

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หมวดพลาสติกชนิดหนังไฟและไร้ควัน
จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่



นาย กิติธนา ธรรมนิสสุต
นาย ปวีรศ อยุธยา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....55582.....
วัน,เดือน,ปี.....9 พ.ค. 2548

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในวารสารใด ๆ ทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flame retardant and Smokeless Plastic Bottle
from Recycled High Density Polyethylene



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง **ขวดพลาสติกชนิดห่วงวงไฟและไรค์วันจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่**

นักศึกษานาย กิติธนา ธรรมิกสกุล
นาย ปวเรศ อยู่สำราญ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ศาสตราจารย์
ประธานกรรมการ อาจารย์มนตรี ทองคำ	
กรรมการ ดร.พีชณี เจริญยิ่ง	ศาสตราจารย์
กรรมการ ดร.นุกูล เอื้อพันธเศรษฐ	


.....
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ขวดพลาสติกชนิดหน่วงไฟและไร้ควันจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
นักศึกษา	นาย กิติธนา ชรรณิกสกุล นาย ปวเรศ อยู่สำราญ
คณะ	วิทยาศาสตร์
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2546
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงกษชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุจินต์ ตันติพิธิษฐกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตขวดพลาสติกชนิดหน่วงไฟและไร้ควัน จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ได้จากการนำกลับมาใช้ใหม่ ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส ไตรฟีนิลฟอสเฟต ร่วมกับสารช่วยหน่วงควันชนิดซิงค์ ออกไซด์ เป็นสารเติมแต่ง จากนั้นศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสม ของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ที่ทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง และ ศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารช่วยหน่วงควัน ที่ทำให้ปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของขวดพลาสติก

จากผลการวิจัย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดคือ อุณหภูมิส่วนป้อน 170°C อุณหภูมิส่วนอัด 180°C อุณหภูมิส่วนผสม 190°C อัตราเร็วสกรู 20 รอบต่อนาที เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที และ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ซึ่งที่สภาวะนี้ขวดมีค่าความแข็งแรงดึง 147 MPa โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด 121 MPa และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด 299 % ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสมคือ 8 phr ซึ่งทำให้ขวดมีค่าความแข็งแรงดึง 69 MPa โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด 67 MPa เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด 404 % อัตราการเผาไหม้ 1.71 เซนติเมตรต่อนาที และ ปริมาณควัน 0.02 กรัม ปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสมคือ 3 phr ซึ่งทำให้ขวดมีค่าความแข็งแรงดึง 26 MPa โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด 28 MPa เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด 832 % อัตราการเผาไหม้ 1.71 เซนติเมตรต่อนาที และปริมาณควัน น้อยกว่า 0.01 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Flame and Smoke retardant Plastic Bottle from Recycled High Density Polyethylene
Name	Mr. Kititana Thammiksakul Mr. Pavares Yoosumran
Faculty	Science
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2003
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somsak Woramongkolchai
Special Project co-advisor	Ajarn Suchin Tontipisitkul

Abstract

This research aims to study the appropriate conditions for the production of non-flammable plastic bottle from recycled high-density polyethylene (R-HDPE) by extrusion blow molding process. In this research triphenylphosphate and zinc oxide are used as flame-retardants and smoke-retardants. The quantities of flame-retardant and smoke-retardant affecting to reducing rate of effective burning and amount of smoke during combustion are also studied.

From the results, it was found that the appropriate conditions of R-HDPE bottle were as temperature of feed , compression and metering section of 170 °C 180 °C and 190 °C ,respectively , screw speed of 20 rpm , blowing time 10 seconds and cooling time 2 seconds . At these condition , the tensile strength of 147 MPa , initial modulus at 1% strain of 121 MPa and elongation at break of 299 % . The appropriate quantity of flame-retardant was 8 phr which indicated the tensile strength of 69 MPa , initial modulus at 1% strain of 67 MPa , elongation at break of 404 % , rate of burning of 1.71 cm/min and amount of smoke from combustion of 0.02 g. The appropriate quantity of smoke-retardant was 3 phr which indicated the tensile strength of 26 MPa , initial modulus at 1% strain of 28 MPa , elongation at break of 832 % , rate of burning of 1.71 cm/min and amount of smoke from combustion of less than 0.01 g.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สุจินต์ ดันติพิสิษฐกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณ บรรจง ภูกะฮาด จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวัสดุและโลหะการ ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับ เครื่องทดสอบการเผาไหม้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและญาติพี่น้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานพอลิเมอร์ บุคคลที่ให้การช่วยเหลือทุกท่านและขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่รุ่นน้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือจน โครงการพิเศษนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

นาย กิติธนา ธรรมมิกตกุล

นาย ปวีณรศ อยู่ด้รารณู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาคภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาคภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 วัสดุ	6
2.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	6
2.3 สารช่วยหน่วงการติดไฟ (Flame Retardant)	8
2.3.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค	8
2.3.2 ขั้นตอนการเผาไหม้	11
2.3.3 ธาตุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ	11
2.3.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟในทางการค้า	14
2.3.5 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดวงไวต์ต่อปฏิกิริยา	15
2.3.6 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ	17
2.3.7 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	17
2.3.8 วิธีการทดสอบ	18
2.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	21
2.4.1 เครื่องย่อยพลาสติก	21
2.4.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin – screw extruder)	22
2.4.3 เครื่องฉีกฟิสิกส์แบบแยกกันนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้	25
2.4.5 เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding)	27
บทที่ 3 การวิจัยและดำเนินงาน	29
3.1 สารเคมี	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 วิธีการทดลอง	30
3.3.1 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE)	30
3.3.2 ขั้นตอนการผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) กับสารช่วยหน่วงการติดไฟ (Flame retardant)	33
3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
3.3.4 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	34
3.3.5 ขั้นตอนการผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน (Smoke retardant)	34
3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมเม็ด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	35
3.3.7 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	35
3.3.8 การทดสอบสมบัติต่างๆ	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	41
4.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ เป่าขึ้นรูปขวดของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด	41
4.1.1 สมบัติเชิงกล	41
4.1.2 สมบัติทางความร้อน	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสม	53
4.2.1 สมบัติเชิงกล	53
4.2.2 สมบัติทางความร้อน	55
4.2.3 อัตราการเผาไหม้และปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้	56
4.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสม	58
4.3.1 สมบัติเชิงกล	58
4.3.2 สมบัติทางความร้อน	60
4.3.3 อัตราการเผาไหม้และปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้	61
บทที่ 5 สรุปลผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สภาพที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ เป่าขึ้นรูปขวดของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดออตรีค	63
5.2 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสม	64
5.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสม	64
5.4 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	6
รูปที่ 2.2 เครื่องบดพลาสติกแบบต่างๆ	21
รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางของเครื่องไม้ตัด	22
รูปที่ 2.4 ส่วนต่างๆของเครื่องอัดแบบเกลียวหนอนคู่	24
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์เครื่องคิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)	25
รูปที่ 2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการผลิตใหม่	26
รูปที่ 2.7 การทดสอบหาอัตราการเผาไหม้	26
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานพื้นฐานของกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอครีต	28
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด	37
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้ อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	41
รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	42
รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	42
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิ ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.5 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรู ต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที 44
- รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรู ต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที 44
- รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที 45
- รูปที่ 4.8 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ ในการอัดอากาศต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริต ทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที 46
- รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ ในการอัดอากาศต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริต ทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที 46
- รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.11 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค ทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที 48
- รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค ทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที 48
- รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 53
- รูปที่ 4.14 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสมอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 54
- รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 55
- รูปที่ 4.16 ค่าอัตราการเผาไหม้ (cm / min) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.17 ค่าปริมาณควัน (g) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการตีไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 56
- รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 58
- รูปที่ 4.19 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 59
- รูปที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 59
- รูปที่ 4.21 ค่าอัตราการเผาไหม้ (cm / min) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 61
- รูปที่ 4.22 ค่าปริมาณควัน (g) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 160 170 และ 180 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	79
รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	79
รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 180 190 และ 200 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	80
รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 15 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	80
รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	81
รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 30 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	81
รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 45 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 5 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 82
- รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 7 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 83
- รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 83
- รูปที่ ก.11 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 15 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 84
- รูปที่ ก.12 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 20 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 84
- รูปที่ ก.13 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 85
- รูปที่ ก.14 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 3 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ ก.15 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 5 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 86
- รูปที่ ก.16 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 7 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 86
- รูปที่ ก.17 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 10 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 87
- รูปที่ ก.18 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 15 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 87
- รูปที่ ก.19 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 20 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน 88
- รูปที่ ก.20 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน 88
- รูปที่ ก.21 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ ก.22 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 6 phr และไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงควัน 89
- รูปที่ ก.23 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงควัน 90
- รูปที่ ก.24 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 10 phr และไม่มีสารเติมสารช่วยหน่วงควัน 90
- รูปที่ ก.25 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน 1 phr 91
- รูปที่ ก.26 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน 2 phr 91
- รูปที่ ก.27 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน 3 phr 92
- รูปที่ ก.28 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน 4 phr 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	7
ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ (Ignition temperatures of various polymers)	9
ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้	16
ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารช่วยหน่วงการติดไฟฟอสฟอรัสไตรฟีนิลฟอสเฟต	29
ตารางที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคทั้ง 3 ส่วน สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	31
ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู 15 20 30 และ 45 rpm ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค สำหรับขวดพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	31
ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคสำหรับขวดพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที	32
ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคสำหรับขวด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที	
ตารางที่ 3.6	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส 0 2 4 6 8 และ 10 phr อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน คือ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm	33
ตารางที่ 3.7	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 phr โดย ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วนคือ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm	35
ตารางที่ 4.1	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.1 ก.2 และ ก.3 ในภาคผนวก ก	49
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.4 ก.5 ก.6 และ ก.7 ในภาคผนวก ก	50
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.8 ก.9 ก.10 ก.11 และ ก.12 ในภาคผนวก ก	51
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.13 ก.14 ก.15 ก.16 ก.17 ก.18 และ ก.19 ในภาคผนวก ก	52
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.20 ก.21 ก.22 ก.23 ก.24 และ ก.25 ในภาคผนวก ก	55
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.26 ก.27 ก.28 ก.29 และ ก.30 ในภาคผนวก ก	60
ตาราง ก.1	สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้ อัตราเร็วสกรู 20 rpm	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที
ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน
- ตาราง ก.2 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 70
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆ
ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริค โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ
170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติม
สารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน
- ตาราง ก.3 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 71
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง
เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริค
โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที
ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน
- ตาราง ก.4 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 72
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริค
โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm
เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ
และสารช่วยหน่วงควัน
- ตาราง ก.5 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 73
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส
โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริคคือ 170 180 และ 190 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน
- ตาราง ก.6 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 74
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณของสารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ ปริมาณสารช่วยหน่วงการคิดไฟชนิดฟอสฟอรัส 8 phr
อุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดคือ 170 180 และ 190 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

- ตาราง ข.1 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการคิดไฟ
ชนิดฟอสฟอรัสในปริมาณต่างๆ และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน
74
- ตาราง ข.2 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน
ชนิด ซิงค์ ออกไซด์ ในปริมาณต่างๆ และสารช่วยหน่วงการคิดไฟ
ชนิดฟอสฟอรัส 8 phr
76



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันนี้ "พลาสติก" เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญมากในชีวิตประจำวัน มนุษย์ได้นำพลาสติกมาผลิตเป็นสิ่งของต่างๆ มากมาย เช่น ภาชนะสำหรับบรรจุสิ่งของต่างๆ ของใช้ในชีวิตประจำวัน เป็นต้น

จากกระแสความนิยมในการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปัญหาขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ และพลาสติกบางชนิด เมื่อเผาไหม้ จะทำให้เกิดก๊าซพิษทำลายระบบต่างๆ ของร่างกาย และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จึงได้มีการรณรงค์ เพื่อแก้ไขปัญหามลพิษจากพลาสติก แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ การนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (Recycle) เพื่อเป็นการลดปริมาณการสั่งซื้อเม็ดพลาสติก ทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิต และทำให้ปริมาณขยะพลาสติกลดลง

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีอุบัติเหตุจากไฟเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากความประมาทหรืออุบัติเหตุ ซึ่งแต่ละครั้งที่เกิดขึ้น จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก เนื่องจากไฟจะเผาไหม้สิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ และเกิดการลุกลามอย่างรวดเร็ว และจะเกิดควันไฟขึ้นมากมาย โดยเฉพาะวัสดุที่ทำจากพลาสติก ซึ่งควันที่เกิดขึ้น เป็นอุปสรรคอย่างยิ่งในการหนีเอาชีวิตรอด และถ้ามนุษย์สูดดมควันเข้าไปในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้สลบหรือถึงขั้นเสียชีวิตได้ ด้วยเหตุนี้ ถ้าสามารถผลิต ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติหน่วงต่อการติดไฟ และมีปริมาณควันที่เกิดขึ้นน้อย ก็จะส่งผลดีต่อชีวิตและทรัพย์สิน

งานวิจัยนี้เป็นการนำพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว (R-HDPE) มาผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิผสม อัตราเร็ว สกปรู เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ และ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow moulding) ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ ปริมาณสารช่วยหน่วงควัน โดยผลจากการศึกษา ทำให้ทราบถึงสภาวะและกระบวนการที่เหมาะสม ในการผลิตขวดพลาสติกที่หน่วงต่อการติดไฟ และมีปริมาณควันน้อย จากนั้นจึงนำไปศึกษาผลของ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อลดปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยการนำกลับมาใช้ใหม่
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการทำขวดพลาสติกที่หน่วงต่อการติดไฟ และไร้ควัน จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาสูตรผสมที่เหมาะสมในการผลิตขวดพลาสติกที่หน่วงต่อการติดไฟ และไร้ควัน จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 หาสภาวะที่เหมาะสม ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ กับสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน โดยอาศัยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow moulding)
- 1.3.2 ศึกษาปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควันที่เกิดขึ้น ของขวดพลาสติก
- 1.3.3 ศึกษาปริมาณของสารช่วยหน่วงควัน ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควันที่เกิดขึ้น ของขวดพลาสติก

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถปรับปรุงขวดพลาสติก จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ให้มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควันที่เกิดขึ้น อย่างเหมาะสม
- 1.4.2 เป็นการลดต้นทุนการผลิตขวดพลาสติก โดยการใช้พลาสติกรีไซเคิล
- 1.4.3 ปริมาณที่เหมาะสม ของสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2547 www.navbharat.co.in [1] ได้รายงานว่าได้มีการใช้ ซิงค์ ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวกรองควันทันหรือ โดยซิงค์ ออกไซด์ จะสามารถดักจับ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) และ ไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ (H₂S) ได้ นอกจากนี้ ยังนิยมใช้ ซิงค์ ออกไซด์ เป็นสารรักษาเสถียรภาพทางความร้อน ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และนิยมใช้ซิงค์ ออกไซด์ เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟในเส้นใยในลอน

ในปี พ.ศ. 2544 Gy.Bertalan และคณะ [2] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของ พอลิพรอพิลีนและพอลิเอไมด์ กับแอมโมเนียม โดยใช้พอลิฟอสเฟตเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ และใช้ โบรอน-ซิลิโคน เป็น Synergistic reactive surfactants (SRS) พบว่า SRS จะช่วยให้สารช่วยหน่วงการติดไฟเกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเอไมด์ ทำให้สมบัติทางความร้อนของ พอลิพรอพิลีน และพอลิเอไมด์ดีขึ้น

ในปี พ.ศ. 2544 วารสาร Fire Retardant Materials [3] ได้แยกประเภทของสารช่วยหน่วงควันทันเป็น 2 ประเภทคือ สารตัวเติม และ สารเติมแต่ง สารช่วยหน่วงควันทันประเภท สารตัวเติม เช่น ซิลิกา (SiO₂) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) อะลูมิเนียม ไตรไฮดรอกไซด์ (ATH) และแมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ เป็นต้น พบว่า แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับความร้อนได้ดีที่สุด จึงลดอัตราการเผาไหม้ได้ดีที่สุด และช่วยลดปริมาณควันได้ดี สารช่วยหน่วงควันทันประเภท สารเติมแต่ง เช่น ไอออน (III) ออกไซด์ (FeOOH) และ ซิงค์ ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น โดยสารช่วยหน่วงควันทัน จะช่วยลดปริมาณควันได้โดยจะไปช่วยส่งเสริมการเกิดถ่าน (char formation) โดยจะลดควันได้ 60% - 100%

ในปี พ.ศ. 2543 วารสาร Plastics Additives & compounding [4] ได้เสนอสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิด ซิงค์ บอเรท เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ให้ควันน้อยและเป็นพิษน้อย นิยมใช้คู่ควบกับสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสเฟตซึ่งจะทำให้ปริมาณควันที่เกิดขึ้นน้อยลงด้วย สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีหมู่ไฮโดรเจน จะไม่นิยมใช้ เพราะเมื่อเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดก๊าซพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2543 P.A.Ubirajara และคณะ [5] ได้ศึกษาสมบัติการหน่วงติดไฟของเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทน อีลาสโตเมอร์ (TPU) ผสมกับไมก้าโดยใช้อะลูมิเนียม ไตรไฮดรอกไซด์ (ATH) เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ ทำการทดสอบการหน่วงติดไฟด้วย UL-94 เนื่องจาก ATH เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพดีและมีราคาถูก ไมก้าเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูกและช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต ทำการผสม TPU ATH และไมก้า ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว อัตราเร็วสกรู 20 rpm อุณหภูมิ 4 ส่วนดังนี้ 170 172 175 และ 180 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณ ATH 70 phr จะให้การหน่วงไฟที่ดีที่สุด และปริมาณไมก้า 20 phr จะให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

ในปี พ.ศ. 2543 วารสาร Plastics Additives & compounding [6] ได้รายงานว่ามีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ และลดควันที่เกิดขึ้นได้ดีมาก โดยเมื่อแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะให้น้ำออกมา ซึ่งจะทำให้ไฟดับลง

ในปี พ.ศ. 2541 N. Shigeko และคณะ [7] ได้ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของเส้นใยฝ้าย ผสมกับ N-methylol dialkyl phosphonopropionamide (Pyrovatex - CP) เทียบกับเส้นใยฝ้าย ผสมกับ Tetrakis hydroxyl methyl phosphonium sulfate (THPS) โดยใช้ Pyrovatex CP และ THPS เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ และจัดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยเทคนิค thermogravimetry (TG) พบว่า Pyrovatex CP จะช่วยให้การสลายตัวด้วยความร้อนของเส้นใยฝ้ายเกิดช้ากว่า THPS

ในปี พ.ศ. 2541 A.Tonkai และคณะ [8] ได้ศึกษาการสลายตัวด้วยแสงของพอลิสไตรีน ผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีโบรมีนอยู่ในโมเลกุล โดยจัดการสลายตัวของพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง UV-visible และ FTIR spectroscopy พบว่า พอลิสไตรีนผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1 phr จะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ที่ความยาวคลื่นแสง 280 nm และพอลิสไตรีนผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr จะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ความยาวคลื่นแสง 300 nm โดยเสถียรภาพต่อแสงของพอลิสไตรีน จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยหน่วงการติดไฟ และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์กับสารช่วยหน่วงการติดไฟ

ในปี พ.ศ. 2541 Y.W.Chen-Yang และคณะ [9] ได้ศึกษาการดูดกลืนแสง UV ของไม้ที่ถูกเคลือบด้วยไซโคลไตรฟอสฟาซีนซึ่งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ โดยวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค FTIR และ UV Spectrometer พบว่าไม้ที่เคลือบด้วยไซโคลไตรฟอสฟาซีน จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 207-216 nm ซึ่งที่ความยาวคลื่นแสงนี้จะเกิดการบ่มตัว ทำให้เกิดการ

เชื่อมโยงระหว่างไม้กับไซโคลโคโรฟอสฟาซีนที่มากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของไม้ดีขึ้น

ในปี พ.ศ. 2541 C. Shin-Hsuan และคณะ [10] ได้ศึกษาสมบัติการหน่วงการติดไฟของพอลิพรอพิลีนที่ผสมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ เปรียบเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ผสม แอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต พบว่าแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี มีปริมาณควันและปริมาณ CO มาก แต่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้เกิดการเผาไหม้ลดลง มีปริมาณควันและปริมาณ CO ลดลง ถ้าใส่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ มากขึ้น จะทำให้หน่วงการติดไฟได้มากขึ้น มีปริมาณควันและปริมาณ CO ลดลง แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดี

ในปี พ.ศ. 2541 J.T.Yeh และคณะ [11] ได้ศึกษาสมบัติการหน่วงการติดไฟของพอลิเอทิลีน เทอแรพทาเลท ที่ผสม ฟอสฟอรัสแดง ซึ่งเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ และใช้ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นสารช่วยหน่วงควัน พบว่า ปริมาณถ่านคาร์บอน (char residue) จะมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน จึงทำให้สมบัติการหน่วงการติดไฟดีขึ้น และมีปริมาณควันน้อยลง เพราะชั้นผิวของถ่านคาร์บอน จะเป็นตัวกั้นไม่ให้ออกซิเจนในบรรยากาศเข้ามาทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน เทอแรพทาเลท ซึ่งปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสมคือ 2 phr และ 2 phr ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นจาก 23.9 เป็น 35.4 และปริมาณควันลดลง 70%

ในปี พ.ศ. 2540 P.P.Lizymol และ T.Sabu [12] ได้ศึกษาสมบัติของการหน่วงการติดไฟ และศึกษาควันที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้ากันได้ คือ PVC/EVA และ PVC/SAN กับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้ากันไม่ได้ คือ EVA/SAN พบว่าสมบัติด้านการติดไฟและปริมาณควันของพอลิเมอร์ผสม จะไม่ขึ้นอยู่กับการผสมเข้ากันได้หรือไม่ของพอลิเมอร์ผสม แต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนผสมหลักในพอลิเมอร์ผสม โดย PVC มีสมบัติช่วยในการหน่วงไฟ

ในปี พ.ศ. 2527 M.M. Hirschler [13] ได้ศึกษาสารช่วยหน่วงควัน ที่สามารถลดปริมาณควันที่เกิดจาก สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ พบว่า สารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟประเภทนี้คือ antimony (III) oxide , anhydrous aluminium (III) oxide , hydrous tin (IV) oxide และ iron (III) oxide แต่ Zinc (II) oxide ไม่สามารถลดปริมาณควันจากสารช่วยหน่วงการติดไฟประเภทนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัสดุ

2.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

กระบวนการในการผลิต จะเป็นปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งและใช้ความดันต่ำโดยมีบางกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายด้วย พอลิเมอร์ที่ได้จะไม่ละลายและอยู่ในรูปแขวนลอยจากนั้นจึงเกิดเป็นเม็ดพอลิเอทิลีน กระบวนการแบบสารละลายนี้อาจทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์ออกมา ส่วนกระบวนการอีกแบบหนึ่งคือ การใช้ก๊าซ โดยที่ผงของพอลิเอทิลีนจะแขวนลอยอยู่ในก๊าซเอทิลีน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow molding) และใช้ทำท่อ อีกชนิดหนึ่ง มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) และการขึ้นรูปแบบหมุน โครงสร้างและสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แสดงดังรูปที่ 2.1 [14] และตารางที่ 2.1 [14] ตามลำดับ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [14]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [14]

สมบัติ	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
ปริมาณความเป็นผลึก (%)	75-90
การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)	4-15
ความหนาแน่น (g / cm ³)	0.941-0.967
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	130-133
ความแข็งแรงดึง (MPa)	18-30
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	100-1000
มอดูลัสการโค้งงอ (MPa)	689-1654
ความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod) (J/m)	27-160
ความแข็ง (Shore D)	60-70
การแพร่กระจายความร้อน (m ² / s) × 10 ⁻⁷	1.57
ดัชนีการหลอมไหล	0.3-0.4

ในทางการค้ามีการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในการทำขวดน้ำดื่มซึ่งได้จากการดึงฟิล์มแบบ 2 ทิศทาง (Biaxial stretching) ในขั้นแรก พารีตัน (Parison) (พอลิเมอร์หลอมเหลว ที่ออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะเป็นท่อนกลาง) จะถูกผลิตโดยการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่เย็น จากนั้นพารีตัน จะถูกให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และเป่าลม 2 ทิศทางภายในแม่พิมพ์ ขวดที่ได้จะมีผนังบาง ความแข็งแรงดึงสูง สามารถโค้งงอได้ดีเหนียว และป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.3.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค

การพิจารณากระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค (macro scale) แตกต่างกับระดับจุลภาค (micro scale) ตรงที่ระดับจุลภาคจะพิจารณาในส่วนของพอลิเมอร์เท่านั้น ในขณะที่ระดับมหภาคจะพิจารณาวัสดุพลาสติกที่รวมกับสารตัวเติม หรือสารเติมแต่ง

การเผาไหม้ของวัสดุในหน่วยมวล เช่น 1 กรัม สามารถพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นเป็น 5 ขั้นตอน

ขั้นที่ 1 : การให้ความร้อน (Heating) ความร้อนจากแหล่งภายนอกอาจมาจากการได้รับจากเปลวไฟโดยตรง (การแผ่รังสี และการพาความร้อน) หรือจากของแข็งร้อน (การนำความร้อน) อัตราของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิที่แตกต่าง และสมบัติของวัสดุ ดังนี้

(1) ความจุความร้อนหรือปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย วัสดุที่มีความจุความร้อนสูงอุณหภูมิจะเพิ่มช้ากว่าวัสดุที่มีความจุความร้อนต่ำ

(2) การนำความร้อนหรืออัตราความร้อน ที่ไหลผ่านวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่ง ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างค่าหนึ่ง ถ้าค่าการนำความร้อนสูง หมายความว่าความร้อนถูกถ่ายโอนเข้าไปใน 1 หน่วยมวลได้เร็วกว่าในกรณีที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ

(3) ความร้อนแฝงการหลอมเหลว การระเหยเป็นไอหรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นในวัสดุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

ขั้นที่ 2 : การสลายตัว (Decomposition) วัสดุได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิการสลายตัวและเริ่มเปลี่ยนแปลงไปเป็นหนึ่งผลิตภัณฑ์ต่อไปนี้ (หรือมากกว่า)

(1) ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้หรือก๊าซซึ่งสามารถเผาไหม้ในอากาศได้ กลุ่มนี้รวมถึงมีเทน อีเทน เอทิลีน ฟอรั่มัลดีไฮด์ อะซิโตน และคาร์บอนมอนอกไซด์

(2) ก๊าซที่ไม่เกิดการสันดาปหรือก๊าซซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอากาศได้ ในกลุ่มนี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ ไฮโดรเจนโบรไมด์ และไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) ของเหลว โดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้บางส่วน และสารอินทรีย์ ที่มีมวลโมเลกุลสูง
- (4) ของแข็ง โดยทั่วไปเป็น ถ่าน และซีเมนต์ เป็นต้น
- (5) อนุภาคของแข็ง หรือเศษพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับควัน

ขั้นที่ 3 : การจุดติดไฟ (Ignition) ก๊าซที่เผาไหม้ได้ จะเกิดการจุดติดไฟในอากาศ เมื่อมีออกซิเจนหรือสารออกซิไดซ์เพียงพอต่อการเผาไหม้ การจุดติดไฟขึ้นกับแหล่งภายนอกของการจุดติดไฟ เช่น เปลวไฟหรือ การจุดประกายไฟ และอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [15]

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ (Ignition temperatures of various polymers)

[15]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิของจุดวาบไฟ (°C)	อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง (°C)
พอลิเอทิลีน	341-357	349
พอลิไวนิลคลอไรด์	391	454
พอลิไวนิลคลอไรด์ อะซิเตท	320-340	435-557
พอลิไวนิลดีน คลอไรด์	532	532
พอลิสไตรีน	345-360	488-496
สไตรีน อะครีโลไนไตรล์	366	454
สไตรีน เมทิลเมทาครีเลต	329	485
พอลิเมทิลเมทาครีเลต	280-300	450-462
พอลิคาร์บอเนต	375-467	477-580
ไนลอน	421	424
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	141	530
เซลลูลอสไนเตรท	305	141
เซลลูลอสไตรอะซิเตท (เส้นใย)	291	540
เอทิลเซลลูลอส	310	296
พอลิยูรีเทน	520-540	416
ฟีนอล	475-500	571-580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของขั้นตอนการจุดติดไฟที่มีต่อสมบัติของวัสดุ เป็นดังนี้

- (1) ก๊าซที่อยู่รอบวัสดุสามารถจุดติดไฟได้ โดยการจุดประกายไฟหรือใช้เปลวไฟ (Flash ignition temperature)
- (2) อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง (Self-ignition temperature) หรืออุณหภูมิซึ่งปฏิกิริยาภายในวัสดุทำให้เกิดการจุดติดไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิการจุดติดไฟโดยใช้เปลวไฟ เพราะต้องการพลังงานมากกว่า
- (3) ระดับต่ำสุดของออกซิเจน ที่ต้องการในการจุดประกายไฟ และการเผาไหม้ (Limiting oxygen concentration) โดยทั่วไปวัสดุสามารถดับไฟได้เอง (Self-extinguishing) ถ้าไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21% และไม่เกิดการจุดประกาย (Non-igniting) ถ้าไม่สามารถจุดประกายไฟกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21%

ขั้นที่ 4 : การเผาไหม้ (Combustion) คือ การเผาไหม้ของมวล 1 หน่วย ทำให้เกิดปริมาณของความร้อนในการเผาไหม้ ความร้อนของการเผาไหม้ทำให้ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของก๊าซจากการเผาไหม้ และ ก๊าซที่ไม่เกิดการเผาไหม้สูงขึ้น จะมีการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการพาความร้อน แ่นความร้อน และ การนำความร้อน

ขั้นที่ 5 : การลุกลามของเปลวไฟ (Propagation) คือความร้อนสุทธิของการเผาไหม้ของมวล 1 หน่วย มีค่าลดลงโดยความร้อนสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมและเพิ่มขึ้น โดยได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น เปลวไฟซึ่งต้องเพียงพอในการทำให้มวล 1 หน่วยที่อยู่ในขั้นตอนการเผาไหม้เข้าสู่ขั้นลุกลามได้

2.3.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้ [16]

ผลจากการถูกเป็นไฟของพลาสติกเกิดขึ้นหลายขั้นตอนซึ่งตามความจริงมีแนวโน้ม
 ความเป็นไปในทางปฏิบัติ ดังนี้

- 1.) การอ่อนตัวของพลาสติกนำไปสู่การย้อยตัวลง (Sagging)
- 2.) การออกซิเดชันของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับ การออกซิเดชันในชั้นบรรยากาศโดยเกิด
 การเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยจะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะ C-H และจากนั้นเป็นพันธะ C-C
- 3.) การเสียดสภาพทางเคมีจะได้โมเลกุลที่เล็กลงเรื่อยๆ
- 4.) พอลิเมอร์ที่เสียดสภาพจะเกิดการระเหยของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 5.) การจุดติดไฟของก๊าซผสมระหว่างสารอินทรีย์กับออกซิเจนในอากาศจัดเป็น
 ปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน
- 6.) การเร่งปฏิกิริยาของทั้ง 5 ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นขึ้นอยู่กับ การสันดาปทาง
 ความร้อนประเภทคายความร้อน
- 7.) การลุกไหม้ของเปลวไฟ (Flashover) จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ
 สารอินทรีย์ในวัฏภาคไอ มาถึงระดับวิกฤติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใกล้เพดานที่มีก๊าซร้อนรวมตัวกันอยู่
 จะทำให้ของผสมของสารอินทรีย์ทั้งหมดกับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดการติดไฟขึ้นทันทีทำให้
 เกิดมวลของเปลวไฟขึ้นในบริเวณเพดาน สิ่งนี้เป็นเหตุผลที่ทำให้ไมคนที่ติดอยู่ในเปลวเพลิง หรือ
 แม้แต่คนที่ดับเพลิงไม่สามารถหนีออกจากเปลวเพลิงได้

2.3.3 วัสดุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.3.3.1 ฟอสฟอรัส

วัสดุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟมากที่สุด คือสารอินทรีย์ประเภท
 ฟอสฟอรัส สารนี้ค่อนข้างมีราคาแพง สามารถใช้ได้ ในพอลิเมอร์ ช่วยลดการติดไฟได้อย่างมี
 ประสิทธิภาพ โดยไม่มีการเกิดควันหรือก๊าซที่มีพิษขึ้น ทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟในวัฏ
 ภาคควบแน่น (Condensed phase) โดยที่ฟอสฟอรัสและสารประกอบของฟอสฟอรัส จะเพิ่ม
 ปริมาณของสิ่งที่เหลือในองค์ประกอบของคาร์บอนหรือถ่าน โดยอาศัยกลไก 1 หรือ 2 กลไก ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวในปฏิกิริยา
 ได้คาร์บอน มากกว่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ หรือคาร์บอนไดออกไซด์
2. ชั้นผิวของถ่านจะยับยั้งออกซิเจนที่เข้ามา และป้องกันการเกิดก๊าซ
 ของคาร์บอนโดยไม่ให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของฟอสฟอรัสในปฏิกิริยาเคมีที่มีผลต่อการสลายตัวของอาจเกี่ยวข้องกับ การออกซิเดชันบางส่วน ตามด้วยปฏิกิริยาการจัดน้ำออกจากโมเลกุล โดยฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของ ถ่านมีลักษณะอยู่ในรูปออกไซด์ของฟอสฟอรัสที่ไม่ระเหย

การกระทำของสารประกอบของฟอสฟอรัสที่พบ มีผลดังนี้

1. มีผลในวัฏภาคควบแน่น (Condensed phase)
2. รบกวนปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนหลักแหล่งหนึ่งในการเผาไหม้ของวัสดุ

เผาไหม้ของวัสดุ

3. รบกวนปฏิกิริยาการเกิดก๊าซที่เป็นต้นเหตุของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และการลุกลามของเปลวไฟ

2.3.3.2 ไบรมีน

สารอินทรีย์ประเภทไบรมีน จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มี ประสิทธิภาพมาก ราคาแพง พันธะระหว่าง C-Br ไม่เสถียรมากนักโดยเฉพาะในสารประกอบอะ ลีฟาติก (Aliphatic) ดังนั้นจึงใช้ได้ปกติในเบนซีน ในเวลาที่เกิดเพลิงไหม้จะทำให้เกิดควันและ ก๊าซที่มีพิษ จึงจำกัดการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ สารอินทรีย์ประเภทไบรมีน ทำ หน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงไฟในวัฏภาคก๊าซ โดยมี 2 กลไก คือ การเปลี่ยนแปลงหรือการสิ้นสุดของ ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และการก่อรูปเป็นก๊าซ ไบรมีนหนัก ซึ่งทำหน้าที่ปกป้องวัฏ ภาคควบแน่น (Condense phase) ด้วยการยับยั้งออกซิเจนที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมี อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำ ตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดร ไฮไลซิสน้ำ เพื่อให้ได้คาร์บอนที่เคลื่อนเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอน

การทำหน้าที่ของสารประกอบของไบรมีนมีผลในขั้นที่ 3 (การจุดติดไฟ) โดย กั้นออกซิเจนและความร้อนที่เข้ามาและมีผลในขั้นที่ 4 (การเผาไหม้) โดยมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการ เผาไหม้ ด้วยการปล่อยสารประกอบของไบรมีนในวัฏภาคก๊าซซึ่งจะหน่วงการติดไฟที่เกิดขึ้น

สารประกอบไบรมีน อะลีฟาติก และอะลีไซคลิก มีประสิทธิภาพมากกว่า สารประกอบอะโรมาติกไบรมีน ในการหน่วงการติดไฟพอลิสไตรีน โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ เชื่อว่าเป็นผลของพลังงานพันธะของอะโรมาติกไบรมีนที่สูงกว่าจึงทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการ ติดไฟที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า

2.3.3.3 คลอรีน

สารอินทรีย์ประเภทคลอรีน จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ แม้จะไม่มีประสิทธิ ภาพเท่ากับ โบรมีนก็ตาม ในทางตรงกันข้ามกลับช่วยลดค่าใช้จ่ายลงและพันธะ C-Cl ก่อนข้างเสถียร จึงนิยมใช้ในพอลิเมอร์ เวลาเกิดเพลิงไหม้สารนี้จะทำให้เกิดควันและก๊าซพิษ จึงเป็นขีดจำกัดในการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ ทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ ทั้งในวิฤภาคก๊าซและวิฤภาคควบแน่น ในวิฤภาคก๊าซใช้กลไกทางเคมีของการเปลี่ยนแปลงหรือการสูญเสียของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ และ กลไกทางกายภาพของการเกิดก๊าซคลอรีนหนักในการปกป้องวิฤภาคควบแน่นด้วยการยับยั้งออกซิเจนและความร้อนที่เข้ามา

ปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดปฏิกิริยาแฮโลจิเนชัน ตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรแฮโลจิเนชัน ซึ่งจะ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกากของเหลือที่เป็นพอลิเมอร์และมีพันธะอยู่คู่อยู่มากซึ่งจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอน สารประกอบของคลอรีนมีลักษณะการทำงานเหมือน โบรมีน คือเกิดในขั้นที่ 3 (การจุดติดไฟ) และขั้นที่ 4 (การเผาไหม้) โดยมีอิทธิพลต่อการสลายตัว ส่วนอะลิฟาติกคลอรีนมีประสิทธิภาพมากกว่า อะโรมาติกคลอรีนทั้งในพอลิเอสเตอร์และพอลิยูรีเทน

2.3.3.4 แอนติโมนีออกไซด์

เป็นสารที่มีสีขาว ราคาแพง ไม่ได้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ จำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ประเภทโบรมีนหรือคลอรีนจึงจะเกิดประสิทธิภาพ เมื่อเกิดเพลิงไหม้จะระเหิดเป็นควันสีขาวรวมกับควันที่เกิดจากแฮโลเจน

2.3.3.5 ไนโตรเจน

พอลิเมอร์บางชนิด พบว่าไนโตรเจนมีผลช่วยหน่วงการติดไฟ แต่ผลที่ได้ไม่ชัดเจน ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.3.3.6 น้ำ

น้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท จัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ดี นิยมใช้กันอย่างมากเนื่องจากเป็นสารที่มีราคาถูก เมื่อพอลิเมอร์เข้าใกล้ความร้อนของเปลวไฟ น้ำจะระเหิดกลายเป็นไอ ทำให้พลาสติกเย็นลง ซึ่งทำให้กระบวนการเผาไหม้ช้าลงโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นจะปกคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ ไม่ให้รวมกับออกซิเจนในบรรยากาศ จึงทำให้ไม่ล้าสักเปลวไฟ ขีดจำกัดของสารนี้ที่สำคัญ คือ อุณหภูมิของการสลายตัวต่ำ พลาสติกที่สามารถแปรรูปที่อุณหภูมิต่ำ เช่น พอลิโอสเตน ยาง พลาสติกโพลีเอทิลีน อีพอกซี พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว พอลิยูรีเทน และลาเทกซ์ เป็นต้น การใช้อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทจะมีประโยชน์อย่างมาก แต่พลาสติกที่ต้องการอุณหภูมิแปรรูปที่สูงขึ้น โดยเฉพาะพลาสติกที่ใช้ในทางวิศวกรรมจะเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียจากการไฮเดรชันในระหว่างกระบวนการ จึงทำให้สูญเสียการหน่วงการติดไฟ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการพัฒนาสารที่มีน้ำหนักการไฮเดรชันที่ค่อนข้างเสถียร

2.3.3.7 เบนซีนในสายโซ่หลัก

เทอร์โมพลาสติกในทางวิศวกรรมที่มีเบนซีนอยู่ในสายโซ่หลัก โดยทั่วไป จะมีดัชนีออกซิเจนค่อนข้างสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นอะลิฟาติก ทั้งนี้ เนื่องจากเสถียรภาพจากการเรโซแนนซ์ของเบนซีนทำให้พันธะแตกออกด้วยความร้อนเกิดเป็นก๊าซ ส่งผลให้การสันดาปเกิดช้าลง

2.3.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟในทางการค้า [16]

สารเคมีที่ช่วยหน่วงการติดไฟถูกจัดแยกเป็นสารเติมแต่ง (additive) และสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารหน่วงการติดไฟประเภทสารเติมแต่งจัดเป็นสารประกอบพอลิเมอร์สำเร็จรูป และมีประมาณ 87 % ที่ใช้อยู่ทั้งหมด ในขณะที่สารช่วยหน่วงการติดไฟที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะนำมาใช้ในโมเลกุลพอลิเมอร์เดิม หรือใช้เป็นสารบ่ม (curing agents) สำหรับเทอร์โมเซตและมีอยู่ประมาณ 13% ของทั้งหมด

ประเภทของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่สำคัญ

2.3.4.1 อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

ใช้กันมากเป็นอันดับหนึ่ง จะใช้ในพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อ่อนตัว โดยมี การบ่มตัวที่อุณหภูมิสูง นิยมใช้ในงานก่อสร้างและการขนส่ง

2.3.4.2 สารอินทรีย์ประเภทฟอสเฟต

ใช้กันมากเป็นอันดับสอง ส่วนมากใช้กับพวกพอลิไวนิลคลอไรด์ เซลลูโลส พอลิฟีนิลีนออกไซด์ และโพลียูรีเทนชนิดยืดหยุ่น พบว่าประมาณ 60% เป็นเอสเตอร์ ประเภทวงแหวนเหมือนกับไตรคลอริลฟอสเฟต และประมาณ 40 % เป็นแฮโลจีเนตเตดอัลคิล ฟอสเฟต ใช้กันมากในพอลียูรีเทน

2.3.4.3 คลอรีเนตเตดไฮโดรคาร์บอน

ใช้กันมากเป็นอันดับสาม คลอรีเนตเตดพาราฟินส์ (Chlorinated parafins) ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 70 % ใช้ในพอลิโอสเตนและไนลอน เช่น ใช้เป็นฉนวน สำหรับลวดและเคเบิล ออกซิเจนทอลล์ ดีคลอเรน (Occidental dechlorane) หรือ บิส-เฮกซะคลอโรไซโคลเพนตาไดเอโนออคเทน (Bis-hexachlorocyclopentadieneoctane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.4 ออร์แกโนโบรมีน

ออร์แกโนโบรมีนที่นำมาใช้ ได้แก่ เดคะโบรโมไดเฟนิลออกไซด์ (Decabromo diphenyl oxide) โคลโพลิเมอร์อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน และโบรมีนที่เติมโซลอะลิฟาติก (Brominated cycloaliphatic) นิยมใช้ในโฟมกันกระแทกพอลิสไตรีน

2.3.4.5 แอนติโมนีออกไซด์

แอนติโมนีออกไซด์นิยมใช้ร่วมกับออร์แกโนคลอรีนและออร์แกโนโบรมีน

2.3.4.6 โลหะออกไซด์อื่นๆ

ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดการเกิดควันในระหว่างการเผาไหม้ได้แก่ โบรอน ซิงค์ และ โมลิบดีนัม

2.3.5 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา

2.3.5.1 เรซินเอพอกซี

ประกอบด้วยเตตระโบรโมบิสฟีนอล เอ (tetrabromo-bisphenol A) ใช้กับเรซินเอพอกซี และ คลอเรนดิคแอนไฮไดรด์ (chlorendicanhydride) นิยมใช้เป็นสารช่วยในการบ่ม

2.3.5.2 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว

ประกอบด้วยเตตระคลอโร และเตตระโบรโมฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (tetrachloro and tetrabromo phthalic anhydride) และคลอเรนดิคแอนไฮไดรด์ (chlorendicanhydride) ใช้แทนฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ที่ใช้ในการผลิตพอลิเอสเทอร์ และใช้เตตระโบรโมบิสฟีนอล เอ (tetrabromo-bisphenol A) แทนพรอพิลีนไกลคอลในการผลิตพอลิเอสเทอร์

2.3.5.3 โฟมพอลิยูรีเทน

ส่วนมากเป็นโฟมชนิดแข็ง ประกอบด้วยฟอสฟอรัสที่มีพอลิเอสเทอร์อยู่

2.3.5.4 พอลิการ์บอเนต

ส่วนมากใช้ เตตระโบรโมบิสฟีนอล เอ แทน บิสฟีนอล เอ นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิเอสเทอร์ซึ่งมีสารช่วยหน่วงการติดไฟอยู่ใน โคลโพลิเมอร์อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกชนิดของสารหน่วงการติดไฟจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติของสารหน่วงการติดไฟดังแสดงในตารางที่ 2.3 [15]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้ [15]

ชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	สูตร	น้ำหนักโมเลกุล	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
ฟอสฟอรัสไดรอกไซด์	P_2O_3	109.95	23.8	173.8
ฟอสฟอรัสเตตรอกไซด์	P_2O_4	125.95	>100	-
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์	P_2O_5	141.94	580-585	300 (S)
ฟอสฟอรัสไตรฟลูออไรด์	PF_3	87.87	-151.5	-101.5
ฟอสฟอรัสเพนตะฟลูออไรด์	PF_5	125.97	-83	-75
ฟอสฟอรัสไดรคลอไรด์	PCl_2	137.33	-112	75.5
ฟอสฟอรัสเพนตะคลอไรด์	PCl_5	208.24	23.8	173.8
ฟอสฟอรัสไตรโบรไมด์	PBr_3	270.70	>100	-
ฟอสฟอรัสเพนตะโบรไมด์	PBr_5	430.52	580	300 (S)
ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์	$POCl_2$	153.33	-585	-101.5
ฟอสฟอรัสออกซีโบรไมด์	$POBr_2$	286.70	-151.5	-75
ไฮโดรเจนฟลูออไรด์	HF	20.01	-83	75.5
ไฮโดรเจนคลอไรด์	HCl	36.46	-112	162 (S)
ไฮโดรเจนโบรไมด์	HBr	80.92	-	172.9
ไฮโดรเจนไอโอไดด์	HI	127.91	-40	-
แอนติโมนี ไดรอกไซด์	Sb_2O_3	291.50	-	105.3
แอนติโมนี ไตรฟลูออไรด์	SbF_3	178.75	2	189.5
แอนติโมนี เพนตะฟลูออไรด์	SbF_5	216.74	56	19.54
แอนติโมนี ไตรคลอไรด์	$SbCl_3$	228.11	-83.1	-84.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ

การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพและราคา
2. การทำเป็นสารประกอบ
3. เสถียรภาพทางความร้อน
4. ความสามารถในการกักความร้อน
5. สมบัติทางกายภาพ
6. ลักษณะที่ปรากฏ
7. ความถาวรและความสามารถเข้ากันได้กับวัสดุที่ใช้
8. ความเป็นพิษและความปลอดภัยทางสิ่งแวดล้อม
9. เสถียรภาพต่อแสง
10. สมบัติทางไฟฟ้า

2.3.7 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.3.7.1 การยับยั้งหรือการกำจัดอนุมูลอิสระ

ปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลักในวัสดุที่เป็นไอ โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลัก สารอินทรีย์ประเภทไฮโดรเจนบางที่อาจเกิดอนุมูลโบรมีนและคลอรีน ซึ่งแทรกแซงสายโซ่ที่เกิดออกซิเดชัน บางคนเชื่อว่าสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสอาจเกิดในลักษณะนี้เช่นกัน

2.3.7.2 การปกคลุมที่ไม่รวมกับออกซิเจน

สารช่วยหน่วงการติดไฟอาจจะทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งปกคลุมผิวของพลาสติก ซึ่งเป็นการทำให้พลาสติกไม่สัมผัสกับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศ และป้องกันการเผาไหม้ ก๊าซประเภทนี้ ได้แก่ โบรมีน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอนติโมนีออกไซด์ ออกซีไฮไดรด์ และ ไออน้ำ เป็นต้น

2.3.7.3 การเคลือบผิว

การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสทำให้เกิดฟอสฟอรัสออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นแก้วหุ้ม เมื่อแข็งตัวแล้วทำให้เกิดการเคลือบของสารอินทรีย์บนพลาสติก จัดเป็นสารที่ไม่เกิดการติดไฟ และช่วยแยกออกซิเจนในบรรยากาศออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7.4 การเกิดถ่าน

กระบวนการเผาไหม้บางชนิด เปลี่ยนพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ ให้เป็นถ่านคาร์บอนที่มีโพมอยู่ โดยจะแยกออกซิเจนในบรรยากาศ และทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวไฟไม่ให้ออกจากพลาสติกและป้องกันการแตกสลายของพลาสติกไปเป็นไอของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสันดาปของไฮโดรคาร์บอน นักทฤษฎีหลายคนเชื่อว่า ประสิทธิภาพของสารช่วยหน่วงการติดไฟขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งเสริมการเกิดถ่าน (Char-formation) ยกตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัสออกไซด์ ดึงน้ำออกจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ทำให้เหลือเพียงคาร์บอนเท่านั้น

2.3.7.5 การดูดความร้อน

ถ้าสารช่วยหน่วงการติดไฟ ได้จากการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน จะทำให้ พลาสติกเป็นตัวกลางต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวจึงช่วยป้องกันการเผาไหม้ โดยการระเหกกลายเป็นไอ น้ำ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

2.3.7.6 การไหม้เป็นหยดจากการเผาไหม้

ในการทดสอบเทอร์โมพลาสติกในห้องปฏิบัติการพบว่า สารตัวอย่างในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จะหลอมเหลว และไหลเป็นหยดโดยมีเปลวไฟติดอยู่ด้วยแล้วสารนั้นจะเย็นตัวลงโดยไม่เกิดการเผาไหม้ต่อไป เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า “ การดับไฟด้วยตนเอง ” (Self-extinguishing behavior)

2.3.8 วิธีการทดสอบ (ในห้องทดลอง)

มีวิธีการทดสอบหลายวิธีในการเปรียบเทียบความสามารถในการติดไฟ และประเมินความเสี่ยงภัย แต่ที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการมีเพียง 2-3 วิธี โดยเริ่มจากการทดสอบขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ตามลำดับ

2.3.8.1 แท่งพลาสติกในแนวนอน (Horizontal Bar)

แท่งพลาสติกถูกวางอยู่ในแนวราบโดยปลายด้านหนึ่งถูกยึดไว้ ถ้าพลาสติกเกิดการโค้งงอ อาจจะช่วยพยุงตัวขึ้นงานด้วยตะแกรง และมีตะเกียงเบนเสน วางอยู่ใต้ปลายอีกข้างหนึ่ง เมื่อทำการเผาไหม้ ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟ เรียกว่า “ ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning) ” ถ้าพลาสติกติดไฟจะต้องวัดอัตราของการเกิดเปลวไฟในหน่วย เซนติเมตรต่อนาที และรายงานผลเป็น “ อัตราการเผาไหม้ (rate of burning) ” ถ้าติดไฟเพียงครั้งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น “ สามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing) ” และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่ายและมีประโยชน์มากในการวิจัยขั้นพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8.2 ดัชนีออกซิเจนหรือการทดสอบโดยอาศัยเทียนไข (Oxygen Index or Candle Test)

พลาสติกขาว วางเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ตามแนวตั้งและตรึงไว้ที่ฐาน ผสมก๊าซออกซิเจน และ ไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ถูกควบคุม และป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอด ทดสอบอย่างต่อเนื่องและออกทางรูเปิดด้านบน นำเปลวไฟจ่อลงตรงส่วนบนสุดของตัวอย่าง พลาสติกเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ เหมือนการจุดติดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้ เปอร์เซนต์ของ ออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเกิดการลุกไหม้ เปอร์เซนต์ของออกซิเจนจะลดลงจนกระทั่งหยุด ส่วน เปอร์เซนต์ของออกซิเจนวิกฤต (critical percent oxygen) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งกันสำหรับการลุกไหม้ พลติเมอร์จะถูกรายงานเป็นดัชนีออกซิเจน วิธีนี้จัดเป็นวิธีทางห้องปฏิบัติการขนาดเล็กที่นิยมใช้มากที่สุด

ถ้าต้องการทดสอบปฏิกิริยาให้รุนแรงมากขึ้นอาจทำกลับกัน โดยการติดตั้ง เทียนไขตามชนิดและจุดเทียนไขตรงส่วนล่างสุด วิธีนี้เปลวไฟจะลุกกลมล้อมรอบตัวอย่าง โดยจะ ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างก่อนแล้วจึงเริ่มเผาไหม้ไปตามด้านข้างทั้งหมด

2.3.8.3 แผงการแผ่รังสี (Radiant Panel)

ผู้เชี่ยวชาญพิเศษหลายคนเชื่อว่า การลุกไหม้จะแผ่รังสีความร้อนให้แก่ ลังแวดล้อมก่อน แล้วจึงจุดติดไฟ โดยจะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงมากกว่าที่จะเกิดการแผ่รังสี แบบการพาทั่วไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้แผงความร้อนของการแผ่รังสี (radiant heat panel) ให้ความ ร้อนแก่สารตัวอย่างก่อน และ/หรือ ในระหว่างที่ทดสอบการจุดติดไฟ (ignition test)

2.3.8.4 อุโมงค์ (Tunnel)

สำหรับวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้าง วิธีที่นิยมทดสอบจะใช้เป็น อุโมงค์ตามแนวนอน (horizontal tunnel) กว้าง 20 นิ้ว และยาว 25 ฟุต โดยใช้เพดานทำด้วยวัสดุที่ จะทดสอบการจุดติดไฟ และปล่อยให้อากาศเข้าไปยังอุโมงค์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ก๊าซที่ได้จากการสันดาปจะออกไปทางปลาย โดยอัตราของระยะทางเปลวไฟไปตามความ ยาวของเพดาน คือการวัดความสามารถในการติดไฟของวัสดุนั้น วิธีนี้นำมาทดสอบวัสดุในทาง การค้าได้ แต่สารตัวอย่างต้องมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในงานวิจัย

2.3.8.5 ห้องควัน (Smoke Chamber)

มีหลายวิธีที่ได้พัฒนา เพื่อที่จะวัดปริมาณของควันที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิด การเผาไหม้ โดยพิจารณาถึงผลของการบดบังการมองเห็น ของคนที่พยายามจะหลบหนีออกจาก เปลวไฟ โดยทั่วไปกล่องที่สร้างขึ้นจะมีหน้าต่างอยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสงจากด้านหลัง กล่องสามารถมองเห็นทะลุผ่านหน้าต่างได้ และวัดการส่งผ่านทางด้านหน้าของกล่อง โดยตัวอย่างจะถูก

เผาไหม้อยู่ภายในกล่องทำให้เกิดควัน ซึ่งจะค่อยๆบดบังแสง ที่สามารถผ่านทะลุมายังกล่องได้ และจากการสูญเสียการส่งผ่านสามารถวัดได้ที่ด้านหน้าของกล่อง วิธีทดสอบนี้มีประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุที่ทำให้เกิดควันได้น้อย

2.3.8.6 ความเป็นพิษ (Toxicity)

ก๊าซที่ได้จากการสันดาปได้นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการหนู เพื่อเปรียบเทียบอัตราที่ก๊าซนี้เสียไปในขณะที่หลบหนี พบว่าคุณสมบัติไม่เหมาะสมและทำให้หนูตาย ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยคนอื่นๆได้ใช้การวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อหาก๊าซที่เกิดในระหว่างเผาไหม้ว่ามีมากเท่าไร โดยทั่วไปปัญหาที่สำคัญคือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2.3.8.7 มุมห้อง (Room Corner)

“มุมห้อง” จะมีลักษณะดังนี้ คือ มีผนัง 2 ผนัง พบกันที่มุม 90 องศาและปิดด้วยเพดาน มีการสร้างกองไม้ดีดไฟตรงมุมห้องเมื่อเทก๊าซโซลินลงไปในกองไม้และจุดไฟ จะมีการบันทึกภาพในขณะที่ไฟลุกลามไปที่ผนังจนถึงเพดานแล้วนำมาศึกษาอัตราของการเผาไหม้จากเทปบันทึกภาพ

2.3.8.8 ถึงก่อสร้างทั้งหลัง (Whole Building)

ในบางครั้งหน่วยดับเพลิงอาจมีการเผาไหม้สิ่งก่อสร้างเพื่อกำจัดทิ้ง โดยอาจอนุญาตให้นักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้ และนักวิศวกรติดตั้งวัสดุที่จะใช้ทดสอบ และบันทึกภาพว่ามีลักษณะการเผาไหม้ในสภาวะเหล่านั้นอย่างไร อย่างไรก็ตาม โอกาสเช่นนี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนักจึงไม่สามารถนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางได้

2.3.8.9 การทบทวนไฟไหม้ที่เกิดขึ้นจริง (Review of Actual Fires)

เมื่อเกิดไฟไหม้จริง นักวิทยาศาสตร์ และนักวิศวกรทางด้านเพลิงไหม้สามารถเรียนรู้ได้อย่างดีโดยการสังเกต หรืออย่างน้อยที่สุด โดยการทบทวนรายละเอียดของเหตุการณ์ย้อนหลัง ยกตัวอย่างเช่น ผู้ชำนาญการในสาขาได้เสนอตนเองเป็นผู้ช่วยนักดับเพลิง เพื่อที่จะสามารถเข้าถึงเหตุการณ์ที่เกิดเพลิงไหม้จริง และสังเกตการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นในขณะนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย


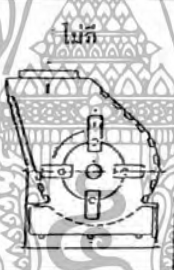


2.4.1 เครื่องย่อยพลาสติก

การย่อย หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีกล ในการย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็ก ตามความต้องการ

ถ้าจะต้องมีการแยกพลาสติกเม็ดหยาบออกจากเม็ดละเอียดเพื่อสามารถทำงานขั้นต่อไปได้สะดวกยิ่งขึ้น ต้องมีการกรองประกอบเข้าไปด้วย

เหตุผลที่จำเป็นต้องย่อยพลาสติกมีหลายอย่าง เช่นเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายเร็ว เป็นต้น เครื่องย่อยมีหลายชนิด ซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อย เช่น เครื่องรีดย่อย เครื่องโม่ตี เครื่องโม่ตัด เครื่องโม่กวน เครื่องโม่แท่งตี และเครื่องโม่รีด

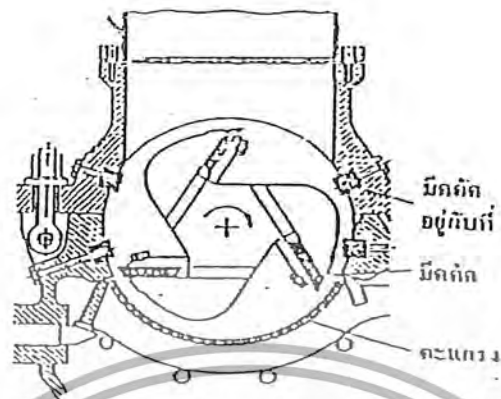
เครื่องรีดย่อยจะใช้สำหรับการย่อยพลาสติกแข็งเพราะเท่านั้น สำหรับการย่อยจะต้องใช้เครื่องโม่บด ในการที่จะเลือกใช้เครื่องโม่ชนิดใดขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียด หรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [17]

เครื่อง	เครื่องรีดย่อย	โม่ตี	โม่ตัด	โม่แท่งตี
ภาพของพลาสติก				
เพราะ	✓	✓		✓
เหนียว			✓	✓
elastic			✓	
เหมาะสำหรับ	PS, PE	PS, PE, PMMA	PVC, PE, PP, PA	PVC, PE, PF

รูปที่ 2.2 เครื่องย่อยพลาสติกแบบต่างๆ [17]

ลักษณะการทำงานของเครื่องย่อยต่างๆ ดังรูปที่ 2.2 [17] จะแตกต่างกัน ดังเช่น เครื่องรีดย่อยจะใช้แรงอัด เครื่องโม่ตัดจะใช้การตัดเฉือน และเครื่องโม่แท่งจะใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี

เครื่องโม่ตัดจะใช้ในการย่อยพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการย่อยเศษพลาสติกหรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางของเครื่องไม้ตัด [17]

เครื่องไม้ตัดซึ่งประกอบด้วย เรือนเหล็กหล่อ มีคมตัดติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่ วัสดุที่จะตัดส่งเข้าทางปล่องด้านบน ตรงกลางจะมีเพล่า ซึ่งมีมีดตัดติดอยู่ 3 เล่ม เสาพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีดหมุนจับและนำไปตัดกับมีดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่อง โดยเครื่องจะทำงานช้าๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ ความเร็วตัดอยู่ระหว่าง 12-14 m/s ระยะห่างระหว่างมีดหมุนและมีดอยู่กับที่ประมาณ 0.25 – 0.5 mm เครื่องไม้ตัดมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 10 kg/hr จนถึง 2,500 kg/hr ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.4.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ (Twin – screw extruder) [14]

เครื่องอัดรีดแบบนี้ จะมีสกรูอาร์คิมิดีส (Archimedian Screws) อยู่ 2 สกรู โดยจัดจำแนกลักษณะของเครื่องอัดรีดตามลักษณะและทิศทางการเคลื่อนที่ของสกรู โดยเครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองไม่ตรงกันจะมีกลไกของการเคลื่อนที่เป็นแบบลาก (drag flow conveyance mechanism) ในขณะที่เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกัน จะมีการเคลื่อนที่แบบการกระจัดทางบวก (positive conveyance)

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่มีประโยชน์ดังนี้ คือ

1. สามารถควบคุมความเนียนของพอลิเมอร์ได้ โดยการใช้การ โปรแกรมสกรู (screw programming)
2. เวลาในการกระจายตัวต่ำ จึงสามารถควบคุมได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เป็นการทำงานที่อาศัยหลักของการระบายอากาศ เนื่องจากก๊าซสามารถถูกกำจัดออกไปได้ง่าย
4. การผสมโดยรวมดี เหมาะสำหรับการทำสารประกอบ

ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ มีหน้าที่ดังนี้ [18]

(1) ส่วนป้อน (feed section)

มีหน้าที่ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ก่อน (Preheat) และส่ง (convey) ไปยัง ส่วนต่อไป ความสูงของสกรูคงที่และความยาวของส่วนนี้จะต้องให้แน่ใจว่าอัตราการป้อนไปข้างหน้าถูกต้อง ไม่น้อยหรือมากเกินไป ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพอลิเมอร์

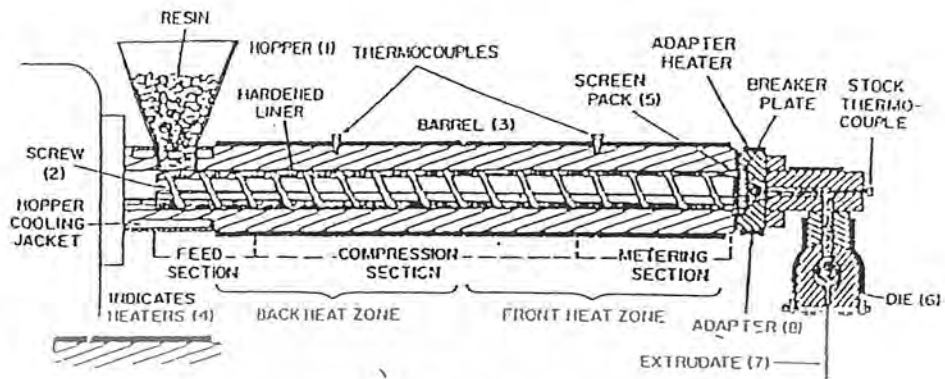
(2) ส่วนอัด (Compression section or transition section)

ความลึกของช่องว่าง (Channel depth) จะลดลงโดยมีหน้าที่ดังนี้ คือ

- ไล่อากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพลาสติก
- เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังกระบอก ทำให้ความแข็งของพอลิเมอร์ลดลง
- เปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เมื่อการหลอมเหลวเป็นไปอย่างเหมาะสม

(3) ส่วนผสม (Metering section)

ความลึกของสกรู (Screw depth) คงที่ ทำหน้าที่หลอมพอลิเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันและป้อนสู่หัวตาย พอลิเมอร์จะมีคุณภาพเดียวกันที่อุณหภูมิและความดันคงที่



รูปที่ 2.4 ส่วนต่างๆของเครื่องอัดแบบเกลียวहनอนุ [18]

หัวตาย (Die section)

เป็นส่วนสุดท้ายของการอัดรีดประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่เป็นรูๆ (Perforated steel plate) เรียกว่าเบรคเกอร์เพลท (Breaker plate) และตะแกรง (Sieve) จำนวน 2-3 ชั้น ที่ทำจากลวดอยู่ด้านใน (ด้านสกรู) ทั้งสองส่วนทำหน้าที่

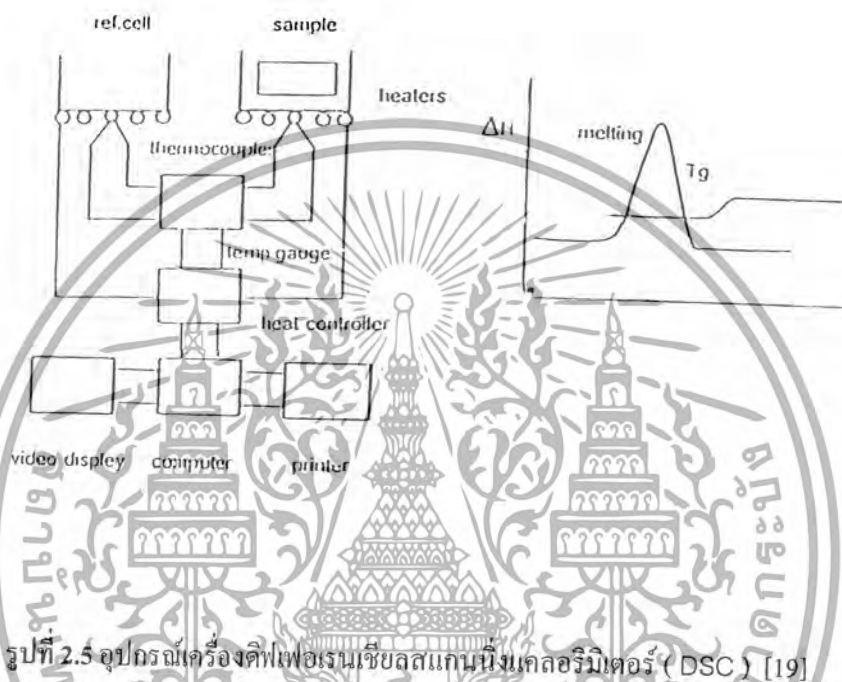
- แยกวัสดุที่มีขนาดใหญ่เกินไปออกก่อนผ่าน พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นเจล สิ่งแปลกปลอม
- บดลดความดันที่เกิดจากบีบและส่วนผสม (Metering)
- ปรับความจ้ำจกการหลอม

2.4.3 เครื่องวัดฟอเรนเชียลคานนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องกับสารตัวอย่างและสารอ้างอิง ที่อุณหภูมิเดียวกัน แล้ววัดอัตราการไหลของความร้อน หลักการของเทคนิคนี้อธิบายดังรูป 2.5 [19] สารตัวอย่างจะถูกวางอยู่ในกล่องโลหะที่มีความเสถียรทางความร้อนสูง ใช้เทอร์โมคัพเพิลวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากนั้นวัดตัวควบคุมความร้อนที่ให้ ทำให้ทราบอัตราความร้อนที่ตัวอย่างดูดซับหรือคายออกมาโดยการคำนวณ เทคนิค DSC จะให้กราฟดังแสดงในรูป 2.5 ทำให้ทราบสมบัติของพอลิเมอร์ ดังนี้

1. พิกัดความจุความร้อนกับอุณหภูมิหรือเวลา ได้จากการวัดความร้อนของการหลอมเหลว ทำให้ทราบวิภาคผลึก วิภาคของผลึกเหลว ปริมาณความเป็นผลึก เป็นต้น

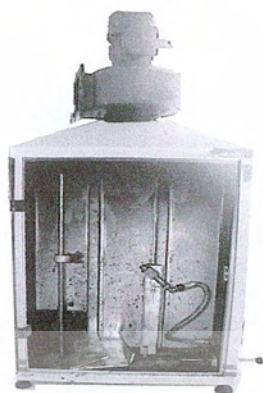
2. การวัดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) บ่งบอกลักษณะของสารช่วยผสมและอายุการใช้งาน (aging)
3. ความร้อนของปฏิกิริยา ใช้ศึกษาการเสื่อมคุณภาพ (Degradation)



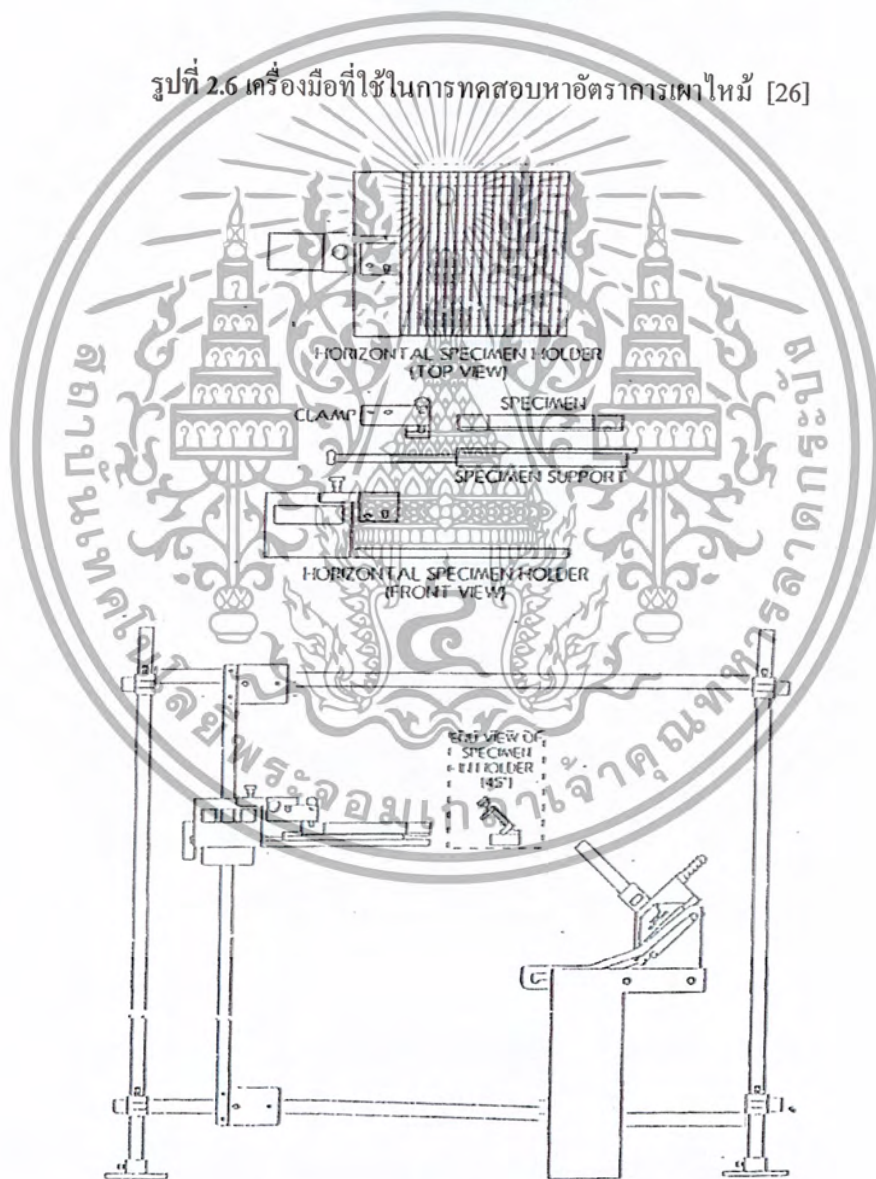
2.4.4 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้

วิธีการทดสอบทำ โดยให้ตัวจับ (clamp) จับแท่งพลาสติกในแนวราบโดยเอียงทำมุม 45° กับแนวราบ ถ้าพลาสติกเกิดการโค้งงอ อาจช่วยพยุงตัวชิ้นงานด้วยตะแกรง มีตะเกียงบนเซน อยู่บริเวณด้านล่างของแท่งพลาสติกอีกด้านหนึ่ง โดยให้ตะเกียงบนเซนเอียงทำมุม 45° กับแนวราบ ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟ เรียกว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning)” ถ้าพลาสติกติดไฟ ต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยเซนติเมตรต่อนาทีและรายงานผลเป็น “อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)” ถ้าติดไฟเพียงครั้งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น “สามารถดับได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing)” และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [20] เครื่องมือที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราคราพใหม่ [26]



รูปที่ 2.7 การทดสอบหาอัตราคราพใหม่ [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding) [21]

กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (extrusion blow molding process) เกิดจากกระบวนการ 2 ชนิดมารวมกันคือ การอัดรีด (Extrusion) และการเป่า (Blowing) ในขั้นตอนการอัดรีดจะต้องอาศัยการทำงานของตัวอัดรีด (Extruder) เป็นหลัก โดยเกลียวหนอน (Screw) ที่ใช้ใน Extruder เป็นแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw) ที่ให้การไหลอย่างต่อเนื่อง (Continuous Melt Flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [21] ซึ่งสกรูที่ใช้สามารถแบ่งส่วนการทำงานออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

(1) ส่วนป้อน (Feed Section)

เม็ดพอลิเมอร์ที่อยู่ใน Hopper ถูกส่งเข้าไปในสกรู ที่มีการหมุนไปข้างหน้า เพื่อส่งไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

(2) ส่วนอัด (Transition or Compression Section)

เม็ดพอลิเมอร์จะถูกอัดและหลอม และการหลอมจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ก่อนจะถูกส่งไปยังส่วนต่อไป

(3) ส่วนผสม (Metering Section)

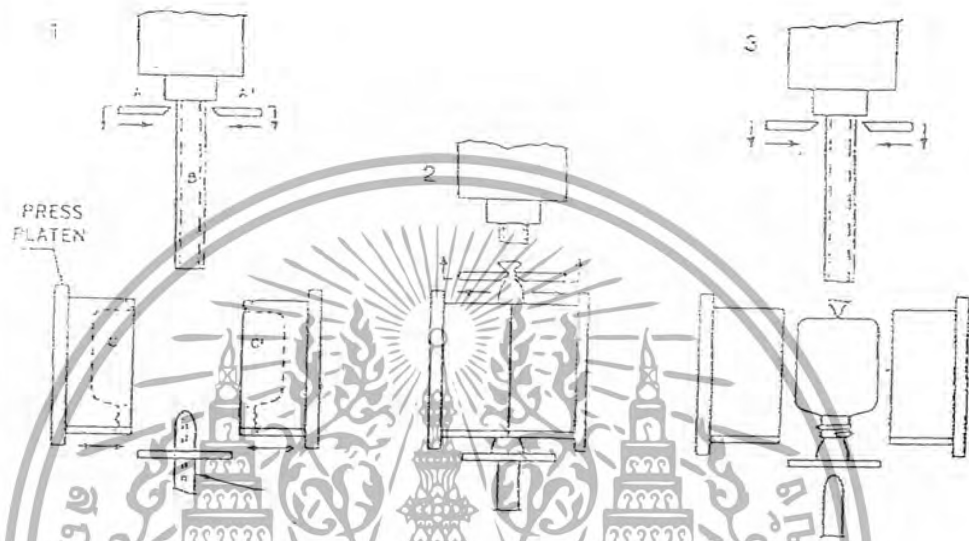
พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวมีการกระจายตัวในลักษณะที่เรียกว่า Homogeneous ก่อนถูกอัดออกไปสู่ส่วนที่เป็นหัวตาย

ขั้นตอนการทำงานพื้นฐานของกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. Melting resin : การหลอมพอลิเมอร์ โดยใช้ Extruder
2. Forming a parison : พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวตายออกมาอย่างต่อเนื่องในลักษณะ ที่เป็นท่อกลวง ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า parison
3. Closing the two-half mold and Inflating : เมื่อ parison ยาวกว่าแม่พิมพ์ที่ใช้ (The Two-Half Mold) แม่พิมพ์ทั้ง 2 ส่วนจะเคลื่อนที่ไปรับ parison พร้อมๆกับการประกบปิด จากนั้นหัวท่ออากาศ (Air Pin) (ซึ่งปกติจะอยู่ตรงตำแหน่งส่วนเบ็ดของผลิตภัณฑ์ เช่น ปากขวด) จะเคลื่อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์เพื่ออัดอากาศให้ parison ขยายตัวตามรูปแบบของแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Cooling and Ejection : ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง โดยให้แม่พิมพ์ปิดไว้เฉยๆ หรืออัดอากาศอย่างต่อเนื่องเพื่อให้แน่ใจว่า parison เปลี่ยนจากของไหลหนืดเป็นผลิตภัณฑ์แข็งแล้ว จากนั้นแม่พิมพ์จะเปิดเพื่อขับผลิตภัณฑ์ออก และเคลื่อนตัวไปรับ parison อันใหม่



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานพื้นฐานของกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด : 1) Parison ถูกอัดรีดจากหัวตาย 2) การเป่าอากาศเพื่อขยาย Parison 3) ภาชนะถูกขับออกจากแม่พิมพ์ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 Recycled high-density polyethylene bottles (R-HDPE) เกรดทางการค้าทั่วไป
- 3.1.2 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิด Phosphorus ของบริษัท Great Lake Chemical Cooperation ชื่อทางการค้า : REOFOS TPP Batch 723174 มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 3.1.3 สารช่วยหน่วงควันชนิด Zinc oxide เกรดวิเคราะห์ของบริษัท Baker Analyzed® Reagent

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารช่วยหน่วงการติดไฟฟอสฟอรัสไตรฟีนิลฟอสเฟต

สมบัติที่สำคัญ	ค่าที่ได้
ความเป็นกรด (H_3PO_4) (%w/w)	0.006
จุดที่เริ่มผลึก ($^{\circ}C$)	49.0
ปริมาณฟีนอลอิสระ (%w/w)	0.004
ลักษณะ	ของแข็งสีขาว
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	47-49
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	>250
อุณหภูมิการเสียดสภาพ ($^{\circ}C$)	>250
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	>220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอก (Twin-screw extruder) ของบริษัท
OHG DUISBURG
- 3.2.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pelletizer) ของบริษัท Bosco A6000
- 3.2.3 เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow moulding machine) ของ บริษัท
SMC Cooperation Limited รุ่น 2100
- 3.2.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) ของบริษัท LLOYD INSTRU-
MENTS รุ่น LR30K
- 3.2.5 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น
Pylyis Diamond DSC
- 3.2.6 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้ (Horizontal Flame Chamber)

3.3 วิธีการทดลอง

- 3.3.1 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
(R-HDPE)
- 3.3.1.1 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้
ใหม่ (R-HDPE)
- นำพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) มา
ทำการเป่าขึ้นรูปขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow
moulding)
 - หาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปขวดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.2
 - หาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปขวดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็ว
สกรู 15 20 30 และ 45 rpm ดังแสดงในตารางที่ 3.3
 - หาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปขวดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้
ในการอัดอากาศ (blowing time) 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที ดัง
แสดงในตารางที่ 3.4
 - หาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปขวดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้
ในการหล่อเย็น (cooling time) 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที ดัง
แสดงในตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคทั้ง 3 ส่วนสำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ครั้งที่	อุณหภูมิส่วนป้อน (Feed section) (°C)	อุณหภูมิส่วนอัด (Compression Section) (°C)	อุณหภูมิส่วนผสม (Metering Section) (°C)
1	160	170	180
2	170	180	190
3	180	190	200

ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู 15 20 30 และ 45 rpm ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคสำหรับขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ครั้งที่	อัตราเร็วสกรู (rpm)
1	15
2	20
3	30
4	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิด อัดรีดสำหรับขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ครั้งที่	เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) (วินาที)
1	2
2	3
3	5
4	7
5	10
6	15
7	20

ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิด อัดรีดสำหรับขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัด อากาศ 10 วินาที

ครั้งที่	เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) (วินาที)
1	2
2	3
3	5
4	7
5	10
6	15
7	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) เพื่อนำสภาวะที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ไปใช้ในขั้นตอนการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

3.3.1.3 นำมาศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC

3.3.2 ขั้นตอนการผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่(R-HDPE) กับสารช่วยหน่วงการติดไฟ (Flame retardant)

3.3.2.1 ขั้นตอนการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) กับ สารช่วยหน่วงการติดไฟ (Flame retardant) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

➤ หาปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.6

➤ อุณหภูมิ 4 ส่วน (feed section , compression section , metering section , die section) ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C ตามลำดับ

➤ อัตราเร็วสกรูของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เท่ากับ 10 rpm

ตารางที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส 0 2 4 6 8 และ 10 phr อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วนคือ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

ครั้งที่	ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส (phr)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมเม็ด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผสมกับสารช่วยหน่วงการติดไฟ ในปริมาณที่กำหนด จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มาตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.3.4 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

3.3.4.1 นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากข้อ 3.3.3 มาทำการเป่าขึ้นรูปขวด ตามสภาวะของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค ที่ได้จากข้อ 3.3.1

3.3.4.2 นำขวดที่ได้จากข้อ 3.3.4.1 ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.4.3 นำขวดที่ได้จากข้อ 3.3.4.1 ไปทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC

3.3.4.4 นำขวดที่ได้จากข้อ 3.3.4.1 ไปทดสอบสมบัติการเผาไหม้และ วัดปริมาณควันที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้

3.3.4.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควัน ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ เพื่อนำสภาวะที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควัน ที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในขั้นตอนการผสม สารช่วยหน่วงควัน

3.3.5 ขั้นตอนการผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และสารช่วยหน่วงควัน (Smoke retardant)

3.3.5.1 ขั้นตอนการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

(R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr กับ สารช่วยหน่วงควัน (Smoke retardant) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

➤ หาปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.7

➤ อุณหภูมิ 4 ส่วน (feed section , compression section , metering section , die section) ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เท่ากับ

170 180 190 และ 190 °C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราเร็วสกรูของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เท่ากับ 10 rpm

ตารางที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์ 1 2 3 และ 4 phr โดย ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน คือ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

ครั้งที่	ปริมาณของ สารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์ (phr)
1	1
2	2
3	3
4	4

3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมเม็ด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน ในปริมาณที่กำหนด จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มาตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.3.7 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

3.3.7.1 นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากข้อ 3.3.6 มาทำการเป่าขึ้นรูปขวด ตามสภาวะของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด ที่ได้จากข้อ 3.3.1

3.3.7.2 นำขวดที่ได้จากข้อ 3.3.7.1 ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.7.3 นำขวดที่ได้จากข้อ 3.3.7.1 ไปทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC

3.3.7.4 นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.3.7.1 ไปทดสอบสมบัติการเผาไหม้ และ วัดปริมาณควันที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และปริมาณควันที่เกิดขึ้น ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน เพื่อหาสถานะที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการเผาไหม้ และ ปริมาณควัน ที่เหมาะสมที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

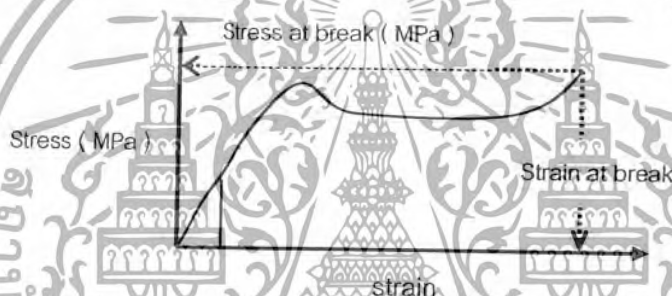
3.3.8 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.8.1 สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (MPa) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) และมอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (ASTM D3822-91) ทดสอบในสภาวะดังนี้

Load cell	30	kN
Test speed	100	mm/min
Gauge Length	25	mm

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.1 [22]



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [22]

3.3.8.1.1 ความแข็งแรงดึง

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึง

คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\sigma = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ σ = ความแข็งแรงดึง (MPa หรือ N/mm^2)

F = แรงดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงาน (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8.1.2 มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1%ความเครียด คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E = (\sigma/\varepsilon)/(1/100) \quad (3.2)$$

เมื่อ E = มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1%ความเครียด (Mpa หรือ N/mm^2)

σ = ความเค้นที่ 1%ความเครียด (Mpa หรือ N/mm^2)

ε = ความเครียดที่ 1%

3.3.8.1.3 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$EB = (L - L_0) / L_0 \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ EB = เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

L = ความยาวชิ้นงานหลังการดึงยืด ณ จุดขาด (mm)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) = 25 mm

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และค่าเฉลี่ย (\bar{X}) คำนวณได้จากสมการที่ 3.4 และ 3.5

$$\bar{X} = \sum X_i / n \quad (3.4)$$

และ

$$SD = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / n} \quad (3.5)$$

เมื่อ X_i = ค่าของชิ้นงานแต่ละตัวอย่าง

n = จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8.2 สมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

ศึกษาสมบัติการหลอมเหลวและการตกผลึกของ R-HDPE โดยใช้ตัวอย่างพอลิเมอร์ประมาณ 3-5 mg สแกนอุณหภูมิจาก 50 °C ถึง 180 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 °C / min โดยคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึก (%) ได้จากสมการที่ 3.6

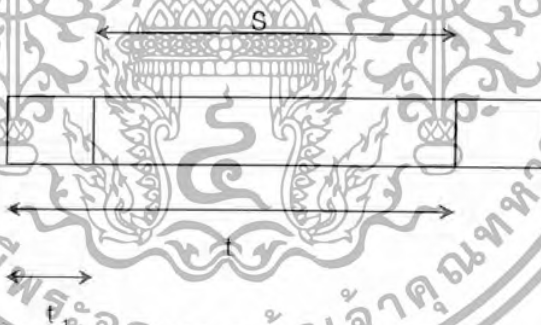
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%)} &= (\Delta H_{100\% \text{ polymer}} / \Delta H_{100\% \text{ crystal polymer}}) \times 100 \quad (3.6) \\ &= (\Delta H_f / \Delta H_f^\circ) \times 100 \end{aligned}$$

เมื่อ ΔH_f คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกที่มีอยู่ (enthalpy of fusion) (J/g)

$$\Delta H_f^\circ \text{ ของ PE} = 293 \text{ J/g [22]}$$

3.3.8.3 สมบัติการเผาไหม้ ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้ (ASTM-D635)

ทำการทดสอบหาอัตราการเผาไหม้ โดยใช้ตัวอย่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่น้ำหนักกลับมาใช้ใหม่ 5 ตัวอย่าง ถ้านามได้จากสมการที่ 3.7 [23]



$$\text{อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)} = S / (t - t_1) \quad (3.7)$$

เมื่อ S คือ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด = 7.5 cm

t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก (min)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดที่สอง (min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8.4 ปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้ (ASTM D 4100) [23]

ทดสอบโดย เผาชิ้นงานที่วางในแนวนอนด้วยเปลวไฟ โดยใช้ตัวกรอง (filter) กรองเพื่อดักจับอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ แล้วนำสิ่งที่กรองได้ไปชั่งน้ำหนัก ใช้เวลาในการเผาไหม้ 30 วินาที / ครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

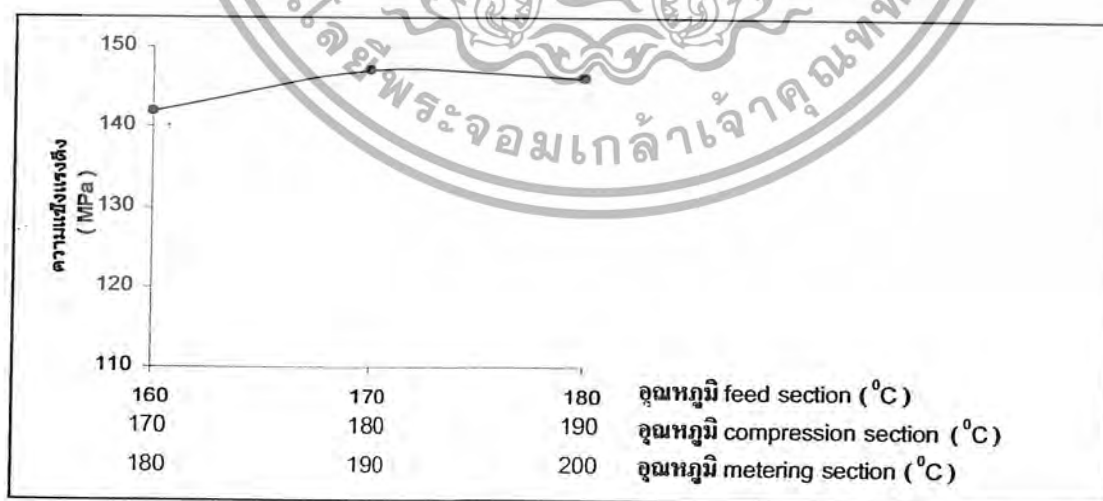
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

4.1.1 สมบัติเชิงกล

4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

กำหนดอัตราเร็วสกรูเท่ากับ 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศเท่ากับ 10 วินาที และเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นเท่ากับ 2 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน คือ feed section , compression section และ metering section เป็น 160 170 180 °C 170 180 190 °C และ 180 190 200 °C ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิ 3 ส่วนเป็น 170 180 190 °C ขวดมีค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.1) และ ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (รูปที่ 4.2) สูงที่สุด และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิมากขึ้น จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้โมเลกุล เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้ ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด มากขึ้น และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ต่ำลง เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 3 ส่วนเป็น 180 190 200 °C พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 3 ส่วนเป็น 170 180 190 °C

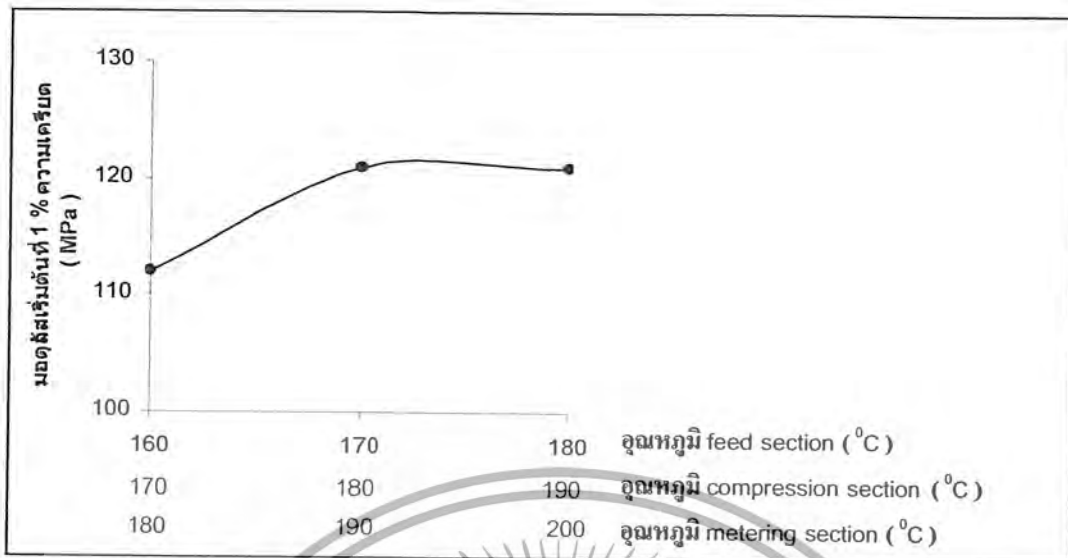


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

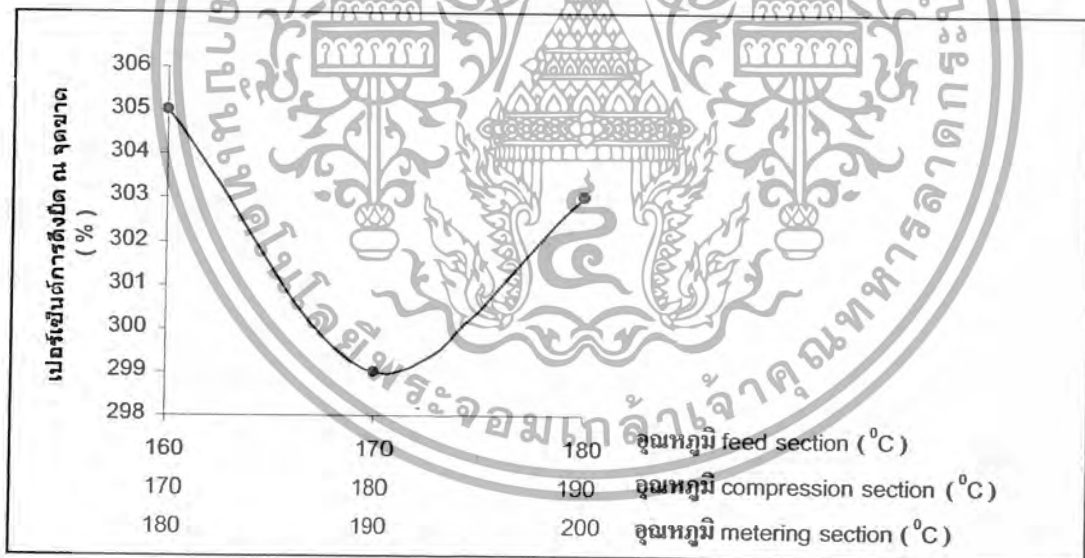
(R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10

วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

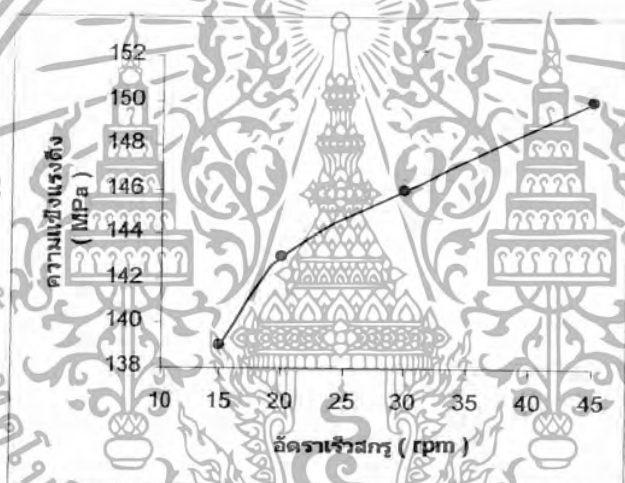


รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิ 3 ส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

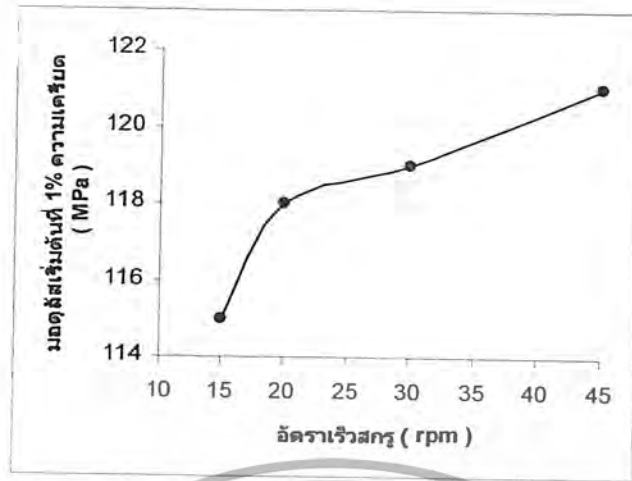
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ผลของอัตราเร็วสกรูของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

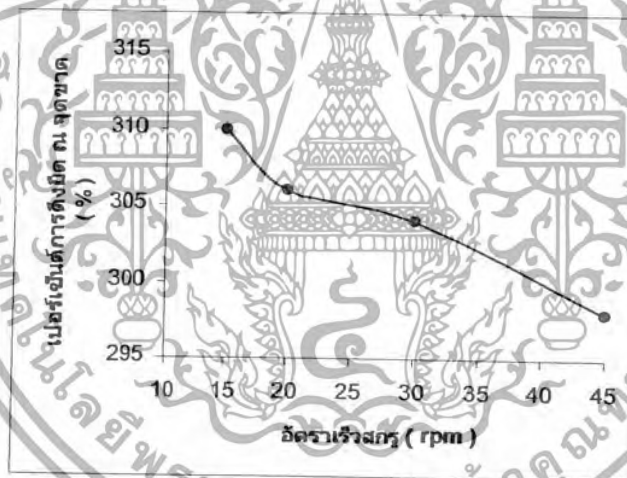
กำหนดอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน คือ feed section , compression section และ metering section เป็น 170 180 190 °C ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศเท่ากับ 10 วินาที และเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นเท่ากับ 2 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู เป็น 15 20 30 และ 45 rpm ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 จากกราฟพบว่า อัตราเร็วสกรูสูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.4) และ ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (รูปที่ 4.5) เพิ่มขึ้น และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราเร็วสกรูสูงขึ้นทำให้ อัตราการเฉือน (shear rate) มากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์น้อยลง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และเกิดการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น [24] แต่ถ้าอัตราเร็วสกรูสูงเกินไป (30 และ 45 rpm) ทำให้พาริสัน (parison) ออกมาจากหัวคายเร็วขึ้น ส่งผลให้ ขวดที่เป่าได้ มีเศษ (scrap) เหลือมากเกินไป



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที



รูปที่ 4.5 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

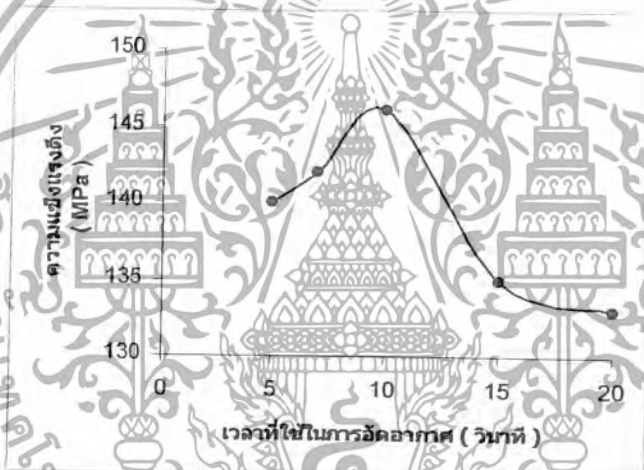


รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึก ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

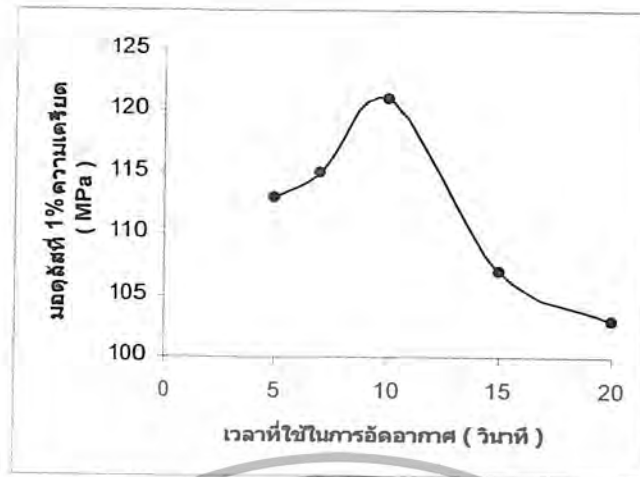
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีต

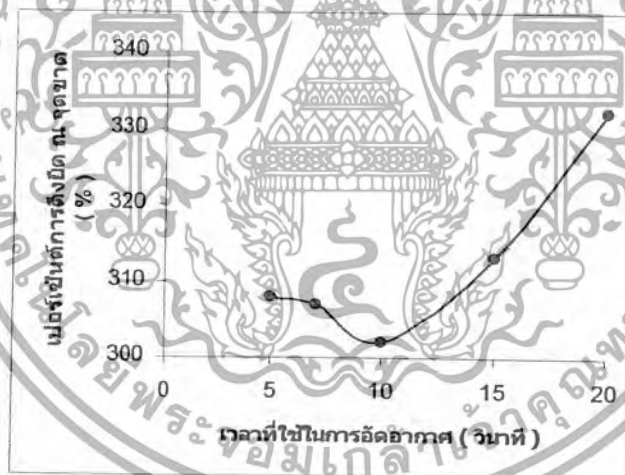
กำหนดอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน คือ feed section , compression section และ metering section เป็น 170 180 190 °C ตามลำดับ อัตราเร็วสกรู เท่ากับ 20 rpm และ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น เท่ากับ 2 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ เป็น 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที ผลแสดงดังรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 จากกราฟพบว่า เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เพราะสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น และ เกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอในทุกๆ บริเวณของขวด แต่ ถ้าเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศมากเกินไป (15 และ 20 วินาที) ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เพราะ พอลิเมอร์เกิดการคายความร้อนได้เร็วขึ้น ทำให้ ความเป็นผลึกน้อยลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และถ้าเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ น้อยเกินไป (2 และ 3 วินาที) จะทำให้ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นขวดที่สมบูรณ์ได้



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศต่างกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที



รูปที่ 4.8 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

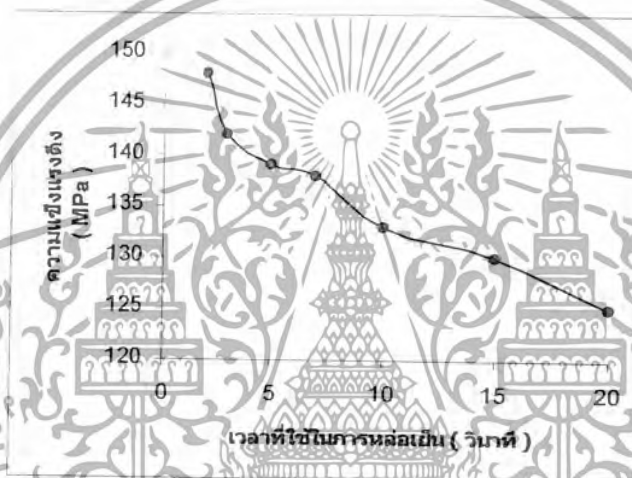


รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การตั้งผลึก ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

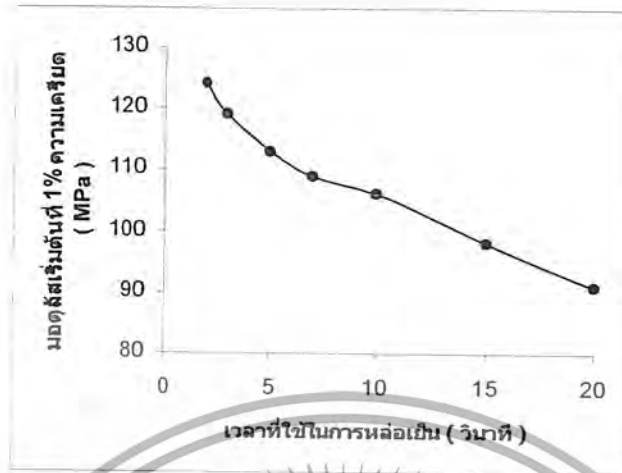
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

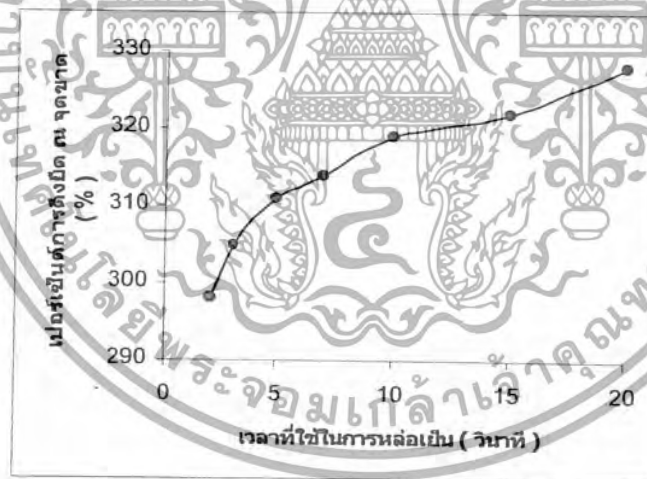
กำหนดอุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน คือ feed section , compression section และ metering section เป็น 170 180 190 °C ตามลำดับ อัตราเร็วสกรู เท่ากับ 20 rpm และ เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ เท่ากับ 10 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น เป็น 2 3 5 7 10 15 และ 20 วินาที ผลแสดงดังรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 จากกราฟพบว่า เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นลดลง ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เพราะพอลิเมอร์มีเวลาในการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในบรรยากาศปกติมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกมากขึ้น แต่ ถ้าเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นมากเกินไป ทำให้การเกิดผลึก มีเฉพาะในแม่แบบเท่านั้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกต่ำ และสมบัติเชิงกลลดลง [25]



รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที



รูปที่ 4.11 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที



รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงถึงขีด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นต่างๆกัน โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีตทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สมบัติทางความร้อน

4.1.2.1 ผลของอุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.1 ก.2 และ ก.3 ในภาคผนวก ก

อุณหภูมิส่วนป้อน (Feed Section) ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิส่วนอัด (Compression Section) ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิส่วนผสม (Metering Section) ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	ปริมาณความ เป็นผลึก (%)
160	170	180	122	151	51
170	180	190	122	152	52
180	190	200	123	141	48

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) จะอยู่ในช่วง 122-123 $^{\circ}\text{C}$ แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่า ที่อุณหภูมิ 3 ส่วน ต่างๆกัน ไม่ส่งผลต่อปริมาณความเป็นผลึก

4.1.2.2 ผลของอัตราเร็วสกรูของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค โดยใช้อุณหภูมิ 3 ส่วน เป็น 170 180 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.4 ค.5 ค.6 และ ค.7 ในภาคผนวก ค

อัตราเร็วสกรู (rpm)	T_m (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
15	122	146	50
20	122	152	52
30	122	157	53
45	123	151	51

จากตารางที่ 4.2 พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) จะอยู่ในช่วง 122 - 123 °C แสดงว่าอัตราเร็วสกรู ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาปริมาณความเป็นผลึกพบว่า ที่อัตราเร็วสกรูต่างกัน ไม่ส่งผลต่อปริมาณความเป็นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดออตริค โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วน เป็น 170 180 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.8 ค.9 ค.10 ค.11 และ ค.12 ในภาคผนวก ค

เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (วินาที)	T_m (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
2	-	-	-
3	-	-	-
5	122	104	36
7	123	133	45
10	122	152	52
15	122	132	45
20	121	128	44

- คือ ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นขวดที่สมบูรณ์ได้

จากตารางที่ 4.3 พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) จะอยู่ในช่วง 121 - 123 °C แสดงว่า เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่า เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศมากขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกมากขึ้น เพราะสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้น และ จะเกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอในทุกๆ บริเวณของขวด แต่ ถิ่นเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศมากขึ้นไป (15 และ 20 วินาที) ทำให้ความเป็นผลึกลดลง เพราะ พอลิเมอร์เกิดการคายความร้อนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วน เป็น 170 180 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.13 ก.14 ก.15 ก.16 ก.17 ก.18 และ ก.19 ใน ภาคผนวก ก

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (วินาที)	T_m (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
2	122	152	52
3	122	151	51
5	122	141	48
7	122	134	46
10	124	123	42
15	122	119	41
20	121	112	38

จากตารางที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) จะอยู่ในช่วง 121 - 122 °C แสดงว่า เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่า เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นลดลง จะทำให้ความเป็นผลึกมากขึ้น เพราะพอลิเมอร์มีเวลาในการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในบรรยากาศปกติมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกมากขึ้น แต่ ถ้าวเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นมากเกินไป ทำให้การเกิดผลึก มีเฉพาะในแม่แบบเท่านั้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกต่ำ [25]

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค คือ อุณหภูมิของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคทั้ง 3 ส่วน เป็น 170 180 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที และ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

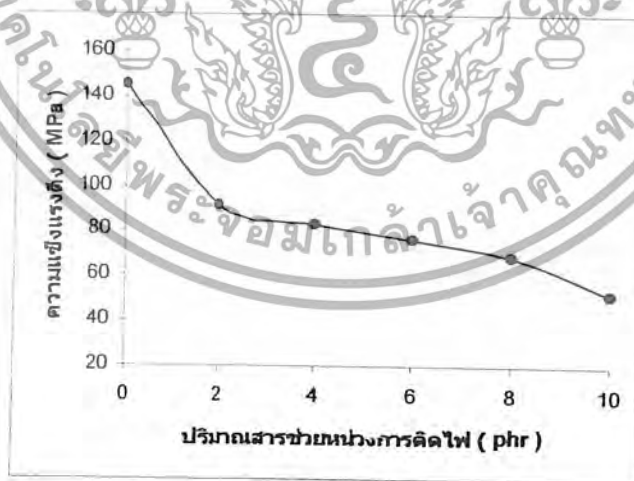
4.2 ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสม

ผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟชนิด ฟอสฟอรัส ในปริมาณต่างๆกัน คือ 2 4 6 8 และ 10 phr ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนอนคู่ (Twin-Screw Extruder) โดยสภาวะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ คือ อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน คือ feed section , compression section , metering section และ die section เป็น 170 180 190 และ 190 °C ตามลำดับ อัตราเร็วสกรู 10 rpm แล้วนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

4.2.1 สมบัติเชิงกล

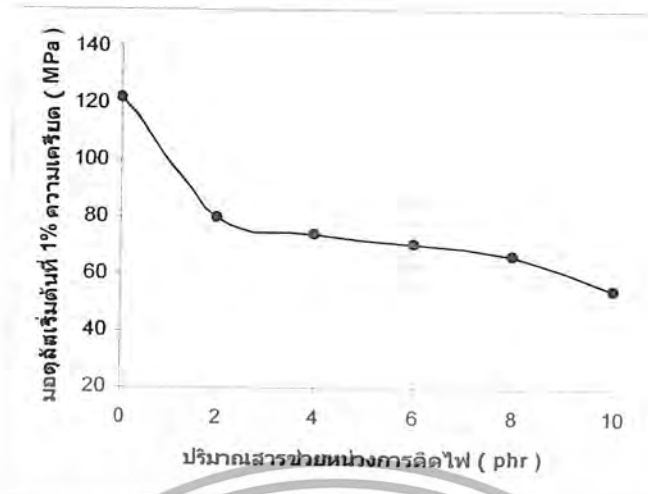
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าเมื่อใส่สารช่วยหน่วงการตีไฟมากขึ้น จะมีผลทำให้ความแข็งแรงดึง และ โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด มีค่าต่ำลง เนื่องจากสารช่วยหน่วงการตีไฟจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลอัดตัว (pack) กันไม่ดี ส่งผลให้ ความแข็งแรงดึง และ โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด มีค่าต่ำลง

จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อใส่สารช่วยหน่วงการตีไฟมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารช่วยหน่วงการตีไฟจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ สายโซ่พอลิเมอร์ ยังเกิดการเกี่ยวพันกันอยู่ ดังนั้น เมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงดึง สายโซ่พอลิเมอร์จะค่อยๆเกิดการคลายตัวออกจากกัน ชิ้นงานทดสอบจึงสามารถถูกดึงยืดได้มาก ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด จึงเพิ่มขึ้น

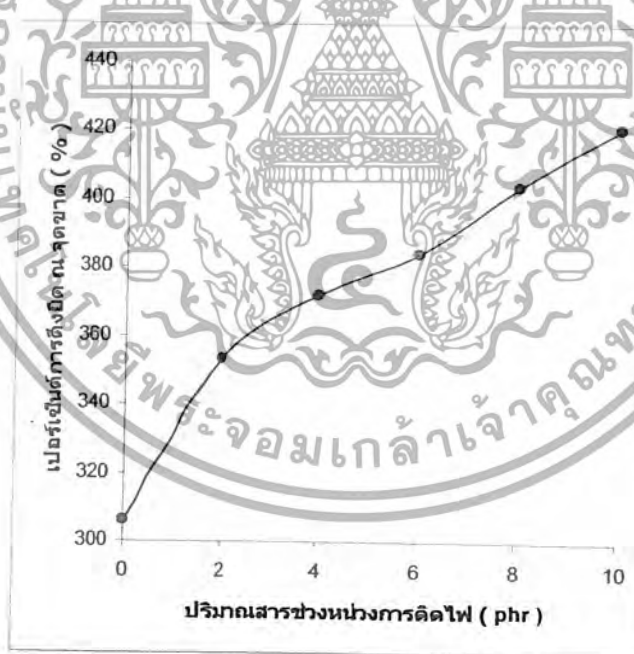


รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการตีไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอุณหภูมิ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการคิดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอุณหภูมิ 4 ส่วน เท่ากับ 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สมบัติทางความร้อน

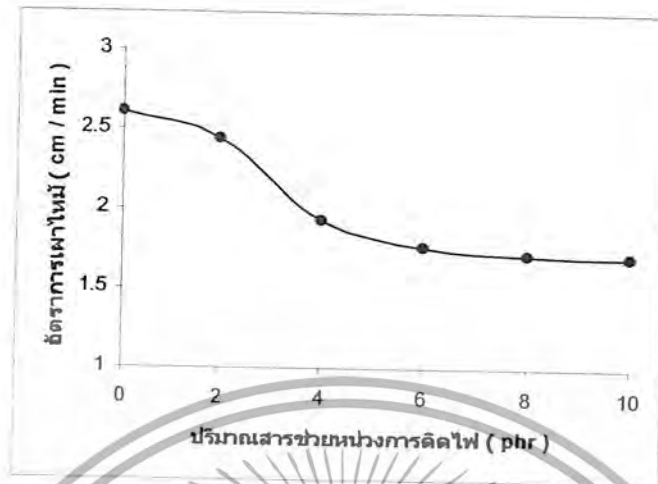
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.20 ค.21 ค.22 ค.23 ค.24 และ ค.25 ในภาคผนวก ก

ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ (phr)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
0	122	152	52
2	122	146	50
4	122	136	46
6	123	128	44
8	122	119	41
10	122	113	39

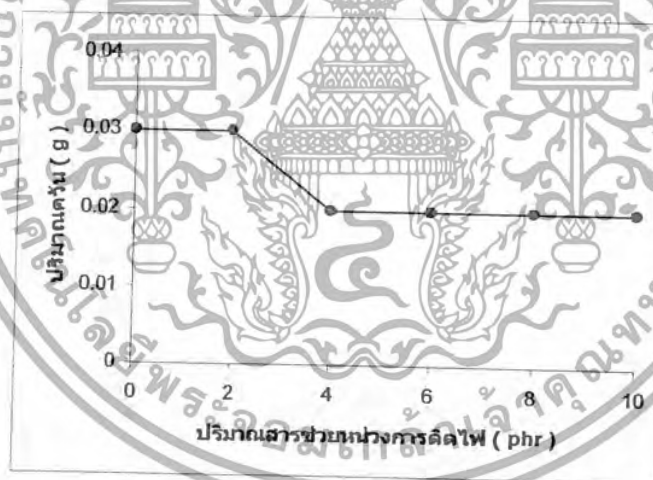
จากตารางที่ 4.5 พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ จะอยู่ในช่วง $122 - 123^{\circ}\text{C}$ แสดงว่า สารช่วยหน่วงการติดไฟ ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่า ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ มากขึ้น ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง เพราะ สารช่วยหน่วงการติดไฟ ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อัตราการเผาไหม้และปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้



รูปที่ 4.16 ค่าอัตราการเผาไหม้ (cm / min) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการติดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วนเป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm



รูปที่ 4.17 ค่าปริมาณควัน (g) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงการติดไฟ 0 2 4 6 8 และ 10 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ จะทำให้อัตราการเผาไหม้ และปริมาณควันลดลง เนื่องจาก สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส เมื่อเกิดการเผาไหม้ จะกลายเป็นฟอสฟอรัสออกไซด์ เคลือบที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ จึงเป็นการแยก ไม่ให้พอลิเมอร์ เกิดปฏิกิริยาการสันดาป กับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศ นอกจากนั้น ฟอสฟอรัสออกไซด์ ยังสามารถ คั่งน้ำออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เหลือเพียงถ่านคาร์บอนเท่านั้น โดยถ่านคาร์บอนนี้ ทำหน้าที่ แยกออกซิเจนในบรรยากาศ และทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวไฟไม่ให้ออกไปทำ ปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ จึงเป็นการช่วยลดอัตราการเผาไหม้ และลดปริมาณควันที่เกิดจาก การเผาไหม้ [16] แต่จากรูปที่ 4.17 พบว่า ปริมาณควันลดลงในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องเติมสาร ช่วยหน่วงควันเพื่อลดปริมาณควันที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่า ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสม คือ 8 phr



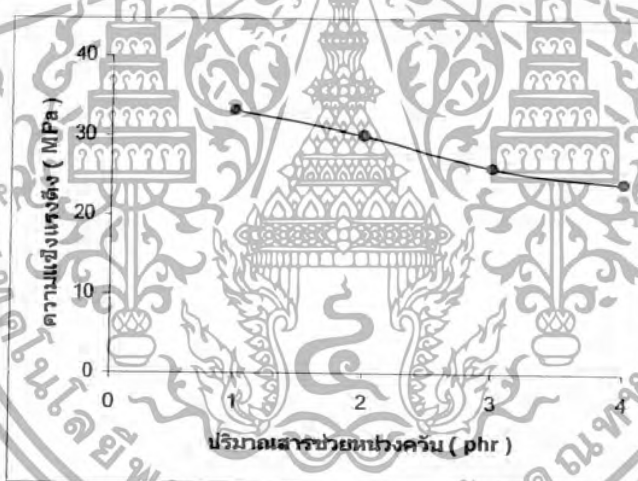
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสม

ผสมสารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์ ในปริมาณต่างๆกัน คือ 1 2 3 และ 4 phr ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ ปริมาณ 8 phr ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-Screw Extruder) โดยสภาวะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ คือ อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน คือ feed section , compression section , metering section และ die section เป็น 170 180 190 และ 190 °C ตามลำดับ อัตราเร็วสกรู 10 rpm แล้วนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

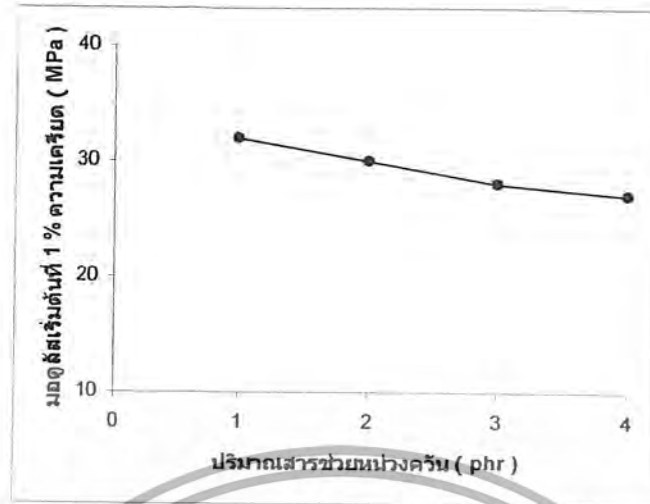
4.3.1 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 พบว่า เมื่อใส่สารช่วยหน่วงควันมากขึ้น มีผลทำให้ความแข็งแรงดึง และ โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด มีค่าต่ำลง แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ดังเหตุผลเดียวกับขั้นตอนการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

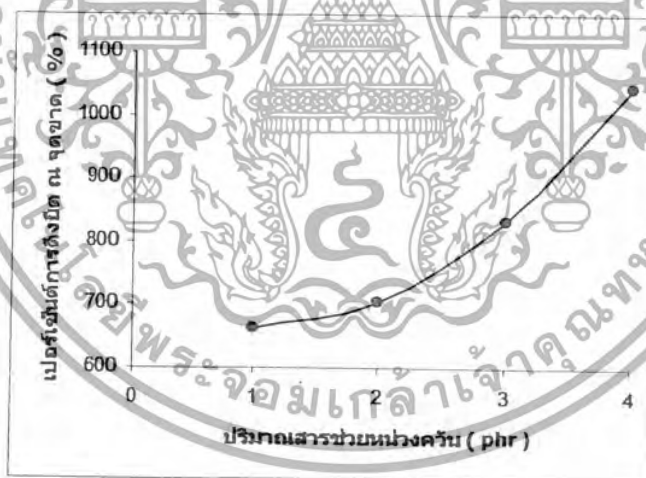


รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงคาร์บอน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm



รูปที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ คาร์บอน (%) ของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงคาร์บอน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สมบัติทางความร้อน

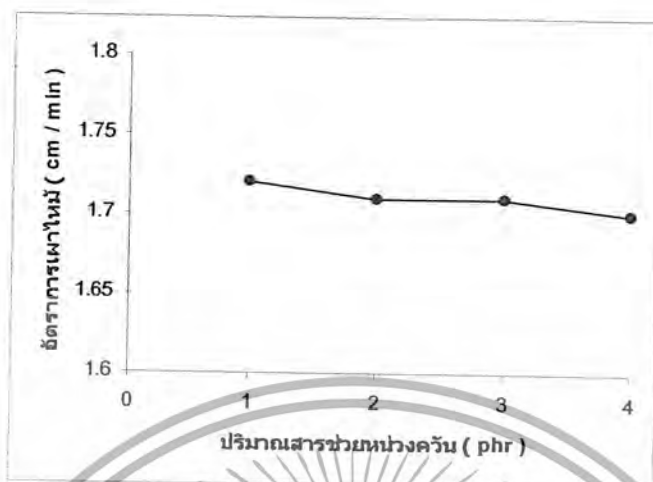
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน จากเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.26 ก.27 ก.28 ก.29 และ ก.30 ในภาคผนวก ก

ปริมาณสารช่วยหน่วงควัน (phr)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
1	121	115	39
2	121	103	35
3	121	91	31
4	122	88	30

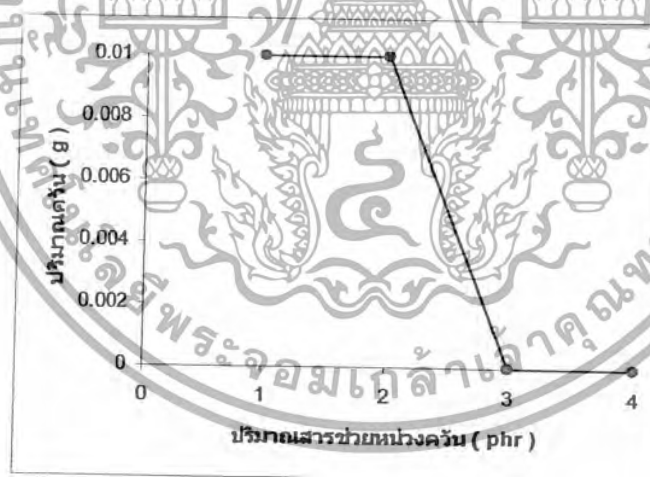
จากตารางที่ 4.6 พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน ยังคงอยู่ในช่วง $121 - 122^{\circ}\text{C}$ แสดงว่า สารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่า เมื่อปริมาณสารช่วยหน่วงควัน มากขึ้น ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง เพราะ สารช่วยหน่วงควัน ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง โดยปริมาณความเป็นผลึกของขดที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟและสารช่วยหน่วงควัน ต่ำกว่าปริมาณความเป็นผลึกของขดที่เติมสารช่วยหน่วงการติดไฟเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อัตราการเผาไหม้และปริมาณควันที่เกิดจากการเผาไหม้



รูปที่ 4.21 ค่าอัตราการเผาไหม้ (cm / min) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm



รูปที่ 4.22 ค่าปริมาณควัน (g) ของขดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟปริมาณ 8 phr โดยใช้ปริมาณ สารช่วยหน่วงควัน 1 2 3 และ 4 phr ที่สภาวะการผสม อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 4 ส่วน เป็น 170 180 190 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 10 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยหน่วงควัน ทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย และปริมาณควันลดลง เนื่องจากสารช่วยหน่วงควัน ทำหน้าที่ส่งเสริมการเกิดถ่านคาร์บอน (char - formation) โดยถ่านคาร์บอนนี้ จะยับยั้งออกซิเจนในบรรยากาศไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยาการสันดาปกับพลาสติก [11] และป้องกันการสลายตัวของพลาสติกไปเป็นไอของสารอินทรีย์ [16] ทำให้อัตราการเผาไหม้ และปริมาณควันลดลง

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่าปริมาณสารช่วยหน่วงควัน ที่เหมาะสม คือ 3 phr



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค จากนั้นทำการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟและสารช่วยหน่วงควันในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ขวดพลาสติกชนิดหน่วงต่อการติดไฟและไร้ควัน

5.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดโดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค

จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวด คือ อุณหภูมิ 3 ส่วน เท่ากับ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรูเท่ากับ 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ เท่ากับ 10 วินาที และ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นเท่ากับ 2 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมเนื่องจาก

- ค่าอุณหภูมิ 3 ส่วนนี้ เป็นค่าอุณหภูมิ ที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เพราะสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น
- ค่าอัตราเร็วสกรูนี้ เป็นค่าที่เหมาะสมเพราะทำให้พาริสัน (parison) มีความยาวที่เหมาะสมในการผลิตขวด ทำให้มีเศษ (scrap) เหลือไม่มาก และขวดมีสมบัติเชิงกลที่ดี
- ค่าเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศนี้ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เพราะสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวที่ดี แต่ถ้าใช้เวลาในการอัดอากาศมากกว่านี้ เป็นการช่วยระบายความร้อนให้ออกจากชิ้นงานได้เร็วขึ้น จึงส่งผลให้ความเป็นผลึกต่ำ ทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดี
- ค่าเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นนี้ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เพราะขวดมีเวลาเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ในบรรยากาศปกติมากขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกมีค่ามาก แต่ถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นมากกว่านี้ ทำให้ขวดเย็นตัวเร็วขึ้น ส่งผลให้การเกิดผลึก มีเฉพาะในแม่แบบเท่านั้น จึงทำให้ความเป็นผลึกต่ำ และสมบัติเชิงกลไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟและสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสมคือ 8 phr เนื่องจาก

- อัตราการเผาไหม้ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ ปริมาณ 8 phr มีค่าน้อยกว่า 10 phr ไม่มากนัก แต่สมบัติเชิงกลของ 8 phr มีค่ามากกว่า 10 phr มาก เพราะสารช่วยหน่วงการติดไฟไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ความเป็นผลึกลดลง ดังนั้น จึงเลือกปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ เท่ากับ 8 phr

จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารช่วยหน่วงควันที่เหมาะสมคือ 3 phr เนื่องจาก

- ปริมาณควัน ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ผสมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ สารช่วยหน่วงควัน 3 phr มีค่าเท่ากับปริมาณควัน จากสารช่วยหน่วงควัน 4 phr โดยที่ อัตราการเผาไหม้ และ สมบัติทางความร้อน ของสารช่วยหน่วงควัน 3 phr มีค่าไม่แตกต่าง จากสารช่วยหน่วงควัน 4 phr มากนัก แต่สมบัติเชิงกล ของสารช่วยหน่วงควัน 3 phr ดีกว่าสารช่วยหน่วงควัน 4 phr เพราะสารช่วยหน่วงควันจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้ความเป็นผลึกลดลง ดังนั้น จึงเลือกใช้สารช่วยหน่วงควัน ปริมาณ 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษากระบวนการผลิตขวดโดยใช้พอลิเมอร์ที่ใช้แล้วชนิดอื่น เช่น PS และ PVC เป็นต้น
- ศึกษาชนิดของสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน ชนิดอื่น เพื่อให้เหมาะสมกับขวดจากพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ศึกษาสมบัติการกระแทก ของขวดพลาสติก เพื่อให้ได้ข้อมูลทางสมบัติเชิงกลที่สมบูรณ์มากขึ้น
- ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] [Online] Available : <http://www.navbharat.co.in / application>
- [2] Gy.Bertalan , Gy. Marosi , P. Anna , I. Ravadits , I. Csontos and A. Toth , Role of Interface Modification in Filled and Flame-Retardant Polymer Systems,*Solid State Ionics* , 141-142 , 2001 ,211-215
- [3] A R Horrocks and D Price , Fire Retardant Materials , Woodhead Publishing Limited , Cambridge , England ,2000 , 25-27
- [4] Akzo Nobel Phosphorus Chemicals , Flame Retardant Additives ,*Plastics Additives & Compounding*,May 2000 , 20-23
- [5] P.A.Ubirajara , L.L.Y.Visconte , J. Gallo and R.C.R. Nunes , Flame Retardancy in Thermoplastic Polyurethane Elastomers (TPU) with Mica and Aluminium trihydrate (ATH),*Polymer Degradation and Stability* , 2000 , Volume 69 , Issue 3 , 257-260
- [6] Alcan Chemicals , Flame retardant : Some New Development , *Plastics Additives & compounding*.,May 2000 , 24-27
- [7] N. Shigeiko , M. Fumi and H. Toshimasa , Durable Flame-Retardant Finished Cotton Fabrics Characterized by Thermal Degradation Behaviors , *J.Appl Polym Sci* , 1998, Vol. 71 , 975-987
- [8] A. Torikai , T. Kobatake and F. okisaki ,Photodegradation of Polystyrene Containing Flame Retardants:Effect of Chemical Structure of the Additives on the Efficiency of Degradation , *J.Appl Polym Sci* , 1998 ,Vol. 67 , 1293-1300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Y. W. Chen-Yang , J.R. Chuang , Y.C. Yang , C.Y.Li and Y.S. Chiu , New UV-Curable Cyclotriphosphazenes as Fire-Retardant Coating Materials for Wood, *J.Appl Polym Sci* , 1998, Vol. 69 , 115-122
- [10] C. Shin-Hsuan and W. Wu-Kou , The Dynamic Flammability and Toxicity of Magnesium Hydroxide Filled Intumescent Fire Retardant Polypropylene , *J.Appl Polym Sci* , 1998 ,Vol. 67 , 989-995
- [11] J.T.Yeh , S.H.Hsieh , Y.C.Cheng , M.J.Yang and K.N.Chen , Combustion and Smoke Emission Properties Poly (ethylene terephthalate) Filled with Phosphorous and Metallic Oxides , *Polymer Degradation and Stability*, 1998 , Volume 61 , 399-407
- [12] P.P. Lizymol and T. Sabu , Flame Retardant Properties of Binary Blends:A Comparison of Miscible and Immiscible Blends. *Polymer Degradation and Stability*, 1996 , Volume 57 , 187-189
- [13] M.M.Hirschler , Reduction of Smoke Formation and Flammability of Thermoplastics Polymers by Metal Oxide , *Polymer* , March 1984 , Volume 25 , Issue 3 , 405-411
- [14] รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย, เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542
- [15] A.F: Grand and C.A. Wilkie, Fire Retardancy of Polymeric Materials, Marcel, New York, 2000
- [16] รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย, เอกสารคำสอน วิชา สารปรับแต่งพอลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542
- [17] รศ.บรรเลง สรนิต , เทคโนโลยีพลาสติก, พิมพ์ครั้งที่ 1 , ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์กรุงเทพฯ, 2525 , 13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] L.S.Gerald . Exploring the World of the Plastics,5thEd,Bloomington,IL:McKnight, 1997
- [19] M.J Flokes and P.S Hope , Polymer Blend and Alloys, 1stEd, United States :
Chapman&Hall,1993
- [20] Data sheet of Advanced HVUL Meets Draft Free , Free , Large Volume Requirements of UL
94 with Unmatched Accuracy , Repeatability and Safety from Atlas Electric Devices
company.
- [21] ดร.สุภรัตน์ รักษลธิ , เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1, ภาควิชา เคมี
คณะวิทยาศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ
- [22] Data sheet of EL-LENE High-Density Polyethylene from Siam Chemical Trade,2001
- [23] Annual Book of ASTM standards
- [24] ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด , เอกสารประกอบการเรียนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ , ภาควิชา เคมี คณะ
วิทยาศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ
- [25] ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ, เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1, ภาควิชา เคมี
คณะวิทยาศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ
- [26] เครื่องทดสอบการเผาไหม้, อาคารฝึกงานวิศวกรรมพลาสติก, ภาควิชาวัสดุและโลหะการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล , ปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE)

ตาราง ก.1 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้ อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

อุณหภูมิส่วนป้อน (Feed section) (°C)	อุณหภูมิส่วนอัด (Compression Section) (°C)	อุณหภูมิส่วนผสม (Metering Section) (°C)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1%ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	
			Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
160	170	180	142	12.58	112	10.52	305	60.27
170	180	190	147	15.61	121	14.94	299	55.83
180	190	200	146	18.89	121	8.75	303	30.24

ตาราง ก.2 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูต่างๆ ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

อัตราเร็วสกรู (rpm)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ. จุดขาด (%)	
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
15	139	14.42	115	11.78	310	30.52
20	143	16.33	118	5.49	306	15.36
30	146	13.46	119	12.73	304	40.11
45	150	13.67	121	10.93	298	37.15

ตาราง ก.3 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ และสารช่วยหน่วงกลิ่น

เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ (blowing time) (วินาที)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ. จุดขาด (%)	
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
5	140	20.13	113	6.57	308	65.43
7	142	17.48	115	13.34	307	25.41
10	146	17.61	121	15.76	302	30.23
15	135	18.74	107	9.91	313	44.27
20	133	13.11	103	13.64	332	16.68

- คือ ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นขวดที่สมบูรณ์ได้

ตาราง ก.4 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น (cooling time) (วินาที)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ. จุดขาด (%)	
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
2	148	18.25	124	11.62	298	28.22
3	142	16.66	119	11.10	305	16.46
5	139	12.29	113	13.34	311	24.14
7	138	17.24	109	5.95	314	40.29
10	133	18.83	106	14.46	319	38.77
15	130	18.21	98	8.68	322	19.89
20	125	23.17	91	3.30	328	15.54

ตาราง ก.5 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส โดยใช้ อุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส (phr)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ. จุดขาด (%)	
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
0	145	17.41	122	20.24	306	14.74
2	91	9.22	80	10.43	353	20.61
4	83	15.54	74	8.80	372	18.81
6	76	9.59	71	11.63	384	29.69
8	69	10.04	67	9.98	404	13.34
10	52	4.20	55	7.45	421	20.66

ตาราง ก.6 สมบัติเชิงกลของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) โดยการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของสารช่วยหน่วงควันชนิดซิงค์ ออกไซด์ โดยใช้ ปริมาณสารช่วยหน่วงการคิดไฟชนิดฟอสฟอรัส 8 phr อุณหภูมิ 3 ส่วนของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดคือ 170 180 และ 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที

ปริมาณของสารช่วยหน่วงควันชนิดซิงค์ ออกไซด์ (phr)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
1	33	6.54	32	4.41	633	70.72
2	30	11.39	30	4.69	704	61.31
3	26	5.49	28	6.67	832	65.55
4	24	5.11	27	3.15	1043	75.47

ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัสในปริมาณต่างๆ และไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

ปริมาณของสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส (phr)	อัตราการเผาไหม้ (cm/min)		เปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ที่ลดลง (%)	ปริมาณควัน (g)		เปอร์เซ็นต์ปริมาณควันที่ลดลง (%)
	Mean	SD.		Mean	Mean	
0	2.61	0.13	0	0.03	0.010	0
2	2.44	0.26	6.51	0.03	0.012	0
4	1.93	0.14	26.05	0.02	0.011	33.33
6	1.76	0.21	32.56	0.02	0.008	33.33
8	1.71	0.17	34.48	0.02	0.011	33.33
10	1.70	0.12	34.48	0.02	0.009	33.33

ตาราง ข.2 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงควันชนิด ซิงค์ ออกไซด์ ในปริมาณต่างๆ และสารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดฟอสฟอรัส 8 phr

ปริมาณของสารช่วยหน่วงควัน ชนิด ซิงค์ ออกไซด์ (phr)	อัตราการเผาไหม้ (cm/min)		เปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ที่ ลดลง (%)	ปริมาณควัน (g)		เปอร์เซ็นต์ปริมาณควัน ที่ลดลง (%)
	Mean	SD.	Mean	Mean	SD.	Mean
1	1.72	0.32	34.09	0.01	0.005	66.67
2	1.71	0.24	34.48	0.01	0.007	66.67
3	1.71	0.17	34.48	< 0.01	0.002	< 66.67
4	1.70	0.19	34.86	< 0.01	0.001	< 66.67

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณความเป็นผลึก (%) จาก DSC thermogram

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%)} &= (\Delta H_{100\% \text{ polymer}} / \Delta H_{100\% \text{ crystal polymer}}) \times 100 \quad (3.6) \\ &= (\Delta H_f / \Delta H_f^0) \times 100 \end{aligned}$$

เมื่อ ΔH_f^0 ของ PE = 293 J/g [22]

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลจากรูปที่ ค.1 R-HDPE มี $\Delta H_f = 150.760 \text{ J/g}$

แทนค่าลงในสมการ 3.6

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%)} &= (\Delta H_{100\% \text{ polymer}} / \Delta H_{100\% \text{ crystal polymer}}) \times 100 \\ &= (150.760 / 293) \times 100 \\ &= 51.453\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณอัตราการเผาไหม้ (cm/min)

$$\text{อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)} = \frac{S}{t - t_1} \quad (\text{cm/min}) \quad (3.7)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

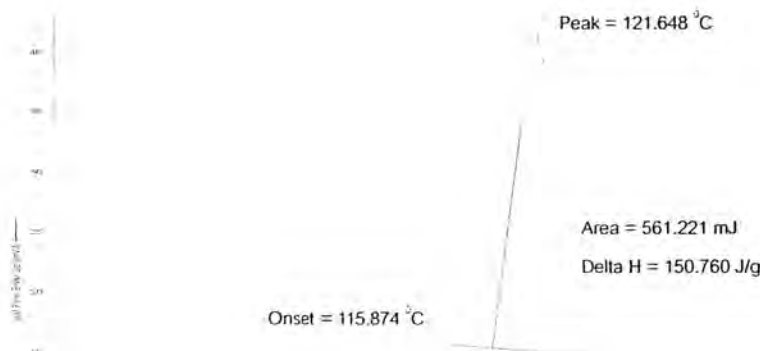
ข้อมูลจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ไม่มีการเติมสารช่วย
หน่วงการติดไฟ และไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

แทนค่าลงในสมการ 3.7

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)} &= \frac{7.5}{3.372 - 0.5} \quad (\text{cm/min}) \\ &= 2.611 \quad (\text{cm/min}) \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

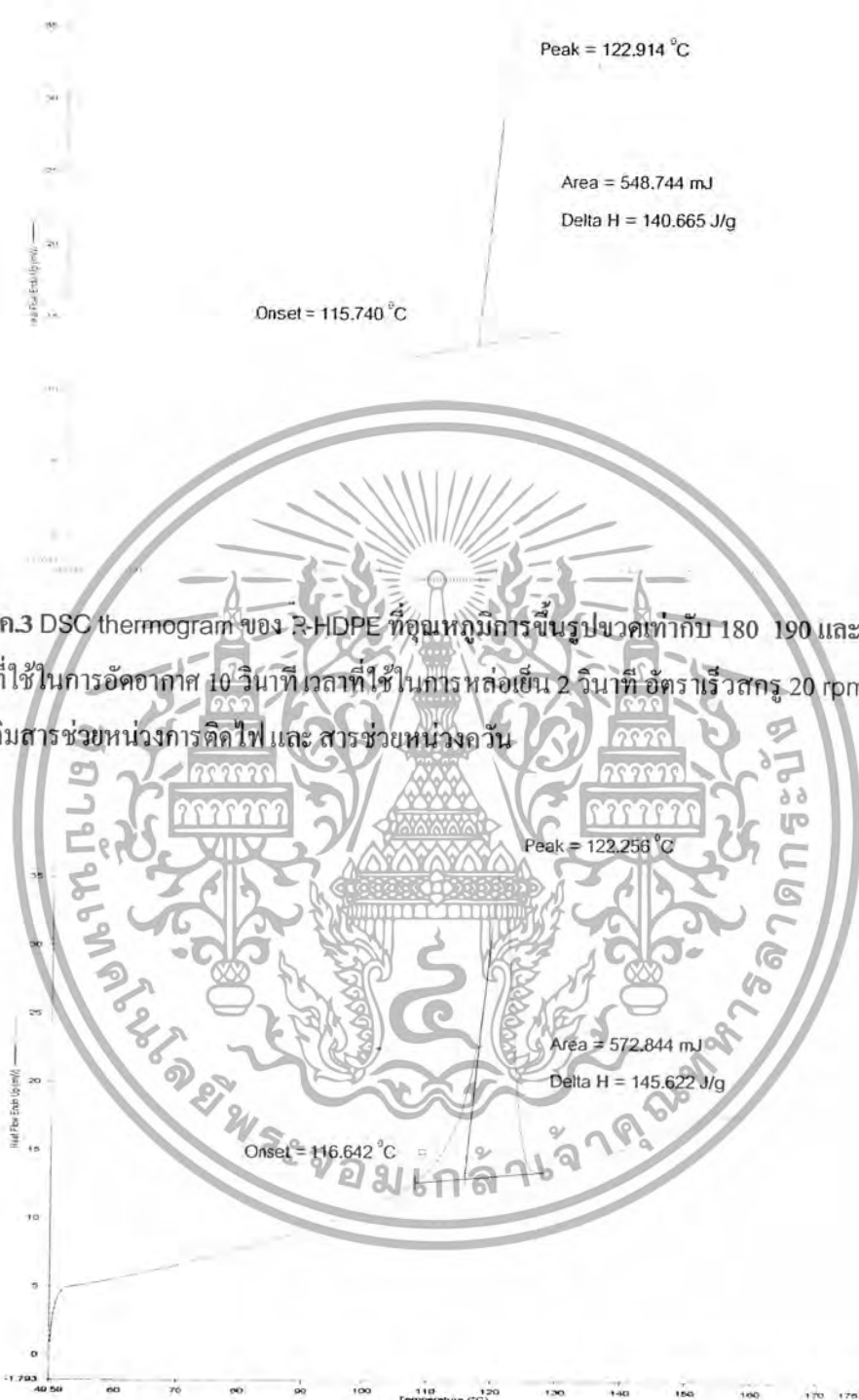


รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 160 170 และ 180 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 15 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงกลิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกํารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 30 rpm ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และสารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

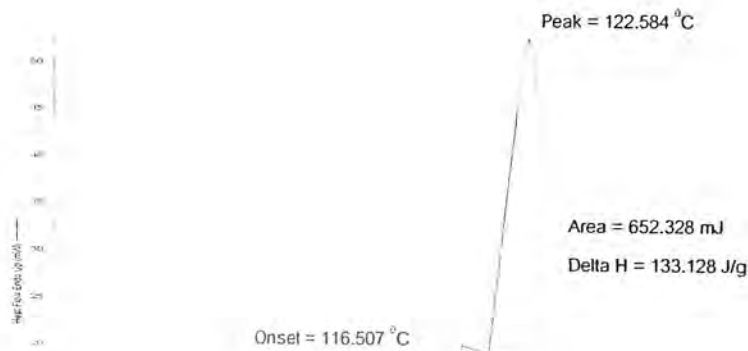


รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 45 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟและสารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 5 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟและ สารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

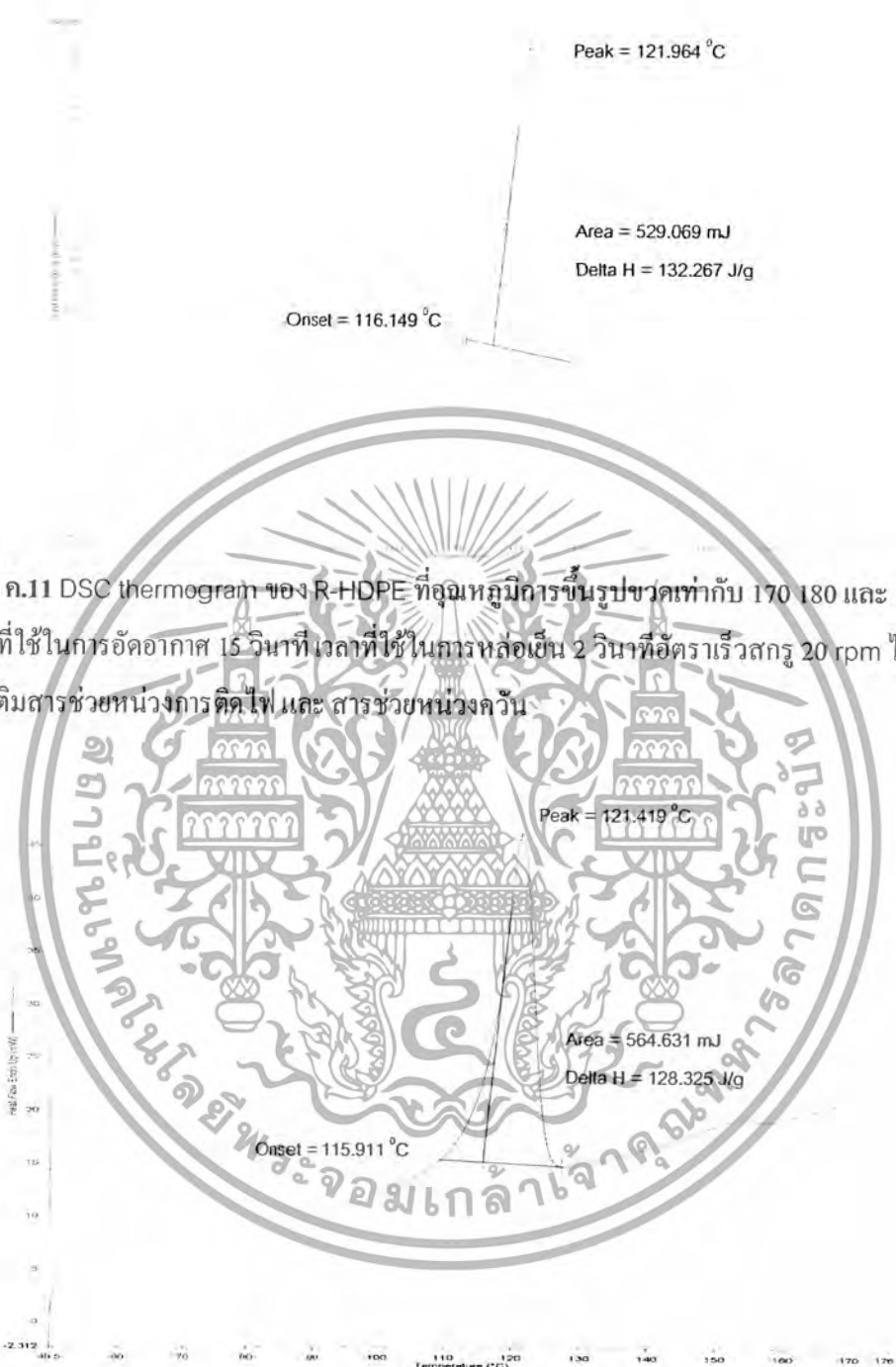


รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 °C และ 180 °C และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 7 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน

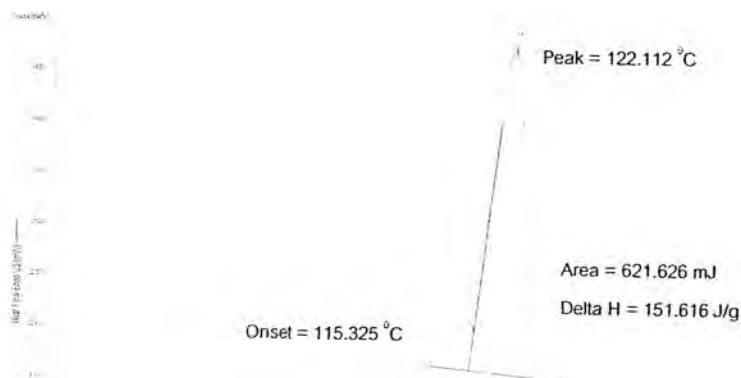


รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 °C และ 180 °C และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

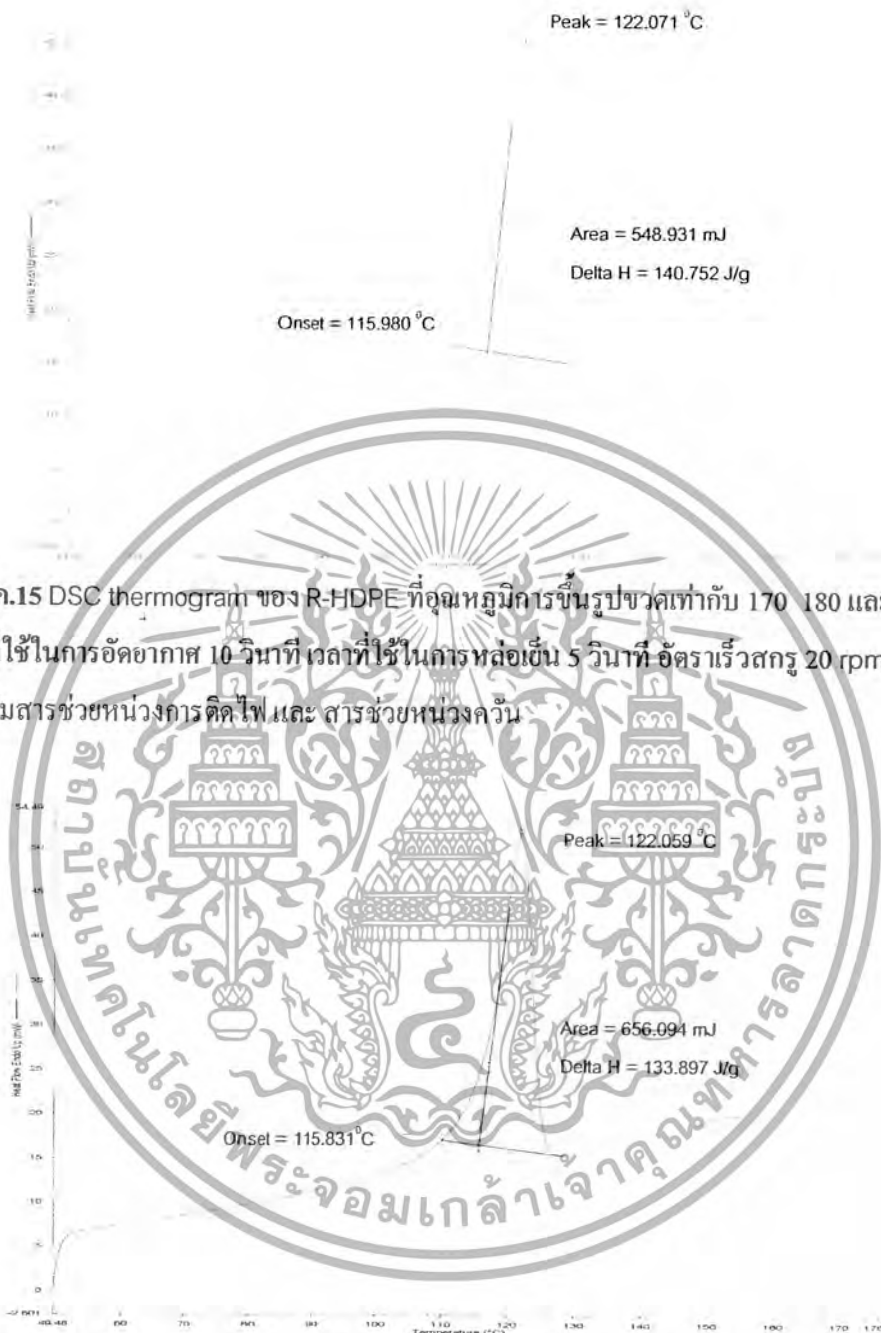


รูปที่ ก.13 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.14 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 3 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

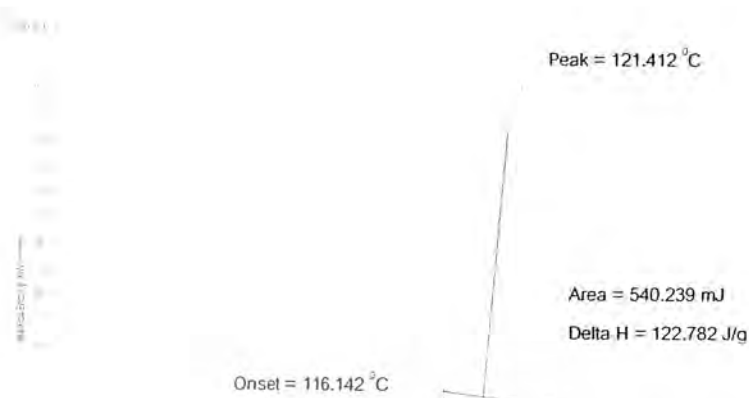


รูปที่ ก.15 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 5 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.16 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 7 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

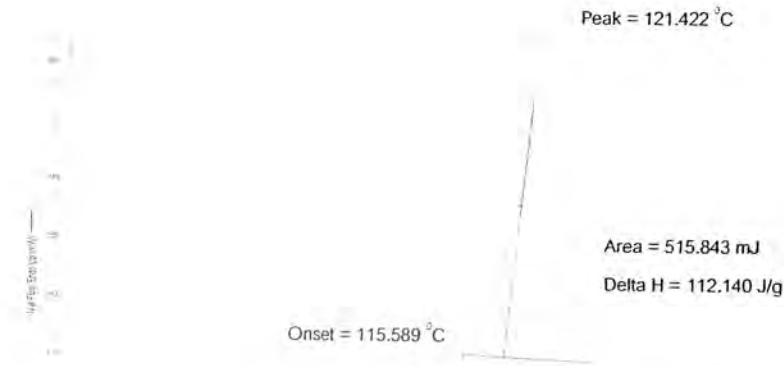


รูปที่ ก.17 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 10 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.18 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 15 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ และ สารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.19 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 20 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ไม่มี การเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟและ สารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.20 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.21 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ๓.22 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 6 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

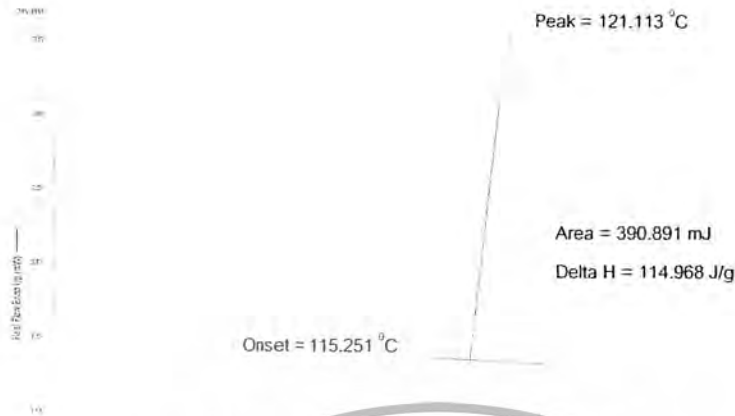


รูปที่ ก.23 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน



รูปที่ ก.24 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 10 phr และ ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

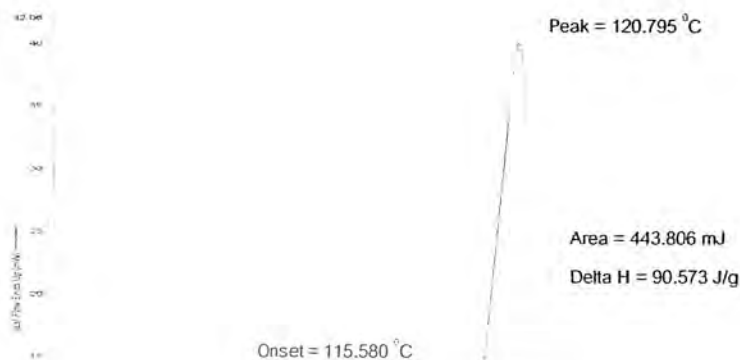


รูปที่ ก.25 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ สารช่วยหน่วงควัน 1 phr



รูปที่ ก.26 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ สารช่วยหน่วงควัน 2 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.27 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ สารช่วยหน่วงควิน 3 phr



รูปที่ ก.28 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปขวดเท่ากับ 170 180 และ 190 °C เวลาที่ใช้ในการอัดอากาศ 10 วินาที เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น 2 วินาที อัตราเร็วสกรู 20 rpm ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 8 phr และ สารช่วยหน่วงควิน 4 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้