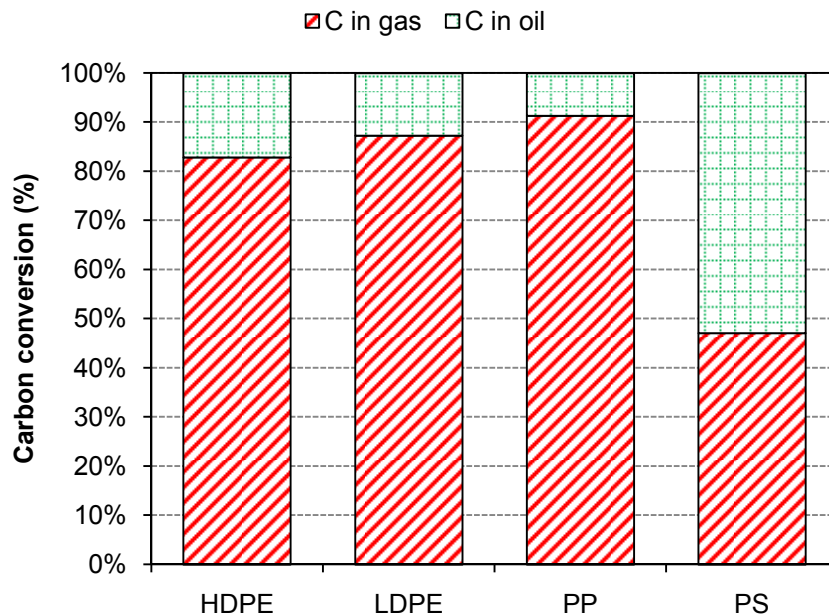
กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน เกิดเป็นแบริดัลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งแบริดัลดังกล่าวจะพยายามทำตัวให้อยู่ในรูปที่เสถียร (Stabilization) อันนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนพันธะคู่ หรือสารประกอบแอลคีน (Williams and Williams, 1999 และ Siddiqui and Redhwi, 2009) อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิเอทิลีน (PE) ไม่มีหมู่ซัดขวาง เหมือนกับพอลิพรอพิลีน (PP) ดังนั้นโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้มากกว่า ส่งผลให้ปริมาณของแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) เกิดขึ้นได้มากกว่า สำหรับกรณีของพอลิพรอพิลีน (PP) สังเกตได้ว่าในโครงสร้างมีหมู่เมทิล ($-CH_3$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นหมู่ข้างเคียง (Side group) เพิ่มมาจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งคาร์บอนที่อยู่บริเวณกิ่งก้านจะมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ที่ต่ำกว่าคาร์บอนในสายโซ่หลัก จึงส่งผลให้หมู่เมทิล ($-CH_3$) มีโอกาสถูกขจัดออก (Elimination) ได้ง่าย ในระหว่างการสลายตัวด้วยความร้อน (McNeill, 1997 และ Miskolczi et al., 2004) แล้วเกิดเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) ดังนั้นปริมาณของแก๊สมีเทน (CH_4) จึงเกิดขึ้นมากกว่ากรณีของพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งสองชนิด สำหรับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดขึ้น อาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ของไฮโดรคาร์บอน และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ดังสมการ (4.1) และ (4.2) และสำหรับกรณีของพอลิสไตรีน (PS) การที่มีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดขึ้นมากที่สุด คาดว่ามาจากการที่ไฮโดรคาร์บอน และ Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีน (PS) สามารถทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ดังสมการ (4.2)-(4.5) (Pinto et al., 2002 และ Wu and Williams, 2010)



ภาพที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา

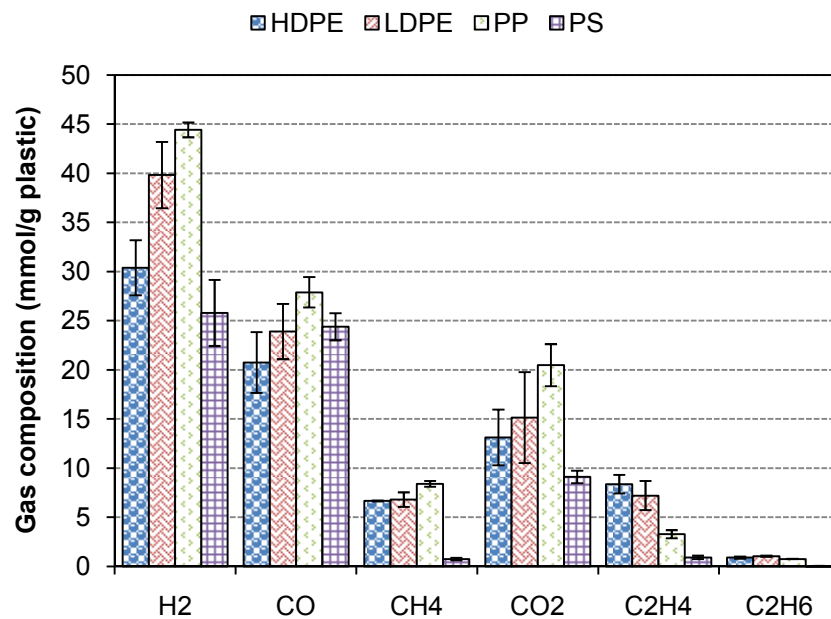
ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อ นาที แสดงดังภาพที่ 4.14 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 91.31 ในขณะที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิสไตรีน (PS) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส คือ 87.32, 82.88 และ 47.07 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันห่าน และปฏิกิริยาฟรีมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้ดี



ภาพที่ 4.14 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที ดังภาพที่ 4.15 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), มีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สูงถึง 44.41, 27.89, 8.40 และ 20.48 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดอื่นๆ คือ พอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), และพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า พอลิพรอพิลีน (PP) ในโครงสร้างมีหมู่เมทิล (-CH₃) ซึ่งทำหน้าที่เป็นหมู่ข้างเคียง (side group) คาร์บอนที่อยู่บริเวณกิ่งก้านจะมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ที่ต่ำกว่าคาร์บอนในสายโซ่หลัก จึงส่งผลให้หมู่เมทิลมีโอกาสถูกขจัดออก (Elimination) ได้ง่ายในระหว่างการสลายตัวด้วยความร้อน (McNeill, 1997 และ Miskolczi et al., 2004) ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), มีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สูงขึ้น เนื่องจากตัวเร่ง

ปฏิกิริยา NiO/SiO₂ มีคุณสมบัติช่วยเร่งปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.3), (4.4) และ (4.6) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น

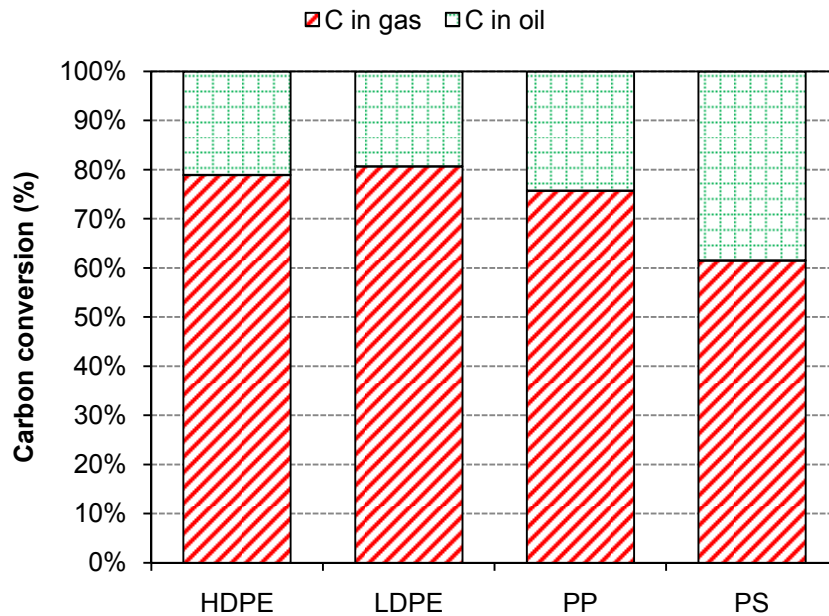


ภาพที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.3 ผลของตัวรองรับปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับทัลค์

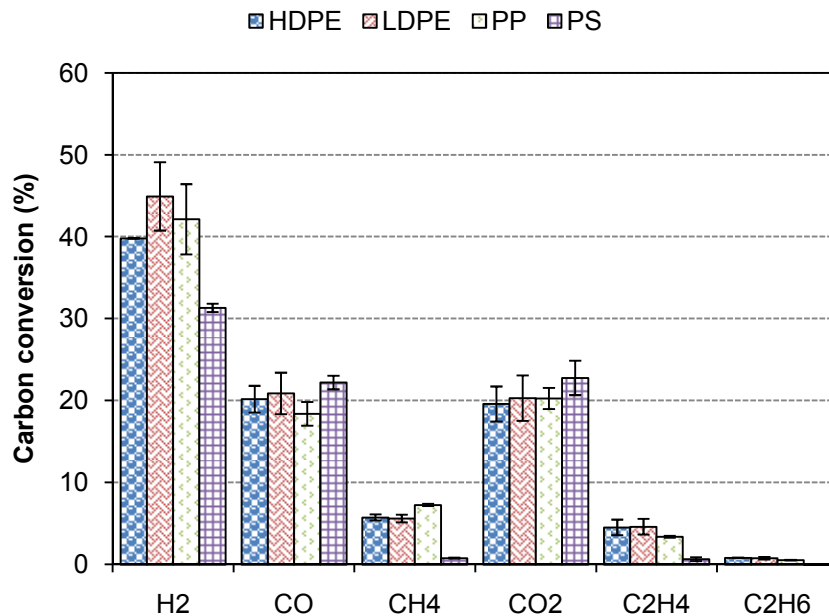
ผลของการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส รั้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังภาพที่ 4.16 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะทำให้อัตราการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 80.73 ในขณะที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส คือ 78.94, 75.77 และ 61.53 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันห่าน และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของ

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) ได้



ภาพที่ 4.16 ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ดังภาพที่ 4.17 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) สูงถึง 44.95 และ 4.61 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าพอลิพรอพิลีน (PP), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิสไตรีน (PS) ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะพบมากในการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) โดยปริมาณแก๊สมีเทน (CH_4) จะพบมากในการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP)



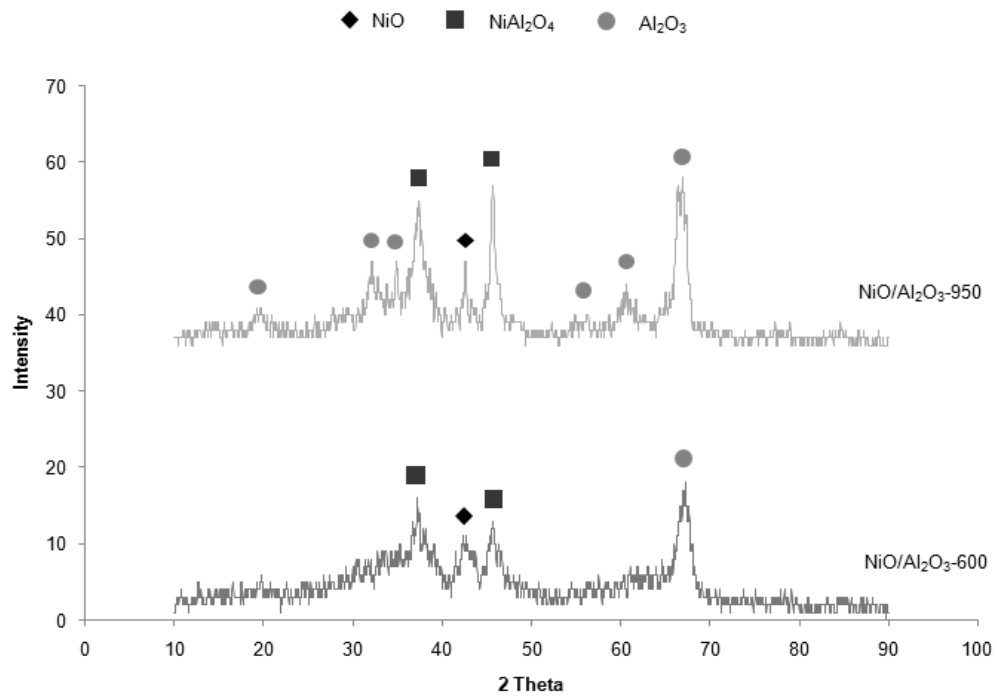
ภาพที่ 4.17 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแก๊สพิกัดพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc แคลไซต์ที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.4 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซต์

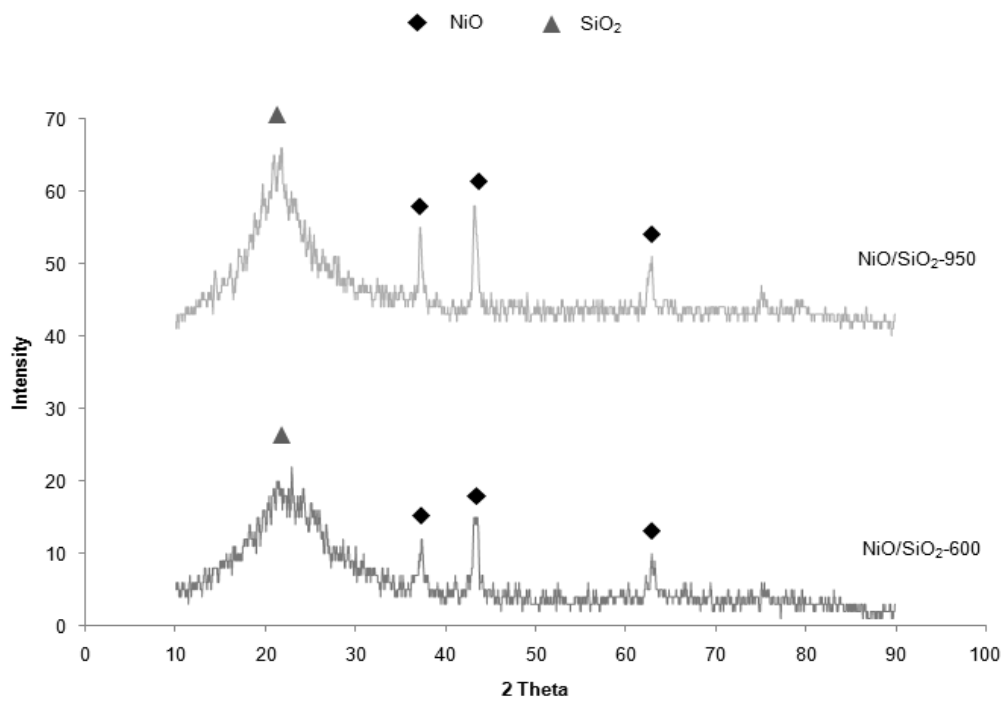
4.4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

จากผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลด้วยเทคนิค XRD แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-950 แสดงพีคขององค์ประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียม (NiAl₂O₄) ที่ $2\theta = 37.4^\circ$ และ 45.5° ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความไวต่ำกว่านิกเกิลออกไซด์ (Chen, 1994) สูงกว่าพีคของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-600 กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซต์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบพีคของ SiO₂ ที่ $2\theta = 21.46^\circ$ และพีคของ NiO ที่ $2\theta = 37.3^\circ$, 43.3° และ 62.92° เช่นเดียวกัน โดยที่ไม่พบพีคสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างนิกเกิลออกไซด์และซิลิกา ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600 พบพีคของ NiO ที่ $2\theta = 43.34^\circ$ และพีคของ Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของทัลค์ ที่ $2\theta = 19.46^\circ$, 28.6° , 37.2° , และ 51.1° อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิแคลไซต์เป็น 950 องศาเซลเซียส พบว่าพีคของ Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ หายไป กลายเป็นพีคของ MgSiO₃ ขึ้นที่ $2\theta = 31.1^\circ$ และพีคของ SiO₂ ที่ $2\theta = 20.5$ และพีค

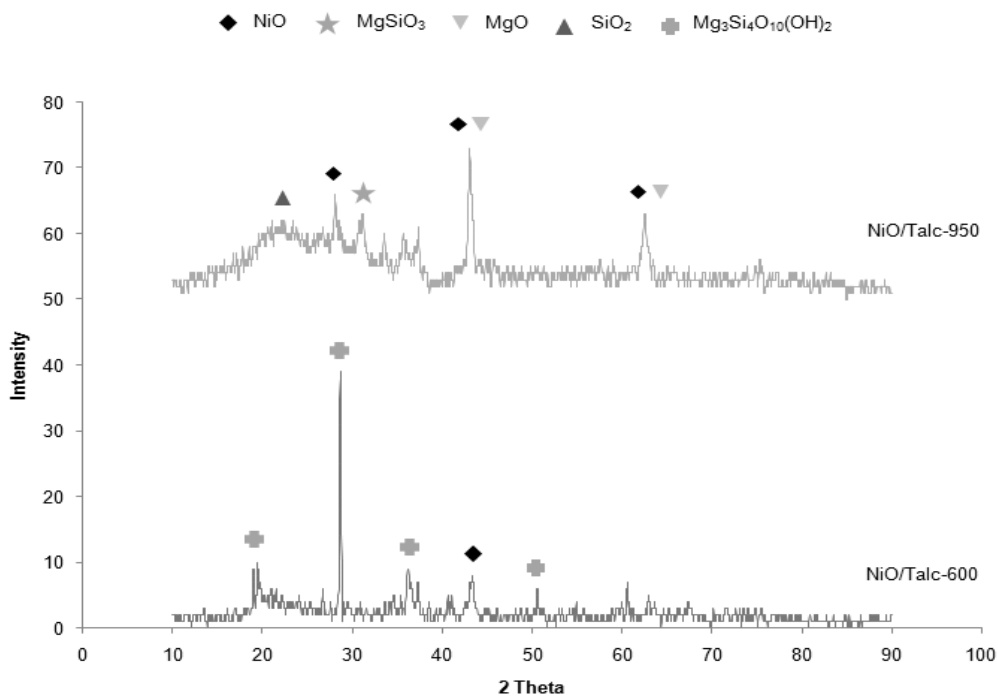
ของ MgO ปรากฏขึ้นที่ $2\theta = 43.06^\circ$ และ 62.5° ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการสลายตัวของความร้อนของโครงสร้าง $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$



(a)



(b)

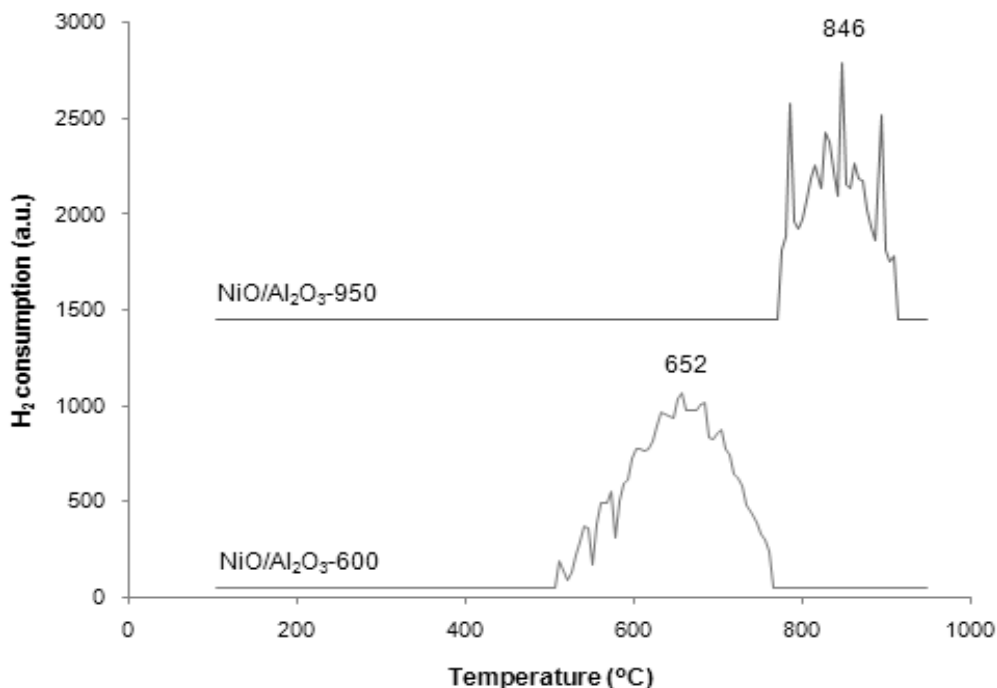


(c)

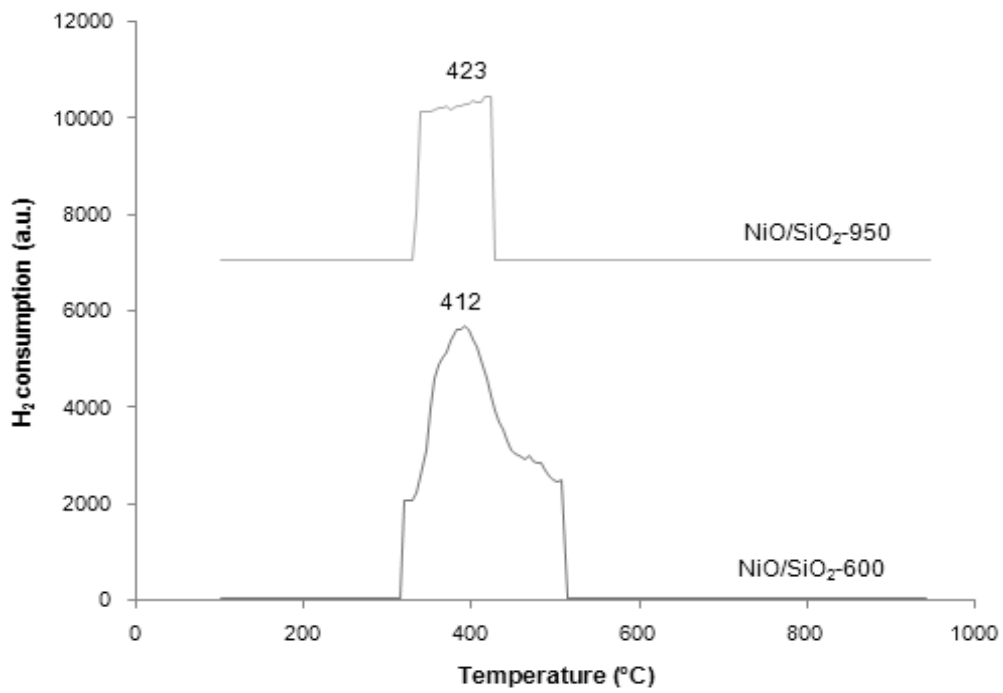
ภาพที่ 4.18 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al₂O₃, (b) NiO/SiO₂ และ (c) NiO/Talc

การทดสอบด้วยเทคนิค TPR เป็นการศึกษาศามารถในการรีดิวซ์โลหะนิกเกิลออกไซด์บนรองรับด้วยแก๊สไฮโดรเจน จากผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.19 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-600 แสดงพีคของ Hydrogen consumption ที่อุณหภูมิ 652 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-950 แสดงพีคของ Hydrogen consumption ที่อุณหภูมิ 846 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ ทำให้ความสามารถในการรีดักชันโลหะนิกเกิลออกไซด์เกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างโลหะและตัวรองรับ (Metal-support interaction) มากขึ้น ทำให้นิกเกิลออกไซด์เกิดอันตรกิริยากับอะลูมินากลายเป็นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนต ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ XRD ที่กล่าวว่าการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 950 องศาเซลเซียส ปรากฏพีคของนิกเกิลอะลูมิเนตที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงบอกได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ ทำให้ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง เนื่องจากโลหะนิกเกิลออกไซด์ที่มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาเกิดอันตรกิริยากับตัวรองรับได้มากขึ้นนั่นเอง ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ จาก 600 เป็น 950 องศา

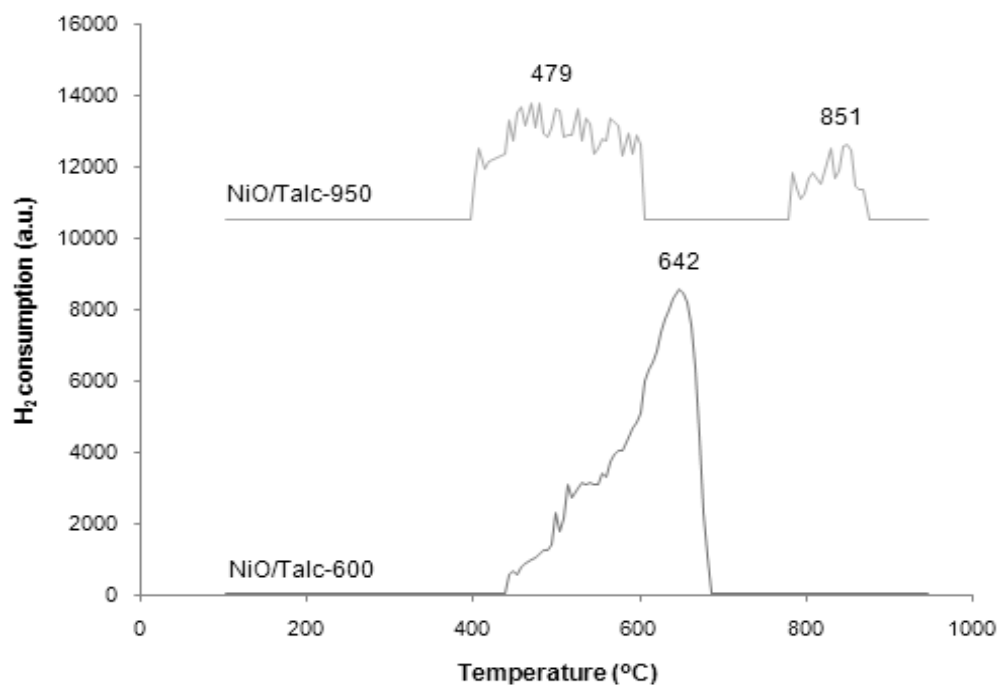
เซลเซียส ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการรีดักชันของนิกเกิลออกไซด์บนซิลิกา โดยที่อุณหภูมิในการรีดักชันปรากฏอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 410-420 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการรีดักชันของนิกเกิลออกไซด์ (Roh, et.al., 2002) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่านิกเกิลออกไซด์ไม่เกิดอันตรกิริยากับตัวรองรับซิลิกา (Kong et.al., 2011) ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์เป็นผลให้พฤติกรรมในการรีดักชันแก๊สไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc (ดังรูปที่ 4.19) เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600 แสดงอุณหภูมิในการรีดักชันอยู่ที่ 642 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิในการรีดักชันเกิดขึ้นสองช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 469 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองแสดงที่อุณหภูมิ 851 องศาเซลเซียส ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส ทำให้นิกเกิลออกไซด์บางส่วนเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับ MgO ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ เป็นผลให้เกิดเป็นสารประกอบ NiO-MgO เกิดการรีดักชันได้ที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าผลึกของ NiO-MgO ไม่สามารถยืนยันได้จากเทคนิค XRD เนื่องจากพีคของ NiO-MgO, NiO และ MgO อยู่ใกล้เคียงกันมาก (Kong et.al., 2011)



(a)



(b)



(c)

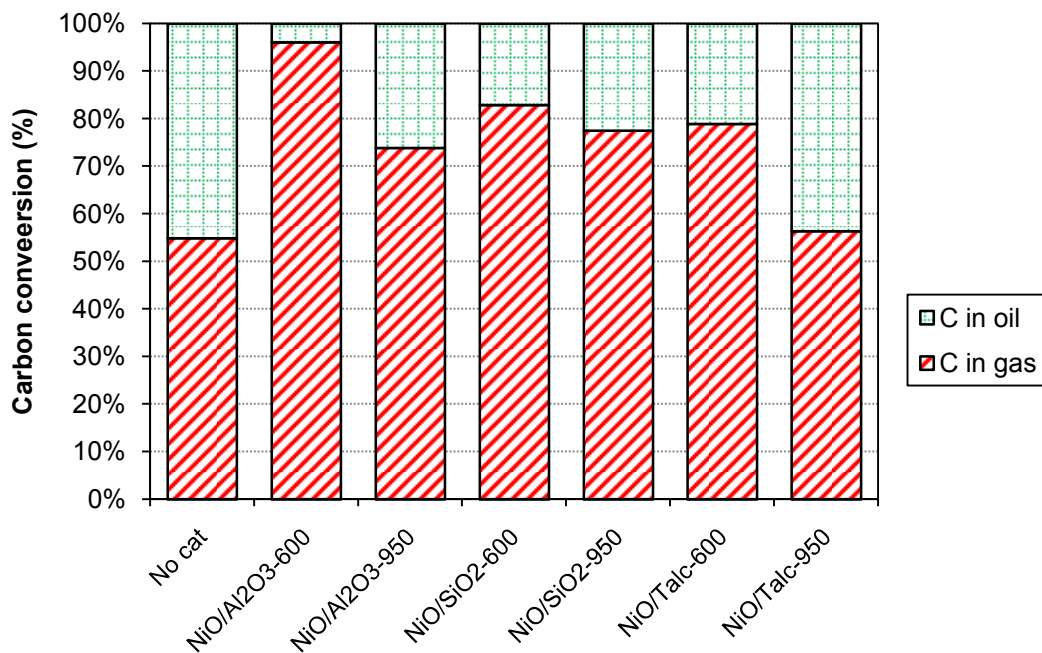
ภาพที่ 4.19 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al₂O₃, (b) NiO/SiO₂ และ (c) NiO/Talc

4.4.2 การแก้ไขโพธิ์เคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

จากภาพที่ 4.20 แสดงผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส แสดงผลเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 96.06 เป็น 73.90 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลลดลง เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดต่ำลงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 อีกทั้งตัวเร่ง $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส น่าจะมีองค์ประกอบของนิกเกิลอะลูมิเนต (NiAl_2O_4) ที่มากขึ้น จึงทำให้มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำลงกับการเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์

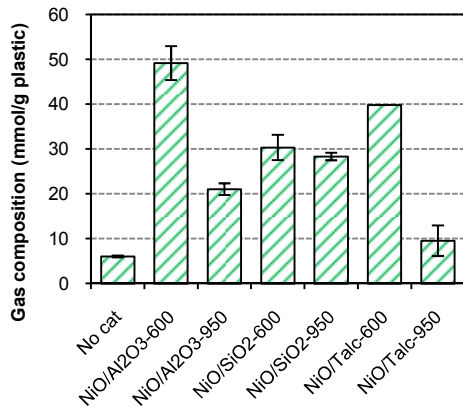
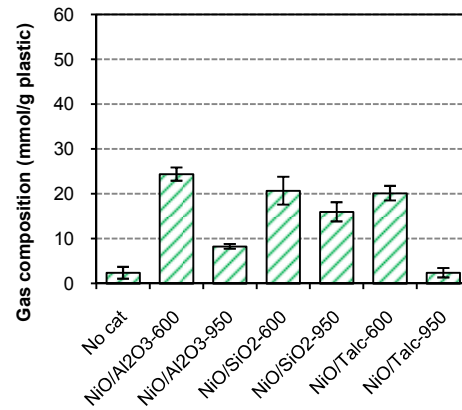
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 82.88 เป็น 77.52 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีปริมาณพื้นที่ผิวต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง

ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 78.94 เป็น 56.38 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากสลายตัวของ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ กลายเป็น MgO ที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์ ซึ่ง MgO ดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างนิกเกิลออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการรีดักชันของนิกเกิลออกไซด์มีต่ำลง

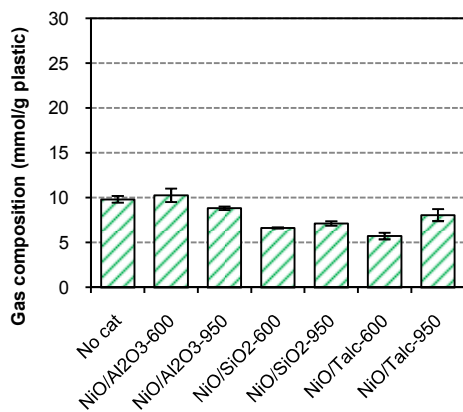
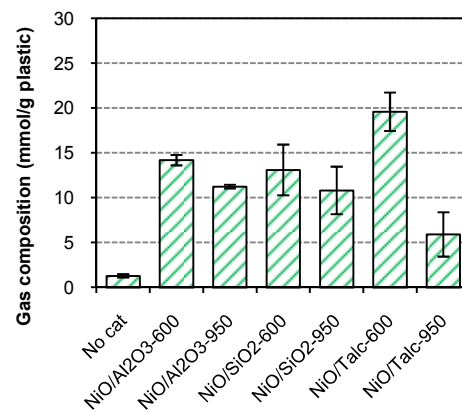
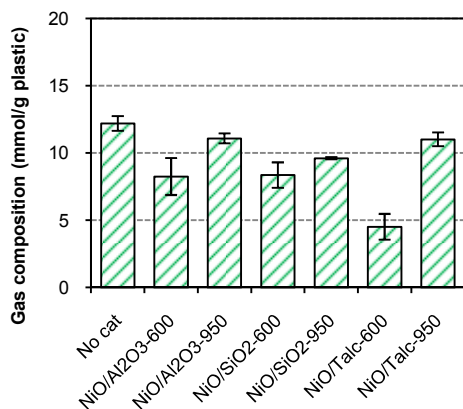
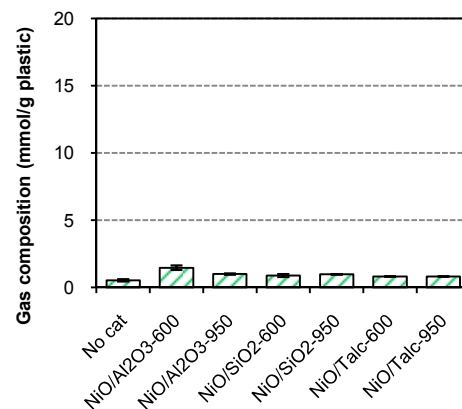


ภาพที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่อองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.21 จะพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สูงกว่า โดยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc จะมีปริมาณแก๊สมีเทน (CH₄) ที่ต่ำกว่า ส่วนปริมาณแก๊สเอทิลีน (C₂H₄) ทุกตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดจะมีปริมาณต่ำกว่าการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นการยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส อย่างเห็นได้ชัด

H₂

CO

CH₄CO₂C₂H₄C₂H₆

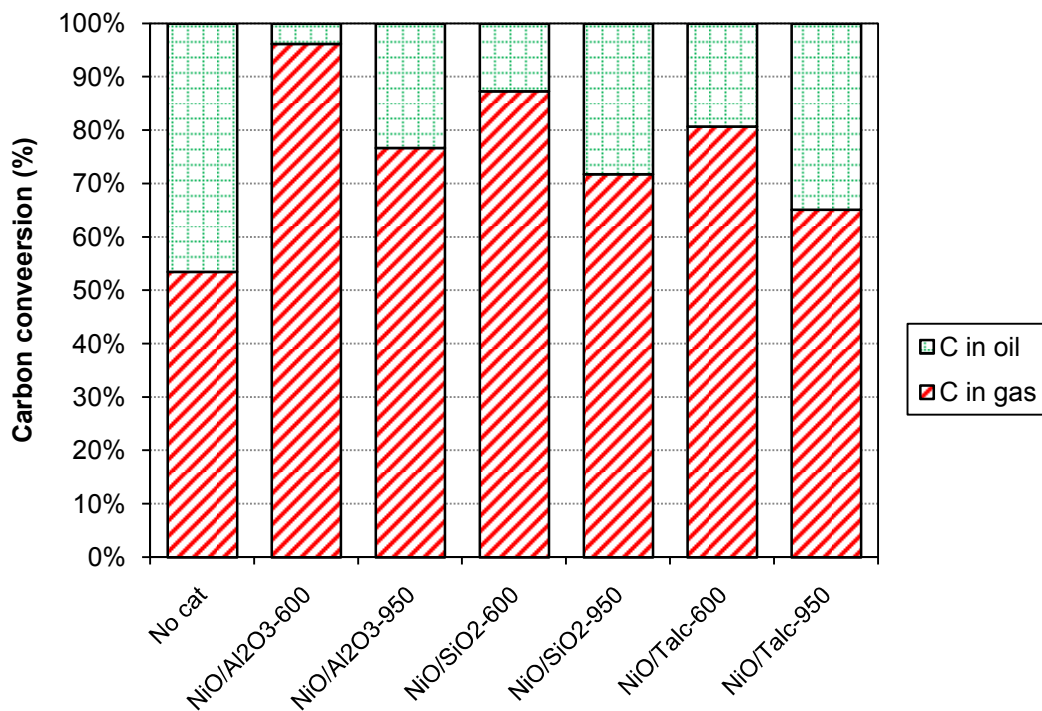
ภาพที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.4.3 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

จากภาพที่ 4.22 แสดงผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส แสดงผลเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 96.20 เป็น 76.72 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์ชของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลลดลง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2

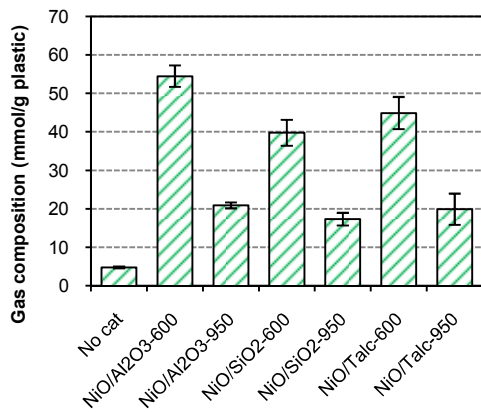
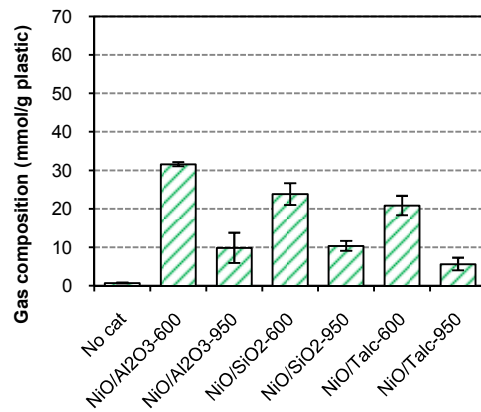
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.22 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 87.32 เป็น 71.78 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในหัวข้อ 4.4.2

ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.22 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 80.73 เป็น 65.15 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากสลายตัวของ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2

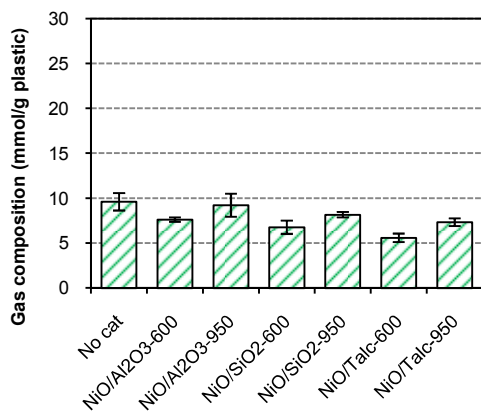
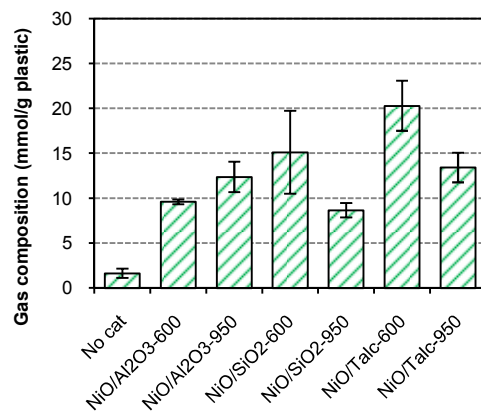
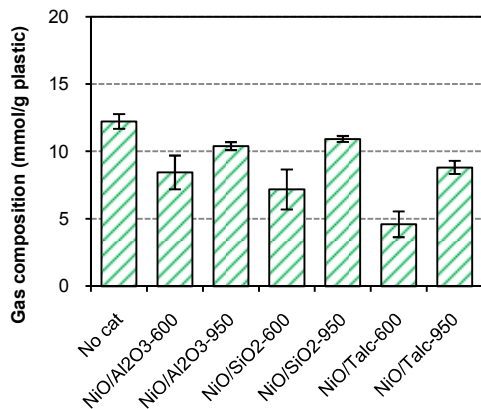
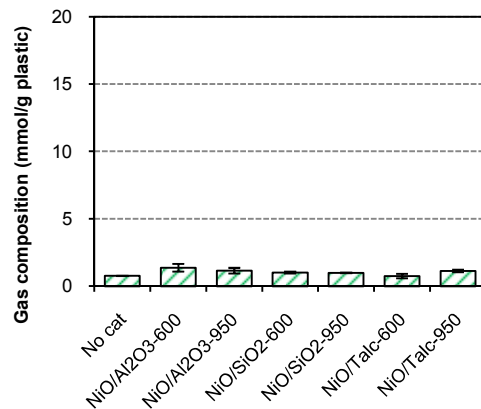


ภาพที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่อองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.23 จะพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงกว่า โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc จะมากกว่า แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ จะต่ำกว่า ส่วนปริมาณแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สเอทิลีน (C₂H₄) ทุกตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดจะมีปริมาณต่ำกว่าการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นการยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิดแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส

H₂

CO

CH₄CO₂C₂H₄C₂H₆

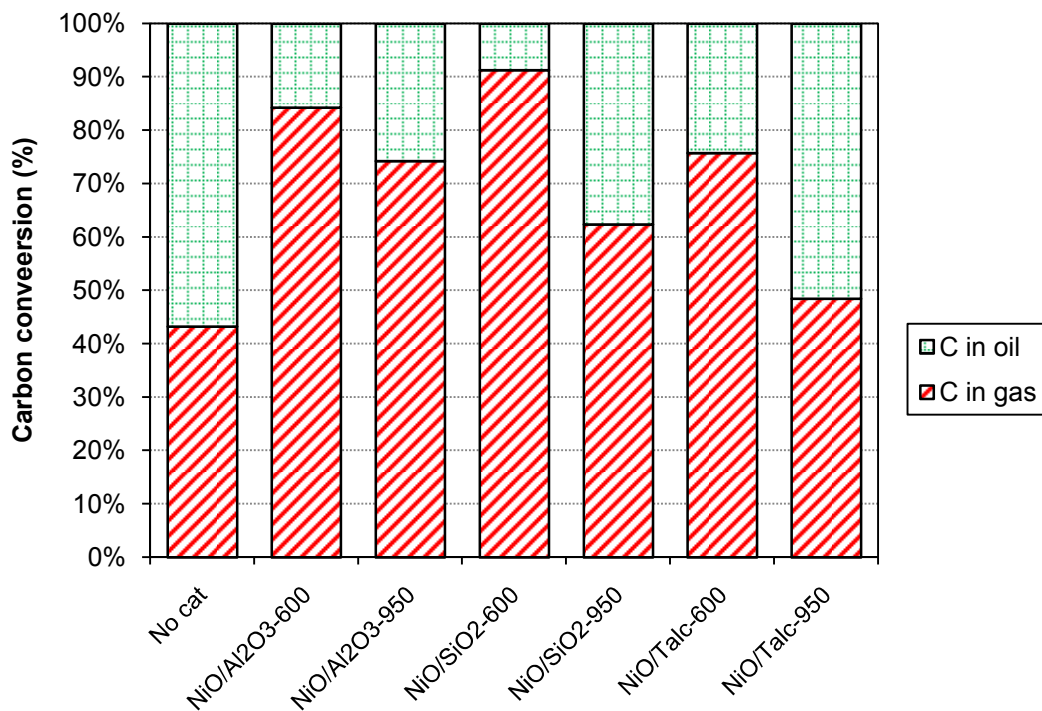
ภาพที่ 4.23 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแกซิฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

4.4.4 การแก้ไขโพไซซอนพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP)

จากภาพที่ 4.24 แสดงผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส แสดงผลเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 84.25 เป็น 74.27 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลลดลง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2

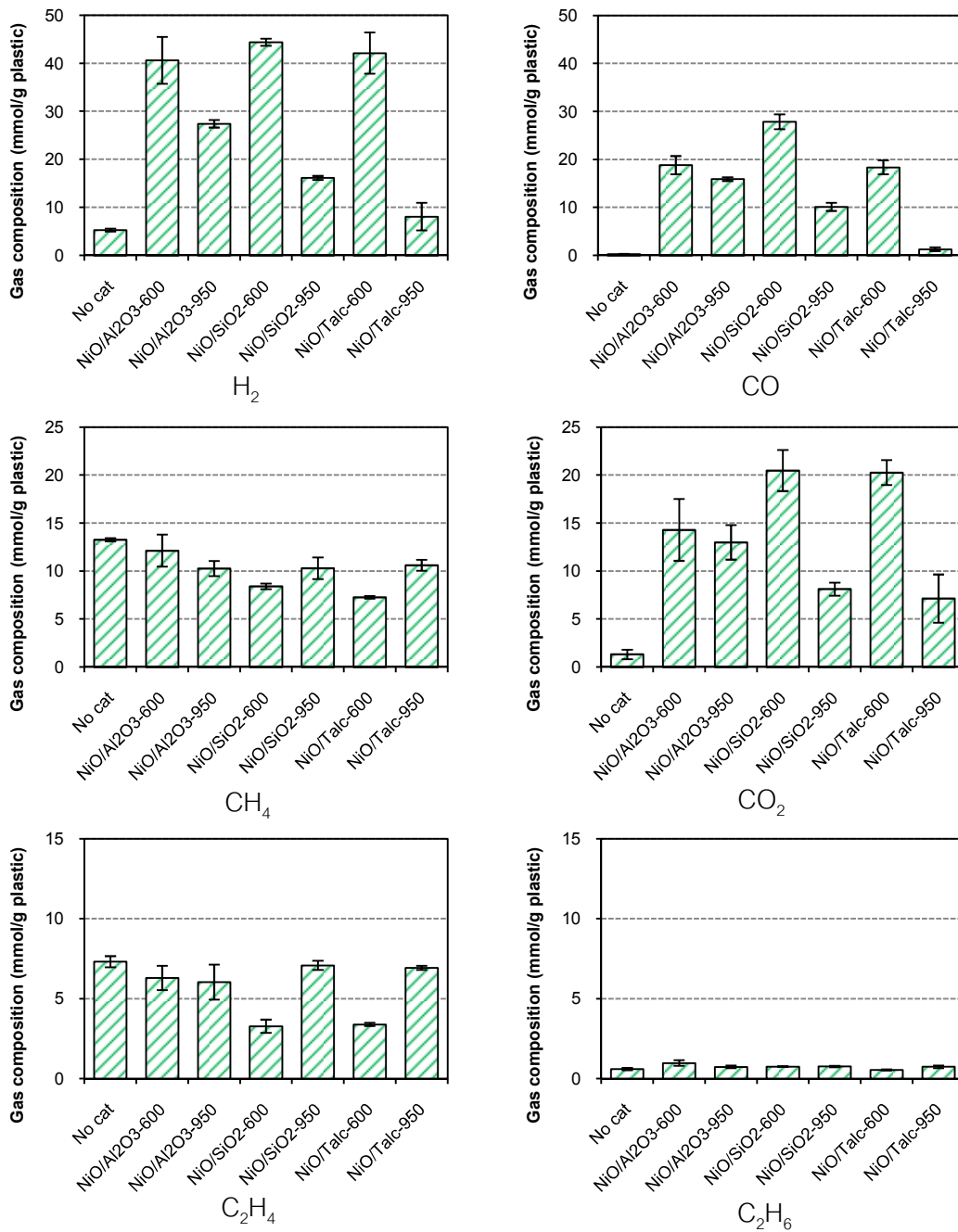
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.24 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 91.31 เป็น 62.35 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีปริมาณพื้นที่ผิวต่ำกว่ามาก

ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.24 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 75.77 เป็น 48.45 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากสลายตัวของ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2



ภาพที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่อองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.25 จะพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สูงกว่า โดยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc จะมีปริมาณแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สเอทิลีน (C₂H₄) ที่ต่ำกว่า ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ จะมีปริมาณแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สเอทิลีน (C₂H₄) ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นที่ยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส



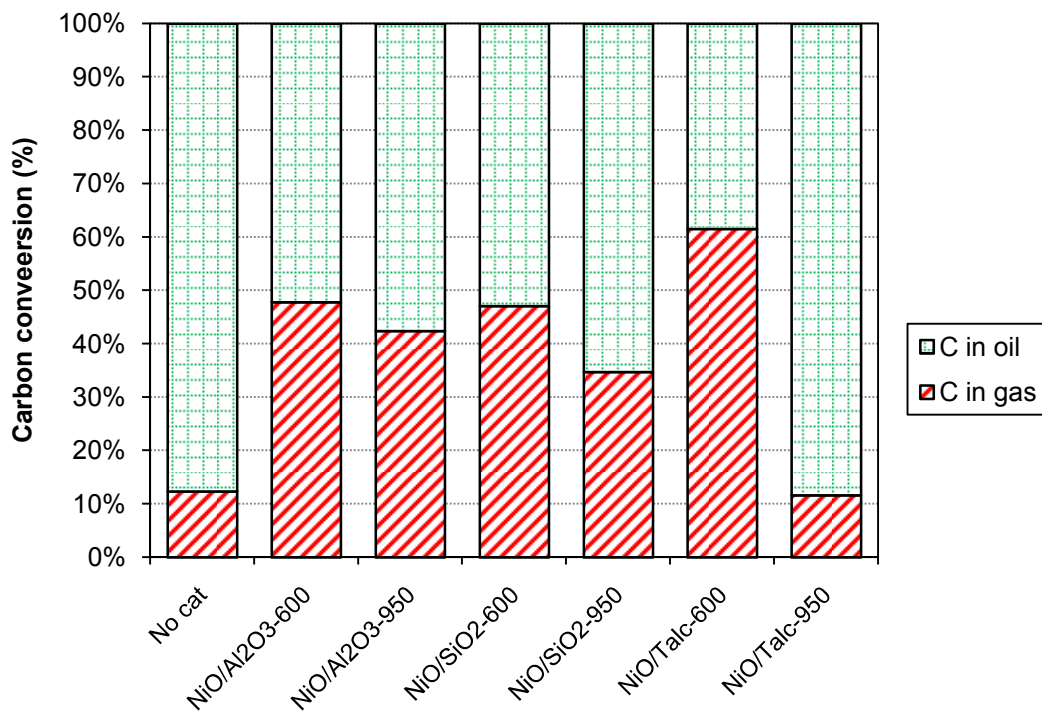
ภาพที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแก๊สฟิวเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (PP) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.4.5 การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS)

จากภาพที่ 4.26 แสดงผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส แสดงผลเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 47.79 เป็น 42.38 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวทาร์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลลดลง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2

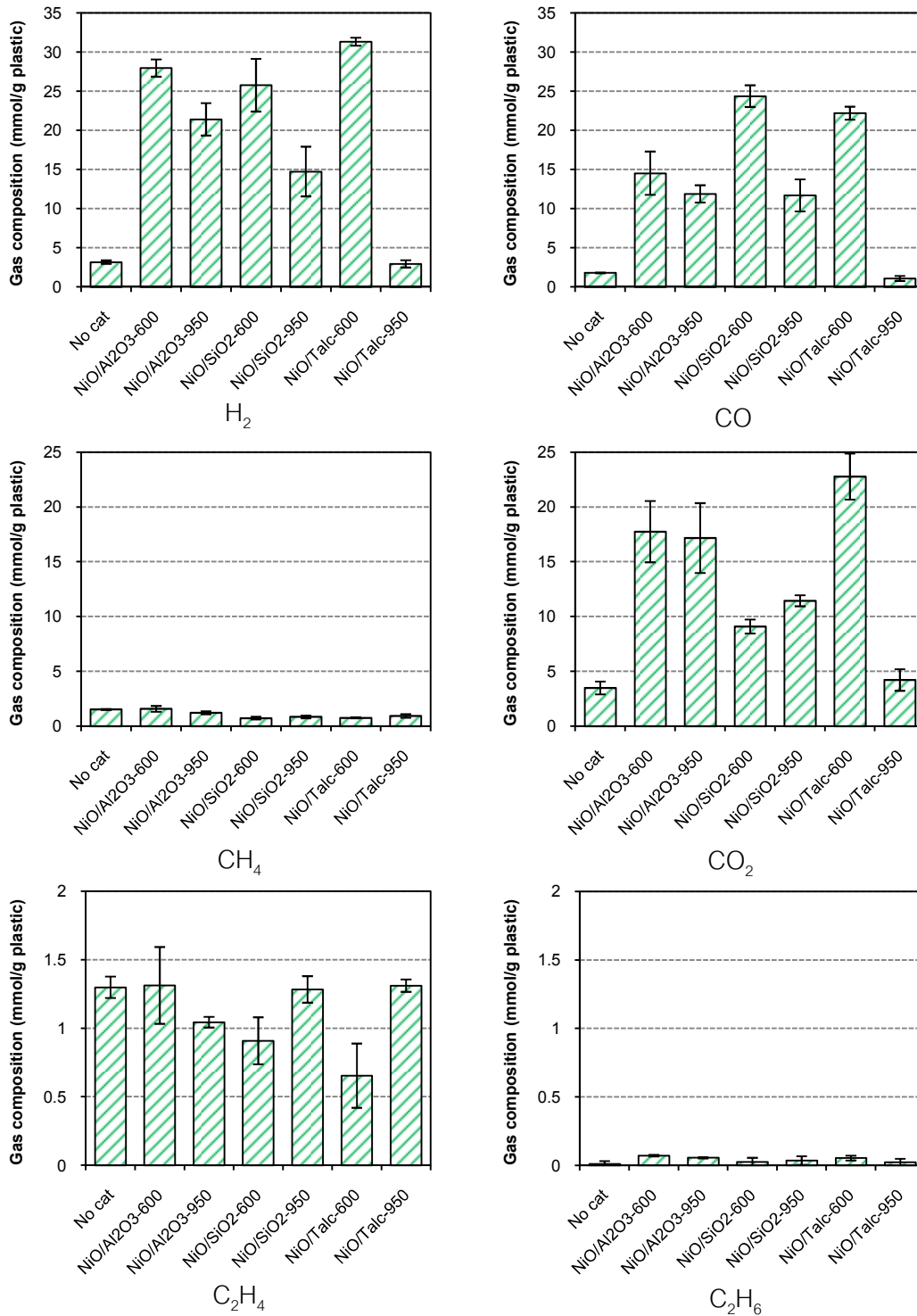
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 47.07 เป็น 34.75 สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีปริมาณพื้นที่ผิวต่ำกว่ามาก

ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.26 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 61.53 เป็น 11.64 สาเหตุดังกล่าวได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.2



ภาพที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่ออนาที

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่อองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4.27 จะพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc แคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงกว่า โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ และ NiO/Talc จะมากกว่า แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ จะต่ำกว่า ส่วนปริมาณแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สเอทิลีน (C₂H₄) ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃ จะสูงกว่า ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ และ NiO/Talc จะมีปริมาณต่ำกว่าการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นการยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทาร์และปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃, NiO/SiO₂ และ NiO/Talc ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

4.5 เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

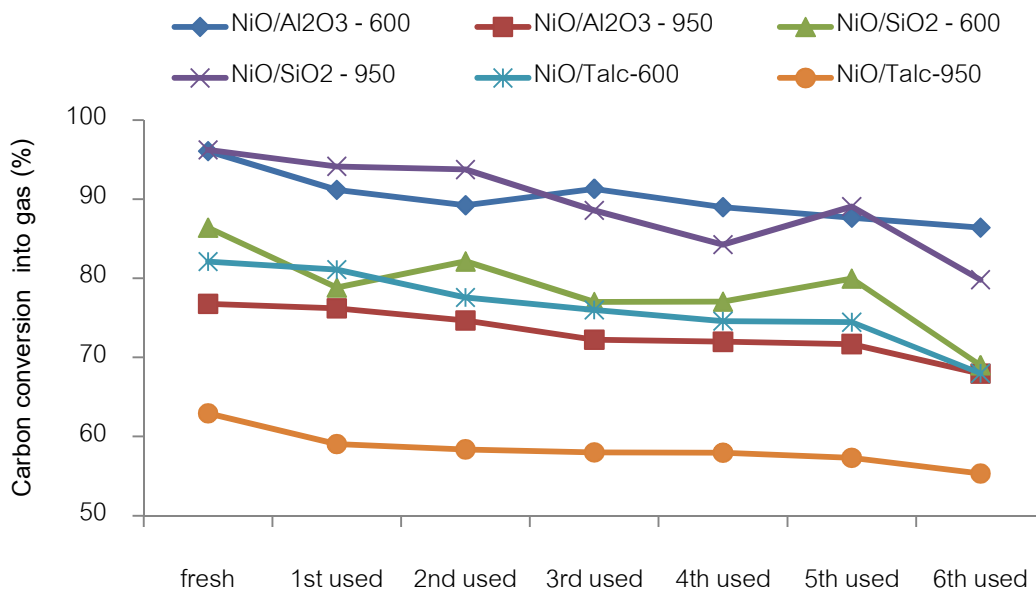
ปัญหาสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล คือ การเสื่อมสภาพ (Deactivation) อย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจาก การเกิดการฝังตัวของโค้กบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Coke deposition) หรือการหลอมรวมตัวกันของอนุภาคโลหะ (Sintering) และการเปลี่ยนแปลงในสถานะของแข็ง (Solid state transformation) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีการป้อนแก๊สออกซิเจนร่วมด้วยในการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของพลาสติก จึงทำให้ปัญหาที่เกิดจากการฝังตัวของโค้กบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดขึ้น ดังนั้นการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสันนิษฐานว่าเกิดจากอิทธิพลของการรวมตัวอนุภาคโลหะ สำหรับการศึกษเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล จะนำไปทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 6 การทดลอง

ภาพที่ 4.28 แสดงผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้งในการแกซิฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สำหรับกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 95.00 เป็น 81.66 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - 600 และลดลงจาก 76.29 เป็น 64.90 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - 950 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้ง ด้วยเทคนิค XRD ดังภาพที่ 4.29 พบว่า รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้ครั้งที่ 6 มีความเข้มของพีคที่แสดงถึงพีค NiO และ NiAl_2O_4 เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณี $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - 600 และ $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - 950 แสดงให้เห็นว่าหลังการทดลองครั้งที่ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการหลอมรวมตัวขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์ อีกทั้งสนับสนุนการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิกเกิลและอะลูมินา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลองด้วยเทคนิค TPR พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ หลังการทดลองครั้งที่ 6 แสดงคุณสมบัติในการรีดักชันอยู่ที่ประมาณ 840 – 870 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการรีดักชันขององค์ประกอบนิกเกิลอะลูมิเนต แสดงดังภาพที่ 4.30

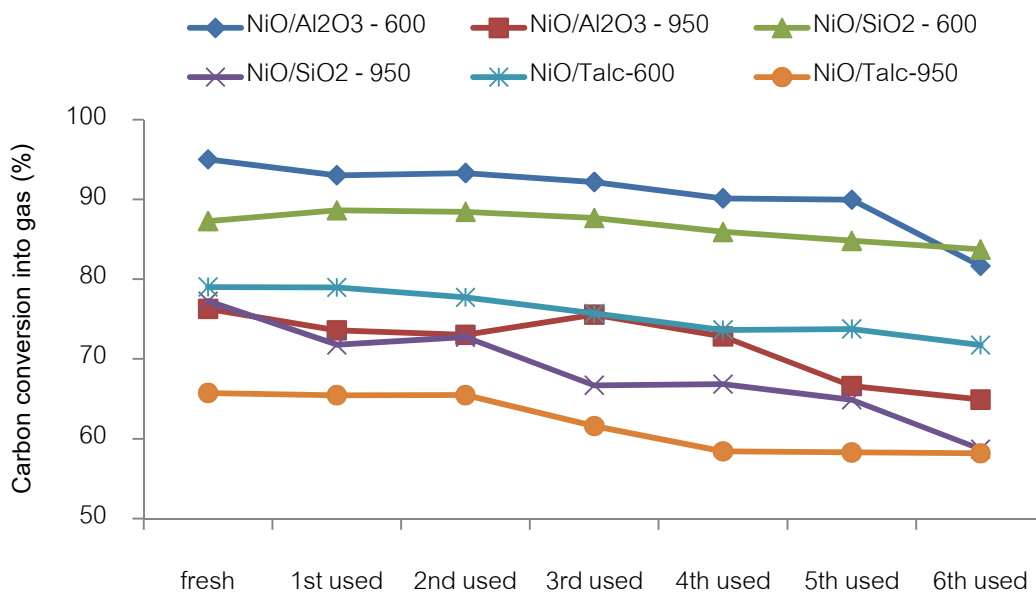
พิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลอง 6 ครั้ง พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 87.27 เป็น 83.72 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2

- 600 และลดลงจาก 77.24 เป็น 58.71 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ - 950 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้ง ด้วยเทคนิค XRD ดังภาพที่ 4.29 พบว่า รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้ครั้งที่ 6 มีความเข้มของพีคที่แสดงถึงพีค NiO และ SiO₂ เพิ่มสูงขึ้น ทั้งในกรณี NiO/SiO₂ - 600 และ NiO/SiO₂ - 950 แสดงให้เห็นว่าหลังการทดลองครั้งที่ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ เกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการหลอมรวมตัวขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์และการเกิดจัดเรียงตัวของโครงสร้าง SiO₂ ให้มีความเป็นผลึกมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทดลองด้วยเทคนิค TPR แสดงดังภาพที่ 4.30 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂ หลังการทดลองครั้งที่ 6 แสดงคุณสมบัติในการรีดักชันที่เปลี่ยนแปลงจากประมาณ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่สูงขึ้น (ประมาณ 600 หรือ 700 องศาเซลเซียส) อีกทั้งพีค TPR มีความเข้มที่ต่ำลงและกว้างขึ้น แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการรีดักชันได้ต่ำลง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาลดลงนั่นเอง

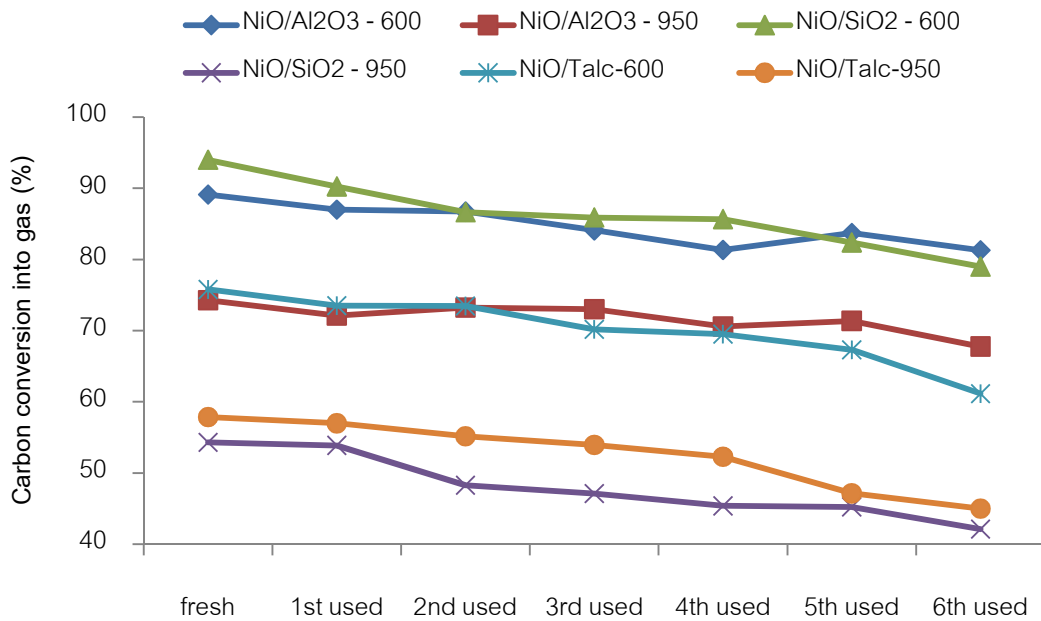
การเพิ่มจำนวนการทดลองการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc - 600 และ NiO/Talc - 950 แสดงในภาพที่ 4.28 พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลอง 6 ครั้ง ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 79.02 เป็น 71.74 สำหรับ NiO/Talc - 600 และลดลงจาก 65.74 เป็น 58.18 สำหรับ NiO/Talc - 950 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกก่อนและหลังผ่านการทำปฏิกิริยาซ้ำ 6 ครั้งของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc - 600 ด้วยเทคนิค XRD พบว่า พีคองค์ประกอบของ Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยาหายไปกลายเป็นพีค SiO₂ ที่ $2\theta = 20.4^\circ$ และ 27.7° และพีค MgSiO₃ ที่ $2\theta = 31.1^\circ$, 33.5° และ 37.4° อีกทั้งยังพบพีคของ NiO กับพีค MgO ปรากฏอยู่ใกล้เคียงกันที่ตำแหน่ง $2\theta = 43.4^\circ$ และ 63.02° จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kong et.al., 2011) กล่าวว่า NiO กับ MgO สามารถเกิดอันตรกิริยากันกลายเป็นองค์ประกอบเชิงซ้อน NiO-MgO ซึ่งตรวจหาได้ยากจากเทคนิค XRD สำหรับผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ก่อนและหลังการทดลองด้วยเทคนิค TPR จะกล่าวในส่วนของผลของเสถียรภาพในการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิโอสไตรีนต่อไป



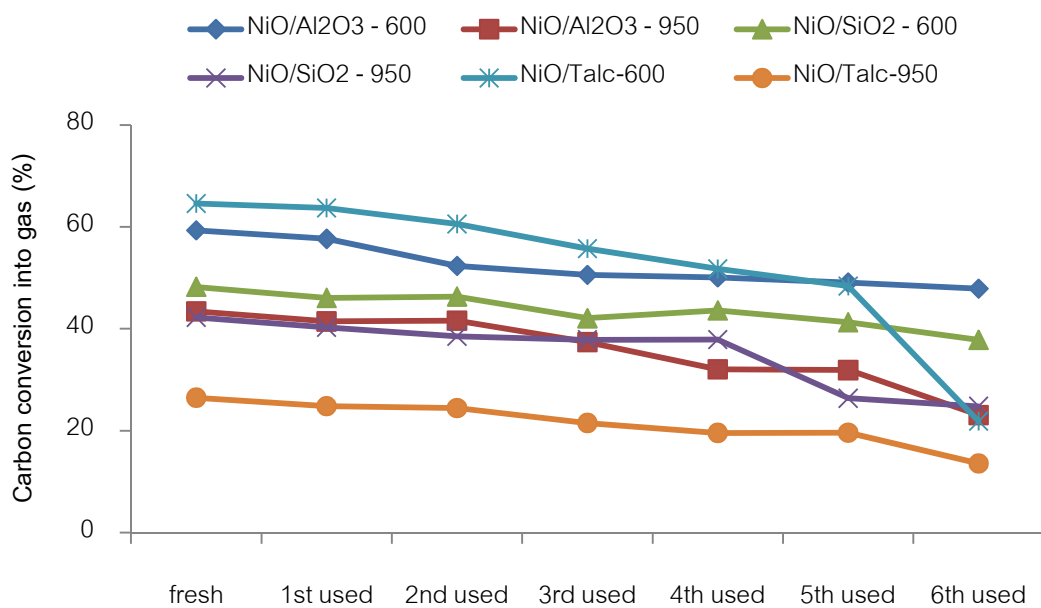
(a)



(b)

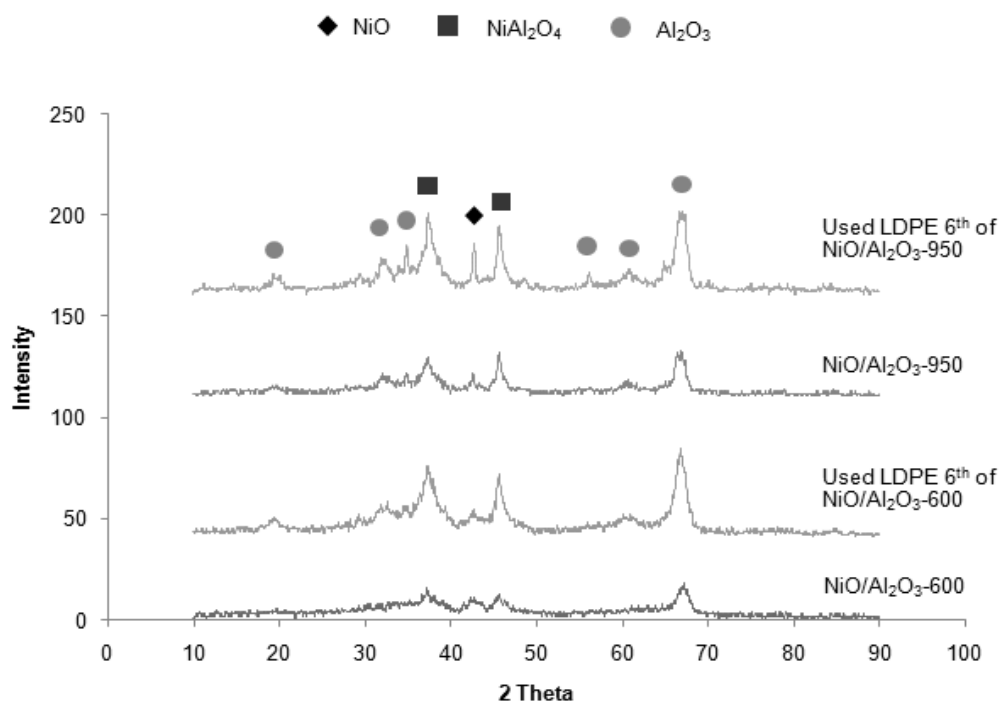


(c)

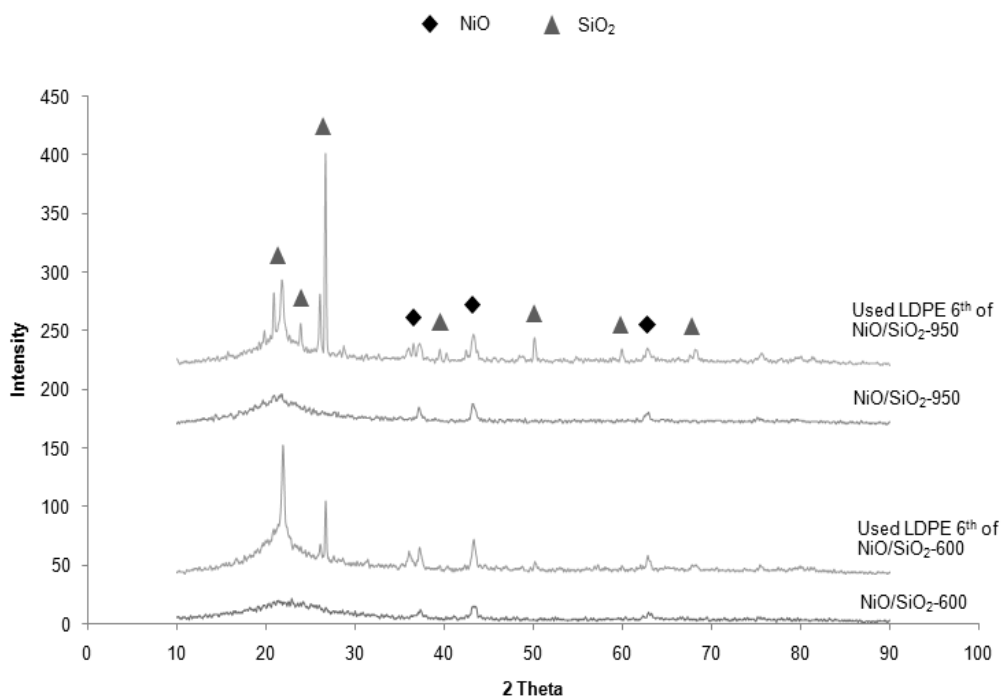


(d)

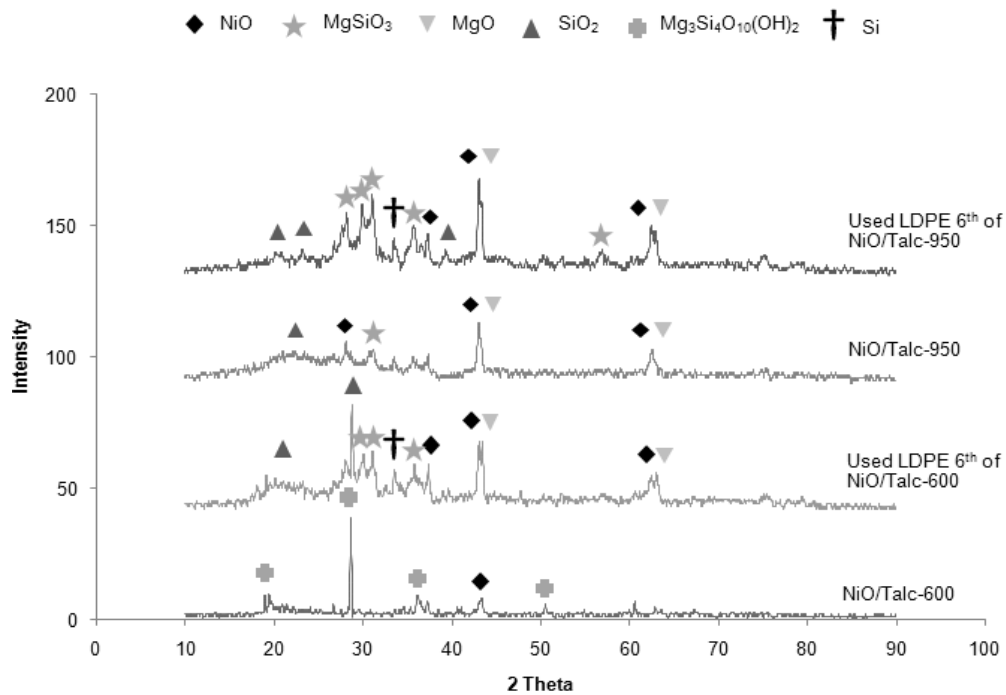
ภาพที่ 4.28 ผลเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ (a) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), (b) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), (c) พอลิพรอพิลีน (PP) และ (d) พอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที



(a)

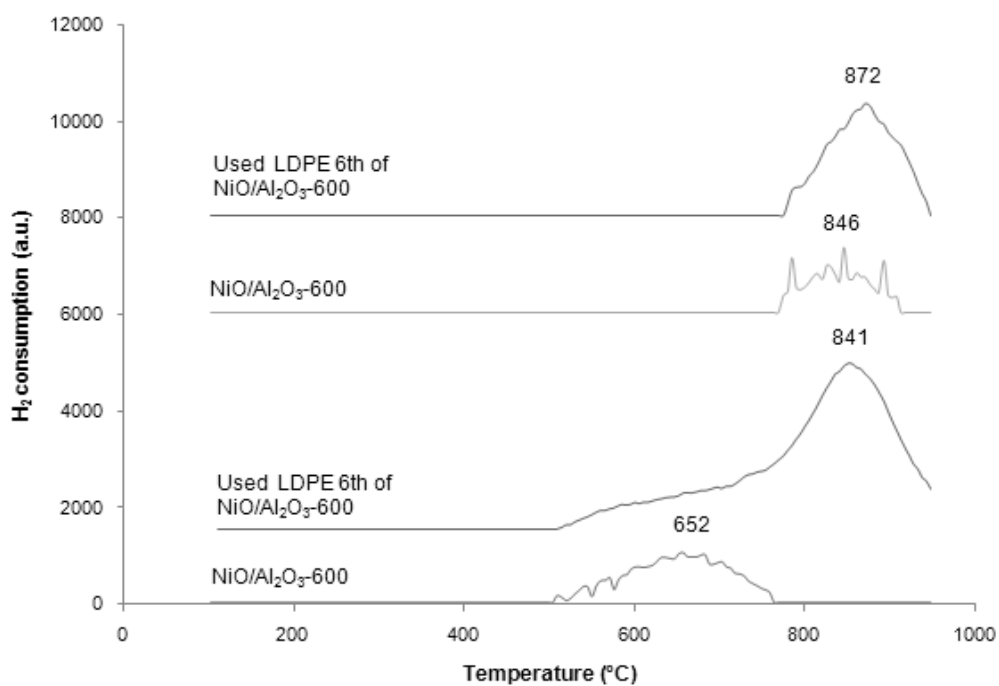


(b)

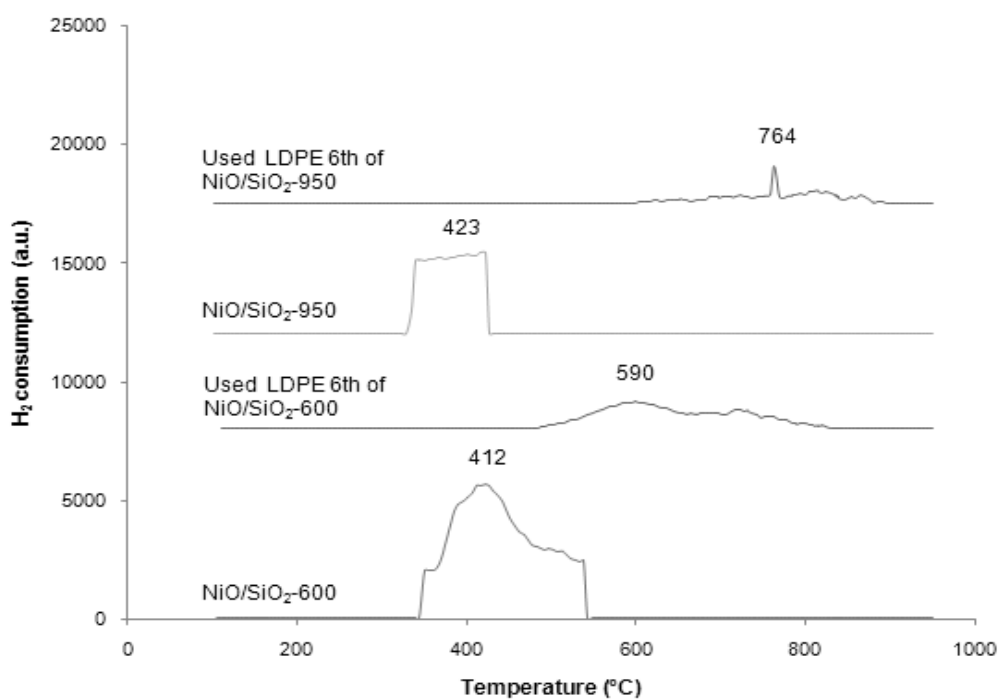


(c)

ภาพที่ 4.29 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al₂O₃, (b) NiO/SiO₂ และ (c) NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊ส ออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที



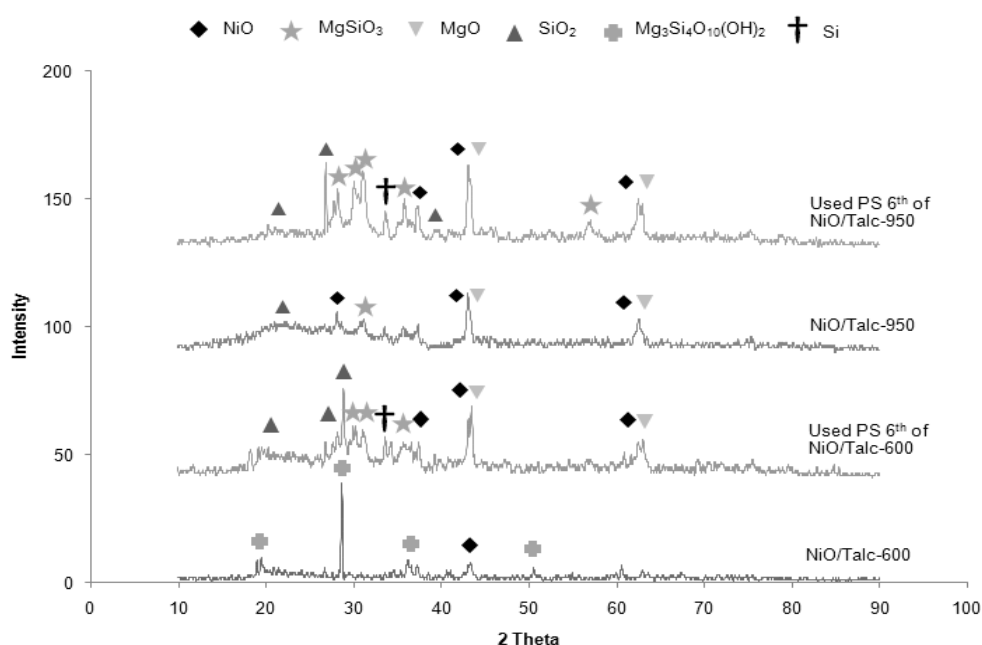
(a)



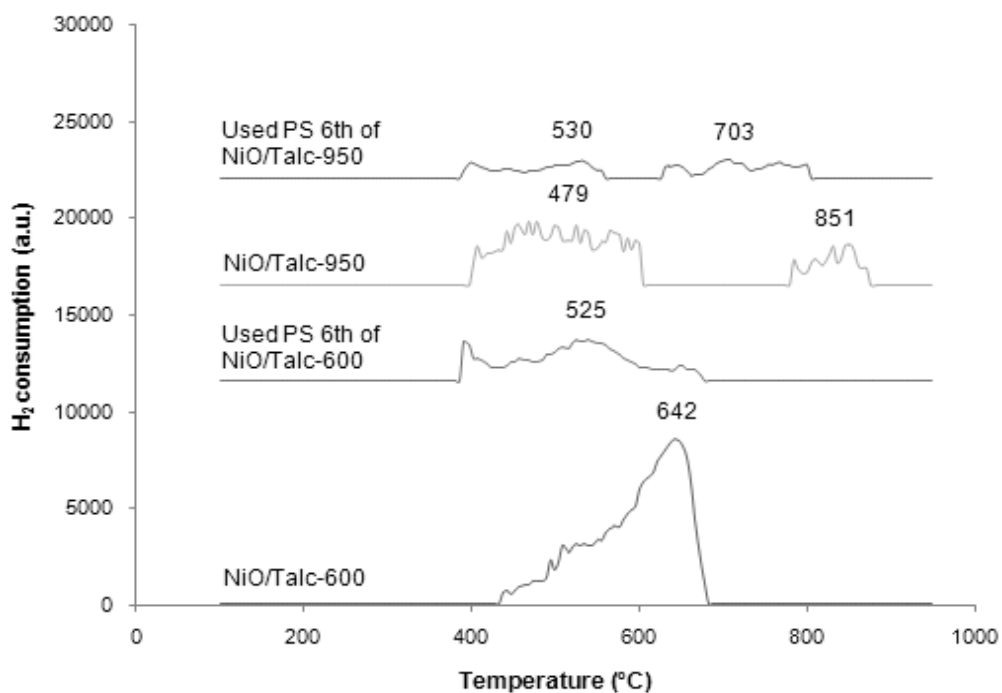
(b)

ภาพที่ 4.30 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) NiO/Al₂O₃ และ (b) NiO/SiO₂ ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

สำหรับผลการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำเป็น 6 ครั้ง พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในแนวทางเดียวกันกับผลของเสถียรภาพในการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเฉพาะการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิสไตรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc - 600 เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำเป็น 6 ครั้ง พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงไปอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกก่อนและหลังผ่านการทำปฏิกิริยาซ้ำ 6 ครั้ง ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ด้วยเทคนิค XRD ดังภาพที่ 4.31 พบว่า มีรูปแบบ XRD ของฟีดคอน์ประกอบแต่ละตัว ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับผลของตัวเร่ง NiO/Talc หลังผ่านการทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc - 600 ก่อนและหลังการทดลองด้วยเทคนิค TPR ดังภาพที่ 4.32 พบว่า มีความสามารถในการรีดักชันได้ต่ำลงอย่างมาก



ภาพที่ 4.31 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.32 รูปแบบ TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ก่อนและหลังกระบวนการแกซีฟิเคชัน พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (PS) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับต่างๆ

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุด โดยองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และปฏิกิริยา Water gas

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุด โดยองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์สูง เนื่องจากช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทน

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงสุด โดยองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เนื่องจากช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยาออกซิเดชัน

5.1.2 ผลของชนิดพลาสติก

การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ พบว่า จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สเอทิลีนสูง เนื่องจากพันธะ C-C ในโครงสร้างเป็นพันธะที่อ่อนที่สุด จึงสามารถเกิดการแตกออกของพันธะได้ง่าย ทำให้จัดเรียงตัวในรูปที่เสถียร คือ แก๊สเอทิลีน

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุด องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ พบว่า จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เนื่องจากโครงสร้างมีหมู่ $-\text{CH}_3$ ที่เกาะกับสายโซ่ของพอลิเอทิลีน ซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ ทำให้ขจัดออกได้ง่าย แล้วเกิดเป็นแก๊สมีเทน)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc พบว่า การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นสูงสุด องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ พบว่า จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สเอทิลีนสูง

5.1.3 ผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์จาก 600 เป็น 950 องศาเซลเซียส การแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน พบว่าจะแสดงผลเชิงลบต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดต่ำลง อีกทั้งมีองค์ประกอบของนิกเกิลอะลูมินेट (NiAl_2O_4) ที่มากขึ้น จึงทำให้มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำลง ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ที่มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง และตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc พบว่า $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ กลายเป็น MgO ที่สามารถ

เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งกับนิกเกิลออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการรีดักชันของนิกเกิลออกไซด์มีค่าต่ำลง

5.1.4 เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำเป็นจำนวน 6 ครั้งในการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสำหรับกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพจากการหลอมรวมตัวขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์ อีกทั้งสนับสนุนการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิกเกิลและอะลูมินา เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO_2 ที่เกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการหลอมรวมตัวขององค์ประกอบนิกเกิลออกไซด์และการเกิดจัดเรียงตัวของโครงสร้าง SiO_2 ให้มีความเป็นผลึกมากขึ้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc ผลึกของ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ กลายเป็น MgO ที่สามารถเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งระหว่างนิกเกิลออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการรีดักชันของนิกเกิลออกไซด์มีค่าต่ำลง ในขณะที่ผลการแกซีฟิเคชันพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน เมื่อเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำเป็น 6 ครั้ง พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงกระบวนการโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ เช่น ฟลูอิดไธด์เบด ฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้
2. ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลด้วยโลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น ซีเรียออกไซด์ เป็นต้น
3. ควรมีระบบในการดักจับทาร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของทาร์ที่ได้จากการทดลอง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกัมมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

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

ปรารงค์เนตร เฟื่องฟูง. แก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค 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 เรืองพรวิสุทธิ. คະຕະໂລໂສໂສບບເສທເທອໂຣຈີເນຍສ. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

วิจารณ์ บุญอำนาจวิทยา. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกกรีไซเคิล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : 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 [2552, กันยายน 7].

สุธาร์ตน์ พัวเจริญ. การรีฟอร์มด้วยไอน้ำของโทลูอีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนทัลค์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.

สุภชิตา เกริกไกววัล. แก๊สสังเคราะห์จากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของทะเลลายปาล์มน้ำมัน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.

เอกพร แจ่มกระจ่าง. แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนของพลาสติกผสมในเครื่องปฏิกรณ์เบด

นิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.

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.

Cheng, Z.; Wu, Q.; Li, W.; Li, J. and Zhu, Q. Effects of promoters and preparation procedures on reforming of methane with carbon dioxide over Ni/Al₂O₃ catalyst. Catalysis Today 30 (1998): 147-155.

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.

Roh H.S., Dong W.S., Jun K.W., Liu Z.W., Park S.E. and Oh Y.S. Partial Oxidation of Methane over Ni/SiO₂. Bull. Korean Chem. Soc. 23 (2002): 669-673.

- 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.
- Kong, M., Fei, J., Wang, S., Lu, W. and Zheng, X. Influence of supports on catalytic behavior of nickel catalysts in carbon dioxide reforming of toluene as a model compound of tar from biomass gasification. Bioresource Technology 102 (2011): 2004-2008.
- 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.
- 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.
- Siddiqui, M.N. and Redhwi, H.H. Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products. Fuel Processing Technology 90 (2009): 545-552.
- Swierczynski, D., Libs, S., Courson, C. and Kienemann, A. Steam reforming of tar from a biomass gasification process over Ni/olivine catalyst using toluene as a model compound. Applied Catalyst B: Environmental 74 (2007): 211-222.

- 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/CeO₂/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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติของพลาสติก

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

ตาราง ก1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของพลาสติก (ปรารักษ์เนตร, 2550)

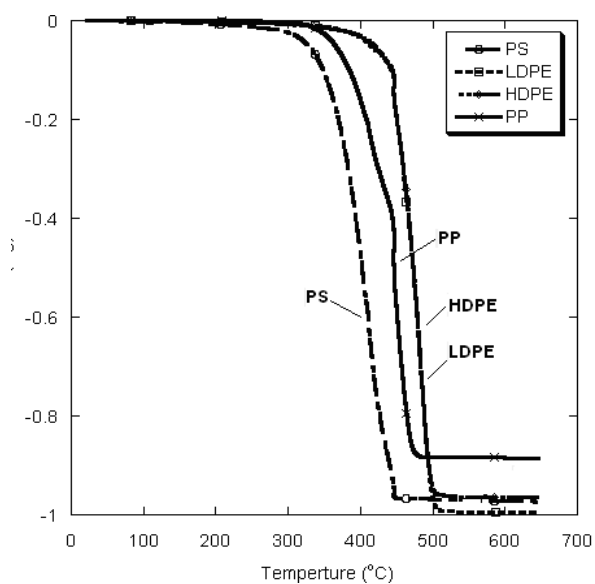
ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
PS	-	99.8	0.2
LDPE	-	100	-
HDPE	-	100	-
PP	-	100	-

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

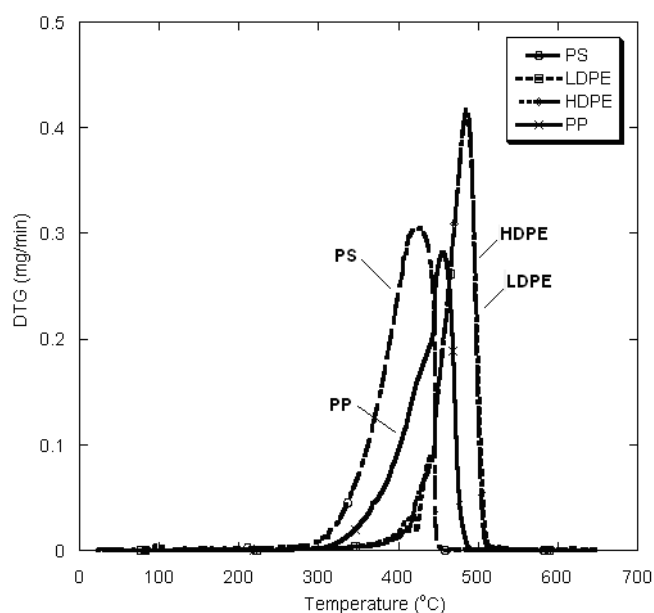
ตาราง ก2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก (ปรารักษ์เนตร, 2550)

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



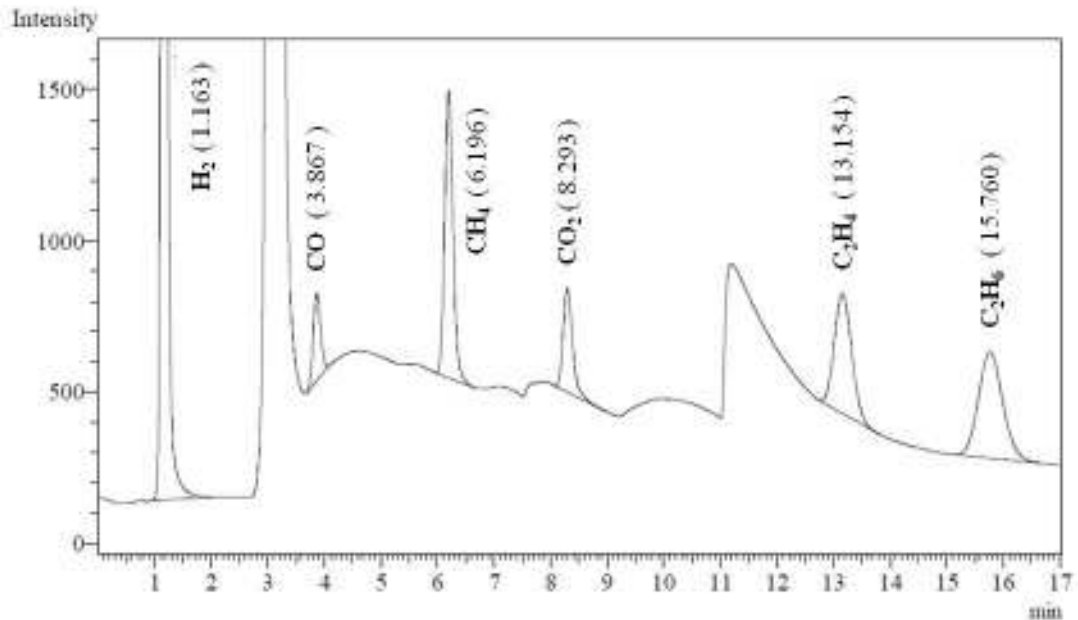
ภาพ ก1 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนแก่พลาสติก
ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที
และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ปรารงค์เนตร, 2550)



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

ภาคผนวก ข

การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด



ภาพ ข1 โครมาโทแกรมของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard)

ตาราง ข1 ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard)

ตัวมาตรฐาน	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				% balance in N ₂
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
H ₂	38812.9	38898	38632.6	38781.17	1.00
CO	2036.7	1969.2	1943.2	1983.033	1.00
CH ₄	7219.1	7559.9	7540.4	7439.8	1.00
CO ₂	1743.1	3312.5	3198.4	2751.333	1.00
C ₂ H ₄	6164	6341.9	6374.2	6293.367	1.00
C ₂ H ₆	7808.1	7953.9	7975.2	7912.4	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 ข2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

(ก) ถุงที่ 1 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				%	mmol/g _{sample}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂	177606.7	158406.5	179359.3	171790.83	4.43	18.06
CO	4047.3	3683.2	3707.8	3812.77	1.92	7.84
CH ₄	14893.2	14779.2	14805.3	14825.9	1.99	8.13
CO ₂	3582	4537.1	3477.2	3865.43	1.40	5.73
C ₂ H ₄	12989.3	14254	14815.6	14019.63	2.23	9.08
C ₂ H ₆	1657	1831	1661.1	1716.37	0.22	0.88

(ข) ถุงที่ 2 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				%	mmol/g _{sample}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂	17151.6	15371	17135.6	16552.73	0.43	1.74
CO	172.6	138.3	147.1	152.67	0.08	0.31
CH ₄	1316.2	1130.5	1262	1236.23	0.17	0.68
CO ₂	2942.5	2210.8	1968.3	2373.87	0.86	3.52
C ₂ H ₄	3102.5	2786.4	2776.5	2888.47	0.46	1.87
C ₂ H ₆	246.3	200.9	183.3	210.17	0.03	0.11

(ค) ถูที่ 3 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				%	mmol/g _{sample}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂	788.8	675.2	817.1	760.37	0.02	0.08
CO	0	0	0	0	0	0
CH ₄	27.7	17.9	43.7	29.77	0.004	0.02
CO ₂	527.2	318.1	1275.6	706.97	0.26	1.05
C ₂ H ₄	87.4	90.3	83.3	87	0.01	0.06
C ₂ H ₆	0	0	0	0	0	0

(ง) ถูที่ 4 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				%	mmol/g _{sample}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂	82.1	141.1	83.7	102.3	0.003	0.01
CO	0	0	0	0	0	0
CH ₄	0	0	0	0	0	0
CO ₂	198.8	115.5	160.4	158.23	0.06	0.23
C ₂ H ₄	0	0	0	0	0	0
C ₂ H ₆	0	0	0	0	0	0

(จ) ถูที่ 5 ใช้เวลาในการเก็บ 10 นาที

องค์ประกอบ แก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ (area)				%	mmol/g _{sample}
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂	39	32.4	36.7	36.03	0.00	0.004
CO	0	0	0	0	0.00	0.00
CH ₄	0	0	0	0	0.00	0.00
CO ₂	0	0	0	0	0.00	0.00
C ₂ H ₄	0	0	0	0	0.00	0.00
C ₂ H ₆	0	0	0	0	0.00	0.00

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

องค์ประกอบแก๊ส	mmol/g _{sample}
H ₂	19.89
CO	8.15
CH ₄	8.83
CO ₂	10.53
C ₂ H ₄	11.01
C ₂ H ₆	0.99

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในพลาสติก (Carbon conversion)

ตัวอย่างเช่น แกซีพีเคชั่น พอลิสไตรีน (PS) หนัก 0.1003 กรัม ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อย
ละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

น้ำหนักพลาสติก 0.1003 กรัม

ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนในพลาสติก (พอลิสไตรีน) เท่ากับ 92

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในพลาสติก (พอลิสไตรีน) เท่ากับ

$$0.1003 \times \frac{92}{100} = 0.09 \text{ กรัม}$$

ตาราง ค1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่ได้จากการแกซีพีเคชั่นพอลิสไตรีน

องค์ประกอบแก๊ส	mmol
H ₂	1.2
CO	1.7
CH ₄	0.5
CO ₂	0.6
C ₂ H ₄	0.08
C ₂ H ₆	0.03

คาร์บอนในแก๊ส CO เท่ากับ $1.7 \times \frac{12}{1000} = 0.02 \text{ กรัม}$

คาร์บอนในแก๊ส CO₂ เท่ากับ $0.6 \times \frac{12}{1000} = 0.01 \text{ กรัม}$

คาร์บอนในแก๊ส CH₄ เท่ากับ $0.5 \times \frac{12}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส } C_2H_4 \text{ เท่ากับ } 0.08 \times \frac{24}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส } C_2H_6 \text{ เท่ากับ } 0.03 \times \frac{24}{1000} = 0.00 \text{ กรัม}$$

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ($CO + CO_2 + CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6$) เท่ากับ 0.03 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น น้ำหนักคาร์บอนในทาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในพลาสติก} - \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส} \\ &= 0.09 - 0.03 \text{ กรัม} \\ &= 0.06 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนในแก๊ส เท่ากับ } \frac{0.03}{0.09} \times 100 = 33.33$$

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนในทาร์ เท่ากับ } \frac{0.06}{0.09} \times 100 = 66.67$$

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ง1 ข้อมูลการทดลองแก๊สฟิเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)			ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	6.23	5.93	6.08	54.88	45.12
	CO	3.38	1.51	2.44		
	CH ₄	10.11	9.58	9.84		
	CO ₂	1.17	1.44	1.31		
	C ₂ H ₄	11.80	12.58	12.19		
	C ₂ H ₆	0.47	0.60	0.54		
LDPE	H ₂	4.68	5.03	4.86	53.47	46.53
	CO	0.88	0.71	0.79		
	CH ₄	8.94	10.31	9.62		
	CO ₂	1.30	2.02	1.66		
	C ₂ H ₄	12.63	11.85	12.24		
	C ₂ H ₆	0.78	0.79	0.78		
PP	H ₂	5.52	5.10	5.31	43.22	56.78
	CO	0.26	0.36	0.31		
	CH ₄	13.39	13.15	13.27		
	CO ₂	1.67	0.97	1.32		
	C ₂ H ₄	7.06	7.55	7.31		
	C ₂ H ₆	0.54	0.64	0.59		
PS	H ₂	3.34	3.03	3.19	12.33	87.67
	CO	1.84	1.78	1.81		
	CH ₄	1.50	1.57	1.53		
	CO ₂	3.90	3.08	3.49		
	C ₂ H ₄	1.24	1.35	1.30		
	C ₂ H ₆	0.03	0.00	0.01		

ตาราง ง2 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-600

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	47.22	53.55	46.81	49.20	96.06	3.94
	CO	25.50	25.11	22.73	24.45		
	CH ₄	9.48	10.37	10.98	10.28		
	CO ₂	14.42	14.63	13.55	14.20		
	C ₂ H ₄	6.86	8.28	8.29	8.25		
	C ₂ H ₆	1.29	1.51	1.62	1.47		
LDPE	H ₂	52.54	56.48	57.06	55.36	96.20	3.80
	CO	31.47	31.21	32.29	31.66		
	CH ₄	7.64	7.88	7.41	7.64		
	CO ₂	9.72	9.32	9.83	9.62		
	C ₂ H ₄	7.16	9.66	8.55	8.46		
	C ₂ H ₆	1.06	1.64	1.42	1.38		
PP	H ₂	38.85	37.59	44.11	40.18	84.25	15.75
	CO	19.66	16.69	20.21	18.85		
	CH ₄	10.55	11.95	13.89	12.13		
	CO ₂	11.03	14.38	17.48	14.30		
	C ₂ H ₄	5.57	6.23	7.08	6.29		
	C ₂ H ₆	0.82	0.92	1.17	0.97		
PS	H ₂	27.36	27.30	29.25	27.97	47.79	52.21
	CO	12.49	17.69	13.44	14.54		
	CH ₄	1.71	1.27	1.76	1.58		
	CO ₂	19.07	14.54	19.64	17.75		
	C ₂ H ₄	1.53	1.00	1.41	1.31		
	C ₂ H ₆	0.07	0.06	0.08	0.07		

ตาราง ง3 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂-600

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	30.90	27.36	32.90	30.37	82.88	17.12
	CO	19.22	18.70	24.29	20.74		
	CH ₄	6.71	6.60	6.63	6.65		
	CO ₂	16.25	10.76	12.34	13.12		
	C ₂ H ₄	8.04	9.42	7.60	8.35		
	C ₂ H ₆	0.99	0.76	0.91	0.89		
LDPE	H ₂	35.89	37.43	42.21	38.51	87.32	12.68
	CO	20.66	25.28	25.73	23.89		
	CH ₄	7.59	6.13	6.63	6.79		
	CO ₂	10.18	15.89	19.33	15.13		
	C ₂ H ₄	8.66	7.23	5.69	7.20		
	C ₂ H ₆	1.11	0.97	1.01	1.03		
PP	H ₂	45.05	44.59	43.58	44.41	91.31	8.69
	CO	29.57	26.51	27.58	27.89		
	CH ₄	8.74	8.23	8.24	8.40		
	CO ₂	20.64	18.27	22.53	20.48		
	C ₂ H ₄	3.35	3.64	2.83	3.27		
	C ₂ H ₆	0.76	0.73	0.77	0.75		
PS	H ₂	23.40	21.25	28.16	24.27	47.07	52.93
	CO	26.46	26.28	28.42	27.05		
	CH ₄	0.83	0.59	0.77	0.73		
	CO ₂	8.97	8.53	9.79	9.10		
	C ₂ H ₄	1.05	0.96	0.72	0.91		
	C ₂ H ₆	0.06	0.02	0.00	0.03		

ตาราง ง4 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-600

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	46.72	46.27	46.72	46.57	78.94	21.06
	CO	19.47	19.01	22.04	20.18		
	CH ₄	5.63	6.14	5.44	5.74		
	CO ₂	20.69	17.13	20.97	19.60		
	C ₂ H ₄	3.86	5.61	4.08	4.52		
	C ₂ H ₆	0.85	0.80	0.80	0.82		
LDPE	H ₂	41.65	43.56	49.64	44.95	80.73	19.27
	CO	21.25	18.21	23.22	20.89		
	CH ₄	5.97	5.79	5.08	5.61		
	CO ₂	17.29	20.86	22.78	20.31		
	C ₂ H ₄	5.02	5.28	3.51	4.61		
	C ₂ H ₆	0.85	0.80	0.80	0.82		
PP	H ₂	37.59	46.10	42.78	42.15	75.77	24.23
	CO	19.89	18.30	17.00	18.40		
	CH ₄	7.27	7.40	7.14	7.27		
	CO ₂	19.00	21.60	20.20	20.27		
	C ₂ H ₄	3.50	3.29	3.37	3.39		
	C ₂ H ₆	0.56	0.51	0.55	0.54		
PS	H ₂	30.82	31.83	31.37	31.34	61.53	38.47
	CO	21.62	21.86	23.15	22.21		
	CH ₄	0.74	0.73	0.82	0.76		
	CO ₂	23.04	20.56	24.73	22.78		
	C ₂ H ₄	0.79	0.79	0.38	0.65		
	C ₂ H ₆	0.07	0.06	0.03	0.05		

ตาราง 5 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชันพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-950

พลาสติก	องค์ประกอบแก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	22.57	20.12	20.59	21.09	73.90	26.10
	CO	8.94	8.09	7.94	8.32		
	CH ₄	9.04	8.86	8.65	8.85		
	CO ₂	11.50	11.16	11.13	11.26		
	C ₂ H ₄	10.65	11.27	11.31	11.08		
	C ₂ H ₆	0.10	1.07	0.94	1.00		
LDPE	H ₂	20.40	21.51	20.55	20.82	76.72	23.28
	CO	8.62	6.79	14.35	9.92		
	CH ₄	8.45	8.54	10.73	9.24		
	CO ₂	10.85	12.10	14.20	12.38		
	C ₂ H ₄	10.09	10.67	10.49	10.41		
	C ₂ H ₆	1.10	1.00	1.40	1.16		
PP	H ₂	26.88	27.99	27.82	27.56	74.27	25.73
	CO	11.07	10.51	10.26	10.61		
	CH ₄	10.41	10.96	9.42	10.26		
	CO ₂	12.35	11.61	15.02	12.99		
	C ₂ H ₄	6.72	6.61	4.78	6.03		
	C ₂ H ₆	0.69	0.82	0.68	0.73		
PS	H ₂	19.14	21.95	23.16	21.42	42.38	57.62
	CO	11.39	13.17	11.15	11.90		
	CH ₄	1.07	1.26	1.33	1.22		
	CO ₂	13.49	18.92	19.09	17.17		
	C ₂ H ₄	1.05	1.00	1.08	1.04		
	C ₂ H ₆	0.05	0.06	0.06	0.06		

ตาราง ง6 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/SiO₂-950

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	27.78	28.02	29.35	28.38	77.52	22.48
	CO	13.81	16.22	18.08	16.04		
	CH ₄	7.43	7.03	6.98	7.15		
	CO ₂	13.86	9.71	8.92	10.83		
	C ₂ H ₄	9.61	9.52	9.67	9.60		
	C ₂ H ₆	1.01	0.97	0.95	0.98		
LDPE	H ₂	17.17	15.84	19.09	17.37	71.78	28.22
	CO	9.02	10.73	11.55	10.43		
	CH ₄	7.98	8.54	8.04	8.19		
	CO ₂	9.63	8.21	8.22	8.69		
	C ₂ H ₄	10.91	11.18	10.73	10.94		
	C ₂ H ₆	0.98	0.99	1.02	1.00		
PP	H ₂	15.69	16.50	16.29	16.16	62.35	37.65
	CO	9.34	10.08	11.06	10.16		
	CH ₄	9.91	9.43	11.58	10.31		
	CO ₂	7.37	8.69	8.31	8.13		
	C ₂ H ₄	6.95	6.88	7.41	7.08		
	C ₂ H ₆	0.76	0.71	0.80	0.76		
PS	H ₂	15.33	17.60	11.33	14.76	34.75	65.25
	CO	12.88	12.89	9.34	11.71		
	CH ₄	0.79	0.77	0.99	0.85		
	CO ₂	12.02	11.28	11.05	11.45		
	C ₂ H ₄	1.35	1.17	1.33	1.28		
	C ₂ H ₆	0.00	0.05	0.06	0.04		

ตาราง ง7 ข้อมูลการทดลองแก๊สพีเคชั่นพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Talc-950

พลาสติก	องค์ประกอบ แก๊ส	สัดส่วนแก๊ส (mmol/g plastic)				ร้อยละการเปลี่ยนของ คาร์บอน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	เป็นแก๊ส	เป็นทาร์
HDPE	H ₂	8.98	13.26	6.53	9.59	56.38	43.62
	CO	3.01	3.15	1.24	2.47		
	CH ₄	8.62	7.33	8.32	8.09		
	CO ₂	5.42	8.59	3.74	5.92		
	C ₂ H ₄	11.09	10.46	11.46	11.01		
	C ₂ H ₆	0.79	0.82	0.85	0.82		
LDPE	H ₂	24.42	18.90	16.52	19.95	65.15	34.85
	CO	7.49	5.45	4.21	5.72		
	CH ₄	6.94	7.80	7.32	7.36		
	CO ₂	15.30	12.81	12.18	13.43		
	C ₂ H ₄	8.27	9.18	9.04	8.83		
	C ₂ H ₆	1.04	1.20	1.19	1.14		
PP	H ₂	9.59	9.95	4.83	8.12	48.45	51.55
	CO	1.59	1.52	0.88	1.33		
	CH ₄	11.24	10.15	10.41	10.60		
	CO ₂	8.22	8.92	4.26	7.13		
	C ₂ H ₄	7.05	6.79	6.94	6.93		
	C ₂ H ₆	0.76	0.81	0.65	0.74		
PS	H ₂	3.48	2.82	2.59	2.96	11.64	88.36
	CO	1.43	1.07	0.80	1.10		
	CH ₄	1.12	0.85	0.83	0.93		
	CO ₂	4.86	4.70	3.08	4.21		
	C ₂ H ₄	1.36	1.27	1.31	1.31		
	C ₂ H ₆	0.05	0.00	0.02	0.02		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรุ่งทิพย์ สิริमितตานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2552