



การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๖๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี

๐๔๑๔๐๓

EFFECTS OF ADDITIVES ON THERMAL DEGRADATION OF POLYETHYLENE



Mr. Charoon Yimlamai

Mr. Wuttichai Ditjarern

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน
โดย นายจรูญ ยิ้มละมัย
นายวุฒิชัย ดิษเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)

.....กรรมการ
(อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน
โดย	นายจรูญ ยิ้มละมัย นายวุฒิชัย ดิษเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่ง ที่มีต่อการสลายด้วยความร้อนของ พอลิเอทิลีน โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาช่วงอุณหภูมิของการสลายด้วยความร้อนของ พอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งด้วยวิธีวิเคราะห์เทอร์โมแกรวิเมตริก (TGA) โดยใช้พอลิเอทิลีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 95 ต่อ 5, 90 ต่อ 10, 85 ต่อ 15 และพอลิเอทิลีนผสมซิลิกาในอัตราส่วน 98 ต่อ 2, 95 ต่อ 5 และ 90 ต่อ 10 อีกส่วนหนึ่งคือ การศึกษาการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น

การศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่ง ด้วย TGA พบว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มจาก 348 จนถึง 496 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา จะทำให้อุณหภูมิการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนสูงขึ้น และในส่วนของการศึกษาการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ ดังกล่าว พบว่าเมื่อทำการสลายพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ จะได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ของเหลวสีเหลืองร้อยละ 73.2 ก๊าซร้อยละ 25.0 และกากซึ่งเป็นของแข็งอีกร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา พบว่า นอกจากจะทำให้ช่วงอุณหภูมิของการสลายด้วยความร้อนสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง ส่วนก๊าซ และกากมีปริมาณเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Effects of Additives on Thermal Degradation of Polyethylene
By Mr. Charoon Yimlamai
 Mr. Wuttichai Dittjarem
Advisor Asst.Dr. Paisal Nakpipat
Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Abstract

The effects of the additives in the pyrolysis of Polyethylene are studied in this project. The experiment can divide into 2 sections. First is the study of the temperature range of pyrolysis of pure Polyethylene and additive-mixed Polyethylene by TGA method. Additive-mixed Polyethylene studied are a combination of Polyethylene and Calcium carbonate at the ratio of 95:5, 90:10, and 85:15. Another one is a combination of Polyethylene and Silica at the ratio of 98:2, 95:5, and 90:10. The second section of this project is the study of the range of pyrolysis of pure Polyethylene and additive-mixed Polyethylene.

For the temperature range of thermal decomposition of pure Polyethylene resulted by TGA method is 348-496 degree Celsius. When the additives such as Calcium carbonate or Silica is added, the temperature ranges usually increase. The products of pyrolysis of pure Polyethylene and additive-mixed Polyethylene consist of 3 major types. There are, 73.2 % light-yellow liquid, 25.0% gas, and the rest is 1.8% solid residue (carbon). When the amount of additives is increase, the liquid product will be decreased, but the gas and solid will be increase.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคลากร
หลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

ผศ.ดร.ไพศาล นาคพัฒนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขโครง
งาน ทำให้โครงงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ผศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา และอาจารย์สันติ
วัฒนาอนุสรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้
คำแนะนำ เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และอำนวยความสะดวก ตลอดการทำโครงงาน

เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทำโครงงานครั้งนี้

คุณฉวีติ ชุมภูปิ่น นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และคุณอัศววิทย์ วงศ์วานกุล นัก
ศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงาน

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่วิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์ ตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวก ในการทำโครงงานนี้
มาตลอด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุคลากร และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด
ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัย และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

29 พฤษภาคม 2543

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขั้นตอนของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 พอลิเอทิลีน.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน.....	3
2.1.1 การจำแนกพอลิเอทิลีน.....	3
2.1.2 ลักษณะทั่วไป.....	4
2.1.3 การใช้งาน.....	4
2.2 กระบวนการเตรียมพอลิเอทิลีน.....	4
2.2.1 พอลิเมอร์ไรเซชันที่ความดันสูง.....	4
2.2.2 กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process).....	5
2.2.3 กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process).....	6
2.2.4 กระบวนการ Standard oil	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 บทบาทของพอลิเอทิลีนในอุตสาหกรรม.....	7
2.3.1 LDPE	7
2.3.2 LLDPE.....	8
2.3.3 HDPE.....	8
บทที่ 3 สารเติมแต่งในพอลิเมอร์.....	11
3.1 สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ (Additives for polymers).....	11
3.2 ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	12
3.2.1 แอนติออกซิแดนต์และสตาบิไลเซอร์ (Antioxidants and stabilizers).....	12
3.2.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	12
3.2.3 ฟิลเลอร์ (Fillers).....	12
3.3 สารเติมแต่งอื่น ๆ	15
3.3.1 สารที่ให้สี (Colorants and pigments).....	15
3.3.2 สารที่ช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ (Flame retardants).....	15
3.3.3 สารหล่อลื่น (Lubricants).....	16
3.3.4 สารต้านไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic agent).....	16
บทที่ 4 การวิเคราะห์โดยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis).....	17
บทที่ 5 กระบวนการสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis).....	23
5.1 ปฏิกริยาต่าง ๆ เกี่ยวกับการสลายด้วยความร้อนของพลาสติก	24
5.2 รูปแบบของการย่อยสลายโดยความร้อนของพอลิเมอร์.....	24
5.2.1 การดีพอลิเมอไรเซชันที่โซ่.....	25
5.2.2 การย่อยสลายแบบเศษ.....	26
5.3 การสลายด้วยความร้อนของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน	27
5.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสลายด้วยความร้อน.....	30
5.4.1 อุณหภูมิในการสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis temperature).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 อัตราการให้ความร้อน และเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์.....	30
5.4.3 สภาวะบรรยากาศต่างๆ	31
5.4.4 ชนิด และลักษณะเฉพาะของระบบเครื่องปฏิกรณ์.....	31
บทที่ 6 การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองการเผา เพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อน.....	32
บทที่ 7 การทดลอง.....	34
7.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
7.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	35
7.2.1 การเตรียม HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และ HDPE ผสมซิลิกา.....	35
7.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวด้วย TGA.....	35
7.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อน.....	35
บทที่ 8 ผลการทดลอง.....	37
8.1 ผลการทดลองที่ได้จาก TGA.....	37
8.2 ผลการทดลองจากการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสม สารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ	39
8.2.1 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์.....	39
8.2.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน.....	45
8.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อน.....	48
บทที่ 9 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
9.1 สรุปผลการทดลอง.....	52
9.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวโดยใช้เครื่อง TGA	52
9.1.2 การสลายด้วยความร้อน.....	52
9.1.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขณะทำการสลายด้วย ความร้อน.....	53
9.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
9.3 ข้อเสนอแนะ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง.....55

ภาคผนวก.....56

ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งด้วย TGA.....57

ประวัติผู้เขียน.....61



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร.....	9
ตารางที่ 3.1 การจัดแบ่งหมวดหมู่และกลุ่มย่อยต่าง ๆ ของสารเติมแต่งสำหรับวัสดุพลาสติก...11	
ตารางที่ 3.2 ชนิดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในพอลิเมอร์.....14	
ตารางที่ 5.1 ผลที่ได้ของโมโนเมอร์จากพอลิเมอร์พวกพอลิสไตรีนชนิดต่าง ๆ26	
ตารางที่ 8.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ.....37	
ตารางที่ 8.2 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE บริสุทธิ์..... 39	
ตารางที่ 8.3 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 95:5.....40	
ตารางที่ 8.4 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 90:10.....41	
ตารางที่ 8.5 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 85:15.....42	
ตารางที่ 8.6 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 98:2.....43	
ตารางที่ 8.7 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 95:5.....44	
ตารางที่ 8.8 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 90:10..... 45	
ตารางที่ 8.9 ปริมาณของเหลวที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน.....46	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.10 ปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน..... 46

ตารางที่ 8.11 ปริมาณ Residue ที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน.....47

ตารางที่ 8.12 ปริมาณผลิตภัณฑ์รวมที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน..... 47



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน.....	3
รูปที่ 2.2 แผนภูมิการผลิตพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน โดยใช้เตาปฏิกรณ์ความดันสูง.....	5
รูปที่ 2.3 แผนภูมิการเตรียมพอลิเอทิลีน โดยกระบวนการซีเกลอร์.....	6
รูปที่ 2.4 แผนภูมิการเตรียมพอลิเอทิลีน โดยกระบวนการฟิลลิปส์.....	7
รูปที่ 4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ Thermogram โดยสมมติว่าเผาสาร A แล้วเปลี่ยนไปเป็น สาร B	17
รูปที่ 4.2 ลักษณะ TG curve ของตัวอย่างพอลิเมอร์ต่าง ๆ	18
รูปที่ 4.3 การหาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ผสมอยู่ในพอลิไวนิลคลอไรด์จาก TG curve.....	19
รูปที่ 4.4 ลักษณะของ TG Curve ของ PTFE ผสมกับ ACETAL.....	19
รูปที่ 4.5 ระบบการชั่งแบบ Null point balance.....	20
รูปที่ 4.6 ลักษณะการโปรแกรมให้ความร้อนเป็นช่วง ๆ	21
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA	22
รูปที่ 5.1 การเกิดผลิตภัณฑ์จากการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ 635, 673 และ 650 เคลวิน.....	29
รูปที่ 5.2 ปฏิริยาที่เป็นไปได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน.....	30
รูปที่ 6.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสลายด้วยความร้อนของ HDPE.....	33
รูปที่ 8.1 การเปรียบเทียบระหว่าง TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมแคลเซียม คาร์บอเนตในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	38
รูปที่ 8.2 การเปรียบเทียบระหว่าง TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.3 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 8.4 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	49
รูปที่ 8.5 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 8.6 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	51
รูปที่ ก.1 ลักษณะ TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์.....	57
รูปที่ ก.2 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 95 : 5.....	58
รูปที่ ก.3 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 90 : 10.....	58
รูปที่ ก.4 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 85 : 15.....	59
รูปที่ ก.5 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 98 : 2.....	59
รูปที่ ก.6 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 95 : 5.....	60
รูปที่ ก.7 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 90 : 10.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นขวดบรรจุน้ำ ขวดยา แพ้มอกสาร แผ่นฟิล์ม ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร เป็นต้น ซึ่งในการผลิตนั้นพบว่า การที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีจะต้องมีการผสมสารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ เพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

การศึกษาการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่ง ทำให้ทราบถึงผลของสารเติมแต่งที่มีต่อการสลายตัวของพอลิเอทิลีน ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพลาสติกอื่น ๆ และการสลายขยะพลาสติกด้วยความร้อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) ศึกษาการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน
- 2) ศึกษาผลกระทบจากสารเติมแต่งที่มีต่อการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน
- 3) ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ

1.3 ขั้นตอนของโครงการ

- 1) ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสาร
- 2) วิเคราะห์สมบัติของการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน ด้วยวิธีเทอร์โมแกรวิเมตริก (Thermogravimetric analysis : TGA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ทำการทดลองการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ
- 4) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1) ทำให้เข้าใจเกี่ยวกับการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ
- 2) ทำให้เข้าใจผลกระทบของสารเติมแต่งที่มีต่ออุณหภูมิการสลายของพอลิเอทิลีน
- 3) เกิดการเรียนรู้และสามารถวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน เมื่อมีการผสมสารเติมแต่งลงไป ในอัตราส่วนต่าง ๆ
- 4) สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการนำพลาสติกใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ใหม่
- 5) สามารถนำความรู้ที่ได้จากโครงการนี้ ไปเป็นแนวทางในการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพลาสติกอื่น ในระดับอุตสาหกรรมได้
- 6) ทำให้รู้และเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานอย่างมีระเบียบแบบแผน

บทที่ 2

พอลิเอทิลีน

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)¹¹¹

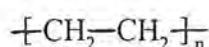
2.1.1 การจำแนกพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีสูตร โครงสร้าง ดังรูปที่ 2.1 สามารถผลิตได้จากแก๊สเอทิลีนบริสุทธิ์ ซึ่งอาจได้มาจากแก๊สธรรมชาติหรือปิโตรเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerisation) ลักษณะโมเลกุลเป็นเส้นสายยาวอย่างง่าย ๆ พอลิเอทิลีนที่สำคัญแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1) พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) พอลิเมอร์นี้อาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้าน (Branched polyethylene) เพราะโครงสร้างประกอบด้วยโซ่ยาวของ CH_2 ที่มีการแตกกิ่งก้านสาขาออกไป บางครั้งอาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันสูง (High-pressure polyethylene) เพราะกระบวนการผลิตใช้ความดันสูงมาก

2) พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) พอลิเมอร์นี้อาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง เพราะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอดมีสาขาโซ่บ้างแต่น้อยมาก บางครั้งอาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการผลิตใช้ความดันต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับกรณีการเตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ

นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งมีทั้ง LLDPE (Linear low density polyethylene) และ MDPE (Medium density polyethylene)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะทั่วไป

พอลิเอทิลีนโดยทั่วไปมีสีขาวขุ่น โปร่งแสง ผิวมันเมื่อสัมผัส หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแบบพิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่สูงนักทนการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย นอกจากนี้เรซินมีหลายลักษณะ ทั้งแบบเป็นผง เป็นเกล็ด เป็นแท่ง เป็นท่อ เป็นแผ่น และแผ่นบาง

2.1.3 การใช้งาน

พอลิเอทิลีนโดยทั่วไปใช้ทำขวดใส่สารเคมี ขวดใส่น้ำ ภาชนะต่าง ๆ เครื่องเล่นของเด็ก กุญแจ ยางรถจักรยานยนต์ ชิ้นส่วนของแบตเตอรี่ กุญแจของ ก่อถ่วงบรรจุสินค้า แพ้เพิ่มเอกสาร ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า ขวดยา แผ่นฟิล์มห่อของ โตะ แก้ว เป็นต้น

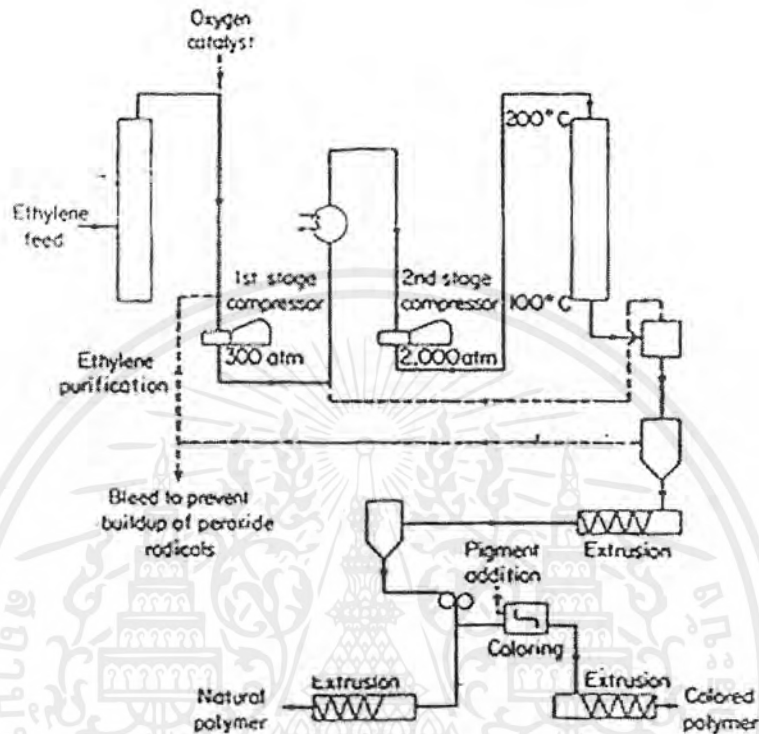
2.2 กระบวนการเตรียมพอลิเอทิลีน^[11,12]

กระบวนการเตรียมพอลิเอทิลีนมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ

2.2.1 พอลิเมอไรเซชันที่ความดันสูง

การเตรียมพอลิเอทิลีนที่ความดันสูง ปกติใช้ความดันประมาณ 1000 – 3000 บรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 80 – 300 องศาเซลเซียส ใช้สารตั้งต้นเป็นเรดิคอลลิสระ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์, เอโซ-ได-ไอโซบิวทิลโรไนไตรล์ (Azo-di-isobutyronitrile) , ออกซิเจนถ้าใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น จะใช้ความดันประมาณ 1500 บรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้ออกซิเจนประมาณ 0.03-0.1 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ทำโดยผ่าน โมโนเมอร์และสารตั้งต้นเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น อาจใช้น้ำหรือเบนซีน ช่วยระบาย ปกติในปฏิกิริยา 10 - 30% ของโมโนเมอร์จะเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอไร จากนั้นจึงแยก พอลิเอทิลีนออกจากเอทิลีนได้ การใช้ความเข้มข้นของโมโนเมอร์มาก ๆ และความดันสูง จะทำให้ได้พอลิเมอไรที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกิ่งก้านสาขา ถ้าต้องการลักษณะกิ่งก้านสาขาที่ต่างกันออกไป เป็นพอลิเมอไรที่มีลักษณะอื่น ๆ อาจจะได้โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของสารตั้งต้น หรืออาจฉีดสารตั้งต้นเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน พอลิเมอไรที่ได้โดยวิธีนี้จะเป็น LDPE ซึ่งมีลักษณะยืดหยุ่น ความหนา

แน่นต่ำ (0.915 – 0.94 กรัม/ลบ.ซม.) การเตรียมพอลิเอทิลีนที่ความดันสูง มีแผนภูมิ ดังรูป
ที่ 2.2



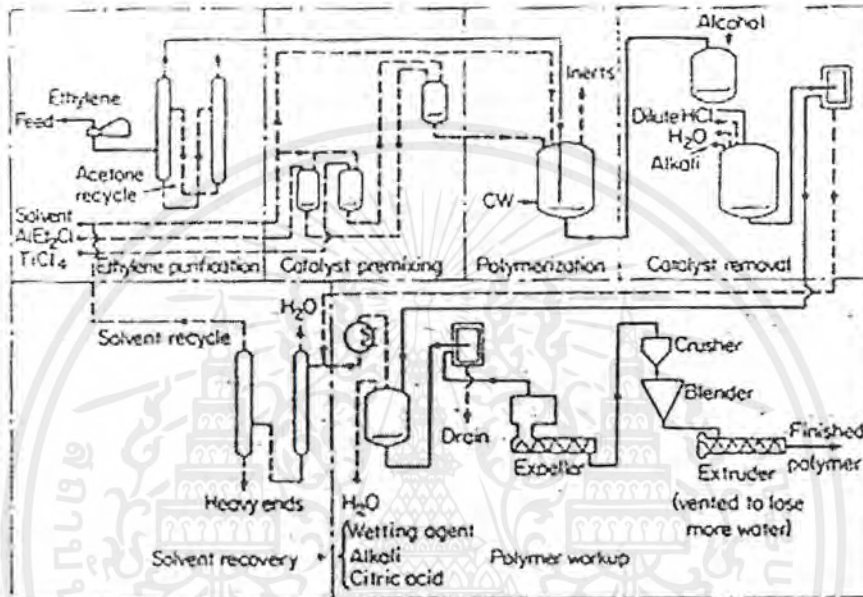
รูปที่ 2.2 แผนภูมิการผลิตพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน โดยใช้เตาปฏิกรณ์ความดันสูง

2.2.2 กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

พอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ เป็นแบบโคออร์ดิเนชัน โดยจะเกิดสารเชิงซ้อนโคออร์ดิเนตระหว่างโมโนเมอร์กับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ไททานเนียมเตตระคลอไรด์กับอลูมิเนียมอัลคิล (เช่น ไดเอทิลอลูมิเนียมคลอไรด์, อะลูมิเนียม-นิยมไตรเอทิล) การเตรียมจะผ่านเอทิลีนโมโนเมอร์เข้าไปในเตาปฏิกรณ์ภายใต้ความดันต่ำและมีตัวเจือจาง (diluent) เช่น น้ำมันดีเซล เฮฟเทน หรือโทลูอิน ปฏิกิริยาจะทำในบรรยากาศของไนโตรเจน โดยไม่มีความชื้นและออกซิเจน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ปกติปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จะละลายในตัวเจือจางได้บ้างและเกิดเป็นสารละลายเหนียว ๆ ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาปนอยู่ด้วย แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกโดยละลายในเอทานอลหรือเมทานอล และแยกโลหะจากตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยกรดเกลือ ถ้าต้องการใช้งานเกี่ยวกับจนวนไฟฟ้า จะต้องทำให้บริสุทธิ์หลาย ๆ ครั้ง แล้วใช้เครื่องเหวี่ยงทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเม็ด ๆ ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

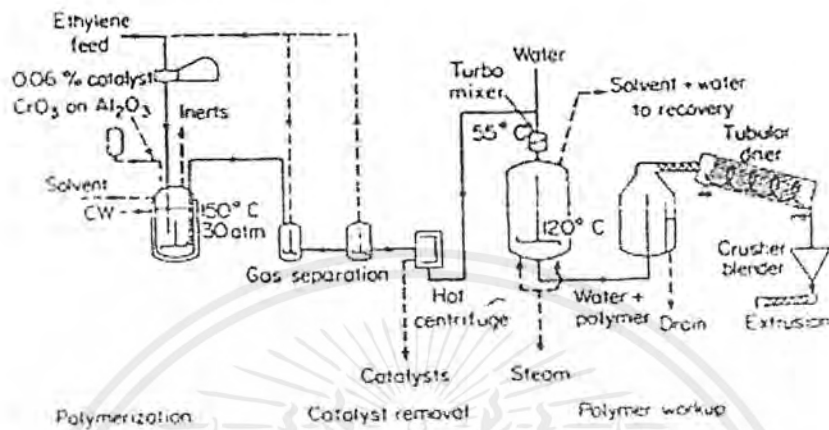
ความหนาแน่นปานกลางคือ ประมาณ 0.945 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งสูงกว่าวิธีในข้อ 2.2.1 ลักษณะที่สำคัญที่ต่างไปจากวิธีที่ความดันสูง คือ มีแขนงน้อยมาก ซึ่งมีผลให้ความหนาแน่นสูงมากขึ้นกว่าวิธีในข้อ 2.2.1 แผนภูมิกระบวนการซีเกลอร์ที่ใช้เตรียม พอลิเอทิลีนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิการเตรียมพอลิเอทิลีน โดยกระบวนการซีเกลอร์

2.2.3 กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

การเตรียมวิธีนี้ใช้สภาวะอยู่ระหว่างวิธีใช้ความดันสูงกับกระบวนการซีเกลอร์ โดยใช้ความดันประมาณ 30 – 40 บรรยากาศ อุณหภูมิ 90 – 160 องศาเซลเซียส ใช้โครเมียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (CrO_3) และมีตัวทำละลาย เช่น ไซโคลเฮกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เตรียมได้โดยการเติมซิลิกา-อลูมินากับสารละลายเกลือโครเมียม และเผาให้ถึง 400 – 800 องศาเซลเซียสในอากาศ เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นแล้วจะผ่านของผสมไปยังที่แยกของเหลว-ก๊าซ เพื่อแยกเอทิลีนโมโนเมอร์ออก จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกที่ Hot centrifuge พอลิเมอร์ที่ได้จะถูกแยกออกจากตัวทำละลายโดยใช้ความร้อนสูง (อาจตกตะกอนโดยทำให้เย็นก็ได้) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่สุดคือ ประมาณ 0.96 กรัม/ลบ.ซม. สายโซ่โมเลกุลเกือบจะเป็นสายตรงชนิดสมบูรณ์โดยแทบไม่มีกิ่งสาขาเลย แผนภูมิการเตรียมพอลิเอทิลีน โดยกระบวนการฟิลลิปส์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภูมิการเตรียมพอลิเอทิลีน โดยกระบวนการฟิลลิปส์

2.2.4 กระบวนการ Standard oil

วิธีนี้คล้าย ๆ กระบวนการฟิลลิปส์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์บนอลูมินา ซึ่งเตรียมได้โดยเผาอลูมินากับแอมโมเนียม-โมลิบเดต ที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส และผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยริคิวซ์ เช่น โลหะหมู่ IA, IIA หรือไฮโดรด์ เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้วงไวต่อปฏิกิริยาความดันใช้ประมาณ 40–80 บรรยากาศ อุณหภูมิ 230 – 270 องศาเซลเซียส ใช้ตัวทำละลายพวกไฮโดรคาร์บอน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.96 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งเท่ากับที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ น้ำหนักโมเลกุลก็ใกล้เคียงกัน

2.3 บทบาทของพอลิเอทิลีนในอุตสาหกรรม³¹

พอลิเอทิลีนนับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพลาสติกอื่น ๆ ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ประเภทของพอลิเอทิลีนที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมมีดังนี้

2.3.1 LDPE

เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มากและเรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า ถุงเย็น มักจะใช้ทำถุงฟิล์มหัดและฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยึดตัวได้ดี ทนต่อการซึมทะลุและการฉีกขาด พร้อมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร แต่จุดอ่อนของ LDPE คือ สามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่ายแต่ทนต่อกรดและด่างทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้ LDPE ยังปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย ด้วยเหตุนี้อาหารที่ไวต่ออากาศ เช่น ของขบเคี้ยวและของทอดเมื่อใส่ในถุงเย็นธรรมดาคุณภาพอาหารจะแปรเปลี่ยนไปเพียงเวลาไม่กี่วัน LDPE ยังมีคุณสมบัติดูดฝุ่นในอากาศมาเกาะติดตามผิวทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก LDPE นี้เมื่อทิ้งไว้นาน ๆ จะเปรอะด้วยฝุ่น

2.3.2 LLDPE

เป็นการผลิตภายใต้ความดันต่ำ นิยมใช้เป็นชั้นป้องกันความชื้น โดยการเคลือบบนผิวของ PE จุดอ่อนของ LLDPE คือ มีความขุ่นมากกว่า LDPE จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงนิยมผสมเม็ดพลาสติกทั้งสองประเภทเข้าด้วยกัน โดยมี LDPE และ LLDPE ในอัตราส่วน 1 : 1

2.3.3 HDPE

ประมาณ 1 ใน 5 ของพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้จะเป็น HDPE และส่วนใหญ่นิยมเป่าเป็นขวด เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงทำให้ HDPE มีความเหนียวและทนต่อการซึมผ่านได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่างๆ กัน แต่ยังไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดีนัก จากการใช้ HDPE แทน LDPE น้ำหนักของขวดสามารถลดลงได้มากกว่า 40% เนื่องจากสามารถเป่าขวดที่มีผิวบางกว่า นอกจากใช้ผลิตขวดแล้ว HDPE ยังสามารถใช้เป่าเป็นฟิล์ม หรือทำเป็นถาดที่ไม่ต้องการความใสมากนัก

ตารางที่ 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร^[3]

คุณสมบัติ	ประเภท	
	LDPE	HDPE
อัตราการซึมผ่าน		
- ไอน้ำ (กรัม/ตรม./วัน)	1.3	0.3
- O ₂ (ลบ.ซม./ตรม./วัน)	550	600
- N ₂ (ลบ.ซม./ตรม./วัน)	180	70
- CO ₂ (ลบ.ซม./ตรม./วัน)	2900	450
ความทนทานต่อสารเคมี		
- กรด	ดี	ดีมาก
- ด่าง	ดี	ดีมาก
- สารระเหย	ดี	ดีมาก
อุณหภูมิการใช้งาน (องศาเซลเซียส)	-70 ถึง 180	-20 ถึง 250
ความใส	ใส	ใส
การพิมพ์	พอใช้	พอใช้
การดูดฝุ่น	สูง	สูง
ความเหนียว (มิลลิวัดตันxเมตร)	10	150
ทนต่อการฉีกขาด(นิวตันxเมตร)	100	30

ตัวอย่างการใช้งานของพอลิเอทิลีนที่สำคัญในอุตสาหกรรมมีดังต่อไปนี้

- 1) ใช้ผลิตเป็นถุงร้อน (HDPE) และถุงเย็น (LDPE) สำหรับการใช้งานทั่วไปสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไป ข้อสังเกตถุงร้อนที่ผลิตจาก HDPE จะมีสีขาวขุ่น
- 2) ใช้ห่อหรือบรรจุอาหารได้เกือบทุกชนิดโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค แต่ไม่ควรใช้ LDPE กับอาหารร้อน
- 3) นิยมใช้ทำถุงบรรจุนมปิ้ง เนื่องจาก PE ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจึงช่วยป้องกันมิให้ขนมปิ้งแห้ง เนื่องจากสูญเสียความชื้นออกไป นอกจากนั้นราคาของ PE ไม่สูงเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของขนมปิ้ง
- 4) นิยมใช้ทำถุงบรรจุผักและผลไม้สด เนื่องจาก PE ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ดี ทำให้มีก๊าซออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาเพียงพอให้พืชหายใจและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชคายออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็สามารถซึมผ่านออกไปได้ง่าย ในบางกรณีจำเป็นต้องเจาะรูที่ถุงเพื่อช่วยระบายไอน้ำที่พืชคายออกมา

- 5) นิยมใช้ LDPE เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องจากกระดาษและแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นถุงหรือของบรรจุอาหาร ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้จึงนิยมนำ LDPE มาประกบติดกับวัสดุต่าง ๆ เหล่านี้ โดยให้ LDPE อยู่ชั้นในสุด และทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกด้วยความร้อน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ของบะหมี่สำเร็จรูป แผ่นปิดด้วยโยเกิร์ต กล่องนมยูเอชที เป็นต้น
- 6) พลาสติก PE ชนิดยืดตัวได้ (Stretch film) นิยมใช้ห่ออาหารสดพร้อมปรุง เนื้อสด และอาหารทั่วไป รูปแบบที่นิยมใช้ คือ ใช้ถาดรองอาหารแล้วห่อด้วยฟิล์มยืดตัวได้
- 7) PE ไม่นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่มีไขมันสูง เช่น เนย ถั่วทอด ขนมขบเคี้ยว



บทที่ 3

สารเติมแต่งในพอลิเมอร์

3.1 สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ (Additives for polymers)^{[2], [4]}

พอลิเมอร์ที่นำไปใช้งานนั้น ถ้านำไปใช้เลยโดยไม่ได้ใส่สารเติมแต่งบางชนิดเข้าไป จะพบว่าพอลิเมอร์นั้นขาดความคงทน ไม่นานจะเกิดการย่อยสลายทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปในทางที่ไม่ต้องการ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการใส่สารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้เหมาะสมและคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น สารเติมแต่งสามารถจำแนกออกตามหน้าที่ที่เป็นหมวดหมู่ต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งย่อยเป็นกลุ่มตามหน้าที่ที่เฉพาะเจาะจง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การจัดแบ่งหมวดหมู่และกลุ่มย่อยต่าง ๆ ของสารเติมแต่งสำหรับวัสดุพลาสติก^[4]

หมวดหมู่ของสารเติมแต่ง	กลุ่มย่อยของสารเติมแต่ง
1. สารเติมแต่งที่ใช้ในการแปรรูป	ก. สารเสถียรภาพในการแปรรูป ข. สารหล่อลื่น ค. สารลดความหนืด ง. สารเร่งการหลอมพลาสติก
2. สารช่วยเพิ่มความสามารถในการโค้งงอ	ก. พลาสติกไซเซอร์
3. สารกันการเสื่อมอายุ	ก. สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ข. สารเสริมเสถียรภาพเนื่องจากรังสีอุลตราไวโอเล็ต
4. สารปรับปรุงสภาพผิว	ก. สารต่อต้านไฟฟ้าสถิตย์ ข. สารกันติด
5. สารปรับปรุงสมบัติทางแสง	ก. รงควัตถุและสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การจัดแบ่งหมวดหมู่และกลุ่มย่อยต่างๆ ของสารเติมแต่งสำหรับวัสดุพลาสติก⁽⁴⁾ (ต่อ)

หมวดหมู่ของสารเติมแต่ง	กลุ่มย่อยของสารเติมแต่ง
6. สารหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ	ข. สารเพิ่มความเป็นผลึก
	ก. สารยับยั้งการติดไฟ
	ข. สารกันไฟ
	ค. สารลดควัน
7. สารช่วยให้เกิดโฟม	ก. สารให้ฟอง

3.2 ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม⁽²⁾

3.2.1 แอนติออกซิแดนต์และสตาบิไลเซอร์ (Antioxidants and stabilizers)

พอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายได้ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรือถูกแสงหรือถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นในการนำพอลิเมอร์ไปใช้งานมักจะมีการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในพอลิเมอร์ สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อช่วยให้พอลิเมอร์เสถียรมากขึ้นนี้ เรียกว่า สตาบิไลเซอร์ ถ้าเป็นสตาบิไลเซอร์ที่ป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์ เรียกว่า แอนติออกซิแดนต์ แต่ถ้าเป็นสตาบิไลเซอร์ที่ช่วยไม่ให้ถูกย่อยสลายเวลาถูกแสงหรือความร้อน หรือพลังงานอื่น ๆ จะเรียกว่า สตาบิไลเซอร์สำหรับความร้อน หรือ สตาบิไลเซอร์สำหรับแสงอุลตราไวโอเลต ตัวอย่างแอนติออกซิแดนต์ ได้แก่ อะเซตลดีไฮด์ แอนนิลีน (VGB) อัลคิลอัลฟาแนฟริลามีน (Agerite resin) และพวก เอมีน ฟีนอล ที่มีหมู่กีดขวางมาก ๆ เป็นต้น ส่วนตัวอย่างพวกสตาบิไลเซอร์ที่ช่วยป้องกันการสลายตัวที่เกิดจากแสง ได้แก่ คาร์บอนดำ (Carbon black) เป็นต้น

3.2.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติดีขึ้นเหมาะสมกับการใช้งานโดยไปช่วยลดความแข็ง พลาสติไซเซอร์จะไปช่วยให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวง่ายขึ้น ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature, Tg) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งเปราะเหมือนแก้ว เปลี่ยนเป็นอ่อนยืดหยุ่น และเหนียวขึ้น ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ ต้องเติมไวนิลอะซีเตตเป็นพลาสติไซเซอร์ช่วยทำให้ยืดหยุ่นดีขึ้น ในกรณีที่พลาสติไซเซอร์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมลงไปทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ คือ โมเลกุลของ พลาสติกไซเซอร์ เกิดพันธะโคเวเลนต์กับพอลิเมอร์ กรณีเช่นนี้เรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) แต่ถ้าพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเป็นเพียงส่วนผสมอยู่ในพอลิเมอร์ กรณีนี้เช่นนี้เรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) ชนิดของพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่กันอยู่แบ่งออกได้เป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้

1) เฟทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate esters) ใช้มากที่สุดในการบรรดาพลาสติกไซเซอร์ทั้งหมด คือ มากกว่าครึ่งหนึ่งของพลาสติกไซเซอร์ทั้งหมดรวมกัน

2) ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters) ที่สำคัญ ได้แก่ Tricresyl phosphate พลาสติกไซเซอร์พวกนี้ นอกจากช่วยทำให้เกิดความยืดหยุ่นแล้ว ยังช่วยป้องกันการติดไฟได้ด้วย

3) สารประกอบพวกอะดิเปต (Adipates) อะซีเลต (Azelates) โอลิเอต (Oleates) และ ซีบาแคต (Sebacates) ซึ่งมักใช้มากในไวนิลเรซิน เพื่อทำให้ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ ๆ

4) สารจำพวกอีพอกซี ซึ่งได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับน้ำมันพืชที่ไม่อิ่มตัวและกรดไขมัน

5) เอสเทอร์ของกรดไขมันจากธรรมชาติ พวกนี้จะใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต เพราะราคาไม่แพงแต่ไม่ค่อยดีนัก ต้องใช้ผสมกับพลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่น ๆ ด้วย จึงเรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ

6) อนุพันธ์ของไกลคอล กลุ่มนี้นิยมใช้เป็นตัวหล่อลื่น และทาในแบบพิมพ์ ช่วยให้พลาสติกหลังแปรรูปแล้วไม่ติดแบบพิมพ์

7) สารประกอบพวกซัลโฟนาไมด์ (Sulfonamides) นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์กับเซลลูโลสเอสเทอร์ ฟีนอลิกเรซิน อะมิโนเรซิน และพลาสติกพวกเอไมด์และโพรตีน

8) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอน นิยมใช้ผสมกับพลาสติกไซเซอร์ตัวอื่น ๆ สารประเภทนี้จะเป็พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ

3.2.3 ฟิลเลอร์ (Fillers)¹¹¹

ได้แก่ สารจำพวกผง หรือ จำพวกเส้นใย (Fibrous) ที่ใช้เติมใส่พอลิเมอร์เพื่อทำให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ดีขึ้น เหมาะสำหรับการใช้งาน เช่น ทำให้แข็งแรงขึ้น มีความคงรูป เพิ่มความคงทนต่อแรงกระแทกและแรงอัด เพิ่มความทนทานต่อความสึกหรอ และทนต่อความร้อน ฟิลเลอร์ที่ใช้ทั่วไปเป็นสารที่มีราคาถูกจึงช่วยลดต้นทุนการผลิตได้

ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ประเภทของฟิลเลอร์และตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในพอลิเมอร์^[5]

1. Organic materials	(3) Anthophyllite
A. Cellulosic products	(4) Crocidolite
1. Wood products	(5) Tremolite
a. Kraft paper	(6) Actinolite
b. Chips	b. Kaolinite (China clay)
c. Coarse flour	c. Mica
d. Ground flour	d. Nepheline syenite
(1) Softwood flour	e. Talc
(2) Hardwood flour	f. Wollastonite
(3) Shell flour	2. Synthetic products
2. Comminuted cellulose products	a. Calcium silicate
a. Chopped paper	b. Aluminum silicate
b. Diced resin board	C. Glass
c. Crepe paper	1. Glass flakes
d. Pulp preforms	2. Solid glass spheres
3. Fibers	3. Hollow glass spheres
a. α -Cellulose	4. Milled fibers
b. Pulp preforms	5. Fibrous glass
c. Cotton flock	a. Filament
d. Textile byproducts	b. Rovings
e. Jute	c. Woven roving
f. Sisal	d. Yarn
g. Rayon	e. Mat
B. Lignin-type products	f. Fabric
1. Ground bark	D. Metals
2. Processed lignin	E. Boron filaments
C. Synthetic fibers	F. Metallic oxides
1. Polyamides (nylon)	1. Ground material
2. Polyesters (Dacron)	a. Zinc oxide
3. Polyacrylonitrile (Orlon, Acrilan)	b. Alumina
D. Carbon	c. Magnesia
1. Carbon black	d. Titania
a. Channel black	2. Whiskers
b. Furnace black	a. Aluminum oxide (sapphire)
2. Ground petroleum coke	b. Beryllium oxide
3. Graphite filaments	c. Magnesium oxide
4. Graphite whiskers	d. Thorium oxide
e. Zirconium oxide	
II. Inorganic materials	G. Calcium carbonate
A. Silica products	1. Chalk
1. Minerals	2. Limestone
a. Sand	3. Precipitated calcium carbonate
b. Quartz	H. Polyfluorocarbons
c. Tripoli	I. Other fillers
d. Diatomaceous earth	1. Whiskers (nonoxide)
2. Synthetic materials	a. Aluminum nitride
a. Wet-processed silica	b. Beryllium carbide
b. Pyrogenic silica	c. Boron carbide
c. Silica aerogel	d. Silicon carbide
B. Silicates	e. Silicon nitride
1. Minerals	f. Tungsten carbide
a. Asbestos	2. Barium ferrite
(1) Chrysotile	3. Barium sulfate
(2) Amosite	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สารเติมแต่งอื่น ๆ ^[11]

3.3.1 สารที่ให้สี (Colorants and pigments)

พอลิเมอร์จำนวนมากที่นำมาใช้งานอาจมีการเติมสีหรือย้อมสีเพื่อเพิ่มความสวยงาม และความน่าใช้ของวัตถุที่ผลิตขึ้น สารที่เติมใส่เพื่อให้เกิดสีอาจเป็นสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ก็ได้

1) สารอินทรีย์ ตัวอย่างได้แก่ สารจำพวกเอโซ (Azo) มักให้สีเหลืองหรือแดง พทาโลไซยาไนด์ (Phthalocyanine) ให้สีน้ำเงิน และ แอนทราควิโนน (Anthraquinone) ให้สีตั้งแต่ส้มแดงไปถึงม่วง เป็นต้น

2) สารอนินทรีย์ ตัวอย่างได้แก่ ออกไซด์ของโลหะซึ่งใช้เป็นสีทาเป็นเวลาหลายร้อยปีแล้ว ออกไซด์ของโลหะที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งให้สีขาว ออกไซด์ของเหล็กที่มีในธรรมชาติเรียกว่า Ochres ให้สีตั้งแต่แดงถึงเหลือง นอกจากนี้แล้วยังมีแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ให้สีขาว สารประกอบแคดเมียม (Cd) ให้สีตั้งแต่สีเหลืองถึงสีเลือดนก (Maroon) เลดโครเมต (PbCrO_4) ให้สีเหลือง และ โมลิบเดต (Molybdate) ซึ่งให้สีส้ม เป็นต้น แต่ปัจจุบันนี้เลิกใช้เลดโครเมตแล้ว เพราะตะกั่วเป็นสารพิษ

การผสมสีให้กับพลาสติกทั่วไป ทำโดยการเติมสีให้กับผงพลาสติก ผสมให้เข้ากันดี แล้วให้ผ่านลูกกลิ้ง (Rolls) ที่ร้อน (แบบ Two rolls mill หรือแบบมีลูกกลิ้งมากกว่าสองก็ได้) หรือมีฉนวนก็ผสมในเครื่องรีด (Extruder)

3.3.2 สารที่ช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ (Flame retardants) ^[12]

ปกติพอลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอนสามารถติดไฟได้เหมือนพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ เช่นเดียวกัน การนำพอลิเมอร์ไปใช้งานจึงมักผสมสารเติมแต่งบางตัวลงไปช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟทำให้ติดไฟยาก สารประกอบที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide) โดยจะต้องใช้ผสมกับสารที่มีคลอรีนด้วย เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบแอนติโมนีออกซีคลอไรด์ (Antimony oxychloride) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ป้องกันหรือหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้ดีมาก นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบอนุพันธ์ของแอนติโมนีอื่นๆ ฟอสเฟตเอสเทอร์ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์กี้สามารถใช้เป็นตัวหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้ดีเช่นกัน โดยเฉพาะใช้มากกับพวกไวนิลเรซิน

สารที่ช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟที่กล่าวมานั้น จัดเป็นตัวยหน่วงเหนี่ยวภายนอก บางครั้งอาจพบตัวยหน่วงเหนี่ยวภายใน คือ อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอสเทอร์ที่ได้จาก Chlorendic anhydride, Tetrabromophthalic anhydride, Phosphate polyols หรือ อีพอกซีเรซินที่ได้จาก Tetrabromobisphenol A พอลิเมอร์ดังกล่าวบรรจุคลอรีนหรือโบรมีน หรือ ฟอสฟอรัส อยู่ในโมเลกุล และช่วยหน่วงเหนี่ยวการติดไฟได้

3.3.3 สารหล่อลื่น (Lubricants)

พอลิเมอร์ที่ผลิตไปใช้งานเป็นเส้นใย จำเป็นต้องใส่สารหล่อลื่น เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะถูกรีดออกจากเครื่อง สารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันได้แก่ น้ำมันพืช เกลือของกรดสเตียริกเอไมด์ หรือผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม เป็นต้น สารหล่อลื่นนี้มักเติมลงในพอลิเมอร์ก่อนจะผ่านกระบวนการแปรรูป ปกติใช้ปริมาณไม่มากนัก คือประมาณ 0.05 – 0.5 % โดยน้ำหนัก สารหล่อลื่นในพอลิเมอร์ที่ผลิตเป็นแผ่นฟิล์มเรียกว่า แอนติบล็อก (Antiblock agents) ซึ่งจะช่วยให้แผ่นฟิล์มติดกันเวลาวางซ้อนกันจำนวนมาก ๆ และช่วยลดแรงเสียดทานของผิวหน้า ตัวอย่างสารที่ใช้เป็นแอนติบล็อก เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

3.3.4 สารต้านไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic agent)¹¹¹

พอลิเมอร์ที่โครงสร้างของโมเลกุลมีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่ไม่มีสภาพขั้วเช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ในระหว่างผ่านกระบวนการแปรรูป อาจเกิดภาวะไฟฟ้าสถิตย์ (ประจุบวกและลบ) ขึ้นที่ผิวของพอลิเมอร์ได้ ถ้ากระบวนการแปรรูปมีหลายขั้นตอนโอกาสที่จะสะสมไฟฟ้าสถิตย์ก็ยังมีมากขึ้น ซึ่งผิวของพอลิเมอร์ที่มีประจุสามารถดูดฝุ่นได้เป็นอย่างดี จึงไม่ควรให้เกิด บางครั้งการสะสมไฟฟ้าสถิตย์อาจสูงถึง 3000 โวลต์ ซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการสะสมของไฟฟ้าสถิตย์บนผิวของพอลิเมอร์ จึงนิยมเติมสารต้านไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งสารนี้อาจจะผสมอยู่ในพอลิเมอร์ หรือเคลือบอยู่บนผิวก็ได้ สารที่ใช้เป็นตัวต่อต้านไฟฟ้าสถิตย์มีหลายประเภท ได้แก่ สารจำพวกอะมีน (RNH_2) เกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium, $\text{R}_4\text{N}^+\text{X}^-$) ฟอสเฟตอินทรีย์ (R_3PO_4) หรือ เอสเทอร์ของพอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น

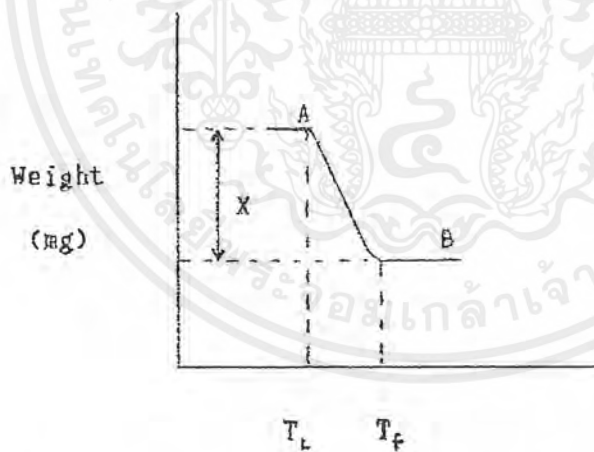
บทที่ 4

การวิเคราะห์โดยวิธีเทอร์โมแกรวิเมตริก^[6]

(Thermogravimetric analysis)

TGA เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (Thermal analysis,TA) นำมาใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (Thermal stability) และหาองค์ประกอบทางเคมีของสาร

เครื่อง TGA เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลา หรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ TGA Thermogram หรือที่เรียกว่า TG curve ลักษณะโดยทั่วไปของ Thermogram ที่ได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

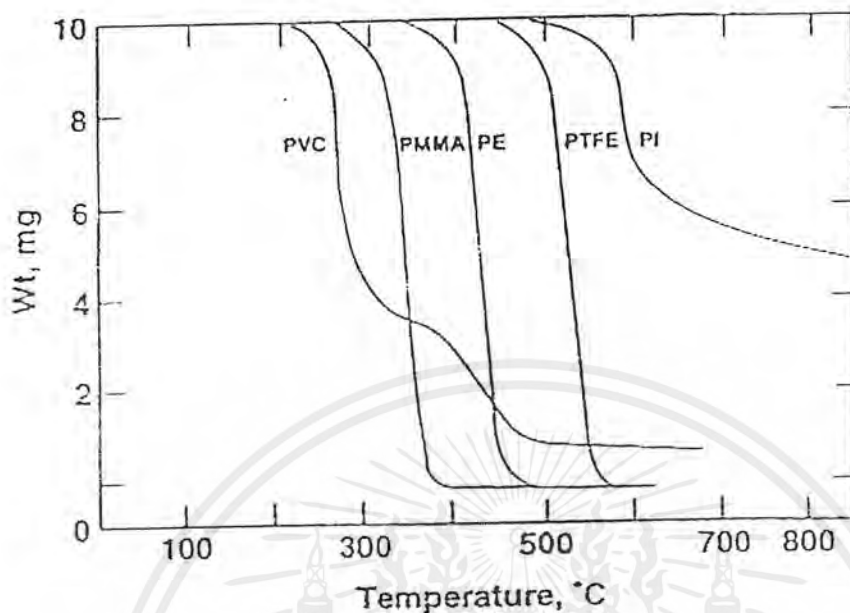


รูปที่ 4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ Thermogram โดยสมมติว่าเผาสาร A แล้วเปลี่ยนไปเป็นสาร B

T_L คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

T_f คือ อุณหภูมิสุดท้าย (Final temperature) ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

X คือ น้ำหนักของสารที่สูญหายไปหรือเปลี่ยนแปลงไป

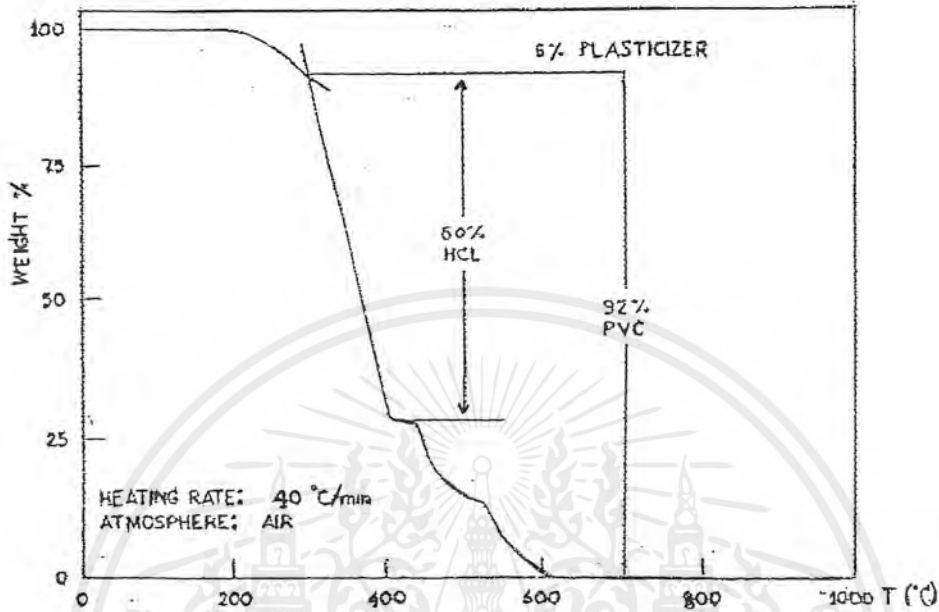


รูปที่ 4.2 ลักษณะ TG curve ของตัวอย่างพอลิเมอร์ต่าง ๆ ^[9]

เครื่องมือ TGA นี้มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างพอลิเมอร์ ผ่าน หิน และผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยใช้วิเคราะห์หาความขึ้น ชนิดของพอลิเมอร์ สารที่สลายตัวเมื่อได้ รับความร้อน (Volatile matter) และองค์ประกอบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการควบคุมคุณภาพ และ วิเคราะห์ทดสอบคุณลักษณะของวัสดุอีกด้วย

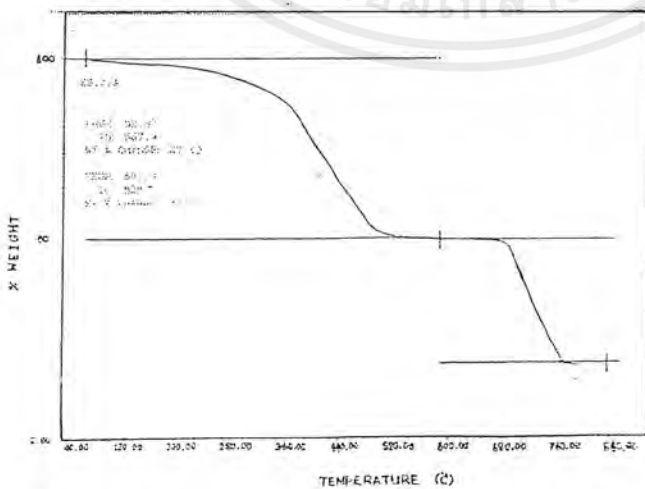
การใช้เครื่อง TGA เพื่อการวิเคราะห์ทดสอบมีอยู่ 2 ประการ ดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทางจลศาสตร์ (Characterize the kinetics of a reaction) เช่น ปฏิกิริยา Decomposition, Evaporization และ Dehydration
2. ใช้ในการศึกษาปริมาณของส่วนประกอบต่าง ๆ ในของผสม ดังต่อไปนี้
 - 1) วิเคราะห์หาปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ หรือแอนติออกซิแดนซ์ โดยน้ำหนัก ที่หายไปในช่วงแรก เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อน ก็คือน้ำหนักของพลาสติกไซเซออร์นั่นเอง จากนั้นพอลิเมอร์จะเกิด Decomposition และ Combustion ต่อไปตามลำดับดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การหาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่ผสมอยู่ในพอลิไวนิลคลอไรด์จาก TG curve

2) ใช้ในการวิเคราะห์ โพลีเมอร์ผสม เนื่องจากในปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดมาผสมกัน เพื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ หรือเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต เช่น ใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ (Styrene-butadiene rubber, SBR) เป็นต้น เครื่อง TGA สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลิตภัณฑ์นั้นทำจากยางชนิดเดียวกัน หรือ 2 ชนิดผสมกัน โดยดูจากคุณสมบัติในการสลายตัวของยางที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะของ TG Curve ของ PTFE ผสมกับ ACETAL

ปน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 01306 มว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่
 2542 041403

3) ใช้วิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) และตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers)

เครื่อง TGA ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนของตัวเครื่อง TGA (The TGA unit itself) ซึ่งประกอบด้วย

1) Thermal system หรือ Furnace system เป็นระบบที่ให้ความร้อนกับสารตัวอย่าง โดยอาศัยลวด Platinum ที่ทนความร้อน (Platinum resistance wire heating element) เป็นตัวให้ความร้อน ซึ่งใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 1200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และอุณหภูมิของเตา (Furnace) จะถูกควบคุมโดย ส่วน Temperature programming

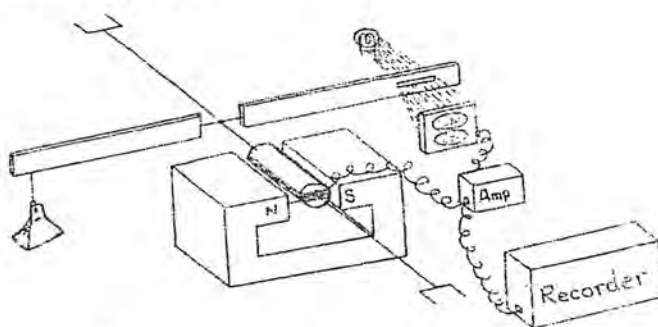
2) Sample pan คือ ภาชนะใส่สารตัวอย่างทำด้วย Platinum ช่วงน้ำหนักที่ใช้ได้ตั้งแต่ 0.02-500 mg full scale

3) Thermocouple คือ เครื่องตรวจวัดความร้อน ในเครื่อง TGA มี Thermocouple 2 อัน ดังนี้

3.1) Control thermocouple ทำด้วยลวด Platel II. อยู่ในเตาจะเป็นตัววัดอุณหภูมิในเตาเพื่อให้เป็นตามที่โปรแกรมไว้

3.2) Sample thermocouple ทำด้วยลวด Chromel-alumel อยู่ชิดกับสารตัวอย่าง จะวัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างขณะได้รับความร้อน และปรากฏผลที่ Recorder หรือคือค่าอุณหภูมิที่อยู่บนแกน y ของ TG curve

4) Balance system หรือ Gravimetric part คือ เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งอาจจัดว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่อง TGA ก็ได้ ในที่นี้ใช้เครื่อง TGA ที่มีระบบการชั่งเป็นแบบ Null point balance ดังรูปที่ 4.5



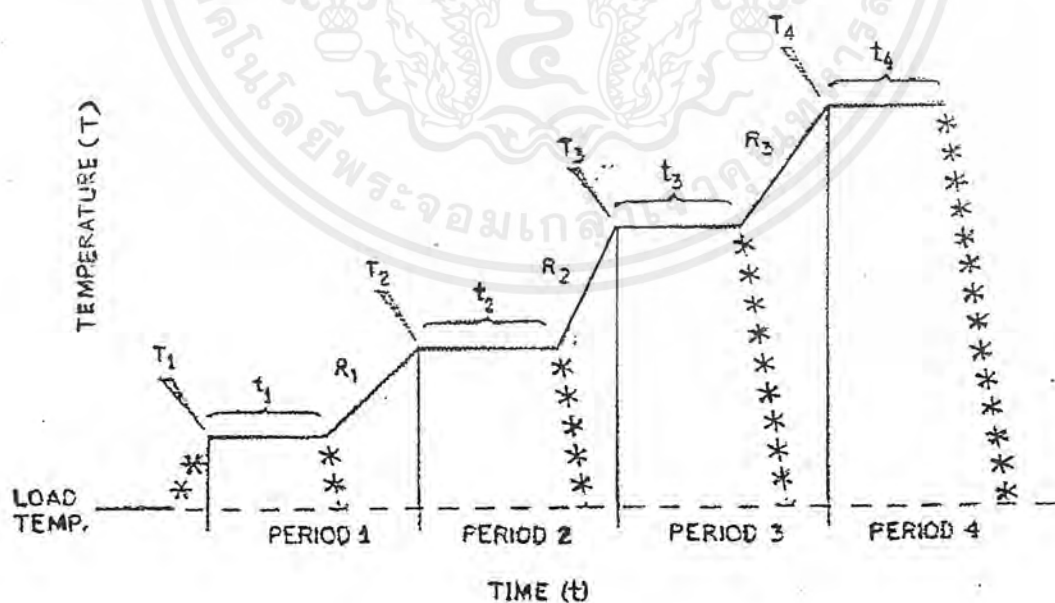
รูปที่ 4.5 ระบบการชั่งแบบ Null point balance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า Balance beam ทำด้วย Quartz อยู่ในตำแหน่งที่เป็นแนวนอน โดยปลายหนึ่งของ Balance beam จะมี Sample pan แขนงอยู่ และอีกปลายหนึ่งจะมีลำแสงจากหลอดไฟที่มีความเข้มแสงคงที่ตกกระทบผ่านไปยัง Slit ลำแสงจะถูกโฟกัสไปยัง Photodiode 2 อัน ที่ตั้งซ้อนกันอยู่ในแนวตั้งเมื่อ Balance beam อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ลำแสงที่ตกกระทบ Photodiode ทั้งสองจะเท่ากัน แต่ถ้า Balance beam อยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมดุลอันเนื่องมาจาก น้ำหนักของสารใน Sample หายไปลำแสงที่ตกกระทบ Photodiode ทั้งสองก็จะไม่เท่ากัน

2. ส่วนควบคุมหรือโปรแกรมอุณหภูมิพร้อมจอแสดงผล (The temperature programming unit or control unit with screen) ส่วนนี้จะเชื่อมโดยตรงกับส่วนที่ 1 อุณหภูมิ หรือความร้อนที่เตาได้รับจะถูกควบคุมด้วย Temperature programming โดยทั่ว ๆ ไปจะทำได้ 2 แบบ คือ

- 1) Isothermal programme เป็นการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราส่วนที่คงที่ตลอด เช่น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หรือ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นต้น วิธีนี้เหมาะกับการใช้ศึกษาความทนทานต่อความร้อน หรือต่อการถูกออกซิไดส์ของสาร
- 2) Multi-stage temperature programme เป็นการโปรแกรมให้ความร้อนเป็นช่วง ๆ (segment) ดังรูปที่ 4.6



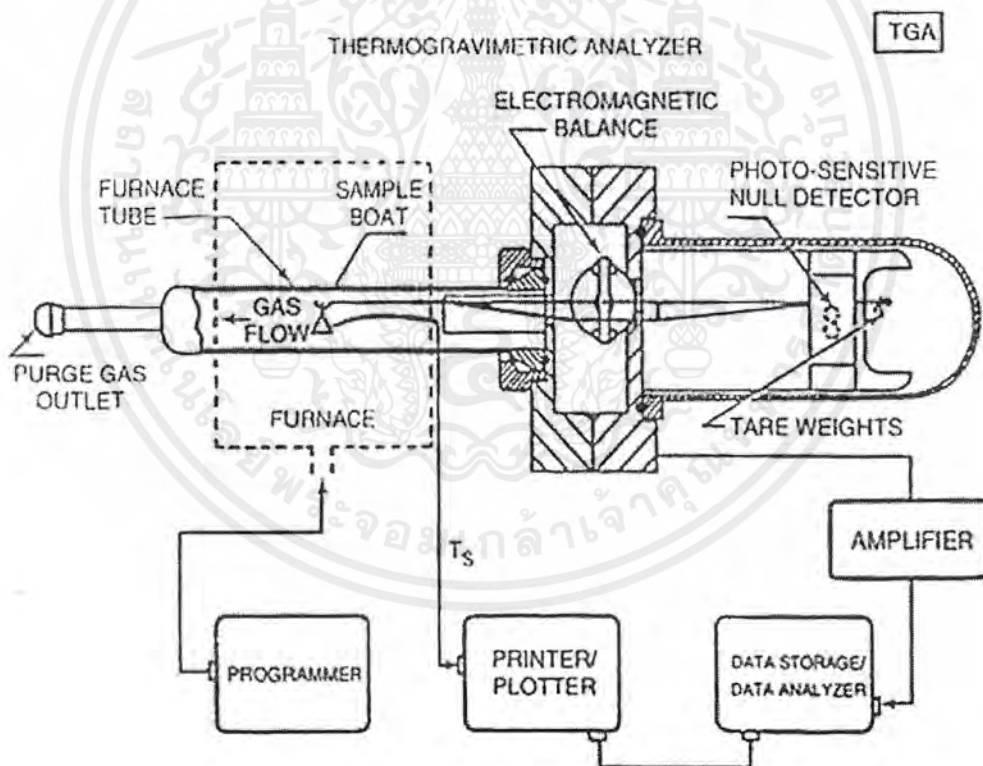
รูปที่ 4.6 ลักษณะการโปรแกรมให้ความร้อนเป็นช่วง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปประกอบด้วย 4 Segment แต่ละ Segment ประกอบด้วย การให้ความร้อนคงที่ หรืออุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งในช่วงเวลาที่จำกัด จากนั้นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่แน่นอนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด นั่นคือ แต่ละ Segment จะประกอบด้วย Isothermal temperature, Holding time และ Scanning time

Multi-stage temperature programme ใช้ได้กับการวิเคราะห์หาค่าประกอบในสาร โดยเฉพาะจะให้ผลที่ถูกต้องแน่นอนในการหาค่าประกอบในสารพวกพอลิเมอร์

3. ส่วนบันทึกข้อมูล หรือแสดงผล (The digital plotter, printer) เป็นตัวบันทึกน้ำหนักของสารเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิจะได้ TGA thermogram อุณหภูมิของสารตัวอย่าง และแกน y เป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA ^[8]

บทที่ 5

กระบวนการสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)^[7]

การสลายด้วยความร้อน เป็นกระบวนการที่สารอินทรีย์โดยเฉพาะสารพวกพอลิเมอร์ ถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูง ๆ ในที่ที่อับอากาศ ปราศจากออกซิเจน หรือมีการจำกัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนไว้ ทำให้เกิดการสลายออกไปเป็นองค์ประกอบย่อยชนิดต่าง ๆ ซึ่งการสลายด้วยความร้อนสารจำพวกพลาสติก จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปก๊าซ ของเหลว และถ่าน ซึ่งล้วนสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ในรูปของเชื้อเพลิง

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการสลายด้วยความร้อนทั่ว ๆ ไป เป็นดังนี้

- ปฏิกิริยามูลฐาน

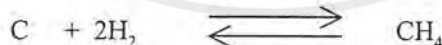
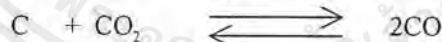
สารอินทรีย์

ความร้อน

ปราศจากออกซิเจน

ก๊าซ + ของเหลว+ ถ่าน

- ปฏิกิริยารอง



ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการสลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นผลของปฏิกิริยาทางเคมีในลักษณะอนุกรมที่ซับซ้อน ทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนพวกก๊าซ เชื้อเพลิงของเหลว และกากของแข็งชนิดต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวประกอบด้วย

- 1) ส่วนที่เป็นก๊าซ มักประกอบไปด้วยไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ฯลฯ
- 2) ส่วนที่เป็นของเหลว มักประกอบไปด้วย น้ำ น้ำมัน น้ำมันดิน และสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ เป็นต้นว่า กรดอะซิติก อะซิโตน และเมทานอล
- 3) ส่วนที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ถ่านคาร์บอนและขี้เถ้า เป็นส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ปฏิกิริยาต่าง ๆ เกี่ยวกับการสลายด้วยความร้อนของพลาสติก

ในระหว่างการสลายด้วยความร้อนพลาสติก ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ อาจเกิดปฏิกิริยาที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้ คือ

1) เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อย่อยสลายเป็นโมโนเมอร์ เช่นพอลิเมทอะครีเลต (Polymethylmetracylate : PMMA) และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene : PTFE)

2) เกิดการแบ่งแยกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย (Fragmentation) ที่โซ่หลัก และแตกตัวที่ความยาวโซ่ (Chain) ต่าง ๆ กัน ทำให้เกิดเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) PE และ PP สามารถที่จะย่อยสลายโดยความร้อนไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนได้มากมาย ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะมีพาราฟิน (Paraffin) และโอเลฟิน (Olefin) ตั้งแต่ C₇ ถึง C₁₂ เป็นส่วนใหญ่ ที่อุณหภูมิต่ำชิ้นส่วนย่อย ๆ นี้ จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น และอาจมีการเชื่อมโยง (Cross-linking) เกิดขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิสูง ๆ ผลิตภัณฑ์จะเป็นพวกก๊าซต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน มีเทน เอทิลีน โพรพิน ฯลฯ

3) เกิดการย่อยสลายทั้งในลักษณะรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ได้แก่ พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) และพอลิไอโซบิวทีน (Polyisobutene : PIB)

4) เกิดการดึงเอาองค์ประกอบหลัก ๆ ออก เหลือทิ้งไว้แต่กากถ่าน เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ให้ไฮโดรคลอริก และพอลิไวนิลอะซีเตตจะให้กรดอะซิติกออกมา

5) ขจัดโซ่ที่อยู่ด้านข้าง (Side-chain) แล้วตามด้วยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล จะให้สารประกอบที่ไม่อิ่มตัว ได้แก่ พวกเทอร์โมเซตติงต่าง ๆ เช่น เรซินฟีนอลิก (Pheolic) และยูเรียอิก (Ureaic) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่ซับซ้อนมากและมีช่วงอุณหภูมิต่อนข้างกว้าง

5.2 รูปแบบของการย่อยสลายโดยความร้อนของพอลิเมอร์

การที่พอลิเมอร์เกิดการย่อยสลายภายใต้อิทธิพลของความร้อนจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างทางเคมีภายในตัวพอลิเมอร์เอง หรือจากการที่มีโครงสร้างที่ไม่เสถียร เนื่องจากมีสิ่งเจือปนหรือสารอื่นที่เติมลงไปอยู่ในโมเลกุล การย่อยสลายทางความร้อนจะไม่เกิดขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิที่สูงพอเพียง ที่ทำให้พันธะมูลฐานทางเคมีต่าง ๆ แยกออกจากกัน รูปแบบของการย่อยสลาย ของพอลิเมอร์ด้วยความร้อนแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ได้ 2 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันที่โซ่ของพอลิเมอร์

2. การย่อยสลายอย่างเคส่ม

การย่อยสลายทางความร้อนทั้ง 2 รูปแบบนี้ อาจเกิดขึ้นแยกกันเป็นเอกเทศ หรือเกิดในลักษณะที่ประสมกัน กรณีหลังค่อนข้างเกิดขึ้นเป็นปกติกว่าการดีพอลิเมอร์ไรเซชันที่โซ่ นับเป็นกระบวนการย่อยสลายที่เป็นส่วนสำคัญของพอลิเมอร์พวกไวนิล ในขณะที่การย่อยสลายพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymers) โดยส่วนใหญ่แล้ว มักเนื่องมาจากการแตกแยกของโซ่อย่างเคส่มไม่เลือกตำแหน่งเกิด

5.2.1 การดีพอลิเมอร์ไรเซชันที่โซ่

การย่อยสลายตัวแบบนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการปลดปล่อยพวกหน่วยโมโนเมอร์ต่างๆ ที่ตำแหน่งปลายโซ่ หรือที่ซื่ออ่อนแอ เป็นการย้อนกลับของขั้นตอนการโพรพาเกชันในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว ซึ่งมักเกิดขึ้นบ่อย ๆ เมื่อโซ่ของพอลิเมอร์มีอะตอมคาร์บอนตติภูมิ (Tertiary carbon) รวมอยู่ด้วย การเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันนี้จะเริ่มต้นที่อุณหภูมิระดับสูงของมัน การย่อยสลายลักษณะนี้อาจเรียกว่าเป็นการดีโพรพาเกชัน หรือไม่เกิดชิปปีง เราอาจแบ่งการย่อยสลายทางความร้อนในรูปแบบนี้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก.) พวกที่มีการย่อยสลายด้วยกระบวนการกำจัดอย่างเป็นลำดับ (Sequential elimination) โดยมีการปลดปล่อยโมโนเมอร์ออกมา

ข.) พวกที่มีการย่อยสลายด้วยกระบวนการกำจัดอย่างเป็นลำดับ แต่มิได้ปลดปล่อยโมโนเมอร์ออกมา

การย่อยสลายแบบไม่เกิดชิปปีง โดยมีการปลดปล่อยโมโนเมอร์ออกมานั้น จะเกิดขึ้นจากที่ปลายโซ่หรือตำแหน่งที่อ่อนแอในโมเลกุล ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมแบบนี้ ได้แก่ พวก PMMA โดยจะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



การย่อยสลายแบบนี้มีลักษณะเฉพาะที่สำคัญ คือ เกิดการกลายเป็นไอหรือก๊าซ (Volatilization) อย่างรวดเร็ว โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

หรือเปลี่ยนแปลงไปอย่างน้อยมาก จากการวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลและการสูญเสียน้ำหนักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลชี้ให้เห็นว่า ลักษณะของการย่อยสลายที่แท้จริงจะเป็นปฏิกิริยาดีโพรพาเกชัน และเป็นลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ขึ้นมา นอกจากนี้ตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นเด่นชัดที่ได้อันหนึ่ง ได้แก่ พวกพอลิสไตรีนชนิดต่างๆ ซึ่งภายในโซ่จะมีอะตอมของคาร์บอนตติยมิอยู่ ตาราง 5.1 แสดงถึงผลได้พวกโมโนเมอร์จากพอลิสไตรีนแต่ละชนิด

ตารางที่ 5.1 ผลที่ได้ของโมโนเมอร์จากพอลิเมอร์พวกพอลิสไตรีนชนิดต่างๆ

Compound	Monomer Yield (%)
Polystyrene	41
Poly (α -deuterostyrene)	68
Poly (β -deuterostyrene)	40
Poly (α,β,β -trifluorostyrene)	72
Poly (α -methylstyrene)	100

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคาร์บอนตติยมิมีความสำคัญอย่างยิ่งในการสนับสนุนให้เกิดการดีโพรพาเกชัน แม้ว่าเราจะใช้ไฮโดรเจนหนัก (Deuterium) เข้าแทนที่ก็ตาม

ส่วนการย่อยสลายแบบมีการกำจัดอย่างเป็นลำดับ แต่ไม่มีการปลดปล่อยโมโนเมอร์ออกมานั้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีการย่อยสลายในลักษณะนี้ได้แก่ พีวีซี ซึ่งพบว่าโมเลกุลเล็ก ๆ นั้น จะถูกกำจัดออกมาโดยไม่เกิดการฉีกขาดที่โซ่หลัก ทำให้เกิดการย่อยตัวของไฮโดรคลอริก และเปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ ปฏิกิริยานี้อาจเรียกว่า การดีไฮโดรคลอรีนชัน (Dehydrochlorination) แสดงได้ดังสมการ



5.2.2 การย่อยสลายแบบเดาสุ่ม

พอลิเมอร์แบบรวมตัวจำนวนมากมายหลายชนิด และพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymer) ทั้งหมดจะได้รับการสลายด้วยความร้อน โดยกลไกของการฉีกขาดแบบเดาสุ่ม ซึ่งเกิดการแตกแยกโซ่ออกไปที่จุดต่าง ๆ โดยไม่เลือกตำแหน่ง ขึ้นส่วน

ต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงมักมีขนาดใหญ่กว่าหน่วยโมโนเมอร์ ตัวอย่างการสลายตัวของรูปแบบนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน



ที่ขอบเขตปฏิกิริยาสูง ๆ โมเลกุลบางตัวที่เกิดจะระเหยกกลายเป็นไอ แต่ลักษณะเฉพาะหลัก ๆ ของรูปแบบการย่อยสลายชนิดนี้ คือ น้ำหนักโมเลกุลของมันลดลงไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ไปน้อยมากหรือไม่มีเลย การเริ่มต้นลดน้ำหนักโมเลกุลอย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิต่ำ ๆ นั้น สันนิษฐานได้ว่าเกิดมีข้อที่อ่อนแอในโซ่หลัก ส่วนการระเหยกกลายเป็นไอที่อุณหภูมิสูง ๆ นั้น โดยปกติเชื่อกันว่าเป็นปฏิกิริยาดิพอลิเมอไรเซชัน และการย้ายผ่านของไฮโดรเจน (Hydrogen transfer)

5.3 การสลายด้วยความร้อนของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 290 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้จะเกิดการลดน้ำหนักโมเลกุลลงด้วยการกลายเป็นไออย่างช้า ๆ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 360 องศาเซลเซียส การระเหยกกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงกลาง ๆ ระหว่างอุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส ถึง 360 องศาเซลเซียส นี้ Oakes และ Richards ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการทำลายพันธะต่าง ๆ จะลดลงไปเรื่อย ๆ แทนที่จะยังคงที่อยู่เหมือนเช่นในกระบวนการแบบเดาสุ่ม สิ่งนี้ทำให้นึกถึงการเกิดการฉีกขาดของข้อที่อ่อนแอในพอลิสไตรีน ในพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างแบบข้อที่อ่อนแอที่เป็นไปได้ปรากฏอยู่ 2 รูปแบบ คือ กลุ่มคาร์บอนิล และกลุ่มสาขาของโซ่ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงจะเกิดการก่อตัวเป็นพันธะคู่ในลักษณะ 1 พันธะต่อ 1 โซ่ที่เกิดการฉีกขาด Oakes และ Richards พิจารณาจากการวัดค่าทางสเปกโตรสโคปิคแล้วลงความเห็น ว่า ข้อที่อ่อนแอต่าง ๆ เป็นต้นเหตุของการย่อยสลายในตอนเริ่มต้น การฉีกขาดจำนวนมากจะเกิดขึ้นที่สาขาของโซ่ต่าง ๆ ทั้งกับกลุ่มคาร์บอนิลเปอร์ออกไซด์ หรือกลุ่มที่ไม่อิ่มตัว จากหลักการเบื้องต้นดังกล่าวและจากหลักฐานอื่น ๆ เขาได้เสนอว่า โครงสร้างต่าง ๆ ที่ถูกออกซิไดซ์ (ส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอนิล) จะเป็นข้อที่อ่อนแอที่แท้จริง และการดิพอลิเมอไรเซชันในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นปฏิกิริยาที่โซ่โดยเริ่มต้นที่โครงสร้างเหล่านี้ และเผยแพร่ผ่านยังจุดต่าง ๆ ของกิ่งก้านสาขา

และผู้ร่วมงานของเขาได้ทำการสลายด้วยความร้อนพอลิเอทิลีนที่สภาวะสูญญากาศ พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ที่คล้าย ๆ กับขี้ผึ้ง (Waxlike) ซึ่งมีโมโนเมอร์ คือ เอทิลีนอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการวิเคราะห์พอลิเมอร์ที่เหลืออยู่ (ภาค) ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (IR) พบว่า ไวนิลีน (Vinylene) ไวนิลไอดีน (Vinylidene) และกลุ่มไวนิลต่าง ๆ จะก่อตัวเกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายนี้ โดยที่พวกกลุ่มไวนิลจะมีความเข้มข้นเข้าที่จุดสูงสุด ในขั้นตอนสุดท้ายของการทำลายพวกพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear polymer) เขาจึงได้เสนอว่าปฏิกิริยาการย้ายผ่านในรูปแบบต่อไปนี้จะป็นรูปแบบหลัก ๆ ของการสลายด้วยความร้อนของพวกพอลิเอทิลีน

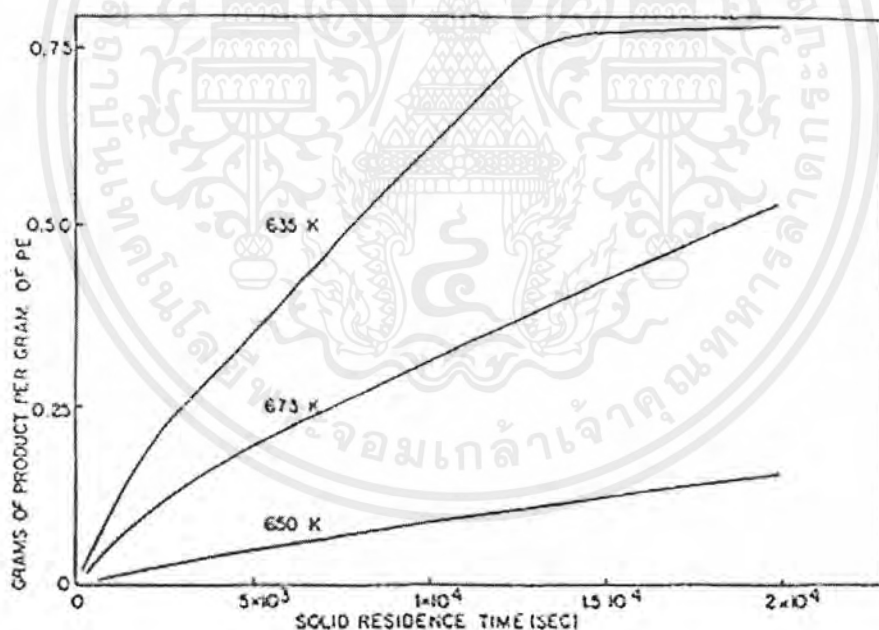


Bailey และ Liotta ได้ทำการสลายด้วยความร้อนสารพอลิเมอร์นี้ภายใต้ความดันลด (Reduce pressure) ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส พบว่าได้ผลผลิตพวกอัลเคน และอัลคีนหลากหลายชนิด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 600 องศาเซลเซียส ผลได้ของเอทิลีนโมโนเมอร์จะเพิ่มขึ้น 10 เท่าจาก 6 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ผลได้ของเอทิลีนจะไม่ขึ้นกับเวลาในการสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis time) ดังนั้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยทำให้เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น จากผลที่ได้ Bailey ได้ชี้แนะไว้ว่า พอลิเอทิลีนพวกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับสารประกอบที่ไม่อึดตัวซึ่งอย่างน้อยที่สุดจะมีไฮโดรเจน 1 ตัว ในตำแหน่งแกมมาของส่วนที่ไม่อึดตัว นั่นคือมันจะแตกสลายเป็นเศษชิ้นเล็กชิ้นน้อย โดยกลไกทางวงแหวนปิดในลักษณะโมเลกุลเดี่ยว เขาควบคุมโนภาพไว้ว่า ปฏิกิริยาเริ่มต้นจะเกี่ยวข้องกับการฉีกขาดที่โซ่ทั้งนี้เนื่องจากการหลุดออกของไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล

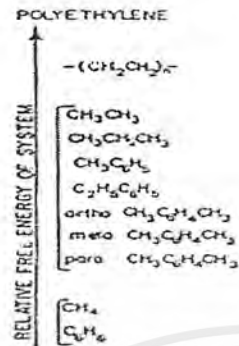
ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ของการย่อยสลายทางความร้อนของพอลิเอทิลีน จะแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดเป็นลักษณะแบบเคาสุ่มทั้งนี้เพราะว่า จะประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอน ตั้งแต่ C-1 จนถึง C-70 ทั้ง ๆ ที่เป็นเช่นนี้แต่อัตราการเกิดขึ้นที่สูงที่สุดซึ่งคาดว่าจะอยู่ในขอบเขตการระเหยกลายเป็นไอในกรณีที่เป็นแบบเคาสุ่ม ถึง 25 % ก็ไม่ได้เป็นไปตามนั้น อัตราการเกิดจะกลับลดลงไปเรื่อยๆ จากตอนเริ่มต้นที่สูง Wall และ Straus ได้อธิบายถึงความขัดแย้งที่ปรากฏขึ้นนี้ในลักษณะของโครงสร้างที่เป็นสาขาของโซ่ในพอลิเมอร์ เขาได้พบว่าอัตราการเกิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีนและโคพอลิเมอร์ของมันที่ล้วนมีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงเส้นนั้น จะไม่ปรากฏขึ้นไม่เพียงแต่ในพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขาเท่านั้นแต่จะเป็นกับโคพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่มี 1-บิวทีน (1-butene) และ 1-เพนทีน (1-pentene) อยู่ด้วย ดังนั้นพฤติกรรมแบบเคาสุ่มจะแสดงให้เห็นว่ามีอัตราการเกิดถึงค่าสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อสาขาต่าง ๆ ของมันเป็นกลุ่มเมทิล (methyl group) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการดำเนินงานการศึกษาของ The TRW systems group เกี่ยวกับการสลายด้วยความร้อนพอลิเอทิลีนพบว่ากลไกปฏิกิริยาการย่อยสลายจะมีรูปแบบที่แตกต่างไปจากพอลิไธรีน ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายประกอบไปด้วย พาราฟฟิน (paraffin) เป็นหลักมากกว่าที่จะเป็น โมโนเมอร์ ปฏิกิริยาการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 600 ถึง 710 เคลวินดูคล้ายกับว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ในตลอดช่วงที่มีการสูญเสียน้ำหนักที่ค่อนข้างกว้าง เมื่อใช้เริ่มถูกรุกเร้า กลไกต่างๆ จะประกอบไปด้วยการแตกออกจากโมเลกุลเป็นเศษชิ้นส่วนต่าง ๆ ติดตามมาอย่างรวดเร็ว รูปที่ 5.1 แสดงถึงจลนศาสตร์ของการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการย่อยสลายทางความร้อนของพอลิเอทิลีน รูปที่ 5.2 แสดงถึงปฏิกิริยาที่จะเป็นไปได้ของการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน จากความสมดุลของพอลิเอทิลีนผลที่ได้แสดงว่า เบนซีนก่อตัวที่อุณหภูมิ 733 เคลวินและความดัน 1 บรรยากาศ อย่างไรก็ตามตัวกลางต่าง ๆ (intermediate) ในปฏิกิริยาจะประกอบไปด้วย โทลูอีน อีเทน โพรเพน เอทิลเบนซีน และ ออไซด-เมต้า-พารา-ไดเมทิล-เบนซีน



รูปที่ 5.1 การเกิดผลิตภัณฑ์จากการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ 635, 673 และ 650 เคลวิน



รูปที่ 5.2 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน

5.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสลายด้วยความร้อน

กระบวนการสลายด้วยความร้อนของพลาสติกทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พวกของเหลว ก๊าซเชื้อเพลิง และของแข็ง ปริมาณและสัดส่วนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ ดังต่อไปนี้

5.4.1 อุณหภูมิในการสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis Temperature) จากการศึกษาสามารถสรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกระบวนการสลายด้วยความร้อน โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลที่ได้จะเป็นดังนี้ คือ

- 1) ปริมาณซีแก๊สลดลง
- 2) ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง
- 3) ค่าปริมาณความร้อนของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ลดลง
- 4) ปริมาณก๊าซ และค่าความร้อนเพิ่มขึ้น
- 5) ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้น

5.4.2 อัตราการให้ความร้อนและเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ สามารถสรุปผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ถ้าอัตราการให้ความร้อนต่ำ และอุณหภูมิที่ใช้ต่ำ จะช่วยให้เกิดผลิตภัณฑ์พวกของเหลวมาก
- 2) ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง และอุณหภูมิที่ใช้สูง จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พวกก๊าซมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ในช่วงเวลาที่เท่ากัน เมื่อใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ ๆ จะทำให้เกิดพวกถ่าน
มาก

5.4.3 สภาวะบรรยากาศต่างๆ

5.4.4 ชนิดและลักษณะเฉพาะของระบบเครื่องปฏิกรณ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายด้วยความร้อน ซึ่งได้แก่ ของเหลว ก๊าซ และถ่าน นอกจากจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังสามารถแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับชนิด และลักษณะเฉพาะของระบบเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้สามารถเลือกระบบการสลายด้วยความร้อนที่เหมาะสม ในอันที่จะบรรลุผลได้ผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนที่ต้องการ



บทที่ 6

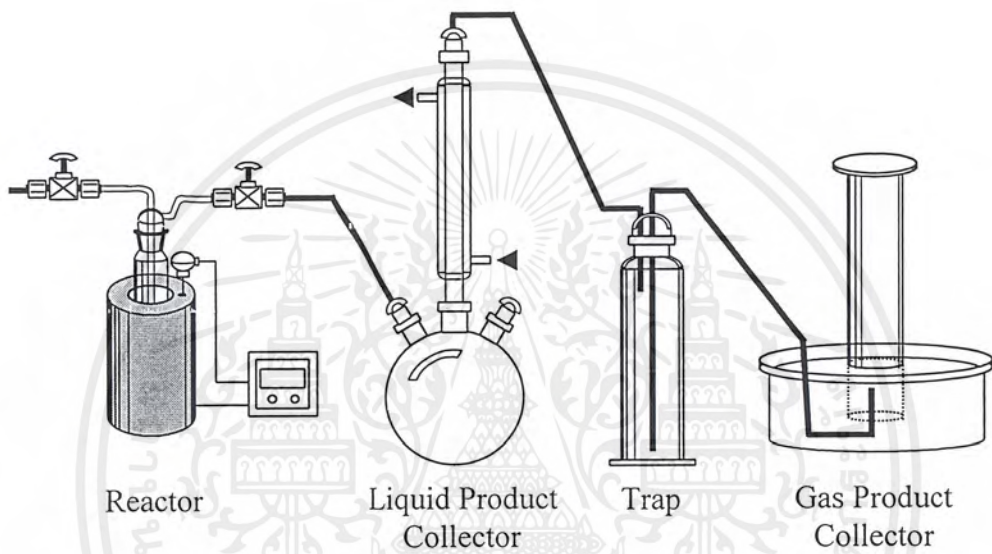
การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองการเผา เพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อน

การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองการเผา เพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากชนิดและลักษณะเฉพาะของชุดทดลองเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสลายด้วยความร้อน ดังนั้นต้องมีการออกแบบ และระบุรายละเอียดของการออกแบบให้ชัดเจน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- เตาไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่ระบบในการทดลอง ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ คือ
 - เตาทรงกระบอก หน้า 25 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 60 มิลลิเมตร สูง 140 มิลลิเมตร
 - ไส้ความร้อนทรงกระบอก (Cylindrical heater) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ใช้ไฟฟ้า 220 โวลต์ 600 วัตต์
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเตา
- เครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ยาว 140 มิลลิเมตร
- ชุดเก็บสะสมผลิตภัณฑ์ของเหลว
 - เครื่องควบแน่น ใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น
 - ขวด 3 คอ
 - ท่อนำก๊าซ
- ชุดเก็บสะสมผลิตภัณฑ์ของก๊าซ
 - ขวดเก็บก๊าซ
 - อ่างน้ำ
 - ท่อนำก๊าซ
- ขวดดักกันการไหลย้อนกลับ

ทั้งหมดประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการสลายด้วยความร้อนของ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- การทดลองเพื่อศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งด้วยวิธี TGA โดยใช้ HDPE ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 95:5, 90:10, 85:15 และ HDPE ผสมกับซิลิกา ในอัตราส่วน 98:2, 95:5 และ 90:10

- การทดลองเพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่ง ดังกล่าวข้างต้น โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA มาใช้เป็นแนวทางในการศึกษา

7.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 7.1.1 ชุดทดลองการเผา ดังแสดงในรูปที่ 6.1
- 7.1.2 เครื่องวิเคราะห์สมบัติของการสลายตัวด้วยความร้อน(TGA)
- 7.1.3 เครื่องชั่ง
- 7.1.4 ขวดแก้วขนาดเล็ก
- 7.1.5 กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร
- 7.1.6 นาฬิกาจับเวลา
- 7.1.7 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
- 7.1.8 แคลเซียมคาร์บอเนต
- 7.1.9 ซิลิกา

7.2 ขั้นตอนการทดลอง

7.2.1 การเตรียม HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และ HDPE ผสมซิลิกา

- 1) HDPE ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 95:5, 90:10 และ 85:15
 - 1.1) ชั่ง HDPE 98 กรัม และแคลเซียมคาร์บอเนต 2 กรัม
 - 1.2) ทำการผสมโดยใช้เครื่อง Two roll mill จนกระทั่งสังเกตเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน
 - 1.3) นำสารผสมที่ได้จากข้อ 1.2 ผ่านเข้าเครื่อง Grinding machine เพื่อทำการบดตัดให้มีขนาดเล็กลง
 - 1.4) นำสารผสมที่ได้จากข้อ 1.3 ผ่านเข้าเครื่อง Extruder เพื่อให้เกิดการผสมกันดียิ่งขึ้น
 - 1.5) เตรียมอัตราส่วนอื่น โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น
- 2) HDPE ผสมกับซิลิกา ในอัตราส่วน 98:2, 95:5 และ 90:10
 - 2.1) ใช้วิธีการเตรียมในทำนองเดียวกันกับการเตรียม HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

7.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวด้วย TGA

การทดลองเพื่อศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

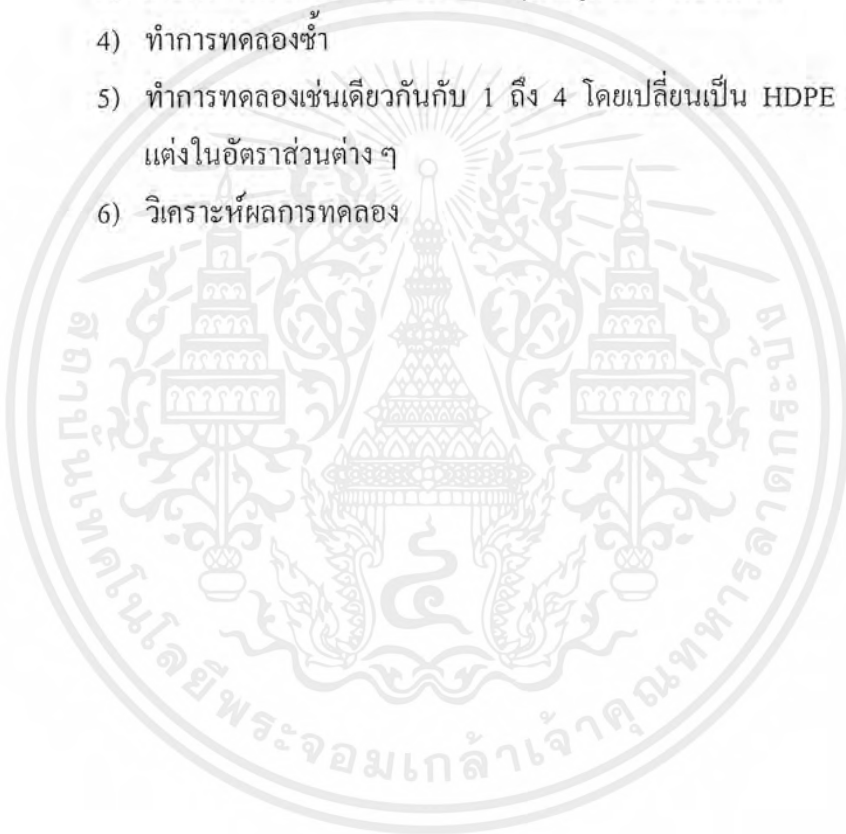
- 1) วิเคราะห์ HDPE บริสุทธิ์ ประมาณ 10 – 20 มิลลิกรัม ด้วย TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตลอดช่วง 80 ถึง 560 องศาเซลเซียส
- 2) วิเคราะห์ HDPE ผสมสารเติมแต่ง แต่ละตัวอย่างด้วยเงื่อนไขเดียวกัน
- 3) วิเคราะห์ผลการทดลอง

7.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อน

การทดลองเพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) สล่าย HDPE บริสุทธิ์ประมาณ 5 กรัม (ชั่งน้ำหนักแน่นอน) ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนโดยเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ขึ้นทีละ 20 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 360 องศาเซลเซียส จนถึง 520 องศาเซลเซียส แต่ละช่วงอุณหภูมิ ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ จนกระทั่งไม่มีผลิตภัณฑ์ออกมา ประมาณ $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง
- 2) เก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ แต่ละช่วงอุณหภูมิ และชั่งน้ำหนัก
- 3) เก็บผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้ แต่ละช่วงอุณหภูมิ และวัดปริมาตร
- 4) ทำการทดลองซ้ำ
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนเป็น HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ
- 6) วิเคราะห์ผลการทดลอง



บทที่ 8

ผลการทดลอง

8.1 ผลการทดลองที่ได้จาก TGA

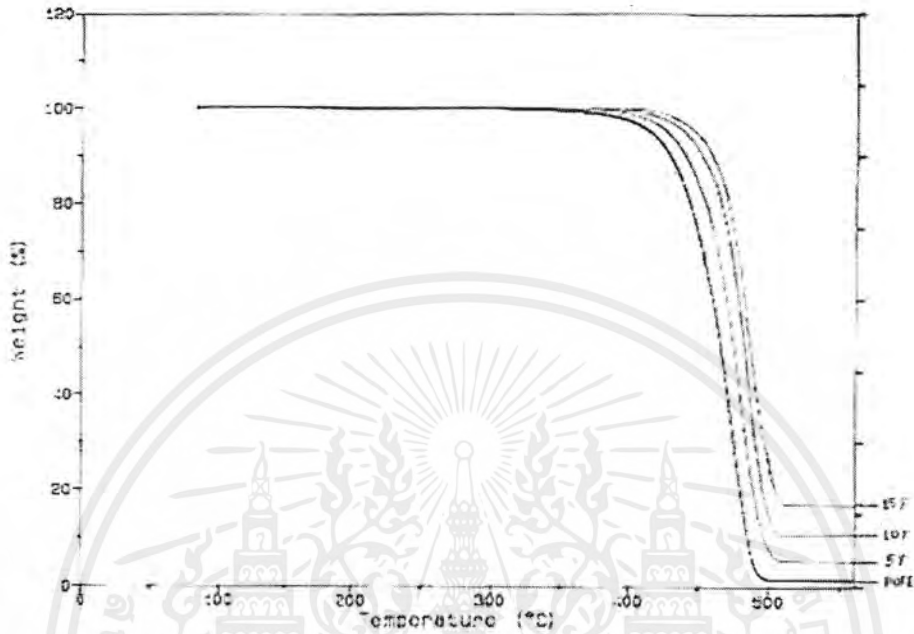
การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วย TGA ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ

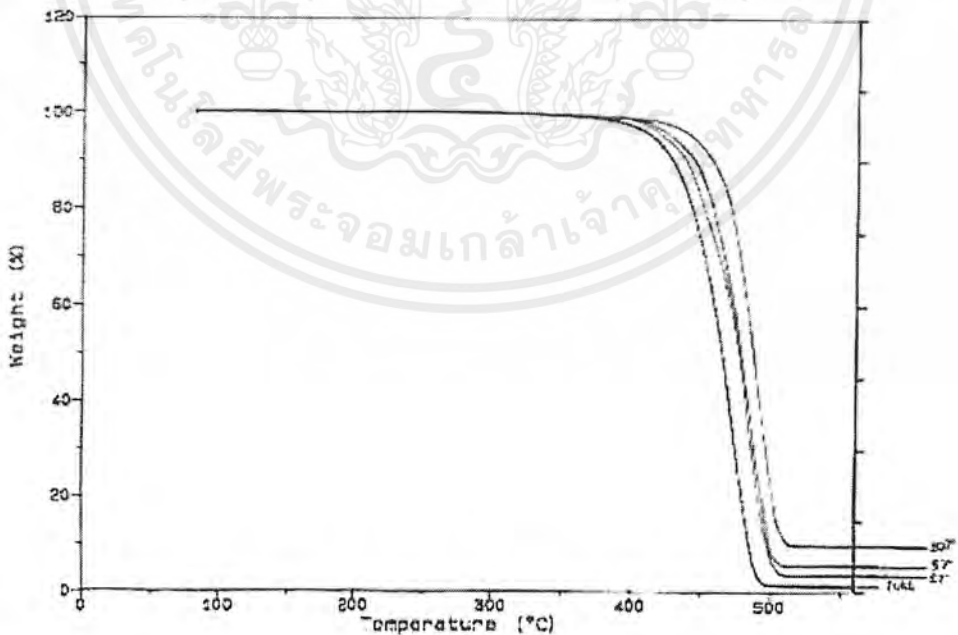
ชนิดของสาร	ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว ¹	
	อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่สลายตัวหมด (องศาเซลเซียส)
HDPE บริสุทธิ์	348	496
HDPE : แคลเซียมคาร์บอเนต		
95 : 5	365	502
90 : 10	382	505
85 : 15	392	509
HDPE : ซิลิกา		
98 : 2	361	508
95 : 5	368	508
90 : 10	378	514

¹ ลักษณะ TG curve ที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก

นำ TG curve ที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน แสดงดังรูปที่ 8.1 และ 8.2



รูปที่ 8.1 การเปรียบเทียบระหว่าง TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 8.2 การเปรียบเทียบระหว่าง TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมซัลฟอนิกในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 ผลการทดลองจากการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสม สารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ

การทดลองเพื่อศึกษาการสลายด้วยความร้อนของ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

8.2.1 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์

มีรายละเอียดที่สังเกตได้ดังตารางที่ 8.2 ถึง 8.8

ตารางที่ 8.2 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE บริสุทธิ์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
380	เป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
400	เป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลอ่อน ๆ
420	เป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลอ่อน ๆ แต่ความหนืดน้อยลง และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาล มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เตือด มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจายมากขึ้น และมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอดมากขึ้น
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้มมาก และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลเข้มติดอยู่ และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งสีน้ำตาลแห้ง กระจายไปทั่ว

ตารางที่ 8.3 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 95:5

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
400	เม็ดพลาสติกหลอมมากขึ้นเป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
420	เป็นของเหลวสีขาวขุ่นปนน้ำตาล ความหนืดน้อยลง
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เดือด และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลดำเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งสีดำเป็นแผ่นบางแห้งเปราะ ครอบปนแว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.4 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 90:10

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
400	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
420	เป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เดือด และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลดำเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งสีดำเป็นแผ่นบางแห้งเปราะ ครอบปนแวกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.5 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 85:15

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
400	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
420	เป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เดือด และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลดำเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งสีดำเป็นแผ่นบางแห้งเปราะ กรอบปนแว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.6 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วน 98:2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
400	เม็ดพลาสติกหลอมมากขึ้นเป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
420	เป็นของเหลวสีขาวขุ่นปนน้ำตาล ความหนืดน้อยลง
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เดือด และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลดำเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งคล้ายขี้เถ้าปนแว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.7 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วน 95:5

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
400	เม็ดพลาสติกหลอมมากขึ้นเป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
420	เป็นของเหลวสีขาวขุ่นปนน้ำตาล ความหนืดน้อยลง
440	เป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีควันสีขาวขุ่นฟุ้งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เค็ด และมีควันสีเหลืองอ่อนฟุ้งกระจาย
500	มีคราบของเหลวสีน้ำตาลดำเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นฟุ้งเล็กน้อย
520	เกิดตะกอนของแข็งคล้ายขี้เถ้าปนแวกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.8 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ของ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วน 90:10

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ในเครื่องปฏิกรณ์
360	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
380	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
400	เริ่มมีเม็ดพลาสติกบางส่วนหลอม
420	เป็นของเหลวหนืด สีขาวขุ่น
440	เป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเริ่มมีควันสีขาวขุ่นเกิดขึ้น
460	เป็นของเหลวสีน้ำตาล มีควันสีขาวขุ่นพุ่งกระจาย และเริ่มมีหยดของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นเกาะบริเวณผิวด้านในหลอด
480	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม เตือด และมีควันสีเหลืองอ่อนพุ่งกระจายมาก
500	เป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม และมีควันสีเหลืองขุ่นพุ่งกระจาย
520	เกิดตะกอนของแข็งคล้ายขี้เถ้าปนแวกซ์

8.2.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่าง ด้วยความร้อน

จากการทดลองพบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลัก ๆ อยู่ 3 ชนิด คือ ของเหลว ก๊าซ และของแข็งปนแวกซ์ (Residue) ดังตารางที่ 8.9 ถึง 8.12

ตารางที่ 8.9 ปริมาณของเหลวที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (กรัม)						
	HDPE บริสุทธิ์	HDPE : แคลเซียมคาร์บอเนต			HDPE : ซิลิกา		
		95 : 5	90 : 10	85 : 15	92 : 2	95 : 5	90 : 10
420	0.08	-	-	-	-	-	-
440	0.56	0.34	0.2	0.06	0.4	0.31	0.10
460	1.78	1.46	1.22	0.88	1.41	1.14	0.78
480	1.24	1.40	1.54	1.70	1.42	1.54	1.61
500	-	0.06	0.08	0.10	0.04	0.06	0.26
520	-	-	0.01	0.03	-	0.01	0.08
รวม	3.66	3.26	3.05	2.77	3.27	3.06	2.83

ตารางที่ 8.10 ปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)						
	HDPE บริสุทธิ์	HDPE : แคลเซียมคาร์บอเนต			HDPE : ซิลิกา		
		95 : 5	90 : 10	85 : 15	92 : 2	95 : 5	90 : 10
360	13	23	37	28	24	51	63
380	-	-	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-	-	-
420	40	-	-	-	-	-	-
440	132	104	76	54	168	122	86
460	326	294	271	235	310	292	211
480	154	288	339	412	338	453	509
500	16	78	92	108	84	106	187
520	-	16	24	33	23	37	61
รวม	681	803	839	870	947	1061	1117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.11 ปริมาณ Residue ที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน

ชนิดของสาร	ปริมาณ Residue (กรัม)
HDPE บริสุทธิ์	0.09
HDPE : แคลเซียมคาร์บอเนต	
95 : 5	0.35
90 : 10	0.52
85 : 15	0.77
HDPE : ซิลิกา	
98 : 2	0.18
95 : 5	0.34
90 : 10	0.53

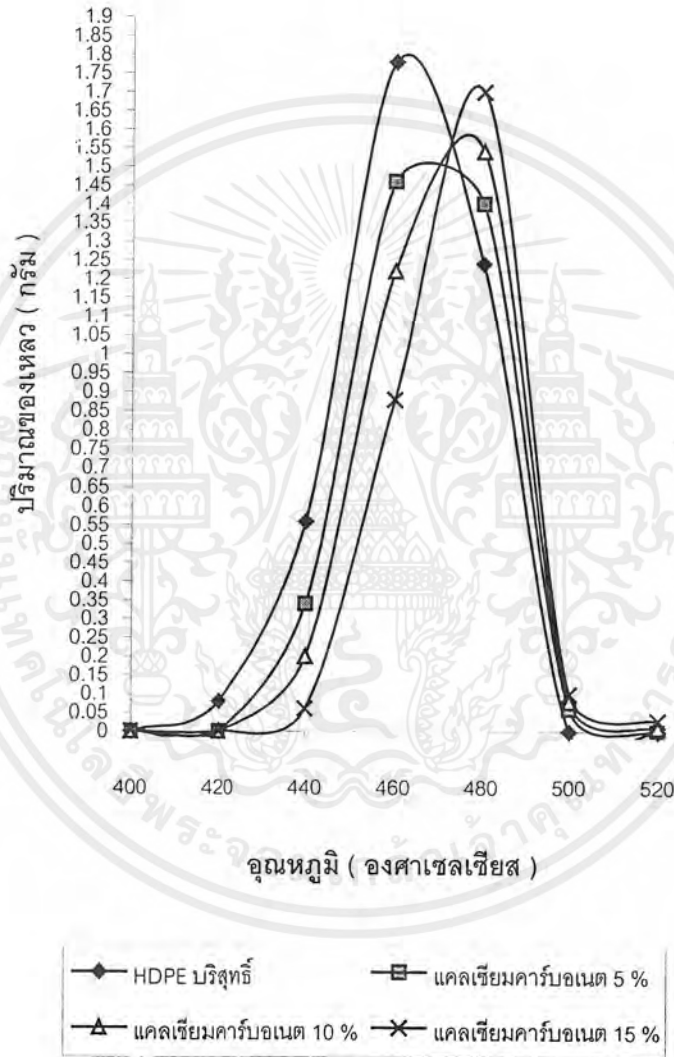
ตารางที่ 8.12 ปริมาณผลิตภัณฑ์รวมที่ได้จากการสลายพลาสติกตัวอย่างด้วยความร้อน

ชนิดของสาร	น้ำหนักสาร (กรัม)	ปริมาณผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อน					
		ของเหลว		ของแข็งปนแว็กซ์		ก๊าซ	
		น้ำหนัก (กรัม)	% โดย น้ำหนัก	น้ำหนัก (กรัม)	% โดย น้ำหนัก	ปริมาณ (ลบ.ชม.)	% โดย น้ำหนัก
HDPE บริสุทธิ์	5	3.66	73.2	0.09	1.8	681	25.0
HDPE : แคลเซียม คาร์บอเนต							
95 : 5	5	3.26	65.2	0.35	7.0	803	27.8
90 : 10	5	3.05	61.0	0.52	10.4	839	28.6
85 : 15	5	2.77	55.4	0.77	15.4	870	29.2
HDPE : ซิลิกา							
98 : 2	5	3.27	65.4	0.18	3.6	947	31.0
95 : 5	5	3.06	61.2	0.34	6.8	1061	32.0
90 : 10	5	2.83	56.6	0.53	10.6	1117	32.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

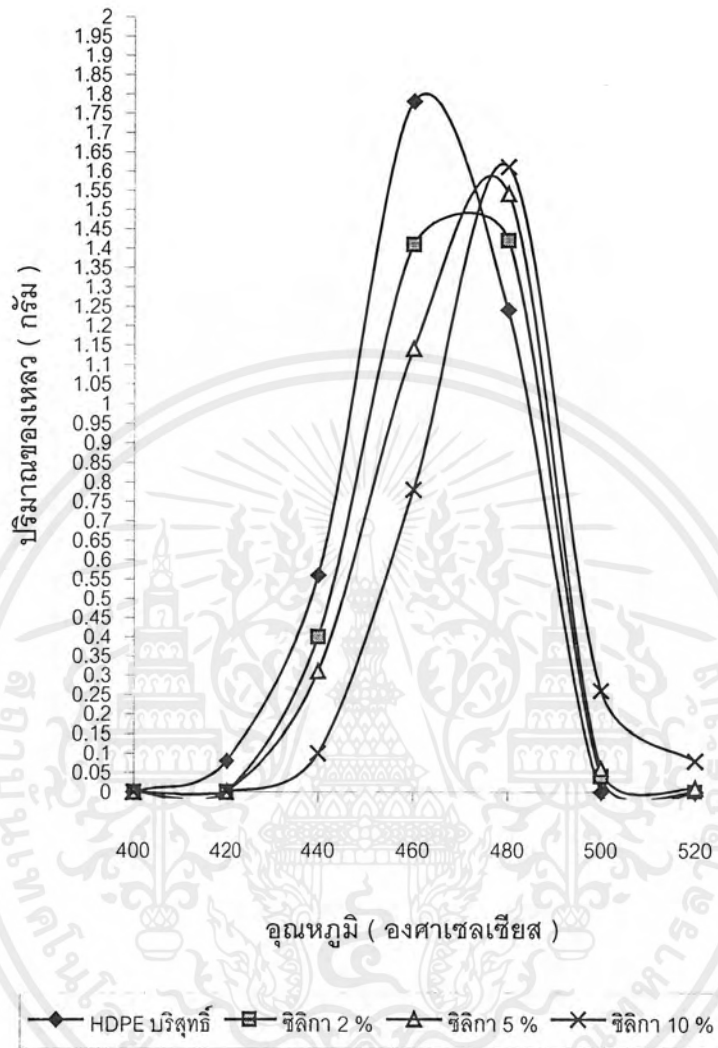
8.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายด้วยความร้อน

จากตารางที่ 8.9 นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิขณะทำการสลายด้วยความร้อน และปริมาณของเหลวที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 8.3 และ 8.4



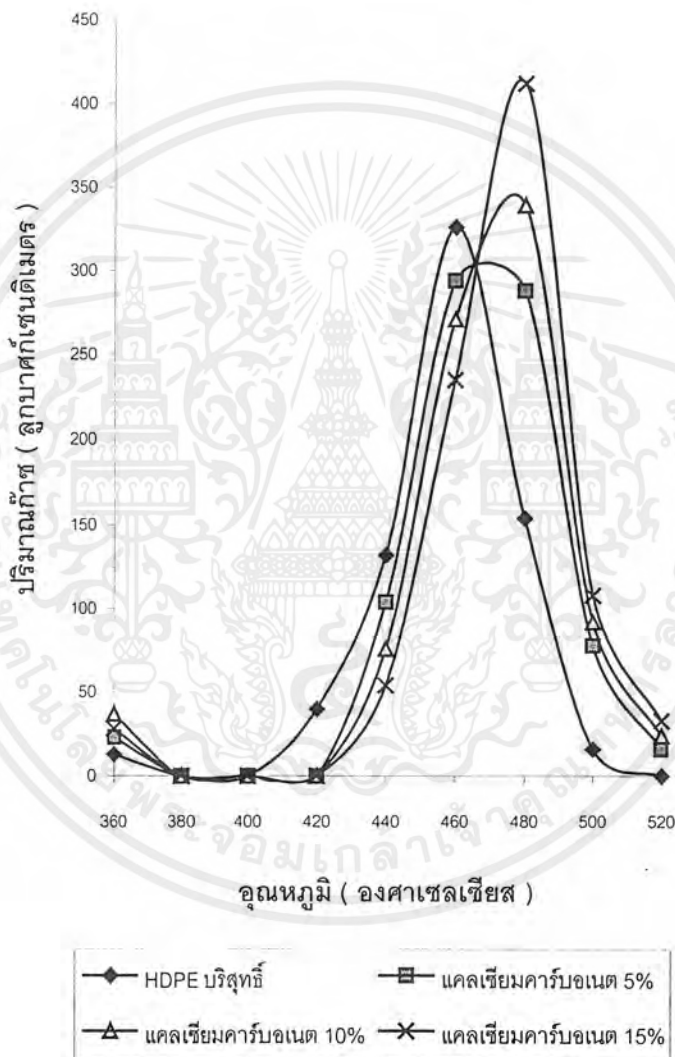
รูปที่ 8.3 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอนเนต ในอัตราส่วนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



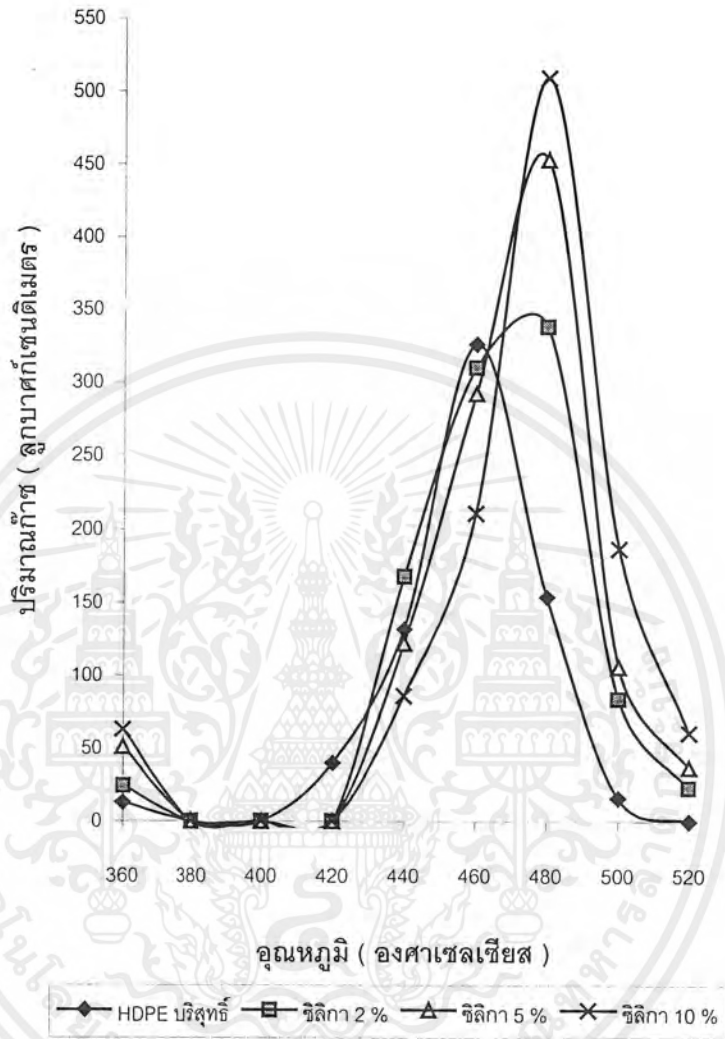
รูปที่ 8.4 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวระหว่าง HDPE บริสุทธิ์ กับ HDPE ผสมซิลิกา ในอัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 8.9 นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิขณะทำการสลายด้วยความร้อน และปริมาณก๊าซ ดังรูปที่ 8.5 และ 8.6



รูปที่ 8.5 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซระหว่าง HDPE บริสุทธิ์กับ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 การเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซระหว่าง HDPE บริสุทธิ์กับ HDPE ผสมซิงก์ออกไซด์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ

บทที่ 9

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

9.1 สรุปผลการทดลอง

9.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว โดยใช้เครื่อง TGA

พบว่า HDPE บริสุทธิ์ จะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัว เริ่มจาก 348 องศาเซลเซียส จนถึง 496 องศาเซลเซียส เมื่อเติมสารเติมแต่ง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน จะมีผลทำให้ ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE สูงขึ้น

เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา จะทำให้อุณหภูมิการสลายด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนสูงขึ้นตลอดช่วง

9.1.2 การศึกษาการสลายด้วยความร้อน

1) การสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในเครื่องปฏิกรณ์

จากการศึกษาพบว่า HDPE บริสุทธิ์ เริ่มหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 360 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีขาวขุ่น เมื่อให้ความร้อนต่อไปจะกลายเป็นของเหลวสีน้ำตาลมีความหนืดน้อยลง และมีควันเกิดขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอีก จะกลายเป็นของเหลวสีน้ำตาลเค็ดคมมีควันฟุ้งกระจาย พอถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะได้ของแข็งสีน้ำตาลแห้งเปราะปนแว็กซ์ ติดค้างอยู่ในหลอด

เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันลงไป ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะเป็นเช่นเดียวกันกับ HDPE บริสุทธิ์ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น และ Residue ที่เกิดขึ้นจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำแห้งเปราะปนแว็กซ์ ส่วน Residue ที่เกิดขึ้นจากการเติมซิลิกา จะมีลักษณะคล้ายขี้เถ้าปนแว็กซ์

2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้

เมื่อทำการสลาย HDPE บริสุทธิ์ด้วยความร้อน พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต ชื่อของเหลวสีเหลือง ก๊าซ และ Residue นั้น (ของแข็งปนแว็กซ์) โดยมีของเหลวที่ตกค้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลิตภัณฑ์หลัก มีสัดส่วนอยู่ถึง 73.2 % โดยน้ำหนัก ก๊าซที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากพอสมควร คือประมาณ 25 % โดยน้ำหนัก และ Residue (ของแข็งปนแวกซ์) อีก 1.8 % โดยน้ำหนัก

เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา ลงไป พบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง ส่วนก๊าซ และ Residue จะเพิ่มขึ้น

9.1.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์ ที่ได้ขณะทำการสลายด้วยความร้อน

1) ผลิตภัณฑ์ของเหลว

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวของ HDPE บริสุทธิ์เริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ของเหลวจะเกิดขึ้นมากที่สุดแล้วลดลงที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส พอถึงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะไม่มีของเหลวเกิดขึ้นแล้ว

เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกา ลงไปในอัตราส่วนต่างๆ ปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ยังไม่เกิดของเหลว แต่จะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ 440 องศาเซลเซียส โดยยิ่งอัตราส่วนมากขึ้น ปริมาณของเหลวก็จะยิ่งลดลง และที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียสก็เช่นเดียวกัน แต่ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส จะถึงจุดที่ของเหลวเกิดมากที่สุด และยิ่งอัตราส่วนมากขึ้น ปริมาณของเหลวก็จะยิ่งมากด้วย ส่วนที่อุณหภูมิ 500 และ 520 องศาเซลเซียส ก็เช่นเดียวกัน

2) ผลิตภัณฑ์ก๊าซ

ช่วงแรกจะเกิดก๊าซขึ้นเนื่องจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ไขมัน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ก๊าซของ HDPE บริสุทธิ์ เริ่มเกิดขึ้นที่ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ส่วน HDPE ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หรือซิลิกาจะเกิดก๊าซขึ้นที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของเหลวที่เกิดขึ้นคือ ยิ่งเกิดของเหลวมาก ก๊าซก็จะมากด้วย

9.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบชุดทดลองการสลายด้วยความร้อน และสภาวะต่าง ๆ ที่ดำเนินการทดลอง ซึ่งถ้ามีเงื่อนไขการทดลองแตกต่างไปจากการทดลองนี้ ผลที่ได้อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง

9.3 ข้อเสนอแนะ

9.3.1 การสลายด้วยความร้อน ใช้เวลานาน ควรมีการตรวจสอบชุดอุปกรณ์ มิให้เกิดการรั่ว และอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานเสมอ

9.3.2 อาจใช้วิธีเก็บก๊าซวิธีอื่น เช่น ใช้บัลลูน หรือใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซร่วมด้วย



เอกสารอ้างอิง

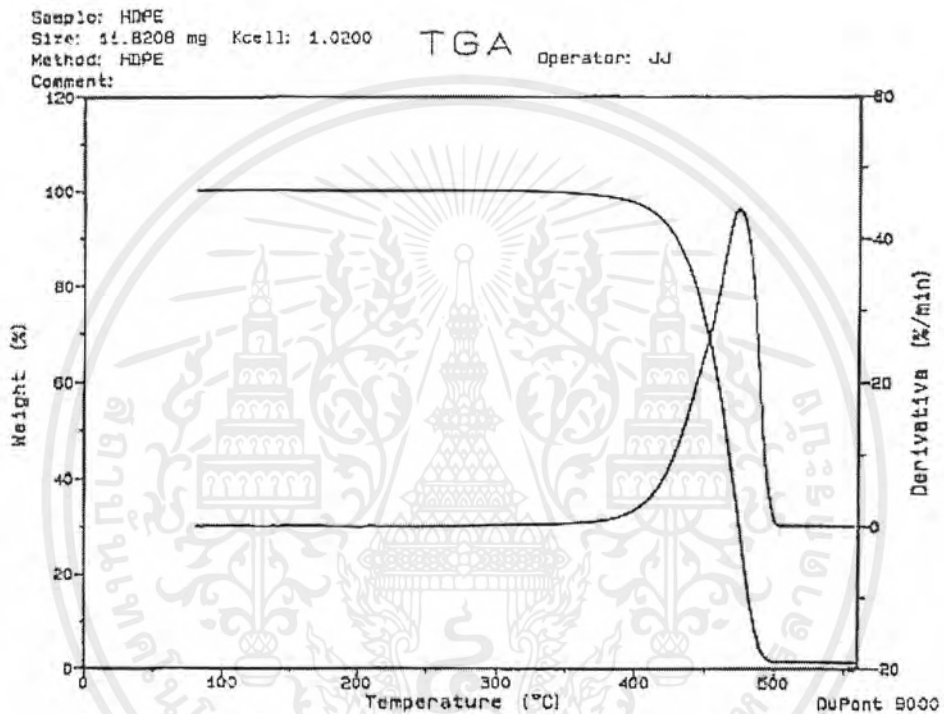
1. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2527. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์อินเดียนโตร.
2. ปรีชา พหลเทพ. 2530. โพลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
3. ปุ่น คงเจริญเกียรติ และสมพร คงเจริญเกียรติ. 2541. บรรจุภัณฑ์อาหาร. บริษัทแพคเมทส์ จำกัด.
4. ลีโน มาสเซีย. 1989. สารเติมแต่งสำหรับวัสดุพลาสติก. การสัมมนาถ่ายทอดเทคโนโลยีไทย – อังกฤษ. โรงแรมเชลทรีด พลาซ่า. กรุงเทพฯ.
5. Charles E. Chraher, Jr. 1996. **Polymer Chemistry**. 4th edition. New York: Marcel Dekker.
6. คู่มือปฏิบัติการเคมีเชิงวิเคราะห์. 2539. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. Schnabel, W. 1981. **Polymer Degradation Principles and Practical Applications**. Munchen: Hanser International.
8. Skoog A., Holler F., Nieman A. 1996. **Principles of Instrumental Analysis**. 5th edition. Saunders College Publishing.
9. Eric A. 1994. **Polymer Process Engineering**. New Jersey: Prentice Hall.



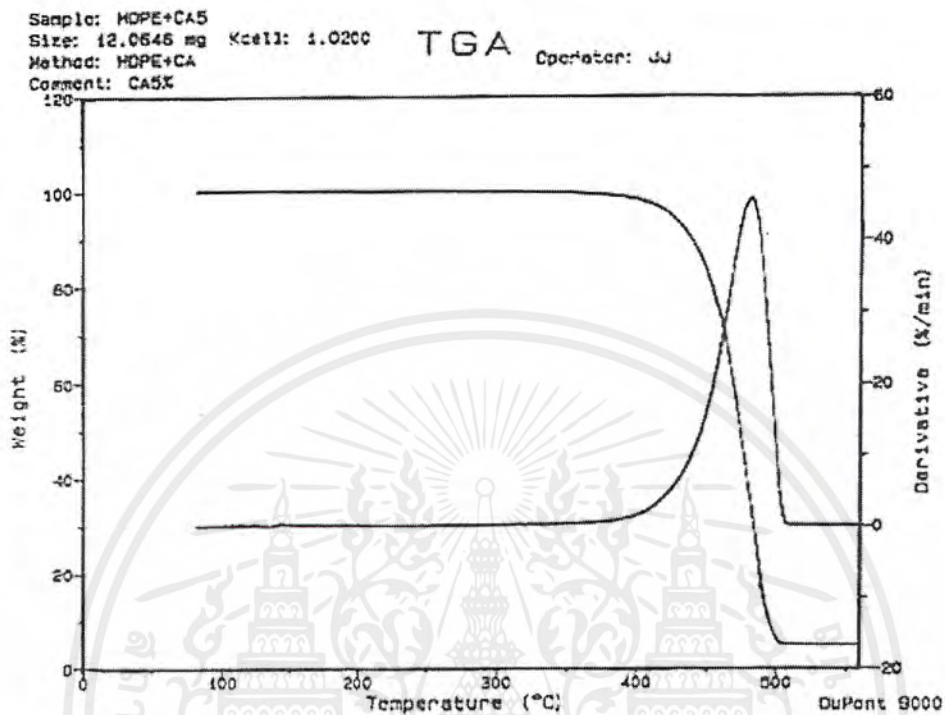
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

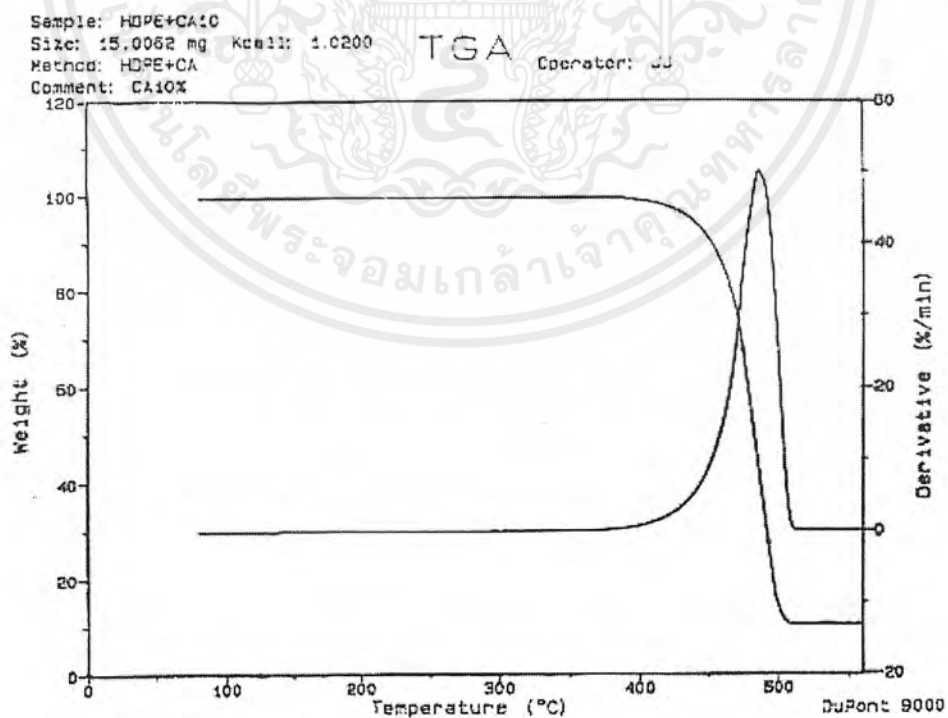
ผลการวิเคราะห์ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE ผสมสารเติมแต่ง ด้วย TGA



รูปที่ ก.1 ลักษณะ TG curve ของ HDPE บริสุทธิ์

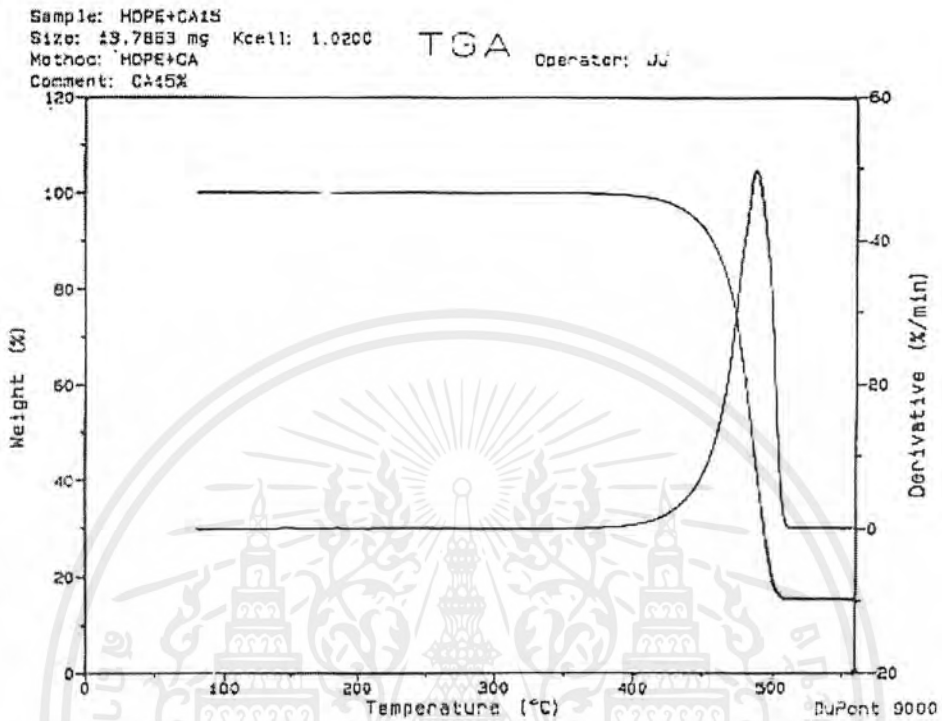


รูปที่ ก.2 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 95 : 5

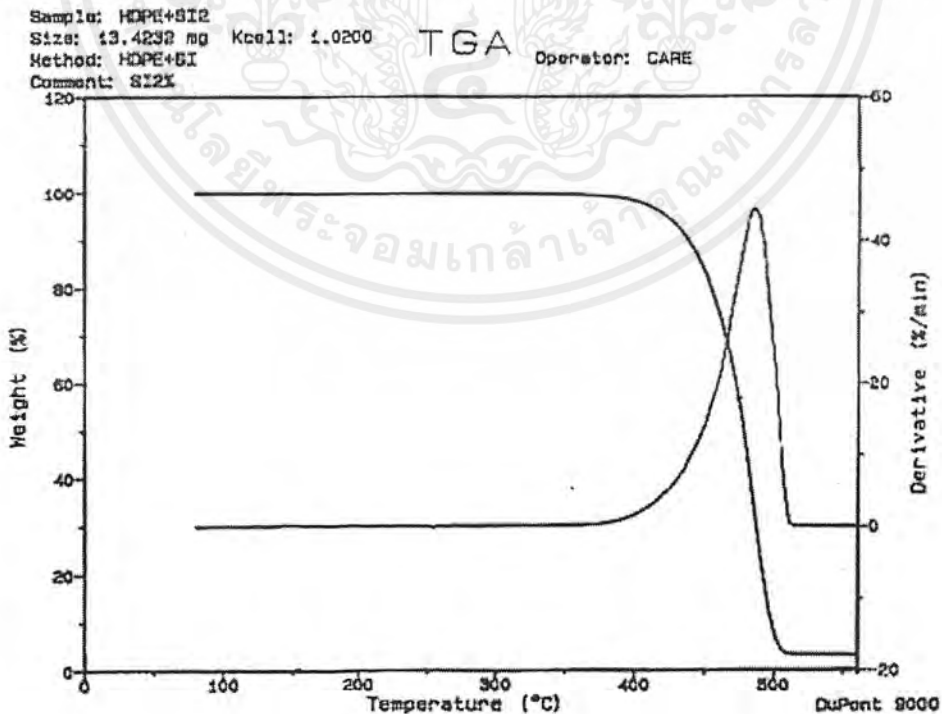


รูปที่ ก.3 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 90 : 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

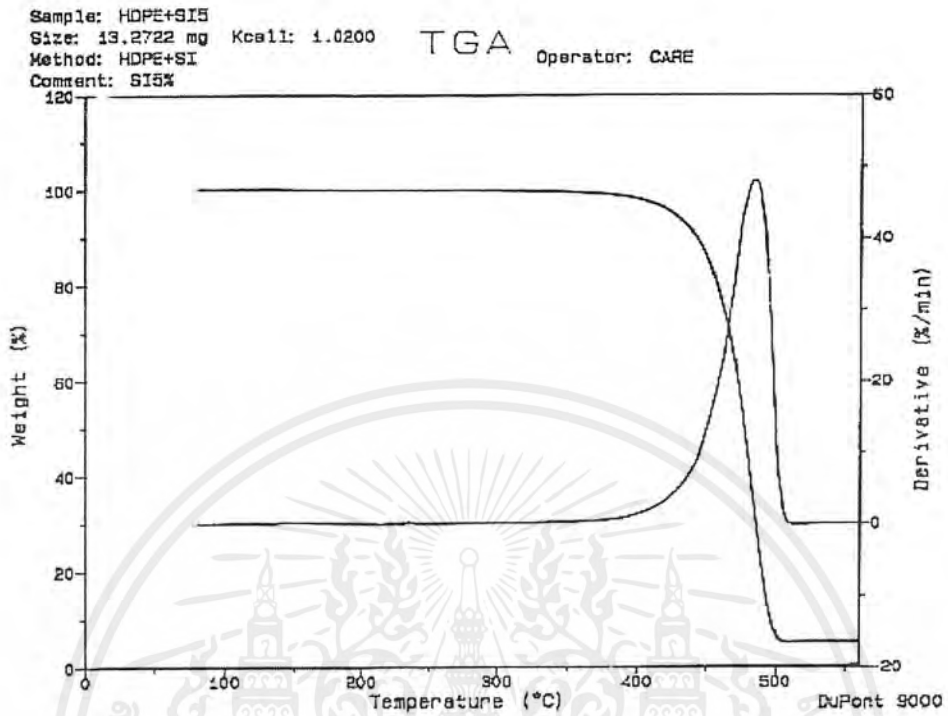


รูปที่ ก.4 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 85 : 15

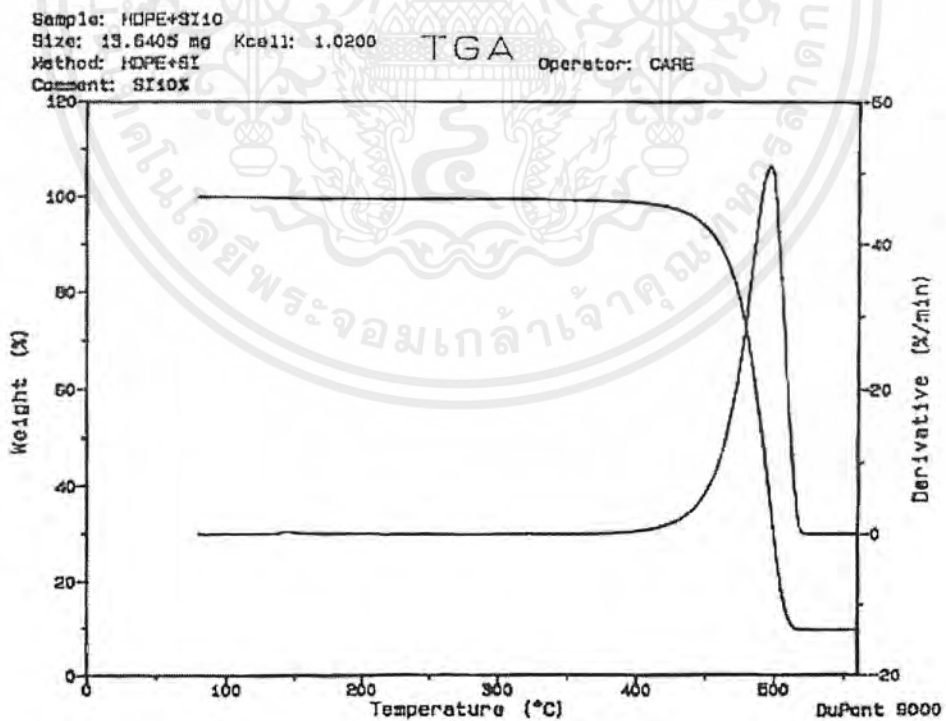


รูปที่ ก.5 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 98 : 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 95 : 5



รูปที่ 6.7 ลักษณะ TG curve ของ HDPE ผสมซิลิกาในอัตราส่วน 90 : 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. นายจรูญ ยิ้มละมัย เกิดเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพิษณุโลกศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2538 จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2542

2. นายวุฒิชัย ดิษเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2538 จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2542