

กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิโอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่
และผลของสารช่วยหน่วงการตีไฟ



นางสาวพัชรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง
นางสาวนิตา อัสวเลิศตระกูล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43927
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

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

**Fiber Spinning Process of Recycled High Density Polyethylene
and Effect of Flame Retardant**

Miss Patcharin Hopechrungruang

Miss Wanida Assawalertrakul



**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

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


หัวข้อโครงการพิเศษ กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำ
กลับมาใช้ใหม่ และผลของสารช่วยหน่วงการติดไฟ
นักศึกษา นางสาวพัชรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง รหัส 41052063
นางสาววนิดา อัสวเลิศระกุล รหัส 41052071
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ


.....
(ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ)

ประธานกรรมการ


.....
(ดร.วันลัทธ ชื่นชม)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ และผลของสารช่วยหน่วงการติดไฟ
นักศึกษา	นางสาว พัชรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง นางสาว วนิตา อัครเวสิตระกูล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์แบบหลอมเหลวจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว โดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว เส้นใยถูกปั่นเก็บที่อัตราเร็ว 4.69 , 6.98 , 8.75 , 10.27 และ 12.93 เมตรต่อนาที จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเส้นใยโดยใช้กระบวนการดัดแบบร้อนและศึกษาหาปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเส้นใยสังเคราะห์

จากผลการวิจัย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์คือ อุณหภูมิโชนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 รอบต่อนาที และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 เมตรต่อนาที ซึ่งที่สภาวะนี้เส้นใยมีค่าความแข็งแรงดึง 58 MPa หรือ 0.7 กรัมต่อดีเนียร์ เปอร์เซ็นต์การดัด ๓ จุดขาด 321% และค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1 % ความเครียด 50 MPa สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเส้นใยคือ อุณหภูมิในการดัด 90 °C และอัตราส่วนการดัด 3.2 ซึ่งที่สภาวะนี้เส้นใยมีความแข็งแรงดึง 202 MPa หรือ 1.4 กรัมต่อดีเนียร์ เปอร์เซ็นต์การดัด ๓ จุดขาด 87% ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1 % ความเครียด 178 MPa และปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟที่เหมาะสมคือ 3 phr ซึ่งทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงดึง 203 MPa หรือ 1.3 กรัมต่อดีเนียร์ เปอร์เซ็นต์การดัด ๓ จุดขาด 108% มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1 % ความเครียด 167 MPa และอัตราการเผาไหม้ 1.88 เซนติเมตรต่อนาที

Special Project Title **Fiber Spinning Process of Recycled High Density Polyethylene and Effect of Flame Retardant**

Name **Miss Patcharin Hopechrungruang**
Miss Wanida Assawalertrakul

Special Project Advisor **Asst.Prof.Dr.Somsak Woramongconchai**

Department **Chemistry**

Academic Year **2001**

Abstract

This research aims to study the appropriate condition for the production of synthetic fibers from recycled high-density polyethylene (R-HDPE) by melt spinning process. Fibers were spinned at rate of 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 and 12.93 m/min. Then the appropriate conditions were studied to improve mechanical properties of fibers by hot-drawing process. The appropriate quantity of flame-retardant mechanical and thermal properties and reducing rate of effective burning were also studied.

From the results, it was found that the appropriate conditions of R-HDPE were as temperature of 170 °C, screw speed and spinning speed of 20 rpm and 12.93 m/min, respectively. At this condition, the tensile strength of 58 MPa or tenacity of 0.7 g/denier, elongation at break of 321%. and initial modulus at 1 % strain of 50 MPa. Then the appropriate conditions for improving properties were as temperature of 90 °C and draw ratio of 3.2 . This condition showed the tensile strength of 202 MPa or tenacity of 1.4 g/denier, elongation at break of 87% and initial modulus at 1 % strain of 178 MPa. The appropriate quantity of flame retardant was 3 phr which indicated the tensile strength of 203 MPa or tenacity of 1.3 g/denier, elongation at break of 108%, initial modulus at 1 % strain of 167 MPa and burning rate of 1.88 cm/min.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ สั่งสอนและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วันฉัตร ชื่นชม และดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสาธิตห์ สุขพงษ์พันธ์ จากกรมวิทยาศาสตร์และบริการที่ให้การช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบอัตราการใช้ไฟไหม้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและญาติพี่น้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้

สุดท้ายขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานพอลิเมอร์ บุคคลที่ให้การช่วยเหลือทุกท่านและขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่รุ่นน้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสาวพัชรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง

นางสาววนิดา อัสวเลิศระกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
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	5
2.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)	5
2.3 เส้นใย	7
2.3.1 เส้นใยสังเคราะห์	9
2.3.2 กระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว	9
2.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟ(Flame Retardant)	10
2.4.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค	10
2.4.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้	13
2.4.3 วัสดุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ	14
2.4.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟในทางการค้า	16
2.4.5 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา	17
2.4.6 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ	19
2.4.7 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ	19
2.4.8 วิธีการทดสอบ	20

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.5.1 เครื่องย่อยพลาสติก	22
2.5.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคนเดียว	24
2.5.3 เครื่องคิฟเฟอร์เรนเจียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(DSC)	26
2.5.4 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้	27
2.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในการดึงยืด	29
บทที่ 3 การวิจัยและดำเนินงาน	30
3.1 สารเคมี	30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่(R-HDPE)	31
3.3.2 ขั้นตอนการดึงยืดเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่นำกลับมาใช้ใหม่(R-HDPE)	31
3.3.3 ขั้นตอนการพัฒนาสมบัติของเส้นใย	32
3.3.4 ขั้นตอนการเติมสารช่วยหน่วงการคิดไฟ	33
3.3.5 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใย ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคนเดียว	36
4.1.1 สมบัติเชิงกล	36
4.1.2 สมบัติทางความร้อน	39
4.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการดึงยืด ในอ่างน้ำมันร้อน (Hot-drawing)	40
4.2.1 สมบัติเชิงกล	41
4.2.2 สมบัติทางความร้อน	43
4.3 การศึกษาหาปริมาณสารช่วยหน่วงการคิดไฟที่เหมาะสม	44
4.3.1 สมบัติเชิงกล	44
4.3.2 สมบัติทางความร้อน	47

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สภาพที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั้นเส้นใย ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว	50
5.2 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการดึงยึดเส้นใยแบบร้อน(hot-drawing)	50
5.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสม	51
5.4 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	54



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	6
รูปที่ 2.2 กระบวนการม้วนเก็บเส้นใยต่างๆ	7
รูปที่ 2.3 การม้วนเก็บเส้นใยจากเครื่องจักรรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว	10
รูปที่ 2.4 เครื่องย่อยพลาสติกแบบต่างๆ	23
รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางของเครื่องไม้ตัด	23
รูปที่ 2.6 ส่วนต่างๆของเครื่องจักรรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว	24
รูปที่ 2.7 หัวคायสำหรับเส้นใย	25
รูปที่ 2.8 กระบวนการม้วนเก็บเส้นใยจากเครื่องจักรรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว	26
รูปที่ 2.9 อุปกรณ์เครื่องคัพเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	27
รูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้การในการทดสอบหาอัตราการเผาไหม้	28
รูปที่ 2.11 การทดสอบหาอัตราการเผาไหม้	28
รูปที่ 2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการดั่งยัด	29
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	33
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึง(MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการใช้อัตรา เร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min	36
รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ใช้แล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการ ใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min	37
รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดั่งยัด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ใช้แล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการ ใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min	37
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงดึง(MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm กับอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 และ 12.93 m/min โดยการใช้อุณหภูมิของเครื่องจักรรีดชนิดเกลียวหนอน เดี่ยวโซนที่ 4 (หัวคाय) 170 °C	38
รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ใช้แล้วที่อัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm กับอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 และ 12.93 m/min โดยการใช้อุณหภูมิของเครื่องจักรรีดชนิด เกลียวหนอนเดี่ยวโซนที่ 4 (หัวคाय) 170 °C	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.6** ค่าเปอร์เซ็นต์การคั่งยึด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm กับอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 และ 12.93 m/min โดยการใช้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C 39
- รูปที่ 4.7** ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 70,80,90 และ 100 °C โดยการใช้อัตราส่วนการคั่งยึด 3.2 41
- รูปที่ 4.8** ค่าเปอร์เซ็นต์การคั่งยึด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 70,80,90 และ 100 °C โดยการใช้อัตราส่วนการคั่งยึด 3.2 41
- รูปที่ 4.9** ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อัตราส่วนการคั่งยึด 1.5, 2.4 และ 3.2 โดยการใช้อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 90 °C 42
- รูปที่ 4.10** ค่าเปอร์เซ็นต์การคั่งยึด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่อัตราส่วนการคั่งยึด 1.5, 2.4 และ 3.2 โดยการใช้อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 90 °C 42
- รูปที่ 4.11** ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr โดยการใช้สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่มีการคั่งยึด 45
- รูปที่ 4.12** ค่าเปอร์เซ็นต์การคั่งยึด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่สภาวะการปั่นเส้นใยโดยการใช้สภาวะการปั่นเก็บเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่มีการคั่งยึด 45
- รูปที่ 4.13** ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr โดยการใช้สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการคั่งยึดต่อในน้ำมันร้อนที่อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 90 °C และอัตราส่วนการคั่งยึด 3.2 46
- รูปที่ 4.14** ค่าเปอร์เซ็นต์การคั่งยึด ณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr โดยการใช้สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการคั่งยึดต่อในน้ำมันร้อนที่อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยึด 90 °C และอัตราส่วนการคั่งยึด 3.2 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 4.15 ค่าอัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว
ที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr 46
- รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 160 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 65
- รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 65
- รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 180 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 66
- รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 190 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 66
- รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 40 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 8.75 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 67
- รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 40 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 67
- รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 8.75 m/min ไม่ทำ
การดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 68
- รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่
ทำการดิ่งยึดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ 68
- รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C
อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำ
การดิ่งยึดที่อุณหภูมิน้ำมัน 70 °C อัตราส่วนการดิ่งยึด 3.2 ไม่มีการเติม
สารช่วยหน่วงการติดไฟ 69

- รูปที่ ค.10 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการดึงยืดที่อุณหภูมิน้ำมัน 80 °C อัตราส่วนการดึงยืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ 69
- รูปที่ ค.11 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการดึงยืดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการดึงยืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ 70
- รูปที่ ค.12 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการดึงยืดที่อุณหภูมิน้ำมัน 100 °C อัตราส่วนการดึงยืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ 70
- รูปที่ ค.13 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ 71
- รูปที่ ค.14 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ที่มีอัตราส่วนการดึงยืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ 71
- รูปที่ ค.15 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 0 phr ไม่ทำการดึงยืด 72
- รูปที่ ค.16 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 1 phr ไม่ทำการดึงยืด 72
- รูปที่ ค.17 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 2 phr ไม่ทำการดึงยืด 73
- รูปที่ ค.18 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 3 phr ไม่ทำการดึงยืด 73

- รูปที่ ค.19 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 74
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr ไม่ทำการดิ่งยัด
- รูปที่ ค.20 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 74
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 0 phr ทำการดิ่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน
 90 °C อัตราส่วนการดิ่งยัด 3.2
- รูปที่ ค.21 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 75
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 1 phr ทำการดิ่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน
 90 °C อัตราส่วนการดิ่งยัด 3.2
- รูปที่ ค.22 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 75
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr ทำการดิ่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน
 90 °C อัตราส่วนการดิ่งยัด 3.2
- รูปที่ ค.23 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 76
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 3 phr ทำการดิ่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน
 90 °C อัตราส่วนการดิ่งยัด 3.2
- รูปที่ ค.24 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C 76
 อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min
 ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr ทำการดิ่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน
 90 °C อัตราส่วนการดิ่งยัด 3.2

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	8
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์	12
ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้	18
ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ใช้ในงานวิจัย	30
ตารางที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โซนที่ 4 (หัวตาย) สำหรับเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min	31
ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27, และ 12.93 m/min ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวสำหรับ เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว โดยใช้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบ เกลียวหนอนเดี่ยวในโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C	32
ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการดึงยืดและอุณหภูมิของน้ำมัน	32
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โซนที่ 4 (หัวตาย) 160, 170, 180 และ 190 °C โดยการใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตรา เร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min	39
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็ว สกรู 20 และ 40 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 8.75 และ 12.93 m/min โดยการ ใช้อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C	40
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำมันในการดึงยืด 70, 80, 90 และ 100 °C ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	43
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วที่ไม่ทำการดึงยืดและที่มีอัตรา ส่วนการดึงยืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ	44
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้ว ที่เติมปริมาณสารช่วยหน่วง การติดไฟ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr ไม่ทำการดึงยืด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว ที่เติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr และมีอัตราส่วนการดัดยัด 3.2	48
ตาราง ก.1	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) ต่างๆ และกำหนดให้อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่ 20 rpm และ 12.93 m/min ตามลำดับ ไม่ทำการดัดยัดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ	54
ตาราง ก.2	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใย(F-HDPE) ที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) ต่างๆ และกำหนดให้อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่ คือ 20 rpm และ 12.93 m/min ตามลำดับ ไม่ทำการดัดยัดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ	55
ตาราง ก.3	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยต่างๆ และกำหนดให้อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) คงที่ 170 °C ไม่ทำการดัดยัดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ	56
ตาราง ก.4	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อุณหภูมิน้ำมันร้อนในการดัดยัดต่าง ๆ และกำหนดให้อัตราส่วนการดัดยัดคงที่ 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ	58
ตาราง ก.5	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อัตราส่วนการดัดยัดต่าง ๆ และกำหนดให้อุณหภูมิน้ำมันร้อนในการดัดยัดคงที่ 90 °C ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ	59
ตาราง ก.6	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่มีการเติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณต่าง ๆ โดยใช้สภาวะในกระบวนการปั่นเส้นใยที่คงที่ คือ อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดัดยัด	60
ตาราง ก.7	สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่มีการเติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณต่าง ๆ โดยใช้สภาวะในกระบวนการปั่นเส้นใยที่คงที่ คือ อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min และผ่านกระบวนการดัดยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C และอัตราส่วนการดัดยัด 3.2	61
ตาราง ข.1	อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณต่าง ๆ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันนี้ "พลาสติก" เป็นสิ่งจำเป็นของชีวิตประจำวัน สามารถนำมาเป็นภาชนะบรรจุสิ่งของต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นของเหลวที่ร้อนหรือเย็น ของแข็งที่เป็นชิ้น รวมไปถึงการนำพลาสติกมาหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่เป็นของเล่น และของใช้ เป็นต้น

จากผลของความนิยมในการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้แนวโน้มของปัญหาขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติเป็นเวลานานและพลาสติกบางชนิดเมื่อเผาไหม้จะทำให้เกิดก๊าซพิษทำลายระบบต่างๆของร่างกาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้จึงมีการรณรงค์เพื่อแก้ปัญหาขยะพลาสติก พลาสติกมีความทนทานต่อการย่อยสลายสูง แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (Recycle) เพื่อเป็นการลดการใช้แหล่งวัตถุดิบตามธรรมชาติและส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจอีกด้วย

ความนิยมในการใช้พลาสติกมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่เว้นแม้แต่ในอุตสาหกรรมเส้นใยซึ่งใช้พลาสติกเป็นแหล่งวัตถุดิบ โดยนำพลาสติกหลายๆชนิดมาผสมกัน เพื่อทำให้สมบัติต่างๆของเส้นใยดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึงและมอดุลัส เป็นต้น ดังนั้นถ้าสามารถผลิตเส้นใยจากพลาสติกที่ใช้แล้วให้มีสมบัติใกล้เคียงกับเส้นใยที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้จะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันมีอุบัติเหตุจากไฟเกิดขึ้นมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากความประมาทหรืออุบัติเหตุ ซึ่งแต่ละครั้งที่เกิดขึ้นนำความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือนเป็นอย่างมาก เนื่องจากเกิดการลุกลามอย่างรวดเร็วของเครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น เครื่องใช้ที่ทำจากไม้ เครื่องใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ถ้าสามารถผลิตเส้นใยที่มีสมบัติหน่วงการติดไฟได้ โดยที่สมบัติต่างๆของเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลงมาก ก็จะส่งผลดีทำให้ไฟไม่ลุกลามต่อไปหรือส่งผลให้เกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นได้

งานวิจัยนี้เป็นการนำพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วสกรู อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย อุณหภูมิผสมของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) โดยผลจากการศึกษาทำให้ทราบถึงผลของสถานะและกระบวนการที่เหมาะสมในการนำขวดพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในรูปเส้นใย จากนั้นนำสถานะและกระบวนการที่เหมาะสมมาทำการดัดแปลงโดยผ่านอ่างน้ำมันร้อนโดยหาอัตราส่วนการดัดยัดและอุณหภูมิอ่างน้ำมันร้อนที่เหมาะสม จากนั้นจึงใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปศึกษาผลของสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติการหน่วงการติดไฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีอยู่กลับมาใช้ใหม่ในรูปของเส้นใยให้เกิดประโยชน์มากที่สุด
- 1.2.2 เพื่อหาสถานะที่ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงเทียบเท่าเส้นใยในทางอุตสาหกรรม และสามารถทนต่อการตีไฟโดยอาศัยสารช่วยหน่วงการตีไฟ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงบทบาทและสถานะของสารช่วยหน่วงการตีไฟที่มีต่อเส้นใย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 หาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยอาศัยเทคนิคการหลอมเส้นใย
- 1.3.2 ปรับปรุงเส้นใยที่ได้ด้วยการดึงยืดแบบร้อน (Hot-drawing) เพื่อหาสถานะที่ทำให้เส้นใย มีความแข็งแรงเทียบเท่าเส้นใยในทางอุตสาหกรรม
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟที่มีต่อสมบัติของเส้นใย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถปรับปรุงเส้นใยให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น
- 1.4.2 เป็นการลดต้นทุนผลิตภัณฑ์โดยการใช้วัสดุรีไซเคิล
- 1.4.3 ปริมาณของสารช่วยหน่วงการตีไฟที่ใช้ได้ดีกับเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2544 R.Xie และ B. QU.[1] ได้ทำการศึกษาการใช้ expandable graphite เป็นสารหน่วงติดไฟ และนำไฟทดสอบด้วยเทคนิค Cone calorimeter test (CCT) thermogravimetric analysis (TGA) และ limiting oxygen index (LOI) ตามมาตรฐานในการทดสอบ UL-94 ตลอดจนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า พบว่า expandable graphite (EG) ที่มีการใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดที่ไม่มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ฮาโลเจน(HFFR)ช่วยปรับปรุงสมบัติการหน่วงติดไฟและสมบัติเชิงกลของพอลิเอธิลีนฟีนิลผสมให้ดีขึ้น

ในปี พ.ศ. 2544 A.M.E. Baker และ A.H. Windle [2] ได้ทำการศึกษาผลของกิ่งและการดึงยึดเส้นใยของพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างเป็นผลึก พบว่าอัตราการจัดเส้นใยทำให้ตัวแปรหน่วยผลึกสามเซลล์ (three crystal unit cell parameter) สำหรับเกรดที่ดีและเกรดทั่วไปลดลง ในขณะที่ความหนาแน่นผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตัวแปรความเป็นกิ่ง (branching parameter) ของเส้นใยตัวอย่างและเส้นใยที่ไม่มีการจัดเรียงตัว พบว่าตัวแปรหน่วยเซลล์ ชนิด a และ b เพิ่มขึ้นตามปริมาณกิ่งและชนิดของกิ่งมีผลต่อการขยายตัว โดยที่กิ่งเฮกซามีนมีการขยายตัวมากที่สุดและกิ่งเอทิลมีการขยายตัวต่ำที่สุด

ในปี พ.ศ.2544 Y. L. Liu [3] ได้ทำการศึกษาสารหน่วงการติดไฟที่ใช้กับอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นสารประเภทฟอสฟอรัสที่มี DOPO-PN (9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide และ 4-hydroxyl benzoaldehyde) ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาการเติมเป็นองค์ประกอบ พบว่าหมู่ฟีนิลจำนวนมากในสายโซ่โมเลกุลใช้เป็นสารบ่มสำหรับอีพอกซี มีดัชนีออกซิเจน (LOI) สูง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณฟอสฟอรัสของอีพอกซีเรซิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่น้อยที่สุดที่ใช้ คือ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสำหรับ DOPO-PN-cure epoxy resins มีค่าดัชนีออกซิเจนเท่ากับ 26 เมื่อทดสอบด้วย UL 94 ประเภท V-0

ในปี พ.ศ. 2544 R. Xie และ B. Qu [4] ได้ศึกษาโครงสร้างการบวมตัวของถ่านที่ได้จากพอลิโพลีฟีนิลผสมกับ expandable graphite และ / หรือ สารหน่วงการติดไฟที่ไม่มีฮาโลเจน (HFFR) และกลไกปฏิกิริยาการหน่วงการติดไฟ ซึ่งได้ข้อมูลจาก FTIR , XPS และ LRS ทำให้ทราบว่าโครงสร้างของถ่านที่บวมตัวประกอบด้วยธาตุคาร์บอนประเภท expandable graphite และวงเบนซีนที่ควมแน่น และ/หรือ สารประกอบเชิงซ้อน phosphocarbonaceous ที่เชื่อมกันด้วยพันธะ P-O-C และ P-N หรือ quaternary nitrogen หรือ dehydrate zincborate ข้อมูลจาก SEM แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่หนาแน่นของถ่านทำให้การถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างก๊าซและวัฏภาคควมแน่นลดลงเพื่อป้องกันพอลิเมอร์จากความร้อนในเปลวไฟและข้อมูล DTA ทำให้ทราบกลไกปฏิกิริยาการหน่วงการติดไฟซึ่งสารหน่วงการติดไฟจะเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาออกซิเดชันและลดความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2543 C. S.Reed และคณะ[5] ได้ทำการศึกษาการนำของผสมพอลิฟอสฟาซีน (polyphosphazene blends) กับ พอลิยูรีเทน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิฟอสฟาซีน จาก 5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ 400°C และ 600°C พบว่าที่ 400°C ปริมาณถ่านในอัตราการผสมต่างๆจะเท่ากัน แต่ที่ 600°C จะมีปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มของพอลิฟอสฟาซีนและเมื่อทดสอบพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด โดยใช้เทคนิคการทดสอบเปลวไฟตามแนวระนาบ และวิเคราะห์ปริมาณด้วยการวัดดัชนีหักเห พบว่าความต้านทานเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิฟอสฟาซีนมากกว่าหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในปี พ.ศ. 2543 T.Hobbs,A.J. Losser [6] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใย PET โดยใช้การดึง 2 ชั้น ด้วยความดัน CO_2 พบว่าเส้นใย PET ที่ถูกดึงใน CO_2 (ของเหลว) ที่ 23°C เนื้อความดันวิกฤตตามด้วยการดึงชั้นที่ 2 ที่ 200°C ในอากาศ โดยพิจารณาผลทางสัณฐานวิทยา พบว่าพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลทที่ถูกดึงด้วย CO_2 มีค่า birefringence และ ความเป็นผลึกสูงขึ้น และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเส้นใยที่ถูกดึงด้วย CO_2 มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูงขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์

ในปี พ.ศ. 2543 Y.K.Kwon และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการหลอมเหลวและความจุความร้อนของ gel-spun และ เส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงโดยใช้ standard differential scanning calorimetry และ wide- angle x-ray diffraction พบว่าพฤติกรรมการหลอมของ gel-spun และ เส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงเป็นพิเศษมีพีคหลอมเหลว 2 พีค (ที่ 415 K และ 423 K) อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (275 K) และความจุความร้อนที่มากเกินปกติ โดยปฏิกิริยาเป็นแบบผันกลับ ได้ค่าที่เข้าใกล้พีคหลอมเหลว (เริ่มที่ประมาณ 350-370K) สิ่งที่เกิดขึ้นได้ในตอนเริ่มแรกคือค่าการดูดความร้อนในการหลอมเหลวที่ต่ำลง (lower melting endotherm) มีค่าเท่าเดิม ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าเป็นเส้นใยอิสระในทิศทางตามยาวและทิศทางด้านข้าง นอกจากนี้เส้นใยส่วนใหญ่เป็นอโรโรมบิก โดยสามารถเกิดการเปลี่ยนจากอโรโรมบิกไปเป็นเฮกซะโกนอลเมื่อเส้นใยถูกจำกัด (constrained fibers) เป็นการบอกได้ว่าวัฏภาคของเฮกซะโกนอลเป็นวัฏภาคที่ไม่สมดุล และการจัดเรียงตัวในส่วนวัฏภาคมีรชันต์ เมื่อใช้ solid state NMR และ full pattern x-ray analysis พบว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วกว้างถึงประมาณ 300K เปรียบเทียบกับอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเอทิลีนอสัณฐานมีจุดกึ่งกลางที่ 237 K และจุดสุดท้าย ที่ 250 K

ในปี พ.ศ. 2543 T.L.Dimetрова และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาถึงการเข้ากัน ได้ของการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลทกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลทและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ไม่ดี สารช่วยผสมเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการผสมเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี ในงานวิจัยนี้ใช้สารช่วยผสมต่างกัน เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์และโคพอลิเมอร์พอลิเอสเทอร์ที่กราฟท์บนสายโซ่พอลิเอทิลีน ในกรณีของอีลาสโตเมอร์ที่ปรับปรุงแล้ว การเข้ากันได้มีการสร้างพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่โคพอลิเมอร์มีส่วนของพอลิเอสเทอร์และส่วนของพอลิเอทิลีนที่มีการยึดทางเทอร์โมไดนามิกส์กับ PET และพอลิเอทิลีนตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2543 G.Wu และคณะ[9] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของพอลิ(เอทิลีน-2,6-แนพทาเลท) ที่ได้จากการปั่นเหลว (melt spinning) แบบความเร็วสูง มีการเตรียมตัวอย่าง โดยทำการปั่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วตั้งแต่ 0.9-10 km/min พบว่าที่ความเร็วต่ำ (1.5-4 km/min) เส้นใยมีการจัดเรียงตัวทั้งในส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐานสูงขึ้นเนื่องจากลักษณะเฉพาะของแรงเค้นที่เกิดขึ้นจากการปั่นด้วยความเร็วสูงเมื่อใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่วนในกรณีความเร็ว 5-10 km/min มีการจัดเรียงตัวที่อิมิตัว ทำให้ความเหนียว (tenacity) และค่ามอดุลัสเริ่มต้นของเส้นใย PEN ที่ได้มีค่า 8 และ 200 g/d ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2543 A.Suzuki และคณะ[10] ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้การดึงยืดและการให้ความร้อนกับเส้นใยพอลิ(เอทิลีนเทอแรฟทาเลท) เป็นรอบการทำงาน โดยที่การดึงยืดมี 3 ขั้นตอน คือ ขั้นแรก ทำการดึงที่อุณหภูมิ 90°C ภายใต้แรงดึง 8.7 MPa ขั้นที่ 2 อุณหภูมิ 90°C ภายใต้แรงดึง 209 MPa และขั้นที่ 3 อุณหภูมิ 130°C ภายใต้แรง 366 MPa ซึ่งแต่ละขั้นตอนทำ 5 รอบ ส่วนการให้ความร้อนทำที่อุณหภูมิ 210°C ภายใต้แรงดึง 281 MPa ทำ 50 รอบ พบว่าเส้นใยสุดท้ายที่ได้มีค่า birefringence 0.255 และปริมาณความเป็นผลึก 55 % เส้นใยนี้มีค่าความแข็งแรงดึง 1.2 GPa มอดุลัสแรงดึง 15.1 GPa และ มอดุลัสสะสม 24.3°C ที่ 25 °C

ในปี พ.ศ. 2541 S.H Chiu และ W.K Wang [11] ได้ทำการศึกษาสารช่วยหน่วงการติดไฟแบบไดนามิกของพอลิพรอพิลีนที่เติมสารตัวเติมแอม โมเนียมฟอสเฟตเพนทริออลและเมลามีน พบว่ามีสมบัติช่วยหน่วงการติดไฟที่ดีมากโดย ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงและยังพบว่าความเข้มข้นของ CO และปริมาณควันลดลงขณะเกิดการเผาไหม้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสารตัวเติมระบบนี้ช่วยปรับปรุงสมบัติการเผาไหม้ของพอลิพรอพิลีน

ในปี พ.ศ. 2541 A. Suzuki และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การดึงยืดและการให้ความร้อน(annealing)กับเส้นใยพอลิ(เอทิลีน-2,6-แนพทาเลท) โดยในการดึงยืดใช้อุณหภูมิ 130°C มีการให้แรงดึง 13 MPa ส่วนการให้ความร้อนใช้อุณหภูมิ 200°C มีการให้แรง 212 MPa พบว่าการดึงยืดเส้นใยที่ได้มีมอดุลัสการดึงยืดและความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนการให้ความร้อนเส้นใยมีค่ามอดุลัส 26 GPa และความแข็งแรงดึง 1.1 GPa

2.2 วัสดุ

2.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

กระบวนการในการผลิตจะเป็นปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งและใช้ความดันต่ำ โดยมีบางกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายด้วย โดยอุณหภูมิของกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ที่ได้จะไม่ละลายและอยู่ในรูปแขวนลอย จากนั้นจึงเกิดเป็นเม็ดพอลิเอทิลีน กระบวนการแบบสารละลายนี้อาจทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์ออกมา ส่วนกระบวนการอีกแบบหนึ่ง คือ การใช้ก๊าซ โดยที่ผงของพอลิเอทิลีนจะแขวนลอยอยู่ในก๊าซเอทิลีน

อลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow molding) และใช้ทำท่อ อีกชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) และการขึ้นรูปแบบหมุน โครงสร้างและสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังรูปที่ 2.1[13] และตารางที่ 2.1[13] ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [13]

ตารางที่ 2.1 สมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [13]

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
มอดุลัสการโค้งงอ (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) ในการทำขวดน้ำดื่มซึ่งได้จากเทคนิคการดึงฟิล์มแบบ 2 ทิศทาง (Biaxial stretching) ในขั้นแรก พาริสันอสัณฐาน (Amorphous parison) จะถูกผลิตโดยการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่เย็น จากนั้นพาริสัน (Parison) จะถูกให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และเป่าลมแรงดึง 2 ทิศทางภายในแม่พิมพ์ ขวดที่ได้จะมีผนังบาง ความแข็งแรงสูง สามารถโค้งงอ เหนียวและป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

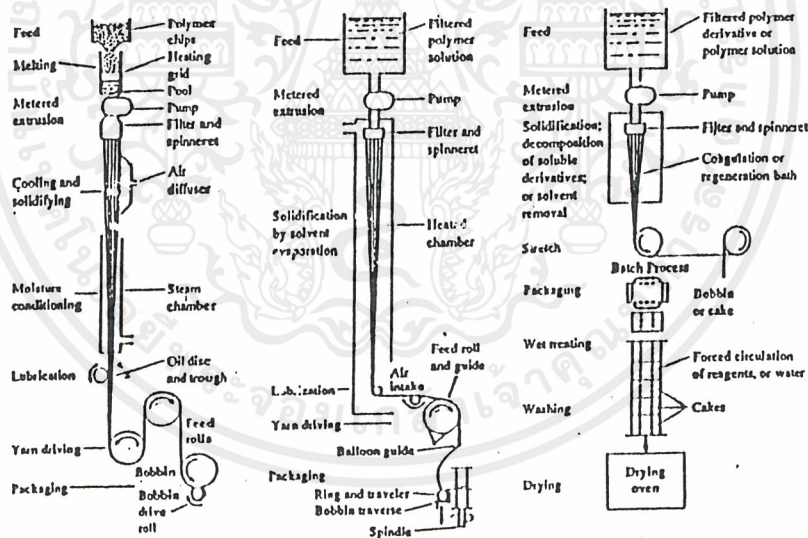
2.3 เส้นใย

เส้นใย คือ วัสดุที่มีความยาวอย่างน้อย 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง เส้นใยสังเคราะห์ เป็นวัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการปั่นให้เป็นรูปแบบเส้นใยซึ่งจะเป็นเส้นเกลียว สมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังตารางที่ 2.2[17]

เส้นใยอินทรีย์ประเภทสังเคราะห์ขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุและกระบวนการปั่นเส้นใย ดังรูปที่ 2.2[17] ซึ่งพอลิเมอร์หลอมหรือสารละลายจะถูกอัดและออกไปยังรูเล็กๆ (orifice) ที่เรียกว่า spinneret หรือ jet โดยได้รูปเส้นใยตามลักษณะของรูเล็กๆ นั้น ต่อมาวัสดุจะผ่านวิฎภาคเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งหลังจากนั้นจะถูกม้วนเข้ากระสวย

ความสามารถในการหมุนของพอลิเมอร์พิจารณาจาก

1. ความเสถียรทางเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการหมุน
2. ความสามารถในการเป็นของเหลวที่ต่อเนื่องหรือเส้นใยกึ่งเหลว
3. การเปลี่ยนรูปไปเป็นพอลิเมอร์แข็งได้ง่าย



รูปที่ 2.2 กระบวนการปั่นเส้นใยต่าง ๆ [17]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[25]

สมบัติ	เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
ความถ่วงจำเพาะ	0.95
ความชื้นย้อนกลับ (%)	0
ความแข็งแรงดึง (σ /denier)	4.0-7.0
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)	15.0-35.0
ความแข็งแรงดึง (MPa)	551.6
การคืนสภาพยืดหยุ่น (%)	สี่
จุดอ่อนตัว °C	120
จุดหลอมเหลว °C	135
ความสามารถในการติดไฟ	ติดไฟช้า
ความทนทานกรดแก่	ต้านทานดี
ความทนทานกรดอ่อน	ต้านทานดี
ความทนทานเบสแก่	ต้านทานดี
ความทนทานเบสอ่อน	ต้านทานดี
ความทนทานตัวทำละลายอินทรีย์	ความทนทาน
ความทนทานต่อแสง	สูญเสียความแข็งแรง
ลักษณะเฉพาะ	จุดหลอมเหลวต่ำ ลอยน้ำ ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและอะโรมาติกเหนืออุณหภูมิ 60°C

2.3.1 เส้นใยสังเคราะห์

เส้นใยสังเคราะห์ต้องมีลักษณะที่แน่นอนเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ควรมีจุดอ่อนตัวทางความร้อนสูง (Thermal Softening Point) มอดูลัสเริ่มต้นของความยืดหยุ่นหรือความแข็งแรงสูง มีค่าความแข็งแรงดึงที่ยอมรับได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง โดยที่ความแข็งแรงดึงแสดงในหน่วย กรัม/ดีเนียร์

ดีเนียร์ คือการวัดขนาดของเส้นใยและนิยามน้ำหนักเป็นกรัมของเส้นใยยาว 9000 เมตร

สมบัติของเส้นใยสังเคราะห์

1. ความแข็งแรงดึงประมาณ 5 กรัม/ดีเนียร์ สำหรับการประยุกต์ทางสิ่งทอ และ 7-8 กรัม/ดีเนียร์ สำหรับการประยุกต์ทางอุตสาหกรรม
2. มอดูลัสเริ่มต้น 30-60 กรัม/ ดีเนียร์ สำหรับการประยุกต์ทางสิ่งทอ และ 50-80 กรัม/ดีเนียร์ สำหรับการประยุกต์ทางอุตสาหกรรม
3. การดึงยืด ณ จุดขาดไม่ควรน้อยกว่า 10% สำหรับการใช้ในสิ่งทอ และ 8-15 % สำหรับการใช้ทางอุตสาหกรรม
4. อุณหภูมิที่เกิดการคืบ (creep) หรืออ่อนตัว ควรต่ำกว่า 215°C สำหรับการประยุกต์ทางสิ่งทอ และ 250°C สำหรับการประยุกต์ทางอุตสาหกรรม
5. เส้นใยควรมีความต้านทานต่อการขูด ความต้านทานความชื้นสำหรับการประยุกต์ทางสิ่งทอ และความต้านทานทางเคมี สำหรับการใช้ทางอุตสาหกรรมดี

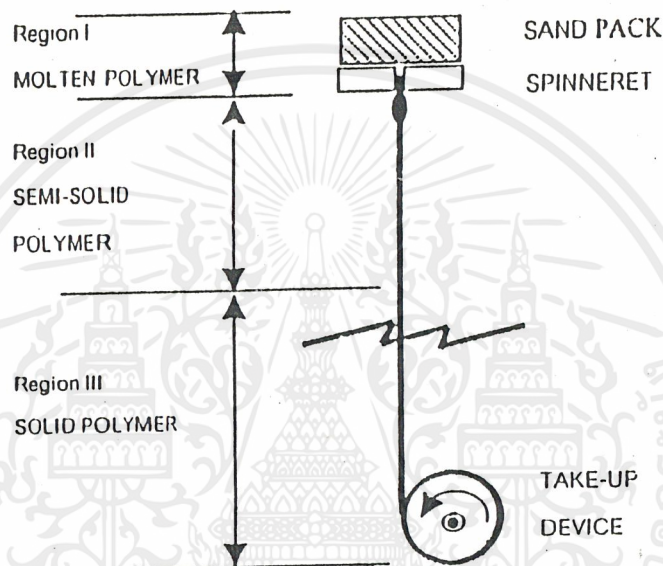
2.3.2 กระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (melt spinning process)

การหลอมเส้นใยเป็นกระบวนการผลิตเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีการประกอบด้วยการหลอมเม็ดพอลิเมอร์ หรือการบีบพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหน่วยการหมุนที่มีเครื่องวัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์ที่แน่นอน พอลิเมอร์หลอมผ่านไปยัง screen pack จากนั้นผ่านไปยัง spinneret หรือ jet ซึ่งเส้นใยถูกสร้างขึ้นและหลังจากออกจากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว เส้นใยจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วและผ่านการหล่อเย็นโดยอาศัยตัวกลางของเหลว เช่น อากาศ แก๊สต่าง ๆ และน้ำ เป็นต้น เส้นใยจะถูกม้วนเก็บด้วยอุปกรณ์ทางกล

ในบางกรณีเส้นใยที่ได้จากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวจะนำมาทำการดึงยืดต่อ หรือในอีกกรณีหนึ่งกระบวนการจะเป็นแบบต่อเนื่อง คือ พอลิเมอร์ถูกปั่นและดึงยืดในชุดเครื่องมือเดียวกัน ขั้นตอนของกระบวนการสุดท้ายทำให้ได้โครงสร้างที่มีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใย

ถ้าวิเคราะห์กระบวนการทั้งหมดของการหลอมเส้นใย (Melt Spinning) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [17] สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

1. พฤติกรรมของสารหลอมเหลวก่อนออกจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว
2. บริเวณหลังจากออกจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวจนถึงการแข็งตัวเมื่อสัมผัสอากาศ
3. พฤติกรรมตั้งแต่การแข็งตัวจนถึงการม้วนเก็บ



รูปที่ 2.3 การม้วนเก็บเส้นใยจากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว [17]

2.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.4.1 กระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค

การพิจารณากระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค (macro scale) แตกต่างกับระดับจุลภาค (micro scale) ตรงที่ระดับจุลภาคจะพิจารณาในส่วนของพอลิเมอร์เท่านั้น ในขณะที่ระดับมหภาคจะพิจารณาวัสดุพลาสติกที่รวมถึงสารตัวเติม หรือสารให้ฟอง

การเผาไหม้ของวัสดุในหน่วยมวลเช่น 1 กรัม สามารถพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นเป็น 5 ขั้นตอน

ขั้นที่ 1 : การให้ความร้อน (Heating) ความร้อนจากแหล่งภายนอกอาจมาจากการได้รับเปลวไฟโดยตรง (การแผ่รังสีและการพาความร้อน) ในกรณีของวัสดุที่ได้รับความร้อนที่ผิวจากการถ่ายเทความร้อนของไอความร้อนที่ได้จากไฟ (การนำความร้อนและการพาความร้อน) หรือจากของแข็งร้อน (การนำความร้อน) เหมือนในกรณีของการยึดติดวัสดุหรือการห่อหุ้มพลาสติกด้วยการเคลือบเพื่อป้องกันอัตราของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิที่แตกต่างและสมบัติของวัสดุ ดังนี้

(1) ความจุความร้อนหรือปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยอุณหภูมิต่อมวล 1 หน่วย วัสดุที่มีความจุความร้อนสูงอุณหภูมิจะเพิ่มช้ากว่าวัสดุที่มีความจุความร้อนต่ำ

(2) การนำความร้อนหรืออัตราการนำความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่งภายใต้ อุณหภูมิที่แตกต่างค่าหนึ่ง ถ้าค่าการนำความร้อนสูง หมายความว่าความร้อนถูกถ่ายโอนเข้าไปใน 1 หน่วยมวลได้เร็วกว่าในกรณีที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ

(3) ความร้อนแฝงการหลอมเหลว การระเหยเป็นไอหรือการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในวัสดุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

ขั้นที่ 2 : การสลายตัว (Decomposition) วัสดุได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิการสลายตัวและเริ่มเปลี่ยนแปลงไปเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ต่อไปนี้ (หรือมากกว่า)

(1) ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้หรือก๊าซซึ่งเผาไหม้ในอากาศ กลุ่มนี้รวมถึงมีเทน อีเทน เอทิลีน ฟอรั่มลดีไฮด์ อะซิโตน และคาร์บอนมอนอกไซด์

(2) ก๊าซที่ไม่เกิดการสันดาปหรือก๊าซซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอากาศได้ ในกลุ่มนี้จะมี คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ ไฮโดรเจนโบรไมด์และไอน้ำ

(3) ของเหลว โดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้บางส่วน และสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง

(4) ของแข็งโดยทั่วไป เป็น ถ่าน และ จี๊เอ้า เป็นต้น

(5) อนุภาคของแข็ง หรือเศษพอลิเมอร์ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับควัน

ขั้นที่ 3 : การจุดติดไฟ (Ignition) ก๊าซที่เผาไหม้ได้จุดติดไฟในอากาศเมื่อมีออกซิเจนหรือสารออกซิไดส์เพียงพอต่อการเผาไหม้จึงจะเริ่มต้น การจุดติดไฟขึ้นกับแหล่งภายนอกของการจุดติดไฟ เช่น เปลวไฟหรือการจุดประกายไฟ และอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.3[14]

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์(Ignition temperatures of various polymers) [14]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิของจุดวาบไฟ °C	อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง °C
พอลิเอทิลีน	341-357	349
พอลิไวนิลคลอไรด์	391	454
พอลิไวนิลคลอไรด์ อะซิเตท	320 – 340	435 – 557
พอลิไวนิลิดีน คลอไรด์	532	532
พอลิสไตรีน	345 – 360	488 – 496
สไตรีน อะคริโลไนไตรล์	366	454
สไตรีน เมทิลเมทาคริเลท	329	485
พอลิเมทิลเมทาคริเลท	280 – 300	450 - 462
พอลิคาร์บอนเนต	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

ผลของขั้นตอนการจุดติดไฟที่มีต่อสมบัติของวัสดุเป็นดังนี้

(1) อุณหภูมิที่ก๊าซอยู่รอบวัสดุสามารถจุดติดไฟได้โดยการจุดประกายไฟหรือใช้เปลวไฟ (Flash ignition temperature) หรือ โดยทั่วไปอุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (นอกจากจะไม่มีการจุดติดไฟ)

(2) อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง(Self-ignition temperature) หรืออุณหภูมิซึ่งปฏิกิริยาภายในวัสดุทำให้เกิดการจุดติดไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิการจุดไฟโดยใช้เปลวไฟ เพราะต้องการพลังงานมากกว่า

(3) ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่ต้องการในการจุดประกายไฟและการเผาไหม้ (Limiting oxygen concentration) โดยทั่วไปแล้ววัสดุสามารถดับไฟได้เอง (Self-extinguishing) ถ้าไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21% และไม่เกิดการจุดประกาย (Nonigniting) ถ้าไม่สามารถ

จุดประกายไฟกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21% สภาวะภายใต้วัสดุที่ไม่เกิดการจุดประกายหรือสามารถดับไฟได้เอง ซึ่งแบ่งตามความรุนแรงของสิ่งที่เกิด

ขั้นที่ 4 : การเผาไหม้(Combustion) คือ การเผาไหม้ของมวล 1 หน่วย ทำให้เกิดปริมาณของความร้อนในการเผาไหม้แน่นอน ความร้อนของการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก๊าซของการเผาไหม้และของก๊าซที่ไม่เกิดการเผาไหม้สูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการพาความร้อน การให้ความร้อนกับอนุภาคของแข็งเพื่อให้เกิดแสงสว่าง การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการแผ่ความร้อนและการให้ความร้อนกับของแข็งที่เหลือและการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

ขั้นที่ 5 : การลุกลามของเปลวไฟ (Propagation) คือ ความร้อนสุทธิของการเผาไหม้ของมวล 1 หน่วย มีค่าลดลงโดยความร้อนสูญหายไปกับสิ่งแวดล้อมและเพิ่มขึ้นโดยได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น เปลวไฟซึ่งต้องเพียงพอในการทำให้มวล 1 หน่วยที่อยู่ในขั้นตอนการเผาไหม้เข้าสู่ขั้นลุกลามได้

2.4.2 ขั้นตอนของการเผาไหม้ [26]

ผลจากการถูกเป็นไฟของพลาสติกเกิดขึ้นหลายขั้นตอนซึ่งตามความเป็นจริงมีแนวโน้มคาบเกี่ยวกันในทางปฏิบัติ ดังนี้

- 1.) การอ่อนตัวของพลาสติกนำไปสู่การหย่อนตัวลง (sagging) และเพิ่มความว่องไวต่อปฏิกิริยา
- 2.) การออกซิเดชันของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการออกซิเดชันในชั้นบรรยากาศโดยเกิดการเร่งปฏิกิริยาคด้วยความร้อน โดยจะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะ C-H และจากนั้นเป็นพันธะ C-C
- 3.) การเสียดคุณภาพทางเคมีจะได้โมเลกุลที่เสถียรเรื่อยๆ
- 4.) พอลิเมอร์ที่เสียดคุณภาพจะเกิดการระเหยได้ของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 5.) การจุดติดไฟของก๊าซผสมระหว่างสารอินทรีย์กับออกซิเจนในอากาศจัดเป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลอิสระประเภทการคายความร้อน
- 6.) การเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติของทั้ง 5 ขั้นตอนที่กำลังมาข้างต้นขึ้นอยู่กับการสันดาปทางความร้อนประเภทคายความร้อน
- 7.) การลุกท่วมของเปลวไฟ (Flashover) จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในบรรยากาศไอมมาถึงระดับวิกฤติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใกล้เพดานที่มีก๊าซร้อนรวมตัวกันอยู่จะทำให้ของผสมของสารอินทรีย์ทั้งหมดกับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดการติดไฟขึ้นทันทีทำให้เกิดมวลของเปลวไฟขึ้นในบริเวณเพดานทั้งหมด สิ่งนี้จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้คนที่ดีอยู่ในเปลวไฟหรือแม้แต่คนดับเพลิงไม่สามารถหนีออกจากเปลวเพลิงได้

2.4.3 ธาตุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.4.3.1 ฟอสฟอรัส

ธาตุที่ใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟมากที่สุดคือสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัส สารนี้ค่อนข้างมีราคาแพง สามารถใช้ได้ทั้งในพอลิเมอร์หรือเป็นสารเติมแต่ง ช่วยลดการติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่มีการเกิดควันหรือก๊าซที่มีพิษขึ้น ทำหน้าที่เป็นสารหน่วงติดไฟในวัฏภาคควบแน่น (condensed phase) (รวมทั้งวัฏภาคของของแข็งและของเหลวเพราะระดับของการหลอมเหลวที่หลากหลายมีผลต่ออุณหภูมิเปลวไฟ) โดยที่ฟอสฟอรัสและสารประกอบของฟอสฟอรัสจะเพิ่มปริมาณของสิ่งที่เหลือในองค์ประกอบของคาร์บอนหรือถ่าน โดยอาศัยกลไก 1 หรือ 2 กลไก ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวในปฏิกิริยาได้คาร์บอนมากกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์
2. รูปแบบชั้นผิวของถ่านซึ่งยับยั้งออกซิเจนที่เข้ามาและหลีกเลี่ยงออกไซด์ของคาร์บอนโดยการป้องกันทางกายภาพและป้องกันการเกิดก๊าซของคาร์บอนโดยไม่ให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

ผลของฟอสฟอรัสในปฏิกิริยาเคมีที่มีผลต่อการสลายตัว อาจเกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันบางส่วน ตามด้วยปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุลโดยก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับรูปแบบความร้อนที่ต่ำลง ฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของถ่านมีลักษณะอยู่ในรูปแบบของออกไซด์ของฟอสฟอรัสที่ไม่ระเหย

การกระทำของสารประกอบของฟอสฟอรัสที่พบมีผลดังนี้

1. มีผลในขั้นที่ 2 เนื่องจากการสลายตัว มากกว่าในขั้นต่อไป (ขั้น 3 การจุดติดไฟ และขั้น 4 การเผาไหม้) จึงเพิ่มความเป็นไปได้ในการหยุดกระบวนการเผาไหม้ในขั้นต้นๆ
2. มีผลในวัฏภาคควบแน่น (Condensed phase) โดยที่เศษของวัสดุอาจมีมากมากกว่าในวัฏภาคก๊าซ (gaseous phase) โดยที่เศษของวัสดุไม่มีผลกระทบบ
3. ครอบคลุมปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นแหล่งความร้อนหลักแหล่งหนึ่งในการเผาไหม้ของวัสดุพลาสติก
4. ครอบคลุมปฏิกิริยาการเกิดก๊าซซึ่งเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการลุกลามของเปลวไฟ

2.4.3.2 โบรมีน

สารอินทรีย์ประเภทโบรมีนจัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพมาก ราคาแพงแต่มีประสิทธิภาพสมราคา พันธะระหว่าง C-Br ไม่เสถียรมากนัก โดยเฉพาะในสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) ดังนั้นจึงใช้ได้ปกติในเบนซีน ในเวลาที่เกิดเพลิงไหม้จะทำให้เกิดควันและก๊าซที่มีพิษจึงจำกัดการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ ทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงติดไฟในวัฏภาคก๊าซ โดยมี 2 กลไก คือ การเปลี่ยนแปลงหรือการสิ้นสุดของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้และการก่อรูปเป็นก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบรมีนหนักซึ่งทำหน้าที่ปกป้องวัฏภาคควบแน่น(condense phase) ด้วยการยับยั้งออกซิเจนที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาและการถ่ายโอนความร้อน

ปฏิกิริยาเคมีอาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาฮาโลจินชันตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรฮาโลจินชันเพื่อได้กากที่เหลือเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอน

การทำหน้าที่ของสารประกอบของโบรมีนมีผลในขั้นที่ 3 การจุดติดไฟ โดยการกั้นออกซิเจนและความร้อน ที่เกินเข้ามาและมีผลในขั้นที่ 4 คือการเผาไหม้ โดยมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ ด้วยการปล่อยสารประกอบของโบรมีนในวัฏภาคก๊าซซึ่งจะหน่วงการติดไฟที่เกิดขึ้น

อะลิฟาติก และอะลิไซคลิก สารประกอบของโบรมีน พบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าอะโรมาติก สารประกอบของโบรมีน ในการหน่วงติดไฟพอลิस्टรีน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เชื่อว่าเป็นผลของพลังงานพันธะของอะโรมาติกโบรมีนที่สูงกว่าซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า

2.4.3.3 คลอรีน

สารอินทรีย์ประเภทคลอรีนจัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟ แม้จะไม่มีประสิทธิภาพเท่ากับโบรมีนก็ตาม ในทางตรงกันข้ามกลับช่วยลดค่าใช้จ่ายลงและพันธะ C-Cl ค่อนข้างเสถียร จึงนิยมใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่นเดียวกับเวลาเกิดเพลิงไหม้สารนี้จะทำให้เกิดควันและก๊าซพิษจึงเป็นขีดจำกัดในการนำผลิตภัณฑ์บางชนิดไปใช้ประโยชน์ ทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการติดไฟทั้งในวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคควบแน่น ในวัฏภาคก๊าซใช้กลไกทางเคมีของการเปลี่ยนแปลงหรือการสิ้นสุดของปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้และกลไกทางกายภาพของการเกิดก๊าซคลอรีนหนักในการปกป้องวัฏภาคควบแน่นด้วยการยับยั้งออกซิเจนและความร้อนที่เข้ามา ส่วนในวัฏภาคควบแน่นเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัว

ปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดปฏิกิริยาฮาโลจินชันตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรฮาโลจินชันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น กากของเหลือที่เป็นพอลิเมอร์และมีพันธะคู่อยู่มาก ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอน สารประกอบของคลอรีนมีลักษณะการทำงานเหมือนกับโบรมีน คือเกิดในขั้นที่ 3 คือการจุดติดไฟและขั้นที่ 4 คือการเผาไหม้ โดยมีอิทธิพลต่อการสลายตัว ส่วนอะลิฟาติกคลอรีนมีประสิทธิภาพมากกว่าอะโรมาติกคลอรีนทั้งในพอลิเอสเตอร์และพอลิยูรีเทน

2.4.3.4 แอนติโมนีออกไซด์

จัดเป็นสารเติมที่มีสีขาว ราคาแพง ไม่ได้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟจำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ประเภทโบรมีนหรือคลอรีนจึงจะเกิดประสิทธิภาพ เมื่อเกิดเพลิงไหม้จะระเหิดเป็นควันสีขาวรวมกับควันที่เกิดจากฮาโลเจน

2.4.3.5 ไนโตรเจน

พอลิเมอร์บางชนิด พบว่าไนโตรเจนมีผลช่วยหน่วงการติดไฟ แต่ผลที่ได้ไม่ชัดเจน ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.6 น้ำ

น้ำที่เกิดไฮเดรชันในอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทจัดเป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟที่ดี นิยมใช้กันอย่างมากเนื่องจากเป็นสารเติมที่มีราคาถูก เมื่อพอลิเมอร์เข้าใกล้ความร้อนของเปลวไฟน้ำจะระเหยกลายเป็นไอทำให้พลาสติกเย็นลงซึ่งทำให้กระบวนการเผาไหม้ช้าลงโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นจะปกคลุมผิวของผลิตภัณฑ์ไม่ให้รวมกับออกซิเจนในบรรยากาศ จึงทำให้ไม่ล้าสักเปลวไฟ จุดจำกัดที่สำคัญ คือ อุณหภูมิของการสลายตัวต่ำ ถ้าพลาสติกสามารถทำที่อุณหภูมิต่ำพอ เช่น พอลิโอฟีนีล ยางพลาสติกโซล อะคริลิกหล่อ เอพอกซี พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว พอลิยูรีเทนและลาเทกซ์ เป็นต้น การใช้อะลูมิเนียมไตรไฮเดรทจะมีประโยชน์เป็นอย่างมาก พลาสติกที่ต้องการอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น โดยเฉพาะพลาสติกที่ใช้ในทางวิศวกรรมจะเกิดการสูญเสียจากการไฮเดรชันในระหว่างกระบวนการจึงทำให้สูญเสียการหน่วงการติดไฟด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการพัฒนาสารเติมที่มีน้ำจากการไฮเดรชันที่ค่อนข้างเสถียร

2.4.3.7 เบนซีนในสายโซ่หลัก

เทอร์โมพลาสติกในทางวิศวกรรมที่มีเบนซีนอยู่ในสายโซ่หลักโดยทั่วไปจะมีดัชนีออกซิเจนค่อนข้างสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นอะลิฟาติก ทั้งนี้เนื่องจากเสถียรภาพจากการเรโซแนนซ์เบนซีนทำให้พันธะแตกออกด้วยความร้อนเกิดเป็นก๊าซ ทำให้การสันดาปช้าลง

2.4.4 สารช่วยหน่วงการติดไฟในทางการค้า [26]

สารเคมีที่ช่วยหน่วงการติดไฟถูกจัดแยกเป็นสารเติมแต่ง (additive) หรือสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารเติมแต่งประเภทสารหน่วงการติดไฟจัดเป็นสารประกอบพอลิเมอร์สำเร็จรูปและมีประมาณ 8.7 เปอร์เซ็นต์ที่ใช้อยู่ทั้งหมด ในขณะที่สารช่วยหน่วงการติดไฟที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะนำมาใช้ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เดิมหรือใช้เป็นสารบ่ม (curing agents) สำหรับเทอร์โมเซตและมีอยู่ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด

ประเภทของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่สำคัญ

2.4.4.1 อะลูมิเนียมไตรไฮเดรท

ใช้กันมากเป็นอันดับหนึ่งในปัจจุบันโดยประมาณ 350 ล้านปอนด์/ปี ใช้กันมากในพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว โดยมีการบ่มตัวที่อุณหภูมิต่ำ นิยมใช้ในงานก่อสร้างและการขนส่ง

2.4.4.2 สารอินทรีย์ประเภทฟอสเฟต

ใช้กันมากที่สุดเป็นอันดับสอง ส่วนมากใช้กับพวกพอลิไวนิลคลอไรด์ เซลลูโลซิก พอลิฟีนิลีนออกไซด์และโพลียูรีเทนชนิดยืดหยุ่นใช้กันประมาณ 225 ล้านปอนด์/ปี พบว่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์เป็นเอสเทอร์ประเภทวงแหวนเหมือนกับไตรคลีซิลฟอสเฟตและประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์เป็นฮาโลจีเนทเต็ดอัลคิล ฟอสเฟต ใช้กันมากในพอลิยูรีเทน

2.4.4.3 คลอรีเนทเต็ด ไฮโดรคาร์บอน

ใช้กันมากที่สุดเป็นอันดับสามโดยประมาณ 100 ล้านปอนด์/ปี คลอรีเนทเต็ด พาราฟินส์ (chlorinated parafins) ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ใช้ในพอลิโอเลฟินส์ เช่น ใช้เป็นฉนวนสำหรับลวดและเคเบิล ออกซิเดนทัล ดีคลอเรน (occidental dechlorane) หรือ บิส-เฮกซะคลอโรไซโคลเพนทระไดอินออกเทน (bis-hexachlorocyclopentadiene octane) ใช้ในพอลิโอเลฟินส์และไนลอน

2.4.4.4 ออร์แกโนโบรมีน

ใช้กันโดยประมาณ 70 ล้านปอนด์/ปี เช่น เดคะโบรโมไดเฟนิลออกไซด์ (decabromodiphenyl oxide) พอลิสไตรีนที่ทนต่อแรงกระแทกและโคพอลิเมอร์อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอินสไตรีนและโบมีนเทเต็ดไซโคลอะลิฟาติก (brominated cycloaliphatic) นิยมใช้ในโฟมพอลิสไตรีน

2.4.4.5 แอนติโมนีออกไซด์ ใช้กันโดยประมาณ 55 ล้านปอนด์/ปี ใช้ร่วมกับออร์แกโนคลอรีนและออร์แกโนโบรมีน

2.4.4.6 โลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดการเกิดควันในระหว่างการเผาไหม้ ได้แก่ โบรอน ซิงค์ และ โมลิบดีนัม พบว่าสูตรบางชนิดช่วยปรับปรุงให้ดีขึ้นมาก

2.4.5 สารช่วยหน่วงการติดไฟชนิดว่องไวต่อปฏิกิริยา

2.4.5.1 เรซินแอฟอกซี

ใช้กันโดยประมาณ 1 ใน 3 ของทั้งหมด ประกอบด้วย เตตระโบรโมบิสฟีนอล A (tetrabromo-bisphenol A) ใช้กับเรซินแอฟอกซีและคลอเรนดิก แอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride) นิยมใช้เป็นสารช่วยในการบ่ม

2.4.5.2 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิมตัว

ใช้ประมาณ 1 ใน 5 ของทั้งหมดประกอบด้วยเตตระคลอโรและเตตระโบรโม พทา ลิก แอนไฮไดรด์ (tetrachloro and tetrabromo phthalic anhydride) และคลอเรนดิก แอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride) ใช้แทน พทา ลิก แอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ที่ใช้ในการผลิต พอลิเอสเทอร์ และใช้เตตระโบรโม บิสฟีนอล A (tetrabromo-bisphenol A) แทนพروفีลีนไกลคอลในการผลิตพอลิเอสเทอร์

2.4.5.3 โฟมพอลิยูรีเทน

ใช้ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด ส่วนมากเป็นโฟมชนิดแข็งประกอบด้วยพอสฟอรัสที่มีฟอสฟอรัสอยู่แต่สามารถใช้พอลิเอสเทอร์ ฟอสฟอรัสที่ขึ้นกับกรดฮาโลเจนเตเต็ดได้ด้วย

2.4.5.4 พอลิคาร์บอนเต

ใช้ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด ส่วนมากใช้ เตตระโบรโมบิสฟีนอล A แทน บิสฟีนอล A นิยมใช้ในเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิเอสเทอร์ซึ่งมีสารเติมประเภทสารช่วยหน่วงการติดไฟอยู่ในโคพอลิเมอร์อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอิน สไตรีน

ในการเลือกชนิดของสารหน่วงการติดไฟจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติของสารหน่วงการติดไฟ ดังแสดงในตารางที่ 2.4[14]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารที่สามารถใช้เป็นสารช่วยหน่วงการติดไฟได้ [14]

ชนิดสารช่วยหน่วงการติดไฟ	สูตร	น้ำหนักโมเลกุล	จุดหลอมเหลว °C	จุดเดือด °C
ฟอสฟอรัสไตรออกไซด์	P_2O_3	109.95	23.8	173.8
ฟอสฟอรัสเตตระออกไซด์	P_2O_4	125.95	>100	-
ฟอสฟอรัสเพนทอออกไซด์	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
ฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์	PCl_3	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	$POCl_3$	153.33	-585	-101.5
ฟอสฟอรัสออกซีโบรไมด์	$POBr_3$	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
ไฮโดรเจนไอโอดाइด์	HI	127.91	-40	-
แอนติโมนี ไตรออกไซด์	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

2.4.6 การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟ

การเลือกสารช่วยหน่วงการติดไฟมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

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

2.4.7 กลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟ

2.4.7.1 การยับยั้งหรือการกำจัดอนุมูลอิสระ

ปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลักในวัฏภาคที่เป็นไอ โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาของสายโซ่อนุมูลหลัก สารอินทรีย์ประเภทฮาโลเจนบางที่อาจเกิดอนุมูลโบรมีนและคลอรีนซึ่งแทรกแซงสายโซ่ที่เกิดออกซิเดชัน บางคนเชื่อว่าสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสอาจเกิดในลักษณะนี้เช่นกัน

2.4.7.2 การปกคลุมก๊าซที่ไม่รวมกับออกซิเจน

สารช่วยหน่วงการติดไฟอาจจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งปกคลุมผิวของพลาสติกซึ่งเป็นการรักษาพลาสติกไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและป้องกันการเผาไหม้ ก๊าซประเภทนี้ ได้แก่ โบรมีน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอนติโมนีออกไซด์ ออกซิเฮไลด์และไอน้ำ เป็นต้น

2.4.7.3 การเคลือบผิว

การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ประเภทฟอสฟอรัสทำให้เกิดฟอสฟอรัสออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นแก้วห่อหุ้ม เมื่อแข็งตัวแล้วทำให้เกิดการเคลือบของสารอินทรีย์บนพลาสติก จัดเป็นสารที่ไม่เกิดการติดไฟและช่วยแยกออกซิเจนในบรรยากาศออกไป

2.4.7.4 การเกิดถ่าน

กระบวนการเผาไหม้บางชนิดเปลี่ยนพอลิเมอร์ประเภทสารอินทรีย์ให้เป็นถ่านคาร์บอนที่มีโฟมอยู่ โดยจะแยกออกซิเจนในบรรยากาศและทำหน้าที่เป็นฉนวนเก็บความร้อนของเปลวไฟไม่ให้ออกจากพลาสติกและป้องกันการแตกสลายของพลาสติกไปเป็นไอของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสันดาปของไฮโดรคาร์บอน นักทฤษฎีหลายคนเชื่อว่าประสิทธิภาพของสารช่วยหน่วงการติดไฟขึ้นอยู่กับความเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถในการส่งเสริมการเกิดถ่าน (char-formation) ยกตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัสออกไซด์ คิงน้ำออกจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ทำให้เหลือเพียงคาร์บอนเท่านั้น หลายสมการเขียนขึ้นเพื่อแสดงความแตกต่างของสารช่วยหน่วงการติดไฟที่สามารถเปลี่ยนแนวทางของกระบวนการเผาไหม้ใหม่ได้เป็นถ่านที่เหลืออยู่ (char caol residue)

2.4.7.5 การดูดความร้อน

ถ้าสารช่วยหน่วงการติดไฟได้จากการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อนจะทำให้พลาสติกเย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวจึงช่วยป้องกันการเผาไหม้ของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ เป็นตัวอย่างที่สำคัญของทฤษฎีนี้

2.4.7.6 การไหลเป็นหยดก่อนการเผาไหม้

ในการทดสอบเทอร์โมพลาสติกในห้องปฏิบัติการพบว่าตอนปลายสุดของการเผาไหม้สารตัวอย่างที่หลอมเหลวไหลเป็นหยดและมีเปลวไฟติดอยู่ด้วยเมื่อทำให้สารเย็นลงโดยไม่เกิดการเผาไหม้ต่อไป เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า “การดับไฟด้วยตนเอง” (self extinguishing behavior) แต่นักวิจัยบางคนค้านว่าการเสนอกลไกของปฏิกิริยาแบบนี้เป็นการป้องกันไฟที่ขึ้นอยู่กัผลึกภัณฑ์เฉพาะในขณะที่เกิดการเผาไหม้ภายใต้สภาวะเฉพาะนั้นๆ สาเหตุนี้จึงไม่สามารถพิจารณาเป็นเทคนิคที่ใช้กันโดยทั่วไป

2.4.8 วิธีการทดสอบ (ในห้องทดลอง)

มีวิธีการทดสอบหลายวิธีในการเปรียบเทียบความสามารถในการติดไฟและประเมินความเสี่ยง แต่ที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการมีเพียง 2 – 3 วิธี โดยเริ่มจากการทดสอบขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ตามลำดับ

2.4.8.1 แท่งพลาสติกในแนวนอน (Horizontal Bar)

แท่งพลาสติกถูกวางอยู่ในแนวราบโดยปลายด้านหนึ่งผูกติดไว้ ถ้าพลาสติกเกิดโค้งงอได้อาจจะช่วยพยุงตัวขึ้นงานด้วยตะแกรง และมีตะเกียงบนเส้นวางอยู่ได้ปลายอีกข้างหนึ่ง ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟ เรียกว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning)” ถ้าพลาสติกติดไฟจะต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยนิ้วต่อนาทีและรายงานผลเป็น “อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)” ถ้าติดไฟเพียงครึ่งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น “สามารถดับได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing)” และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นนิ้ว วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่ายและมีประโยชน์มากในการวิจัยขั้นพื้นฐาน

2.4.8.2 ดัชนีออกซิเจนหรือการทดสอบโดยออคซิเจนไนซ์ (Oxygen Index or Candle Test)

พลาสติกยาววางเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ตามแนวตั้งและตรึงไว้ที่ฐาน ผสมก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ถูกควบคุมและป้อนเข้าไปที่ฐานของหลอดทดสอบอย่างต่อเนื่องและออกทางรูเปิดด้านบน นำเปลวไฟจอลงตรงส่วนบนสุดของตัวอย่างพลาสติกเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เหมือนจุดติดเทียนไข ถ้าไม่เกิดการลุกไหม้ เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเกิดการลุกไหม้ เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนจะลดลงจนกระทั่งหยุด เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนวิกฤติ (critical percent oxygen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นเส้นแบ่งกัน สำหรับการลุกไหม้พอลิเมอร์จะถูกรายงานเป็นดัชนีออกซิเจน วิธีนี้จัดเป็นวิธีทางห้องปฏิบัติการขนาดเล็กที่นิยมใช้มากที่สุดเพื่อสืบค้นงานวิจัยขั้นพื้นฐาน

ถ้าต้องการทดสอบปฏิกิริยาให้รุนแรงมากขึ้นอาจทำกลับกันโดยการติดตั้งเทียนไขตามชนิดและจุดเทียนไขตรงส่วนล่างสุด วิธีนี้เปลวไฟจะถูกล้อมรอบตัวอย่าง โดยจะให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างก่อนแล้วจึงเริ่มเผาไหม้ไปตามด้านบนข้างทั้งหมด

2.4.8.3 แผงการแผ่รังสี (Radiant Panel)

ผู้เชี่ยวชาญพิเศษหลายคน เชื่อว่าการลุกไหม้จะแผ่รังสีความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมก่อนแล้วจึงจุดติดไฟ โดยจะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงมากกว่าที่จะเกิดการแผ่รังสีแบบการพาทั่วไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้แผงความร้อนของการแผ่รังสี (radiant heat panel) ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างก่อน และ/หรือ ในระหว่างที่ทดสอบการจุดติดไฟ (ignition test)

2.4.8.4 อุโมงค์ (Tunnel)

สำหรับวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้างวิธีที่นิยมทดสอบจะใช้เป็นอุโมงค์ตามแนวนอน (horizontal tunnel) กว้าง 20 นิ้ว และยาว 25 ฟุต โดยใช้เพดานทำด้วยวัสดุที่จะทดสอบ จุดติดไฟเพดานที่ปลายด้านหนึ่งและปล่อยให้อากาศเข้าไปยังอุโมงค์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ก๊าซที่ได้จากการสันดาปออกไปทางปลายโดยอัตราของระยะทางเปลวไฟไปตามความยาวของเพดาน คือ การวัดความสามารถในการติดไฟของวัสดุนั้น วิธีนี้นำมาทดสอบวัสดุในทางการค้าได้แต่สารตัวอย่างต้องมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในงานวิจัยและการพัฒนา

2.4.8.5 ห้องควัน (Smoke Chamber)

มีหลายวิธีที่ได้พัฒนาเพื่อที่จะวัดปริมาณของควันที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการเผาไหม้ โดยพิจารณาถึงผลของการบดบังการมองเห็นของคนที่ยกยอจะหลบหนีออกจากเปลวไฟโดยทั่วไปกล่องที่สร้างขึ้นจะมีหน้าต่างอยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสงจากด้านหลังกล่องสามารถมองเห็นทะลุผ่านหน้าต่างได้ และวัดการส่งผ่านทางด้านหน้าของกล่องโดยตัวอย่างจะถูกเผาไหม้อยู่ภายในกล่องทำให้เกิดควัน ซึ่งจะค่อยๆบดบังแสงที่สามารถผ่านทะลุมายังกล่องได้และจากการสูญเสียการส่งผ่านทำให้สามารถวัดด้านหน้าของกล่องได้ วิธีทดสอบนี้มีประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุที่ทำให้เกิดควันได้น้อย

2.4.8.6 ความเป็นพิษ (Toxicity)

ก๊าซที่ได้จากการสันดาปได้นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการหนู เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราที่ก๊าซนี้เสียไปในขณะที่เกิดการหลบหนี พบว่าคุณสมบัติไม่เหมาะสมและทำให้หนูตาย ด้วยเหตุนี้นักวิจัยคนอื่นๆได้ใช้การวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาก๊าซที่เกิดในระหว่างการเผาไหม้ว่ามีมากเท่าไร โดยทั่วไปปัญหาที่สำคัญ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยไม่คำนึงถึงว่าวัสดุที่เผาไหม้จะเป็น ไม้ กระดาษ หรือ พลาสติก

2.4.8.7 มุมห้อง (Room Corner)

บริษัทที่มีโรงงานร่วมกันได้สร้าง “ มุมห้อง ” เพื่อทดสอบวัสดุขึ้น โดยห้องที่ใช้จะมีลักษณะดังนี้ คือ มีผนัง 2 ผนังพบกันที่มุม 90 องศาและปิดด้วยเพดาน มีการสร้างกองไม้ติดไฟตรงมุมห้อง เมื่อเทก๊าซโซลีนลงไปในกองไม้และจุดไฟ จะมีการบันทึกภาพในขณะที่ไฟลุกลามไปที่ผนังจนถึงเพดาน แล้วนำมาศึกษาอัตราของการเผาไหม้จากเทปบันทึกภาพ ในกรณีที่เปลวไฟมีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถทำให้เกิดการลุกท่วมเปลวไฟที่เหมือนจริงได้

2.4.8.8 สิ่งก่อสร้างทั้งหลัง (Whole Building)

ในบางครั้งหน่วยดับเพลิงท้องถิ่นอาจมีการเผาไหม้สิ่งก่อสร้างเพื่อกำจัดทิ้งโดยอาจอนุญาตให้นักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้และนักวิศวกรติดตั้งวัสดุที่จะใช้ทดสอบรวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่จะทดสอบ เข้าร่วมสังเกตและบันทึกภาพว่ามีลักษณะการกระทำในสภาวะเหล่านั้นอย่างไร อย่างไรก็ตามโอกาสเช่นนี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนักจึงไม่สามารถนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางได้

2.4.8.9 การทบทวนไฟไหม้ที่เกิดขึ้นจริง (Review of Actual Fires)

เมื่อเกิดไฟไหม้จริง นักวิทยาศาสตร์และนักวิศวกรทางด้านเพลิงไหม้สามารถเรียนรู้ได้อย่างดีโดยการสังเกตหรืออย่างน้อยที่สุดได้ทบทวนรายละเอียดของเหตุการณ์ย้อนหลัง ยกตัวอย่างผู้ชำนาญการในสาขาได้เสนอตนเองเป็นผู้ช่วยนักดับเพลิงในเมืองที่ตนเองอยู่เพื่อที่จะสามารถเข้าเหตุการณ์ที่เกิดเพลิงไหม้จริงและสังเกตการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นในขณะนั้นได้

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

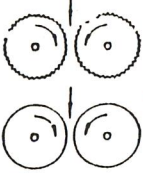
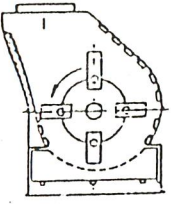
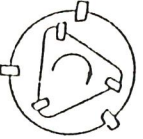
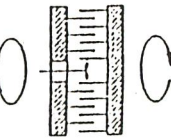
2.5.1 เครื่องย่อยพลาสติก

การย่อย หมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีกล ในการย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกันตามต้องการ

ถ้าจะต้องมีการแยกพลาสติกเม็ดหยาบออกจากเม็ดละเอียดเพื่อสามารถทำงานในขั้นต่อไปได้สะดวกยิ่งขึ้น ต้องมีการกรองประกอบเข้าไปด้วย

เหตุผลที่จำเป็นต้องย่อยพลาสติกมีหลายอย่าง เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสม ทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายเร็ว เป็นต้น เครื่องย่อยมีหลายชนิด ซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก ตัวอย่างเครื่องย่อย เช่น เครื่องรีดย่อย เครื่องโมตี เครื่องไม้ตัด เครื่องไม่กวน เครื่องโม้แท่งตี และเครื่องโม้รีด

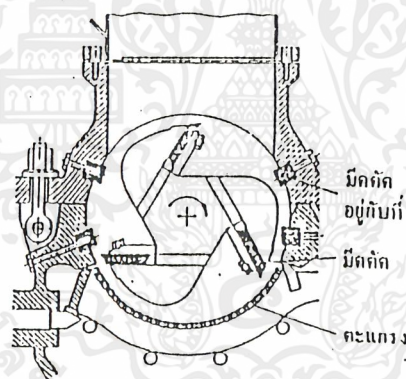
เครื่องรีดย่อยจะใช้สำหรับการย่อยพลาสติกแข็งเปราะได้เท่านั้น สำหรับการย่อยจะต้องใช้เครื่องโม้บด ในการที่จะเลือกใช้เครื่องโม้ชนิดใดขึ้นอยู่กับว่าต้องการความละเอียด หรือความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติกขนาดไหน ดังแสดงในรูปที่ 2.4[15]

เครื่อง	เครื่องรีดข่อย	ไม้ตี	ไม้ค้ำ	ไม้แท่งตี
สภาพของพลาสติก				
เปราะ	✓	✓		✓
เหนียว			✓	✓
elastic			✓	
เหมาะสำหรับ	PS, PF	PS, PF, PMMA	PVC, PE, PP, PA	PVC, PE, PF

รูปที่ 2.4 เครื่องข่อยพลาสติกแบบต่าง ๆ [15]

ลักษณะการทำงานของเครื่องข่อยต่างๆ ดังรูปที่ 2.4[15] แตกต่างกัน ดังเช่นเครื่องรีดข่อยใช้แรงอัด เครื่องไม้ค้ำใช้การตัดเฉือนและเครื่องไม้แท่งตีใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี

เนื่องจากเครื่องไม้ค้ำใช้มากในการข่อยพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้ในการข่อยเศษพลาสติก หรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางของเครื่องไม้ค้ำ [15]

เครื่องไม้ค้ำซึ่งประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มันคง มีค้ำติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่ วัสดุที่จะค้ำส่งเข้าทางปล่องข้างบน ตรงกลางจะมีเพลาลูกกลิ้งที่มีค้ำติดอยู่กับเรือน 3 ลูก เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีค้ำหมุนจับ และนำไปค้ำกับมีค้ำซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่อง โดยเครื่องจะทำงานช้าๆ ไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ ความเร็วค้ำจะอยู่ระหว่าง 12-14 m/s ระยะห่างระหว่างมีค้ำและมีค้ำอยู่กับที่ประมาณ 0.25-0.5 mm เครื่องไม้ค้ำมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 10 kg/h จนถึง 2500 kg/h ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เครื่องจักรแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder)

สกรูของเครื่องจักรจะมี 1 หรือ 2 ไร่ (Flights) เป็นเกลียวตลอดความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก (Outside diameter) ของไร่จะคงที่ตลอดความยาวซึ่งจะพอดีกับกระบอก (Barrel) โดยรูท (Root) และแกนกลาง (Core) จะเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ทำให้ช่องว่างของเกลียว (Spiralling channel) มีการเปลี่ยนแปลงความลึก (Depth) โดยทั่วไปความลึกของช่องว่าง (Channel depth) จะลดลงจากปลายส่วนป้อน (Feed) ถึงหัวคายน้ (Die) เพื่อเพิ่มความดันในการอัดรีดและพาพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังหัวคายน้ สกรูแบ่งออกเป็น 3 ส่วนซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกัน ไม่รวมส่วนของคายน้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [16]

(1) ส่วนป้อน (Feed zone)

มีหน้าที่ให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ก่อน (Preheat) และส่ง (Convey) ไปยังส่วนต่อไป ความสูงของสกรูคงที่และความยาวของส่วนนี้จะต้องให้แน่ใจว่าอัตราการป้อนไปข้างหน้าถูกต้อง ไม่น้อยหรือมากเกินไป ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของพอลิเมอร์

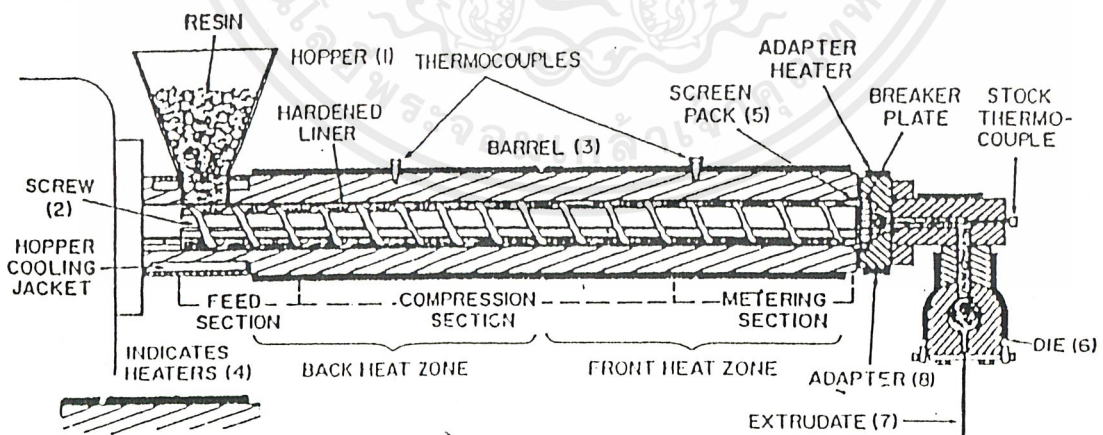
(2) ส่วนอัด (Compression zone vs transition zone)

ความลึกของช่องว่าง (Channel depth) จะลดลง โดยมีหน้าที่ดังนี้ คือ

- ไล่อากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพลาสติก
- เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังกระบอก ทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง
- เปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เมื่อการหลอมเหลวเป็นไปอย่างเหมาะสม

(3) ส่วนผสม (Metering zone)

ความลึกของสกรู (Screw depth) คงที่ ทำหน้าที่หลอมให้เป็นเนื้อเดียวและป้อนให้คายน้ พอลิเมอร์มีคุณภาพเดียวกันที่อุณหภูมิและความดันคงที่



รูปที่ 2.6 ส่วนต่างๆของเครื่องจักรแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [16]

หัวคายน (Die-zone)

เป็นส่วนสุดท้ายของการอัดรีด ประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่เป็นรูๆ (Perforated steel plate) เรียกว่า เบรคเกอร์ เพลท (Braker plate) และตะแกรง (Sieve) จำนวน 2-3 ชั้น ที่ทำจากลวดอยู่ด้านใน (ด้านสกรู) ทั้งสองส่วนทำหน้าที่

- แยกวัสดุที่มีขนาดใหญ่เกินไปออก เช่น ผุ่น พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นเจล สิ่งแปลกปลอม
- ปล่อยความดันที่เกิดจากปั๊มและส่วนผสม (Metering)
- ปรับความจำจากการหลอม

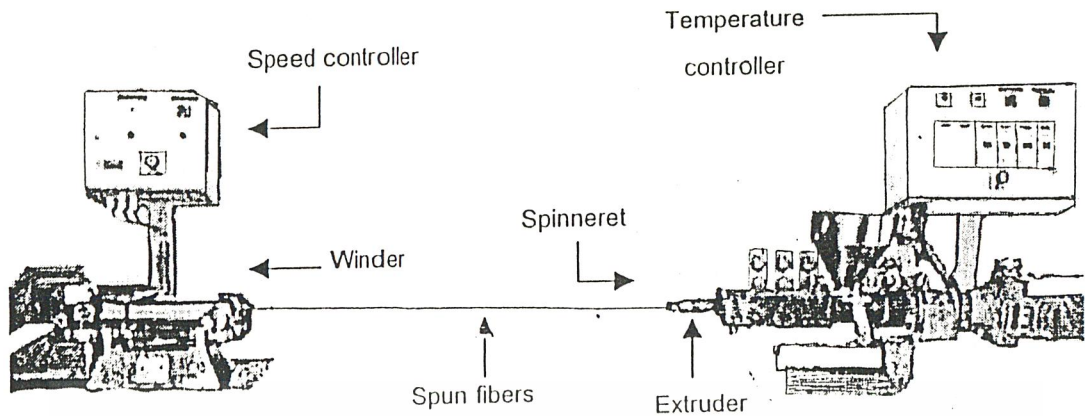
หัวคายนสำหรับเส้นใย (die spinneret)

เส้นใยพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ เตรียมโดยกระบวนการหลอม เส้นใยที่มีหัวคายนสำหรับเส้นใย (spinneret die) มีลักษณะเป็นวงกลม 14 รู และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หัวคายนสำหรับเส้นใย (die spinneret)

เส้นใยหลอมจะออกมาจากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวซึ่งหมุนในแนวขวางและหล่อเย็นโดยใช้อากาศ จากนั้นเส้นใยจะแข็งตัวและถูกม้วนเก็บที่ความเร็วในการหมุนต่าง ๆ กัน กระบวนการม้วนเก็บเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.8



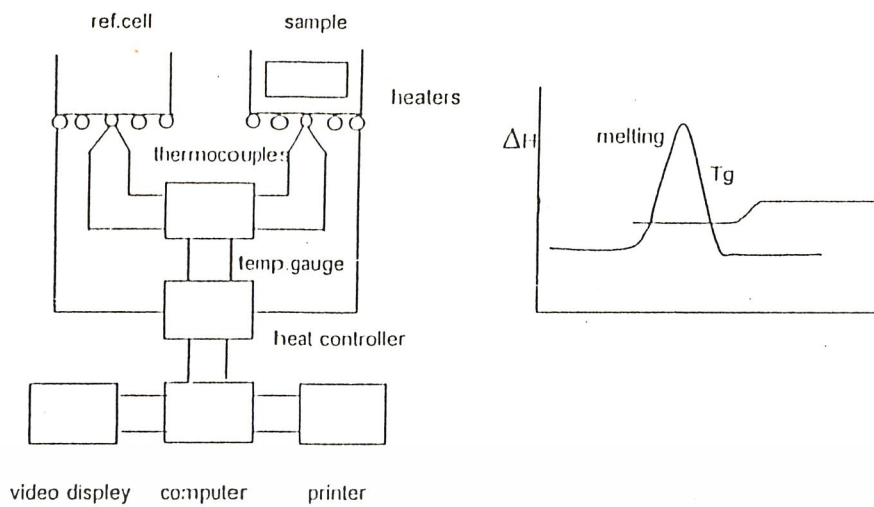
รูปที่ 2.8 กระบวนการม้วนเก็บเส้นใยจากเครื่องจักรรีดเกลือยวหนอนเดี่ยว

2.5.3 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

ในกรณีนี้ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องกับสารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกัน แล้ววัดอัตราการไหลความร้อน หลักการของเทคนิคนี้อธิบายดังรูป 2.9 [18] สารตัวอย่างจะถูกวางอยู่ในกล่องโลหะที่มีความเสถียรทางความร้อนสูง ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากนั้นตัวควบคุมความร้อน (Heat Controller) จะแก้ไขความแตกต่างนี้โดยการให้ความร้อนแก่สารที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งความร้อนที่ให้จะถูกวัด ทำให้ทราบว่าการไหลความร้อนที่ตัวอย่างดูดซับหรือคายออกมาโดยการคำนวณเทคนิค DSC จะได้กราฟดังแสดงในรูป 2.9 [18] ทำให้ทราบสมบัติของพอลิเมอร์ ดังนี้

1. พิกัดความจุความร้อนกับอุณหภูมิหรือเวลาได้จากการวัดความร้อนของการหลอมเหลว ทำให้ทราบวัฏภาคผลึก วัฏภาคของเหลวผลึก ปริมาณความเป็นผลึก เป็นต้น
2. การวัดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) บ่งบอกลักษณะของสารช่วยผสมและอายุการใช้งาน (aging)
3. ความร้อนของปฏิกิริยา ใช้ศึกษาการเสื่อมคุณภาพ (Degradation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

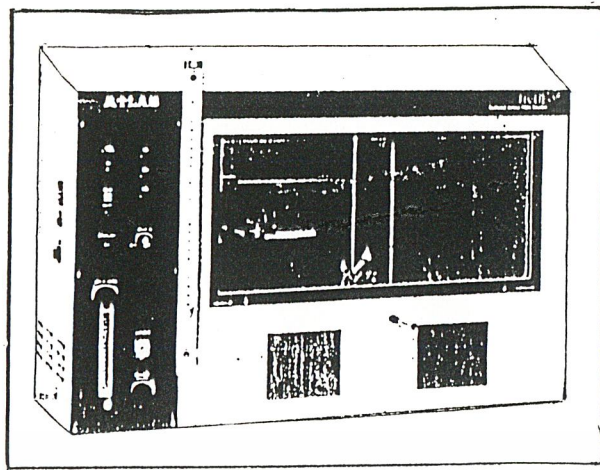


รูปที่ 2.9 อุปกรณ์เครื่องคิดฟิโอะเรนเซียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) [18]

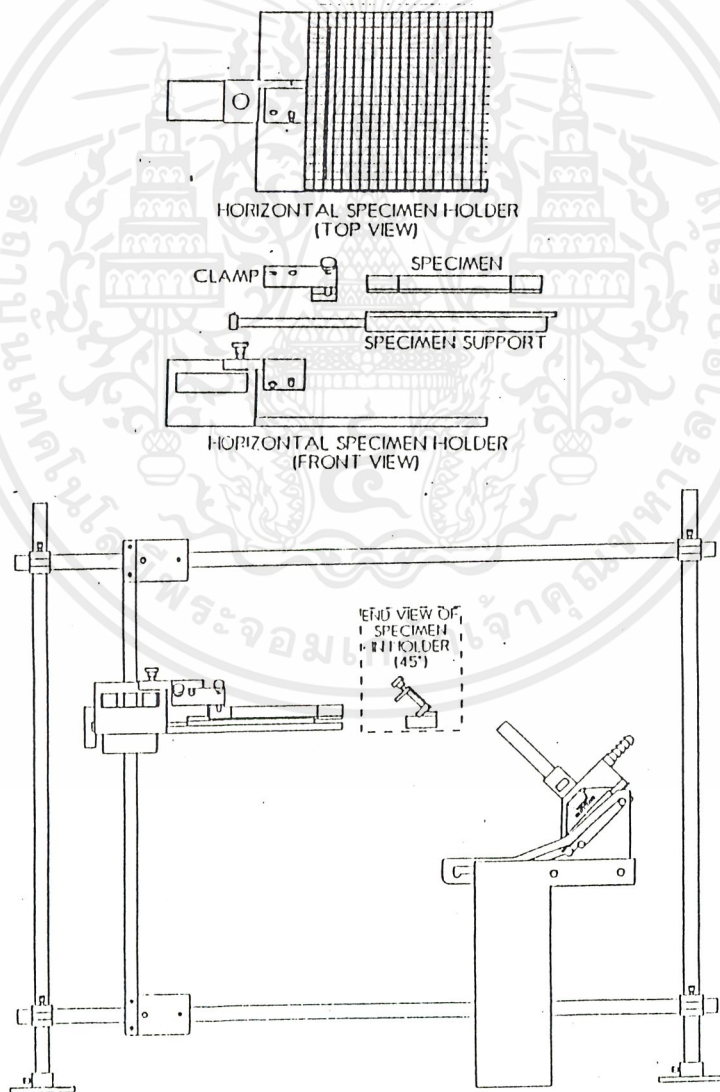
ในกรณีนี้ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องกับสารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกัน แล้ววัดอัตราการไหลความร้อน หลักการของเทคนิคนี้อธิบายดังรูป 2.9[18] สารตัวอย่างจะถูกวางอยู่ในถ່องโลหะที่มีความเสถียรทางความร้อนสูง ใช้เทอร์โมคัพเพิลวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากนั้นตัวควบคุมความร้อน (Heat Controller) จะแก้ไขความแตกต่างนี้โดยการให้ความร้อนแก่สารที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งความร้อนที่ให้อาจถูกวัด ทำให้ทราบว่อัตราการความร้อนที่ตัวอย่างดูดซับหรือคายออกมาโดยการคำนวณ

2.5.4 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้

วิธีการทดสอบทำโดยให้ตัวจับ(clamp)จับแท่งพลาสติกในแนวราบโดยให้เอียงทำมุม 45° กับแนวราบ ถ้าพลาสติกเกิดการโค้งงอได้อาจจะช่วยพยุงตัวชิ้นงานด้วยตะแกรง และมีตะเกียงเบนเสนอยู่บริเวณปลายแท่งพลาสติกอีกด้านหนึ่งโดยให้ตะเกียงเบนเสนเอียงทำมุม 45° กับแนวราบ ถ้าพลาสติกไม่ติดไฟ เรียกว่า “ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning)” ถ้าพลาสติกติดไฟจะต้องวัดอัตราการเกิดเปลวไฟในหน่วยเซนติเมตรต่อวินาทีและรายงานผลเป็น “อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)” ถ้าติดไฟเพียงครั้งทางแล้วหยุดให้รายงานเป็น “สามารถดับได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing)” และรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นนิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.11[19] และเครื่องมือที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.10[19]



รูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการเผาไหม้ [19]



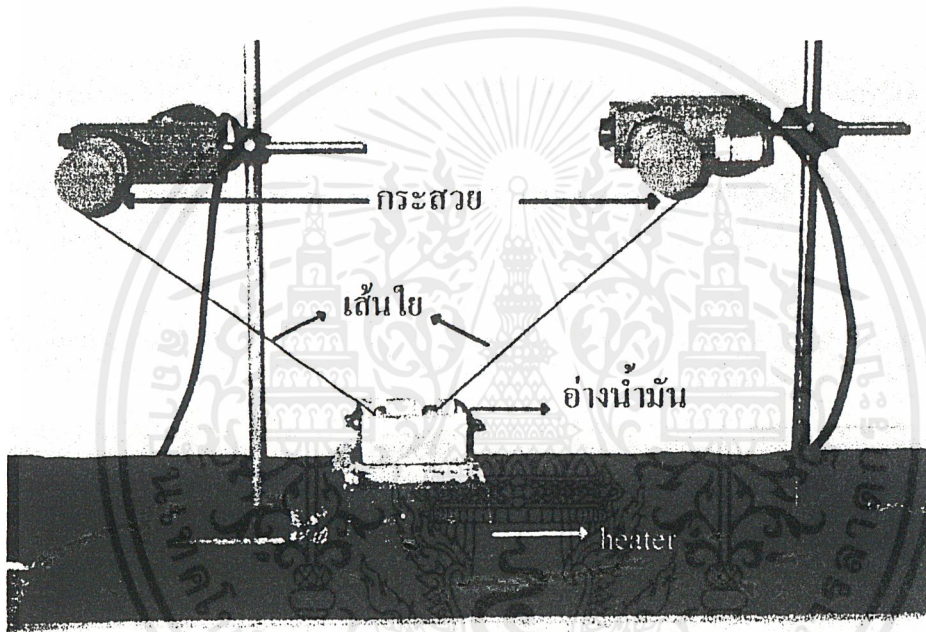
รูปที่ 2.11 การทดสอบหาอัตราการเผาไหม้ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในการดิ่งยัด

วิธีการทดลองทำโดยใช้กระสวยไม้วนเก็บเส้นใยทางค้ำช้ายซึ่งจะมีอัตราเร็วที่ควบคุมด้วยมอเตอร์ต่ำกว่าทางด้านขวา จากนั้นนำเส้นใยผ่านลงในอ่างน้ำมันที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ hot plate แล้วไม้วนเก็บเส้นใยด้วยกระสวยทางด้านขวาที่มีอัตราเร็วมอเตอร์สูงกว่าทางด้านซ้าย วัดความยาวก่อนดิ่งยัดและหลังดิ่งยัด รายงานผลเป็นอัตราการดิ่งยัดในหน่วย m/m โดยคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$\text{อัตราส่วนการดิ่งยัด} = \frac{\text{ความยาวเส้นใยหลังดิ่งยัด(m)}}{\text{ความยาวเส้นใยก่อนดิ่งยัด(m)}} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการดิ่งยัด

บทที่ 3

การวิจัยและดำเนินงาน

3.1 สารเคมี

3.1.1 Recycled high-density polyethylene bottles (R-HDPE) เกรดทางการค้าทั่วไป

3.1.2 Phosphorus flame retardant ของบริษัท Great Lake Chemical Cooperation

ชื่อทางการค้า : REOFOS TPP Batch 723174 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารช่วยหน่วงการติดไฟฟอสฟอรัสไตรฟีนิลฟอสเฟตที่ใช้

สมบัติที่สำคัญ	ค่าที่ได้
ความเป็นกรด(H_3PO_4)(%w/w)	0.006
จุดที่เป็นผลึก (°C)	49.0
ปริมาณฟีนอลอิสระ (%w/w)	0.004
ลักษณะ	ของแข็งสีขาว
จุดหลอมเหลว(°C)	47-49
จุดเดือด(°C)	> 250
อุณหภูมิการเสถียรภาพ (°C)	> 250
อุณหภูมิจุดวาบไฟ (°C)	> 220

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ของบริษัท INTRO BX-18

3.2.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pelletizer) ของบริษัท Bosco A6000

3.2.3 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS รุ่น

LR30K

3.2.4 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

3.2.5 เครื่องดึงยึดเส้นใยด้วยเทคนิค hot-drawing

3.2.6 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้ (Horizontal Vertical Flame Chamber) ของบริษัท ATLAS

ELECTRIC DEVICES COMPANY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE)

3.3.1.1. การเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Recycled Polyethylene ;R-HDPE)

นำขวดพลาสติกขุ่นมาล้างให้สะอาด ตากให้แห้ง นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pelletizer) เพื่อทำการย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2 ขั้นตอนการดึงยึดเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE)

3.3.2.1. ขั้นตอนการดึงยึดเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ (R-HDPE)

- ◆ นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมาทำการดึงยึดเส้นใยด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว
- ◆ หาสภาวะในการดึงยึดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวในโซนที่ 4 (หัวคาย) $150-190^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.2
- ◆ หาสภาวะในการดึงยึดที่เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27, และ 12.93 m/min ดังแสดงในตารางที่ 3.3
- ◆ นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) และสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวในโซนที่ 4 (หัวคาย) สำหรับเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min

ครั้งที่	อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) ($^{\circ}\text{C}$)
1	160
2	170
3	180
4	190

ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27, และ 12.93 m/min ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอนเดี่ยวสำหรับเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว โดยใช้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนเดี่ยวในโซนที่ 4(หัวคาย)170°C

อัตราเร็วสกรู(rpm)	อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย(m/min)				
20	4.69	6.98	8.75	10.27	11.90
30	4.69	6.98	8.75	10.27	12.93
40	4.69	6.98	8.75	10.27	12.93
50	4.69	6.98	8.75	10.27	12.93

3.3.2.2. เปรียบเทียบผลของเส้นใย R-HDPE ในสถานะต่างๆ เพื่อนำสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าไปพัฒนาเส้นใยด้วยเทคนิคการดึงยืดขณะร้อน (hot-drawing)

3.3.3 ขั้นตอนการพัฒนาสมบัติของเส้นใย

3.3.3.1. นำเส้นใยที่ได้ไปทำการดึงยืดด้วยเทคนิคการดึงยืดขณะร้อน (hot-drawing) ทำการหาสถานะในการดึงที่เหมาะสมโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการดึงยืด และอุณหภูมิของน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการดึงยืดและอุณหภูมิของน้ำมันในการดึงยืด

อุณหภูมิน้ำมัน(°C)	อัตราส่วนการดึงยืด		
70	1.5	2.4	3.2
80	1.5	2.4	3.2
90	1.5	2.4	3.2
100	1.5	2.4	3.2

3.3.3.2. นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) และสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ขั้นตอนการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

3.3.4.1 ทำการเติมสารหน่วงติดไฟ (flame retardant) ในปริมาณ 1-4 phr ในสถานะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนอนเคียวที่ได้จากข้อ 3.3.2

3.3.4.2 นำเส้นใยที่ได้ไปดึงยืดในสถานะที่ได้จากข้อ 3.3.3

3.3.4.3 นำเส้นใยที่ได้จากข้อ 3.3.4.1 และข้อ 3.3.4.2 ไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC และสมบัติของสารช่วยหน่วงติดไฟด้วยเครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้

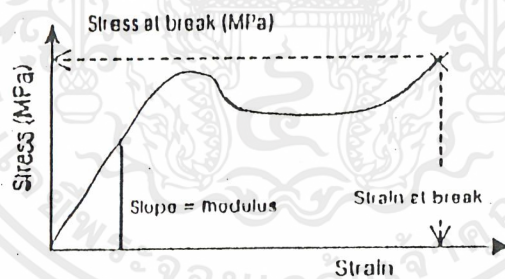
3.3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.5.1 สมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

สมบัติทางเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (MPa) เบร็คเซ้นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%) แรงดึง ณ จุดขาด (N) และ โมดูลัสเริ่มต้นที่ 1 % ความเครียด (MPa) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (ASTM D3822-91) ใช้ 10 spun fibers ทดสอบในสถานะดังนี้

Load cell	1	kN
Test speed	240	mm/min
Gauge length	100	mm

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงดังรูปที่ 3.1[24]



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด[24]

3.3.3.5.1 ความแข็งแรงดึง

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึงคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

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

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

F = แรงดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่ตัดขวางของชิ้นงาน(mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.5.2 มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง มอดูลัสที่ 1% ความเครียดคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

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

เมื่อ E = มอดูลัสที่ 1% ความเครียด (MPa หรือ N/mm^2)

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

ϵ = ความเครียดที่ 1%

3.3.3.5.3 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

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

เมื่อ EB = เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

L = ความยาวชิ้นงานหลังการดึงยืด ณ จุดขาด (mm)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) = 100 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

3.3.5.2 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC)

ศึกษาสมบัติการหลอมเหลวและการตกผลึกของ HDPE โดยใช้อัตราการส่งผ่านความร้อนของตัวอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ตัวอย่างเส้นใยประมาณ 5-10 mg สแกนอุณหภูมิจาก 50 °C ถึง 180 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 °C/min โดยคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึก(%) ได้จากสมการที่ 3.6

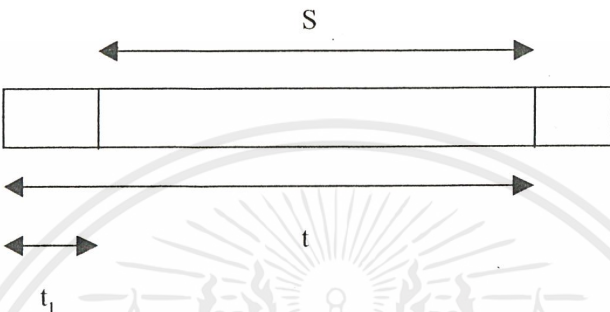
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ΔH_f^o ของ PE = 293 J/g [24]

3.3.5.3 เครื่องทดสอบอัตราการเผาไหม้ (ASTM D635)

ทำการทดสอบหาอัตราการเผาไหม้ โดยใช้ตัวอย่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว 10 ตัวอย่าง จำนวนได้จากสมการที่ 3.7[20]



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

เมื่อ S คือ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด = 7.5 cm

t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก(min)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดที่สอง(min)

เมื่อ อัตราการเผาไหม้ของ PE = 1.52 เซนติเมตร/นาที [20]

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคนเดียว

4.1.1 สมบัติเชิงกล

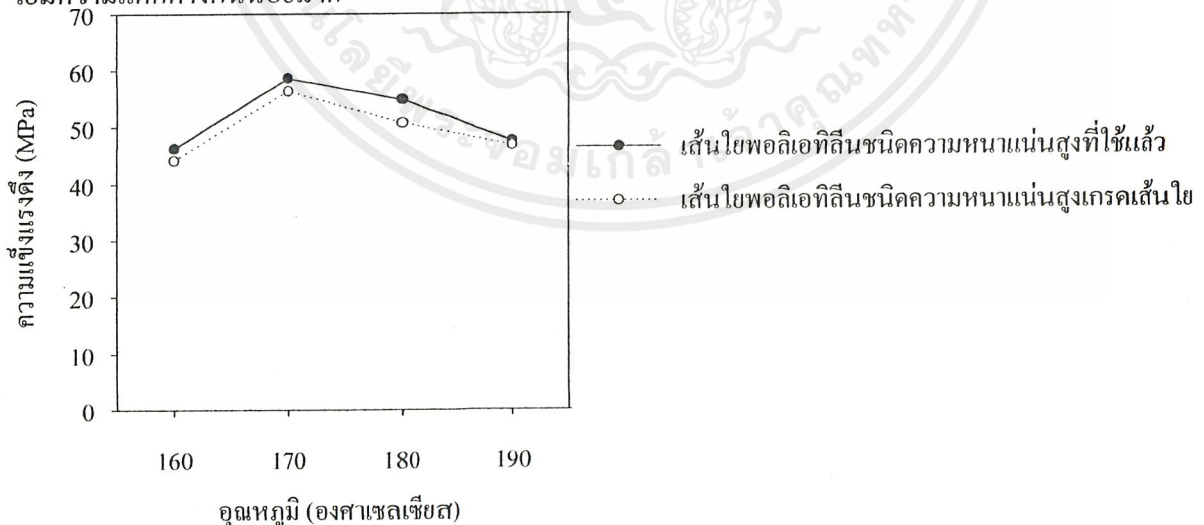
4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิ

กำหนดอัตราเร็วสกรูเท่ากับ 20 rpm และความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยเท่ากับ 12.93 m/min ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) เป็น 160 170 180 และ 190 °C ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C เส้นใยจะมีค่าความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.1) และมอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (รูปที่ 4.2) สูงที่สุดเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 °C พอลิเมอร์มีความหนืดต่ำทำให้ไหลได้ดี แต่มีข้อจำกัดทางเครื่องมือในการปั่นเก็บที่มีอัตราเร็วไม่สูงเพียงพอจึงทำให้เส้นใยหย่อนคั้งนั้นเส้นใยจึงมีการจัดเรียงโมเลกุลไม่ดี และจากกราฟพบว่าเส้นใยที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยจะมีสมบัติคือดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเส้นใยที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเส้นใยที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้พิจารณาได้จากค่าดัชนีการหลอมไหล ดังนี้

MFI ของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใย(F-HDPE) = 0.8

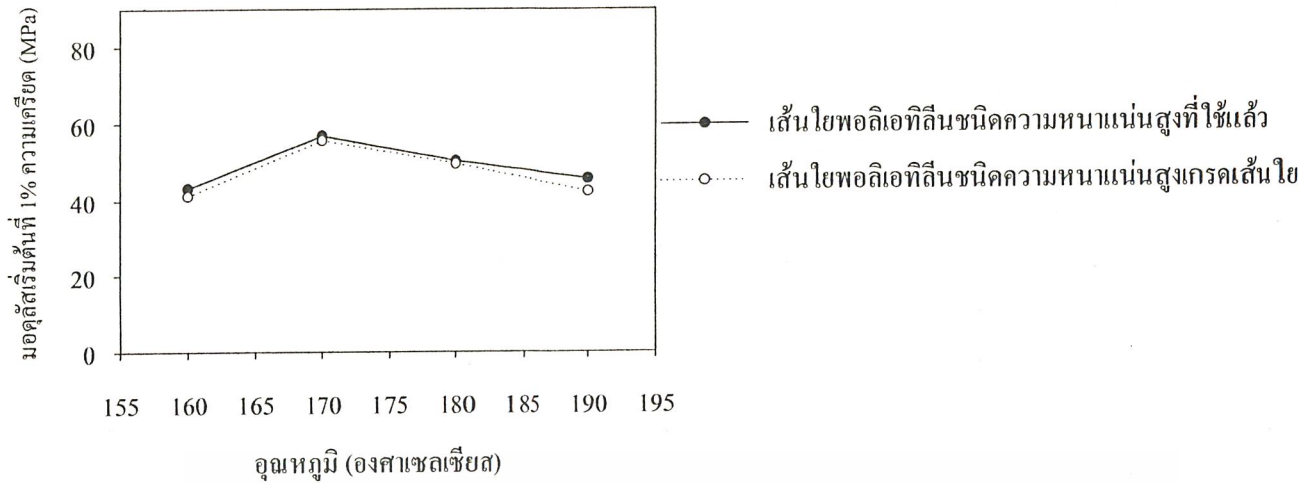
MFI ของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่(R-HDPE) = 0.3 - 0.4[24]

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.3) เส้นใยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและเกรดเส้นใยไม่มีความแตกต่างกันน้อยมาก

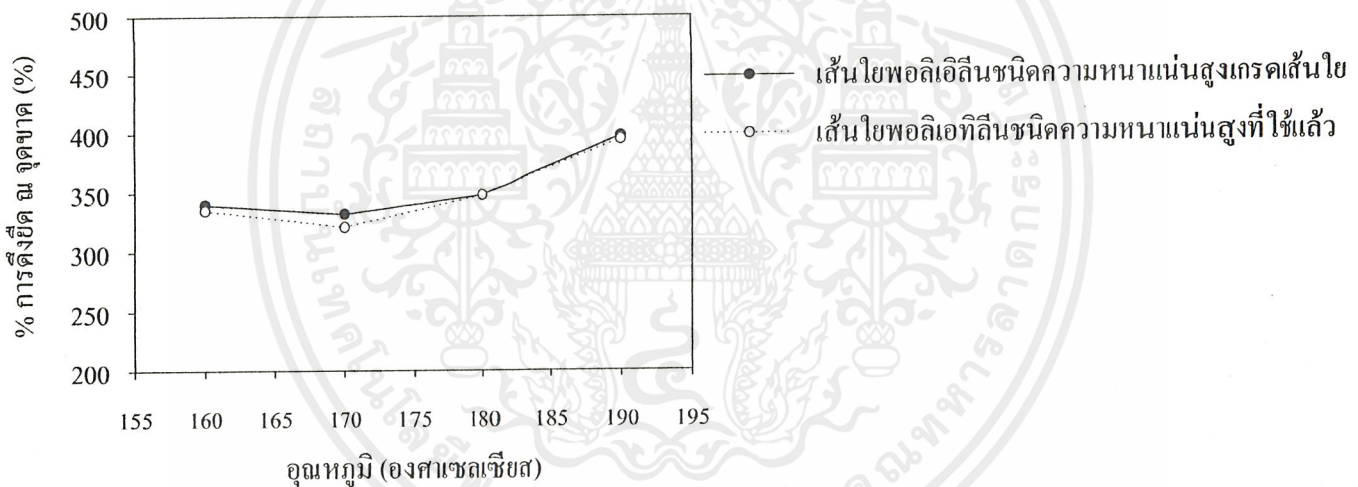


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min



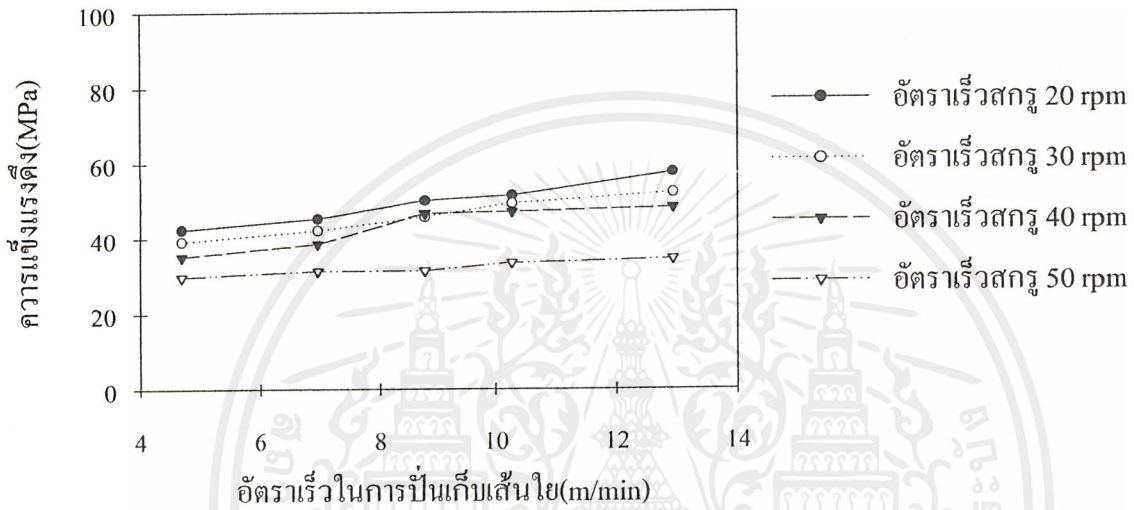
รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใยที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min

4.1.1.2 ผลของอัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย

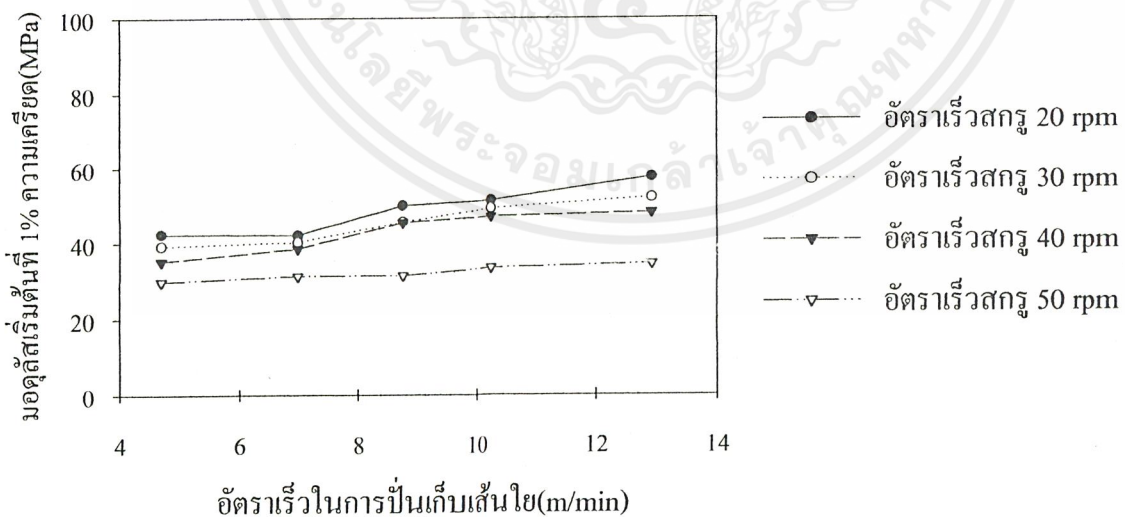
กำหนดอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคाय) 170 °C ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40, และ 50 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 และ 12.93 m/min ผลแสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 จากกราฟพบว่าถ้าให้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่และเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู พบว่าที่อัตราเร็วสกรูต่ำเส้นใยมีความแข็งแรงดึง(รูปที่4.4) มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (รูปที่ 4.5) เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วสกรูต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ผ่านออกจากหัวค้ายได้ช้าทำให้เส้นใยไม่หย่อนเมื่อทำการปั่นเก็บ ดังนั้นเส้นใยจึงมีการจัดเรียงโมเลกุลได้มาก ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.6) ลดลง เนื่องจากเส้นใยมีการจัดเรียงโมเลกุลดี จึงมีการเกี่ยวพันของสายโซ่มาก ดังนั้นเมื่อเส้นใยได้รับแรงดึงจึงไม่เกิดการดึงยึดมากทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีลดลงและถ้ากำหนดอัตราเร็วสกรูให้คงที่และเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย พบว่าเส้นใยมีค่าความแข็งแรงดึง(รูปที่ 4.4) มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (รูปที่ 4.5) เพิ่มขึ้นและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.6) ลดลงตามความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากถ้าความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยมีค่ามากจะทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเพิ่มขึ้น[25]

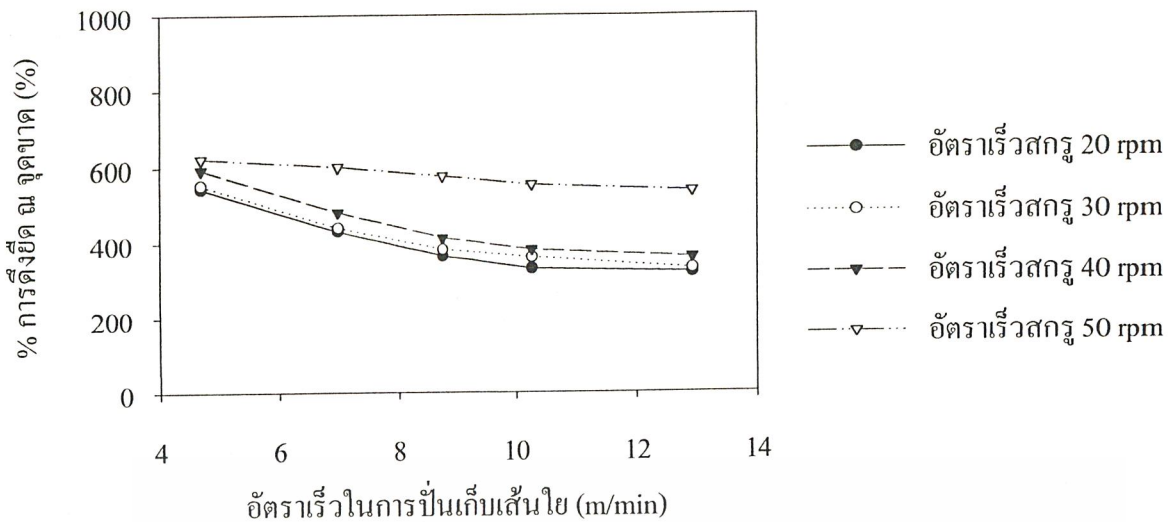


รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27 และ 12.93 m/min กับอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm



รูปที่ 4.5 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27, และ 12.93 m/min กับอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เปรอ์เซ็นต์การตั้งยึกณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 4.69, 6.98, 8.75, 10.27, และ 12.93 m/min กับอัตราเร็วสกรู 20, 30, 40 และ 50 rpm

4.1.2 สมบัติทางความร้อน

4.1.2.1 ผลของอุณหภูมิโดยใช้อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min จากตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว (R-HDPE) จะอยู่ในช่วง 133-134 °C แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึก พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณความเป็นผลึกของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.1, ค.2, ค.3 และ ค.4 ในภาคผนวก ค

อุณหภูมิ (°C)	Tm (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
160	135	166	57
170	134	166	57
180	134	167	57
190	133	166	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ผลของอัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยโดยใช้อุณหภูมิโซนที่4 (หัวคาย)

170 °C

จากตารางที่ 4.2 ถ้าพิจารณาที่อัตราเร็วสกรูคงที่แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึกมีค่าไม่แตกต่างกันซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึกไม่ขึ้นกับอัตราเร็วในการปั่นเก็บ เมื่อพิจารณาที่อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วสกรู พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวไม่ขึ้นกับอัตราเร็วสกรูเช่นกัน แต่ปริมาณความเป็นผลึกขึ้นกับอัตราเร็วสกรู คือที่อัตราเร็วสกรู 40 rpm มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าที่อัตราเร็วสกรู 20 rpm เนื่องจากที่อัตราเร็วสกรู 20 rpm ทำให้พอลิเมอร์ที่ผ่านหัวคายออกมาได้ช้า ทำให้เส้นใยไม่หย่อนเมื่อทำการปั่นเก็บจึงทำให้โมเลกุลของเส้นใยพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวมากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลในข้อ 4.1.1.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ก.5 , ก.6 , ก.7 และ ก.8 ในภาคผนวก ก

อัตราเร็วสกรู (rpm)	อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย (m/min)	T _m (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
40	8.75	134	165	57
	12.93	135	166	57
20	8.75	134	173	59
	12.93	134	174	59

สรุปเมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดแล้ว สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นเก็บเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วของเครื่องจักรชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว คือ อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min

4.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการดึงยึดในอ่างน้ำมันร้อน(Hot-drawing)

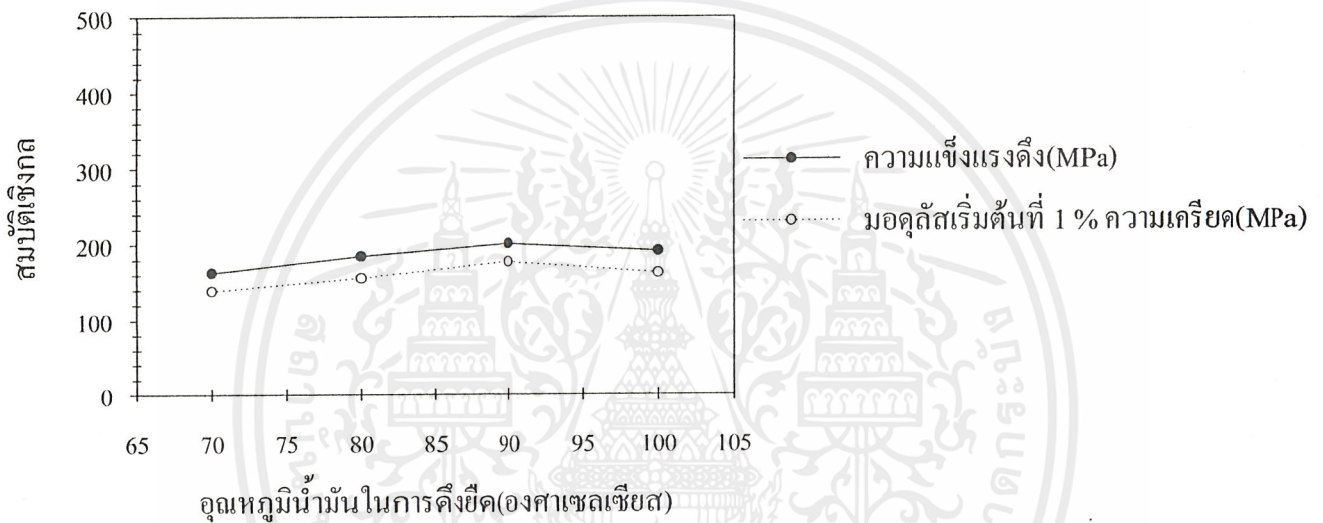
กำหนดเส้นใยที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วของเครื่องจักรชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว คือ อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min นำมาดึงยึดในอ่างน้ำมันร้อนแล้วศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

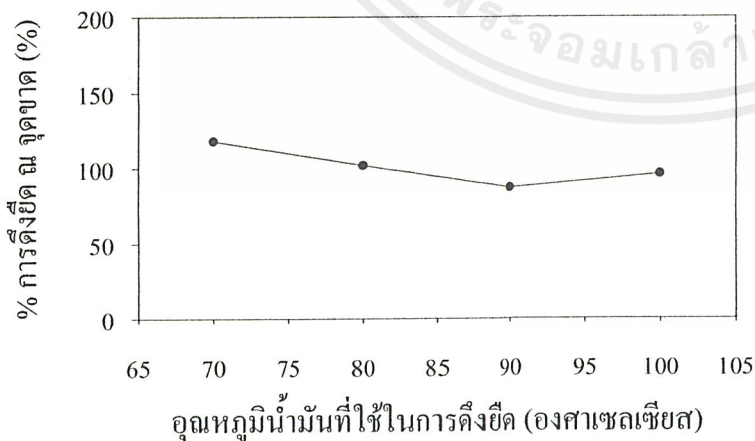
4.2.1 สมบัติเชิงกล

4.2.1.1 ผลของอุณหภูมิ

กำหนดให้ใช้อัตราส่วนการดึงยึด 3.2 และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมันเป็น 70 , 80 ,90 และ 100 °C ผลแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 จากกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C เส้นใยที่ได้จะมีความแข็งแรงดึง มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียดเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดลดลงดีกว่าอุณหภูมิ 70 และ 80 °C เพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิของน้ำมันไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล แต่ที่อุณหภูมิ 100 °C เส้นใยมีความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียดมีค่าลดลง เนื่องจากในขั้นตอนนี้ต้องการให้เส้นใยอ่อนตัวแล้วทำการดึงยึดเพื่อให้เกิดการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลதாகขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 100 °C เส้นใยเริ่มเกิดการหลอมตัวจึงทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวไม่ดี



รูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้อัตราส่วนการดึงยึด 3.2 และอุณหภูมิน้ำมันในการดึงยึด 70 , 80 , 90 และ 100 °C

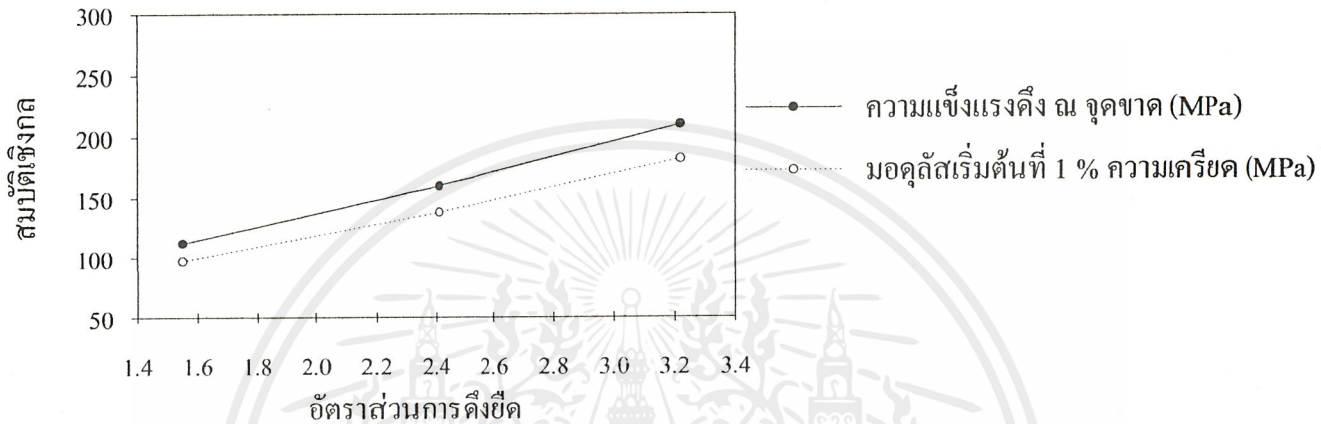


รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้อัตราส่วนการดึงยึด 3.2 และอุณหภูมิน้ำมันในการดึงยึด 70 , 80 , 90 และ 100 °C

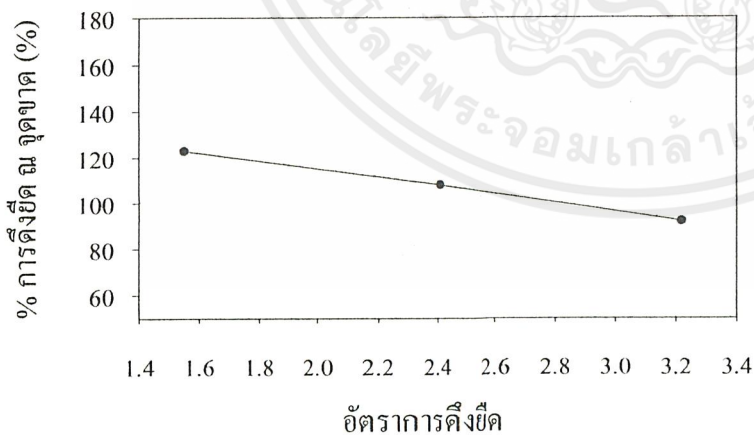
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 อัตราส่วนการคั่งยัด

กำหนดให้ใช้อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยัด 90°C และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการคั่งยัดเป็น 1.5, 2.4 และ 3.2 ผลแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากกราฟรูปที่ 4.9 พบว่าเส้นใยที่ได้จากการคั่งยัดที่อัตราส่วนการคั่งยัด 3.2 มีความแข็งแรงดึง มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียดเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การคั่งยัด ณ จุดขาดลดลงดีกว่าเส้นใยจากการคั่งยัดที่อัตราส่วนการคั่งยัดอื่นๆ เนื่องจากถ้าใช้อัตราส่วนการคั่งยัด 3.2 ทำให้เส้นใยเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรงได้มาก



รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วโดยการใช้อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยัด 90°C และใช้อัตราส่วนการคั่งยัด 1.5, 2.4 และ 3.2



รูปที่ 4.10 เปอร์เซนต์การคั่งยัด ณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วโดยการใช้ อุณหภูมิน้ำมันในการคั่งยัด 90°C และใช้อัตราส่วนการคั่งยัด 1.5, 2.4 และ 3.2

4.2.2 สมบัติทางความร้อน

4.2.2.1 ผลของอุณหภูมิโดยใช้อัตราส่วนการดึงยืด 3.2

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) และปริมาณความเป็นผลึกของแต่ละอุณหภูมิน้ำมันในการดึงยืดมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิน้ำมันในการดึงยืดไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.9, ค.10, ค.11 และ ค.12 ในภาคผนวก ก

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
70	134	164	56
80	133	163	56
90	134	164	56
100	133	161	55

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) และปริมาณความเป็นผลึกของแต่ละอุณหภูมิน้ำมัน 70 , 80 และ 90 $^{\circ}\text{C}$ ในการดึงยืดมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าอุณหภูมิน้ำมันในการดึงยืดไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึก แต่ที่อุณหภูมิน้ำมัน 100 $^{\circ}\text{C}$ พบว่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้เส้นใยเกิดการหลอมตัว

4.2.2.2 ผลของอัตราส่วนการดึงยืดโดยใช้อุณหภูมิน้ำมันในการดึงยืดที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}\text{C}$

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการดึงยืดเส้นใยจะทำให้เส้นใยมีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดึงยืดทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเพิ่มขึ้น[22] ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.13 และ ค.14 ในภาคผนวก ก

เส้นใย	T _m (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
อัตราส่วนการดึงยืด 3.2	134	166	57
ไม่ทำการดึงยืด	134	164	56

สรุปเมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดแล้ว สภาวะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการดึงยืดเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้ในอ่างน้ำมันร้อน(hot-drawing) คือ อุณหภูมิน้ำมันในการดึงยืด 90 °C และอัตราส่วนการดึงยืด 3.2

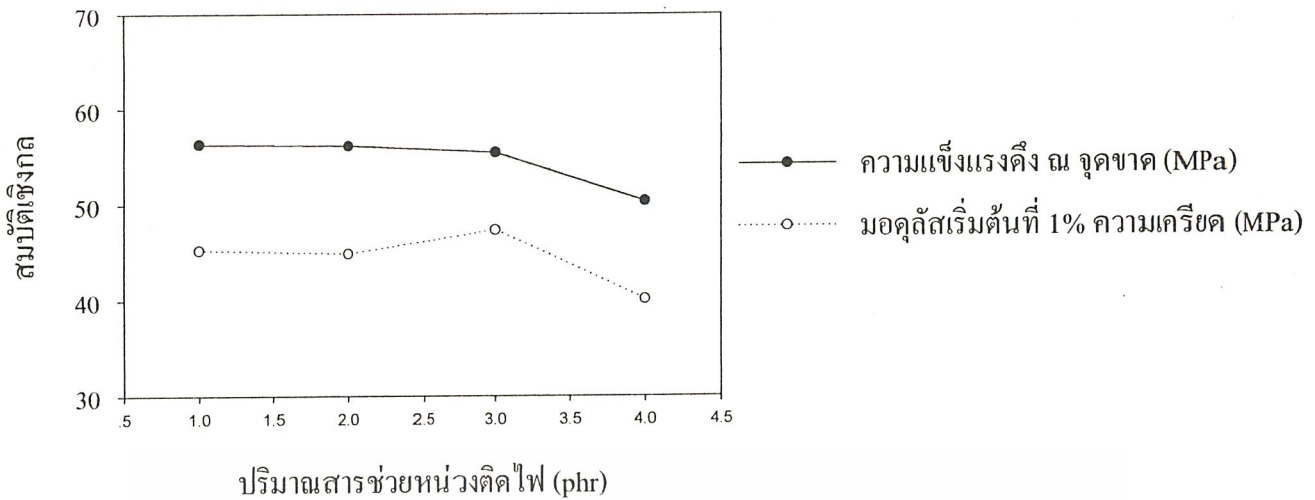
4.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสม

การเติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 1 , 2 , 3 และ 4 phr ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) แล้วนำไปผ่านกระบวนการปั่นเส้นใยที่สภาวะของเครื่องจักรชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min โดยมีการศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

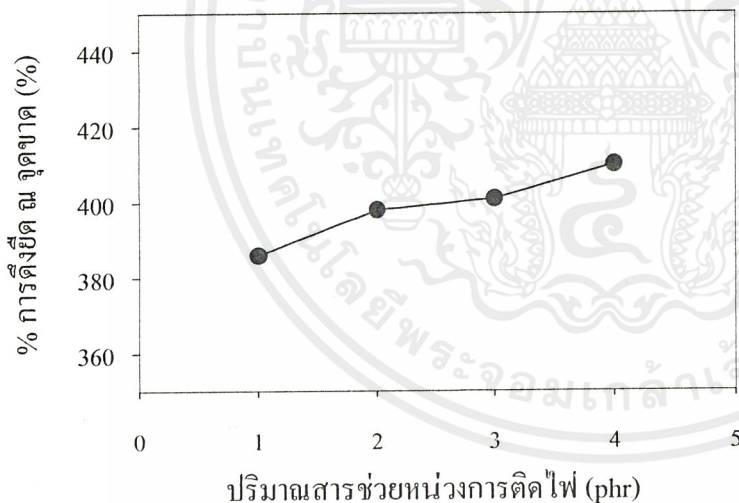
4.3.1 สมบัติเชิงกล

4.3.1.1 เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใย

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อใส่สารช่วยหน่วงการตีไฟจะมีผลทำให้ความแข็งแรงดึง มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียดของเส้นใยมีค่าต่ำลงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารช่วยหน่วงการตีไฟไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุล



รูปที่ 4.11 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วโดยการใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170°C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min



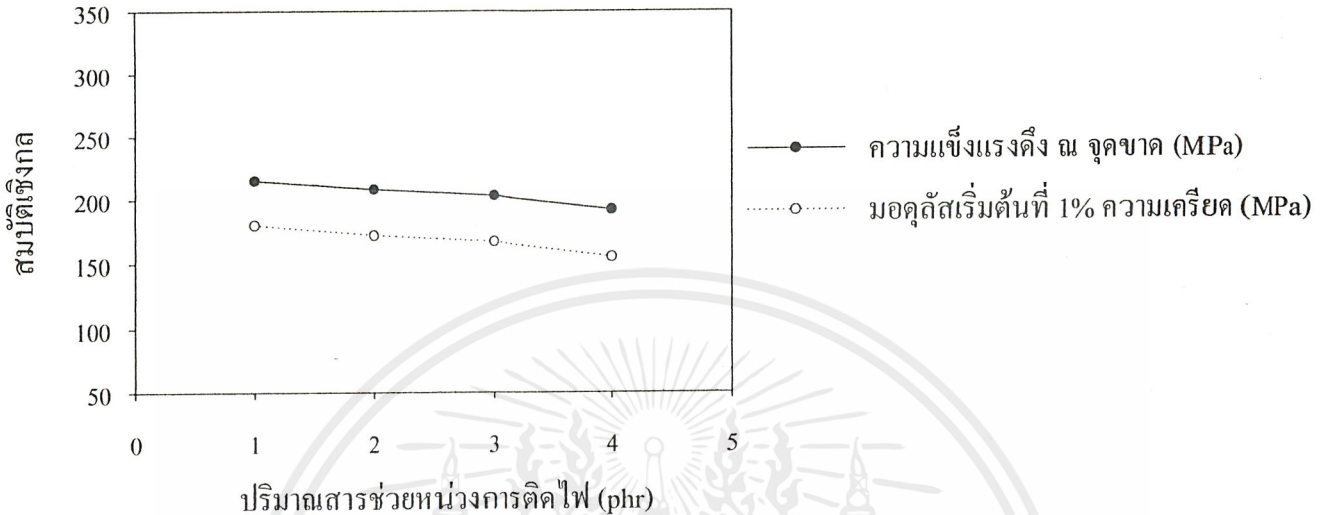
รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วโดยการใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงติดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170°C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

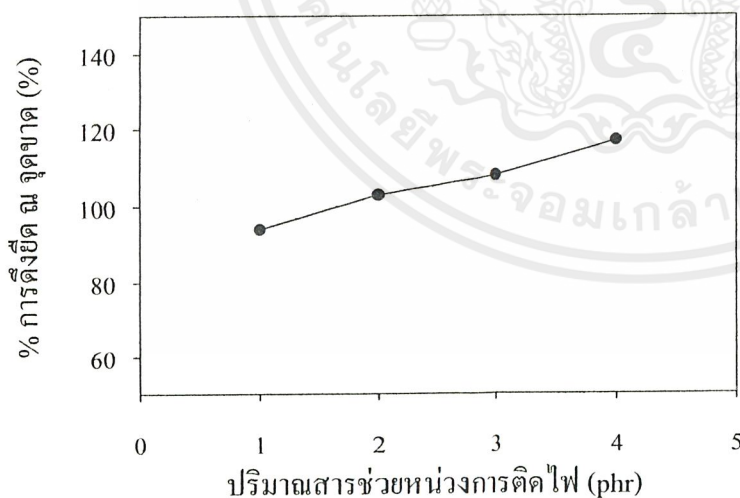
4.3.1.2 เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยแล้วนำมาทำการดึงยืด

เมื่อใส่สารช่วยหน่วงการคิดไฟจะมีผลทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสลดลงผลแสดงในข้อ

4.3.1.1 และเมื่อนำเส้นใยมาดึงยืดทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่เพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่ลดลงเนื่องจากการดึงยืดในน้ำมันร้อนทำให้เส้นใยเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.13 ค่ามอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa) และความแข็งแรงดึง (MPa) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงคิดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170°C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการดึงยืดต่อในน้ำมันร้อน (hot-drawing) ที่อุณหภูมิน้ำมัน 90°C และอัตราส่วนการดึงยืด 3.2



รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วโดยการใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงคิดไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่สภาวะการปั่นเส้นใยอุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170°C , อัตราเร็วสกรู 20 rpm และใช้อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ทำการดึงยืดต่อในน้ำมันร้อน (hot-drawing) ที่อุณหภูมิน้ำมัน 90°C และอัตราส่วนการดึงยืด 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบผลเส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยแล้วนำมาทำการดัดยัดกับเส้นใยที่ไม่ได้นำมาดัดยัดต่อ พบว่าเส้นใยที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟจะทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงแต่นำเส้นใยมาผ่านกระบวนการดัดยัดทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียดสูงขึ้นมาก แม้จะไม่ดีเท่ากับเส้นใยที่ไม่ได้ใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟแล้วนำมาทำการดัดยัด เนื่องจากสารช่วยหน่วงการติดไฟอาจเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเส้นใยจึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

4.3.2 สมบัติทางความร้อน

4.3.2.1 เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใย

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลงและถ้าใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟในปริมาณมากขึ้นก็จะทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลงมากขึ้น เนื่องจากสารช่วยหน่วงการติดไฟไปขัดขวางการเกิดผลึก แต่ถ้าพิจารณาอุณหภูมิของการหลอมเหลวพบว่าอยู่ในช่วง 133 -134 °C แสดงว่าปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) DSC thermogram แสดงดังรูปที่ ค.15 , ค.16 , ค.17 ค.18 และ ค.19 ในภาคผนวก ค

ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ (phr)	Tm (°C)	ΔH (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
0	134	164	56
1	133	160	55
2	134	156	53
3	134	154	53
4	134	151	51

4.3.2.2 เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยแล้วนำมาทำการดัดยัด

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลงและถ้าใส่สารช่วยหน่วงการติดไฟเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง แต่สารช่วยหน่วงการติดไฟจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมเหลว

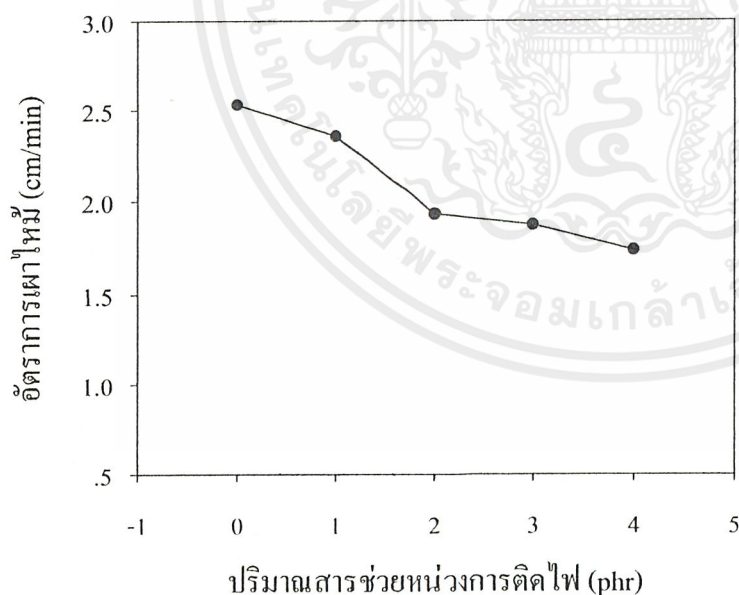
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

DSC thermogram แสดงคั่งรูปที่ ค.20 , ค.21 , ค.22 , ค.23 และ ค.24 ในภาคผนวก ค

ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ (phr)	Tm ($^{\circ}$ C)	Δ H (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (%)
0	134	166	57
1	133	165	56
2	133	160	55
3	133	161	55
4	133	158	54

เมื่อเปรียบเทียบผลในตารางที่ 4.5 กับ 4.6 ที่ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟเท่ากัน พบว่าเส้นใยที่ผ่านการดึงยี่ดมีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของสมบัติทางเชิงกล

4.3.2.3 เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใย



รูปที่ 4.15 ค่าอัตราการเผาไหม้ (cm/min) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช่แล้วโดยการใช้ปริมาณสารช่วยหน่วงตีไฟ 1, 2, 3 และ 4 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟมากขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงเนื่องจากเกิดกลไกของสารช่วยหน่วงการติดไฟดังนี้ สารช่วยหน่วงการติดไฟเป็นสารประเภทฟอสฟอรัสทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระของสายโซ่หลักในวัฏภาคไอและเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดฟอสฟอรัสออกไซด์เคลือบผิวทำให้ผิวของพอลิเมอร์ไม่สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการหาสภาวะที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วในรูปของเส้นใยในกระบวนการปั่นเส้นใยโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยที่ได้ผ่านการดึงยืดแบบร้อนและหาปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสมที่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเส้นใยที่ได้

5.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว

ในการศึกษานี้ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เช่น อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) อัตราเร็วสกรู และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย

จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจาก

- ◆ ที่อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยสูงขึ้น จะทำให้เส้นใยมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเพราะโมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางดึงได้มาก
- ◆ อัตราเร็วสกรูต่ำจะทำให้เส้นใยมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเพราะพอลิเมอร์ออกมาจากหัวคายช้าทำให้เส้นใยไม่หย่อนเมื่อทำการปั่นเก็บดังนั้นเส้นใยจึงมีการจัดเรียงโมเลกุลได้ดี
- ◆ จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วกับเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใย พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถนำขวดพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ได้

5.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดึงยืดเส้นใยแบบร้อน(hot-drawing)

ในการศึกษานี้ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดึงยืดเส้นใย เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเส้นใยให้ดีขึ้นโดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำมันร้อนในการดึงยืดและอัตราส่วนการดึงยืด

จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการดึงยืด 3.2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เนื่องจาก

- ◆ อุณหภูมิของน้ำมันไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย แต่จากผลการทดลองอุณหภูมิ 90 °C ได้เส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าอุณหภูมิอื่นๆ เล็กน้อย

◆ เส้นใยเมื่อได้รับแรงดึงยืดจะทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางการดึง ถ้าอัตราส่วนการดึงมาก โมเลกุลจะเกิดการจัดเรียงตัวได้มากขึ้นด้วย

5.3 ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสม

ในการศึกษานี้ต้องการหาปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสมที่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนมากนัก และยังช่วยทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงด้วย

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟที่เหมาะสม คือ 3 phr เนื่องจาก

◆ สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่มีการผสมสารช่วยหน่วงการตีไฟปริมาณ 3 phr มีค่าอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกับปริมาณ 2 phr แต่สามารถลดอัตราการเผาไหม้ได้มากกว่า ซึ่งถ้าใส่สารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณมากกว่านี้ (4 phr) สมบัติเชิงกลของเส้นใยจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากสารช่วยหน่วงการตีไฟเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ทำให้มีความเป็นผลึกน้อยลง

5.4 ข้อเสนอแนะ

- ◆ ศึกษาถึงสมบัติด้านอื่นๆ เช่น สมบัติทางสัณฐานวิทยา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น
- ◆ ศึกษากระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์ที่ใช้แล้วชนิดอื่น เช่น PET และ PP เป็นต้น
- ◆ ศึกษาถึงการดึงยืดเส้นใยที่อัตราส่วนการดึงยืดสูงกว่านี้เพื่อให้เส้นใยมีสมบัติเชิงกลที่ดีเทียบเท่าเส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรม
- ◆ ศึกษาชนิดของสารช่วยหน่วงการตีไฟชนิดอื่น เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของเส้นใยสังเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Xie. and B. Qu ;Expandable Graphite Systems for Halogen-Free Flame-Retardaing of Polyolefins. I. Flammability Characterization and Synergistic. J.Appl Polym Sci 2001, 80, 1181
- [2] A.M.E. Baker. and A.H.Windle ;The Effeers of Branching and Fibre Drawing on the Crystal Structure of Polyethylene. Polymer 2001, 42,651
- [3] Y.L. Liu, Flame-Retardant Epoxy Resins from Novel Phosphorus-Containing Novolac., Polymer 2001, 42, 3445
- [4] R. Xie ., and B. Qu; Expandable Graphite Systema for Halogen-Free Flame-Retarding of Polyolefins. II. Structures of Instumescent Char and Flame-Retardant Mechanism., J.Appl Polym Sci 2001, 80, 1190
- [5] C. S. Read ., Polyurethane/Poly [bis (Carboxylatophenoxy)Phosphazene] Blends and Their Potential as Flame-Retardant Materials. Polym. Eng.and Sci. 2000, 40, 465
- [6] T.Hobbs. and A.J.Losser., Preparation of High Performance Poly(Ethylene Terephthalate) Fibers : Two-Stage Drawing Using High Pressure CO₂.Polymer 2000, 41, 6223
- [7] Y.KK.Won , Melting and Heat Capacity of Gel-Spun , Ultra-High Molar Mass Polyethylene Fibers. Polymer 2000, 41, 6237
- [8] T.L.Dimetrova , On the Compatibilization of PET/HDPE Blens through a New Class of Copolyesters. Polymer 2000, 41, 6237
- [9] G. Wu , Q Li and J.A. Caculo. Fiber Structure and Properties of Poly (Ethylene-2,6-Naphthalate) Obtained by High-Speed Melt Spinning. , Polymer 2000 , 41 , 8139-8150.
- [10] A. Suzuki , K. Toda and T. Kunugi. Application of a Cycle Zone-Drawing / Zone-Annealing Method to Poly (Ethylene Terephthalate) Fibers. , Polymer 2000, 41 , 6061-6066
- [11] S.H. Chiu and W.K. Wang. Dynamic Flame Retardancy of Polypropylene Filled with Ammonium Polyphosphate , Pentaerythritol and Melamine Additive. , Polymer 39 , 1998 , 1957-1955
- [12] A. Suzuki, T. Kuwabara and T. Kunugi. Application of a Zone-Drawing and Zone-Annealing Method to Poly (Eyhylene-2,6-Naphthalate) Fibres. , Polymer 39, 1998 , 4235-4241.
- [13] ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย , เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542
- [14] A.F. Grand and C.A. Wilkie., Fire Retardancy of Polymeric Materials, Marcel Dekker, New York,2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] รศ.บรรณแดง ศรีนิล, เทคโนโลยีพลาสติก พิมพ์ครั้งที่ 1, ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์กรุงเทพฯ, 2525,13.
- [16] L.S.Gerald . **Exploring the World of the Plastics**. 5th Ed. Bloomington, IL: Mc Knight. 1997.
- [17] G.G. Richard , **Polymer Processing Engineering**. United States: Chapman & Hall. 1995.
- [18] M.J Flokes and P.S Hope , **Polymer Blends and Alloys**. 1st Ed. United States : Chapman&Hall. 1993.
- [19] 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.
- [20] Annual Book of **ASTM standards**
- [21] Data Sheet of EL-LENE High-Density Polyethylene from Siam Chemical Trade. 2001.
- [22] K. Kongsatit. **Fiber Spinning Process of Recycled Polyolefins and Poly(Ethylene Terephthalate)**.ISBN 274 – 648 – 505 – 9.2001
- [23] Z .Charles and P.Carroll . **Manual of Man-Made Fibers**. Guildford : Astex Publishing Company. 1960
- [24] Data sheet of EL-LENE High-Density Polyethylene from Siam Chemical Trade.2001.
- [25] S.K Ravi and D.Prashant andA.A Abhiraman. **Melt Spinning of Syndiotactic Polypropylene : Structure Development and Implications for Oriented Crystallization**. J. Polm.Sci., Part B. Polym Phys. Ed., 1989. pp.2469-2472.
- [26] ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย เอกสารคำสอน **วิชา สารปรับแต่งพอลิเมอร์** ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แก้ว(R-HDPE) และเกรดเส้นใย(F-HDPE)

ตาราง ก.1 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แก้ว(R-HDPE) ที่อุณหภูมิโชนที่ 4 (หัวตาย) ต่างๆ และกำหนดให้อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่ คือ 20 rpm และ 12.93 m/min ตามลำดับ ไม่มีการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

อุณหภูมิ โชนที่ 4 (หัวตาย) ($^{\circ}$ C)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier) Mean
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
160	46	8.57	335	31.30	43	8.47	446	5.34	0.7
170	58	4.78	321	98.78	50	9.61	428	4.69	0.7
180	54	9.57	348	75.43	48	10.24	477	3.72	0.7
190	47	5.75	395	88.50	45	8.95	415	2.78	0.7

ตาราง ก.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดเส้นใย (F-HDPE) ที่อุณหภูมิไซท์ที่ 4(หัวตาย) ต่างๆ และกำหนดให้อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยคงที่ คือ 20 rpm และ 12.93 m/min ตามลำดับ ไม่มีการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยย่นช่วงการตีไฟ

อุณหภูมิไซท์ที่ 4 (หัวตาย) (°C)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
160	44	3.46	340	24.53	40	7.42	345	4.15	0.7
170	55	2.56	332	56.23	48	6.32	536	5.26	0.7
180	51	5.32	348	42.15	47	5.34	325	7.85	0.7
190	47	4.68	398	34.89	43	4.68	449	6.45	0.7

ตาราง ก.3 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อัตราเร็วสกรูและอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยต่างๆ และกำหนดให้ อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวตาย) คงที่ที่ 170 °C ไม่มีการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตัดไฟ

อัตราเร็วสกรู (rpm)	อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย (m/min)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด(%)		มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
		Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
20	4.69	42	8.52	544	31.87	42	9.57	328	2.84	0.6
	6.98	45	10.85	431	18.59	40	8.42	488	3.57	0.6
	8.75	50	12.78	365	22.84	44	10.52	567	3.62	0.6
	10.27	51	9.87	331	12.45	46	11.47	346	4.78	0.6
	12.93	58	7.85	321	29.68	49	12.87	372	4.96	0.7
30	4.69	39	5.42	554	42.45	38	9.59	547	4.65	0.5
	6.98	42	8.74	441	8.69	40	7.48	390	5.21	0.5
	8.75	45	9.15	382	32.35	43	8.24	432	3.78	0.6
	10.27	49	10.87	361	52.68	48	10.44	454	2.64	0.6
	12.93	52	3.45	331	34.63	50	11.27	468	3.98	0.7

ตาราง ก.3(ต่อ)

อัตราเร็วการปั่น (rpm)	อัตราเร็วในการปั่นกับเส้นใย (m/min)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงขาด (%)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
		Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
40	4.69	35	8.52	594	98.59	35	10.46	542	2.89	0.5
	6.98	38	10.16	482	98.44	38	9.96	310	2.34	0.6
	8.75	46	9.42	413	45.57	50	8.87	458	3.25	0.6
	10.27	47	7.43	382	69.02	51	11.44	367	2.47	0.6
	12.93	48	6.54	361	84.15	57	10.35	328	4.27	0.6
50	4.69	29	10.42	622	76.77	29	11.54	339	5.12	0.5
	6.98	31	11.53	604	85.45	31	10.88	428	3.48	0.5
	8.75	31	8.42	576	72.89	31	12.94	348	2.34	0.5
	10.27	33	9.54	554	65.56	33	10.05	438	3.52	0.5
	12.93	34	8.75	538	71.48	34	8.47	467	2.47	0.5

ตาราง ก.4 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิโอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อุณหภูมิน้ำมีรอนในการดึงยืดต่างๆ และกำหนดให้อัตราส่วนการดึงยืดคงที่คือ 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

อุณหภูมิ (°C)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
70	163	47.42	118	78.23	139	78.42	403	1.68	1.3
80	185	28.57	102	63.42	156	84.15	424	2.41	1.3
90	202	39.57	87	24.25	178	65.42	417	1.79	1.3
100	192	32.67	96	46.23	163	45.23	367	2.69	1.3

ตาราง ก.5 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่อัตราส่วนการดึงยืดต่างๆ และกำหนดให้อุณหภูมิมีนํ้าร้อนในการดึงยืด

คงที่ คือ 90 °C ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการดึงยืด

อัตราการดึงยืด (m/m)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
1.5	112	13.51	123	97	28.41	97	409	2.38	1.2
2.4	160	16.48	108	138	63.47	138	452	3.12	1.3
3.2	210	24.65	92	182	36.23	182	412	2.67	1.4

ตาราง ก.6 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว (R-HDPE) ที่มีการเติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณต่าง ๆ โดยใช้สถานะในกระบวนการปั่นเส้นใยที่คงที่ คือ อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวตาย) 170 °C, อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วเส้นใย 12.93 m/min ไม่มี

การดึงยึด

ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ (phr)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		มอดูลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
1	55	9.57	386	95.48	45	7.1	396	1.28	0.7
2	55	7.82	398	98.63	42	8.47	424	2.12	0.7
3	54	8.45	401	103.6	41	7.68	368	3.14	0.7
4	50	8.24	410	98.67	36	6.45	472	2.42	0.6

ตาราง ก.7 สมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่มีการเติมปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟในปริมาณต่าง ๆ โดยใช้สภาวะในกระบวนการปั่นเส้นใยที่คงที่ คือ อุณหภูมิโซนที่ 4 (หัวด้าย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm และอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min และผ่านกระบวนการดึงยึดที่อุณหภูมิ 90 °C และอัตราส่วนการดึงยึด 3.2

ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ (phr)	ความแข็งแรงดึง (MPa)		เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		มอดุลัสเริ่มต้นที่ 1% ความเครียด (MPa)		Denier (g/9000 m)		ความแข็งแรงดึง (g/denier)
	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.	
1	215	65.32	94	21.35	180	96.23	428	3.65	1.4
2	208	103.10	103	26.54	172	86.35	326	2.36	1.4
3	203	86.23	108	52.31	167	65.75	518	3.25	1.4
4	192	26.34	117	26.45	155	67.29	479	5.61	1.4

ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1 อัตราการเผาไหม้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้ว(R-HDPE) ที่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ (phr)	อัตราการเผาไหม้(cm/min)		เปอร์เซ็นต์การเผาไหม้ที่ลดลง(%)	
	Mean	SD.	Mean	Mean
0	2.53	0.75	0	
1	2.36	0.98	6.72	
2	1.93	0.48	23.72	
3	1.88	1.02	25.69	
4	1.74	0.86	31.23	

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณความเป็นผลึก(%) จาก DSC thermogram

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

เมื่อ $\Delta H_f^0 \text{PE} = 293 \text{ J/g}$ [24]

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลจากรูปที่ก.1 R-HDPE มี $\Delta H_f = 165.97 \text{ J/g}$

แทนค่าลงในสมการ 3.6

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นผลึก(\%)} &= (\Delta H_{100\% \text{polymer}} / \Delta H_{100\% \text{crystal polymer}}) * 100 \\ &= (165.97 / 293) * 100 \\ &= 56.645\% \end{aligned}$$

การคำนวณอัตราการเผาไหม้

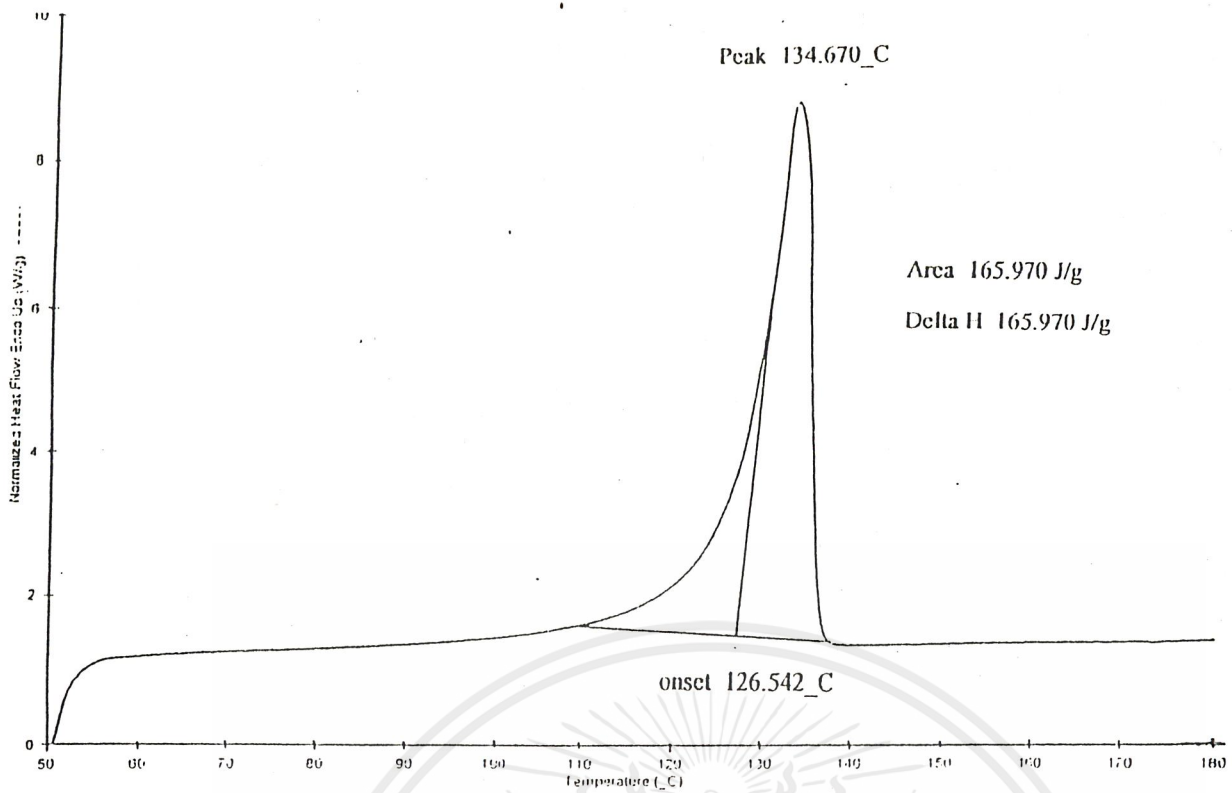
$$\text{อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)} = \frac{S}{t - t_1} \quad (\text{cm/min}) \quad (3.7)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

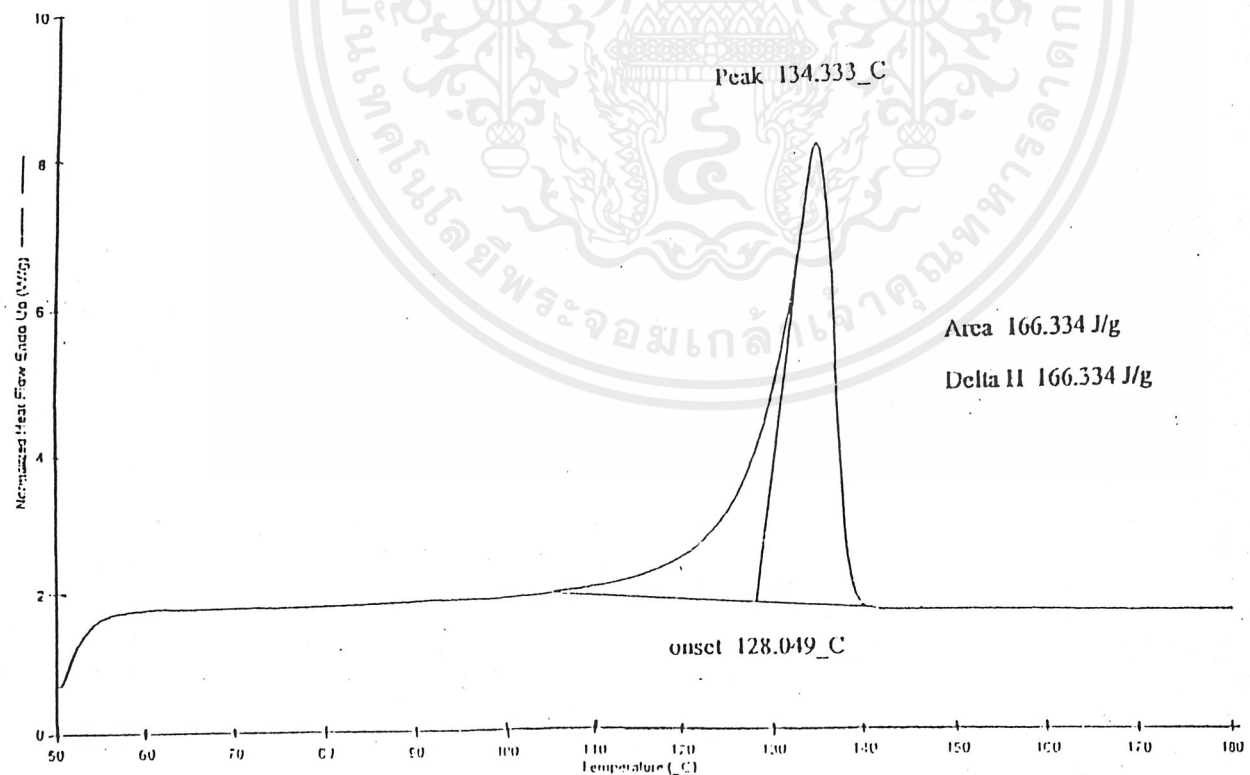
ข้อมูลจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วที่ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ
แทนค่าลงในสมการ 3.7

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเผาไหม้ (rate of burning)} &= \frac{7.5}{3.462 - 0.5} \quad (\text{cm/min}) \\ &= 2.532 \text{ cm/min} \end{aligned}$$



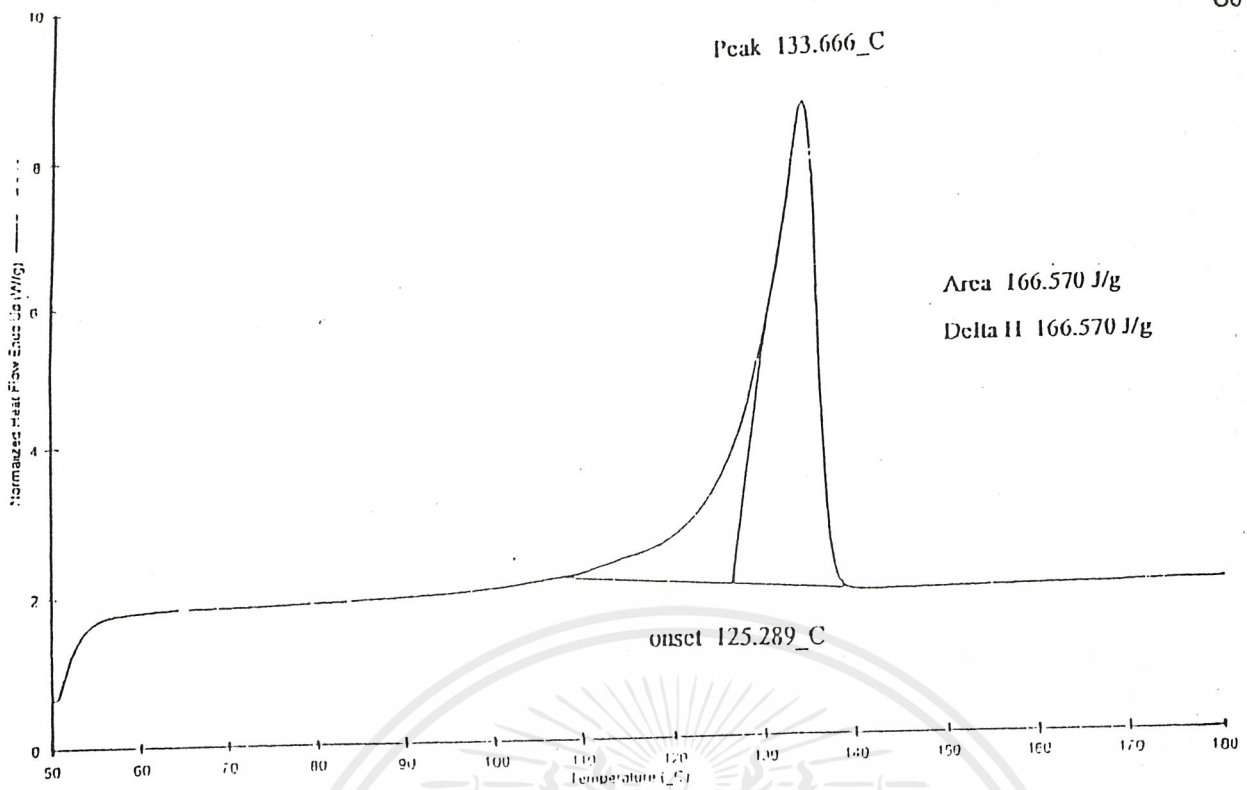


รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 160 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการคั่งยึกและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

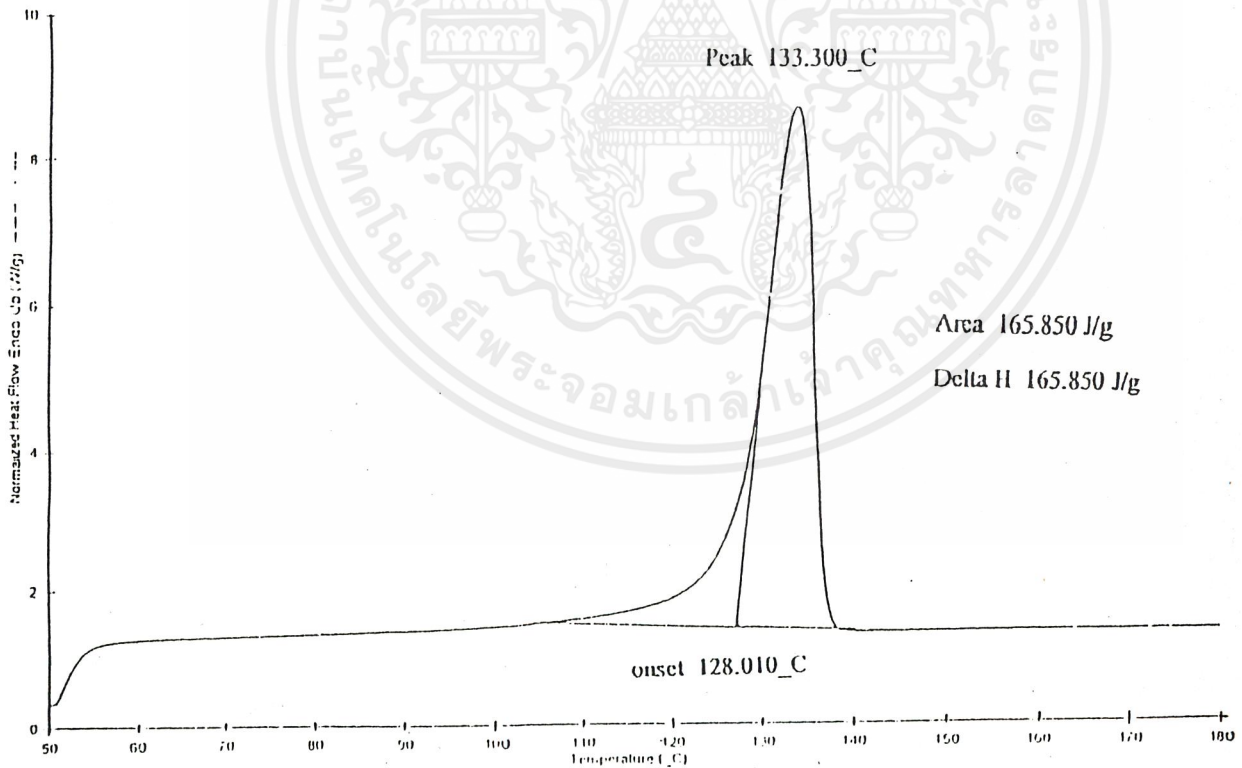


รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการคั่งยึกและไม่มีการเติมสารช่วย

หน่วงการติดไฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

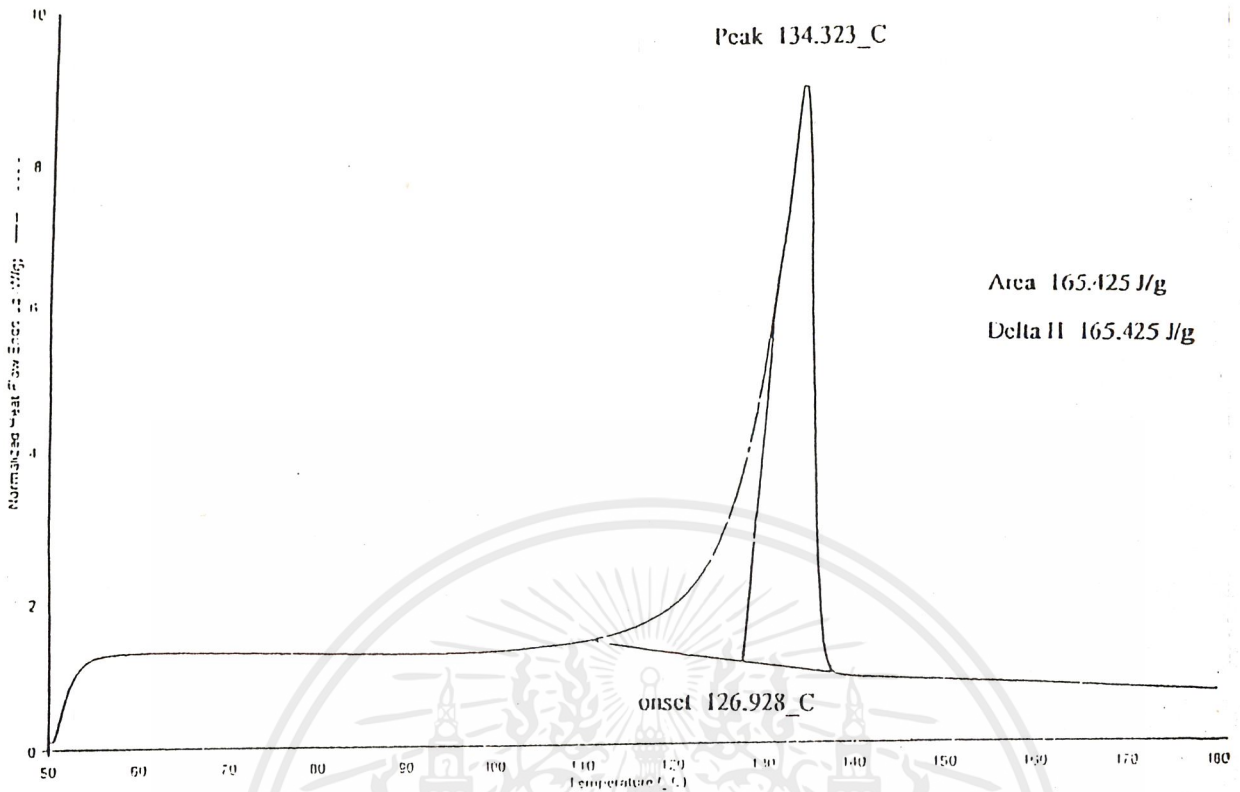


รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 180 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดึงยึกและไม่มีการเติมสารช่วย

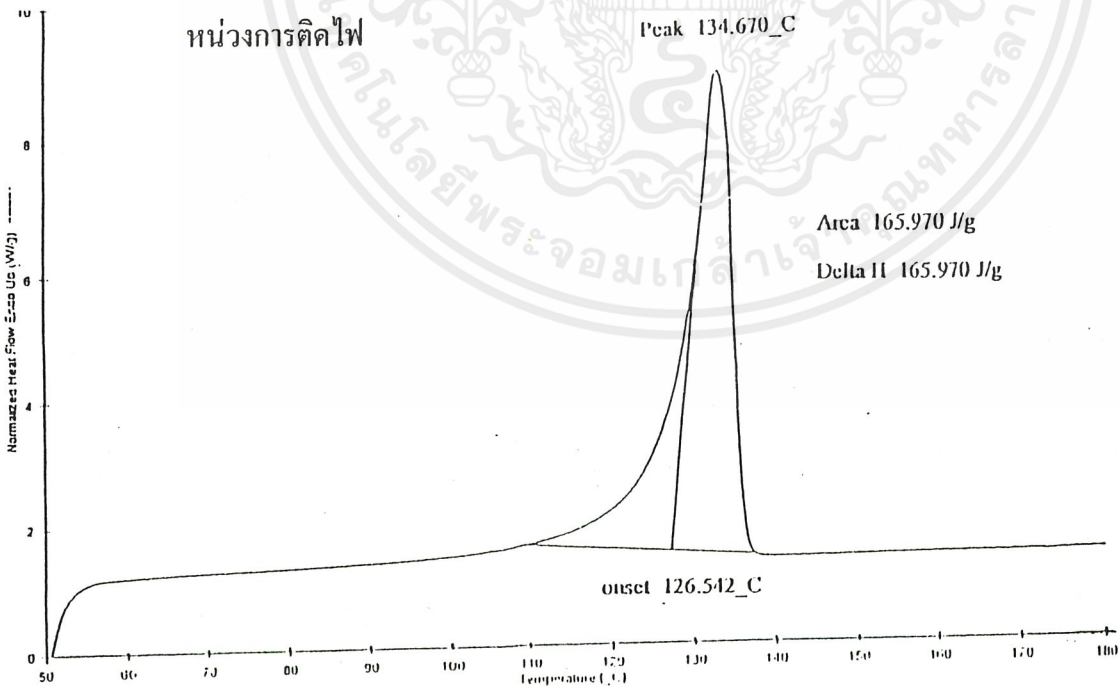


รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 190 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดึงยึกและไม่มีการเติมสารช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หน่วยงานคิดไฟ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

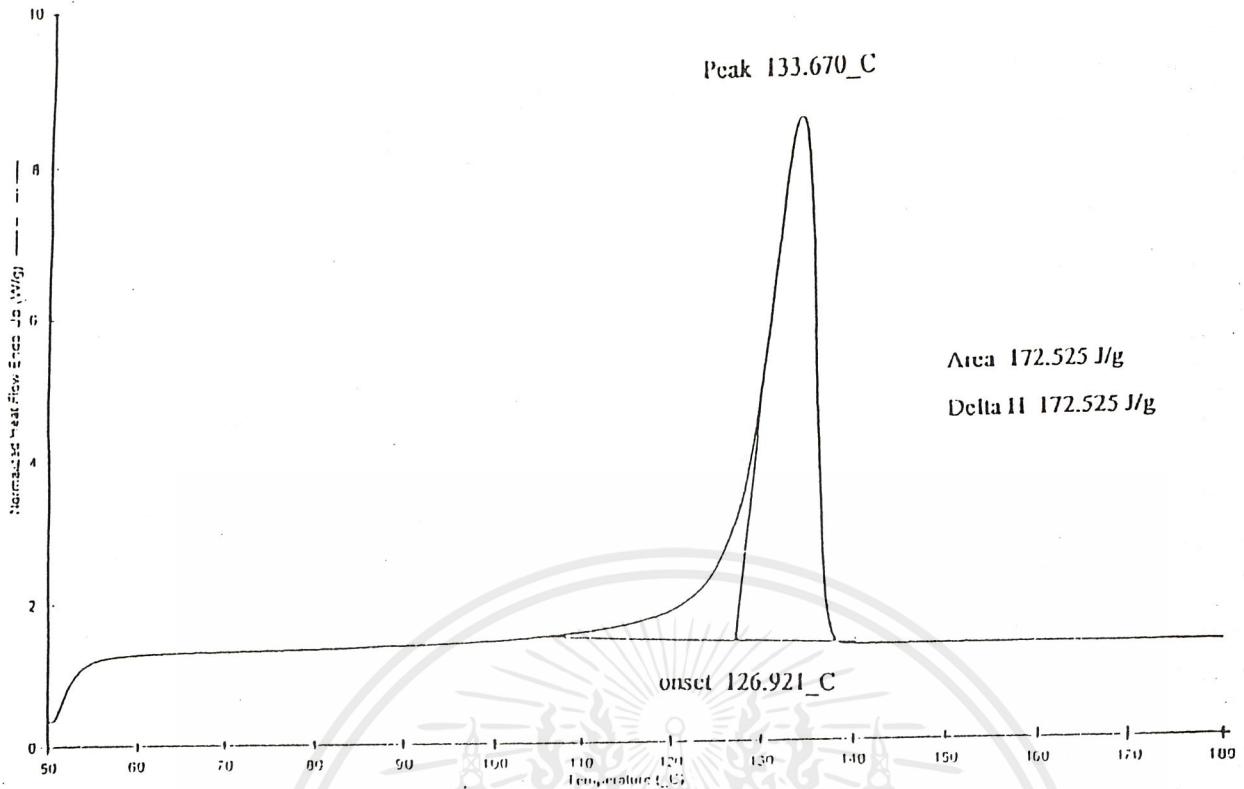


รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 40 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 8.75 m/min ไม่ทำการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการติดไฟ

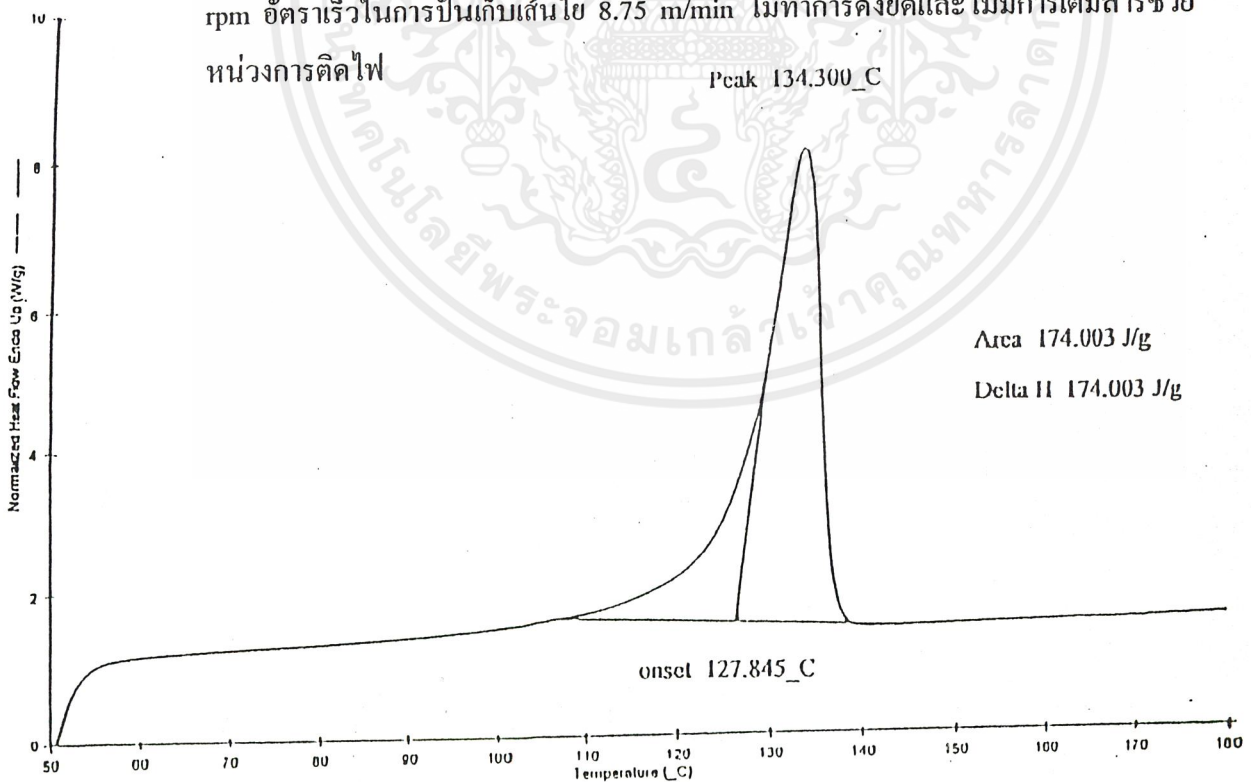


รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 40 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วย

เอกสวรนี้เป็นหน่วยงานติดไฟไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

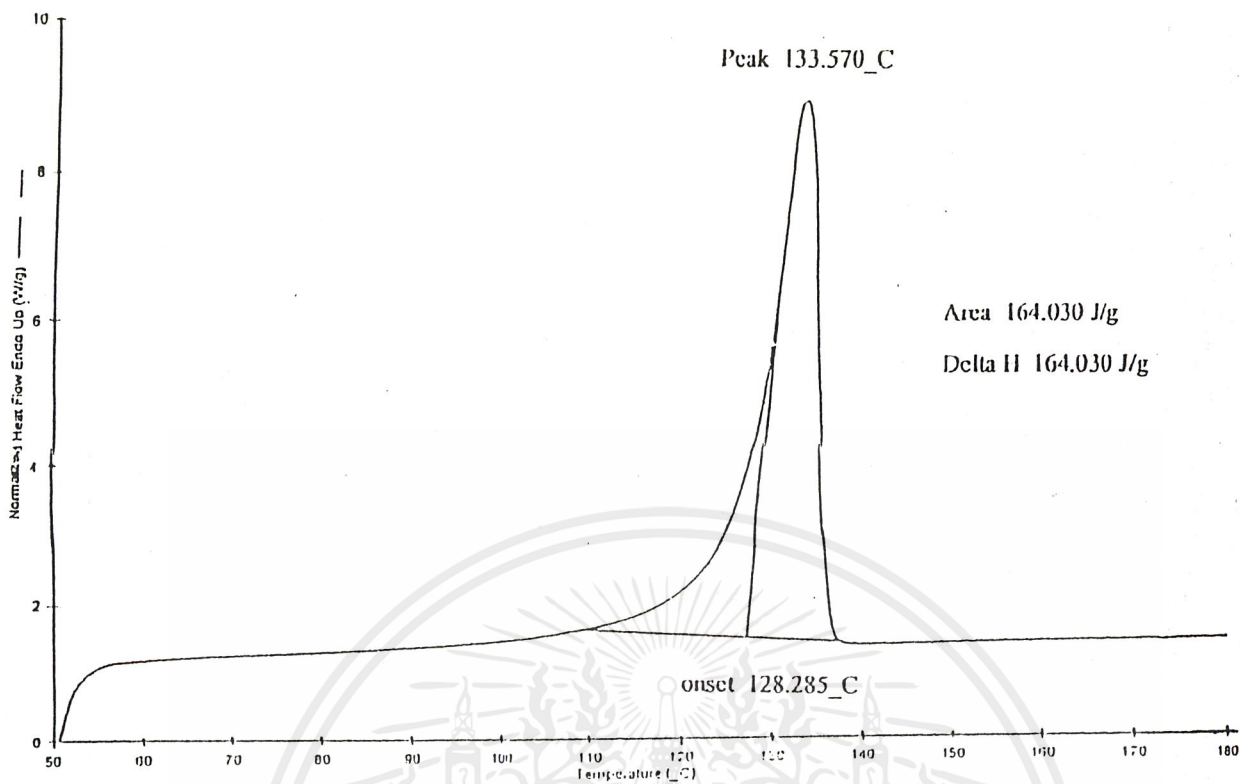


รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 8.75 m/min ไม่ทำการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

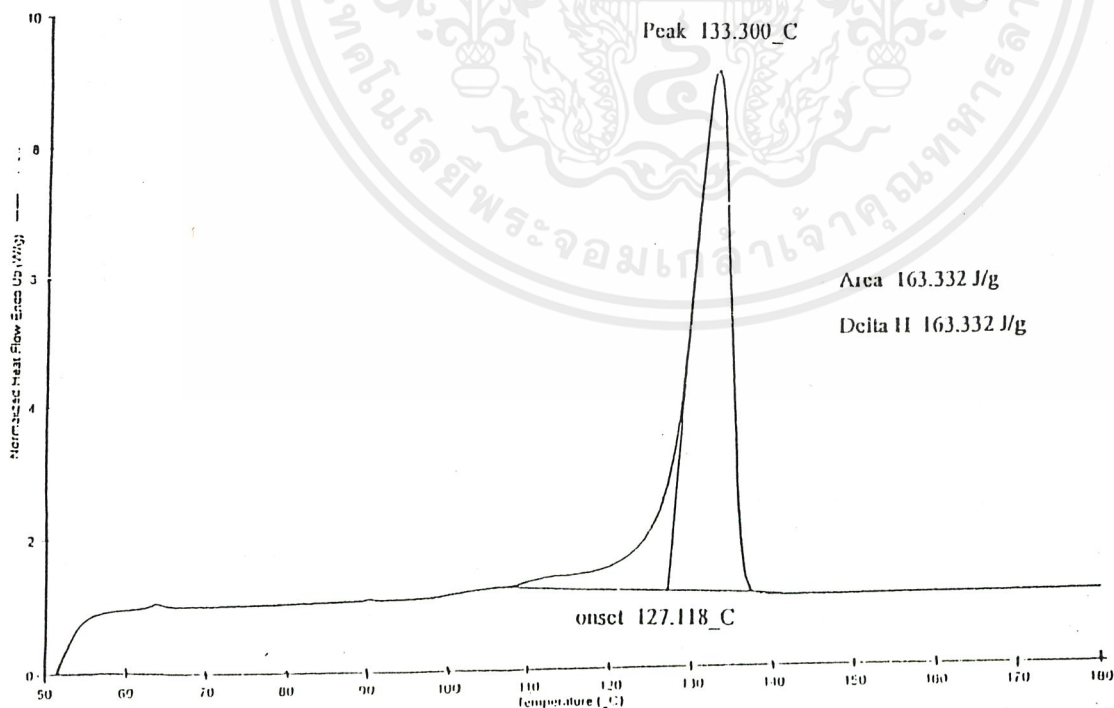


รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการดึงยืดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



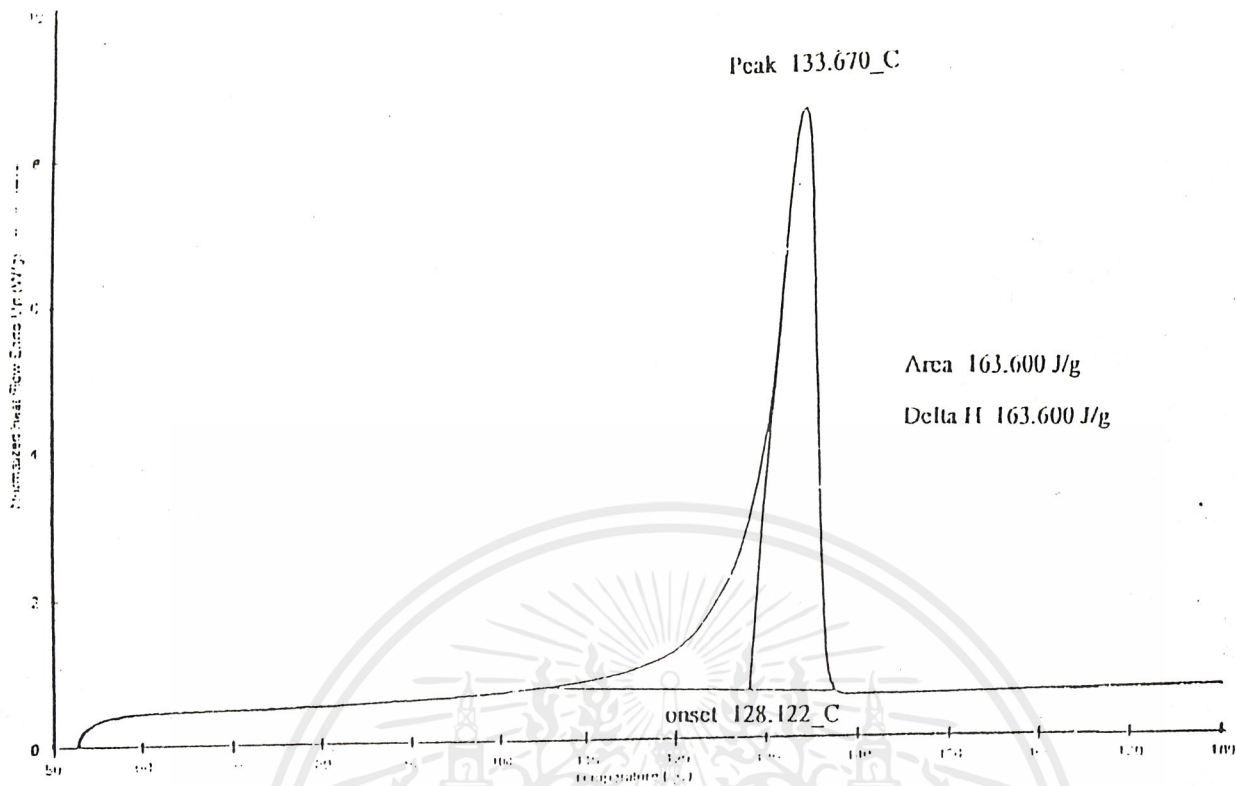
รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min คังชืดที่อุณหภูมิน้ำมัน 70 °C อัตราส่วนการคังชืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ



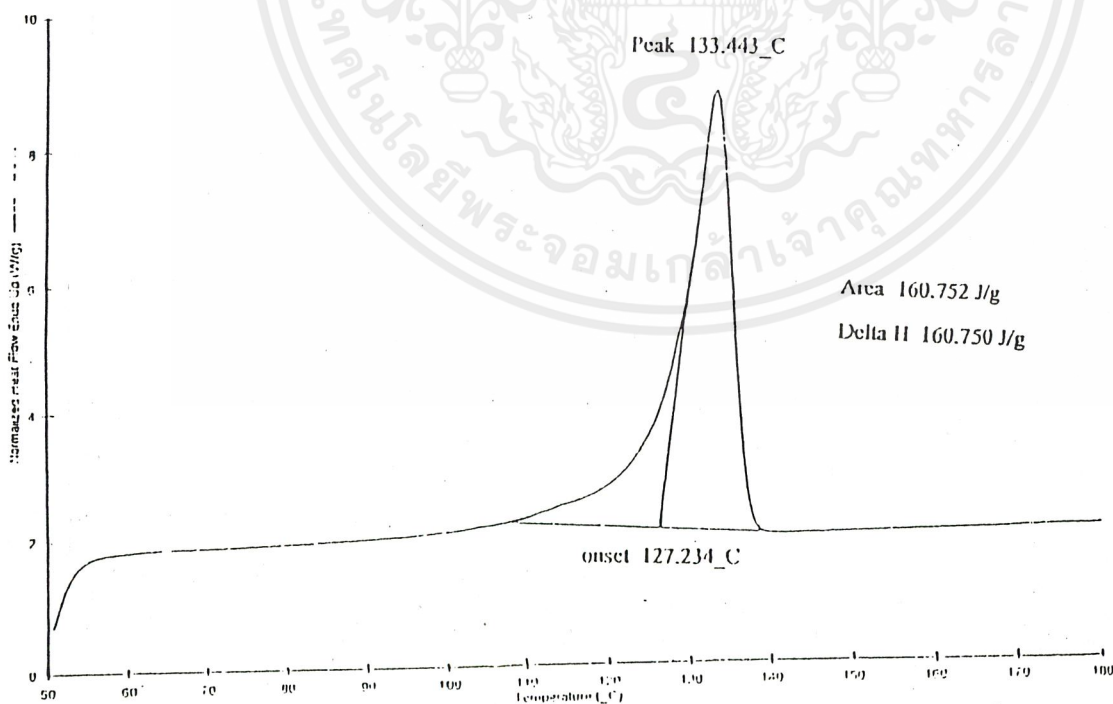
รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20

rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min คังชืดที่อุณหภูมิน้ำมัน 80 °C อัตราส่วนการคังชืด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุที่สมควรและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



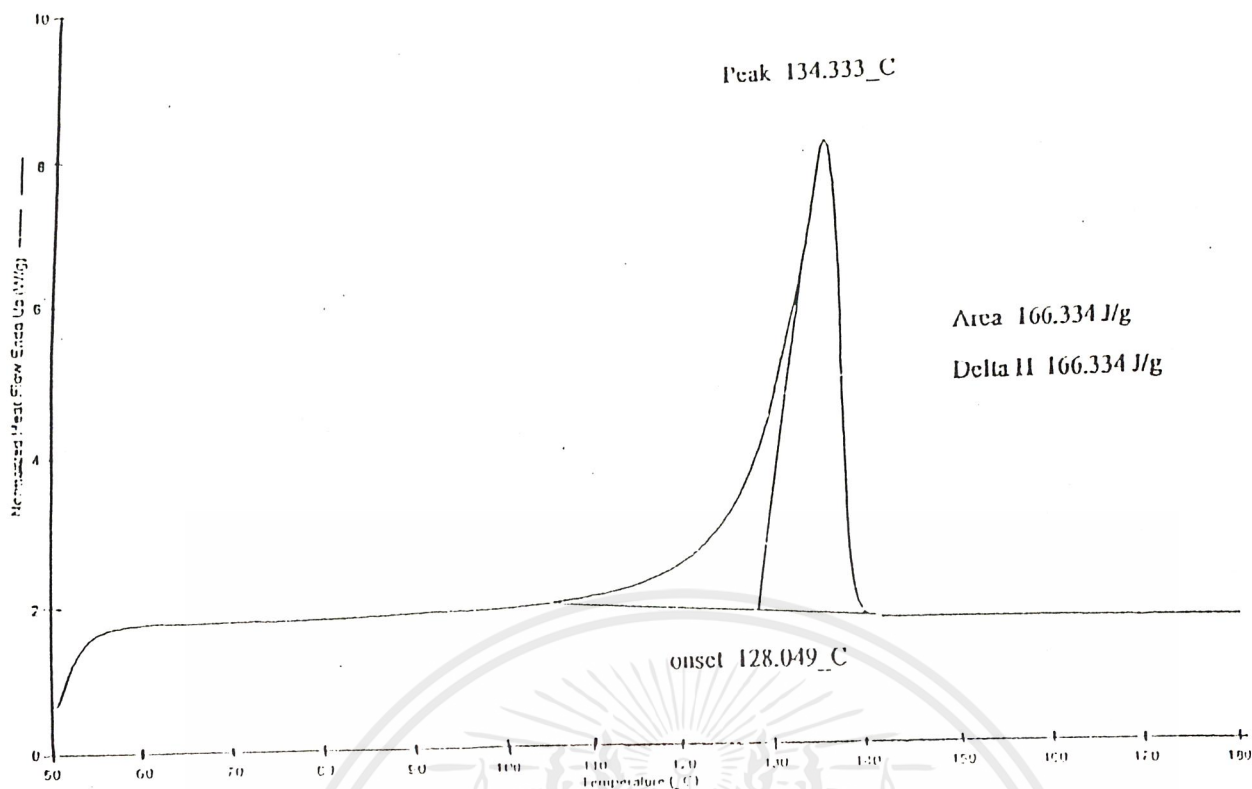
รูปที่ ค.11 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min คิงซี้ดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการคิงซี้ด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการคืดไฟ



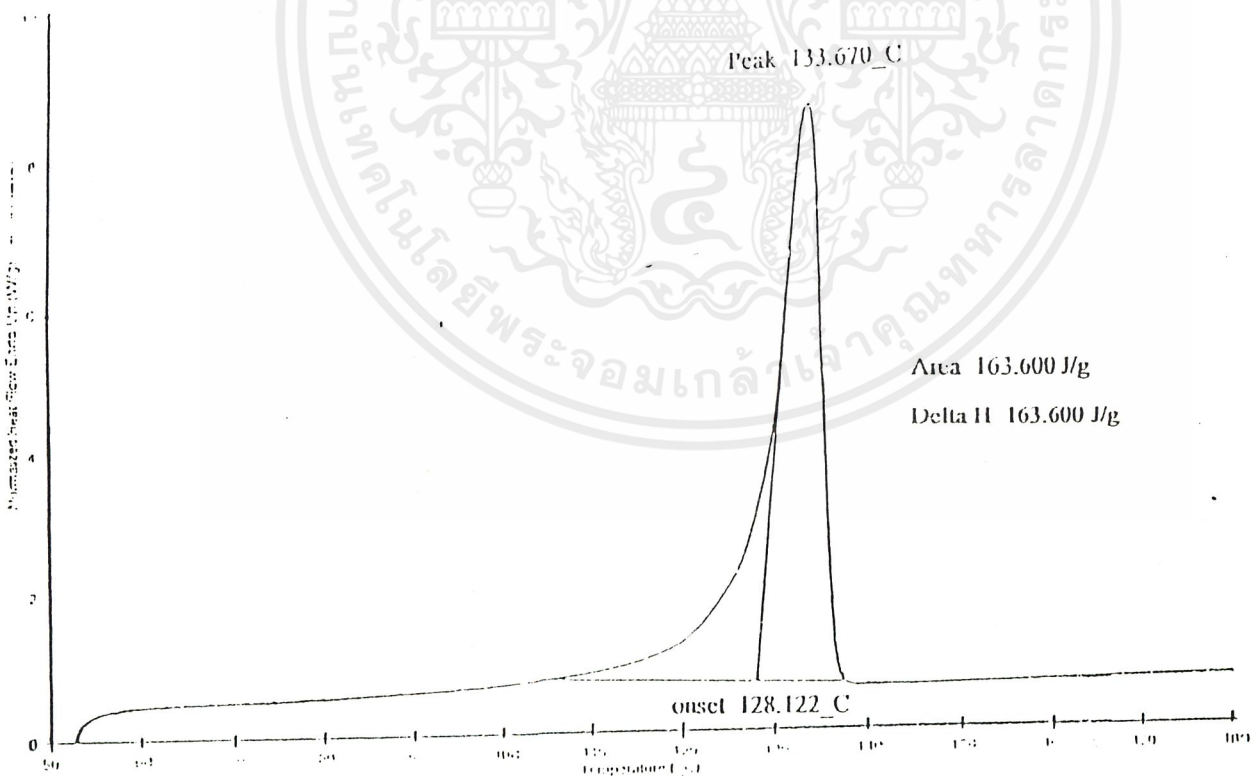
รูปที่ ค.12 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min คิงซี้ดที่อุณหภูมิน้ำมัน 100 °C อัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การคิงซี้ด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการคืดไฟ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

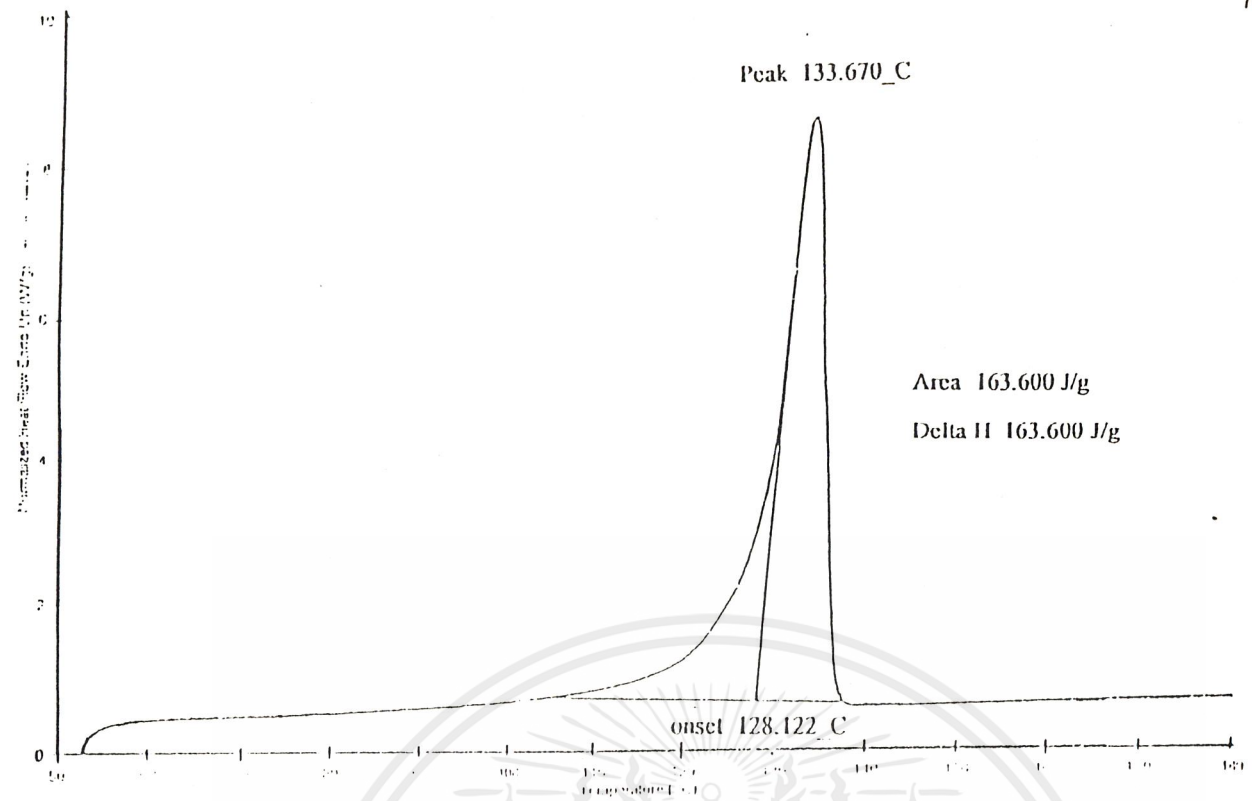


รูปที่ ก.13 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ไม่ทำการคั้งยัดและไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

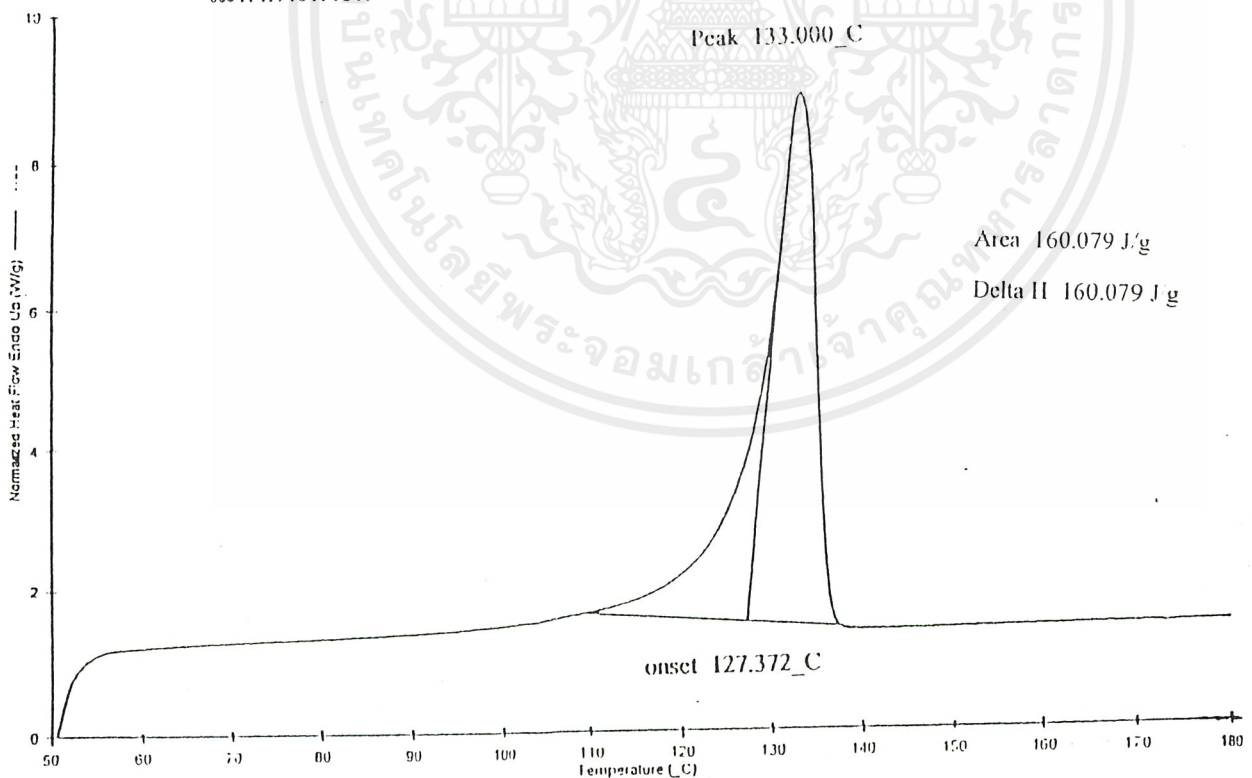


รูปที่ ก.14 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ที่มีอัตราส่วนการคั้งยัด 3.2 ไม่มีการเติมสารช่วยหน่วงการตีไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

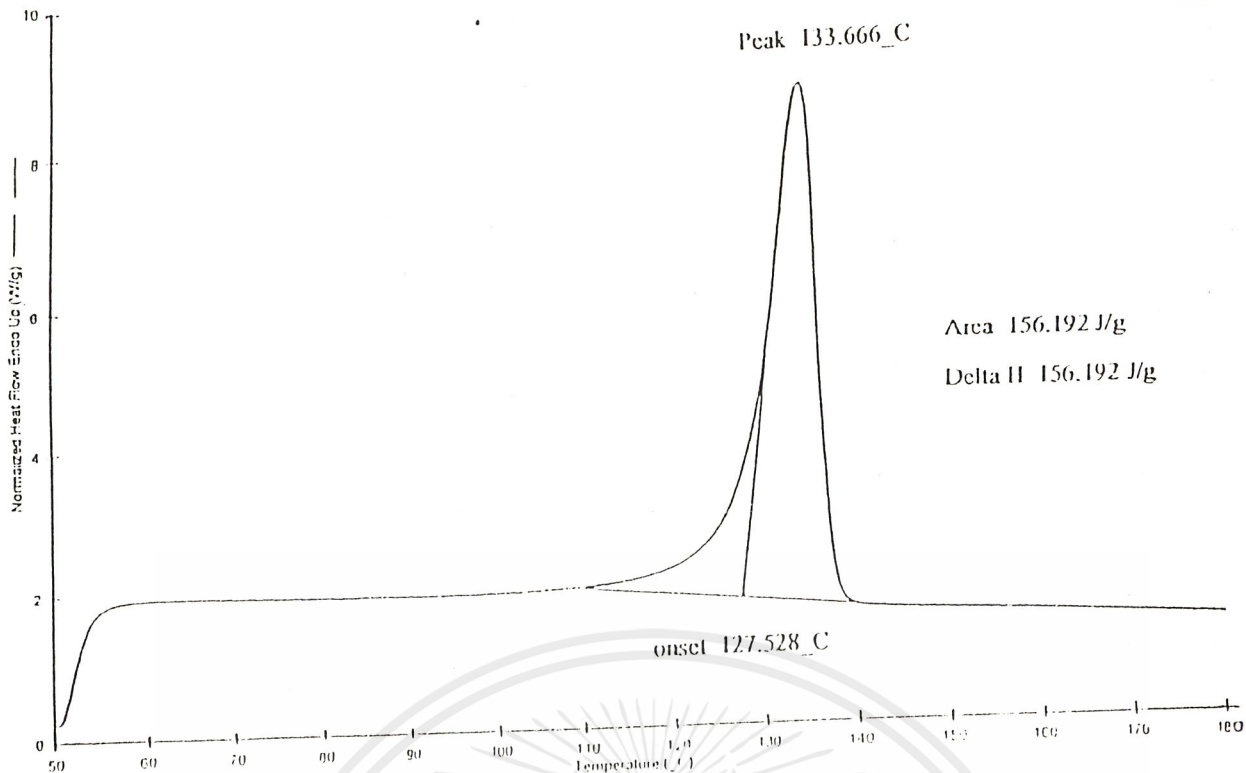


รูปที่ ก.15 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 0 phr ไม่ทำการดั่งยัด

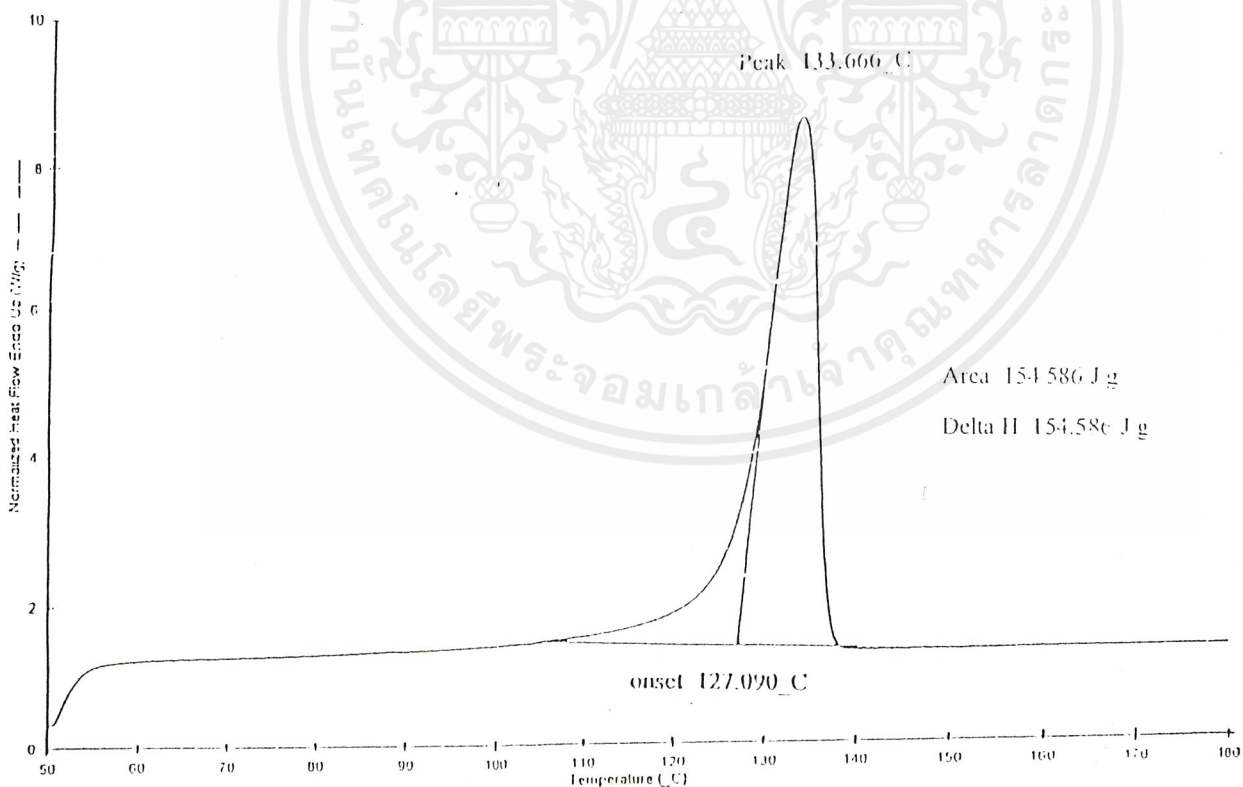


รูปที่ ก.16 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 1 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

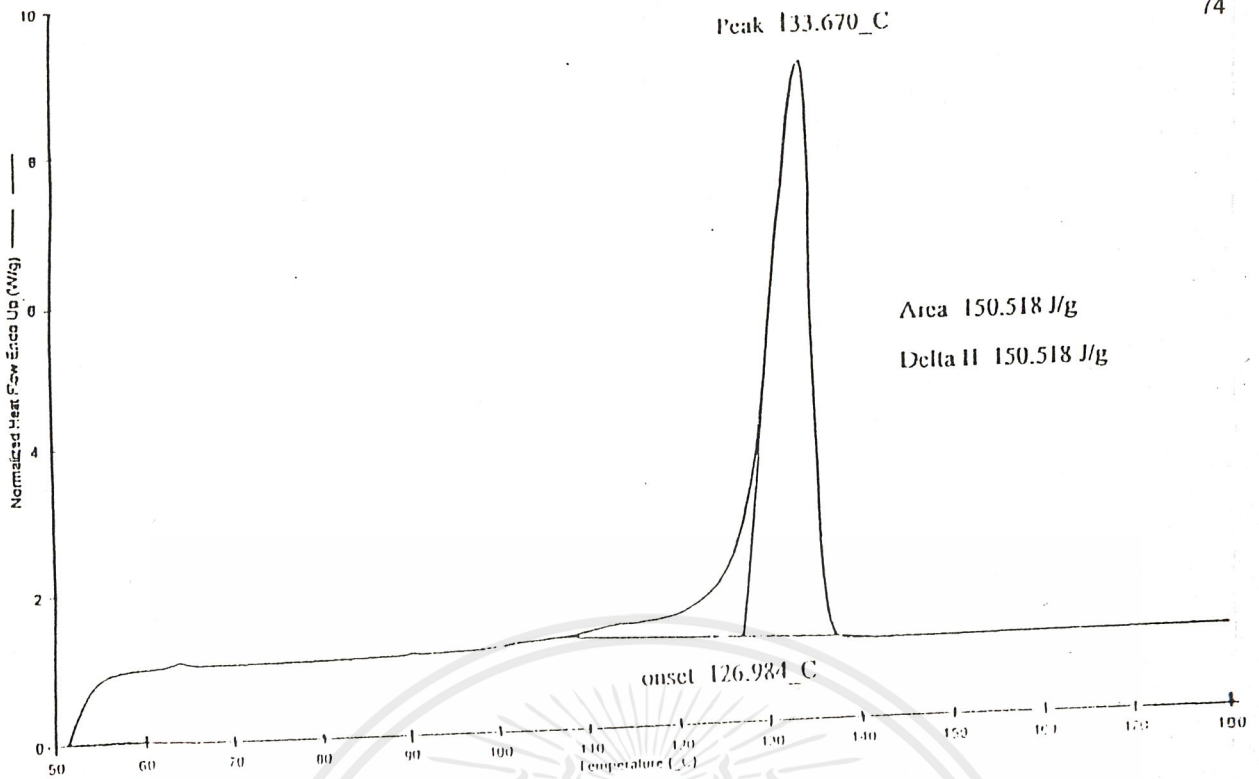


รูปที่ ก.17 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 2 phr ไม่ทำการคั่งยัด

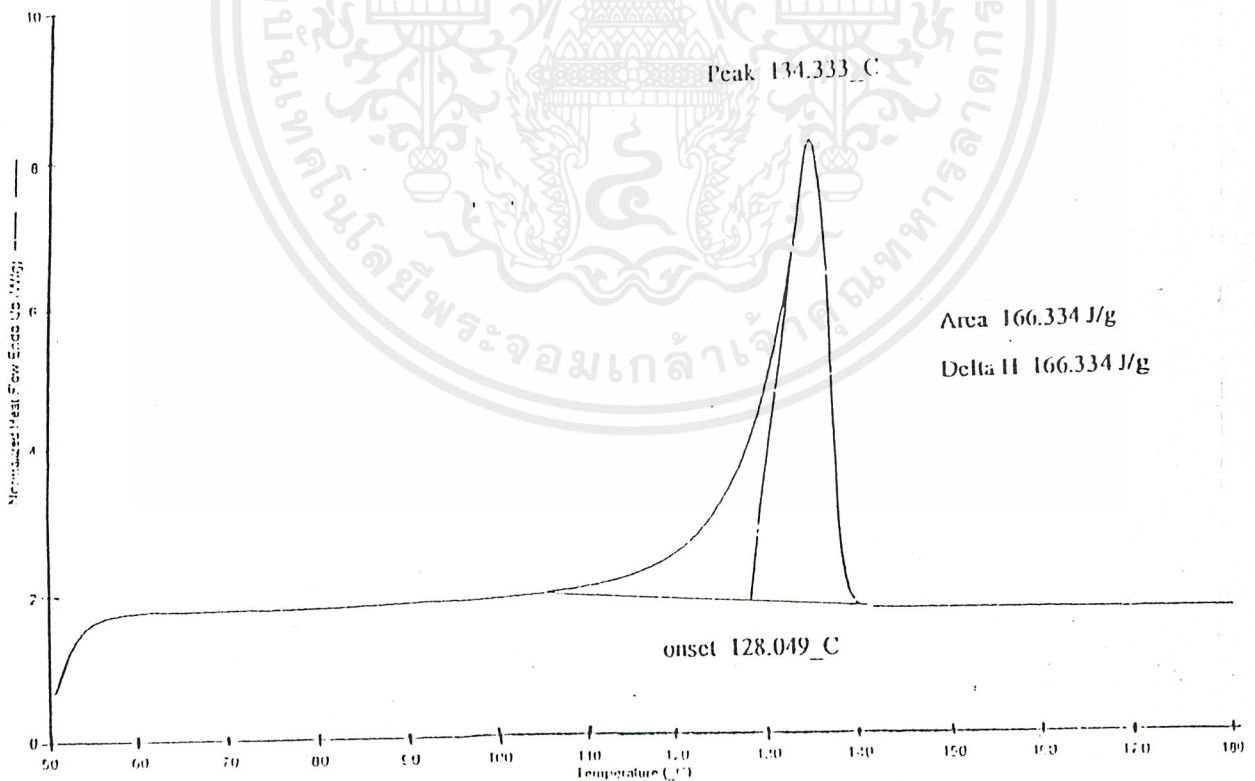


รูปที่ ก.18 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



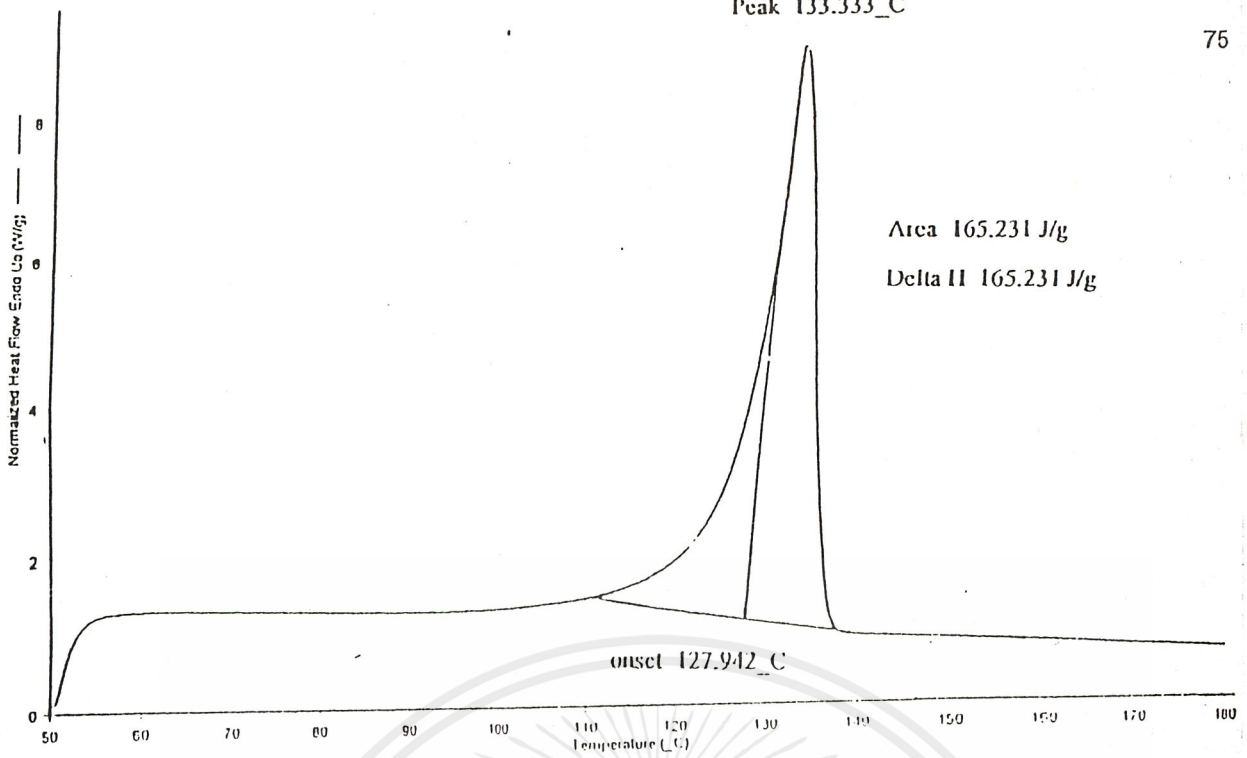
รูปที่ ก.19 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr ไม่ทำการคั่งยัด



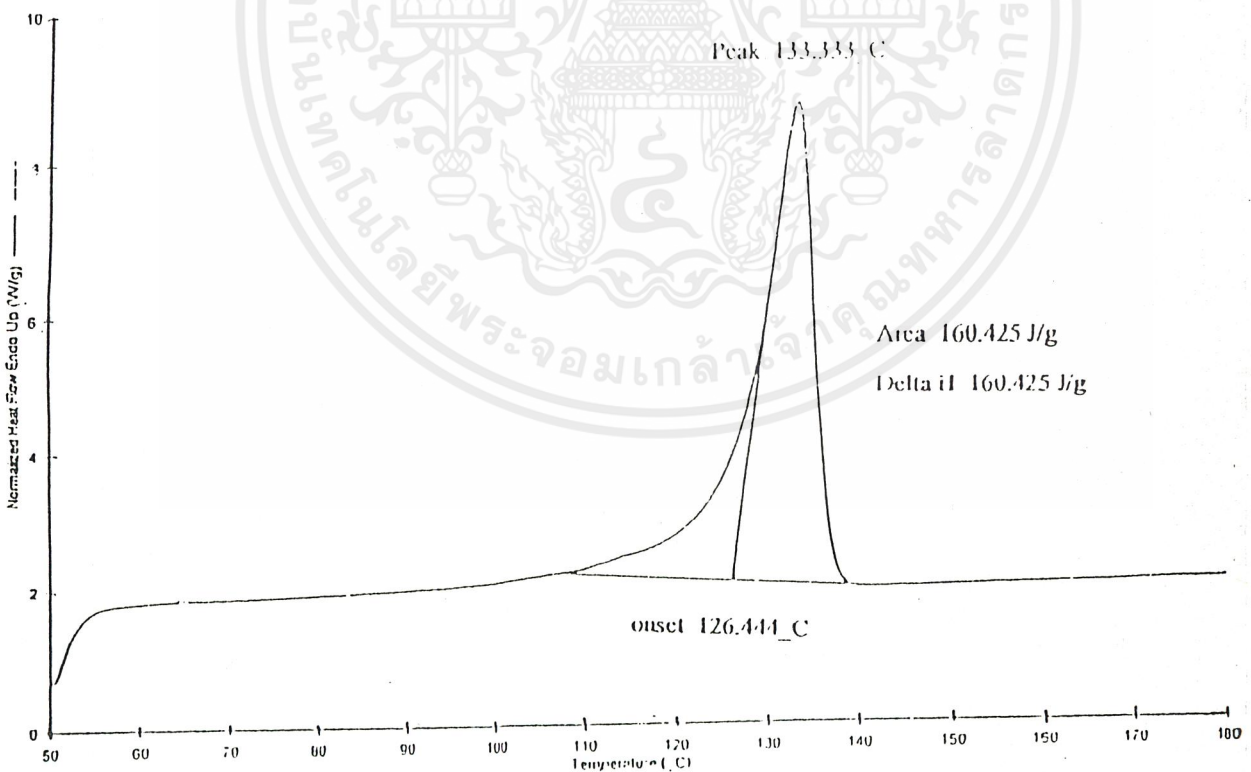
รูปที่ ก.20 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 0 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า คั่งยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการคั่งยัด 3.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้พิมพ์ไม่รับผิดชอบต่อการเปลี่ยนแปลงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

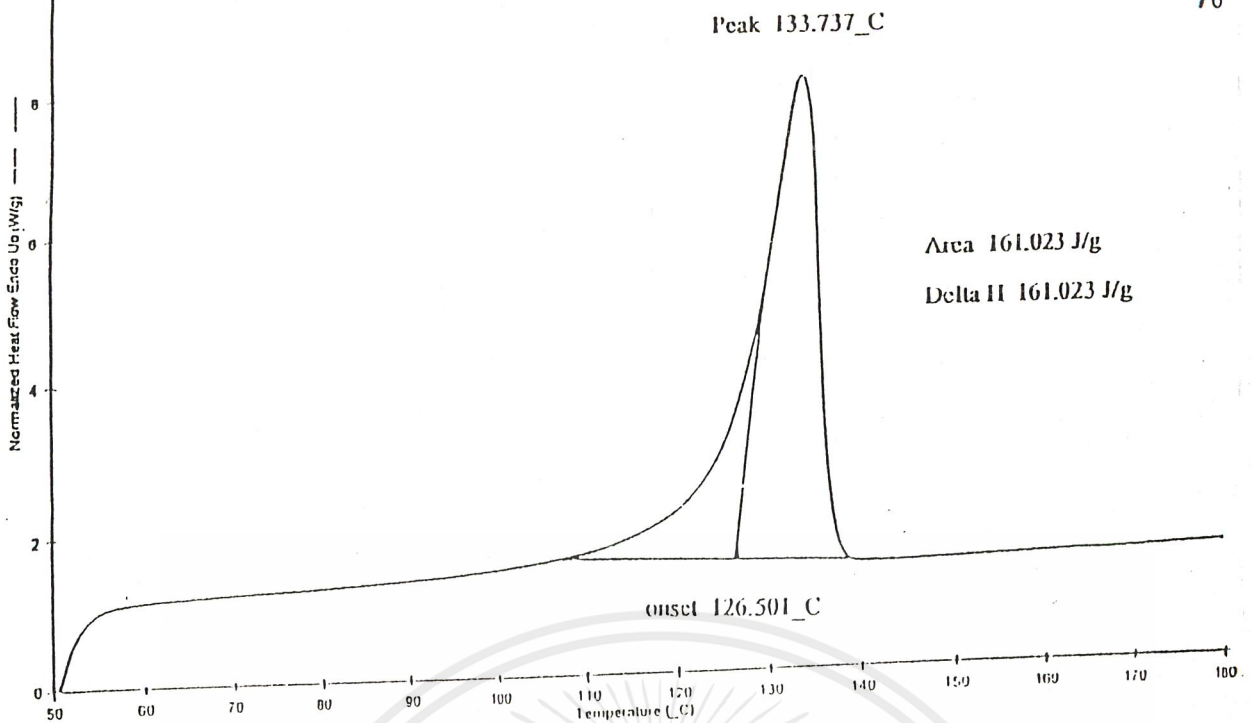


รูปที่ ค.21 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 1 phr ดึงยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการดึงยัด 3.2

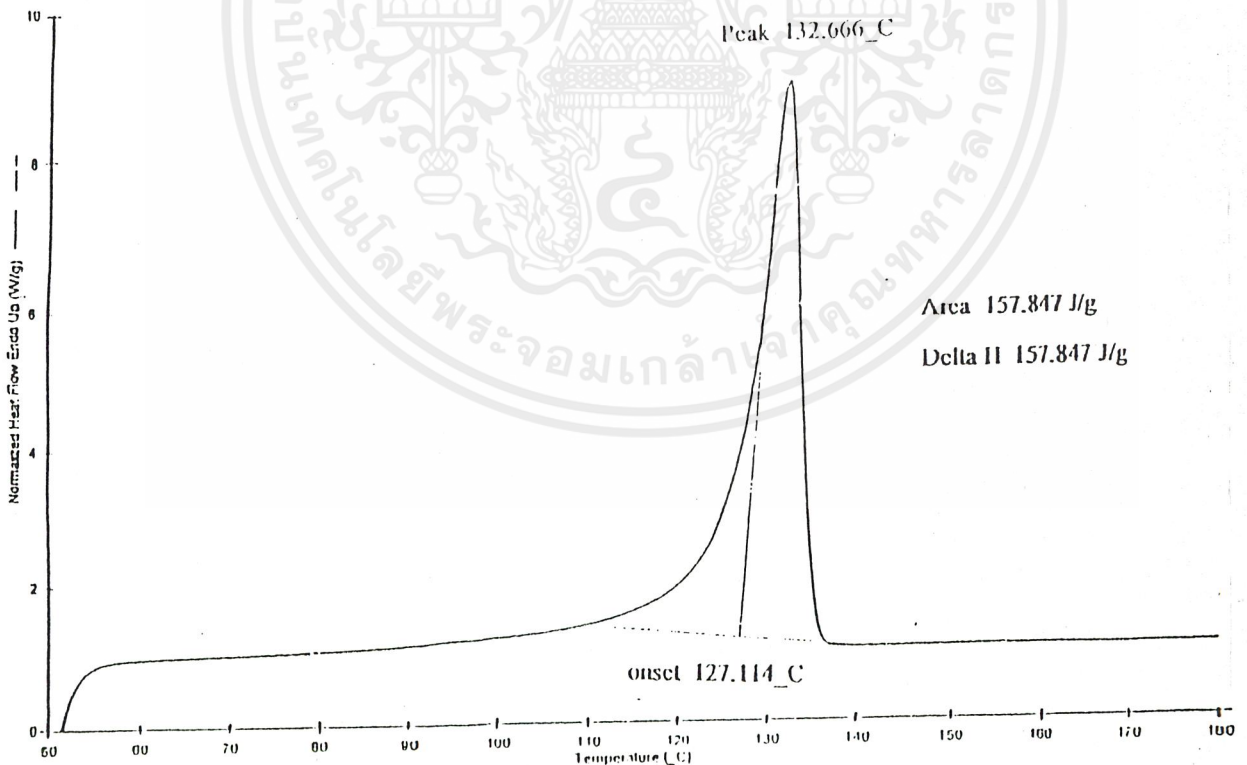


รูปที่ ค.22 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการตีไฟ 2 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดึงยัดที่อุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการดึงยัด 3.2
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.23 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 3 phr คิงยี่ห้ออุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการคิงยี่ห้อ 3.2



รูปที่ ก.24 DSC thermogram ของ R-HDPE ที่อุณหภูมิโซนที่ 4(หัวคาย) 170 °C อัตราเร็วสกรู 20 rpm อัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 12.93 m/min ปริมาณสารช่วยหน่วงการติดไฟ 4 phr เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า คิงยี่ห้ออุณหภูมิน้ำมัน 90 °C อัตราส่วนการคิงยี่ห้อ 3.2 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้