ผลของโครงสร้างเชิงโมเลกุลของพอลิเอทิลีนที่ผสมสารกระตุ้นเปอร์ออกไซค์ต่อสมบัติเชิงกล เชิงกายภาพ และพฤติกรรมการเย็นตัว

Effect of Molecular Structure of Polyethylene Incorporated with Peroxide Activator on Mechanical and Physical Properties, and Cooling Behavior

โสมธิดา ลิขิตเลิศ[1*] อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์[2] ชัชชัย วงศ์เฉลียว[2] และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[3]
Somthida Likhitlert[1], Apisit Kositchaiyong[2], Chatchai Wongchaleo[2] and Narongrit Sombatsompop[3]

[1] Graduate student, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, Division of Materials Technology, School of Energy Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
[2] Researcher, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, Division of Materials Technology, School of Energy Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
[3] Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, Division of Materials Technology, School of Energy Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
[*]e-mail: mook_246@hotmail.com

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของการเติมสารเปอร์ออกไซด์ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สำหรับสารเปอร์ออกไซด์ที่ใช้คือ ไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ โดยทำการผสม ในช่วง 1 ถึง 3 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเอทิลีน ผลการทดลอง พบว่าการเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ในพอลิเอทิลีนส่งผลให้ปริมาณเจลเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเจล ในขณะที่สมบัติความต้านทานแรงดึงและปริมาณความเป็นผลึกลดลง สำหรับพฤติกรรมการเย็นตัว พบว่าอุณหภูมิการเย็นตัวของพอลิเอทิลีนมีช่วงคงที่ประมาณ 92 – 120°C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ได้การวัดสมบัติทางความร้อน โดยขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเอทิลีน และไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ที่เติมลงไป เมื่อพิจารณาอัตราการเย็นตัว พบว่าการวัดค่าดังกล่าวในช่วงก่อนอุณหภูมิการเกิดผลึก การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและการเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าอัตราการเย็นตัวในพอลิเอทิลีนมีค่าสูงขึ้น

Abstract: This work studied the effects of the addition of peroxide activator in High-Density Polyethylene (HDPE), Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE), Low-Density Polyethylene (LDPE). Dicumyl peroxide (DCP) used as peroxide activator was varied from 1 to 3 parts per hundred (pph). It was found that the addition of DCP in polyethylenes resulted in an increase in gel content. Varying DCP contents showed no difference in gel content value of all polyethylenes, whereas the higher DCP content resulted in decreasing in tensile properties and the degree of crystallinity of polyethylenes. When considering cooling behavior, the temperature of molten polyethylene appeared around 92 to 120°C, which corresponded to the crystallization temperatures obtained from DSC results, depending on the molecular structure of polyethylene and the DCP content. The cooling rate calculated from the crystallization

temperature was high with increasing coolant flow rate and addition of DCP affected cooling rate value to be higher than the value obtained from those opposite aspects.

บทนำ

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูก ทนต่อสารเคมีและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนมีข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิการใช้งานหรืออุณหภูมิการอ่อนตัวต่ำ รวมถึงความแข็งแรงลดลงมากเมื่อได้รับความร้อน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ การทำให้พอลิเอทิลีนมีโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมขวาง (Crosslink structure) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถปรับปรุงให้พอลิเอทิลีนมีสมบัติเชิงกลเช่นความเหนียว และความทนทานต่อแรงกระแทกได้สูงขึ้น รวมถึงใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง เช่น ท่อส่งน้ำร้อน สายไฟเคเบิล เป็นต้น [1]

การทำให้พอลิเอทิลีนมีโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมขวางมี 3 วิธีคือ1) การใช้รังสี 2) การเติมสารประเภทไซเลน และ 3) การเติมสารประเภทเปอร์ออกไซด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเพิ่มความเข้มของรังสีที่ใช้กระตุ้นให้โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดแรดิคัล หรือการเติมสารประเภทไซเลน ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดมีการเชื่อมขวางสูงขึ้น อุณหภูมิการอ่อนตัวทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) และอุณหภูมิในการสลายตัว (Decomposition temperature) เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการสึกหรอของพอลิเอทิลีนลดลง [2,3] ส่วนการเติมเปอร์ออกไซด์ลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พบว่าค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) และค่าระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break) เวลาในการเกิดพันธะเชื่อมขวางและความเป็นผลึกลดลง แต่ค่าความแข็งแกร่งคืบ (Creep modulus) มีค่าเพิ่มขึ้น [4,5] และเมื่อพิจารณาถึงกลไกการเกิดผลึกพร้อมกับการเชื่อมขวาง พบว่าการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) โดยการกระตุ้นด้วยรังสีแกมมา และขึ้นรูปด้วยกระบวนการความดันสูง ส่งผลต่อกลไกการเกิดผลึก ซึ่งทำให้ปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีนและความต้านทานต่อความล้ามีค่าเพิ่มขึ้น

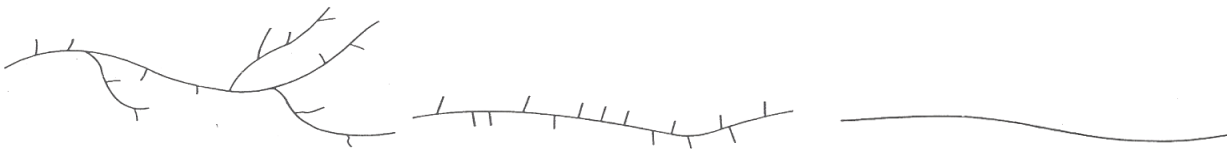
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน 3 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-Density Polyethylene, LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene, LDPE) ที่ผสมสารเปอร์ออกไซด์ชนิดไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ปริมาณต่างๆที่ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง ปริมาณการเกิดเจล อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ปริมาณความเป็นผลึก และพฤติกรรมการเย็นตัว

วิธีการทดลอง

วัสดุและสารเคมี

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (เกรด H555JA) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (เกรด M3804RUP) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (เกรด LD1905FA) ได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัทเครือซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ซึ่งความแตกต่างของโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 1 สารกระตุ้นการเชื่อมขวางเปอร์ออกไซด์คือไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ เกรด

Aceox DCP ได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัทพีซีที อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด โดยใช้ผสมในพอลิเอทิลีนที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 1 2 และ 3 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเอทิลีน (Parts per hundred: pph)



a.) b.) c.)

รูปที่ 1 ความแตกต่างของโมเลกุลของพอลิเอทิลีน a.) LDPE b.) LLDPE c.)HDPE

ขั้นตอนการเตรียมสารผสมและเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมวัสดุผสมเริ่มจากนำพอลิเอทิลีนมาขึ้นรูปโดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ของบริษัทแลปเทค เอนจิเนียริ่ง จำกัดโดยใช้อุณหภูมิการผสมที่ 160°C เป็นเวลา 5 นาที เติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ตามปริมาณที่กำหนดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำของผสมที่ได้เข้าเครื่องบดพลาสติก (Crusher) ก่อนนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot press) ของบริษัทแลปเทค จำกัด โดยสภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 240°C และความดัน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การหาปริมาณเจล

การหาปริมาณเจลอาศัยวิธีทดสอบตาม ASTM D2765 โดยตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม นำไปละลายในสารละลายไซลีนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองและอบที่อุณหภูมิ 150°C จนแห้งและนำมาชั่งน้ำหนัก โดยปริมาณเจลที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังงานวิจัยของ [3]

การหาปริมาณความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึก

การหาปริมาณความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ของบริษัท Mettler Toledo เริ่มจากการชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 5 mg ตั้งโปรแกรมการทดสอบ โดยเพิ่มและลดอุณหภูมิจาก 25-180°C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min ทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ดังงานวิจัยของ Khonakdar และคณะ [4]

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานนี้คือการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงโดยอาศัยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่นโดยใช้มาตรฐานตาม ASTM D638 ชิ้นงานทดสอบถูกตัดตามมาตรฐานโดยใช้อัตราการดึงยืดที่ 100 mm/min

การศึกษาอัตราการเย็นตัว

การศึกษาอัตราการเย็นตัวทำได้โดยอาศัยอุปกรณ์ที่สามารถวัดอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปได้ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) ชุดวัดอุณหภูมิ และ 2) ระบบปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อ ขั้นตอนการวัดอัตราการเย็นตัวเริ่มจากเทพอลิเมอร์ลงบนแม่พิมพ์ จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิลชนิด K วางลงบนพอลิเมอร์โดยให้

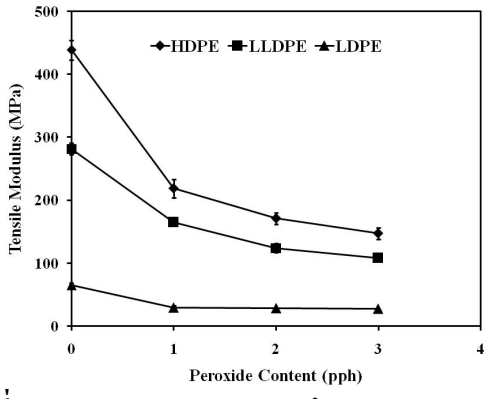
ปลายเทอร์โมคัปเปิลอยู่บริเวณตรงกลางแม่พิมพ์และเทพอลิเมอร์ลงไปให้เต็มก่อนที่จะนำแม่พิมพ์แผ่นที่สองวางปิด จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดันโดยใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 240 °C เริ่มทำการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มแรงดันแม่พิมพ์เป็น 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที และนำชิ้นงานมาหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจะถูกปรับโดยวัดอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter) ที่อัตราต่างๆ ได้แก่ 4 8 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

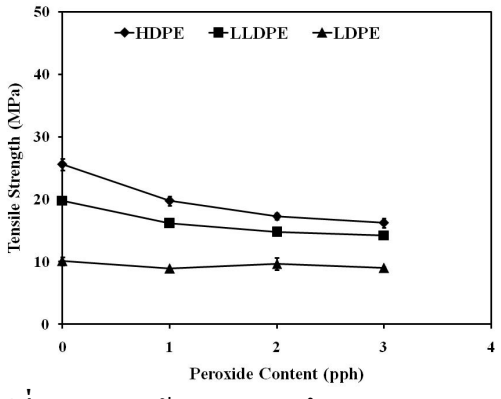
ตารางที่ 1 ปริมาณผลึก ปริมาณเจล และอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนที่ได้จากเครื่อง DSC

พอลิเอทิลีน	HDPE			LLDPE			LDPE		
ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (pph)	0	3	เปลี่ยนแปลง (%)	0	3	เปลี่ยนแปลง (%)	0	3	เปลี่ยนแปลง (%)
ปริมาณเจล (Normalize gel %)	0	84	84	0	97	97	0	99	99
ปริมาณความเป็นผลึก (%)	60.9	44.4	-16.0	51.7	40.9	-10.8	31.4	27.6	-3.8
อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	112	107	-5	111	104	-7	96	88	-8

ตารางที่ 1 แสดงผลของการเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อปริมาณเจล ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเจลมีค่าสูงขึ้น โดย LDPE มีค่าดังกล่าวสูงที่สุด รองลงมาคือ LLDPE และ HDPE ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก LDPE มีอะตอมของเทอเทียรีคาร์บอน (Tertiary carbon atom) ซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีความว่องไวต่อการเกิดแรดิคัล (Radical) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดอื่น [7]



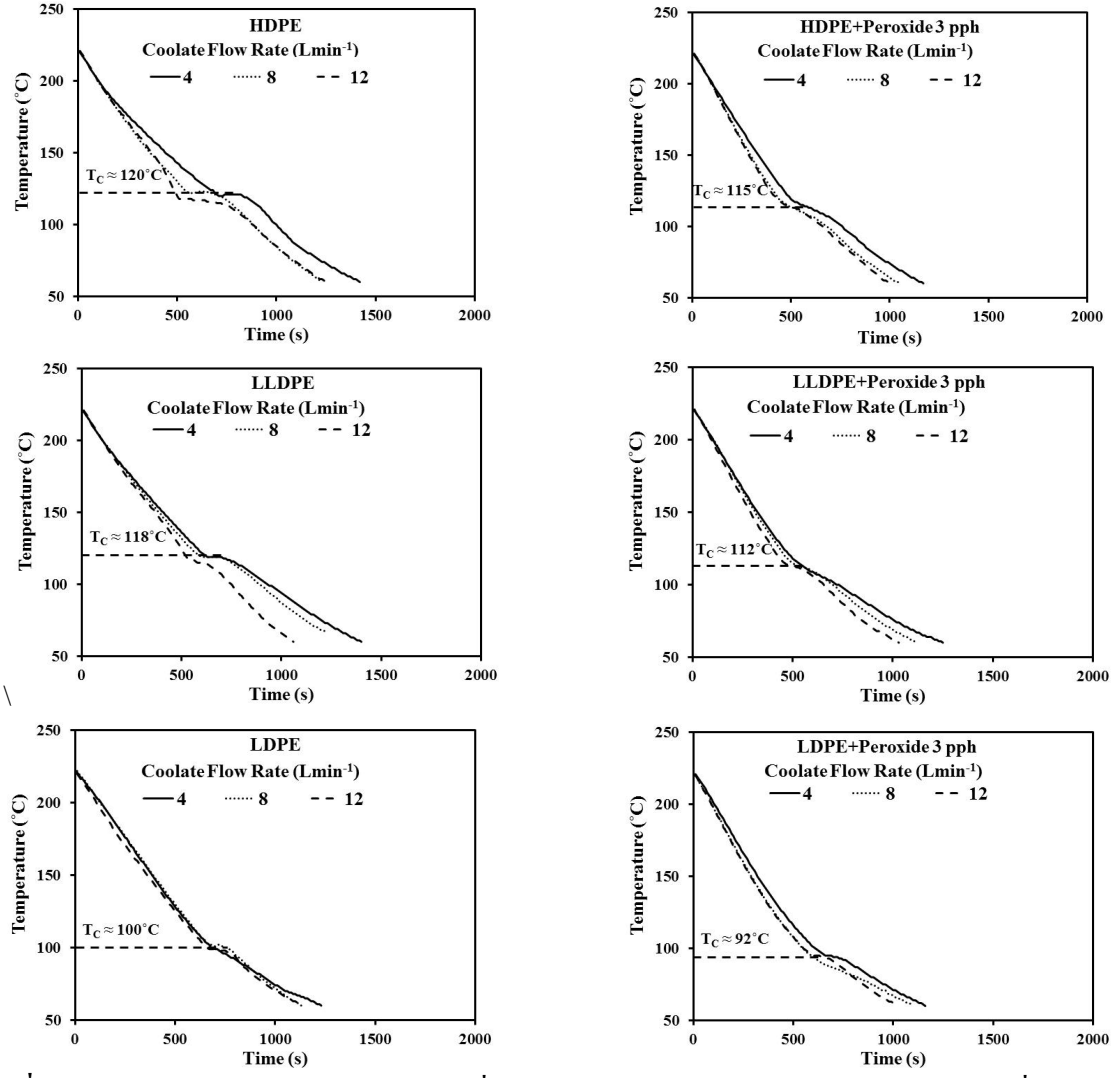
รูปที่ 2 ค่ามอดูลัสความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนที่ผสมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน



รูปที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิเอทิลีนที่ผสมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างกัน

ปริมาณความเป็นผลึกเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีผสมและไม่ผสมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 pph แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าการเติมเปอร์ออกไซด์ทำให้ความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากสารเปอร์ออกไซด์ทำให้โมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีการเชื่อมขวางเกิดขึ้น จึงขัดขวางสายโซ่พอลิเมอร์ไม่ให้สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ [4] และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเป็นผลึกในพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ

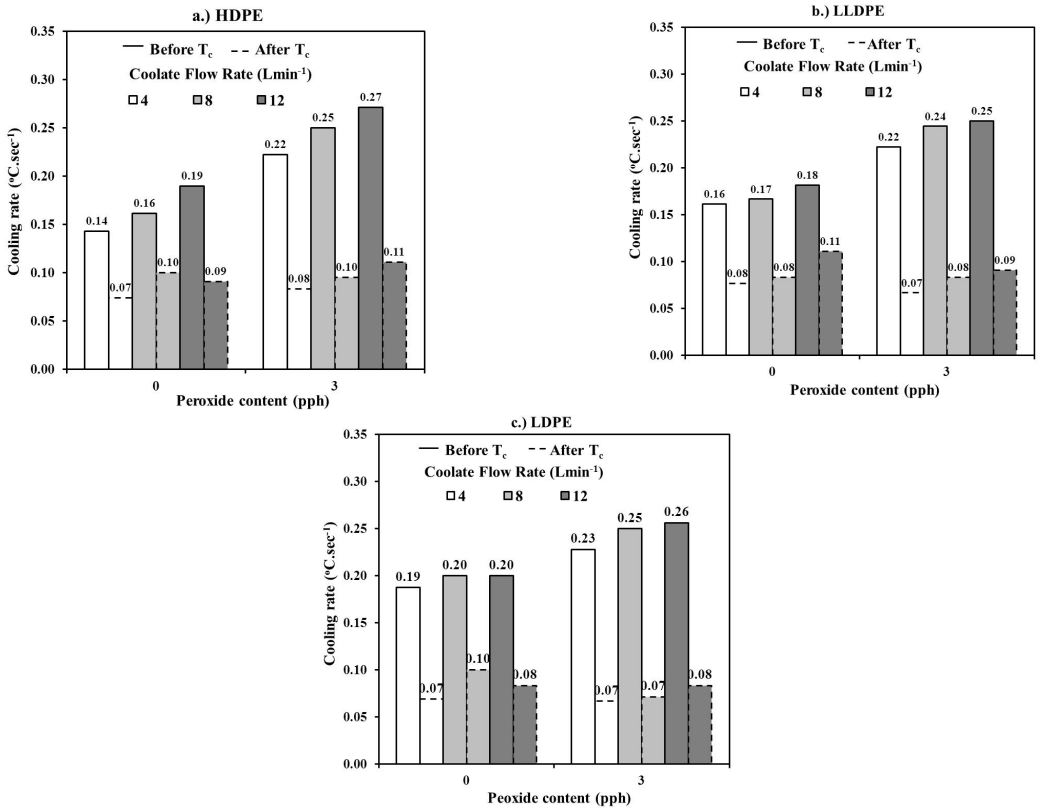
เปรียบเทียบในกรณีเติมและไม่เติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ พบว่าHDPE มีปริมาณความเป็นผลึกลดลงมากที่สุด รองลงมาเป็น LLDPE และ LDPE ตามลำดับ ส่วนค่ามอดูลัสความทนแรงดึง และความต้านทานแรงดึงสูงสุด แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าการเพิ่มปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่าดังกล่าวลดลง เนื่องจากไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกลดลง และเมื่อเปรียบเทียบผลของโครงสร้างโมเลกุลพอลิเอทิลีน พบว่า HDPE มีสมบัติแรงดึงลดลงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองด้านความเป็นผลึกในตารางที่ 1



รูปที่ 4 เส้นกราฟการเย็นตัวของพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสม (ซ้าย) และผสมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อนส่วนของพอลิเอทิลีน (ขวา) ที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 4 8 และ 12 ลิตรต่อนาที

การวัดอุณหภูมิขณะเย็นตัวระหว่างการขึ้นรูปสามารถแสดงเป็นเส้นกราฟการเย็นตัวเทียบกับเวลา แสดงดังรูปที่ 4 พบว่ากราฟมีช่วงอุณหภูมิคงที่ (Plateau temperature) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ระหว่าง 92 – 120 °C ที่แสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิคงที่ในเส้นกราฟการเย็นตัวนั้นเป็นผลมาจากการคายความร้อนในระหว่างกระบวนการเกิดผลึก [8-9] สำหรับผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นพบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ พบว่า

อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าลดลง ส่วนเวลาในการเหนี่ยวนำต่อการเกิดผลึก (Induction time) มากขึ้น เนื่องจากผลของการเกิดการเชื่อมขวางพอลิเอทิลีนส่งผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยากขึ้น [4]



รูปที่ 5 อัตราการเย็นตัวของพอลิเอทิลีนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการเกิดผลึกที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 4 8 และ 12 ลิตรต่อนาที โดยที่ a คือ HDPE b คือ LLDPE และ c คือ LDPE

ค่าอัตราการเย็นตัวของพอลิเอทิลีนที่ไม่ผสมและผสมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เปรียบเทียบระหว่างช่วงก่อนและหลังการเกิดผลึก แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าอัตราการเย็นตัวในช่วงก่อนการเกิดผลึกมีค่าสูงกว่าช่วงหลังการเกิดผลึก เนื่องจากในช่วงก่อนการเกิดผลึกพอลิเมอร์ซึ่งคงอยู่ในสถานะหลอมเหลวบางส่วนนั้นโมเลกุลมีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้อยู่จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ทั้งแบบการนำและพาความร้อน ในขณะที่ช่วงหลังการเกิดผลึกพอลิเมอร์อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนไหวต่ำจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนอย่างเดียว ส่วนผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น พบว่าอัตราการเย็นตัวสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้มีการพาความร้อนได้มากกว่า

สำหรับอัตราการเย็นตัวในช่วงก่อนเกิดผลึกเปรียบเทียบระหว่างในกรณีของที่ไม่ได้เติมและเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ พบว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้เติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเย็นตัวต่ำกว่ากว่าพอลิเอทิลีนที่เติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้เติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์สามารถสร้างผลึกให้เกิดขึ้นได้มากกว่าและทำให้การคายความร้อนออกมาในช่วงระหว่างการเย็นตัว และสำหรับอัตราการเย็นตัวในช่วงหลังเกิดผลึกเปรียบเทียบระหว่างในกรณีของพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้เติมและเติมไดคิวมิวเปอร์

ออกไซค์ พบว่าอัตราการเย็นตัวมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากพอลิเอทิลีนเกิดเป็นผลึกสมบูรณ์แล้ว จึงไม่มีปฏิกิริยาการคายความร้อนหรือดูดความร้อนของโมเลกุลพอลิเอทิลีนเกิดขึ้น ส่วนอัตราการเย็นตัวของ HDPE มีค่าต่ำกว่า LLDPE และ LDPE ตามลำดับ เนื่องจากมีการคายความร้อนที่เกิดจากผลึกสูงซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีนแต่ละประเภท

สรุปผลการทดลอง

การเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ส่งผลให้ปริมาณเจลในพอลิเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้น ส่วนสมบัติความต้านทานแรงดึงและปริมาณความเป็นผลึกพบว่ามีค่าลดลง เมื่อพิจารณาเส้นกราฟการเย็นตัว พบว่าพอลิเอทิลีนแสดงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ประมาณ 92 – 120 °C ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบสมบัติทางความร้อน สำหรับอัตราการเย็นตัวของวัสดุผสมพบว่าค่าดังกล่าวในช่วงก่อนอุณหภูมิการเกิดผลึก การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และการเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซค์ส่งผลให้ค่าอัตราการเย็นตัวในพอลิเอทิลีนมีค่าสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] T.R. Manley, M.M. Qayyum, The effects of varying peroxide concentration in crosslinked linear polyethylene, Department of Materials Science. Newcastle University, 1970, pp. 176-188

[2] P.H. Kang, Y.C. Nho, The effect of g-irradiation on ultra-high molecular weight polyethylene recrystallized under different cooling conditions, Radiation Physics and Chemistry. 60 (2001) 79-87.

[3] K. Sirisinha., M. Boonkongkaew, S. Kositchaiyong, The effect of silane carriers on silane grafting of high-density polyethylene and properties of crosslinked products. Polymer Testing, 29 (2000) 958–965.

[4] H.A. Khonakdar, J. Morshedian, U. Wagenknechtand, S.H. Jafari, An investigation of chemical crosslinking effect on properties of high-density polyethylene, Polymer. 44 (2003) 4301–4309.

[5] T.K. Kang, C.S. Ha, Effect of processing variables on the crosslinking of HDPE by peroxide, Polymer Testing. 19 (2000) 773–783.

[6] K.S. Simis, A. Bistolfi, A. AnujBellare, L.A. Pruitt, The combined effects of crosslinking and high crystallinity on the microstructural and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene, Biomaterials. 27 (2006) 1688–1694.

[7] J.V. Gulmine, P.R. Janissek, H.M. Heise, L. Akcelrud, Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering, Polymer Degradation and Stability. 79 (2003) 385–397.

[8] N. Sombatsompop, A. Kositchaiyong, E. Wimolmala E, Experimental analysis of temperature and crystallinity profiles of wood-sawdust/PP composites during cooling, J Appl Sci. 102 (2006) 1896–1905.

[9] N. Sombatsompop, A. Tangsongcharoen, Effect of glass-fiber content and coolant temperature on temperature and crystallinity profiles of PP melt during cooling, J Appl Sci. 82 (2000) 2087–2097.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยฯขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (ทุนวิจัยมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสัญญาเลขที่ MRG-WI535S053) บริษัท เจริญมิตร จำกัด และทุนวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research Universities; NRU) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับห้องปฏิบัติการขึ้นรูปชิ้นงาน และ ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรม

วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับคำปรึกษาด้านการวัดอุณหภูมิชิ้นงานพอลิเอทิลีน

Keywords: Polyethylene / Molecular structure / Peroxide activator / Cooling behavior