



248014



**ผลการสัมมนาของคณะกรรมการที่ปรึกษาเพื่อปรับปรุงโครงสร้างการประเมินวิจัย
ตามวิธีที่มีประสิทธิภาพดี และหลักการรวมการเป็นสื่อของข้อดีที่ได้**

นางอรุณี ไชยรัตน์ อธิบดี

**ข้าพเจ้ามีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนนี้ของงานที่มอบหมายให้ศึกษา
ปัญหาและเสนอแนะการปรับปรุงโครงสร้างการประเมินวิจัยที่มีประสิทธิภาพดี
และหลักการรวมการเป็นสื่อของข้อดีที่ได้
ตามที่คณะกรรมการที่ปรึกษาเพื่อปรับปรุงโครงสร้างการประเมินวิจัย
มอบหมายให้ศึกษาและเสนอแนะการปรับปรุง**

พ.ศ. ๒๕๕๔

b000252815

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



ผลกระทบของสารกระตุ้นประเภทเปอร์ออกไซด์และสภาวะการบ่มเร่งด้วยความร้อน
ที่มีต่อสมบัติ และพฤติกรรมการเย็นตัวของพอลิเอทิลีน

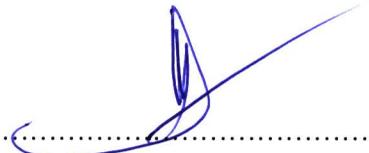
นางสาวโสเมธิดา ลิขิตเลิศ วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. สมหมาย ผิวสะอาด)



(ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)



(ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

กรรมการ



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของสารกระตุ้นประเภทเปอร์ออกไซด์และสภาวะการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติ และพฤติกรรมการเย็นตัวของพอลิเอทิลีน
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นางสาวโสเมธิตา ลิขิตเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

248014

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนที่ผสมสารกระตุ้นประเภทเปอร์ออกไซด์ ผลของชนิดสารเปอร์ออกไซด์ทางการค้า และผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติเชิงกล เชิงกายภาพและพฤติกรรมการเย็นตัวของพอลิเอทิลีน โดยพอลิเอทิลีนที่นำมาใช้ศึกษา ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สำหรับปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 1-3 pph ประกอบด้วยไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลอง พบว่า เมื่อพิจารณาผลของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนที่มีการผสมไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ LDPE มีความสามารถในการเกิดเจลสูงสุด รองลงมาคือ LLDPE และ HDPE ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อปริมาณเจล แต่ส่งผลให้สมบัติความต้านทานแรงดึงและปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนลดลง ทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเอทิลีนสำหรับพฤติกรรมการเย็นตัวของพอลิเอทิลีนทั้งสามชนิด พบว่า อุณหภูมิการเย็นตัวมีช่วงคงที่ประมาณ 92–120 °C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ได้จากผลทดสอบการวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และเมื่อพิจารณาอัตราการเย็นตัวในช่วงก่อนอุณหภูมิการเกิดผลึก พบว่าการผสมไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของพอลิเอทิลีน มีค่าสูงขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบชนิดของสารเปอร์ออกไซด์ทางการค้า 2 ชนิด พบว่า กรณีการผสมไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลของพอลิเอทิลีนมีค่าสูงกว่ากรณีการผสมไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่กรณีการผสมไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึก อุณหภูมิอ่อนตัว สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และสมบัติความต้านทานต่อแรงดัดงอสูงมีค่าสูงกว่ากรณีการผสมไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ สำหรับพฤติกรรมการเย็นตัว พบว่า การผสมไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้

248014^ก

อัตราการเย็นตัวสูงกว่าการผสมไดเตอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ สำหรับผลกระทบของการบ่มเร่ง
ขึ้นงานในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C พบว่า ปริมาณการเกิดเจล ปริมาณความเป็นความผลึก สมบัติ
ความต้านทานแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนทั้งที่ผสมและไม่ผสม
สารเปอร์ออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาการทดสอบ 0 ถึง 16 วัน

คำสำคัญ: การบ่มเร่งในน้ำร้อน / พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง / สารกระตุ้นชนิดเปอร์ออกไซด์ /
อัตราการเย็นตัว

Thesis Title	Effects of Peroxide Activator and Thermal Aging on Properties and Cooling Behavior of Polyethylene
Thesis Credits	15
Candidate	Miss Somthida Likhitlert
Thesis Advisor	Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2554

Abstract

248014

The aims of this work were to study the effects of addition of peroxide activator in polyethylene having different molecular structures, type of commercial peroxide activators and thermal aging on mechanical property, physical property and cooling behavior of polyethylene. Polyethylenes used in this study were high-density polyethylene (HDPE), linear low-density polyethylene (LLDPE), low-density polyethylene (LDPE). The commercial peroxide activators used were dicumyl peroxide (DCP) and di-tert butyl peroxide (DTBP) and their loadings were varied from 1 to 3 pph. The results suggested that LDPE had the most ability to gel than LLDPE and HDPE when adding the DCP into polyethylenes. Increasing the DCP in polyethylenes did not result in the increase in gelation, and tended to decrease the tensile properties and the degree of crystallinity of polyethylenes, depending on the molecular structure of the polyethylenes. With respect to the cooling curves, the plateau temperature of the polyethylenes were found around 92 – 120 °C, which corresponded to the crystallization temperatures which were also obtained by differential scanning calorimetry (DSC) analysis. In addition, when considering the cooling rate (slope of cooling curves) before crystallization temperature, the polyethylene with DCP had higher cooling rate than that without DCP. For the effect of different commercial peroxides, the gel content and the cooling rate of the polyethylene with DCP was higher than that with DTBP whereas the opposite effect was found for degree of crystallinity, heat distortion temperature, tensile and flexural properties. When thermal aging in hot-water at 90 °C, it was found that the gel content, degree of crystallinity, tensile

248014⁰

and flexural properties of both polyethylene with and without DCP were very similar and also showed a slight increase with time from 0 to 16 days.

Keyword: Cooling rate / Cross-linked polyethylene / Hot water aging / Peroxide activator

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ คำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา ระหว่างการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการได้รับประสบการณ์ใหม่ๆ ในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. เอกชัย วิมลมาลา, คุณอภิสิทธิ์ โนมิตชัยขงค์ และคุณชัชชัย วงศ์เฉลียว นักวิจัยคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันได้แก่ ผศ. ดร. สมหมาย ผิวสอาด ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บริษัท เครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย และบริษัท พีซีที อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์เงินทุนและวัสดุในการวิจัย

ขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (PaRP) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และทดสอบ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวสำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน รวมถึงเพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

ประโยชน์อันใดที่ก่อเกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๒
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมขวาง	5
2.1.1 พอลิเอทิลีน	5
2.1.2 การเกิดการเชื่อมขวางในพอลิเอทิลีน	7
2.1.3 การประยุกต์ใช้	12
2.2 ผลกระทบของการเกิดการเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน	13
2.2.1 ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์	13
2.2.2 การเสื่อมสภาพ	16
2.3 การวัดอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์	19
2.3.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อน	19
2.3.2 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

3. วัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	27
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี	30
3.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	30
3.2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	31
3.2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	31
3.2.4 ไดคิควิมิวเปอร์ออกไซด์	31
3.2.5 ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์	32
3.3 กระบวนการผสมวัตถุประสงค์และการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	32
3.3.1 ขั้นตอนการผสมวัตถุประสงค์	32
3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	33
3.4 การทดสอบหาปริมาณการเกิดเจล	34
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน	35
3.5.1 ปริมาณความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึก	35
3.5.2 อุณหภูมิการสลายตัว	35
3.5.3 อุณหภูมิอ่อนตัว	35
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล	36
3.6.1 สมบัติความต้านทานแรงดึง	36
3.6.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงคดงอ	36
3.6.3 สมบัติความต้านทานแรงกระแทก	37
3.6.4 สมบัติความแข็งแบบ Shore D	37
3.7 การศึกษาอัตราการเย็นตัว	38
3.7.1 ชุดวัดอุณหภูมิ	38
3.7.2 ระบบปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	39
3.7.3 ขั้นตอนการวัดอัตราการเย็นตัว	41
3.8 การบ่มเร่งด้วยความร้อน	43

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	44
4.1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน	44
4.1.1 ปริมาณการเกิดเจลและความสามารถในการเกิดเจล	44
4.1.2 สมบัติทางด้านความร้อน	46
4.1.3 สมบัติเชิงกล	48
4.1.4 พฤติกรรมการเย็นตัว	52
4.2 ผลของชนิดเปอร์ออกไซด์ทางการค้า 2 ชนิด	57
4.2.1 ปริมาณการเกิดเจล	57
4.2.2 สมบัติทางด้านความร้อน	59
4.2.3 สมบัติเชิงกล	60
4.2.4 พฤติกรรมการเย็นตัว	62
4.3 ผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน	65
4.3.1 ปริมาณการเกิดเจล	65
4.3.2 สมบัติทางด้านความร้อน	65
4.3.3 สมบัติเชิงกล	67
5. สรุปผลการทดลอง	71
5.1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน	71
5.2 ผลของชนิดเปอร์ออกไซด์	71
5.3 ผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน	72
5.4 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ประวัติผู้วิจัย	77

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติที่เปลี่ยนไปหลังจากการเชื่อมขวางพอลิเอทิลีน	7
2.2 การเปรียบเทียบสมบัติและข้อจำกัดของวิธีการเชื่อมขวางแต่ละระบบ	10
2.3 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิลและช่วงอุณหภูมิการใช้งาน	22
3.1 อุปกรณ์ในส่วนของชุดวัดอุณหภูมิ	39
3.2 วิธีการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์ขณะขึ้นในรูป	41
4.1 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิด	45
4.2 ปริมาณความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วนที่ได้จากเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)	47
4.3 อุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิต่ำของพอลิเอทิลีนที่ผสมและไม่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์	48
4.4 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ จากเครื่อง Impact tester	50
4.5 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ จากพื้นที่ได้กราฟระหว่างแรงกับระยะดิ่งยึด	51
4.6 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมและผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน ที่ได้จากเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)	59
4.7 อุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิต่ำของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมและผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน	59
4.8 ปริมาณการเกิดเจลของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งที่เวลา 16 วัน	65
4.9 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งที่เวลา 16 วัน ที่ได้จากเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	65

ตาราง (ต่อ)

หน้า

- | | | |
|------|---|----|
| 4.10 | อุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิดไดควิ-
มิวเปอร์ออกไซด์หรือโคเตอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน ทั้ง
ก่อนและหลังการบ่มเร่งที่เวลา 16 วันที่ได้จากเครื่อง Thermogravimetric Analysis
(TGA) | 66 |
| 4.11 | มอดูลัสความทนแรงดึงของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิดไดควิ-
มิวเปอร์ออกไซด์หรือโคเตอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วน ทั้ง
ก่อนและหลังการบ่มเร่งที่เวลา 16 วัน | 68 |
| 4.12 | ความต้านทานความทนแรงดึงของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิด
ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์หรือโคเตอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อย
ส่วน ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งที่เวลา 16 วัน | 69 |
| 4.13 | ราคาของ ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์หรือโคเตอร์บิวทิลเปอร์ออกไซด์ | 70 |

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 สูตรทั่วไปของพอลิเอทิลีน	5
2.2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเอทิลีน a) HDPE b) LLDPE c) LDPE	5
2.3 ขั้นตอนการเชื่อมขวางโดยใช้รังสีพลังงานสูง	8
2.4 ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมขวางโดยใช้สารไซเลน	9
2.5 กลไกการเกิดการเชื่อมขวางโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์	10
2.6 สูตรเคมีของไดควิมิวเปอร์ออกไซด์	11
2.7 สูตรเคมีของไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์	11
2.8 ตัวอย่างการนำเอาพอลิเอทิลีนเชื่อมขวางไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ	12
2.9 ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์วัสดุของพอลิเมอร์	15
2.10 การเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	17
2.11 กลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนเมื่อมีการเติมสารเปอร์ออกไซด์	18
2.12 วงจรเทอร์โมคัปเปิลเบื้องต้น	21
3.1 แผนการดำเนินการศึกษาผลของ โครงสร้าง โมเลกุลของพอลิเอทิลีน	28
3.2 แผนการดำเนินการศึกษาการเปรียบเทียบผลของชนิดสารเปอร์ออกไซด์ทางการค้า 2 ชนิด	29
3.3 แผนการดำเนินการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งทางความร้อน	30
3.4 สูตร โครงสร้าง และลักษณะทางกายภาพของ ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์	31
3.5 สูตร โครงสร้าง และลักษณะทางกายภาพของ ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์	32
3.6 เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่และเครื่องบดพลาสติก	33
3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดันและชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป	33
3.8 การตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัดสารเพื่อหาปริมาณการเกิดเจล	34
3.9 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง	36
3.10 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดัดงอ	37
3.11 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก	37
3.12 เครื่องทดสอบสมบัติความแข็งแบบ Shore D	38
3.13 ชุดวัดอุณหภูมิ ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล แม่พิมพ์ประกบ 2 แผ่น และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	39
3.14 วาล์วปรับอัตราการไหลและเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ	40

รูป (ต่อ)	หน้า
3.15 เครื่องอัดขึ้นรูปรีออนระบบแรงดัน ชุดวัดอุณหภูมิ และระบบปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	40
3.16 เครื่องทดสอบการบ่มเร่งด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	43
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดเจลกับปริมาณไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ผสมในพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเกิดเจลกับปริมาณ ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ผสมในพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE	44
4.3 ปฏิกริยาการเกิดอนุมูลอิสระของพอลิเอทิลีนที่มีการเติมสารเปอร์ออกไซด์	46
4.4 ปฏิกริยาการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	46
4.5 ปฏิกริยาการเชื่อมขวางของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	46
4.6 มอดูลัสความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	49
4.7 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	49
4.8 มอดูลัสความทนต่อแรงค้ำของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	49
4.9 ความต้านทานต่อแรงค้ำสูงสุดของพอลิเอทิลีนชนิด HDPE LLDPE และ LDPE ที่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	49
4.10 ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดที่ผสม ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ	52
4.11 กราฟการเขียนตัวของ HDPE โดย (a) ไม่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ และ (b) ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ 3 ส่วนในร้อยส่วน ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ	53
4.12 กราฟการเขียนตัวของ LLDPE โดย (a) ไม่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ และ (b) ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ 3 ส่วนในร้อยส่วน ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ	53
4.13 กราฟการเขียนตัวของ LDPE โดย (a) ไม่ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ และ (b) ผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ 3 ส่วนในร้อยส่วน ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ	54

รูป (ต่อ)	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์อัตราการเย็นตัวในช่วงก่อนเกิดผลึกและอัตราการเย็นตัวในช่วงหลังเกิดผลึกกับปริมาณไดคิมิวเปอร์ออกไซค์ของ (a) HDPE (b) LLDPE และ (c) LDPE ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ	55
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเกิดผลึกของ HDPE LLDPE และ LDPE ที่ไม่ผสมและผสมไดคิมิวเปอร์ออกไซค์ 3 ส่วนในร้อยละ ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ	56
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเย็นตัวของ PP เมื่อตำแหน่งการวัด $r/R = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 อุณหภูมิหล่อเย็น 5 องศาเซลเซียส	56
4.17 ค่าปริมาณการเกิดเจลของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ	58
4.18 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผ่านการวัดปริมาณเจลที่เกิดขึ้นของพอลิเอทิลีนที่ผสม ไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์	58
4.19 มอดูลัสความทนแรงดึงของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ	60
4.20 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ	60
4.21 มอดูลัสความทนต่อแรงดัดของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ	61
4.22 ความต้านทานต่อแรงดัดสูงสุดของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซค์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ	61
4.23 กราฟการเย็นตัวของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ 1 ส่วนในร้อยละ โดย (a) ไดคิมิวเปอร์ออกไซค์ (b) ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์	62
4.24 กราฟการเย็นตัวของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ 2 ส่วนในร้อยละ โดย (a) ไดคิมิวเปอร์ออกไซค์ (b) ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์	62
4.25 กราฟการเย็นตัวของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ 3 ส่วนในร้อยละ โดย (a) ไดคิมิวเปอร์ออกไซค์ (b) ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์	63
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวในช่วงก่อนเกิดผลึกและหลังเกิดผลึกของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซค์ชนิด (a) ไดคิมิวเปอร์ออกไซค์และ (b) ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซค์ในปริมาณต่างๆ ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ 4, 8 และ 12 ลิตรต่อนาที	63

รูป (ต่อ)	หน้า
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเกิดผลึกของ HDPE ที่ผสมสารเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณต่างๆ ณ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ 4 8 และ 12 ลิตรต่อนาที (a) ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์และ (b) ไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์	64
4.28 มอดูลัสความทนแรงดึงของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิด ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อย ส่วน โดยทำการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ	67
4.29 ความต้านทานความทนแรงดึงของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนใน ร้อยส่วน โดยทำการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ	67
4.30 มอดูลัสความทนต่อแรงค้ำของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนใน ร้อยส่วน โดยทำการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ	68
4.31 ความต้านทานต่อแรงค้ำสูงสุดของ HDPE ที่ไม่ผสมและผสมสารเปอร์ออกไซด์ ชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์หรือไดเตอร์บิวทิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนใน ร้อยส่วน โดยทำการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ	68