

แกซีพีเคชั่นของพลาสติกโดยใช้ไฟโรไลซ์ซาร์จากชีวมวล



นางสาวคุณิตา ทองน้อย

ศูนย์วิทยพัทยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PLASTIC GASIFICATION USING PYROLYZED CHARS FROM BIOMASS



Miss Kunita Thongnoi

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

คุณิตา ทองน้อย : แกซีพีเคชันของพลาสติกโดยใช้ไพโรไลซ์ชาร์จากชีวมวล. (PLASTIC GASIFICATION USING PYROLYZED CHARs FROM BIOMASS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เลอสรวง เมฆสุด, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของถ่านไพโรไลซ์ชาร์จากชีวมวลต่อการแกซีพีเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร โดยพลาสติกที่นำมาศึกษา ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิสไตรีน (PS) ส่วนถ่านชาร์ที่นำมาศึกษามี 2 ชนิด คือ ถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสกะลาปาล์มและซังข้าวโพด นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับการใช้ถ่านกัมมันต์ วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากผลการทดลองพบว่าการใส่ถ่านชาร์ร่วมกับพลาสติกทำให้ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลงผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากถ่านชาร์จะไปกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใส่ถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นแก๊สมากที่สุด รองลงมาถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพดตามลำดับ โดยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.4 16.0 และ 11.9 โดยโมลตามลำดับ ในกรณีที่ใช้พอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ชนิดของพลาสติกยังมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยในกรณีที่ใช้กับถ่านชาร์จากกะลาปาล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 17.3 รองลงมาพอลิโพรพิลีนร้อยละ 16 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 14.5 และพอลิสไตรีนน้อยที่สุดร้อยละ 8.3 ตามลำดับ เนื่องจากพอลิสไตรีนมีโครงสร้างที่มีหมู่เบนซีนเกาะอยู่ทำให้แตกตัวได้ยากกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่กิ่งและพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่ตรง

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อนิสิต.....คุณิตา ทองน้อย.....
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4972239523: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : GASIFICATION / PLASTIC / CHAR

KUNITA THONGNOI : THESIS TITLE. PLASTIC GASIFICATION USING
PYROLYZED CHARS FROM BIOMASS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.
LURSUANG MEKASUT, Dr. Ing., THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF. PRAPAN
KUCHONTHARA, Ph.D., 97 pp.

This research studied the effect of pyrolyzed chars from biomass on steam gasification of plastic in fixed bed reactor. The plastics that were used in this experiment consists of polypropylene (PP) high polyethylene (HDPE) low polyethylene (LDPE) and polystyrene (PS). The chars produced from pyrolysis of palm shell and corncorb were used and activated carbon was also employed for comparison. The production gases were analyzed by gas chromatography. The results analyzed showed that the enhancing of gas production and reducing of tar was observed with the presence of char. It can be explained that char could perform as a catalyst for the reaction of hydrocarbon and tar cracking in this process. The carbon conversion of polypropylene into gas in case of using activated carbon, palm-shell char, and corncob char were 17, 16, and 12 respectively. The types of plastic also affected on the percentage of carbon conversion into gas. Using palm-shell char, the carbon conversion into gas of high polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), low polyethylene (LDPE) and polystyrene (PS) were 17, 16, 15 and 8 respectively. This is due to the presence of benzene in the PS structure causing more difficult cracking than the others.

Department :Chemical Technology.... Student's Signature : *Kunita Thongnoi*.....
Field of Study :Chemical Technology.... Advisor's Signature : *L. S.*.....
Academic Year :2009..... Co-advisor's Signature: *Prapan Kuchonthara*.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชฌาธา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาใช้เวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัย รวมทั้งให้การอบรมสั่งสอนด้านวิชาการตลอดมา

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advance Materials) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณสุรัตน์ พุทธา และคุณสุภชิตา เกริกไกวล์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติก.....	4
2.2 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน.....	12
2.3 หลักการแปรรูปพลาสติก.....	16
2.4 กระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	17
2.5 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	25
2.6 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส.....	25
2.7 การทำแก๊สให้สะอาด.....	26
2.8 ถ่านชาร์.....	29
2.9 ถ่านกัมมันต์.....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	41
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	46
3.3 วิธีการทดลอง.....	46

บทที่		หน้า
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	50
	4.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์.....	50
	4.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและถ่านชาร์.....	51
	4.3 สมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์.....	52
	4.4 แก๊สฟิวเคชั่นของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	53
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
	รายการอ้างอิง.....	78
	ภาคผนวก.....	81
	ภาคผนวก ก.....	82
	ภาคผนวก ข.....	86
	ภาคผนวก ค.....	88
	ภาคผนวก ง.....	90
	ภาคผนวก จ.....	93
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ณ

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต	6
2.2 ชนิด สูตรโครงสร้าง คุณสมบัติการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (T_m).....	11
2.3 สิ่งเจือปนในแก๊สและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด.....	27
2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชาร์และการนำไปใช้ประโยชน์.....	30
2.5 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ.....	35
3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	44
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของชีวมวลและถ่านชาร์.....	51
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์.....	52
4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET surface area) ของสารตัวอย่าง.....	53
4.4 ผลของการเปรียบเทียบใส่และไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	73
ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard).....	90
ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง.....	90
จ1 ข้อมูลการทดลองในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	93

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ญ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 พลาสติก.....	7
2.2 โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตและสัญลักษณ์.....	8
2.3 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์.....	8
2.4 โพลีไวนิลคลอไรด์และสัญลักษณ์.....	9
2.5 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์.....	9
2.6 โพลีโพรพิลีนและสัญลักษณ์.....	10
2.7 โพลีสไตรีนและสัญลักษณ์.....	10
2.8 พลาสติกอื่นๆและสัญลักษณ์.....	11
2.9 แผนผังแสดงประเภทของการรีไซเคิล.....	15
2.10 ปฏิกริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซีฟิเคชัน.....	17
2.11 เครื่องแกซีฟายแบบต่าง ๆ.....	26
2.12 การดูดซับ (Adsorption) ที่รูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	34
3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	42
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	43
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph).....	43
3.4 เครื่อง CHN Analyzer.....	46
4.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์.....	51
4.2 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดย ไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	54
4.3 ผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการ แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	55
4.4 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอน มอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ จากแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร	56

ภาพประกอบที่	หน้า
4.5 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มจากแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร	58
4.6 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์จากซังข้าวโพดจากแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	59
4.7 ผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	61
4.8 ผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.	62
4.9 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียสอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	64
4.10 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	65
4.11 กลไกการแตกตัวของพอลิเอทิลีน.....	66
4.12 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) แก๊สมีเทน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	68
4.13 ผลของชนิดถ่านชาร์ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	70

ภาพประกอบที่	หน้า
4.14 ผลของชนิดถ่านชาร์ตต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	71
4.15 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์ตจากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	72
4.16 ผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์ตจากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร.....	73
4.17 อิทธิพลของชนิดถ่านชาร์ตที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จากกระบวนการแกซีฟิเคชันร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรนาที่.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันมนุษย์มีการใช้พลาสติกเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการขยายตัวของเมืองและการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรรมากรบริโภคของประชากร เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดีที่สามารถปรับปรุงสมบัติให้เหมาะกับการใช้งานต่าง ๆ ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ทดแทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง เช่น ไม้ เหล็ก โดยพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพลาสติกทางความร้อน เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น พลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายยากจึงต้องใช้เวลายาวนานกว่าที่พลาสติกชิ้นหนึ่ง ๆ จะสลายหมด ดังนั้นการกำจัดขยะพลาสติกไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม แต่เดิมการกำจัดขยะพลาสติกจะนิยมกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ เผาเพื่อให้พลังงานและนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ปัญหาที่พบจากการกำจัดโดยการฝังกลบ คือ ขยะพลาสติกจะใช้เนื้อที่ในการฝังกลบมาก อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยจะเกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องจักรที่ขนาดใหญ่จะกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแกซิฟิเคชันเนื่องจากประหยัดพลังงานและรักษาสีสิ่งแวดล้อม ในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้กระบวนการไพโรไลซิสแต่ยังมีปัญหาเมื่อทำการผลิตในปริมาณมากจะเกิดทาร์มากตามไปด้วย ซึ่งยากที่จะแก้ไขจึงมีข้อจำกัดในกระบวนการนี้ ส่วนกระบวนการแกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวให้เป็นแก๊สที่เหมาะสมในการใช้งานในทางโรงไฟฟ้า โรงงานเคมีหรือการขนส่งเชื้อเพลิง

กระบวนการแกซิฟิเคชันร่วม เป็นกระบวนการสันดาปร่วมของถ่านหิน ชีวมวลและพลาสติกเพื่อเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยมีการบ่อนอากาศหรือไอน้ำในปริมาณที่จำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการประกอบด้วยแก๊ส ทาร์และซาร์ ซึ่งแก๊สที่ได้นั้นประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัยและแนวโน้มในการเกิดแก๊สสังเคราะห์ โดยการนำถ่านซาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลรวมทั้งถ่านกัมมันต์มาใช้ในแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของพลาสติกชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Drop Tube Fixed Bed โดยถ่านซาร์ที่ได้จาก

กระบวนการ ไพโรไลซิสของชีวมวลและถ่านกัมมันต์ทำกระบวนการแกซีฟิเคชันร่วมกับพลาสติก คาดว่าจะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของถ่านชาร์ที่มีผลต่อการแตกตัวของทาร์
- 1.2.2 ศึกษาผลของชนิดชาร์จากชีวมวลที่มีผลต่อการแตกตัวของทาร์
- 1.2.3 ศึกษาผลของชนิดพลาสติกที่มีต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยใช้ชาร์จากชีวมวล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 ศึกษาผลของถ่านชาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Drop Tube Fixed Bed
- 1.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบและผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas-Chromatography)
- 1.3.4 ศึกษาการเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.3.5 ศึกษาชนิดและสมบัติของถ่านชาร์ต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแกซีฟิเคชันของพลาสติก
- 1.3.6 ศึกษาผลของชนิดพลาสติกต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแกซีฟิเคชันของ พลาสติก
- 1.3.6 วิจารณ์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต ห้องสมุด และฐานข้อมูลทางวารสารวิชาการต่างๆ
 - 1.4.1.1 แกซีฟิเคชัน
 - 1.4.1.2 วิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากพลาสติก
- 1.4.2 ศึกษาผลของถ่านชาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Drop Tube Fixed Bed
- 1.4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบและผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.4.4 จัดหาชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ ช้างข้าวโพด, กะลาปาล์ม, กะลามะพร้าว

- 1.4.5 ศึกษาการเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.4.6 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของพลาสติก
 - 1.4.6.1 การการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis): ASTM D3172
ได้แก่ ปริมาณความชื้น: ASTM D3173, ปริมาณสารระเหย: ASTM D3175, ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า: ASTM D3174
 - 1.4.6.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) : CHN analyzer ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน
- 1.4.7 หากาษาที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Drop Tube Fixed Bed ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 5 ตัวแปร
 - 1.4.7.1 ชนิดของพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน
 - 1.4.7.2 ชนิดของถ่านชาร์จากชีวมวล
 - 1.4.7.3 อุณหภูมิ 650-850 องศาเซลเซียส
- 1.4.8 วิเคราะห์ถ่านชาร์ก่อนและหลังการทดลอง โดยวิเคราะห์แบบ
 - 1.4.8.1 วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด (BET)
- 1.4.9 วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 แก๊สสังเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวต่อไป
- 1.5.2 เป็นแนวทางในการกำจัดขยะพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มคุณค่าเชิงพลังงานของพลาสติก
- 1.5.3 องค์ความรู้เกี่ยวกับอันตกิริยาระหว่างถ่านชาร์ ชีวมวลและพลาสติกในกระบวนการแกซิฟิเคชันร่วม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้นในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์ค้นเคยและใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้นี้ล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ

2.1.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของพลาสติก

พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพอลิไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ มีสมบัติอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนจึงทำให้สามารถหลอมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายหลายรูปแบบ และยังเป็นวัสดุเอนกประสงค์ที่มีประโยชน์สามารถใช้แทนวัสดุอื่นได้นานับประการ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีนและกำมะถัน เป็นต้น การศึกษาชนิดของพลาสติกทำได้โดยการตรวจสอบสมบัติบางประการ เช่น ความเหนียว ความแข็ง ความทนทานต่อการขีดข่วน ความหนาแน่น การละลาย และการเผาไหม้ เป็นต้น พลาสติกต่างชนิดกันย่อมมีสมบัติแตกต่างกัน และจะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์และละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น เฮกเซน (Hexane) โทลูอีน (Toluene) ไซลีน (Xylene)

2.1.2 ประเภทและการใช้งาน [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

หากแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อน เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

โพลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่โพลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดเนื่องจาก โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันไปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือโครงสร้างของโพลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปมากนัก พลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปโดยการฉีดขณะที่พลาสติกถูกทำให้อ่อนตัวและไหลได้ด้วยความร้อนและความดัน เข้าไปในแม่แบบที่มีช่องว่างเป็นรูปร่างตามต้องการ ภายหลังจากที่พลาสติกไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นตัวและถอดออกจากแม่พิมพ์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยการบด และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่พลาสติกประเภทนี้มีข้อเสียและขีดจำกัดของการใช้งาน คือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงไป ตัวอย่างเช่น ขวดน้ำดื่มไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุน้ำร้อนจัดหรือเดือด

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

โพลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห (Cross link) ซึ่งจะหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้โพลิเมอร์มีรูปร่างที่ถาวร ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก ได้สารที่ไม่มีสมบัติของความเป็นโพลิเมอร์ต่อไป การผลิตพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตจะแตกต่างจากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกคือ ขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันเพียงบางส่วน มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย และยังสามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ เมื่อผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการแล้ว ให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่เสถียรและแข็งแรง สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบโดยไม่ต้องรอให้เย็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในแม่พิมพ์ ดังนั้นการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมเซตกลับทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ต่างจากกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่การให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกนิ่ม และหลอมเหลว พลาสติกเทอร์โมเซตเมื่อใช้งานเสร็จแล้วไม่สามารถนำมาผ่านการหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ได้อีก และถ้าให้ความร้อนมากเกินไป

จะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวหรือไหม้ โดยไม่เกิดการหลอมเหลว ตัวอย่างของพลาสติกในกลุ่มนี้เช่น เบคเคลไลต์ และเมลามีน เป็นต้น เรซินบางกลุ่มก็สามารถบ่ม(Curing)ที่อุณหภูมิห้องได้ โดยไม่ต้องใช้ความร้อน การเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหของพลาสติกเทอร์โมเซตนี้ ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยหรือไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ จึงให้สมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง การไม่ละลายในตัวทำละลาย ความทนทานต่อความร้อน สารเคมี และการคืนตัว พลาสติกเทอร์โมเซตมีอยู่ด้วยกัน 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ อีพอกซี (Epoxies) โพลีเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyesters) อัลคิดีส์ (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) และอะมิโนเรซิน (Amino resins)

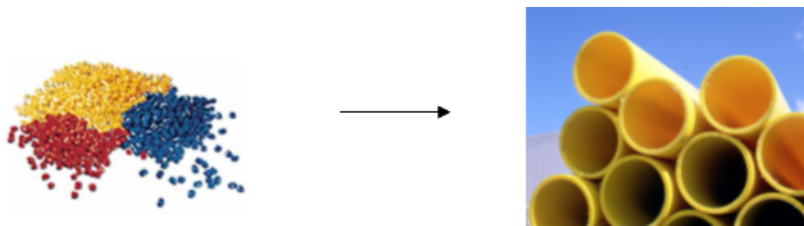
การแบ่งประเภทของพลาสติก นอกจากจะพิจารณาสมบัติของพลาสติกเมื่อถูกความร้อนแล้ว ยังต้องพิจารณาจากความหนาแน่น ลักษณะการติดไฟและการละลายในตัวทำละลายอื่นๆ สามารถแยกความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซต
1. เป็นโพลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกิ่ง	1. เป็นโพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห
2. อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	2. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน
3. ต้องทำให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ ทำให้เสียรูปทรง	3. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์	4. เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์
5. นำมารีไซเคิลโดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้

2.1.3 ความหมายของพลาสติก

คำว่า "พลาสติก" และ "โพลิเมอร์" ในความหมายเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "โพลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างโพลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ เช่น ถัง ฉนวน พลาสติก วัสดุสังเคราะห์และท่อที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พลาสติก

ที่มา : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/index.html

2.1.3.1 ขอบเขตที่ใช้สำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก มี 3 ชนิดคือ

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

2.1.3.2 พลาสติกมีแหล่งกำเนิดจาก 5 แหล่งคือ

1. ผลิตผลการเกษตร เช่น Cellulose Nitrate, Cellulose Acetate
2. ผลิตผลทางการเกษตรและน้ำมันมีน้อยมาก เช่น Furan
3. น้ำมันและถ่านหินเป็นแหล่งใช้ผลิตพลาสติกชนิดต่างๆได้มากที่สุด เช่น Polyethylene, Polystyrene
4. น้ำมันและสินแร่ เช่น Polyvinyl Butyral , Polyvinyl Carbazole
5. สินแร่มีน้อย เช่น Calcium Aluminum Silicate

พลาสติกที่ใช้ยังมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำมันเกือบทั้งสิ้นหรือราวร้อยละ 90 และน้ำมันดิบที่ผลิตพลาสติกใช้เพียงร้อยละ 1 ของน้ำมันที่ผลิตได้รวมกันทั่วโลก พลาสติกแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวและความหนาแน่นต่างกัน จึงมีการใช้สัญลักษณ์เพื่อช่วยในการเลือกพลาสติกชนิดต่างๆ และช่วยในการแยกพลาสติกในกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเราสามารถแยกชนิดของพลาสติกได้

2.1.4 ชนิดของพลาสติก

1. โพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลต (Poly (ethylene terephthalate), PET)

PET สัญลักษณ์คือ 1 เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความใส มองทะลุได้ มีความแข็งแรงทนทานและเหนียว ทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย ป้องกันการผ่านของแก๊สได้ดี มีจุดหลอมเหลว 250-260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.38-1.39 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดน้ำปลา ขวดน้ำมันพืช และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ขวด PET ยังมี

สมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สได้เป็นอย่างดีจึงใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำอัดลม PET แสดงในรูปที่ 2.2 สามารถนำกลับมา รีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาวพรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน หรือเส้นใยสำหรับเล่นสกี



รูปที่ 2.2 โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตและสัญลักษณ์

ที่มา : <http://www.polymers.invista.com>

2. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

HDPE สัญลักษณ์คือ 2 เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง โครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรง ค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มากค่อนข้างนิ่ม มีความเหนียวไม่แตกง่าย ทนสารเคมีมีจุดหลอมเหลว 130 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.95-0.92 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ถูร่อนชนิดขุ่น ขวดนม รองเท้า ส่วนใหญ่ทำให้มีสีส้มสวยงามแสดงในรูปที่ 2.3 ยกเว้นขวดที่ใช้บรรจุน้ำดื่ม ซึ่งจะขุ่นกว่าขวด PET ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจาก HDPE ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้นได้ดี HDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตขวดต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน



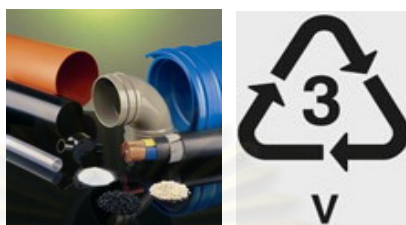
รูปที่ 2.3 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสัญลักษณ์

ที่มา : <http://www.nelionexports.com>

3. โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride), PVC) PVC

PVC สัญลักษณ์คือ 3 เป็นพลาสติกที่มีลักษณะทั้งแข็งและสามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ มีสีส้มสวยงาม มีจุดหลอมเหลว

75-90 องศาเซลเซียส เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก เช่น ท่อพีวีซี สายยาง แผ่นฟิล์มห่ออาหาร ใช้ทำสายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ขวดใส่แชมพูสระผมแสดงในรูปที่ 2.4 PVC เป็นพลาสติกที่มีสมบัติหลากหลาย สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกมาก เช่น ประตู หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม PVC สามารถนำกลับมารีไซเคิล เพื่อผลิตท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ หรือม้านั่งพลาสติก



รูปที่ 2.4 โพลีไวนิลคลอไรด์และสัญลักษณ์
ที่มา : <http://www.plastics-technology.com>

4. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

LDPE สัญลักษณ์คือ 4 เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความนิ่มกว่า HDPE มีความเหนียว ยืดตัวได้ในระดับหนึ่ง ส่วนใหญ่ มีความใส มองเห็นได้ จุดหลอมเหลว 110 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.92-0.94 นิยมนำมาใช้ทำแผ่นฟิล์ม ห่ออาหาร ถุงใส่ขนมปังและขวดยาหรือขวดน้ำกลั่นแสดงในรูปที่ 2.5 LDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้วหรือถังขยะ



รูปที่ 2.5 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและสัญลักษณ์
ที่มา : <http://www.reich-chemistry.wikispaces.com>

5. โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

PP สัญลักษณ์คือ 5 เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ มีความแข็งและเหนียว คงรูป ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความร้อนและสารเคมี ทำให้มีสีสัน

สวยงามได้ มีจุดหลอมเหลว 160-170 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90-0.91 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารในครัวเรือน เช่น ถ้วยร้อนชนิดใส อุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด กล่อง ถัง ตะกร้า หรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น จาม ชาม แสดงในรูปที่ 2.6 PP สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นกล่องแบตเตอรี่รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับน้ำมัน



รูปที่ 2.6 โพลีโพรพิลีนและสัญลักษณ์

ที่มา : <http://www.chemicals-technology.com>

6. โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

PS สัญลักษณ์คือ 6 เป็นพลาสติกที่มีความใส แข็งแต่เปราะแตกง่าย ราคาถูก มีจุดหลอมเหลว 70-115 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90-0.91 นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องไอศกรีม เทปเพลง สำลี หรือของแข็ง กล่องโฟมแสดงในรูปที่ 2.7 เนื่องจาก PS เปราะและแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักที่เบามากซึ่งประกอบด้วย PS ประมาณร้อยละ 2-5 เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง PS สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัด หรือของใช้อื่นๆ

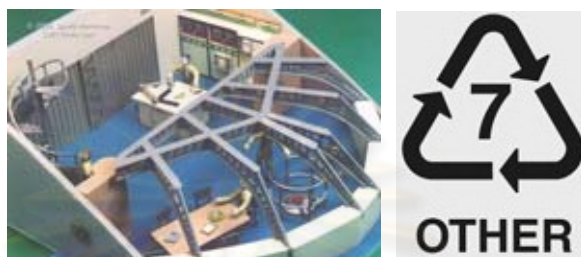


รูปที่ 2.7 โพลิสไตรีนและสัญลักษณ์

ที่มา : <http://www.foongsite.com>

7. พลาสติกอื่นๆ (Others) ที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก

หรือไม่ทราบว่าเป็นพลาสติกชนิดใด ปัจจุบันเรามีพลาสติกหลายชนิดให้เลือกใช้ พลาสติกที่ใช้ในครัวเรือนส่วนใหญ่สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อหลอมใช้ใหม่ได้ การมีสัญลักษณ์ตัวเลข ทำให้เราสามารถแยกพลาสติกออกเป็นชนิดต่างๆ เพื่อนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น สำหรับพลาสติกในกลุ่มที่ 7 เป็นพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรกแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พลาสติกอื่นๆ และสัญลักษณ์

ที่มา : <http://www.cultvman.com>

นอกจากมีตัวเลขระบุแล้ว ควรใส่สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษระบุชนิดของพลาสติกนั้นๆ ไว้เพื่อสะดวกในการแยกและนำกลับมารีไซเคิล เช่น โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ซึ่งชนิดและสูตรโครงสร้างสามารถแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิด สูตรโครงสร้าง อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว glass transition temperature, T_g และอุณหภูมิจุดหลอมเหลว melting point temperature, T_m

พอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง	สูตรโมเลกุล	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)
โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต, PET	$\left[\text{CO} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CO} - (\text{CH}_2)_4 - \text{O} \right]_n$	$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	75	260
โพลีเอทิลีน, PE	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$	$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$	-80	144-152
โพลีไวนิลคลอไรด์, PVC	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$	$(\text{CH}_2 - \text{CHCl})_n$	82	100-260
โพลีโพรพิลีน, PP	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$	$(\text{C}_3\text{H}_6)_n$	-10	-160
โพลีสไตรีน, PS	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_n$	$(\text{C}_8\text{H}_8)_n$	95	240

อุตสาหกรรมที่ใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร รองลงมา คือ อุตสาหกรรมเคมี เช่น เครื่องสำอาง ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และสารเคมีอื่นๆ เมื่อพิจารณาเป็นรายผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ขวดพลาสติกส่วนมากจะจำหน่ายให้แก่โรงงานผลิตน้ำมันพืช โรงงานผลิตเครื่องสำอาง ส่วนโรงงานผลิตหลอดพลาสติก โฟม กระจบอง เซ่ง และลัง จะจำหน่ายให้แก่โรงงานแปรรูปอาหาร สำหรับโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกจำพวกถุง ซอง ถัง กล่อง จะจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ทั่วไป เนื่องจากความนิยมและความต้องการใช้สินค้าและบรรจุภัณฑ์ดังกล่าว ทำให้ปริมาณการใช้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สถานการณ์ของเสียประเภทพลาสติกในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี จากการสำรวจโดยกระทรวงพลังงานพบว่าในปีพ.ศ. 2547 มีปริมาณขยะชุมชนทั่วประเทศ 39,956 ตันต่อวัน หรือประมาณ 14.6 ล้านตันต่อปี โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณขยะมูลฝอยที่เก็บขนได้ 9,356 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 24 ของปริมาณขยะชุมชนทั่วประเทศ ซึ่งปัจจุบันนำไปกำจัดโดยว่าจ้างให้เอกชนขนไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ประมาณ 6,000 - 7,000 ตันต่อวันและอำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ประมาณ 2,000 - 2,300 ตันต่อวัน คิดปริมาณเก็บขนได้มากกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่การนำมาตรกรารีไซเคิลสามารถแก้ปัญหาการจัดการขยะพลาสติกได้เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น โดยในปัจจุบันมีขยะพลาสติกเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลเพียง 0.2 ล้านตัน หรือเพียงประมาณร้อยละ 7-10 ด้วยข้อจำกัดในเรื่องการคัดแยก การทำความสะอาด คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และราคาตลาดที่ไม่แน่นอน ของเสียประเภทพลาสติกที่เหลือจึงถูกกำจัดโดยนำไปฝังกลบ ทำให้รัฐและส่วนท้องถิ่นต้องใช้งบประมาณนับ 10,000 ล้านบาท ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าที่ดินและเวลาในการย่อยสลายอีกนับ 500 ปี และในจำนวนนี้ยังมีขยะที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอีกจำนวนหนึ่ง จากการประเมินเบื้องต้นพบว่าประเทศไทยมีขยะพลาสติกตกค้างจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

1. ประมาณร้อยละ 15 จากจำนวนขยะมูลฝอยชุมชน (Municipal Waste) เป็นจำนวนประมาณ 2.5 ล้านตัน
2. ประมาณร้อยละ 30 จากขยะเก่าจากหลุมฝังกลบที่ปิดแล้ว (Old Landfill) เป็นจำนวนประมาณ 4.5 ล้านตัน
3. ประมาณร้อยละ 10 จากขยะจากอุตสาหกรรม (Industrial Waste) เป็นจำนวนประมาณ 0.5 ล้านตัน [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ฯ, 2552 : ออนไลน์]

2.2 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน (MSW Gasification)

ขยะมูลฝอยชุมชน ในภาษาอังกฤษใช้คำว่า Municipal Solid Waste ใช้ตัวย่อ MSW ในที่นี้หมายถึงขยะมูลฝอยที่มีแหล่งกำเนิดมาจากชุมชนเมืองค์ประกอบหลักสามารถแบ่งออกได้เป็น

3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ขยะอินทรีย์ที่เน่าเสียได้ง่าย และมีความชื้นสูง เช่น เศษอาหาร เศษผัก ผลไม้ ใบไม้ ใบหญ้า เป็นต้น ขยะที่เผาไหม้ได้ ซึ่งได้แก่ ขยะอินทรีย์ที่ย่อยสลายช้า เช่น ไม้ ยาง หนัง กระดาษ และสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก และวัสดุแข็ง ซึ่งก็คือส่วนที่ไม่เผาไหม้ เช่น หิน ทราช แก้ว กระเบื้อง เป็นต้น [อำนาจ ทองสถิตย์, 2550] ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติก หลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้อย่างมากมาย ปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เกิดขยะ พลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึง ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย การพัฒนาทางเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทำให้การรีไซเคิล พลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling)

2.2.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่เกิด ในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติม ผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่างๆ

2.2.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ

2.2.2.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการ ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่าน กระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและ

ปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกคือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลงปฏิบัติการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในเกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลงเรื่อยๆ ไม่คุ้มต่อการลงทุน สาเหตุที่สำคัญเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก อนุภาคเล็กๆ หรือ เศษกาบทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือ มีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลลดลง

2.2.2.2 การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification)

เนื่องจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า Compatibilizer

2.2.2.3 การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Co extrusion and Coinjection moulding)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทฤษฎีซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดี

2.2.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

2.2.3.1 การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical recycling)

เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerization) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูง

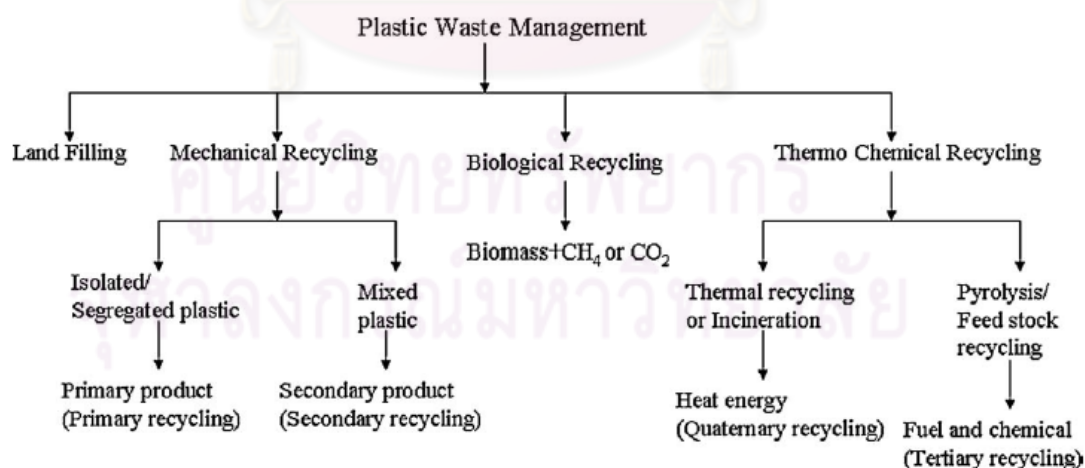
2.2.3.2 การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

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

2.2.4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552 : ออนไลน์]

พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

แม้ว่าทุกวันนี้การรีไซเคิลพลาสติกยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก แต่ก็กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่เรากำลังให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะสามารถจัดการขยะที่เป็นพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง อย่างไรก็ตามพลาสติกพหุที่ จะนำมารีไซเคิลทางความร้อนก็ควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก



รูปที่ 2.9 แผนผังประเภทของการรีไซเคิล [Panda et al., 2010]

2.3 หลักการแปรรูปพลาสติก

2.3.1 ไพโรไลซิสหรือคาร์บอนเซชัน (Pyrolysis หรือ Carbonization)

เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะจำกัดปริมาณออกซิเจนภาวะที่ใช้ดำเนินการคือ อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไปกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งเป็นไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ของแข็งถ่านชาร์ (Charcoal) เป็นผลิตภัณฑ์หลักไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (Fast pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันดินหรือน้ำมันทาร์ (Tar) และน้ำมัน (Oil) ผลิตภัณฑ์ของแข็งถ่านชาร์ (Charcoal) และ ผลิตภัณฑ์แก๊ส ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอื่นๆ

2.3.2 การเผาไหม้ (Combustion)

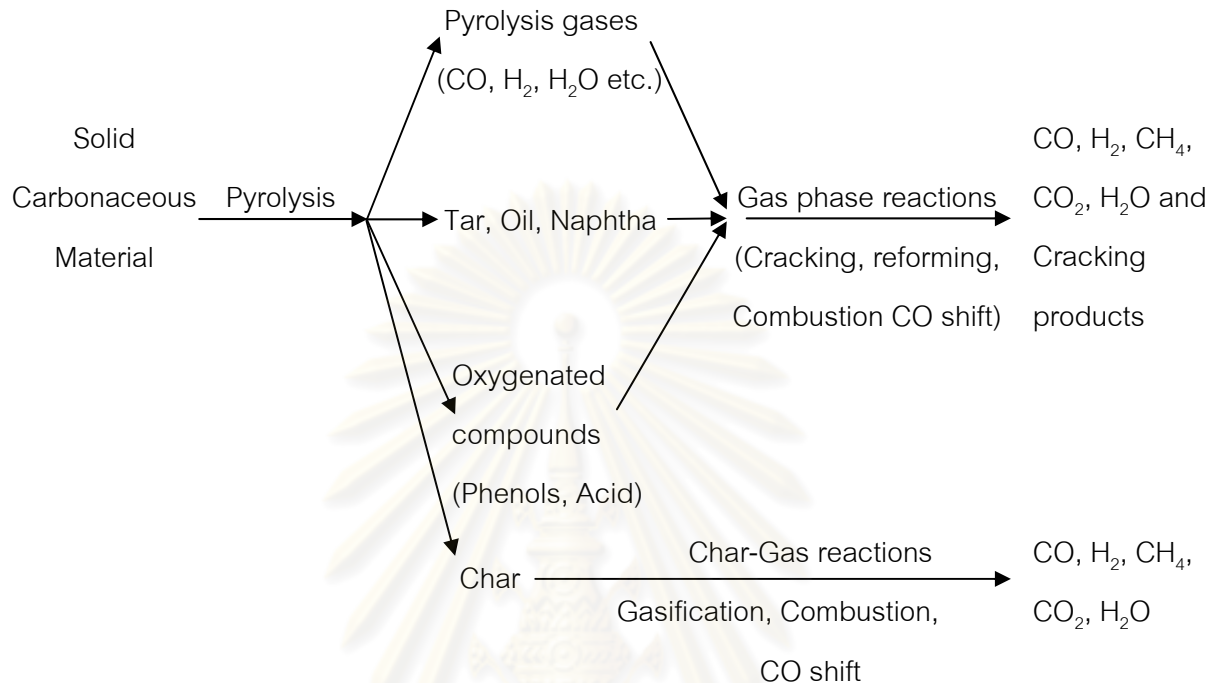
เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะที่ใช้ออกซิเจนโดยจะเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคแก๊สเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส ช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เข้าภาวะที่ใช้ดำเนินการ คืออุณหภูมิตั้งแต่ 800-1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศเกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือคาร์บอน (C)

2.3.3 แกซิฟิเคชัน (Gasification)

เป็นกระบวนการการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักกับอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำที่ส่วนใหญ่ใช้ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิช่วง 800 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันดินหรือน้ำมันทาร์ (Tar) ผลิตภัณฑ์ของแข็งถ่านชาร์ (Charcoal) และผลิตภัณฑ์แก๊ส (Producer gas) โดยทั่วไปเชื้อเพลิงแข็งเหล่านี้จะมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน แต่อาจแตกต่างกันตรงสัดส่วนผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

กระบวนการแกซิฟิเคชันจะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา 2 ช่วง ช่วงแรกเกิดกระบวนการไพโรไลซิส ในขั้นตอนนี้จะเกิดในช่วงเวลาอันสั้นได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

น้ำมันทาร์ และของแข็งถ่านชาร์ ช่วงสองเกิดกระบวนการแกซีฟิเคชัน น้ำมันทาร์จะทำการปฏิกิริยา สันดาปต่อที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ถ่านชาร์ยังทำปฏิกิริยาต่อโดยอากาศ ออกซิเจนหรือไอน้ำ ผลิตภัณฑ์ได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นแสดงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาต่อเนื่องในกระบวนการแกซีฟิเคชัน [Ahmed et al., 2009]

2.4 กระบวนการแกซีฟิเคชัน

2.4.1 นิยาม

กระบวนการแกซีฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแข็งโดยอาศัยการสันดาปบางส่วนในการทำปฏิกิริยา เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ และชีวมวล รวมทั้งพลาสติก เพื่อผลิตแก๊สและถ่านชาร์ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ เรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (Syngas or producer gas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) รวมทั้งแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นต้น

2.4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสของชีวมวล ในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊ส

ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขึ้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยน้ำมันทาร์ และชาร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น [Asadullah et al., 2009 and Devi et al., 2005] ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันมี 3 ประเภทคือ [ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541]

2.4.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.4.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ $C_5 - C_6$ ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ $< 200^{\circ}C$ ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ $200 - 250^{\circ}C$ ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ $250 - 300^{\circ}C$ ได้แก่ ไดเมทิล แนฟทาลีน
- น้ำมันแอนทราซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ $300 - 350^{\circ}C$ ได้แก่ ฟลูออรีน พีแนพทีน
- พิทช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ $> 350^{\circ}C$ ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไขซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

สมบัติทางเคมีของน้ำมันทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของน้ำมันทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly oxygenate pyrolyzate ไปเป็น Less oxygenate pyrolyzate และมีความคงที่ของอุณหภูมิมากกว่า (Thermally highly aromatic structure stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจนและคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก

2.4.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

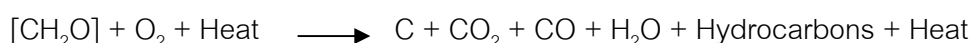
เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า

2.4.3 ปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สซิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ (Plastic steam gasification) [He et al., 2009] ปฏิกริยาที่เกิดเป็นตัวอย่างพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ดังสมการที่ (2.1)

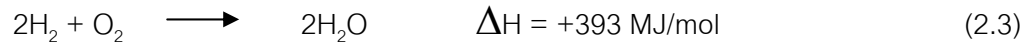
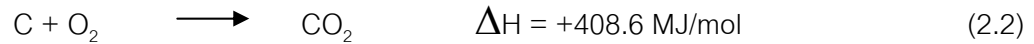


สารระเหยจะทำปฏิกริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ต่อที่อุณหภูมิสูงหรือปฏิกริยาทุติยภูมิ (Secondary reaction) ในขณะที่ถ่านชาร์จะถูกแก๊สซิฟายต่อโดยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำได้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้เป็น

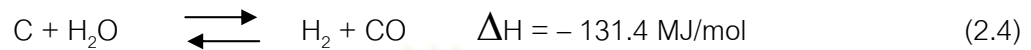


นอกจากนี้ยังมีปฏิกริยาทุติยภูมิที่เกิดต่อเนื่อง ได้แก่

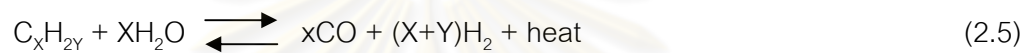
- ถ่านชาร์และไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศ ซึ่งปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาคายความร้อน และเป็นปฏิกริยาที่ให้ความร้อนในการอบขยะมูลฝอยชุมชนให้แห้ง เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึงอุณหภูมิทำปฏิกริยาและทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ปฏิกริยาอื่นๆ ด้วย



- ปฏิกิริยา Water gas ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างถ่านชาร์กับไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



- ปฏิกิริยาระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



- ปฏิกิริยา Boudouard ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านชาร์เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



- ปฏิกิริยา Water-Gas Shift ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



- ปฏิกิริยา Methane formation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



ปฏิกิริยาที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยหลักที่จะกำหนดการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวคืออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ถ้า Residence time ในบริเวณ Hot zone ของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไป หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดการสันดาปและจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นที่บริเวณ Reduction zone เป็นน้ำมันทาร์

รูปแบบการใช้งานแก๊สเชื้อเพลิง (เช่น ให้ความร้อนโดยตรง ผลิตไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ) จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง การกำจัดปริมาณของน้ำมันทาร์และฝุ่นละอองในแก๊สเชื้อเพลิง ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดสัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ สภาวะความดันและอุณหภูมิ และคุณลักษณะของขยะมูลฝอยชุมชน ซึ่งคุณลักษณะของขยะมูลฝอยชุมชนจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านเคมีความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ในแง่ของประสิทธิภาพและระบบและคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปเผาในกังหันแก๊ส เครื่องยนต์สันดาปภายในหรือหม้อน้ำ

2.4.4 แก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศ (Air Gasification)

เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด ผลิตเชื้อเพลิงแก๊สพลังงานต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับการที่มีไนโตรเจนปริมาณเล็กน้อยเพียงใด ที่จะไปเจือจางเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้ เชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวเหมาะสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อจุดประสงค์ในการใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เครื่องมือควรมีการออกแบบใช้ในการเผาไหม้น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติที่ง่ายในการนำไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข ในการเดินเตาผลิตแก๊สและประสิทธิภาพทั้งหมดของการเปลี่ยนให้ใกล้เคียงกับการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 70-80 ถ้าใช้เครื่องมือที่ออกแบบดี สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ เชื้อเพลิงแก๊สจะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้ง กังหันแก๊ส (Gas turbine) และเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator)

2.4.5 แก๊สซิฟิเคชันด้วยออกซิเจน (Oxygen Gasification)

เป็นกระบวนการที่ใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ จะให้เชื้อเพลิงแก๊สที่มีพลังงานสูงกว่าการใช้อากาศ เชื้อเพลิงแก๊สนี้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนและมักเรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) เพราะว่าแก๊สนี้สามารถให้ความร้อนหรือใช้สังเคราะห์เมทานอล แอมโมเนียและสารเคมีอื่นๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ใช้มีราคาสูง และยังต้องการสิ่งทีอำนวยความสะดวกในการแยกออกซิเจนจากอากาศ

2.4.6 แก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (Steam Gasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำเชื้อเพลิงแก๊ส

2.4.7 แก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carboxygasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

2.4.8 แก๊สซิฟิเคชันด้วยแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogasification)

เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตแก๊สมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดซัลฟิวไรด์ที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นแก๊สที่ต้องการให้เกิดในการแก๊สซิฟิเคชันมาก แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมาก นอกจากนี้จะมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มเติม

2.4.9 ปฏิกริยวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water-gas shift reaction)

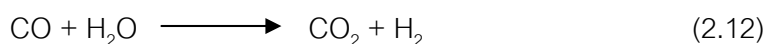
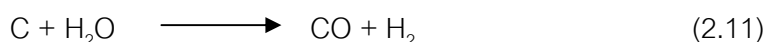
เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์

2.5 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส

ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

2.5.1 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value gas or Low Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/m³ (90-150 Btu/SCF) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้ [Donald et al., 1988]

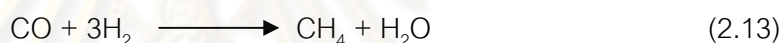


2.5.2 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value gas or Medium Btu gas)

เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m³ (250-550 Btu/SCF) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การไม่มีไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

2.5.3 การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value gas or High Btu gas)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นแก๊สมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจาก Medium Btu gas สามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการมีเทนชัน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดปฏิกิริยาของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ดังสมการ



2.6 ประเภทของเตาผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasifiers)

เตาผลิตแก๊สแบบนี้เมื่อแบ่งตามทิศทางการไหลของแก๊ส เมื่อเทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง จะสามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

2.6.1 เครื่องแก๊สไฟที่มีการไหลขึ้นของแก๊สสังเคราะห์ (Updraft gasifier)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เป็นแบบที่ใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเครื่องและสารแก๊สไฟ (อากาศ หรือออกซิเจน และ/หรือไอน้ำ) ถูกป้อนทางด้านล่างและไหลขึ้นสวนทางกับเชื้อเพลิง แสดงในรูปที่ 2.11 (ก) บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า Combustion zone or Oxidation zone เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณ Combustion zone จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion zone จะมีอุณหภูมิสูงและถูกส่งผ่านไปยัง Reduction zone ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ขึ้น

เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านั้น ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำลง สารระเหยและน้ำมันที่ที่เกิดขึ้นในช่วงการกลั่นสลายจะติดออกไปกับเชื้อเพลิงแก๊สที่เกิดขึ้น ดังนั้นเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบ Updraft gasifier จะมีปริมาณของน้ำมันที่มาก บางครั้งอาจถึงร้อยละ 20 ของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบ Updraft gasifier มีอุณหภูมิไม่สูงนักและมีปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันที่มาก ทำให้มีค่าความร้อนมากจำเป็นต้องมีหน่วยทำความสะอาดเชื้อเพลิงแก๊สก่อนนำเชื้อเพลิงไปหมุนกังหันแก๊ส ข้อดีหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบ Updraft gasifier คือ ติดตั้งง่ายและมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

2.6.2 เครื่องแก๊สไฟที่มีการไหลลงของแก๊สสังเคราะห์ (Downdraft gasifier)

เครื่องปฏิกรณ์ gasifier แบบนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันที่ในเชื้อเพลิงแก๊ส โดยเฉพาะอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง แสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณของการเผาไหม้แก๊สที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้จะถูกรีดิวส์ ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อยขณะเดียวกันในชั้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และน้ำมันที่ที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดอุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิริยาความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนผสมของน้ำมันที่ลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของน้ำมันที่ได้จาก Updraft gasifier และเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จะสะอาดกว่า

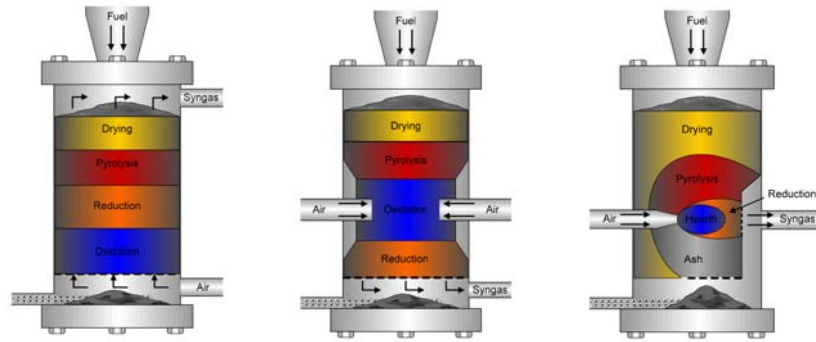
การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบ Downdraft gasifier นี้ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสำหรับเชื้อเพลิงที่ได้ (มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30) เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณน้ำมันที่ต่ำเครื่องปฏิกรณ์แบบ Downdraft gasifier จึงเหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่มีขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 500 กิโลวัตต์

2.6.3 เครื่องแกซิฟายที่มีการไหลแบบขวาง (Crossdraft gasifier)

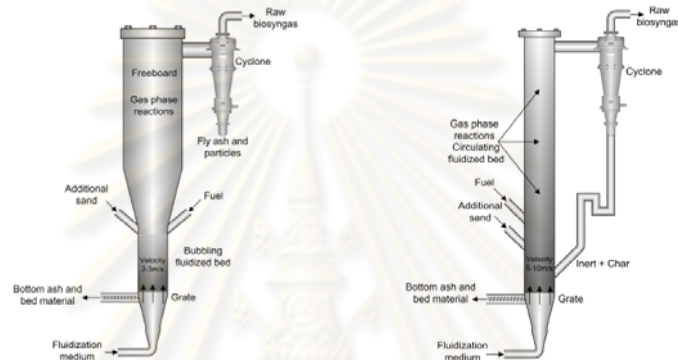
เชื้อเพลิงถูกป้อนทางด้านบน ส่วนสารแกซิฟายถูกป้อนทางด้านข้างและไหลผ่านเชื้อเพลิง ได้แก๊สสังเคราะห์ทางด้านตรงข้าม แสดงในรูปที่ 2.11 (ค) อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดที่อยู่ใต้วงเวียน ส่วนบริเวณของบริเวณ Combustion จะอยู่ถัดหัวฉีดออกไปและถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณ Reduction แก๊สที่ออกจากบริเวณนี้แล้วจะเป็นบริเวณสลายน้ำมันทาร์และน้ำมันทาร์ที่ได้จากบริเวณการกลั่นสลายนี้จะผ่านบริเวณ Reduction ก่อนที่ออกสู่ภายนอกทำให้น้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ส่งผลให้เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีปริมาณน้ำมันทาร์ต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาไหลขวางมีอุณหภูมิสูงมาก รุกอากาศที่เข้าไปเตาและตะแกรงต้องใช้วัสดุทนความร้อนที่ดีหรือมีการหล่อเย็นที่ดี

2.6.4 เครื่องแกซิฟายแบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed gasifiers)

ปัญหาที่เกิดจากการใช้เครื่องแกซิฟายทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น คือ ถ้าหลอมเหลวเป็น สแลก (Slag) อยู่ด้านล่างทำให้ความดันลด การเผาไหม้ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้หลักการของฟลูอิไดซ์เบด โดยการป้อนกระแสแก๊ส เรียกว่าสารฟลูอิไดซ์ส่วนใหญ่เป็นอากาศ จะถูกป้อนที่ด้านล่างสุดของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้นจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการ ฟลูอิไดซ์แล้วจะเกิดฟองอากาศขึ้นในทรายและเบดเริ่มลอยขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่า Bubbling Fluidized Bed (BFB) และถ้าความเร็วสูงขึ้นอีก ทรายบางส่วนจะหลุดลอยออกไป ไชโคลนจึงถูกติดตั้งเพื่อนำทรายกลับมาในขณะที่แก๊สจะไหลผ่านไชโคลนออกไปทางด้านบน และกลับมาป้อนเข้าที่ด้านล่างของเบดอีกครั้ง ลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) แสดงในรูปที่ 2.11 (ง)



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



(ง) Bubble and Circulating Fluidized bed gasifier

รูปที่ 2.11 เครื่องแกชไฟฟายแบบต่าง ๆ [Olofsson et al., 2009]

2.7 การทำแก๊สให้สะอาด (Gas Cleaning)

การทำเชื้อเพลิงแก๊สที่ออกจากเครื่องแกชไฟฟาย ให้สะอาดนับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำเชื้อเพลิงแก๊สมาเผาไหม้ในกังหันแก๊ส เนื่องจากการกำจัดและป้องกันปัญหาด้านมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดปัญหาการเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเนื่องจากการกัดกร่อนของแก๊สกรด หรือการสึกกร่อนด้วยอนุมูลของแข็ง

เชื้อเพลิงแก๊สที่ออกจากเครื่องแกชไฟฟายจะมีสารเจือปน แสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งปริมาณของสารเจือปนนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการแกชไฟเคชั่นและลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ใช้

ตารางที่ 2.3 สิ่งเจือปนในแก๊สและกระบวนการทำแก๊สให้สะอาด [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ฯ, 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

2.7.1 Hot Gas Cleanup for Particulate

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

2.7.2 การแตกตัวทาร์ (Tar Cracking)

ความเข้มข้นของน้ำมันทาร์ในเชื้อเพลิงแก๊สจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่แก๊สฟาย ซึ่งความเข้มข้นของน้ำมันทาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณน้ำมันทาร์จะเป็นฟังก์ชันของชนิดของเครื่องแก๊สฟาย และภาวะที่ดำเนินการนอกจากนี้ ปริมาณและลักษณะเฉพาะของน้ำมันทาร์จะขึ้นกับเชื้อเพลิงด้วย มีรายงานว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟายไม่มีปริมาณมากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการแก๊สฟายถ่านหิน ซึ่งน้ำมันทาร์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อเกิดเป็นเขม่าซึ่งจะทำให้ตัวกรองอุดตัน

วิธีการกำจัดน้ำมันทาร์มี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

- การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) โดยการใส่ไดโอดไมต์หรือนิกเกิล
- การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) โดยวิธีออกซิชั่นบางส่วนหรือการสัมผัสกับความร้อนโดยตรง

2.7.2.1 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

มีรายงานว่า การกำจัดน้ำมันทาร์โดยวิธีการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมาก โดยสามารถเปลี่ยนน้ำมันทาร์ได้มากกว่าร้อยละ 99 โดยใช้โคโคไลต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทฐานนิกเกิล (Nickel based) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

ปัญหาเรื่อง การเสื่อมสภาพของตัวเร่ง ปฏิกิริยาไม่ค่อยพบในตัวเร่งปฏิกิริยาโคโคไลต์ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เป็นการเกาะของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถ Reactivate ได้โดยคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแก๊สไฟเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงขึ้น

2.7.2.2 การแตกตัวด้วยความร้อน

น้ำมันทาร์ที่ได้จากชีวมวลจะสลายตัวด้วยความร้อนยากกว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากถ่านหิน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะกำจัดน้ำมันทาร์ด้วยวิธีบำบัดด้วยความร้อนอย่างเดียว มีหลายวิธีในการกำจัดน้ำมันทาร์โดยการแตกตัวด้วยความร้อน เช่น

1. เพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาที่บริเวณ Freeboard ในเครื่องแก๊สไฟแบบฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน แต่วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วน
2. สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนพื้นผิว เป็นการลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ วิธีนี้ได้ผลเพียงแค่บางส่วนเช่นกัน
3. ออกซิเดชันบางส่วนโดยเติมอากาศหรือออกซิเจน วิธีนี้จะทำให้ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพลดลงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเติมออกซิเจน วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส และเป็นระบบแก๊สไฟเคชันด้วยออกซิเจน

2.7.3 การกำจัดน้ำมันทาร์ (Tar Removal)

วิธี Water scrubbing ถือได้ว่าเป็นวิธีกำจัดทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง น้ำมันทาร์และสิ่งเจือปนอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีปัญหาในการกำจัดน้ำมันทาร์โดยเฉพาะในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันทาร์ ในการกำจัดน้ำมันทาร์จำเป็นต้องใช้วิธีจับทางกายภาพให้น้ำมันทาร์รวมตัวกัน (Agglomeration) หรือจับตัวกัน มากกว่าจะใช้เพียงการลดอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมันทาร์จากชีวมวลนั้นรวมตัวกันยาก และจำเป็นต้องใช้ระบบบำบัดที่ยุ่งยากซับซ้อนในการกำจัดให้ได้ถึงร้อยละ 90

2.8 ถ่านชาร์ (Charcoal)

2.8.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชาร์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชาร์

- เป็นของเหลือทิ้ง ราคาถูกและหาได้ง่าย
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- มีปริมาณสารระเหยและสารอินทรีย์ต่ำ
- มีคุณสมบัติคงที่ เช่น ไม่สลายตัวเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน

วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรง มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย ชานอ้อย หรือซังข้าวโพด เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite) พีท (Peat) เป็นต้น
- ส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น เลือด กระดูก เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์อินทรีย์วัตถุ หรือที่เรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural char)

ถ่านสังเคราะห์แบ่งออกตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ

- ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง (Hard artificial char) เช่น ถ่านน้ำตาล ถ่านไม้ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่ความดันสูง
- ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน (Soft artificial char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านซังข้าวโพด ถ่านหินน้ำมัน ถ่านน้ำตาล เป็นต้น

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชาร์และการนำไปใช้ประโยชน์ แสดงดังตาราง 2.4 พบว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน มีได้ถ่านชาร์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) สูงและความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับในสารละลายได้ดี แต่ดูดซับแก๊สไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว จะทำถ่านชาร์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนเล็ก (Micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านชาร์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่นวิธีการ

ผลิต ภาวะที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะบอกว่าวัสดุชนิดใดที่สามารถผลิตเป็นถ่านชาร์ที่ เหมาะสมกับงานแบบใด

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชาร์และการนำไปใช้ประโยชน์ [Bansel and coworker, 1988]

วัสดุ	คาร์บอนคงตัว	สารระเหย	ความหนาแน่น	เถ้า	การใช้ประโยชน์
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	55-60	0.40-0.50	0.3-1.1	การดูดซับในสารละลาย
ไม้เนื้อแข็ง	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	การดูดซับในสารละลาย
ลิกนิน	35-40	58-60	0.30-0.40	-	การดูดซับในสารละลาย
เปลือกถั่วลิสง	40-45	55-60	1.40	0.5-0.6	การดูดซับไอ
ลิกไนต์	55-70	25-40	1.00-1.35	5.0-6.0	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้ออ่อน	65-80	20-30	1.25-1.50	2.0-12	การดูดซับในสารละลายและไอ
ปิโตรเลียมโค้ก	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้อกึ่งแข็ง	70-75	10-15	1.45	5-15	การดูดซับไอ
ถ่านหินเนื้อแข็ง	85-95	5-10	1.50-1.80	2-15	การดูดซับไอ

2.9 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอคทีฟคาร์บอน (Active carbon) หรือ แอกทิเวเตด คาร์บอน (Activated carbon) เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกสารคาร์บอนที่ได้มาจากการเผาถ่าน ซึ่งเป็น ถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใส่เทคโนโลยีทาง วิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวน มากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

2.9.1 ความหมายของสารกัมมันต์

Derbyshire กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือวัตถุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง สามารถดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ดี และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจ ใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวกรองของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ Jankowska กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็น องค์ประกอบหลักร้อยละ 87-90 และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์

และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต

ตาม มอก. 900-2532 กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างได้เป็นอย่างดี

2.9.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon) หรือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะใช้ชนิดใดก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งานถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้ในการฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้กำจัดกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เบียร์ และไวน์ ใช้ในการทำตัวละลายบริสุทธิ์ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์และอุตสาหกรรมการพิมพ์ ใช้ในการดูดซับสีและกลิ่นในการทำน้ำประปา ใช้ในเครื่องกรองน้ำหรือเครื่องทำน้ำให้บริสุทธิ์ที่มีจำหน่ายอย่างแพร่หลายอยู่ในขณะนี้และใช้เป็นวัสดุทำน้ำกากป้องกันแก๊สพิษ เป็นต้น ในปัจจุบัน ผู้ประกอบการผลิตถ่านกัมมันต์มีการนำเสนอรูปแบบการใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น เช่น การทำผลิตภัณฑ์ฟอกอากาศจากถ่านกัมมันต์ในรูปแบบที่สวมใส่ในรถยนต์ ในตู้เย็น ฯลฯ สามารถแบ่งถ่านกัมมันต์ออกเป็น

2.9.2.1 แบ่งตามขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์

1. ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้การดูดซับแก๊สหรือไอระเหย
2. ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี
3. ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการฟอกสี และการผลิตยา

2.9.2.2 แบ่งตามลักษณะรูปร่างของถ่านกัมมันต์

1. ประเภทของผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นของเหลว
2. ประเภทเป็นเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำให้เป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตแก๊ส

2.9.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

1. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์
2. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

2.9.3 องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีความพรุนสูง มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสูง วัสดุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร สามารถผลิตได้จากชีวมวล เช่น ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม เป็นต้น โดยมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นวง เช่น ลิกนิน (Lignin) เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose)

2.9.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ คาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสโดยเผาที่ภาวะออกซิเจนต่ำที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตเป็นถ่านชาร์ (Char) ซึ่งเป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส (Gas) ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความสามารถในการดูดซับต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำทำให้มีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ผ่านกระบวนการที่สอง ที่เรียกว่า การกระตุ้น (Activation) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดอุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ภายใต้การควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.9.5 กระบวนการการกระตุ้น

การกระตุ้น (Activation) แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมี และการกระตุ้นทางกายภาพ

2.9.5.1 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

จะช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆที่เกิดในกระบวนการ ดังนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างมีปริมาณสูง ซึ่งการกระตุ้นนี้ใช้สารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในถังที่มีออกซิเจน เป็นเวลาหลายชั่วโมงโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 600 - 700 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งานทำให้เกิดร่างற்றுพูนภายในและร่างற்றுฟุ้งก่ชันบนพื้นผิวในแต่ละส่วน ดังนั้นกระบวนการผลิตจึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการกรองที่แตกต่าง ผลิตภัณฑ์อาจจะอยู่ในรูปเม็ดเล็กๆ (Granular Activated Carbon, GAC) อยู่ในรูปเป็นผง (Powder Activated Carbon, PAC) หรืออยู่ในรูปผงอัดเป็นแท่ง (Compressed Activated Carbon, CAC) ถ่านกัมมันต์บางอย่างจะถูกล้างด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์หรือโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์

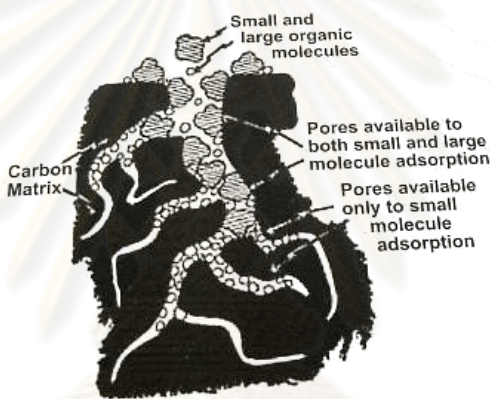
2.9.5.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊สหรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated stream) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆละลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน (Porous) อยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง นอกจากนี้ยังอาจจะใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันก็ได้ คือ เมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้แก๊สหรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด เพื่อการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น

2.9.6 การทำงานของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หลักการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆของสารอินทรีย์และคาร์บอนที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ในทางทฤษฎีสารที่ถูกดูดซับอาจจะถูกปล่อย

กลับออกมาได้ แต่จากการสังเกตทดลอง ได้แสดงให้เห็นว่าภาวะการปล่อยกลับออกมานั้นเกิดขึ้นได้ยาก แบบที่เรียมักจะสร้างกลุ่มอยู่ที่ผิวของถ่านกัมมันต์และกินบางส่วนของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้ ซึ่งจะเป็นการช่วยคืนรูปพูนของถ่านกัมมันต์บางส่วนและป้องกันการหลุดกลับของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้ ส่วนกระบวนการดูดซึมนั้นจะอาศัยหลักการแพร่ของก๊าซหรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหพูนภายในเม็ดถ่าน ซึ่งภายในจะเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือเกิดการจับยึดโดยความเป็นร่างแหยึดเหนี่ยวไว้ ยกตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่นไอโซนถูกดูดซึมเข้าไปและถูกคาร์บอนรีดิวซ์เป็นออกซิเจน ซึ่งตัวไอโซนหรือออกซิเจนไม่ได้ไปสร้างหรือถูกจับไว้โดยถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด ส่วนกระบวนการดูดซึมอีกประเภทคือการถูกดูดซึมเข้าไปแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้สร้างพันธะที่หนาแน่นกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ



รูปที่ 2.12 การดูดซับ (Adsorption) ที่รูปพูนของถ่านกัมมันต์

ที่มา : <http://www.ginkosea.com/print/9.html>

2.9.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารที่เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะอยู่บนตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorptions) การดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งลักษณะความแข็งแรงของการดูดซับและจำนวนชั้นการดูดซับแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ [วิทยา เรื่องพร วิสุทธิ์, 2547]

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

2.9.7.1. การดูดซับทางเคมี

เป็นการดูดซับที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยช่องว่างของออร์บิทัลของอะตอมหรือโมเลกุลของตัวดูดซับ จะดึงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนตัวดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการแทนที่ของโมเลกุล (Rearrangement) โดยออร์บิทัลของ

การดูดซับทางเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามลักษณะการเกาะของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ คือการดูดซับทางเคมีแบบรวมโมเลกุล (Associative chemisorption) และการดูดซับทางเคมีแบบแยกโมเลกุล (Dissociative chemisorption)

2.9.7.2. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดบนผิวของของแข็งเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงนี้รวมถึงแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic attraction) แรงดึงดูดที่เกิดจากแรงของความเป็นขั้วถาวร (Dipole moment) ของโมเลกุล และรวมถึงแรงดึงดูดเนื่องจากการเหนี่ยวนำของโมเลกุลจนเกิดเป็นขั้ว จากการกระจายของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) ที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar atoms or molecules) เรียกว่า แรงดึงดูดของขั้วเหนี่ยวนำ (Induced dipolar attraction) แรงเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพตรงบริเวณผิว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ซึ่งเป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเท่านั้น

2.9.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

2.9.8.1. ประเภทใช้กับของเหลว (Liquid phase carbon)

อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้สารละลายหรือในของเหลว ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมัน อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ อุตสาหกรรมเคมีและยา อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์

2.9.8.2. ประเภทที่ใช้ในการดูดแก๊สและไอ (Gas phase carbon)

ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ อุตสาหกรรมปรับอากาศ อุตสาหกรรมบุหรี

2.9.8.3 กรอง

น้ำต้องมีประสิทธิภาพการกรองที่เร็วในการที่จะดูดกลิ่น รส ออกจากน้ำ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ทำมาจาก กะลามะพร้าว ลิกไนต์และไม้เนื้อแข็ง ลักษณะของตัวกรองสามารถแบ่งเป็น 3 แบบ คือ เป็นม้วนทรงกระบอก เป็นเม็ด และเป็นบล็อก ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบและการไหลของของน้ำผ่านตัวกรอง

2.9.8.4 ทำความสะอาด

การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon PAC) ทำความสะอาดสารละลายส่วนใหญ่การทำความสะอาดสารละลายเช่น น้ำตาลและกลูโคสในรูปของเหลวหรือผลึกด้วยการดูดซับสีของสารละลายมักจะใช้ถ่านกัมมันต์ที่ส่วนใหญ่มีรูขนาด 55-70 อังสตรอม (รูขนาดเล็กจะน้อยกว่า 20 อังสตรอม ดังนั้นการใช้วัสดุที่เป็นไม้อยูคาร์ลิปัสและไม้ยางจะเหมาะสมกับการเป็นตัวดูดซับสีที่ดีคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ พบว่าจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.32-0.37 กรัมต่อมิลลิกรัม pH 5-8 เมทิลลิเนบลู 220-240 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโอดีน 700-800

2.9.8.5 จับคลอไรด์

การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon GAC) วัสดุที่นำมาใช้ทำ ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม น้ำมัน ถ่านหิน เพราะมีความแข็งเมื่อถูก กระตุ่นจะให้พื้นที่ผิวที่สูง ซึ่งจะให้ขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กถึงเล็กมากที่สามารถจับคลอไรด์ ไอออน สารละลายอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้ตัวอย่างการนำไปใช้

2.9.8.6 การดูดซับโลหะหนัก

ถ่านกัมมันต์สามารถที่ดูดซับอนุภาคที่มีประจุบวกและลบที่ละลายอยู่ในน้ำได้ โดยเฉพาะอนุภาคที่มีประจุบวกพบว่าการดูดซับจะมีค่ามากไปน้อยดังนี้ $H^+ > Al^{+3} > Ca^{+2} > Li^+ > Na^+ > K^+$ และสำหรับอนุภาคที่มีประจุลบ NO_3^- จะถูกดูดดีกว่า Cl^- pH จึงมี ผลต่อการดูดซับของอนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ เนื่องจากที่ pH ต่ำจะก่อให้เกิด H^+ มากและถูกดูด แทนไอออนตัวอื่นๆ แต่กระนั้นที่ pH เปลี่ยนแปลงไม่มาก สารประกอบอนินทรีย์ก็ถูกดูดซับด้วย ค่าที่แตกต่างกันมาก เช่น สารละลายเกลือที่มี KCl และ Na_2SO_4 เกือบจะไม่ถูกดูดเลย ในขณะที่ ไอโอดีนเป็นสารที่ถูกดูดมากที่สุด โดยทั่วไปพบว่าถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพไม่ดีนักต่อการดูด ซักโลหะในสารละลายอินทรีย์สารเท่าในสารละลายอนินทรีย์สาร เนื่องจากโลหะจะแตกตัวไม่ดีใน สารละลายอินทรีย์สารโลหะหนักที่ปนอยู่ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่มีปริมาณน้อยจะถูกถ่านกัมมันต์ ดูดซับจนหมดเรียงตามลำดับต่อไปนี้ Cadmium, Chromium, Zinc, Lead, Mercury, Copper Cyanide

2.9.8.7 การดูดซับสารอินทรีย์

ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์จะสามารถดูดซับสารเคมีได้หลายชนิด โดยเฉพาะอินทรีย์ สารแล้ว แต่โดยความจริงประสิทธิภาพของการดูดซับอินทรีย์สารของถ่านกัมมันต์ผูกผันกับ สารประกอบที่ละลายน้ำได้ คือจะดูดซับได้ดีต่อสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดี และยังพบว่าอินทรีย์ สารที่ไม่เลกุลโตจะถูกดูดซับด้วยแรงที่มากกว่าโมเลกุลเล็ก เช่น เมทิลฟีนอล ถูกดูดด้วยความแรง มากกว่า ฟีนอล และ ไดเมทิลฟีนอลถูกดูดซับแรงที่สุด ตารางข้างล่างบอกถึงการดูดซับ สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ

การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้ โดยทั่วไปคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือรวมแก๊ส

ดังกล่าวก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดี ต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น

1. โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
2. สารอินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
3. ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์
4. อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
5. ความดันของแก๊ส
6. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
7. ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

F. Pinto และคณะ (2003) ศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันร่วมของถ่านหิน ชีวมวลและพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลื่อนที่ด้วยอากาศและไอน้ำ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 750-850 องศาเซลเซียส ทำให้ความเข้มข้นของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนลดลง ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นนอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้ปริมาณทาร์และไฮโดรคาร์บอนลดลง ส่วนการเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนลดลงเนื่องจากไอน้ำไปช่วยการเกิดปฏิกิริยาการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ

K.K. Lee และคณะ (2004) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกกะลามะพร้าวและถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลื่อนที่ แล้วนำมาทดสอบหาความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีค่าความว่องไวในตอนเริ่มต้นและจะมีการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเวลาผ่านไป

D.R. McIlveen-Wright และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการการเผาไหม้และกระบวนการแกซีฟิเคชันของถ่านหิน ชีวมวลและพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลื่อนที่ พบว่าเมื่อใช้ถ่านหินอย่างเดียวทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ ชาร์และเถ้าสูง แต่เมื่อผสมถ่านหินด้วยชีวมวลและหรือพลาสติกช่วยลดปริมาณซัลเฟอร์ ชาร์และเถ้าได้ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณสูง

M.P. Aznar และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดขยะพลาสติกร่วมกับถ่านหินและชีวมวล ด้วยกระบวนการแกซิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลื่อนที่โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ ตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิอยู่ในช่วง 750 – 880 องศาเซลเซียส ผลผลิตก๊าซที่ได้ออกมาจะประกอบด้วย แก๊ส ทาร์และถ่านชาร์ ซึ่งแก๊สที่ได้นั้นประกอบด้วยไฮโดรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไฮโดรคาร์บอน เช่น อีเทน เป็นต้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และถ่านชาร์ลดลง นอกจากนี้เมื่อใช้พลาสติกร่วมกับถ่านหินและชีวมวลทำให้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณชาร์และทาร์ลดลง

N. Muradov และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ในกระบวนการไพโรไลซิสแล้วมาทดสอบหาภาวะที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนและลดการเสื่อมสภาพ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์พบว่าเมื่อใช้เหล็กบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างเดียว เนื่องจากเหล็กช่วยตัวถ่านกัมมันต์ทำให้มีความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่ออกซิเจนทำให้อัตราการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

Z. Bai และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับ ถ่านกัมมันต์และตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับ ถ่านกัมมันต์ทำให้มีความว่องไวสูงกว่าใช้ถ่านกัมมันต์อย่างเดียวเนื่องจากนิกเกิลไปช่วยเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์มาวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะพื้นที่ผิว พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่พบตำแหน่งพิกเนิลออกไซด์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบในสภาวะอาร์กอน จากลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณคาร์บอนเกาะบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

H. Maoyun และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากของเสียโพลีเอทิลีนโดยแกซิฟิเคชันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO บนตัวรองรับ γ -Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไอน้ำต่อของเสียโพลีเอทิลีนเท่ากับ 1.33 พบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 94.52 เป็นร้อยละ 145.23 โดยน้ำหนัก ทาร์และชาร์ลดลงร้อยละ 12.94, 19.15 เป็นร้อยละ 2.62, 12.65 โดยน้ำหนัก ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ (H₂+CO) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.25 เป็นร้อยละ 64.35 โดยโมล แก๊สไฮโดรเจนจากร้อยละ 16.92 เป็นร้อยละ 36.98 โดยโมล แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จากร้อยละ 20.33 เป็นร้อยละ 27.37 โดย

โมล ค่า Cold gas efficiency จากร้อยละ 39.90 เป็นร้อยละ 60.67 อัตราส่วนแก๊สสังเคราะห์ (H_2/CO) อยู่ในช่วง 0.83-1.35 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นผลิตเชื้อเพลิงในกระบวนการฟิชเชอร์โทรป

ปรารงค์เนตร เฟื่องฟูง (2550) ศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พลาสติกที่นำมาศึกษา ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ ร้อยละไอน้ำ อัตราการป้อนแก๊สออกซิเจนและร้อยละของนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ในตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่ออุณหภูมิร้อยละไอน้ำ อัตราการป้อนแก๊สออกซิเจนและร้อยละของนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้ผลการทดลองดีที่สุด รองลงมา คือ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและ พอลิสไตรีน โดยร้อยละการเปลี่ยนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ คือ ร้อยละ 94 74 74 และ 59 ตามลำดับ ที่ภาวะการทดลอง คือ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 52 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 15 มิลลิลิตรต่อนาที และร้อยละ 5 ของนิกเกิลออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยน้ำหนัก

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการผลิตพลังงานจากขยะพลาสติกในกระบวนการแกซิฟิเคชันจะให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อผลิตเป็นพลังงานที่มีคุณค่า ซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้และเป็นข้อดีกว่าการกำจัดขยะด้วยวิธีอื่น โดยงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้ขยะพลาสติกเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินหรือชีวมวล ซึ่งพบว่าพลาสติกเป็นปัญหาหลักที่ทำให้แก๊สที่ได้มีทาร์ในปริมาณสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดถ่านชาร์ที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของพลาสติกด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแกซีฟิเคชันของพลาสติก ร่วมกับถ่านชาร์ โดยทำการทดลองภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำ เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวล

การเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวล ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยมีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

- 1) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
- 2) ตะแกรงร่อนขนาด 1, 2 มิลลิเมตร
- 3) ครุชีเบิล (crucible)
- 4) เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace)
- 5) เตาอบ (oven)
- 6) โกร่ง (mortar)
- 7) ช้อนตักสาร
- 8) โถดูดความชื้น

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Drop-tube fixed-bed)

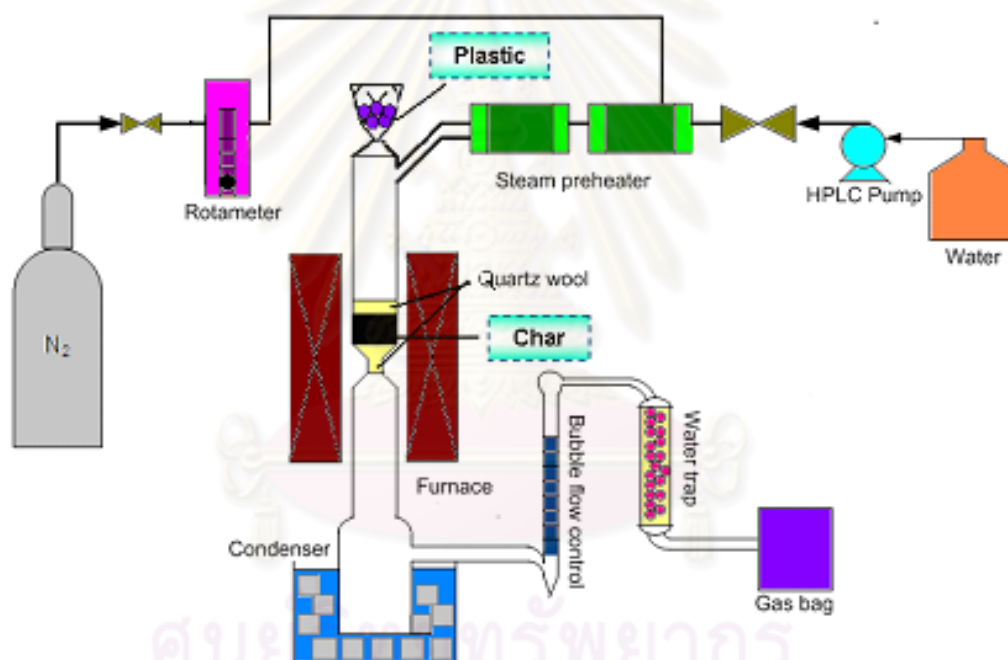
เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1) เปิดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Drop tube fixed bed) ที่ทำมาจากแก้วควอทซ์ (Quartz) ทนความร้อน มีความสูง 43.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25 มิลลิเมตร โดยมีความสูง 20 เซนติเมตร ใส่ Quartz wool รองบริเวณกึ่งกลางท่อ เพื่อรองรับถ่านชาร์จากชีวมวลให้มีความสูง 1 เซนติเมตร

- 2) อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) ของแก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลรวมให้คงที่ที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที

3) HPLC pump ทำหน้าที่ดูจ่ายน้ำเพื่อผลิตเป็นไอน้ำ โดยใช้ความเข้มข้นของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

- 4) เทอร์โมคัพเพิล (Thermocouple) ชนิด K
- 5) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) สำหรับระบบผลิตไอน้ำ
- 6) เครื่องให้ความร้อน (Tube furnace) ในการเกิดปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่ต้องการ (850 องศาเซลเซียส)
- 7) อุปกรณ์ดักจับทาร์
- 8) เครื่องควบแน่น (Condenser) ทำจากแก้ว สูง 30 เซนติเมตร
- 9) อุปกรณ์ดูดความชื้น บรรจุด้วยซิลิกาเจล (Silica gel)
- 10) ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (Sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



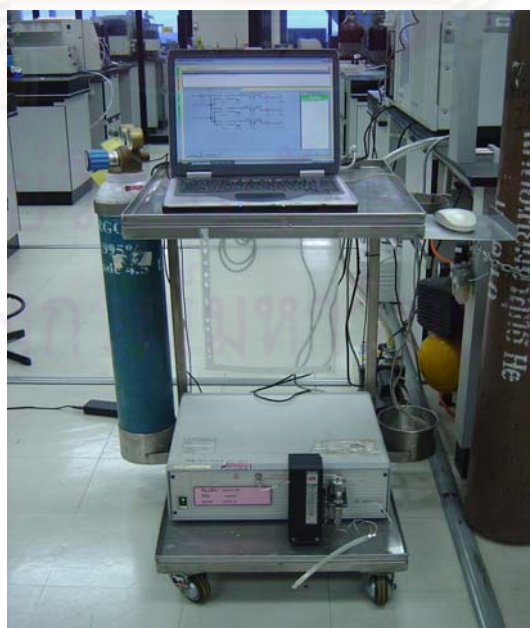
รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

3.1.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Agilent 3000A เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแสดงในรูปที่ 3.3 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สพา (Carrier gas)	แก๊สฮีเลียม (He) , แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	ประกอบด้วย 3 คอลัมน์ คือ - Molecular Sieve - Plot Q - OV-1
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	110 , 60 และ 90 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)

แก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

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

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (flow rate) ให้คงที่ โดยอัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำ และมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียม และอาร์กอน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใด ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

- ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาริสุทธ์ (reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์ แล้วดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

3.1.4 เครื่อง CHN Analyzer

เครื่อง CHN Analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ Leco เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาหาร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนของถ่านหินและชาร์ แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่อง CHN Analyzer

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 1) เม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP)
- 2) กะลาปาล์ม
- 3) ชังข้าวโพด จากศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา
- 4) ซิลิกาเจล จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
- 5) แก๊สไนโตรเจน 99.95% จาก บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 6) แอร์ 99.95% จาก บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านชาร์จากชีวมวล

3.3.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

3.3.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

3.3.2 การเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวล

- 1) นำกะลาปาล์ม ชั่งข้าวโพดมาผ่านการบดอย่างหยาบ
- 2) นำกะลาปาล์มและชั่งข้าวโพดที่ได้ไปเผาด้วยเตาเผาความร้อนสูง (Muffle furnace) โดยการหย่อน 3 ระดับ คือ เหนือปากเตาเผา (อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส) นาน 3 นาที ปากเตาเผา (อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส) นาน 3 นาทีและกึ่งกลางเตาเผา (อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส) นาน 6 นาที
- 3) จากนั้นนำถ่านชาร์จากชีวมวลที่ได้มาบดและแยกเถ้าออก
- 4) นำมาคัดขนาดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 มิลลิเมตร

3.3.3 การแกซีฟิเคชันพลาสติกโดยใช้ไอน้ำ

- 1) เตรียมเม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP)
- 2) ชั่งเม็ดพลาสติกหนัก 100 มิลลิกรัม
- 3) ใส่ quartz wool รองบริเวณกึ่งกลางท่อ เพื่อรองรับเม็ดพลาสติกขณะเกิดปฏิกิริยา
- 4) นำเม็ดพลาสติกมาใส่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.2
- 5) จากนั้นเปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในท่อทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เปิดเตาเผาให้มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส
- 6) ส่วนไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ด้วย HPLC pump
- 7) จากนั้นทำการปล่อยเม็ดพลาสติกจากด้านบน
- 8) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เข้าส่วนการควบแน่น ส่วนดักจับความชื้น
- 9) ทำการเก็บแก๊สที่ได้ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
- 10) ปิดเครื่องปั้มน้ำ ลดอุณหภูมิระบบผลิตไอน้ำ และเตาให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์

3.3.4 การแก๊สพีเคชันพลาสติกโดยใช้ถ่านกัมมันต์

- 1) เตรียมเม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP)
- 2) ชั่งเม็ดพลาสติกหนัก 100 มิลลิกรัม
- 3) ใส่ quartz wool รองบริเวณกึ่งกลางท่อ เพื่อรองรับเม็ดพลาสติกขณะเกิดปฏิกิริยาและบรรจุถ่านชาร์ให้มีความสูง 1 เซนติเมตร ตอนแรกถ่านชาร์ที่ใช้เป็นถ่านกัมมันต์
- 4) นำเม็ดพลาสติกมาใส่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.2
- 5) จากนั้นเปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในท่อและถ่านชาร์ออกทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เปิดเตาเผาให้มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส
- 6) ส่วนไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ด้วย HPLC pump ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ถ่านกัมมันต์สลายตัวคงที่ (เพราะถ่านกัมมันต์ที่เราทำการทดลองมีการสลายตัว) แล้วทำการเก็บแก๊สครั้งแรก 10 นาที (แก๊สที่ได้นี้ใช้ในการตรวจสอบผลของแก๊สที่ออกมาจากการสลายตัวของถ่านกัมมันต์)
- 7) จากนั้นทำการปล่อยเม็ดพลาสติกจากด้านบน
- 8) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เข้าสู่การควบแน่น ส่วนดักจับความชื้น
- 9) ทำการเก็บแก๊สที่ได้ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแล้วนำแก๊สแต่ละชนิดที่ได้มาหักลบกับครั้งแรก ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกมาจึงเป็นแก๊สที่ได้จากพลาสติกอย่างเดียว
- 10) ปิดเครื่องปั๊มไอน้ำ ลดอุณหภูมิระบบผลิตไอน้ำ และเตาให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์
- 11) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิจริง จึงเก็บถ่านชาร์ที่เหลือ นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป

3.3.5 การแก๊สพีเคชันพลาสติกโดยใช้ไพโรไลซ์ชาร์จากชีวมวล

- 1) เตรียมเม็ดพลาสติก ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP)
- 2) ชั่งเม็ดพลาสติกหนัก 100 มิลลิกรัม
- 3) ใส่ quartz wool รองบริเวณกึ่งกลางท่อ เพื่อรองรับเม็ดพลาสติกขณะเกิดปฏิกิริยาและบรรจุถ่านชาร์ให้มีความสูง 1 เซนติเมตร

- 4) นำเม็ดพลาสติกมาใส่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.2
- 5) จากนั้นเปิดแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในท่อและถ่านชาร์ออกทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เปิดเตาเผาให้มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส
- 6) ส่วนไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ด้วย HPLC pump ทิ้งไว้ 15 นาที
- 7) จากนั้นทำการปล่อยเม็ดพลาสติกจากด้านบน
- 8) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เข้าส่วนการควบแน่น ส่วนดักจับความชื้น
- 9) ทำการเก็บแก๊สที่ได้ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแล้วนำแก๊สแต่ละถุงมาหักลบกับผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้นั้นมาจากถ่านชาร์อย่างเดียวที่เวลาเดียวกัน ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกมาจึงเป็นแก๊สที่ได้จากพลาสติกอย่างเดียวหรือลดผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการสลายตัวของถ่านชาร์
- 10) ปิดเครื่องปั้มน้ำ ลดอุณหภูมิระบบผลิตไอน้ำ และเตาให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์
- 11) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง จึงเก็บถ่านชาร์ที่เหลือ นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยส่วนใหญ่ไม่นิยมศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปพลาสติกให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง เนื่องจากพลาสติกมีปริมาณสารระเหยสูงและคาร์บอนคงตัวต่ำหรือไม่มีเลย จึงทำให้พลาสติกไม่สามารถแก๊สไฟได้ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำมันทาร์ในปริมาณสูงและผลิตภัณฑ์แก๊สปริมาณต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแก๊สไฟเคชันของพลาสติกโดยใช้ไพโรไลซิสจากชีวมวลด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยพลาสติกและถ่านชาร์ที่นำมาศึกษา คือ พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิสไตรีน (PS) ถ่านชาร์เตรียมจากชังข้าวโพดและกะลาปาล์ม

โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์ ส่วนที่ 2 คือผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและถ่านชาร์ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และส่วนที่ 4 คือผลการศึกษาการแก๊สไฟเคชันพลาสติกโดยใช้ไพโรไลซิสจากชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ได้แก่ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

4.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์

รูปที่ 4.1 แสดงผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์ที่ผ่านการไพโรไลซิส พบว่ากะลาปาล์มที่ได้หลังจากบดอย่างหยาบมีลักษณะเหมือนกะลามะพร้าวที่แตกเป็นชิ้นเล็กๆ สีน้ำตาลเข้มและแข็ง ส่วนชังข้าวโพดที่ได้หลังจากบดอย่างหยาบมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ สีเหลือง และเมื่อนำมาผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที พบว่าถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากชังข้าวโพดมีลักษณะสีดำ แข็งและเปราะ

	ชีวมวลที่ได้หลังจากบด อย่างหยาบ	ชีวมวลที่ผ่านการ ไพโรไลซิส
กะลาปาล์ม		
ซังข้าวโพด		

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์ที่ผ่านการไพโรไลซิส

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและถ่านชาร์

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ตามมาตรฐาน ASTM D3173-D3175 ซึ่งแสดงปริมาณ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวของพลาสติก ชีวมวลและถ่าน ชาร์ แสดงในตารางที่ 4.1 และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D5291- D5296 ด้วยเครื่อง CHN Analysis ซึ่งวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนของชีวมวล และถ่านชาร์ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของพลาสติก ชีวมวลและ ถ่านชาร์

วิเคราะห์แบบประมาณ	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น (Moisture)	เถ้า (Ash)	สารระเหย (Volatile Matter)	คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)
พอลิโพรพิลีน	-	-	100	-
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	-	-	100	-
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	-	-	100	-
พอลิสไตรีน	-	-	99.8	0.2
กะลาปาล์ม	6.0	5.4	55.4	33.2
ซังข้าวโพด	6.9	1.9	70.1	21.1
ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม	2.9	6.3	20.7	70.1
ถ่านชาร์จากซังข้าวโพด	1.5	2.0	23.0	73.5

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของพลาสติก ถ่านชาร์จากชีวมวลและถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (daf)*	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ไนโตรเจน (N)	ออกซิเจน (O)
พอลิโพรพิลีน	85.2	14.8	-	-
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	85.4	14.6	-	-
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	85.6	14.4	-	-
พอลิสไตรีน	92.0	8.0	-	-
ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม	73.8	1.4	0.5	24.3
ถ่านชาร์จาก ชั่งข้าวโพด	84.0	1.5	0.6	13.9
ถ่านกัมมันต์	73.2	1.4	0.2	25.2

*daf = dry ash free

4.3 สมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์ที่ผ่านการไพโรไลซิสและถ่านชาร์ที่ผ่านกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยเทคนิค Brunauer, Emmett, Teller (BET) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มที่ผ่านการไพโรไลซิสมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 279.78 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มากกว่าถ่านชาร์จากชั่งข้าวโพดที่ผ่านการไพโรไลซิสมีพื้นที่ผิวเพียง 39.38 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.02 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

เมื่อนำถ่านชาร์มากระตุ้นด้วยไอน้ำที่ภาวะอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่ามีพื้นที่ผิวและมีปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น โดยถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 744.91 เป็น 891.62 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.39 เป็น 0.42 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านชาร์จากกะลาปาล์มมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 279.78 เป็น 450.47 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.13 เป็น 0.22 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ถ่านชาร์จากชั่งข้าวโพดมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 39.38 เป็น 384.12 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 0.18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยคาร์บอนอะตอมทำปฏิกิริยากับน้ำได้แก๊สออกไซด์ของคาร์บอนแพร่ออกจากผิวของคาร์บอน จึงส่งผลให้ถ่านชาร์หลังจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากขึ้น [Abdel et al, 2005]

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET surface area) ของถ่านชาร์

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
ถ่านกัมมันต์	744.91	0.39
ถ่านกะลาปาล์ม*	279.78	0.13
ถ่านซังข้าวโพด*	39.38	0.02
ถ่านกัมมันต์**	891.62	0.42
ถ่านกะลาปาล์ม**	450.47	0.22
ถ่านซังข้าวโพด**	384.12	0.18

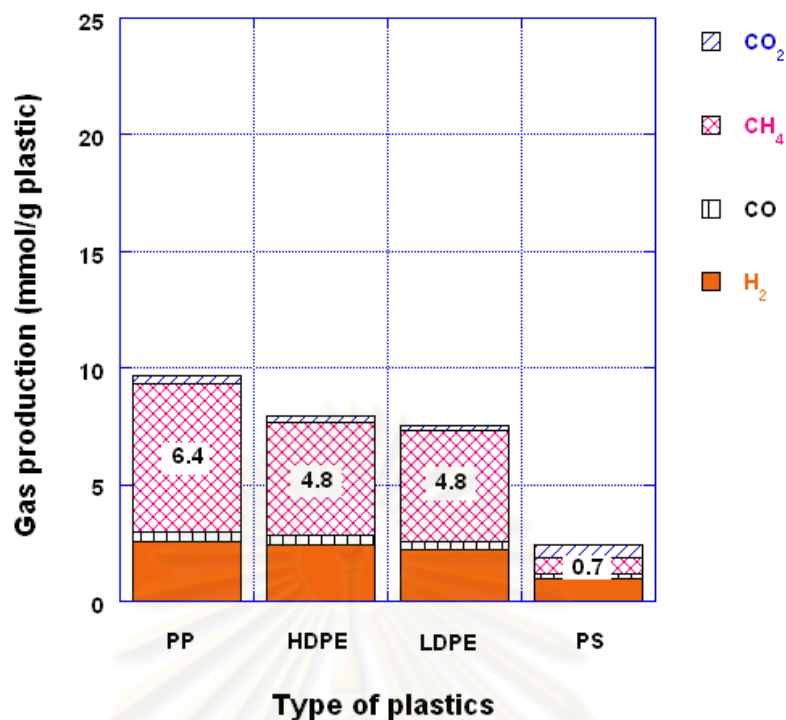
*หลังการไพโรไลซิส

**หลังการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (ก่อนการปล่อยเม็ดพลาสติก)

4.4 แกกซีพีเคชันของพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

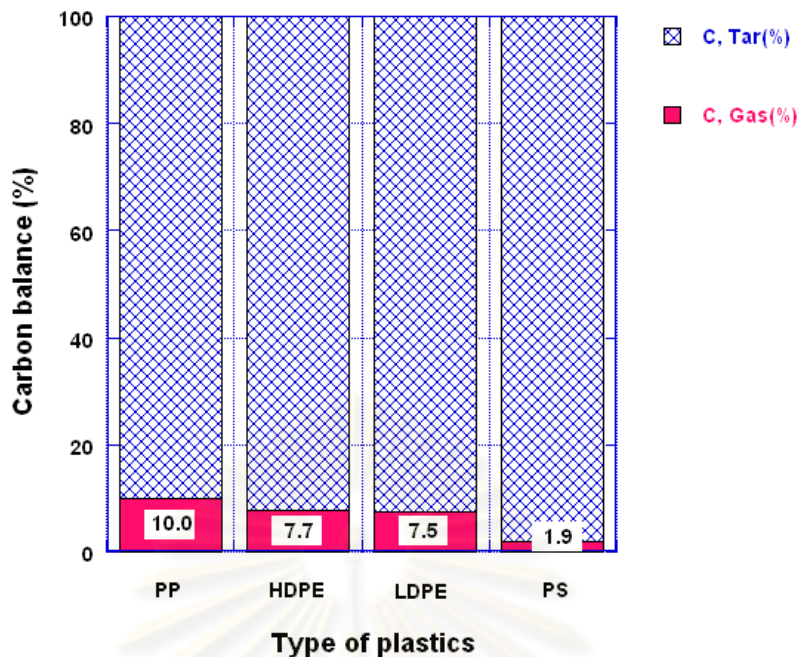
4.4.1 การแกกซีพีเคชันชนิดพลาสติกด้วยไอน้ำของ กรณีไมใส่ถ่านชาร์จากชีวมวล

รูปที่ 4.2 แสดงผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากจากกระบวนการแกกซีพีเคชันด้วยไอน้ำ โดยไมใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าชนิดของพลาสติกมีผลต่อสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยพอลิโพรพิลีนให้ปริมาณมีเทนมากกว่าพอลิเอทิลีนจาก 6.4 เป็น 4.8 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบสายโซ่กิ่งที่มีหมู่ CH_3 เกาะอยู่ที่สายโซ่หลัก แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่บริเวณกิ่งก้านนั้นจะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จะเกิดการแตกตัวให้ความร้อนเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งจะทำให้อนุมูลอิสระดังกล่าวไปดึงไฮโดรเจนอะตอมที่บริเวณ tertiary hydrogen บนสายโซ่หลักของพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮโดรเจน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ต่อเนื่องกันไปจนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนขนาดเล็กลง [ประจักษ์ รัตน์ แต่ภักดี, 2547] ดังนั้นพอลิโพรพิลีนจึงแตกตัวได้ง่ายกว่าโครงสร้างของพอลิเอทิลีน ส่วนพอลิสไตรีนมีปริมาณแก๊สน้อยที่สุด เนื่องจากพอลิสไตรีนมีโครงสร้างที่มีหมู่เบนซีนเกาะอยู่ที่สายโซ่เมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวได้ง่ายกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่กิ่งและพอลิเอทิลีนสายโซ่ตรง



รูปที่ 4.2 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากจากการกระบวนการแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.3 แสดงผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีพีเคชั่นด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าชนิดของพลาสติกมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นแก๊สโดยพอลิโพรพิลีนให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุดร้อยละ 10.0 รองลงมาพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงร้อยละ 7.7 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 7.5 และพอลิสไตรีนน้อยที่สุดร้อยละ 1.9 โดยโมลตามลำดับ พอลิสไตรีนให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สน้อยสามารถอธิบายได้ว่าแรดิคัลที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีนในตอนเริ่มต้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยา Repolymerization ที่อุณหภูมิสูงต่อไปเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันทาร์นั่นเอง อย่างไรก็ตามสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นไปเป็นน้ำมันทาร์ เนื่องจากพลาสติกมีปริมาณสารระเหยสูงและคาร์บอนคงตัวดำหรือไม่มีเลย [ปรารงค์เนตร เฟื่องฟูง, 2550] จึงทำให้พลาสติกไม่สามารถแกซีฟายได้ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำมันทาร์ในปริมาณสูงและผลิตภัณฑ์แก๊สปริมาณต่ำ

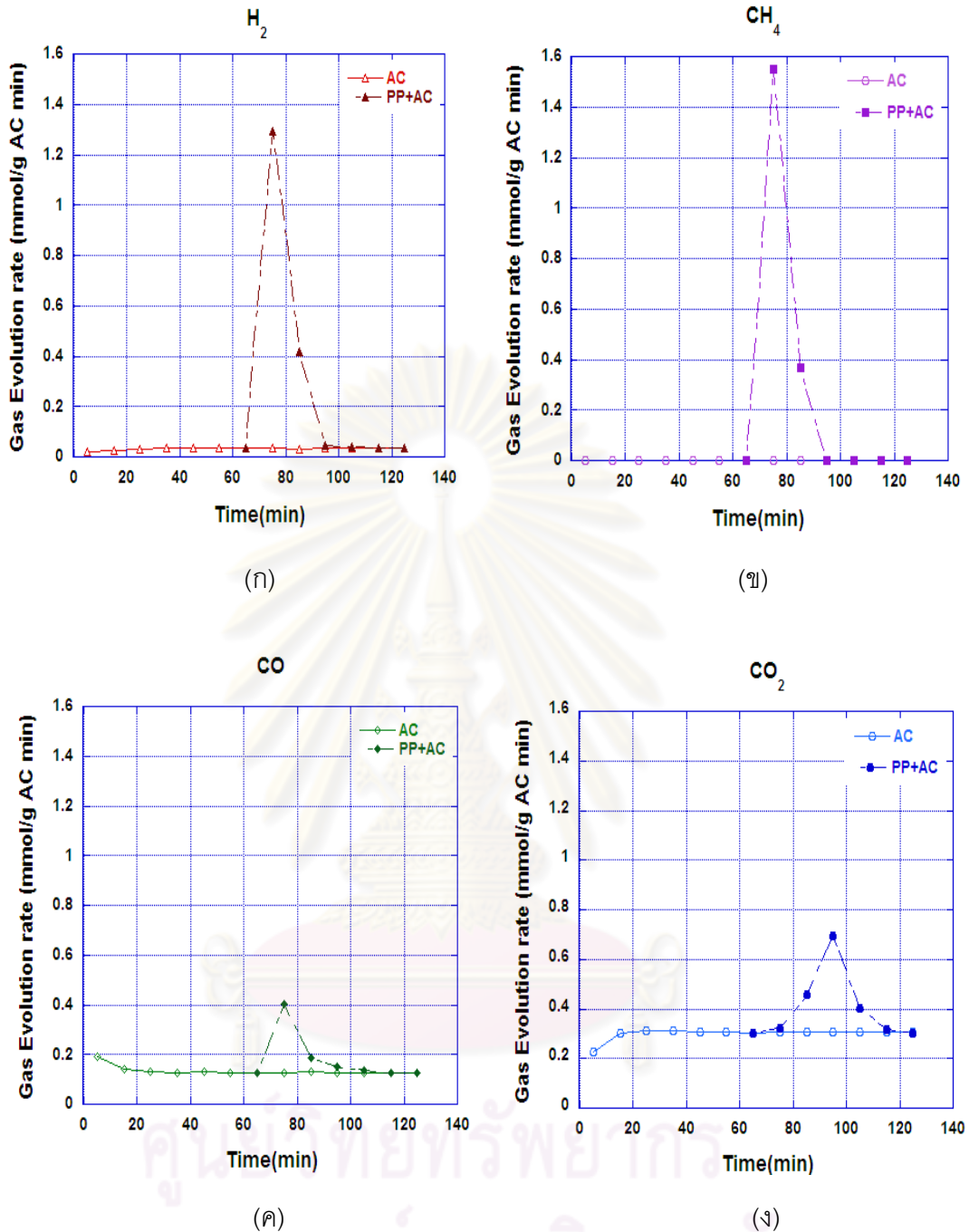


รูปที่ 4.3 ผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่ถ่านซาร์จากชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

4.4.2 แกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำของถ่านซาร์

4.4.2.1 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านกัมมันต์ กรณีไม่ใส่พลาสติก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

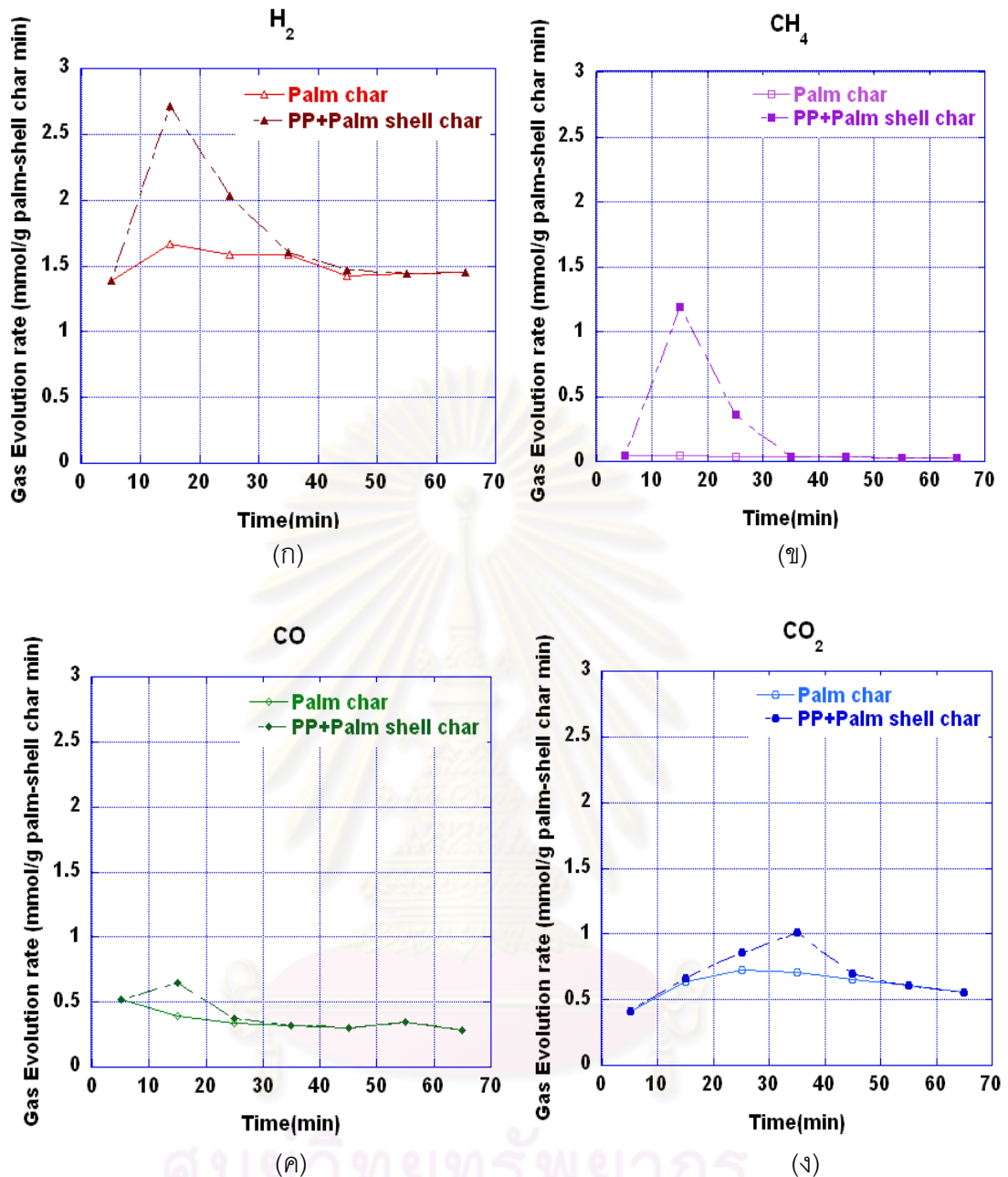


รูปที่ 4.4 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

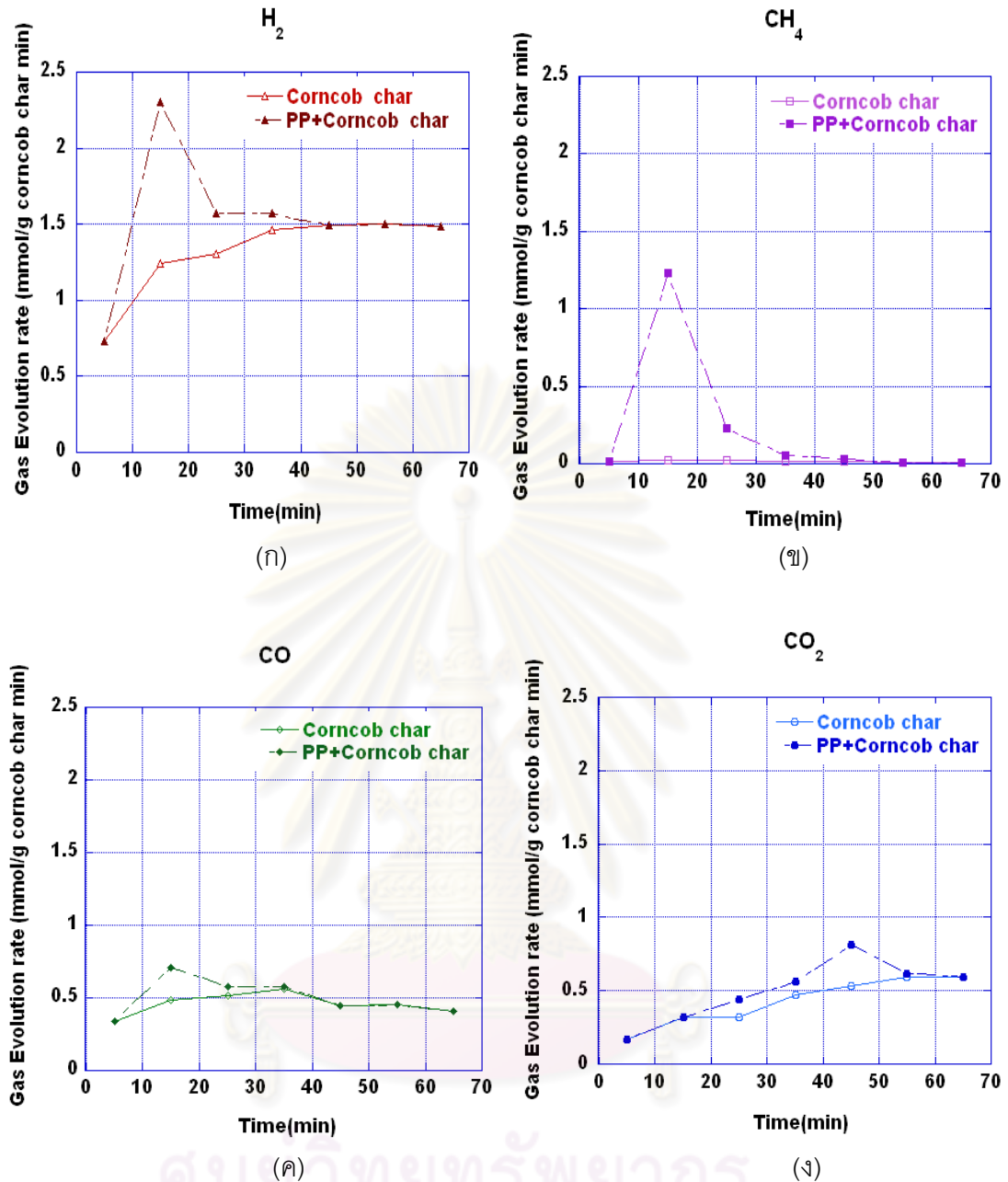
รูปที่ 4.4 แสดงผลของเวลาต่อการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์จากระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติก ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าการแกซิฟิเคชันของถ่านกัมมันต์ ในช่วงแรกถ่านกัมมันต์มีการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดไม่คงที่ หลังจากทำปฏิกิริยา ผ่านไปเป็นเวลา 60 นาที พบว่าการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สค่อนข้างคงที่ ดังนั้นแกซิฟิเคชัน พลาสติกร่วมกับถ่านกัมมันต์ทุกครั้งต้องทำการเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สสูงแรกที่เวลา 60 นาที ก่อนทำการปล่อยพลาสติกเพื่อใช้ในการตรวจสอบผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกมาจากการสลายตัวของ ถ่านกัมมันต์และนำข้อมูลมาหักลบกับผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการปล่อยพอลิโพรพิลีนลงมา ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงมาจากพอลิโพรพิลีนอย่างเดียวหรือลดผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการ สลายตัวของถ่านกัมมันต์

4.4.2.2 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านชาร์จาก กะลาปาล์มและซังข้าวโพด กรณีไม่ใส่พลาสติก

รูปที่ 4.5 - 4.6 แสดงผลของเวลาต่อการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอน มอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์กะลาปาล์มและถ่านชาร์ซังข้าวโพดจากระบวนการ แกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อัตราการไหลของแก๊ส ไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าการแกซิฟิเคชันของ ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพด มีการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ไม่คงที่ในช่วงเวลาต่างๆ ดังนั้นการแกซิฟิเคชันพลาสติกร่วมกับถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและ พลาสติกร่วมกับถ่านชาร์จากซังข้าวโพดทุกครั้ง ต้องทำการเก็บแก๊สที่เวลาเดียวกันกับการ แกซิฟิเคชันของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพดเมื่อไม่ใส่พลาสติก แล้วนำ จุดแต่ละจุดที่เวลาเดียวกันมาหักลบกันผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ก็นำมาจากพลาสติกอย่างเดียวหรือ ลดผลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการสลายตัวของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จาก ซังข้าวโพด



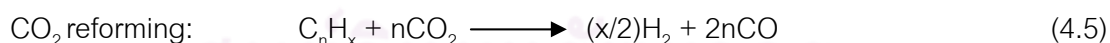
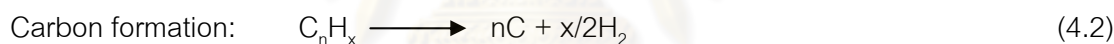
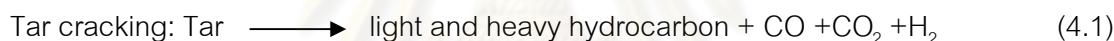
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์กะลาปาล์มจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตร ต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

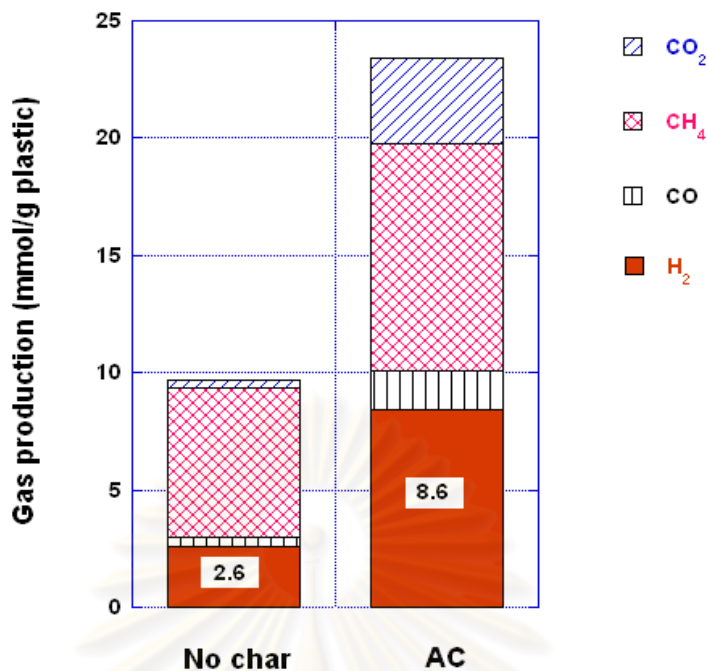


รูปที่ 4.6 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สมีเทน (ค) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านชาร์ซึ่งทำจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยไม่ใส่พลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที และร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

4.4.3 การใส่ถ่านซาร์ในการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ

รูปที่ 4.7 แสดงผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ (ตัวแทนถ่านซาร์) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าการใส่ถ่านกัมมันต์มีผลต่อปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ใส่มีพื้นที่ผิวสูงเท่ากับ 744.9 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) ได้ดีขึ้น [Xiao et al, 2007] แสดงดังสมการที่ (4.1) ในทำนองเดียวกันสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนฟอร์เมชัน (Carbon formation) ดังสมการที่ (4.2) จะได้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 2.6 เป็น 8.5 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming) [Ahmed et al, 2009 and Pinto et al, 2003] และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ reforming) แสดงดังสมการที่ (4.3) ถึง (4.5)





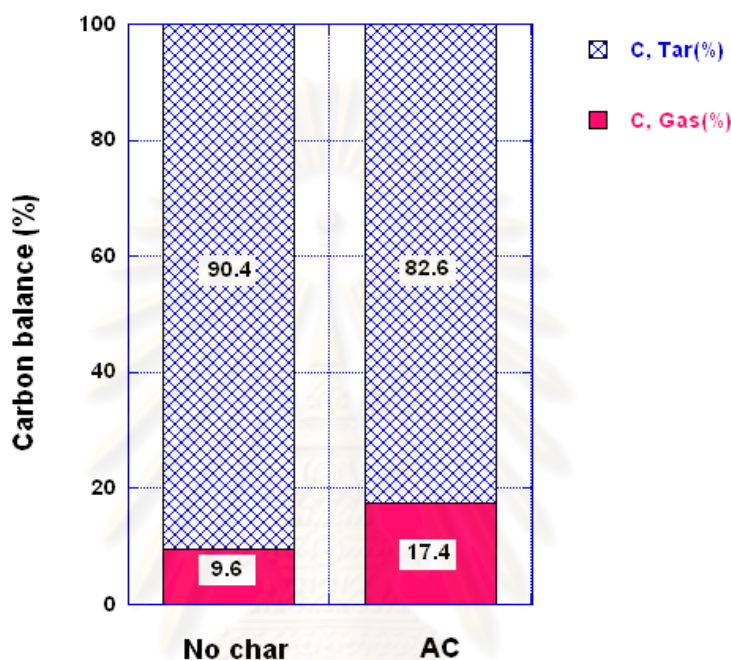
รูปที่ 4.7 ผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีพีเคชั้นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.8 แสดงผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีพีเคชั้นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าการใส่ถ่านกัมมันต์ จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.6 เป็น 17.4 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มีปริมาณลดลงจากร้อยละ 90.4 เป็น 82.6 แสดงให้เห็นว่าการใส่ถ่านกัมมันต์สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) ไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยแสดงดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาแกซีพีเคชั้นของพลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) [Xiao et al, 2007] และถ่านกัมมันต์ดังสมการที่ (4.6) ถึง (4.8)





ดังนั้นผลการทดลองนี้บ่งชี้ได้ว่าองค์ประกอบของคาร์บอนที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ อาจส่งผลช่วยเร่งประสิทธิภาพการแตกตัวของน้ำมันทาร์ได้ คาดว่าน่าจะให้ผลเช่นเดียวกับคาร์บอนในถ่านชาร์จากชีวมวล

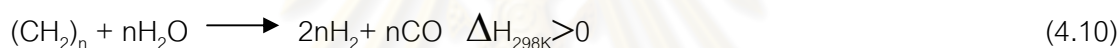
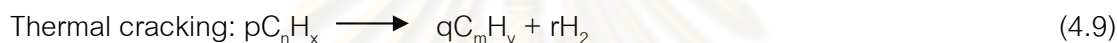


รูปที่ 4.8 ผลของการใส่ถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาที และร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

4.4.4 อุณหภูมิในการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ

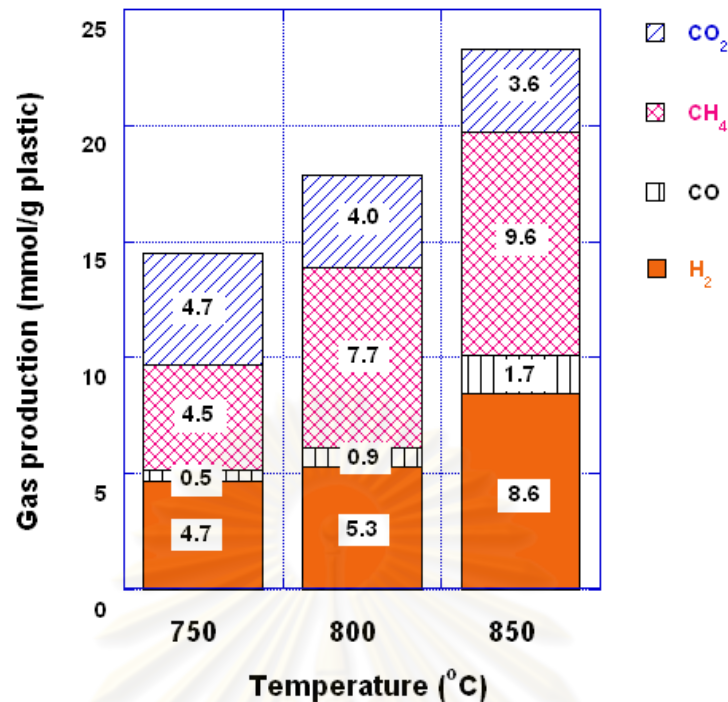
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชัน เนื่องจากอุณหภูมิสามารถกำหนดการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น และน้ำมันทาร์ลดลง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการแกซีฟิเคชันพลาสติก ที่อุณหภูมิ 750 – 850 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.9 แสดงผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละ

ของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 750 เป็น 850 องศาเซลเซียส ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 4.7 เป็น 8.5 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติกและปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 4.5 เป็น 9.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติกตามลำดับ [Pinto et al, 2003 and Aznar et al, 2006] สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์กลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้นดังสมการ (4.7) (4.8) และ (4.9) นอกจากนี้ปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงแสดงดังสมการ (4.4) เพราะเป็นปฏิกิริยาคูดพลังงาน ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 4.7 เป็น 3.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติกในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 9.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก เนื่องจากการแกซิฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ (Plastic steam gasification) [He et al, 2009] จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากสมการที่ (4.10)



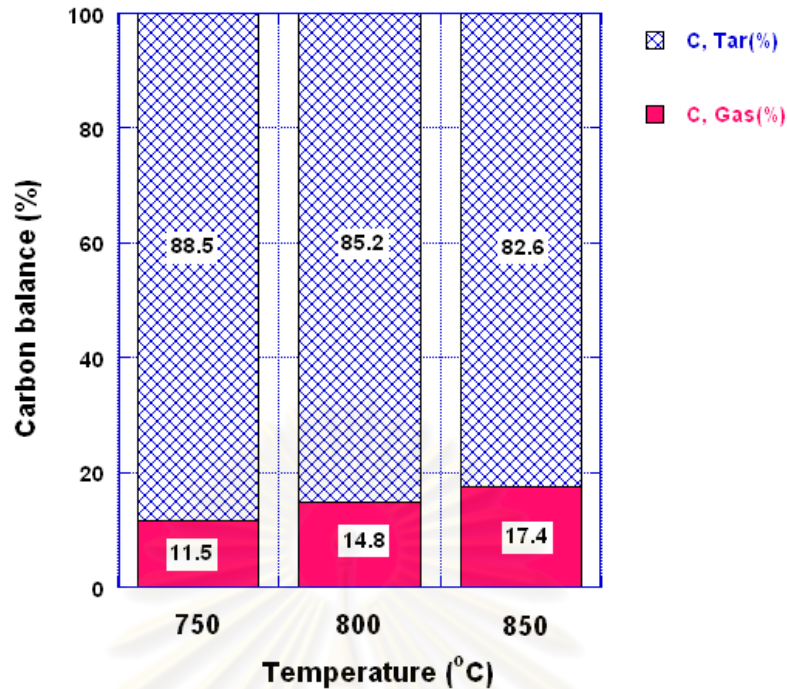
การเพิ่มของผลิตภัณฑ์แก๊สสอดคล้องกับการเพิ่มของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้หลายเหตุผล เช่น (i) ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการแกซิฟิเคชันโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ii) การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แก๊สอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาฟรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ [Franco et al, 2003]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



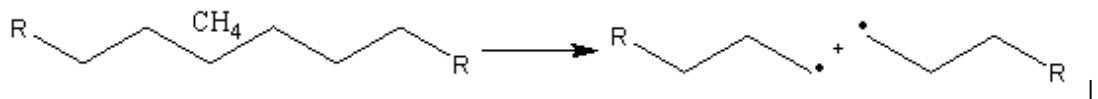
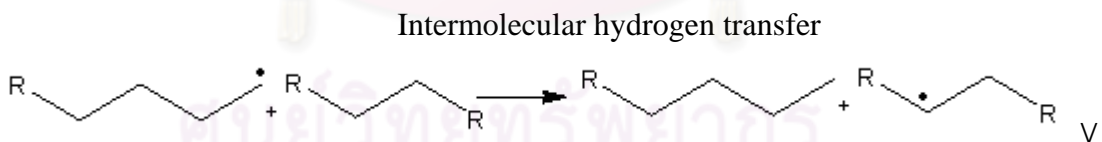
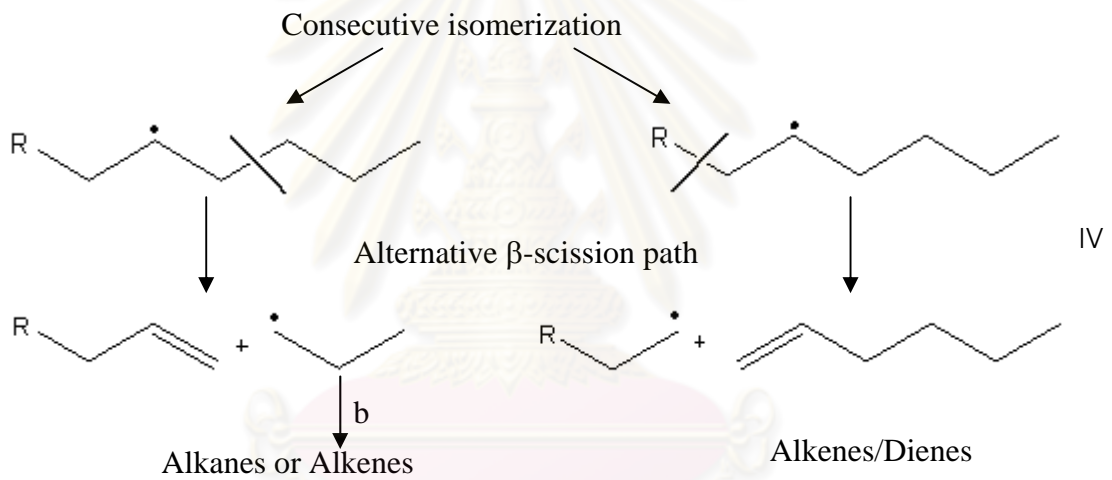
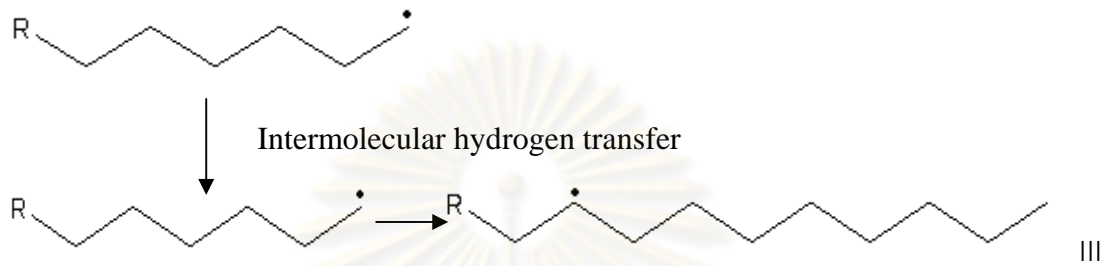
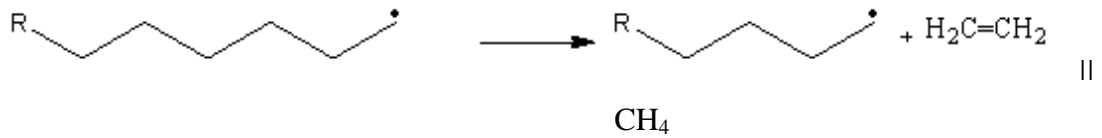
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ จากการแกซีพีเคชั่นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการการสลายตัว ซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี ทำให้ปริมาณทาร์เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์และเกิดการแตกตัวเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบาขึ้น

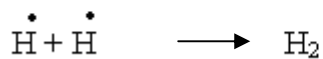


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

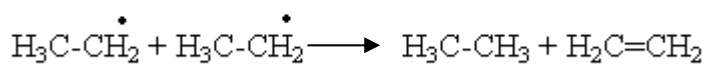
จากงานวิจัยของ F.J. Mastral และคณะได้แสดงกลไกการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน (ตัวอย่างพลาสติก) ขั้นแรก (Initiation) จะเกิดการแตกตัวจากสายโซ่ยาวเป็นมอนอเมอร์ที่สั้นลงที่มีอนุมูลอิสระ (Radicals) เกิดขึ้นดังสมการ I และสายมอนอเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระในขั้นดำเนินการ (Propagation) จะเกิดการแตกตัวเป็นสายมอนอเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระของเอทิลีนและจะปลดปล่อยแก๊สมีเทนออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ II ถึง V ซึ่งสายมอนอเมอร์สามารถดึงโมเลกุลภายในของไฮโดรเจน (Intermolecular hydrogen transfer) จะได้ Alkanes หรือ Alkenes/Dienes ขั้นตอนสุดท้ายส่วนที่เป็นอนุมูลอิสระจะเกิดการรวมกัน (Recombination) โดยหมู่อนุมูลอิสระของเมทิลจะรวมตัวกันเป็นหมู่อัลเคนและหมู่อนุมูลอิสระของไฮโดรเจนรวมตัวกันเป็นแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ VI และเมื่อหมู่อิสระของอัลเคนรวมตัวกันจะได้อัลเคนและอัลซีน ซึ่งกลไกดังกล่าวสนับสนุนการแตกตัวทางความร้อนของพลาสติก ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ให้เป็นมอนอเมอร์รวมทั้งระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวจะได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนออกมา แสดงดังรูปที่ 4.11

Initiation**Propagation****Termination**

Recombination



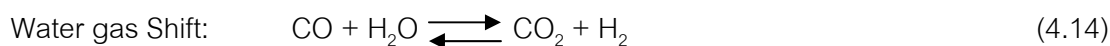
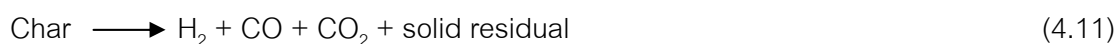
disproportionation

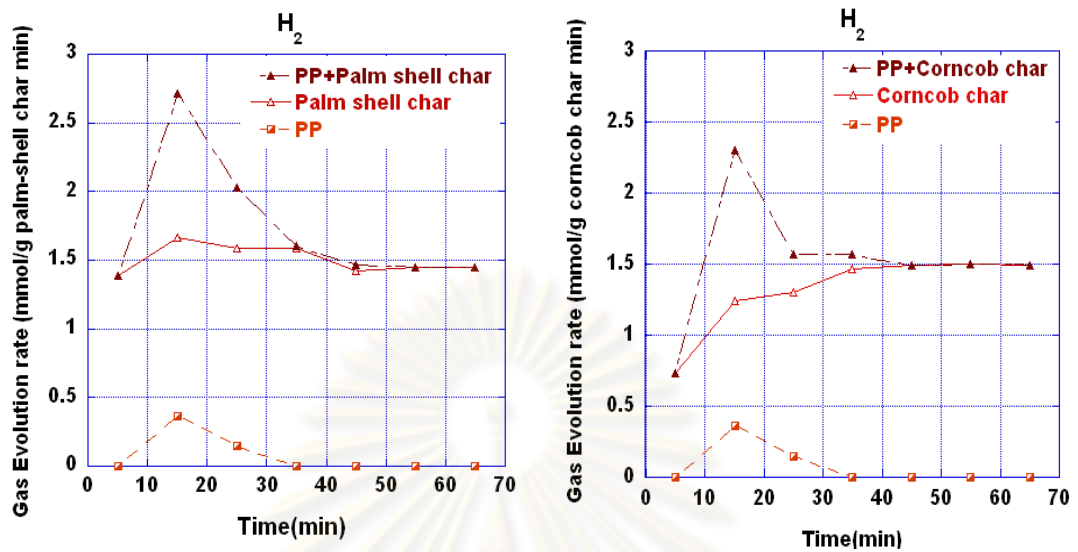
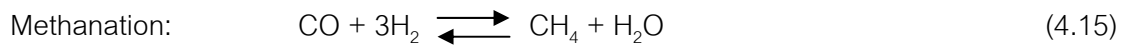


รูปที่ 4.11 แสดงกลไกการแตกตัวของพอลิเอทิลีน [F.J. Mastral et al., 2002]

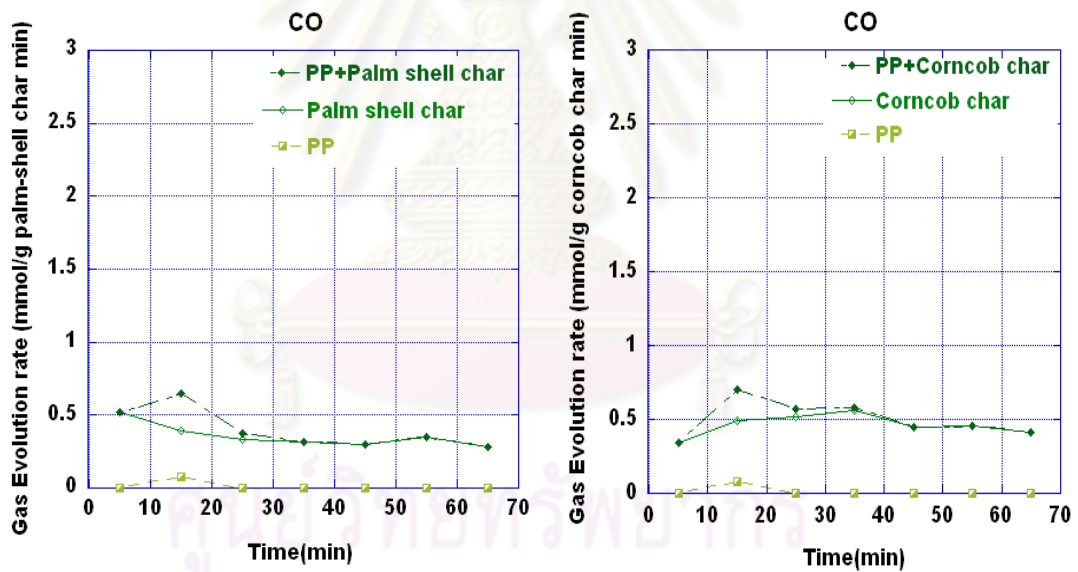
4.4.5 ชนิดถ่านชาร์จากชีวมวลในการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ

รูปที่ 4.12 แสดงผลของเวลาต่อการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์จากระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 มิลลิลิตร ต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแกซีฟิเคชันของพลาสติก ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม ถ่านชาร์จากซังข้าวโพด พลาสติกร่วมกับถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม พลาสติกร่วมกับถ่านชาร์จากซังข้าวโพด พบว่าเมื่อแกซีฟิเคชันของพลาสติกจะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน ในช่วงเวลา 5-35 นาทีและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง แล้วทำการเปรียบเทียบกับถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพดในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่าช่วงเวลาการสลายตัวเป็นแก๊สมากกว่า อันเนื่องมาจากพลาสติกมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อถูกความร้อนจะเกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเร็วกว่าถ่านชาร์จากชีวมวล ดังนั้นในการทดลองจึงต้องการแกซีฟายถ่านชาร์จากชีวมวลร่วมกับพลาสติก โดยใช้ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม ถ่านชาร์จากซังข้าวโพดร่วมกับพลาสติกจะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันของพลาสติกแสดงดังสมการที่ (4.6) ถึง (4.8) ร่วมกับการแกซีฟิเคชันของถ่านชาร์ ดังสมการที่ (4.11) และแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ ดังสมการที่ (4.10) พร้อมทั้งการแตกตัวด้วยความร้อน ดังสมการที่ (4.9) กรณีที่ใช้พลาสติกอย่างเดียวแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลา 5-15 นาที เมื่อใช้ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม ถ่านชาร์จากซังข้าวโพดร่วมกับพลาสติกแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและปฏิกิริยา Water gas ดังสมการที่ (4.4) และ (4.12) หลังจากช่วงเวลา 15 นาทีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Water gas และปฏิกิริยา Water gas Shift ดังสมการที่ (4.13) และ (4.14) ส่วนแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 5-35 นาทีเนื่องจากกระบวนการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Depolymerization) ให้เป็นมอนอเมอร์จะได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนออกมารวมทั้งเกิด ปฏิกิริยามีเทนชัน (Methanation) ดังสมการที่ (4.15) และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแก๊สลดลง



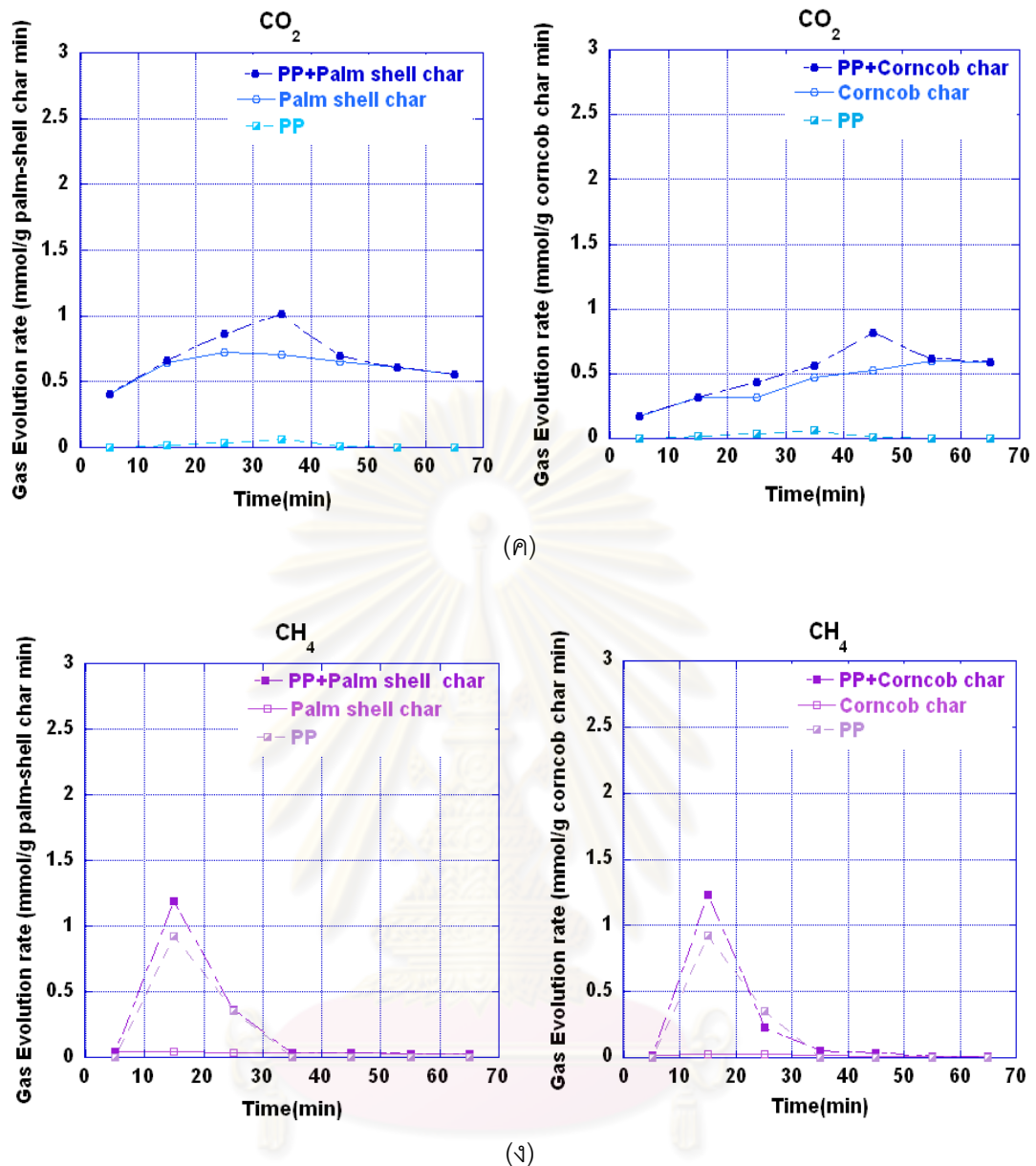


(ก)



(ข)

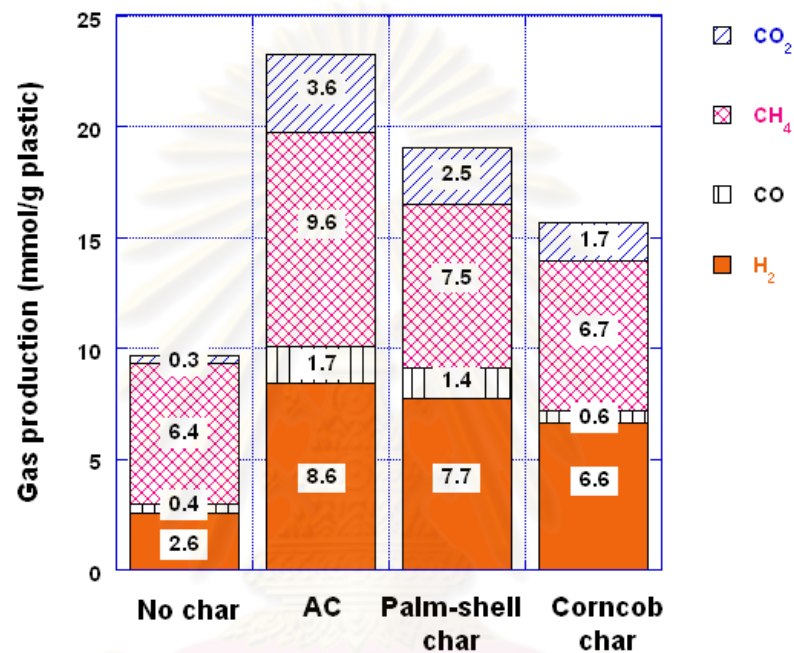
รูปที่ 4.12 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) แก๊สมีเทน จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.12 ผลของเวลาที่มีต่อการปลดปล่อย (ก) แก๊สไฮโดรเจน (ข) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ค) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) แก๊สมีเทน จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร(ต่อ)

นอกจากนี้รูปที่ 4.13 แสดงผลของชนิดถ่านชาร์ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร จากการเปรียบเทียบการใส่และไม่ใส่ถ่านชาร์ พบว่าการแกซีฟิเคชันของพลาสติกโดย

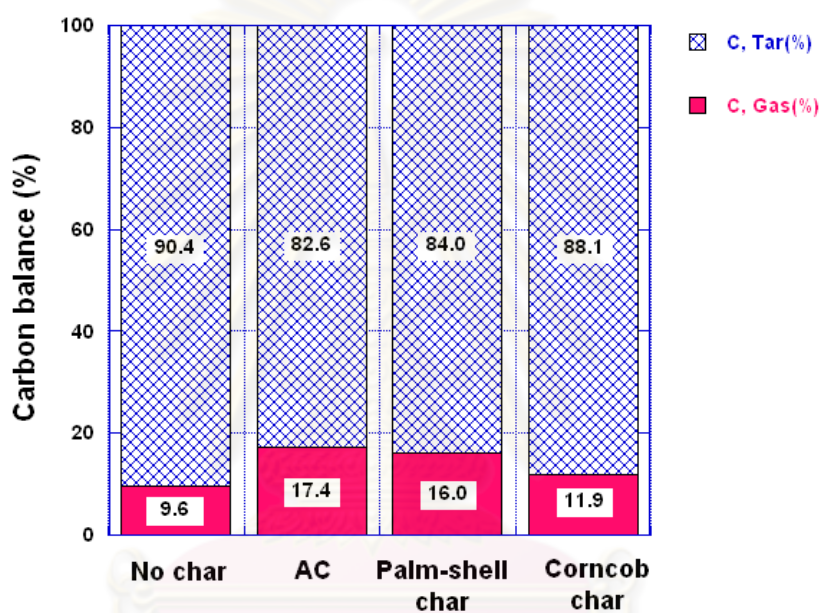
ไม่ได้ใส่ถ่านชาร์จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนเพียง 2.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก แต่เมื่อใส่ถ่านกัมมันต์ ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากขี้ข้าวโพด ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 8.6, 7.7 และ 6.6 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก โดยเกิดจากปฏิกิริยา Water gas Shift ดังสมการที่ (4.12) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นดังสมการที่ (4.4) ส่วนปริมาณแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 6.4 เป็น 9.6, 7.5 และ 6.7 มิลลิโมลต่อกรัมพลาสติก เนื่องจากปฏิกิริยามีเทนชัน แสดงดังสมการที่ (4.13) [Franco et al, 2003]



รูปที่ 4.13 ผลของชนิดถ่านชาร์ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีพีเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.14 แสดงผลของชนิดถ่านชาร์ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีพีเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าเมื่อใส่ถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มากที่สุดจากร้อยละ 90.4 เป็นร้อยละ 82.6 รองลงมาถ่านชาร์จากกะลาปาล์มร้อยละ 84 และถ่านชาร์จากขี้ข้าวโพดร้อยละ 88.1 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าถ่านชาร์จากกะลาปาล์มมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ และมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์จากขี้ข้าวโพด

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพดพบว่า การใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มจะให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นแก๊สสูงกว่าถ่านชาร์จากซังข้าวโพด เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของถ่านชาร์ที่นำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area) พบว่าถ่านชาร์จากกะลาปาล์มมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 450.47 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.22 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมมากกว่าถ่านซังข้าวโพดที่มีพื้นที่ผิว 384.12 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.18 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ดังนั้นถ่านชาร์ที่มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก จึงทำให้สารตั้งต้นแตกตัวได้ดี [สุรชัย สุวรรณแสงชูโต, 2542]

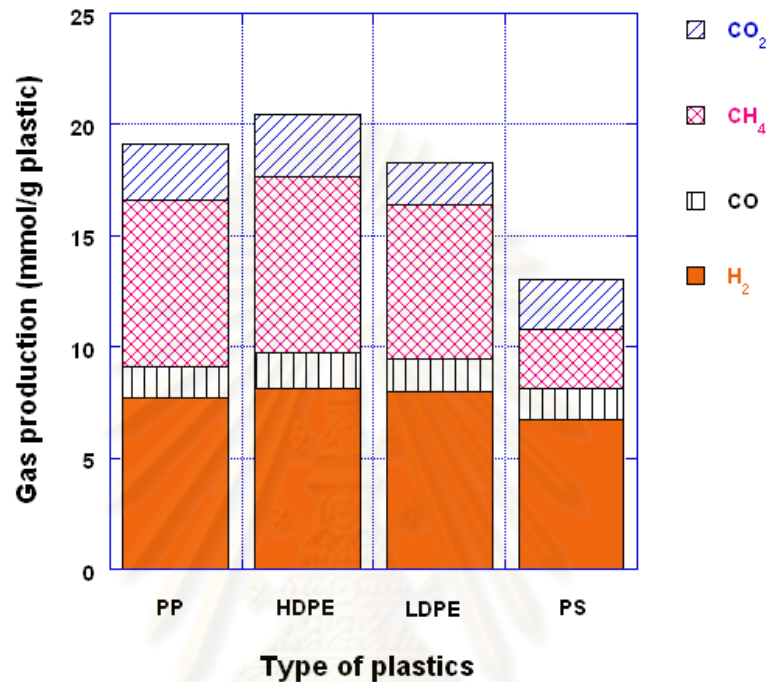


รูปที่ 4.14 ผลของชนิดถ่านชาร์ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ จากการแกซีฟิเคชันพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาที และร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

4.4.6 การแกซีฟิเคชันชนิดพลาสติกด้วยไอน้ำ กรณีใช้ถ่านชาร์จากชีวมวล

รูปที่ 4.15 แสดงผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด จากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาที และร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าชนิดพลาสติกทำให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น โดยพอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง ชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิสไตรีนให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน

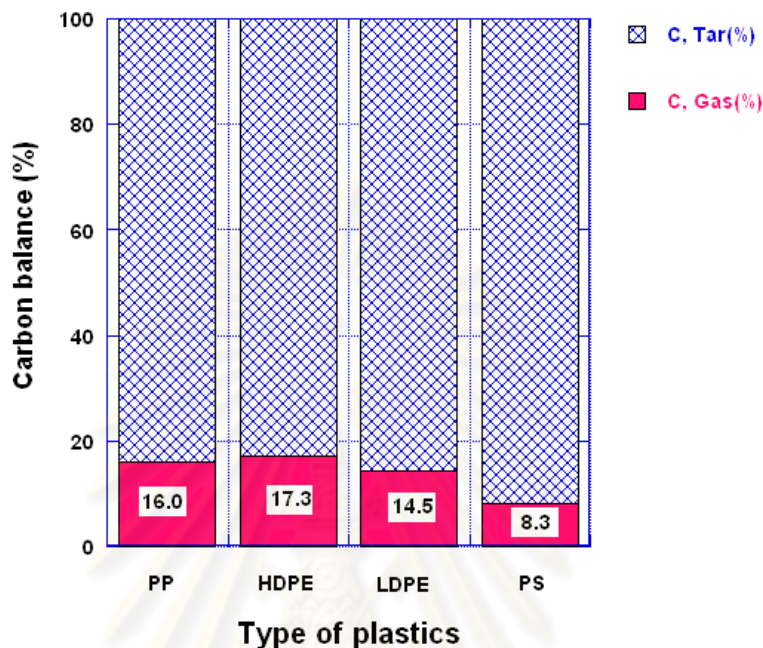
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นแตกต่างกันเนื่องจากลักษณะโครงสร้างและสมบัติของพลาสติก เช่น พอลิไธรีนมีโครงสร้างเป็นวงเบนซีน ทำให้แตกตัวยากกว่าพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่กิ่งและพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่ตรง [Kyong et al, 2002]



รูปที่ 4.15 ผลของชนิดพลาสติกต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.16 แสดงผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าเมื่อใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุดร้อยละ 17.3 โดยโมล รองลงมาพอลิโพรพิลีนร้อยละ 16 โดยโมล พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 14.5 โดยโมลและพอลิไธรีนน้อยที่สุดร้อยละ 8.3 โดยโมลตามลำดับ เนื่องจากถ่านจากกะลาปาล์มสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมเพิ่มขึ้น ดังสมการ (4.1) นอกจากนี้พอลิไธรีนให้ปริมาณ

ผลิตภัณฑ์ทาร์มากที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าแรติคัลที่เกิดจากการสลายตัวของ พอลิस्टไตรีนในตอนเริ่มต้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อได้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ หรือองค์ประกอบ polycyclic [Kyong et al, 2002]



รูปที่ 4.16 ผลของชนิดพลาสติกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์จากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.4 ผลของการเปรียบเทียบใส่และไม่ใส่ถ่านชาร์จากชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร

องค์ประกอบ ของแก๊ส (mmol/g plastic)	PP		HDPE		LDPE		PS	
	No	Plam-shell	No	Plam-shell	No	Plam-shell	No	Plam-shell
	char	char	char	char	char	char	char	char
H ₂	2.57	7.70	2.43	8.15	2.19	7.99	0.95	6.71
CO	0.42	1.40	0.43	1.60	0.36	1.49	0.22	1.40
CH ₄	6.36	7.50	4.81	7.91	4.75	6.92	0.71	2.65
CO ₂	0.31	2.50	0.25	2.80	0.26	1.90	0.53	2.30

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการเปรียบเทียบไสและไมไสถ่านชาร์จากกะลาปาล์มต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดจากการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่ออนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร พบว่าเมื่อไสถ่านชาร์ทำให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไสถ่านชาร์จากกะลาปาล์มสนับสนุนการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) ได้ดีขึ้น ดังสมการ (4.1) ในทำนองเดียวกันสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนฟอร์เมชัน (Carbon formation) ดังสมการที่ (4.2) จะได้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam reforming) [Ahmed et al, 2009 and Pinto et al, 2003] และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ reforming) แสดงดังสมการที่ (4.3) ถึง (4.5)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำโดยใช้ไพโรไลซ์ซาร์จากชีวมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาทีและร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตรสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านซาร์

ถ่านซาร์จากกะลาปาล์มที่เตรียมได้มีค่าพื้นที่ผิวที่เตรียมได้มีปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านจากซังข้าวโพดและเมื่อนำถ่านซาร์ทั้งสองมากระตุ้นด้วยไอน้ำพบว่าพื้นที่ผิวและมีปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น

5.5.2 การแกซีพีเคชั่นชนิดพลาสติกด้วยไอน้ำ กรณีไม่ใส่ถ่านซาร์จากชีวมวล

การแกซีพีเคชั่นชนิดพลาสติก โดยไม่ใส่ถ่านซาร์จากชีวมวล พบว่าพอลิไพโรฟิลินให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุด รองลงมาพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิสไตรีนตามลำดับ แต่น้อยมากเมื่อเทียบกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเป็นไปเป็นน้ำมันทาร์ จากปัญหาปริมาณน้ำมันทาร์สูงนี้ ทำให้โรงงานหรือกระบวนการต่างๆ นำมาผสมกับถ่านหินหรือชีวมวล

5.5.3 การใส่ถ่านกัมมันต์ในการแกซีพีเคชั่นพลาสติกด้วยไอน้ำ

การใส่ถ่านกัมมันต์ในการแกซีพีเคชั่นพลาสติก พบว่าเมื่อใส่ถ่านกัมมันต์ร่วมทำปฏิกิริยากับพลาสติก ทำให้แก๊สสูงขึ้นและมีน้ำมันทาร์ต่ำลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์ช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้ไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สได้เพิ่มขึ้น

5.5.4 อุณหภูมิในการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ

อุณหภูมิในการแกซีฟิเคชันพลาสติก พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลง เนื่องจากคาร์บอนปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

5.5.5 ชนิดถ่านชาร์จากชีวมวลในการแกซีฟิเคชันพลาสติกด้วยไอน้ำ

ชนิดถ่านชาร์จากชีวมวลในการแกซีฟิเคชันพลาสติก พบว่าเมื่อใส่ถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มากที่สุด รองลงมาถ่านชาร์จากกะลาปาล์มและถ่านชาร์จากซังข้าวโพดตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าถ่านชาร์จากกะลาปาล์มมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ และมีผลเชิงเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์จากซังข้าวโพด

5.5.6 การแกซีฟิเคชันชนิดพลาสติกด้วยไอน้ำ กรณีใส่ถ่านชาร์จากชีวมวล

การแกซีฟิเคชันชนิดพลาสติก โดยใส่ถ่านชาร์จากกะลาปาล์ม พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากที่สุด รองลงมาพอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิสไตรีนตามลำดับ เนื่องจากพอลิสไตรีนมีโครงสร้างแบบวงอะโรมาติกทำให้แตกตัวได้ยากกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่กิ่งและพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบโซ่ตรง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการเตรียมถ่านชาร์จากชีวมวลในกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งรวมทั้งการไพโรไลซิสและการกระตุ้นไว้ในขั้นตอนเดียว

5.2.2 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา เช่น อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ร้อยละของไอน้ำ ความดัน เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้

5.2.3 ปรับปรุงกระบวนการโดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่นๆ เช่น ฟลูอิดไคซ์เบด ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นต้น

- 5.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงหรือสารเคมีที่ได้จากการแตกตัวพอลิโพรพิลีน, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิสไตรีน



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, กรม. การผลิตพลังงานจากขยะชุมชน. [ออนไลน์].

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

ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกัมมันต์จากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ประจักษ์รัตน์ แต่ภักดี. การแตกตัวพอลิพรอพอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

ปรารงค์เนตร เฟื่องฟูง. แก๊สสังเคราะห์จากขยะพลาสติกโดยแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.

สุรัชย์ สุวรรณแสงชูโต. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในฟลูอิดไคส์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

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

อำนาจ ทองสถิตย์. การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน. รายงานการศึกษาค้นคว้าส่วนบุคคล วิทยาลัยนักบริหาร สถาบันพัฒนาข้าราชการพลเรือน, 2550.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Abde, A., Hendawy, E. Surface and adsorptive properties of carbon prepared from biomass. Applied Surface Science 252 (2005): 287–295.
- Ahmed, I., Gupta, A.K. Hydrogen production from polystyrene pyrolysis and gasification Characteristics and kinetics. International Journal of Hydrogen Energy. 34 (2009): 6253-6264.
- Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S.; Kunimori, K., Yamada, M., Tomishige, K. Catalyst developmentt for the gasification of biomass in the dual-bed gasifier. Applied Catalysis A: General. 255 (2003): 169-180.
- Aznar, M.P., Caballero, M.A., Sancho, J.A., France's, E. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. Fuel Processing Technology. 87 (2006): 409-420.
- Baiab, Z., Chena, H., Lia, B., Lia, W. Methane decomposition over Ni loaded activated carbon for hydrogen production and the formation of filamentous carbon. International Journal of Hydrogen Energy. 32 (2007): 32-37.
- Devi, L., Ptasinska, J.K., Janssen, J.J.G.F., Paasen, S., Bergman, C.A.P., and Kiel, H.A.J. Catalytic decomposition of biomass tars. Renewable Energy. 30 (2005): 565-587.
- Donald, L.K. Biomass for Renewable Energy, Fuel, and Chemicals. London: Academic Press (1988).
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. Fuel. 82 (2003): 835–842.
- Garcia, B.P., Mastral, J.F., Ceamanos, J., Berruoco, C., Serrano, S. Gasification of biomass /high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier. Bioresource Technology. 99 (2008): 5485-5491.
- He, M., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S., Guo, X., Luo, S. 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.
- Kyong, L., Nam, S.N., Dae, H. S., Younghwa, S. Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst. Polymer Degradation and Stability. 78 (2002): 539–544.

- Lee, K.K., Hana, G.Y., Yoon, K.Y., Lee, B.K. Thermocatalytic hydrogen production from the methane in a fluidized bed with activated carbon catalyst. Catalysis Today. 93-95 (2004): 81-86.
- McIlveen, W.R., Pinto, F., Armesto, L., Caballero, M.A., Aznar, M.P., Cabanillas, Y., Huang, I., and Gulyurtlu, J.T.M. A comparison of circulating fluidizedbed combustion and gasification power plant technologies for processing mixtures of coal, biomass and plastic waste. Fuel Processing. 87 (2006): 793-801
- Muradov, N., Smith, F., Huang, C., Raissi, A. Autothermal catalytic pyrolysis of methane as a new route to hydrogen production with reduced CO₂ emissions. Catalysis Today. 116 (2006): 281-288.
- Olofsson, I., Nordin, A., Soderlind, U. Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquids fuels. Energy technology & thermal process chemistry, Umea university. (2005).
- Panda, A. K., Singh, R. K., 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 and Sustainable Energy Reviews. 14 (2010): 233-248.
- Pinto, F., Franco, C., Rui, A. C., Tavares, M., Dias, I. Cabrita. Effect of experimental conditions on co-gasification of coal, biomass and plastics wastes with air/steam mixtures in a fluidized bed system. Fuel. 82 (2003): 1967–1976
- Xiao, R., Jin, B., Zhou, H., Zhong, Z., Zhang, M. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. Energy Conversion and Management. 48 (2007): 778-786.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลและถ่านชาร์

1. การวิเคราะห์ของแข็งแบบประมาณ (Proximate Analysis: ASTM D 3173-D 3175)

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: ASTM D 3173)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากของแข็ง ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (Porcelain Crucible) พร้อมฝาปิด
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งคงที่) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

การคำนวณ

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้น
ก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักของแข็งเริ่มต้น
ก่อนอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal : ASTM D 3174)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากเผา

เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง (หรืออาจใช้ตัวอย่างของแข็งที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)

3. นำถั่วฝักกระเบื้องที่มีตัวอย่างของแข็งพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ฝาของแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถั่วฝักกระเบื้องและฝาดออกจากเตาเผา ที่งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

การคำนวณ

$$A = \frac{(W_3 - W_4)}{W} \times 100$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของเถ้า
	W_3	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและเถ้า (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่างของแข็ง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างของแข็ง (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3175)

หลักการ

นำตัวอย่างของแข็งที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่หายไป

เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชชีเบลทำจากนิกเกิลพร้อมฝา
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ฝาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ที่งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล

3. ชั่งตัวอย่างของแข็งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิกเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิกเกิลพร้อมตัวอย่างของแข็งเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ของแข็งที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิกเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิกเกิลพร้อมฝาและของแข็งที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

$$V = \left(\frac{W_5 - W_6}{W} \right) \times 100 - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W ₅	=	น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็งก่อนเผา (กรัม)
	W ₆	=	น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของของแข็งหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างของแข็งเริ่มต้น (กรัม)

1.3 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างของแข็ง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Agilet 3000A เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา (carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (recorder)

แก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสาร

ผสมเหล่านี้นอกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาพร้อมกับแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. หาร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ

จากตารางไอน้ำ (steam table) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ได้ค่าของ specific volume 4.952 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม

อัตราการไหลของไอน้ำที่ใช้ในการทดลอง 0.10 มิลลิลิตรต่อนาที = 0.10 กรัมต่อนาที

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น specific volume} &= (4.952 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม}) * (0.10 \text{ กรัมต่อนาที}) * \\ & \quad (1 \text{ กิโลกรัมต่อกิโลกรัม}) * (1000 \text{ ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร}) \\ & \quad * (1000 \text{ มิลลิลิตรต่อลิตร}) \\ &= 495.2 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \end{aligned}$$

ณ สภาวะที่ 25 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

หาอัตราการไหลของแก๊สที่สภาวะ 850 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักแก๊สอุดมคติ

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad V_1/V_2 &= T_1/T_2 \\ 80/V_2 &= 298/1123 \\ \text{จะได้} \quad V_2 &= 301.48 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ (\%vol)} &= 495.2 / (301.48 + 495.2) * 100 \\ &= 62.16 \end{aligned}$$

2. หาระยะเวลาที่ถ่านชาร์สัมผัสกับสารระเหยง่าย (contact time)

กรณีถ่านชาร์สูง 1.4 เซนติเมตร

สัดส่วนช่องว่าง 0.68

$$\text{จากสูตร} \quad Vg = \frac{\pi D^2}{4} h * \epsilon_s$$

$$Vg = [((3.14 * 2^2) / 4) * 1.4 * 0.68] = 2.992 \text{ ลูกบาศก์มิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } V_{25}/T_{25} &= V_{850}/T_{850} \\
 240/298 &= V_{850}/1123 \\
 V_{850} &= 8160 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น } Vg/V_{850} &= 2.992/8160 = 0.00037 \text{ นาที} \\
 &= 0.00037 * 60 = 0.0222 \text{ วินาที}
 \end{aligned}$$

3. หาระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (resident time)

กรณีถ่านชาร์สูง 1.4 เซนติเมตร

สัดส่วนช่องว่าง 0.68

$$\text{จากสูตร } Vg = \frac{\pi D^2}{4} h * \epsilon_s$$

$$Vg = [((3.14 * 2^2)/4) * 1.4 * 0.68] + [((22/7 * 2^2)/4) * 0.6 * 1] = 4.88 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } V_{25}/T_{25} &= V_{850}/T_{850} \\
 240/298 &= V_{850}/1123 \\
 V_{850} &= 4080 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้น } Vg/V_{850} &= 4.88/4080 = 0.0012 \text{ นาที} \\
 &= 0.0012 * 60 = 0.072 \text{ วินาที}
 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ตาราง ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (standard)

ชนิดแก๊ส	area	% balance in N ₂
H ₂	5,576.02	1.00
CO	6,807.43	1.00
CH ₄	5,601.59	1.00
CO ₂	12,539.62	1.00

อัตราการไหลแก๊สรวม 80 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊สทุก 10 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 70 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 800 มิลลิลิตร

ตัวอย่างเช่น พลาสติก + ถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 62 โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำหนักพลาสติก 0.1003 กรัม

ตาราง ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

1) ถุงที่ 1 (ก่อนปล่อยเม็ดพลาสติก)

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	AC conversion (%)
H ₂	1,345.15	1,036.52	1,190.84	0.21
CO	7,828.26	7,737.80	7,783.03	1.14
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	31,006.37	31,331.79	31,169.08	2.49

2) ถู่งที่ 2 (ปล่อยเม็ดพลาสติก)

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	12,257.41	12,256.91	12,257.16	2.20	1.98	6.26
CO	9,793.94	9,793.74	9,793.84	1.44	0.30	0.93
CH ₄	13,060.06	14,460.61	13,760.33	2.46	2.46	7.74
CO ₂	31,223.97	31,870.03	31,547.00	2.52	0.03	0.09

3) ถู่งที่ 3

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	5,051.32	5,051.32	5,051.32	0.91	0.69	2.18
CO	9,076.60	9,066.20	9,071.40	1.33	0.19	0.60
CH ₄	3,250.68	3,257.30	3,253.99	0.58	0.58	1.83
CO ₂	34,298.03	34,298.03	34,298.03	2.74	0.25	0.79

3) ถู่งที่ 4

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	1,280.12	1,280.12	1,280.12	0.23	0.02	0.05
CO	7,823.62	7,823.62	7,823.62	1.15	0.01	0.02
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	38,917.18	38,917.18	38,917.18	3.10	0.62	1.95

3) ถู่งที่ 5

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	1,251.94	1,251.94	1,251.94	0.22	0.01	0.03
CO	7,854.78	7,954.78	7,904.78	1.16	0.02	0.06
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	33,591.54	33,591.54	33,591.54	2.68	0.19	0.61

3) ถุงที่ 6

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	1,257.37	1,257.37	1,257.37	0.23	0.01	0.04
CO	7,907.22	7,907.22	7,907.22	1.16	0.02	0.06
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	31,493.02	31,493.02	31,493.02	2.51	0.03	0.08

3) ถุงที่ 7

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	PP conversion (%)	mmol/g plastic
H ₂	1,257.37	1,257.37	1,257.37	0.23	0.01	0.04
CO	7,877.71	7,877.71	7,877.71	1.16	0.01	0.04
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	31,392.07	31,192.07	31,292.07	2.50	0.01	0.03

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 30 นาที = ถุงที่ 2+ถุงที่ 3+ถุงที่ 4+ถุงที่ 5+ถุงที่ 6+ถุงที่ 7

	(mmol/g plastic)
H ₂	8.60
CO	1.70
CH ₄	9.57
CO ₂	3.55

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองผลของการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านชาร์ ในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ

ถ่านชาร์	เวลา (วินาที)	ชนิด แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmol/g- char	mmol/g char*min
ถ่านกัมมันต์	0-10	H ₂	589.46	846.90	718.18	0.16	0.10	0.01
		CO	10,602.02	10,491.12	10,546.57	1.55	0.96	0.10
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	22,412.73	21,326.44	21,869.58	1.82	1.12	0.11
	10-20	H ₂	935.26	1,025.09	980.17	0.22	0.14	0.01
		CO	7,784.96	7,597.38	7,691.17	1.13	0.70	0.07
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	29,428.50	29,319.21	29,373.86	2.44	1.51	0.15
	20-30	H ₂	1,154.13	1,180.25	1,167.19	0.26	0.16	0.02
		CO	6,996.73	7,302.41	7,149.57	1.05	0.65	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	30,377.57	30,237.24	30,307.40	2.52	1.56	0.16
	30-40	H ₂	1,252.25	1,262.47	1,257.36	0.28	0.17	0.02
		CO	6,993.31	6,993.31	6,993.31	1.03	0.63	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	30,215.77	30,254.97	30,235.37	2.52	1.55	0.16
	40-50	H ₂	1,212.25	1,319.79	1,266.02	0.28	0.18	0.02
		CO	7,138.74	7,138.74	7,138.74	1.05	0.65	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	29,998.60	30,089.71	30,044.15	2.50	1.54	0.15
	50-60	H ₂	1,223.37	1,210.85	1,217.11	0.27	0.17	0.02
		CO	6,906.90	6,906.90	6,906.90	1.01	0.63	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	30,106.22	30,105.07	30,105.64	2.50	1.55	0.15
	60-70	H ₂	1,236.53	1,160.26	1,198.39	0.27	0.17	0.02
		CO	6,899.01	6,899.01	6,899.01	1.01	0.63	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	29,500.09	29,500.09	29,500.09	2.45	1.51	0.15

ตาราง ๑1 ข้อมูลการทดลองผลของการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านชาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ (ต่อ)

ถ่านชาร์	เวลา (วินาที)	ชนิด แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmol/g- AC	mmol/g AC*min
ถ่านชาร์ จากกะลาปาล์ม	70-80	H ₂	1,251.24	1,312.39	1,281.81	0.29	0.18	0.02
		CO	6,932.12	6,932.12	6,932.12	1.02	0.63	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	30,148.37	30,148.37	30,148.37	2.51	1.55	0.15
	80-90	H ₂	1,145.20	1,145.20	1,145.20	0.26	0.16	0.02
		CO	7,099.07	7,099.07	7,099.07	1.04	0.64	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	29,988.44	29,988.44	29,988.44	2.50	1.54	0.15
	90-100	H ₂	1,234.30	1,234.30	1,234.30	0.28	0.17	0.02
		CO	7,061.37	7,061.37	7,061.37	1.04	0.64	0.06
		CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CO ₂	29,954.04	29,954.04	29,954.04	2.49	1.54	0.15
	0-10	H ₂	652,600.90	652,600.90	652,600.90	16.98	6.95	0.69
		CO	15,683.40	15,683.40	15,683.40	6.31	2.58	0.26
		CH ₄	4,119.50	4,119.50	4,119.50	0.51	0.21	0.02
		CO ₂	13,328.10	13,328.10	13,328.10	4.99	2.04	0.20
	10-20	H ₂	780,612.30	780,612.30	780,612.30	20.31	8.31	0.83
		CO	11,876.30	11,876.30	11,876.30	4.78	1.96	0.20
		CH ₄	4,129.00	4,129.00	4,129.00	0.51	0.21	0.02
		CO ₂	20,878.30	20,878.30	20,878.30	7.82	3.20	0.32
	20-30	H ₂	743,864.20	743,864.20	743,864.20	19.35	7.92	0.79
		CO	10,126.50	10,126.50	10,126.50	4.08	1.67	0.17
		CH ₄	3,580.90	3,580.90	3,580.90	0.45	0.18	0.02
		CO ₂	23,612.10	23,612.10	23,612.10	8.85	3.62	0.36
	30-40	H ₂	744,008.40	744,008.40	744,008.40	19.35	7.92	0.79
		CO	9,581.80	9,581.80	9,581.80	3.86	1.58	0.16
		CH ₄	3,513.30	3,513.30	3,513.30	0.44	0.18	0.02
		CO ₂	23,038.80	23,038.80	23,038.80	8.63	3.53	0.35
40-50	H ₂	669,381.40	669,381.40	669,381.40	17.41	7.13	0.71	
	CO	9,048.10	9,048.10	9,048.10	3.64	1.49	0.15	
	CH ₄	3,296.60	3,296.60	3,296.60	0.41	0.17	0.02	
	CO ₂	21,368.90	21,368.90	21,368.90	8.01	3.28	0.33	

ตาราง ๑1 ข้อมูลการทดลองผลของการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านชาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำ (ต่อ)

ถ่านชาร์	เวลา (วินาที)	ชนิด แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmol/g- char	mmol/g char*min
	50-60	H ₂	678,453.90	678,453.90	678,453.90	17.65	7.22	0.72
		CO	10,549.60	10,549.60	10,549.60	4.25	1.74	0.17
		CH ₄	2,984.00	2,984.00	2,984.00	0.37	0.15	0.02
		CO ₂	20,007.40	20,007.40	20,007.40	7.50	3.07	0.31
	60-70	H ₂	681,606.80	681,606.80	681,606.80	17.73	7.26	0.73
		CO	8,630.20	8,630.20	8,630.20	3.47	1.42	0.14
		CH ₄	2,891.70	2,891.70	2,891.70	0.36	0.15	0.01
		CO ₂	18,154.50	18,154.50	18,154.50	6.80	2.78	0.28
	70-80	H ₂	632,667.10	632,667.10	632,667.10	16.46	6.74	0.67
		CO	7,645.70	7,645.70	7,645.70	3.08	1.26	0.13
		CH ₄	2,367.60	2,367.60	2,367.60	0.29	0.12	0.01
		CO ₂	15,651.10	15,651.10	15,651.10	5.86	2.40	0.24
	80-90	H ₂	621,865.00	621,865.00	621,865.00	16.18	6.62	0.66
		CO	8,414.00	8,414.00	8,414.00	3.39	1.39	0.14
		CH ₄	2,622.10	2,622.10	2,622.10	0.33	0.13	0.01
		CO ₂	19,991.20	19,991.20	19,991.20	7.49	3.07	0.31
90-100	H ₂	561,498.70	561,498.70	561,498.70	14.61	5.98	0.60	
	CO	7,623.50	7,623.50	7,623.50	3.07	1.26	0.13	
	CH ₄	2,247.80	2,247.80	2,247.80	0.28	0.11	0.01	
	CO ₂	17,226.60	17,226.60	17,226.60	6.45	2.64	0.26	
ถ่านชาร์ จากขี้ข้าวโพด	0-10	H ₂	72,925.80	72,925.80	72,925.80	10.07	3.65	0.37
		CO	246.00	246.00	246.00	4.72	1.71	0.17
		CH ₄	1,463.10	1,463.10	1,463.10	0.25	0.09	0.01
		CO ₂	9,516.80	9,516.80	9,516.80	2.36	0.86	0.09
	10-20	H ₂	123,828.20	123,828.20	123,828.20	17.09	6.20	0.62
		CO	351.00	351.00	351.00	6.74	2.44	0.24
		CH ₄	1,877.40	1,877.40	1,877.40	0.33	0.12	0.01
		CO ₂	17,745.00	17,745.00	17,745.00	4.40	1.60	0.16
	20-30	H ₂	135,430.50	125,430.50	130,430.50	18.00	6.53	0.65
		CO	371.20	371.20	371.20	7.12	2.58	0.26
		CH ₄	1,888.90	1,888.90	1,888.90	0.33	0.12	0.01
		CO ₂	17,873.00	17,873.00	17,873.00	4.43	1.61	1.06

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองผลของการปลดปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สของถ่านชาร์ในกระบวนการแกซีไฟเคชันด้วยไอน้ำ (ต่อ)

ถ่านชาร์	เวลา (วินาที)	ชนิด แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmol/g- AC	mmol/g AC*min
	30-40	H ₂	146,116.20	146,116.20	146,116.20	20.17	7.31	0.73
		CO	405.60	405.60	405.60	7.79	2.82	0.28
		CH ₄	1,265.30	1,265.30	1,265.30	0.22	0.08	0.01
		CO ₂	26,233.50	26,233.50	26,233.50	6.50	2.36	0.24
	40-50	H ₂	149,011.00	149,011.00	149,011.00	20.57	7.46	0.75
		CO	318.80	318.80	318.80	6.12	2.22	0.22
		CH ₄	1,074.20	1,074.20	1,074.20	0.19	0.07	0.01
		CO ₂	29,496.70	29,496.70	29,496.70	7.31	2.65	0.27
	50-60	H ₂	149,883.80	149,883.80	149,883.80	20.69	7.50	0.75
		CO	325.50	325.50	325.50	6.25	2.27	0.23
		CH ₄	832.40	832.40	832.40	0.14	0.05	0.01
		CO ₂	33,187.80	33,187.80	33,187.80	8.23	2.98	0.30
	60-70	H ₂	148,689.80	148,689.80	148,689.80	20.52	7.44	0.74
		CO	295.60	295.60	295.60	5.67	2.06	0.21
		CH ₄	554.80	554.80	554.80	0.10	0.03	0.00
		CO ₂	33,023.00	33,023.00	33,023.00	8.19	2.97	0.30
	80-90	H ₂	152,311.70	152,311.70	152,311.70	21.02	7.62	0.76
		CO	328.70	328.70	328.70	6.31	2.29	0.23
		CH ₄	542.30	542.30	542.30	0.09	0.03	0.00
		CO ₂	37,406.20	37,406.20	37,406.20	9.27	3.36	0.34
	90-100	H ₂	119,156.80	119,156.80	119,156.80	16.45	5.96	0.60
		CO	198.90	198.90	198.90	3.82	1.38	0.14
		CH ₄	181.10	181.10	181.10	0.03	0.01	0.00
		CO ₂	36,080.00	36,080.00	36,080.00	8.95	3.24	0.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวคุณिता ทองน้อย เกิดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย