ผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน

นางสาวกชกร กีรติจิรัฐิติกาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF ULTRAMARINE BLUE AND PHTHALOCYANINE BLUE PIGMENTS ON CRYSTALLIZATION OF POLYPROPYLENE

Miss Kodchagorn Keeratichiraththitikan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน
โดย	นางสาวกชกร กีรติจิรัฐิติกาล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. วรรณี ฉินศิริกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. วรรณี ฉินศิริกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. นพดล เกิดดอนแฝก)

กชกร กีรติจิรัฐติกาล : ผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน. (EFFECTS OF ULTRAMARINE BLUE AND PHTHALOCYANINE BLUE PIGMENTS ON CRYSTALLIZATION OF POLYPROPYLENE). อ.ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ : รศ. อรอุษา สรวารี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. วรรณี ฉินศิริกุล, 93 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยนำสารสีอัลตรามารีนบลูหรือฟแทโลไซยานีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001-0.1 โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ทำให้ได้เม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสี แล้วนำเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีที่เตรียมได้ไปตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.002 และ 0.01 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงนำพอลิโพรพิลีนผสมอัลตรามารีนบลู (ร้อยละ 0.0001-0.002 โดยน้ำหนัก) และผสมฟแทโลไซยานีนบลู (ร้อยละ 0.0001-0.02 โดยน้ำหนัก) มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นสกรูเดี่ยว จากนั้น นำชิ้นงานไปตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึก ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ โครงสร้างผลึก ความต้านแรงดึง และความใส โดยเปรียบเทียบผลการตรวจสอบทั้งหมดกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่สารสี

จากการทดลองพบว่า การใส่สารสีอัลตรามารีนบลูหรือสารสีฟแทโลไซยานีนบลูที่ปริมาณเล็กน้อย มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกและดีกรีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สเฟียรูไลต์ขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่า ทั้งสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ โดยฟแทโลไซยานีนบลูเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกที่มีประสิทธิภาพสูงมาก เพราะสามารถทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นถึง 15 องศาเซลเซียส จากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมแสดงให้เห็นว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิดไม่มีผลต่อรูปผลึกของพอลิโพรพิลีน ผลการทดสอบความต้านแรงดึงและสมบัติทางแสง พบว่า การใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู สามารถปรับปรุงความต้านแรงดึงและความใสของพอลิโพรพิลีนได้

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

##5272690423: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORDS : POLYPROPYLENE/NUCLEATION/ULTRAMARINE BLUE/
PHTHALOCYANINE BLUE

KODCHAGORN KEERATICHIRATHTHITIKAN : EFFECTS OF ULTRAMARINE BLUE AND PHTHALOCYANINE BLUE PIGMENTS ON CRYSTALLIZATION OF POLYPROPYLENE. ADVISOR : ASSOC. PROF. ONUSA SARAVARI, CO-ADVISOR : WANNEE CHINSIRIKUL, Ph.D., 93 pp.

In this research, effects of ultramarine blue (ULT) and phthalocyanine blue (PHT) pigments on crystallization of polypropylene (PP) were investigated. Either ULT pigment or PHT pigment at the amount of 0.0001-0.1 wt% was melt mixed with PP in a single screw extruder. The obtained extrudates were pelletized and then examined for their crystallization behaviors using differential scanning calorimetry (DSC) technique. It was observed that the crystallization temperature of PP was nearly constant when the ULT and PHT concentrations were increased from 0.002 wt% and 0.01 wt%, respectively. Thus, the series of PP filled with various concentrations of ULT (0.0001-0.002 wt%) and PHT (0.0001-0.02 wt%) pigments were consequently fabricated into thin sheets using a single screw plastic sheet extruder. The PP/pigment samples were characterized for their crystallization behavior, size of spherulites, crystal structure, tensile strength, and clarity. Overall results were compared with those of the neat PP.

It was found that the addition of even a very small amount of ULT or PHT into PP resulted in a higher crystallization temperature, a higher degree of crystallinity, and a smaller spherulite size. This indicated that both ULT and PHT are able to nucleate PP, in which PHT is a very efficient nucleating agent, increasing the crystallization temperature of PP by 15°C. X-ray diffraction patterns revealed that the addition of both pigments did not affect the crystal structure of PP. The results of tensile and optical tests showed that the tensile strength and clarity of PP were improved with the ULT and PHT addition.

Department: Materials Science Student's Signature……

Field of Study: Applied Polymer Science and Textile technology Advisor's Signature……

Academic Year: 2011 Co-Advisor's Signature……

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. วรรณี ฉินศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ และ ดร. นพดล เกิดดอนแฝก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประกาศิต ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก่า คะซิมา ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์
6. รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกูลกิจ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบและเครื่องมือ
7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบและเครื่องมือ
9. บริษัท เอ็ชเอ็มซี พอลิเมอร์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย
10. บริษัท ไทยนามพลาสติกส์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ
11. บริษัท คลาเรียนท์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ
12. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องชาย ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. วารสารปริทรรศน์..... 3

2.1 พอลิโพรพิลีน..... 3

2.1.1 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน..... 3

2.1.2 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน..... 4

2.1.3 สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน..... 5

2.1.4 โครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน..... 6

2.1.4.1 รูปผลึกแบบแอลฟา..... 8

2.1.4.2 รูปผลึกแบบบีตา..... 9

2.1.4.3 รูปผลึกแบบแกมมา..... 10

2.1.4.4 รูปผลึกแบบสเมกติก..... 10

2.2 สารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน..... 11

2.2.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อนิวเคลียสผลึก..... 13

2.3 สารสี..... 14

2.3.1 สารสีอนินทรีย์..... 14

2.3.2 สารสีอินทรีย์..... 15

2.3.3 อัลตรามารีนบลู..... 16

2.3.4 ฟแทโลไซยานีนบลู..... 16

3. การทดลอง..... 21

3.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 21

บทที่ หน้า

3.1.1 วัตถุดิบ..... 21
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 22
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 22
3.2 วิธีเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีน..... 23
3.2.1 การเตรียมเม็ดพลาสติกเข้มข้นของพอลิโพรพิลีน (masterbatch) ผสมสารสีอัลตรามารีนบลูหรือฟแทโลไซยานีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.001-0.1 โดยน้ำหนัก..... 24
3.2.2 การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.0001-0.05 โดยน้ำหนัก..... 24
3.2.3 การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.0001-0.05 โดยน้ำหนัก..... 24
3.2.4 การขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรพิลีน..... 25
3.3 การตรวจสอบสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู..... 25
3.3.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 25
3.3.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์..... 25
3.4 การตรวจสอบผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน..... 26
3.4.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์..... 26
3.4.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก..... 26
3.4.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า..... 27
3.4.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์..... 27
3.5 การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของแผ่นพอลิโพรพิลีน..... 27
3.6 การทดสอบสมบัติทางแสงของแผ่นพอลิโพรพิลีน..... 27
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 28
4.1 การตรวจสอบสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู..... 28
4.1.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 28
4.1.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์..... 31

บทที่ หน้า

4.2 การตรวจสอบผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกพอลิโพรพิลีน..... 33
4.2.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์..... 33
4.2.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า..... 44
4.2.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์..... 46
4.3 การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของแผ่นพอลิโพรพิลีน..... 48
4.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของแผ่นพอลิโพรพิลีน..... 52
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 54
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 54
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 55
รายการอ้างอิง..... 56
ภาคผนวก..... 58
ภาคผนวก ก..... 59
ภาคผนวก ข..... 65
ภาคผนวก ค..... 82
ภาคผนวก ง..... 89
ภาคผนวก จ..... 91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 93

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน..... 12

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 35

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 40

ตารางที่ 4.3 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 42

ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 45

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 49

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 50

ตารางที่ 4.7 ความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 53

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน (a) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (b) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และ (c) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน……	5
ภาพที่ 2.2	คอนฟอร์เมชันของสายโซ่ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	6
ภาพที่ 2.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบ (a) แอลฟา (b) บีตา และ (c) แกมมา.....	7
ภาพที่ 2.4	ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน C ตั้งฉากกับระนาบ.....	8
ภาพที่ 2.5	ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ.....	9
ภาพที่ 2.6	ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ.....	10
ภาพที่ 2.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบสเมกติก.....	11
ภาพที่ 2.8	ผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน....	12
ภาพที่ 2.9	DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน.....	14
ภาพที่ 2.10	โครงสร้างของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู.....	17
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมพอลิโพรพิลีนผสมสารสี.....	23
ภาพที่ 4.1	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีอัลตรามารีนบลู ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	28
ภาพที่ 4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีอัลตรามารีนบลู ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	29
ภาพที่ 4.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	29
ภาพที่ 4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย10,000 เท่า.....	30
ภาพที่ 4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย20,000 เท่า.....	30

หน้า

ภาพที่ 4.6 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีอัลตรามารีนบลู..... 32
ภาพที่ 4.7 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 32
ภาพที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีนและเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณ 0.0001%-0.1% โดยน้ำหนัก..... 36
ภาพที่ 4.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีนและเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณ 0.0001%-0.1% โดยน้ำหนัก..... 37
ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิการเกิดผลึกของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 38
ภาพที่ 4.11 ดีกรีของความเป็นผลึกของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 38
ภาพที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีน-บลูเทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 41
ภาพที่ 4.13 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู เทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู..... 43
ภาพที่ 4.14 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู เทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 43
ภาพที่ 4.15 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 45
ภาพที่ 4.16 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู (a) PP, (b) PP/ULT 0.0001%, (c) PP/ULT 0.0005%, (d) PP/ULT 0.001%, (e) PP/ULT 0.002%..... 46

หน้า

ภาพที่ 4.17 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู (a) PP, (b) PP/PHT 0.0001%, (c) PP/ PHT 0.0005%, (d) PP/ PHT 0.001%, (e) PP/ PHT 0.002%, (f) PP/PHT 0.01%, (g) PP/PHT 0.015%, (h) PP/PHT 0.02%..... 47

ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู.... 49

ภาพที่ 4.19 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 50

ภาพที่ 4.20 ความใสของแผ่นทดสอบพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู..... 53

บทที่ 1
บทนำ

พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบสเตอริโอ (stereo configurations) ได้ 3 แบบคือ แบบไอโซแทกติก (isotactic) แบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic) และแบบอะแทกติก (atactic) แต่แบบที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือ แบบไอโซแทกติก โดยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP) สามารถเกิดผลึกได้ 4 รูปแบบที่แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ รูปแบบผลึกแบบแอลฟา (α-form) แบบบีตา (β-form) แบบแกมมา (γ-form) และแบบสเมกติก (smectic) ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน จะประกอบด้วยผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีผลึกแบบบีตาบ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบแอลฟา จะมีมอดูลัสและความต้านแรงดึงสูง ความทนแรงกระแทกปานกลาง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตาเป็นส่วนใหญ่ จะมีมอดุลัสและความต้านแรงดึงต่ำกว่า แต่มีความทนแรงกระแทกและสมบัติการยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

สำหรับพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเติบโตของผลึกปานกลางและสามารถทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้นโดยอาศัยวิธีการเกิดนิวเคลียสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous nucleation) จากการใส่สารก่อนิวเคลียสผลึกลงไป ซึ่งสารก่อนิวเคลียสผลึกจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเติบโตของผลึก ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดสม่ำเสมอเล็กลง และมีดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้สารก่อนิวเคลียสผลึกกับพอลิโพรพิลีนจะทำให้เกิดแต่ผลึกแบบแอลฟาและบีตาเท่านั้น สำหรับสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบแอลฟาสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมบิวทิลเบนโซเอต (sodium t-butyl benzoate) อะลูมิเนียมเบนโซเอต (aluminium benzoate) ไดเบนซิลลิดีนซอร์บิทอล (dibenzylidene sorbitol, DBS) ทัลค์ เคาลิน ฯลฯ โดยสารอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารอนินทรีย์ ส่วนสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบบีตาสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีหลายชนิด ได้แก่ ไดโซเดียมฟทาเลต (disodium phthalate) แคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) สารสีควินาคริโดน (quinacridone pigment) ฯลฯ โดยสารสีควินาคริโดนเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบบีตาที่มีประสิทธิภาพสูง

อัลตรามารีนบลู (ultramarine blue pigment) เป็นสารสีอนินทรีย์และฟแทโลไซยานีนบลู (phthalocyanine blue pigment) เป็นสารสีอินทรีย์สีน้ำเงินที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ ให้สีที่สวยงาม ทนความร้อน แสงสว่าง เคมีภัณฑ์และตัวทำละลายต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้สารสีทั้ง 2 ชนิดยังหาได้ง่าย ไม่มีพิษและมีราคาถูกกว่าสารสีควินาคริโดน ซึ่งคาดว่าสารสีสีน้ำเงินทั้ง 2 ชนิดนี้มีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเช่นกัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน ตรวจสอบความสามารถการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของสารสีทั้ง 2 ชนิด และศึกษาผลของการเกิดผลึกต่อสมบัติความต้านแรงดึงและสมบัติทางแสงของชิ้นงานตัวอย่างพอลิโพรพิลีน

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิโพรพิลีน

ในปี ค.ศ. 1869 Berthelot ได้นำโพรพิลีนมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เป็นของเหลวหนืดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและใช้งานในอุตสาหกรรมไม่ได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1955 Natta G และคณะได้สังเคราะห์พอลิโพรพิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงได้เป็นผลสำเร็จโดยการใช้ตัวเร่งออร์กาโนเมทัลลิก (organo metallic) ที่มีไททาเนียมและอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และในปี ค.ศ. 1965 พอลิโพรพิลีน ออกวางจำหน่ายเป็นครั้งแรกโดยบริษัท Hoechst AG [1]

พอลิโพรพิลีนเป็นสเตอริโอเรกุลาร์พอลิเมอร์ (stereoregular polymer) ที่มีความสำคัญทางการค้า โดยพอลิโพรพิลีนถูกปรับปรุงให้เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายทางด้านโครงสร้างทางเคมี เช่น โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) และแบบบล็อก (block copolymer) นอกจากนี้ยังมีการควบคุมการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง [2] เช่น งานฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนอุปกรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ งานฉีดท่อน้ำหรือแผ่นฟิล์มที่มีการดึงยืดทิศทางเดียวและสองทิศทาง อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

2.1.1 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์ จะคล้ายการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน โดยมอนอเมอร์ทั้งสองได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น แก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมันเบา (light oil) โดยส่วนที่เป็น C_3 (โพรพิลีนและโพรเพน) สามารถแยกจากแก๊สอื่นๆได้ง่าย ด้วยวิธีการกลั่นลำดับส่วน แต่การแยกโพรพิลีนจากโพรเพนทำได้ค่อนข้างยาก จึงต้องระมัดระวังในการออกแบบหอกลั่น

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน จำเป็นต้องกำจัดสารเจือปน เช่น น้ำ และ เมทิลอะเซทิลีนออกด้วยความระมัดระวัง

กระบวนการของซีเกลอร์แนตตาที่นำมาใช้สังเคราะห์พอลิโพรพิลีน จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา” ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างทิทาเนียมไตรคลอไรด์ กับอะลูมิเนียมไตรเอทิล หรืออะลูมิเนียมไตรบิวทิล หรืออะลูมิเนียมไดเอทิลโมโนคลอไรด์ในแนฟทาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อให้เกิดเป็นของเหลวข้นหนืดที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 10% และแนฟทา 90% สมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นกับส่วนส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งขนาด และรูปร่างอีกด้วย

โพรพิลีนจะถูกผ่านเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้ความดัน โดยที่สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารเจือจาง (ปกติใช้แนฟทา) จะใส่แยกกัน และปฏิกิริยาจะดำเนินไปภายใต้อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง โดยปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ 80-85 % ปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ และจะเป็นพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) มากกว่าแบบสารละลาย (solution polymerization) [3]

2.1.2 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลโพรพิลีนในสายโซ่โมเลกุลซึ่งโครงสร้างที่ไม่สมมาตรของโพรพิลีนนำไปสู่การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลภายในสายโซ่ได้ 3 แบบ คือ

1. แบบหัวต่อหาง (head to tail)
2. แบบหัวต่อหัว (head to head)
3. แบบหางต่อหาง (tail to tail)

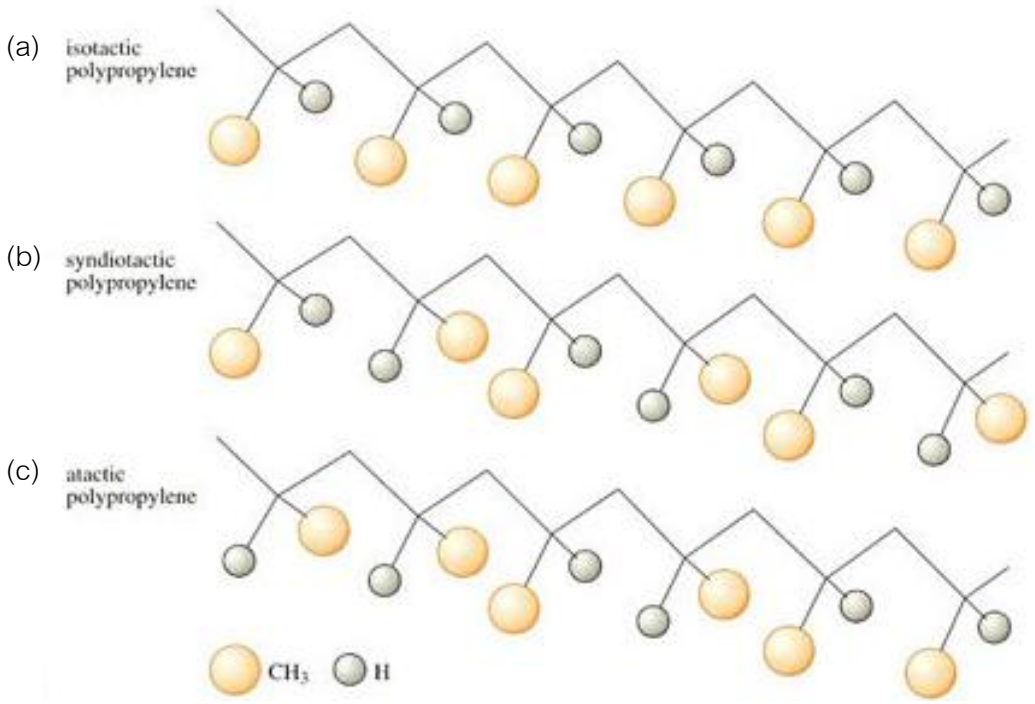
จากผลด้านสเตอริก (steric effect) ของหมู่เมทิลทำให้เกิดการจัดเรียงแบบหัวต่อหางเป็นส่วนใหญ่ ได้เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนที่มีความเป็นระเบียบทางเคมีสูง ซึ่งถ้าในโครงสร้างมีการจัดเรียงแบบหัวต่อหัวและหางต่อหางจะทำให้เกิดข้อบกพร่องทางโครงสร้างเคมีบนสายโซ่พอลิโพรพิลีน และจากการที่หมู่เมทิลมีตำแหน่งอยู่บนคาร์บอนอสมมาตรจึงเกิดโครงสร้างแบบสเตอริโอ (stereo configurations) ได้ 3 แบบคือ

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene, iPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันของระนาบตลอดสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (a)

2. ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene, sPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่สลับกันคนละด้านของระนาบสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (b)

3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene, aPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่แบบสุ่มบนแต่ละด้านของระนาบ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (c) ซึ่งอะแทกติกพอลิโพรพิลีนสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบแรดิคัลระบบเก่าทำให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้

การใช้ตัวเร่งซีเกลอร์แนตตาที่มีความจำเพาะทำให้สามารถเลือกสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกหรือซินดิโอแทกติกได้ ซึ่งพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้าง 2 แบบนี้สามารถเกิดผลึกได้โดยการจัดเรียงส่วนของสายโซ่โมเลกุลขนานกับสายข้างเคียงอย่างต่อเนื่องกันไป



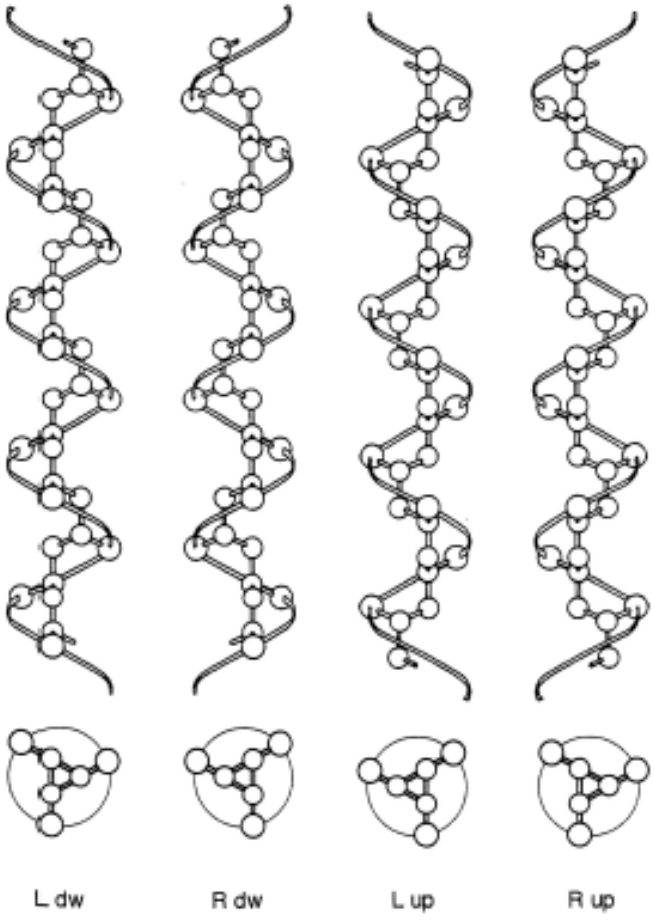
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน (a) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (b) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และ (c) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน

2.1.3 **สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน** [4]

พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเงา ใส ป้องกันความชื้นได้ดีแต่การป้องกันอากาศซึมผ่านต่ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง พอลิโพรพิลีนทนต่อกรดและเบสเป็นอย่างดี และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนความล้า (fatigue) เนื่องจากการหักงอ (flexing) ได้ดี มีจุดอ่อนตัวที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์น้อยกว่าพอลิเอทิลีน เพราะมีไฮโดรเจนอะตอมที่ต่ออยู่กับคาร์บอนองศา 3 (tertiary carbon) ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์และอัลตราไวโอเลตสเตบิไลเซอร์

2.1.4 **โครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน** [5]

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีแนวโน้มเกิดผลึกได้สูงเนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งโคพอลิเมอร์แบบบล็อกและสุ่มของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณโคมอนอเมอร์ชนิดอื่นเพียงเล็กน้อยก็ให้แนวโน้มในลักษณะเดียวกัน โดยสายโซ่โมเลกุลของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีคอนฟอร์เมชันของสายโซ่แบบ 2x3/1 (tgtg) และหมู่แทนที่อสมมาตรของหมู่เมทิลทำให้เกิดการหมุนรอบแกนสันหลัง (backbone) ได้ 2 แบบ คือ เกลียววนขวา (right-handed helices) และเกลียววนซ้าย (left-handed helices) โดยตำแหน่งของหมู่เมทิลที่ติดกับสายโซ่นี้สามารถอยู่ได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของแกนสายโซ่ ดังภาพที่ 2.2

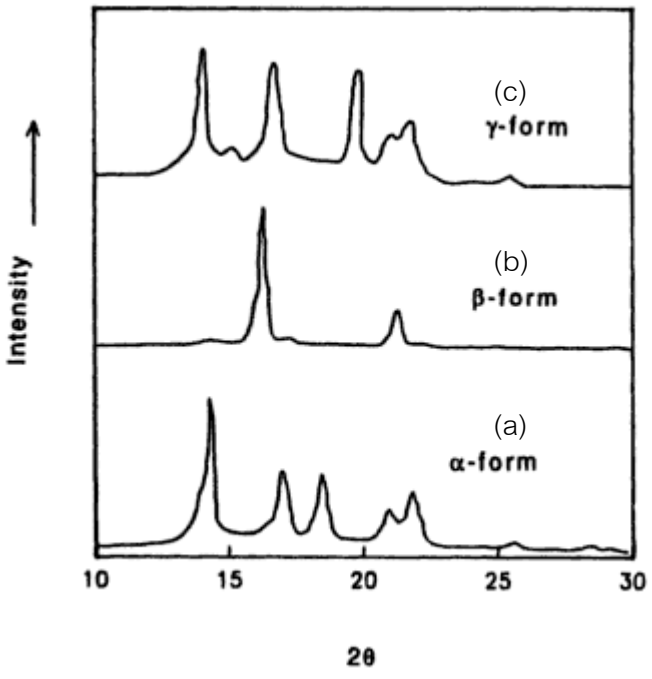


ภาพที่ 2.2 คอนฟอร์เมชันของสายโซ่ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

ทำให้โครงสร้างผลึก (crystal structure หรือ polymorphs) ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดจากการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลมี 4 แบบ คือ

1. รูปผลึกแบบมอนอคลินิก (monoclinic form) หรือแบบแอลฟา (alfa form, α-iPP)
2. รูปผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexzgonal form) หรือแบบบีตา (beta, β-iPP)
3. รูปผลึกแบบไตรคลินิก (triclinic form) หรือแบบแกมมา (gamma form, γ-iPP)
4. รูปผลึกแบบสเมกติก (smectic form)

ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยโครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะประกอบด้วยผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีผลึกแบบบีตาบ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบแอลฟา จะมีมอดูลัสและความต้านแรงดึงสูงแต่มีความทนแรงกระแทกปานกลาง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตาเป็นส่วนใหญ่ จะมีมอดูลัสและความต้านแรงดึงต่ำกว่าแต่มีความทนแรงกระแทกและสมบัติการยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

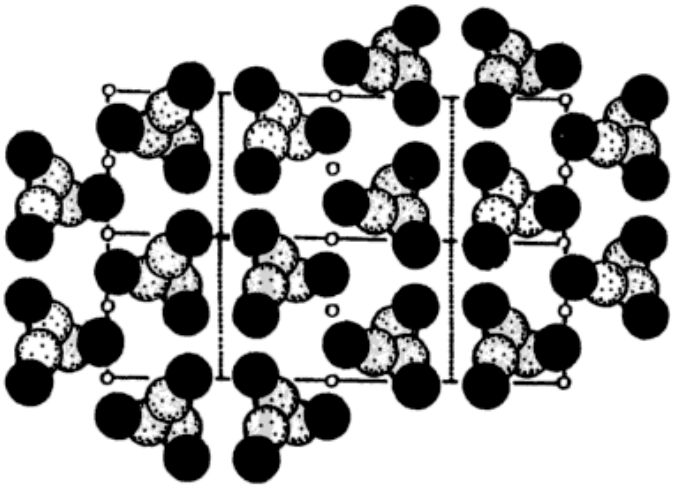


ภาพที่ 2.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบ (a) แอลฟา (b) บีตา และ (c) แกมมา

2.1.4.1 รูปผลึกแบบแอลฟา

รูปผลึกแบบแอลฟาถูกค้นพบครั้งแรกโดย Natta G.ในปีค.ศ. 1956 โดยรูปผลึกแบบแอลฟาเป็นรูปผลึกที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ได้จากการลดอุณหภูมิของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวหรือจากสารละลายไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

จากการศึกษาด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีกสำคัญของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบแอลฟา คือ พีกที่มุม 2θ = 14.1 16.9 18.8 และ 21.2° แสดงถึงระนาบ [110] [040] [130] และ [111] ของผลึกแอลฟาตามลำดับ ส่วนยูนิตเซลล์ (unit cell) ของรูปผลึกแบบแอลฟาคือมอนอคลินิกแลททิส (monoclinic lattice) ที่มี lacttice constant a = 0.666 นาโนเมตร b = 2.078 นาโนเมตร c = 0.6495 นาโนเมตร $\alpha = \gamma = 90°$ และ β = 99.62° ความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.936 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเกลียวนซ้ายหันเข้าหาสายโซ่ที่มีเกลียวนขวาอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.4



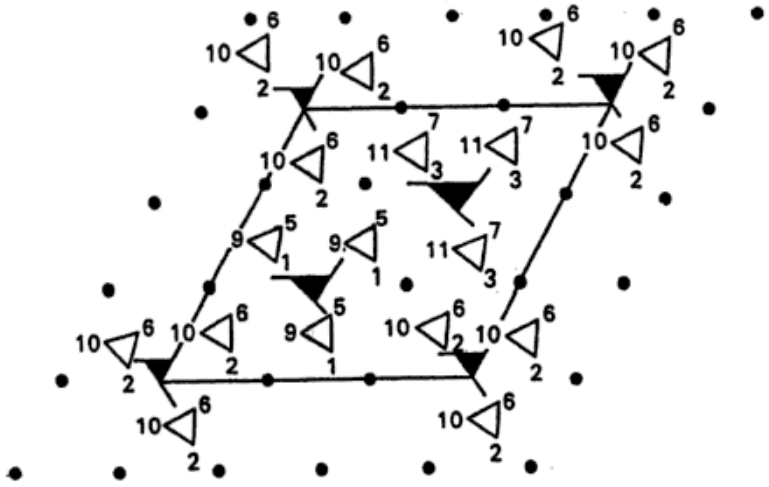
ภาพที่ 2.4 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน C ตั้งฉากกับระนาบ

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบแอลฟามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุล (equilibrium melting point, $T_m°$) ที่ประมาณ 208 ± 8°C

2.1.4.2 รูปผลึกแบบบีตา

รูปผลึกแบบบีตาถูกค้นพบขึ้นในปี ค.ศ. 1959 โดย Keith H.D. และคณะ [6] พบว่า สเฟียรูไลต์ของรูปผลึกแบบบีตาที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ต่างไปจากรูปผลึกแบบแอลฟา ซึ่งเป็นรูปแบบผลึกปกติของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตามีตำแหน่งพีกที่สำคัญคือ ที่ 2θ = 16.1° แสดงระนาบ [003] ของผลึกบีตา และจากการวิเคราะห์ยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตา พบว่าการสะท้อนแสงที่แสดงถึงตำแหน่ง d spacing 0.553 นาโนเมตร และ 0.417 นาโนเมตร เกิดจากการสะท้อนของระนาบ [200] และ [201] จากเฮกซะโกนอลแลททิส (hexzgonal lattice) ที่มีค่า lattice constant a = 1.274 นาโนเมตร c = 0.635 นาโนเมตร $\alpha = \beta = 90°$ และ $\gamma = 120°$ ความหนาแน่นของผลึกจากการคำนวณเท่ากับ 0.921 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภายในแต่ละยูนิตเซลล์มีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเฉพาะเกลียววนซ้ายหรือเกลียววนขวาเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.5



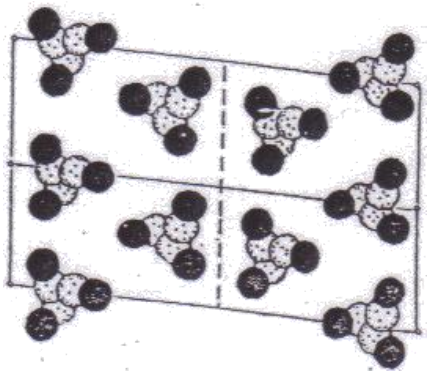
ภาพที่ 2.5 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบบีตามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุลที่ประมาณ 176°C

2.1.4.3 รูปผลึกแบบแกมมา

รูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 โดยพบได้เฉพาะในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มี degree of isotacticity สูง และใช้ความดันสูงในขณะขึ้นรูป ซึ่งลักษณะทางเรขาคณิตและสมบัติทางความร้อนของผลึกแบบแกมมายังไม่เป็นที่แน่ชัด

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบตำแหน่งพีกสำคัญของรูปผลึกแบบแกมมาที่มุม 2θ = 15.8 16.6 และ 20.0° แสดงถึงระนาบ [111] [008] และ [117] ของผลึกแบบแกมมา และสามารถประมาณค่า lattice constant a = 0.654 นาโนเมตร b = 2.14 นาโนเมตร c = 0.650 นาโนเมตร α = 89° β = 99.36° และ γ = 99° ความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.954 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในยูนิตเซลล์ของผลึกแบบแกมมามีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกแบบแอลฟาที่ถูกแรงเฉือนไปในแกน a ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ

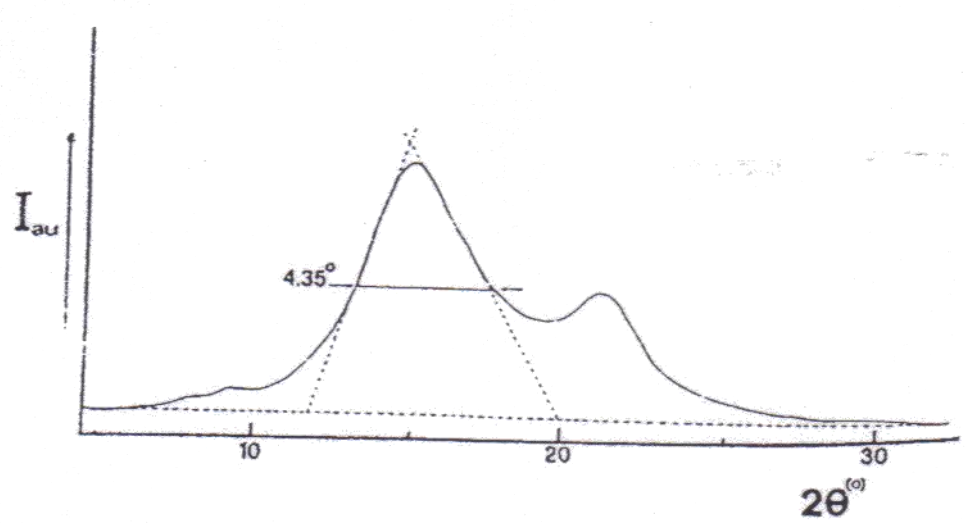
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบแกมมามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุลที่ประมาณ 187°C

2.1.4.4 รูปผลึกแบบสเมกติก

โครงสร้างยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบสเมกติกเกิดจากการลดอุณหภูมิพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างรวดเร็ว ซึ่งยังไม่เป็นที่ไม่เข้าใจมากนัก โดยรูปผลึกแบบสเมกติกเป็นรูปแบบการจัดระเบียบสายโซ่ระหว่างความเป็นอสัญฐานและความเป็นผลึก มีความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ

0.954 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของอะแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีค่าเท่ากับ 0.85 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภายในยูนิตเซลล์มีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวาขนานกันอย่างไม่เป็นระเบียบมากนัก

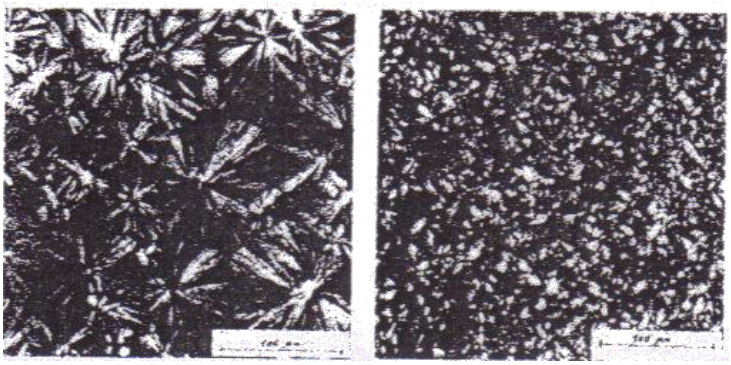
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบสเมกติก พบตำแหน่งพีกสำคัญที่มุม 2θ = 14.8° และ 21.2° ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบสเมกติก

2.2 **สารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน** [7]

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเติบโตของผลึกปานกลาง และสามารถทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น จากการใส่สารก่อนิวเคลียสผลึกลงไป ซึ่งสารก่อนิวเคลียสผลึกจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเติบโตของผลึก ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดสม่ำเสมอและเล็ก มีดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.8 แสดงผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกต่อขนาดของสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน ซึ่งวัดโดย polarized optical microscopy ซึ่งจะเห็นได้ว่า สเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กลงในกรณีที่ใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก



ไม่ใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก | ใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก

ภาพที่ 2.8 ผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน รวมทั้งแสดงเวลาที่ลดลงในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัวเมื่อใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก โดยกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้คือ กระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ

ตารางที่ 2.1 ผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน*

Nucleating agent	T_c , °C	Cooling Time Reduction , %	Modulus , MPa	Gardner Imp. , J @ -30°C	HDT , °C
None	109	-	1060	1.8	79
Millad 3988[a]	124	32.4	1340	1.7	95
ADK NA-11[b]	125	27.8	1260	1.3	102
HPN-68[C]	127	39.8	1270	1.8	102

* Medium-Impact Copolymer, Milliken Chemical

a Dibenzylidene sorbitol-based clarifier, Milliken Chemical

b Organophosphate nucleating agent, Amfine Chemicals

c Norbornane carboxylic acid salt nucleating agent, Milliken Chemical

สำหรับสารที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมทีบิวทิลเบนโซเอต (sodium-t-butyl benzoate) โซเดียมพาราเมทิลเบนโซเอต (sodium p-methyl benzoate)

โซเดียมเบนโซเอต (sodium benzoate) อะลูมิเนียมเบนโซเอต (aluminium benzoate) โมโนไฮดรอกซิลอะลูมิเนียม พารา- ที- บิวทิลเบนโซเอต (monohydroxylaluminium p-t-butyl benzoate) ไดเบนซิลลิดีนซอร์บิทอล (dibenzylidene sorbitol, DBS) ทัลค์ เคาลิน เป็นต้น

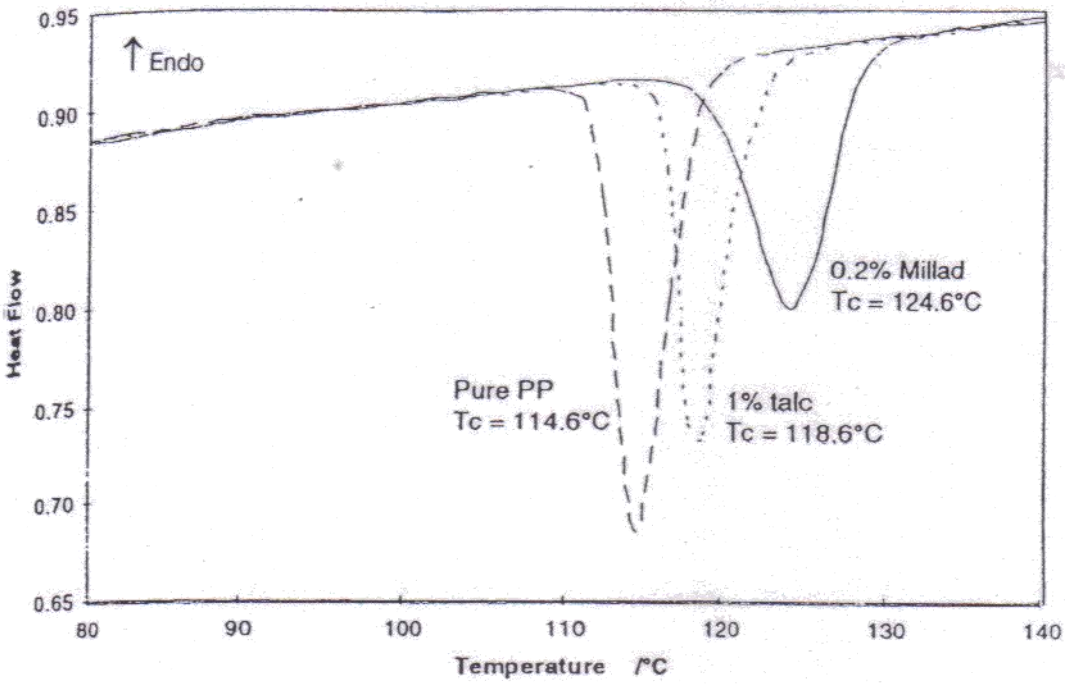
สารก่อนิวเคลียสผลึกแบบบีตาสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน มีหลายชนิด ได้แก่ สารสีควินาคริโดน (quinacridone pigment) หรือที่รู้จักในชื่อ Permanent Red E3B ไตรฟีนอลไดไตรแอซีน (triphenol ditriazine) แคลเซียมไพเมเลต (calcium pimelate) แคลเซียมฟทาเลต (calcium phthalate) ไดโซเดียมฟทาเลต (disodium phthalate) สารผสมระหว่างกรดไพเมลิก (pimelic acid) และแคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) ฯลฯ ซึ่งในการทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบบีตาจากการใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก พบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีผลึกแบบแอลฟาอยู่ร่วมด้วยเสมอไม่มากก็น้อย

2.2.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อนิวเคลียสผลึก

วิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมเหลว และตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อนิวเคลียสผลึกคือ การหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC (differential scanning calorimetry) โดยทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลว แล้วลดความร้อนลงโดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิคงที่ จะได้ DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิซึ่งปรากฏพีกการคายพลังงานที่แสดงถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์

ภาพที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนทั้งในกรณีที่ไม่ได้ใส่และใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก (ทัลค์ 1% และ Millad 0.1%) ซึ่งจะเห็นได้ว่า T_c ของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นเมื่อใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก (แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดผลึกได้เร็วขึ้น)

สำหรับขนาดของสเฟียรูไลต์สามารถวัดได้โดย polarized optical microscopy (ภาพที่ 2.8) นอกจากนี้ ในกรณีที่การก่อผลึกไม่สูงมากนัก สามารถหาความหนาแน่นของนิวเคลียสได้จากการนับปริมาณของสเฟียรูไลต์



ภาพที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน

2.3 **สารสี** (Pigments) [8, 9, 10]

สารสีเป็นสารมีสีซึ่งไม่ละลายในพลาสติกและตัวทำละลายทั้งหลาย และแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สารสีอนินทรีย์และสารสีอินทรีย์

2.3.1 **สารสีอนินทรีย์** (Inorganic Pigments)

สารสีอนินทรีย์อาจได้จากธรรมชาติ เช่น หิน แร่ธาตุ และดินต่างๆ ที่มีสีเป็นต้น หรือได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีตกตะกอนจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีทำให้เกิดเป็นสารสีตกตะกอนลงมาแล้วกรองออก

สารสีอนินทรีย์แบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ สารสีสีขาว สารสีสีดำ และสารสีอื่นๆ

สารสีสีขาว ที่นิยมใช้กับพลาสติกมากที่สุดคือ ทิทาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ในขณะที่คาร์บอนแบล็ก (carbon black) เป็นสารสีสีดำที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับสารสีอนินทรีย์ที่ให้สีอื่นๆ มีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ เหล็กออกไซด์ ให้สีต่างๆกันถึง 4 สี คือ เหลือง แดง น้ำตาล และดำ สารประกอบแคดเมียม ให้สีเหลือง ส้มและแดง อัลตรามารีน (ultramarine) ให้สีน้ำเงิน โครเมียมออกไซด์ ให้สีเขียว สารประกอบของตะกั่ว ได้แก่ lead chromates and molybdates ให้สีเหลือง ส้ม และแดง

สารสีอนินทรีย์มีสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ไม่ละลายในพลาสติกและตัวทำละลายใดๆ
2. โดยทั่วไปมีความทนทานต่อความร้อนและแสงสูง
3. กระจายเข้าไปในเนื้อพลาสติกได้ง่าย
4. โดยปกติทึบแสง
5. มีความแรงของสี (color strength) ต่ำ สีด้าน ไม่สดใส

2.3.2 **สารสีอินทรีย์** (Organic Pigments)

สารสีอินทรีย์ทุกชนิดได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการตกตะกอนระหว่างสารเคมีโครงสร้างของสารสีอินทรีย์ประกอบด้วยวงเบนซิน (benzenoil structure)

สารสีอินทรีย์แบ่งได้เป็นหลายชนิดขึ้นกับโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ สารสีอะโซ (azo pigments) ให้สีเหลือง ส้ม และแดง สารสีฟแทโลไซยานีน (phthalocyanine pigments) ให้สีน้ำเงินและเขียว สารสีแว็ต (vat pigments) ให้สีเฉดต่างๆกัน สารสีไดออกซาซีน (dioxazine pigments) ให้สีม่วง สารสีควินาคริโดน (quinacridone pigments) ให้สีแดง ม่วง และส้ม สารสีไอโซอินโดลิโนน (isoindolinone pigments) ให้สีเหลือง

เมื่อเปรียบเทียบกับสารสีอนินทรีย์แล้ว สารสีอินทรีย์มีสมบัติโดยทั่วไปดังนี้คือ

1. มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า กล่าวคือ สารสีอินทรีย์มีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.1 ไมโครเมตร ในขณะที่สารสีอนินทรีย์มีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย 1 ไมโครเมตร
2. ให้สีที่โปร่งใสกว่า
3. มีความแรงของสีสูงกว่า
4. ให้สีที่สะอาดและสดใสกว่า
5. มีความทนทานต่อความร้อนและแสงต่ำกว่า
6. ทำให้แตกกระจายตัวในเนื้อพลาสติกได้ยากกว่า
7. มีราคาแพงกว่า
8. เนื่องจากสารสีอินทรีย์บางตัวมีสมบัติละลายได้ ดังนั้นสารสีเหล่านี้จะเกิดการคายสี (bleeding) ได้

สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูเป็นสารสีสีน้ำเงินสดใส ที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างกว้างขวางรวมทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากมีสมบัติดีและหาได้ง่าย โดยรายละเอียดของสารสีทั้ง 2 ชนิดมีดังนี้

2.3.3 **อัลตรามารีนบลู** (Ultramarine blue)

อัลตรามารีนบลูเป็นสารสีอนินทรีย์สีน้ำเงินโปร่งแสง จัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโซเดียมอะลูมิเนียมซัลโฟซิลิเกต (sodium aluminium sulfosilicate) โดยกำมะถันจะอยู่ในลักษณะของหมู่โพลิซัลไฟด์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก สูตรเคมีของอัลตรามารีนคือ $Na_8Al_6Si_6O_{24}S_4$ เกิดอยู่ในแร่ lapis lazuli นอกจากนี้ ยังสามารถเตรียมอัลตรามารีนบลูได้จากการนำกำมะถัน ไซนาเคลย์ โซเดียมซัลเฟต และตัวรีดิวซ์ (เช่น ชันสนหรือถ่าน) มาผสมและบดเข้าด้วยกัน เผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้ผลิตภัณฑ์ขั้นแรกซึ่งมีสีเขียว นำมาบดและผสมกับกำมะถัน แล้วเผาต่ออีก 3-4 วัน โดยการเปลี่ยนแปลงภาวะของการผลิต ก็จะได้สารสีที่มีเฉดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่เขียว น้ำเงิน จนกระทั่งสีแดง

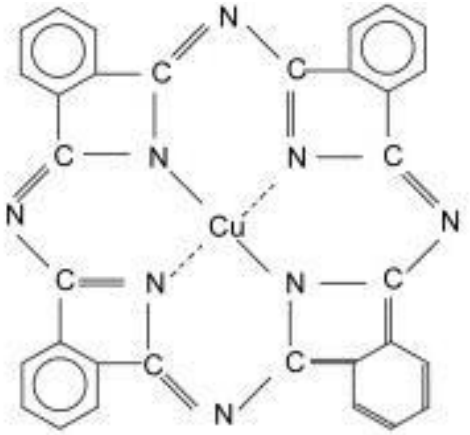
อัลตรามารีนบลูมีสีน้ำเงินอมแดง (reddish blue) ให้สีที่สะอาดตา ไม่มีความเป็นพิษ ทนความร้อน แสงสว่าง และเคมีภัณฑ์ส่วนใหญ่ได้ดี และมีราคาถูก

2.3.4 **ฟแทโลไซยานีนบลู** (Phthalocyanine blue)

ฟแทโลไซยานีนบลู หรือคอปเปอร์-ฟแทโลไซยานีน (Cu-phthalocyanine) เป็นสารสีอินทรีย์สีน้ำเงินที่นิยมนำมาใช้กันมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ มีความทนทานต่อความร้อน แสงสว่าง เคมีภัณฑ์และตัวทำละลายต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีความเข้มของสีสูง ให้สีที่สดใสและโปร่งใส และมีราคาถูก

ฟแทโลไซยานีนบลูมีลักษณะของผลึก 2 แบบคือ แบบแอลฟา ซึ่งมีสีน้ำเงินอมแดง และแบบบีตา ซึ่งมีสีน้ำเงินอมเขียว ผลึกแบบบีตา จะเสถียรกว่าผลึกแบบแอลฟา โดยที่ผลึกแบบแอลฟาจะเปลี่ยนเป็นผลึกแบบบีตาเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C หรือเมื่อถูกกับตัวทำละลายบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวทำละลายอะโรมาติก

โครงสร้างทางเคมีของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู แสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู

สำหรับงานวิจัยการนำสารชนิดต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์มาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน มีดังนี้

นพดล เกิดดอนแฝก และคณะ [11] ได้เตรียมไดโซเดียมเทเรฟทาเลตและแคลเซียมเทเรฟทาเลตจากการนำขวดเพทที่ใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยกระบวนการอัลคาไลดีคอมพอสิชันแล้วนำเกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดที่เตรียมได้ไปทดลองใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (DSC) และเทคนิคไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (wide angle X-ray diffraction) จากการทดลองพบว่า เกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดสามารถชักนำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้ทั้งแบบแอลฟาและบีตา นอกจากนี้ จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ยังพบด้วยว่าการใช้เกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิด สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกและทนแรงดึงของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนให้เพิ่มขึ้นได้

พนิตนันท์ ศรีสุวรรณ [12] ได้ศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (0.075%-3.0%โดยน้ำหนัก) ต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยตรวจสอบประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล-สแกนนิงคาลอริเมทรี และเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) จากการทดลองพบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกและดีกรีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สเฟียรูไลต์พอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่าทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็น

สารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ชักนำให้พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบแอลฟา ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรชักนำให้เกิดผลึกแบบแอลฟาส่วนใหญ่และมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลพบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้เสถียรภาพทางความร้อน ความต้านแรงดึงและทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมด ทำให้สรุปได้ว่า ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนคือ 1.0% และ 0.1% โดยน้ำหนักตามลำดับ

Osowiecka และคณะ [13] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกระหว่างสารอินทรีย์ (Millad 3988 และ ADK NA21) และสารอนินทรีย์ (ทัลค์) ในพอลิโพรพิลีน จากการวิจัยพบว่า สารอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงกว่า กล่าวคือ การใช้สารอินทรีย์นอกจากทำให้พอลิโพรพิลีนมีผลึกที่สม่ำเสมอและละเอียดกว่า แล้วยังทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าด้วย

Mingliang และคณะ [14] ได้ศึกษาสมบัติการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโล-ไนต์คอมพอสิต (ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน) ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี จากผลการทดลองพบว่า การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ขนาดของผลึกพอลิโพรพิลีนลดลง ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น และจุดหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกและเร่งกระบวนการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารสีต่าง ๆ เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกในพอลิโพรพิลีน ได้แก่

Kanu และคณะ [15] ได้ศึกษาผลของสารสีอนินทรีย์และสารสีอินทรีย์ต่อสมบัติความต้านแรงดึงและแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (injection molding) โดยสารสีอนินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองคือ Sicopal Blue K6310 (cobalt blue, $CoAl_2O_4$) Green 10402 (Cobalt Chromite Green Spinel) และ Yellow 10655 (Antimony/chromium/titanium oxide) และสารสีอินทรีย์ที่ใช้คือ Heliogen Blue K6911D (Cu Phthalocyanine, alpha- stable) และ Irgalite Green GFNP K704289 (Copper

Phthalocyanine (Chlorinated)) จากการวิจัยพบว่า การใส่สารสีทั้งสองประเภท ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึงและแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยสารสีอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารสีอนินทรีย์

Broda [16] ได้ศึกษาผลของการใช้สารสีอินทรีย์ต่อความสามารถการเกิดนิวเคลียสผลึกในเส้นใยพอลิโพรพิลีนจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (polarizing microcopy) ซึ่งสารสีอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองคือ ควินาคริโดน และฟแทโลไซยานีนบลู จากการวิจัยพบว่า สารสีทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกในเส้นใยพอลิโพรพิลีนได้ดี กล่าวคือ การใช้สารสีทั้งสองชนิด ทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึก และอัตราการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สเฟียรูไลต์พอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลง โดยสารสีควินาคริโดนมีประสิทธิภาพสูงกว่าฟแทโลไซยานีนบลูเล็กน้อย

Broda [17] ได้ศึกษาโครงสร้างของเส้นใยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมสารสีควินาคริโดน หรือฟแทโลไซยานีนบลูด้วยเทคนิค wide-angle X-ray scattering และ small angle X-ray scattering โดยทดลองใช้ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยแตกต่างกัน (100-1350 เมตร/นาที) ผลการทดลองพบว่า การใส่สารสีและใช้ความเร็วม้วนเก็บต่ำ (100-400 เมตร/นาที) ทำให้เส้นใยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้ทั้งแบบแอลฟาและบีตา และเมื่อคำนวณค่า K-value เพื่อหาปริมาณผลึกแบบบีตา พบว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีนที่ผสมสารสีควินาคริโดนมีค่า K-value สูงกว่าเส้นใยที่ผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วม้วนเก็บสูงขึ้น มีผลทำให้ปริมาณผลึกแบบบีตาลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ใช้ความเร็วม้วนเก็บสูงที่สุด (1350 เมตร/นาที) พบว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วม้วนเก็บสูง สารสีไม่มีผลต่อโครงสร้างของเส้นใย

Broda และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างของเส้นใยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยสารเติมแต่งที่ใช้คือสารสีอินทรีย์ (ควินาคริโดน และฟแทโลไซยานีนบลู) ปริมาณ 0.5% ของพอลิโพรพิลีน และสารหน่วงไฟ (tris(bromoneopentyl)phosphate และ tetrabromobisphenol A bis(2,3-dibromopropyl ether) ปริมาณ 10% ของพอลิโพรพิลีน ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า การใส่สารสีทั้งสองชนิด ทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น โดยเส้นใยที่ใส่สารสีควินาคริโดนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงกว่าเส้นใยที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู ในขณะที่การใส่สารหน่วงไฟไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก แสดงให้เห็นว่า สารสีทั้งสองชนิดสามารถเกิดนิวเคลียสผลึกในเส้นใยพอลิโพรพิลีนได้ แต่สารหน่วงไฟไม่มีความสามารถดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ความเร็วม้วนเก็บต่ำเส้นใยพอลิโพรพิลีนที่ใส่

สารสีควินาคริโดนเกิดผลึกแบบบีตาร่วมด้วย และสารหน่วงไฟที่ใส่ลงไปทำให้ปริมาณผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยสูงขึ้น พบว่าสารเติมแต่งมีผลต่อโครงสร้างของเส้นใยน้อยมาก กล่าวคือ ที่ความเร็วม้วนเก็บสูง (1350 เมตร/นาที) เส้นใยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว

ในบทต่อไปเป็นการรายงานถึงวิธีการทดลองการนำสารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน โดยเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) จากนั้นนำเม็ดพอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นสกรูเดี่ยว (single screw plastic sheet extruder) นำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิง-คาลอริเมทรีและเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ศึกษาผลของการเกิดผลึกต่อความต้านแรงดึงและสมบัติทางแสงของชิ้นงานตัวอย่างพอลิโพรพิลีน

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.1 วัตถุดิบ

1. พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP)

พอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เกรดของพอลิโพรพิลีนที่ใช้นี้คือ HP420J จากบริษัท เอ็ชเอ็มซี พอลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymer Co., Ltd) มีสมบัติดังนี้

- อัตราการไหลที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส (กรัม/10 นาที) 3
- ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) 0.90
- ความต้านแรงดึง ณ จุดคราก (ASTM D 638, MPa) 32

2. อัลตรามารีนบลู (ultramarine blue)

อัลตรามารีนบลู Pigment Blue 29 ที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยนามพลาสติกส์ จำกัด (มหาชน) มีสมบัติดังนี้

- ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) 2.35
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) 2.60
- ความทนทานต่อความร้อน (องศาเซลเซียส) สูงกว่า 350

3. ฟแทโลไซยานีนบลู (phthalocyanine blue)

ฟแทโลไซยานีนบลู Pigment Blue 15:3 ที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท คลาเรียนท์ (ประเทศไทย) จำกัด มีสมบัติดังนี้

- ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) 1.62
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร) 95
- ความทนทานต่อความร้อน (องศาเซลเซียส) 300

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

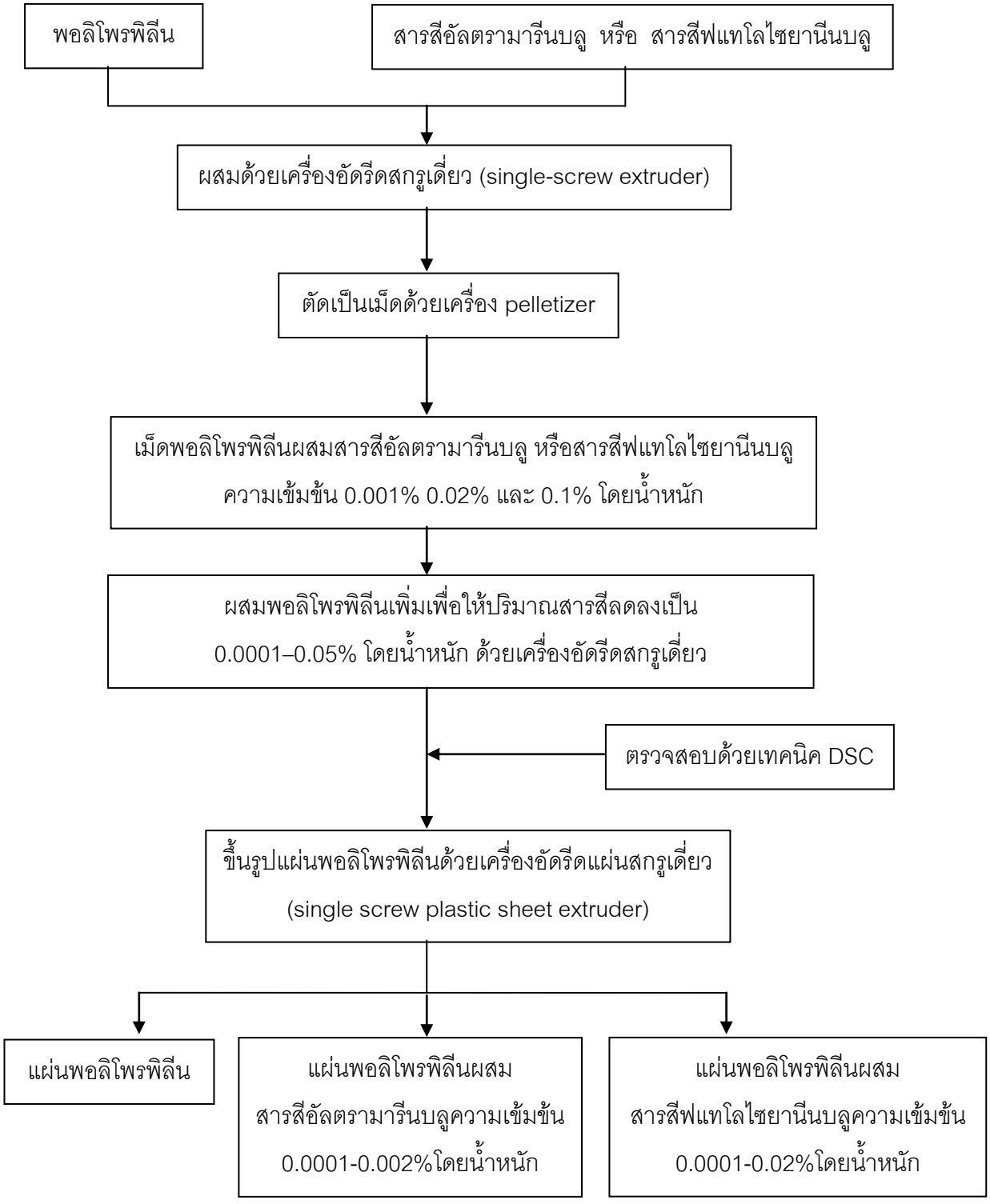
1. เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single-screw extruder, Haake)
2. เครื่องตัด (pelletizer, Haake)
3. เครื่องอัดรีดแผ่นสกรูเดี่ยว (single screw plastic sheet extruder, Collin)
4. สกรู (mixing head แบบ pin type, เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร, L/D 25)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM 6400)
2. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ (DSC, Perkin-Elmer)
3. ไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (WAXD, JEOL รุ่น JDX 3530)
4. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy, Olympus รุ่น CX31)
5. Hot stage (METTLER TOLEDO รุ่น FP82HT)
6. เครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก (Galaxy I Melt Indexer, KAYENESS INC. รุ่น D 7053)
7. เครื่องทดสอบแรงดึง (LLOYD Universal Testing Machine รุ่น LR 100K)
8. เครื่องวัดความใส (Haze-gard Plus)

3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีน

ขั้นตอนการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนผสมสารสีเป็นไปตามภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิโพรพิลีนผสมสารสี

3.2.1 การเตรียมเม็ดพลาสติกเข้มข้นของพอลิโพรพิลีน (masterbatch) ผสมสารสีอัลตรามารีนบลูหรือฟแทโลไซยานีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.001-0.1 โดยน้ำหนัก

นำพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.001 0.02 และ 0.1 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.001 0.02 และ 0.1 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) โดยตั้งภาวะการผสม คือ อุณหภูมิที่กระบอกสกรูเท่ากับ 200 210 210 และ 215 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 80 รอบต่อนาที และตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่อง pelletizer

3.2.2 การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.0001-0.05 โดยน้ำหนัก

นำพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีอัลตรามารีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.0001 และ 0.0005 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีอัลตรามารีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.002 0.003 0.005 0.007 และ 0.01 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีอัลตรามารีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ผ่านเข้าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว โดยตั้งภาวะการผสม คือ อุณหภูมิที่กระบอกสกรูเท่ากับ 200 210 210 และ 215 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 80 รอบต่อนาที และตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่อง pelletizer

3.2.3 การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลูความเข้มข้นร้อยละ 0.0001-0.05 โดยน้ำหนัก

นำพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีฟแทโลไซยานีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.0001 และ 0.0005 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีฟแทโลไซยานีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.002 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณสารสีฟแทโลไซยานีนบลูลดลงเป็นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ผ่านเข้าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว โดยตั้งภาวะการผสม คือ อุณหภูมิที่กระบอกสกรู

เท่ากับ 200 210 210 และ 215 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 80 รอบต่อนาที และตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่อง pelletizer

3.2.4 การขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรพิลีน

นำพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001-0.002 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนผสมสารสีฟแทโลไซยานีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001-0.02 โดยน้ำหนัก ผ่านเข้าเครื่องอัดรีดแผ่นสกรูเดี่ยว (single screw plastic sheet extruder) โดยตั้งอุณหภูมิที่กระบอกสกรูเท่ากับ 200 210 210 และ 215 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 80 รอบต่อนาที โดยขั้นตอนสุดท้ายแผ่นพอลิโพรพิลีนจะถูกผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.3 การตรวจสอบสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู

3.3.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจดูลักษณะรูปร่างอนุภาคของสารสีอัลตรามารีนบลู และฟแทโลไซยานีนบลู โดยนำสารสีอัลตรามารีนบลู หรือฟแทโลไซยานีนบลูมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวทองเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ตัวอย่าง และเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องดูลักษณะรูปร่างอนุภาค ด้วยเทคนิคสแกนนิงอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (scanning electron microscopy)

3.3.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารสีอัลตรามารีนบลู และฟแทโลไซยานีนบลูด้วยเทคนิคไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึก ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งภาวะทดสอบที่ 30 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 10 – 30 องศา

3.4 การตรวจสอบผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน

3.4.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิง-คาลอริเมทรี โดยนำสารผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและสารสี 5 – 8 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน DSC Pan ชั่งน้ำหนักแน่นอนแล้วปิดผนึก ทำการทดสอบโดยตั้งภาวะการทดสอบดังนี้

1. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 210 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 210 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที
3. ลดความร้อนจากอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที
5. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 210 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ตรวจสอบหาอุณหภูมิการเกิดผลึก โดยวิเคราะห์จากพีกการเกิดผลึก และดีกรีของความเป็นผลึก ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{ดีกรีของความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^0_f} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง

ΔH^0_f = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100%

โดยในที่นี้ให้ ΔH^0_f มีค่าเท่ากับ 209 จูลต่อกรัม [19]

3.4.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก

ตรวจสอบอัตราการหลอมไหล (melt flow rate) ของพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก ตั้งค่าภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส โดยใช้ตุ้มน้ำหนักกดขนาด 2.16 กิโลกรัม การทดสอบทำตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D 1238

3.4.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

ตรวจสอบรูปร่างและขนาดสเฟียรูไลต์เฉลี่ยของแผ่นพอลิโพรพิลีน โดยตัดชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจากแผ่นพอลิโพรพิลีน ประกบแผ่นพอลิโพรพิลีนด้วยแผ่นกระจก นำไปวางบนแท่น hot stage แล้วกดให้แผ่นพอลิโพรพิลีนเป็นแผ่นบาง ตั้งภาวะทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 200 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการเกิดผลึก นำแผ่นกระจกที่ประกบแผ่นพอลิโพรพิลีนมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยใช้แสงโพลาไรซ์ในการตรวจสอบที่กำลังขยาย 400 เท่า จากนั้นวัดขนาดสเฟียรูไลต์ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนด้วยโปรแกรม Image-Pro Express 6.0 แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.4.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแผ่นพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึก ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งภาวะทดสอบที่ 30 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 10 – 30 องศา

3.5 การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของแผ่นพอลิโพรพิลีน

ทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงตามแนวเครื่องจักร (MD) ของแผ่นตัวอย่างพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้หัวดึงขนาด 1 กิโลนิวตัน ตั้งค่าภาวะทดสอบที่ความเร็วดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดชิ้นตัวอย่างพอลิโพรพิลีนกว้าง 6 มิลลิเมตร หนา 0.23 มิลลิเมตร ระยะ gauge length เท่ากับ 33 มิลลิเมตร และระยะระหว่างที่จับชิ้นงาน เท่ากับ 65 มิลลิเมตร การทดสอบทำตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D 638

3.6 การทดสอบสมบัติทางแสงของแผ่นพอลิโพรพิลีน

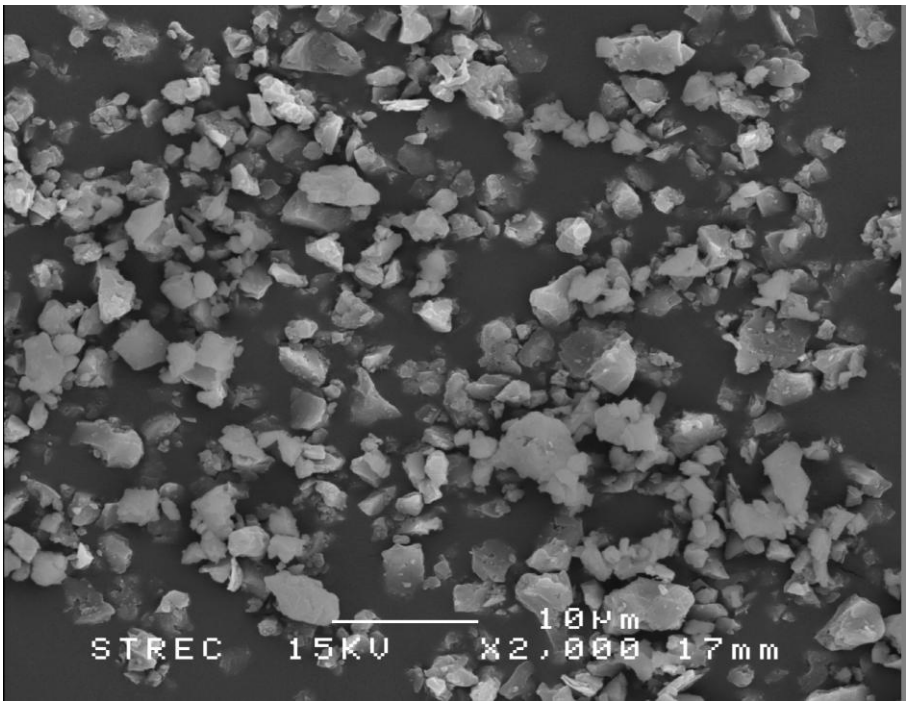
ทดสอบสมบัติการส่องผ่านของแสงของแผ่นตัวอย่างพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องวัดความใส haze-gard plus ตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D 1003

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

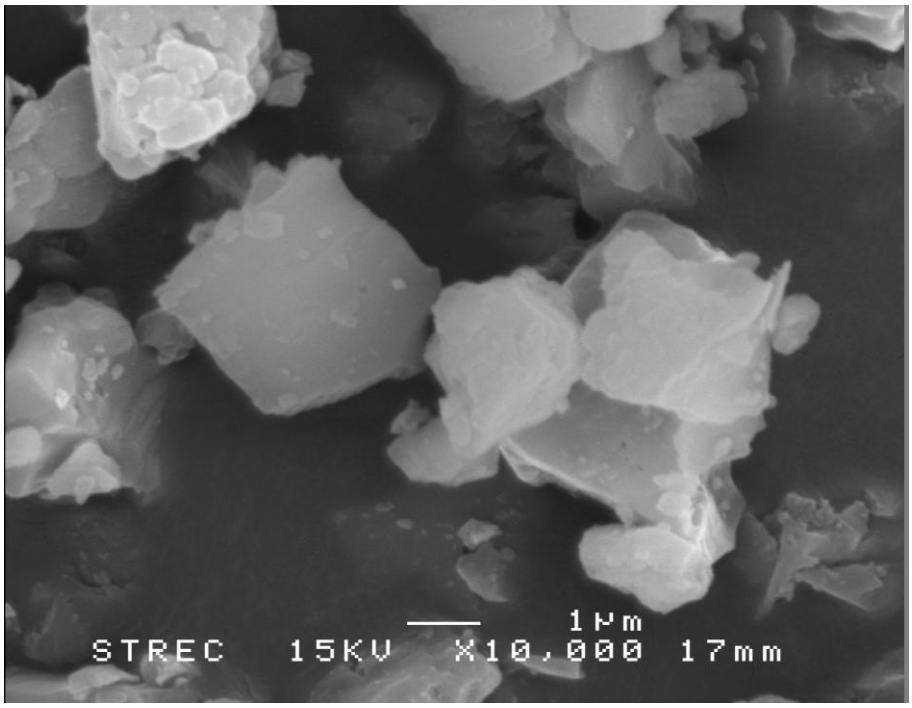
4.1 การตรวจสอบสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู

4.1.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

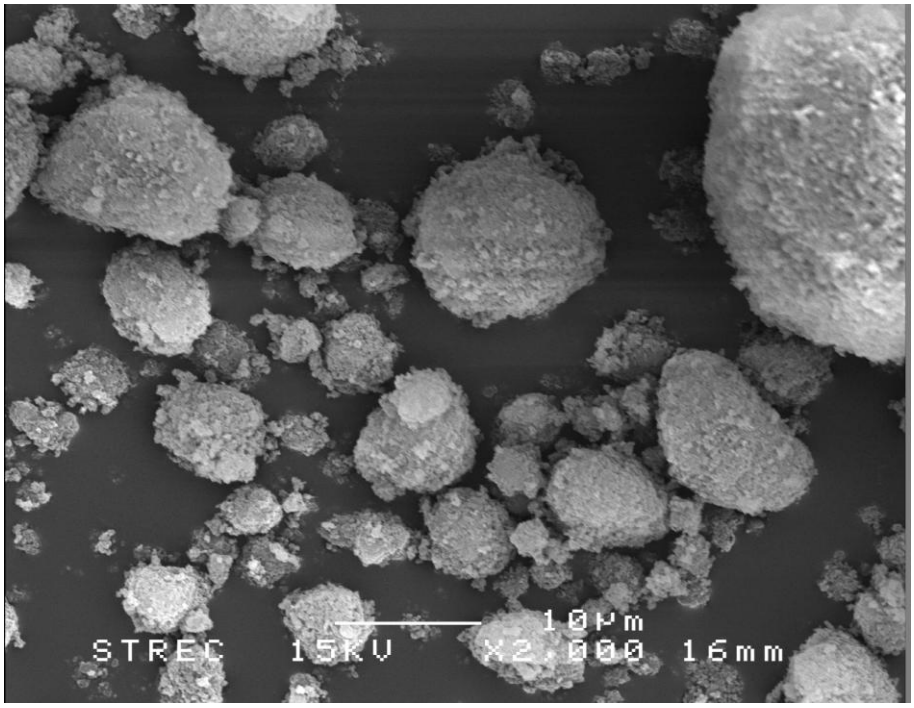
เพื่อศึกษาผลของขนาดและรูปร่างอนุภาคของสารสีต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน จึงได้นำสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูไปตรวจสอบรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.5 ตามลำดับ โดยพบว่าสารสีอัลตรามารีนบลูมีรูปร่างอนุภาคเป็นแผ่นและเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อน ซึ่งจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นได้ว่าสารสีอัลตรามารีนบลูมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1-4 ไมโครเมตร ในขณะที่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีรูปร่างอนุภาคกลมค่อนข้างรีจับกลุ่มรวมกันแน่นกว่า ซึ่งจากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 20,000 เท่า จะเห็นได้ว่าสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.150 – 0.2 ไมโครเมตร)



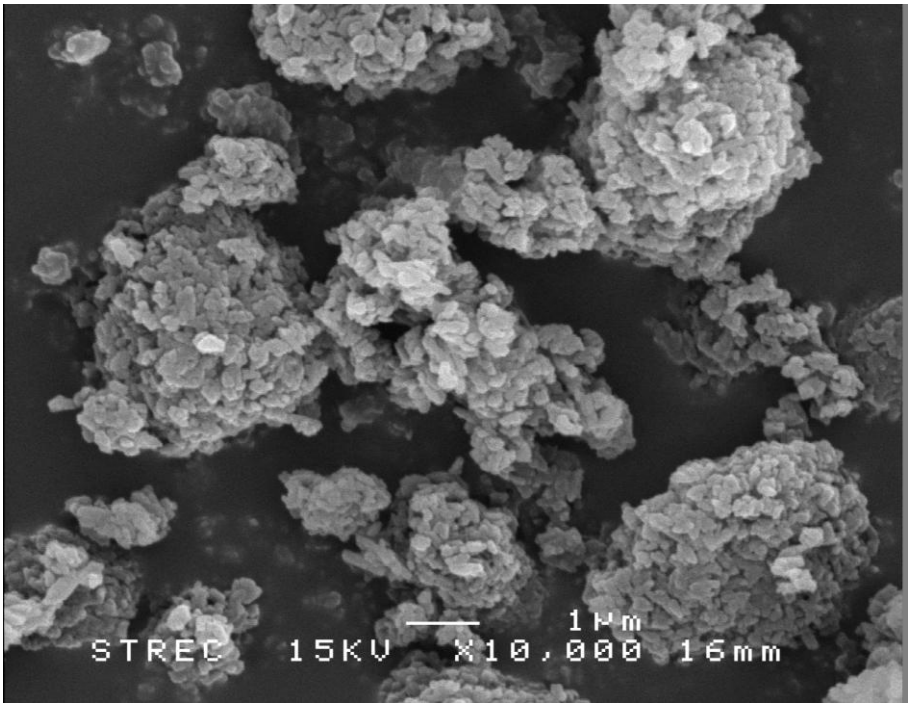
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีอัลตรามารีนบลูที่กำลังขยาย 2000 เท่า



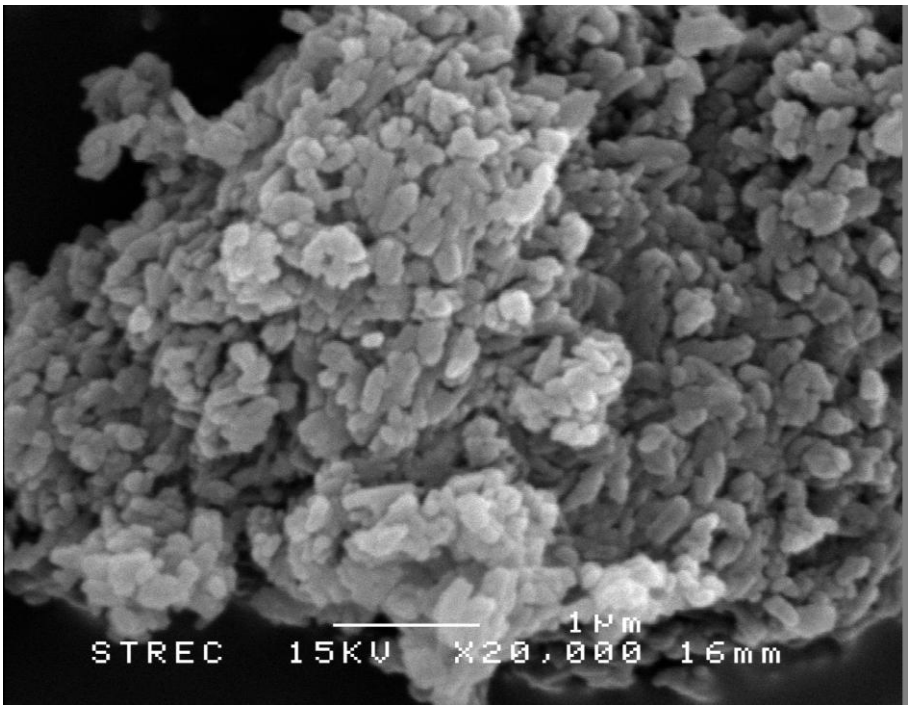
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีอัลตรามารีนบลู ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

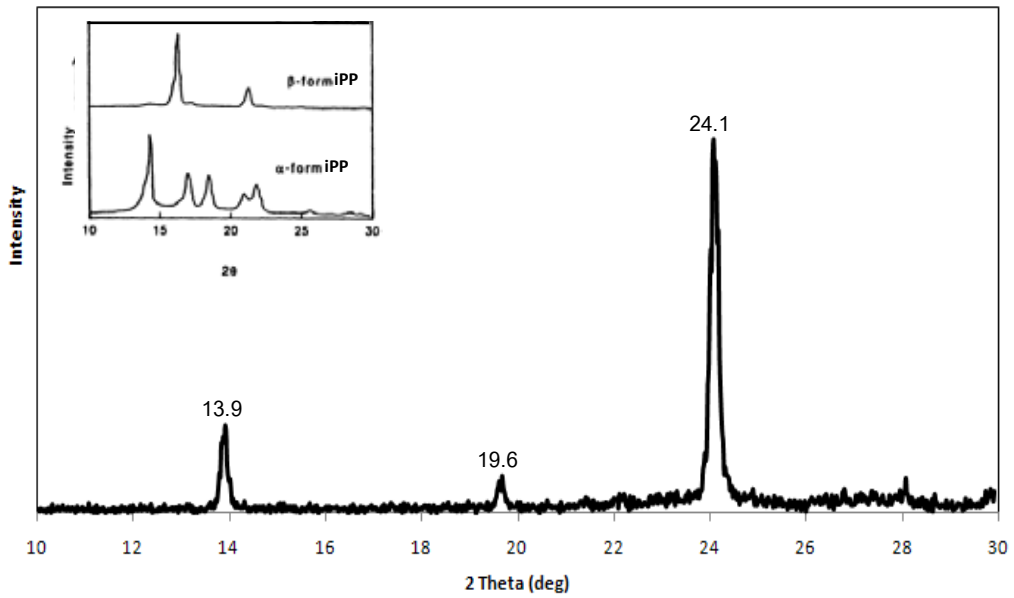


ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

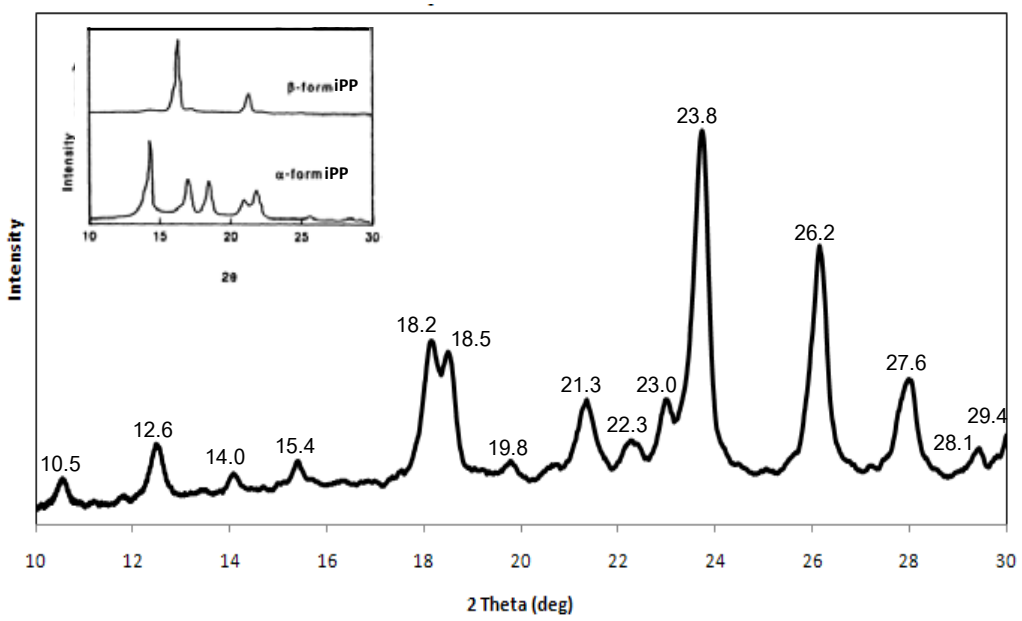
4.1.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู ด้วยเทคนิค WAXD ในช่วงการตรวจสอบที่มุม 2θ = 10-30° ซึ่งเป็นช่วงเดียวกันกับช่วงที่ใช้ในการตรวจสอบแผ่นพอลิโพรพิลีน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 โดยพบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีอัลตรามารีนบลูปรากฏพีกสำคัญที่มุม 2θ = 13.9, 19.6 และ 24.1° ซึ่งต่างจากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีฟแทโลไซยานีนบลูซึ่งปรากฏพีกสำคัญที่มุม 2θ = 10.5, 12.6, 14.0, 15.4, 18.2, 18.5, 19.8, 21.3, 22.3, 23.0, 23.8, 26.2, 27.6, 28.1 และ 29.4° แสดงว่าสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ ยังพบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูมีพีกสำคัญที่ตำแหน่งไม่ตรงกับพีกสำคัญของพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกทั้งแบบแอลฟา (2θ = 14.1, 16.9, 18.8 และ 21.2°) และบีตา (2θ = 16.1°) (ภาพที่ 2.3) จึงทำให้สามารถวิเคราะห์รูปผลึกของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่เติมสารสีทั้ง 2 ชนิดด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันได้



ภาพที่ 4.6 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีอัลตรามารีนบลู



ภาพที่ 4.7 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของสารสีฟแทโลไซยานีนบลู

4.2 การตรวจสอบผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน

4.2.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์

วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการตรวจสอบผลของสารก่อนิวเคลียสผลึกต่อการเกิดผลึก คือ การหาอุณหภูมิการเกิดผลึกจากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งจากการนำพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูมาตรวจสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิหลอมเหลว และดีกรีของความเป็นผลึก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.8-4.11 โดยพบว่า พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 159.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 110.6 องศาเซลเซียส และดีกรีของความเป็นผลึกเท่ากับ 31.21% ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด พบว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลวสูงขึ้นเล็กน้อย และดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

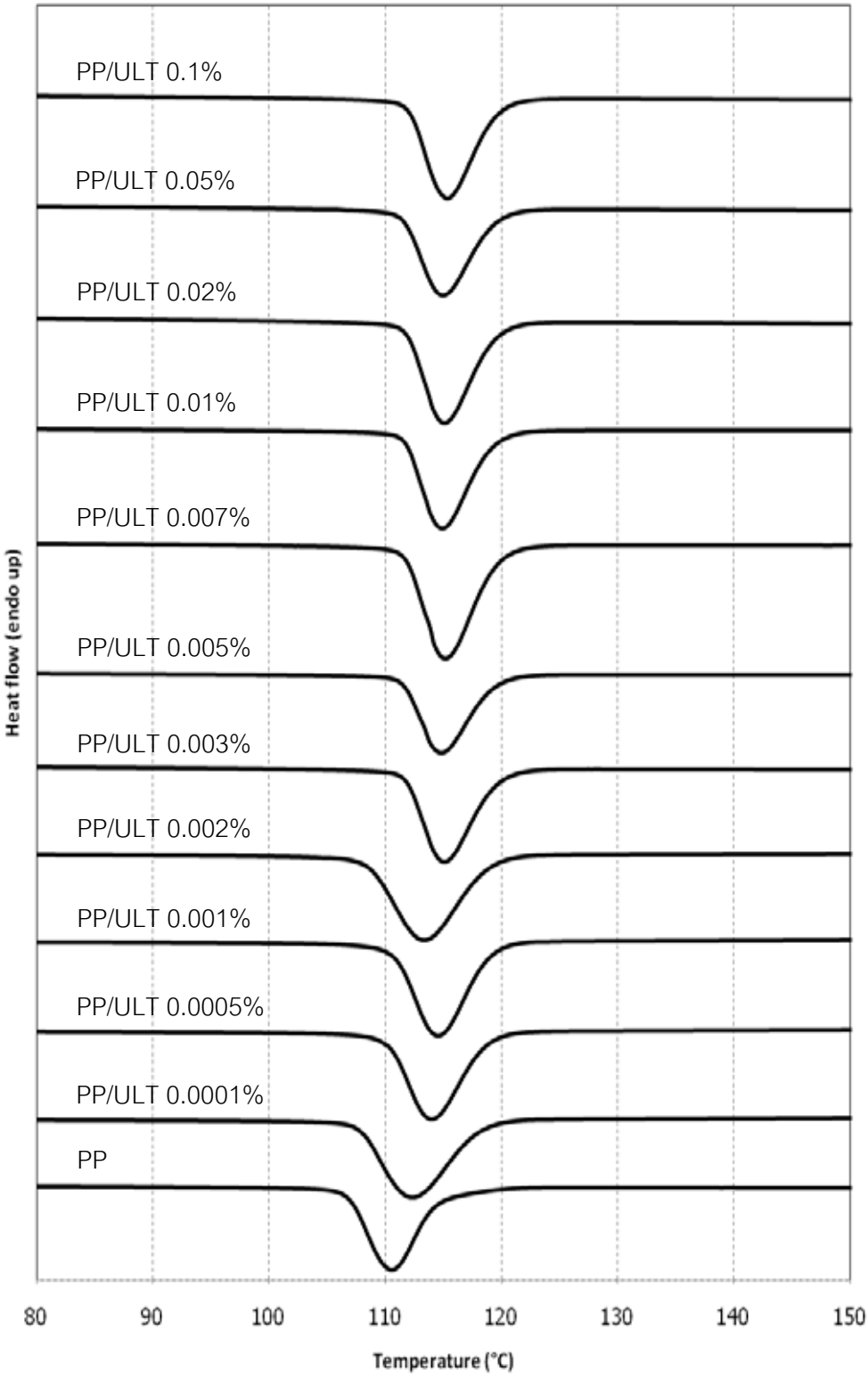
ในกรณีที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001 – 0.002 โดยน้ำหนัก พบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นตามปริมาณสารสี แสดงให้เห็นว่าอัลตรามารีนบลูมีความสามารถในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 115.2 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณสารสีร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณสารสีอัลตรามารีนบลูเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.003-0.1 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 115 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณอัลตรามารีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก ความสามารถการก่อนิวเคลียสผลึกของสารสีอัลตรามารีนบลูไม่ได้แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น ยิ่งไปกว่านั้น ที่ปริมาณสารสีดังกล่าว ยังพบด้วยว่า พอลิโพรพิลีนมีดีกรีของความเป็นผลึกลดลง แต่ก็ยังสูงกว่ากรณีที่ไม่ใส่สารสี ซึ่งคาดว่าเนื่องมาจากปริมาณสารสีอัลตรามารีนบลูที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้สารสีเกิดการจับกลุ่ม (agglomerate) ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนผสมสารสีปริมาณดังกล่าวมีดีกรีของความเป็นผลึกลดลง

สำหรับสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู พบว่า ให้ผลในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารสี โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุดเท่ากับ 125.7 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่สารสีถึง 15 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพสูงมากในการชักนำให้พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าการใส่ฟแทโลไซยานีนบลูตั้งแต่ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักเป็นต้นไป มีผล

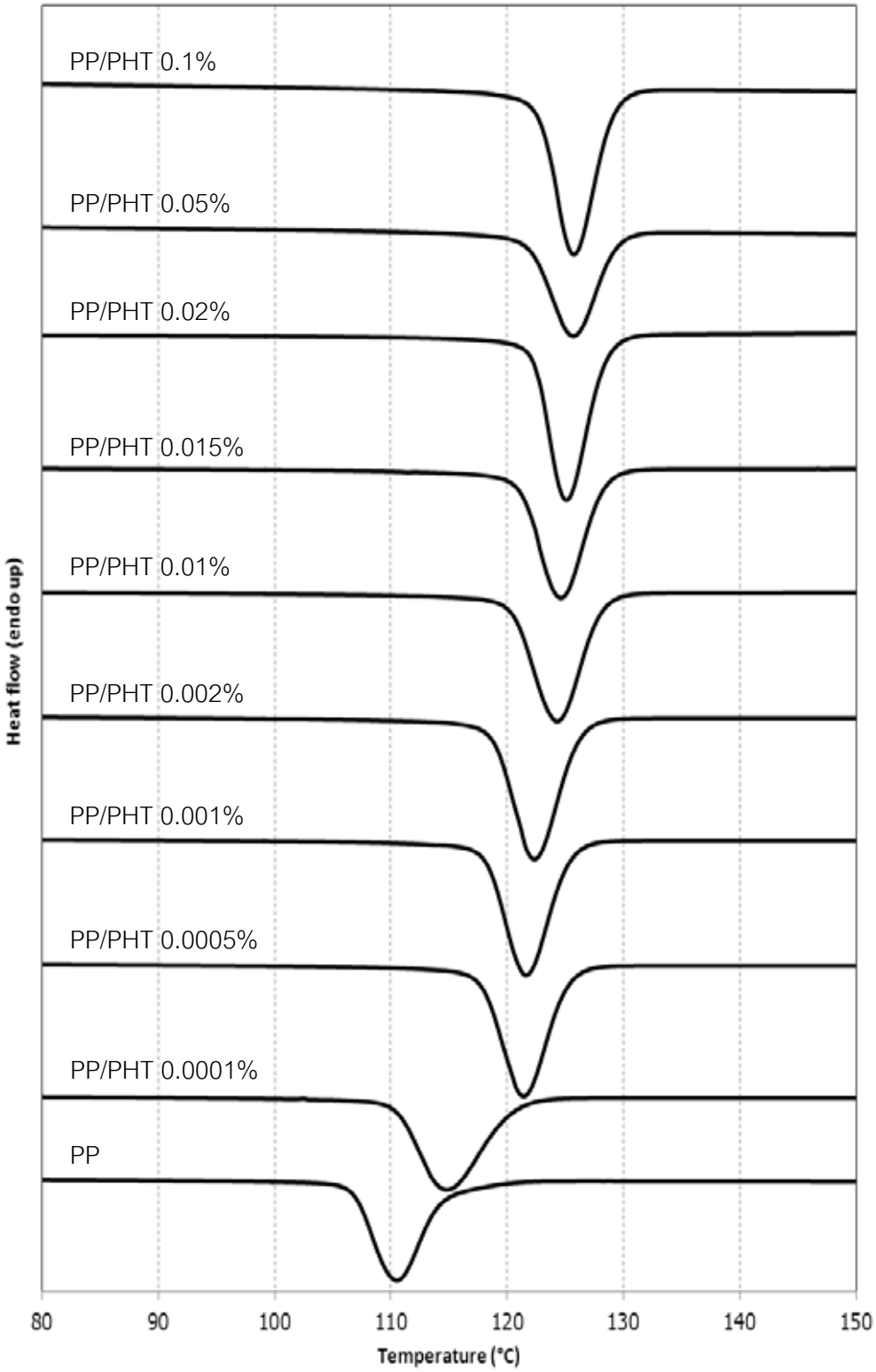
ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่ดีกรีของความเป็นผลึกมีค่าค่อนข้างคงที่และลดลงเมื่อปริมาณสารสีสูงกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณฟแทโลไซยานีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ความสามารถการก่อนิวเคลียสผลึกของสารสีฟแทโลไซยานีนบลูไม่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ที่ปริมาณสารสีสูงกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก อาจทำให้สารสีเกิดการจับกลุ่มเช่นเดียวกัน ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีดีกรีของความเป็นผลึกลดลง

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

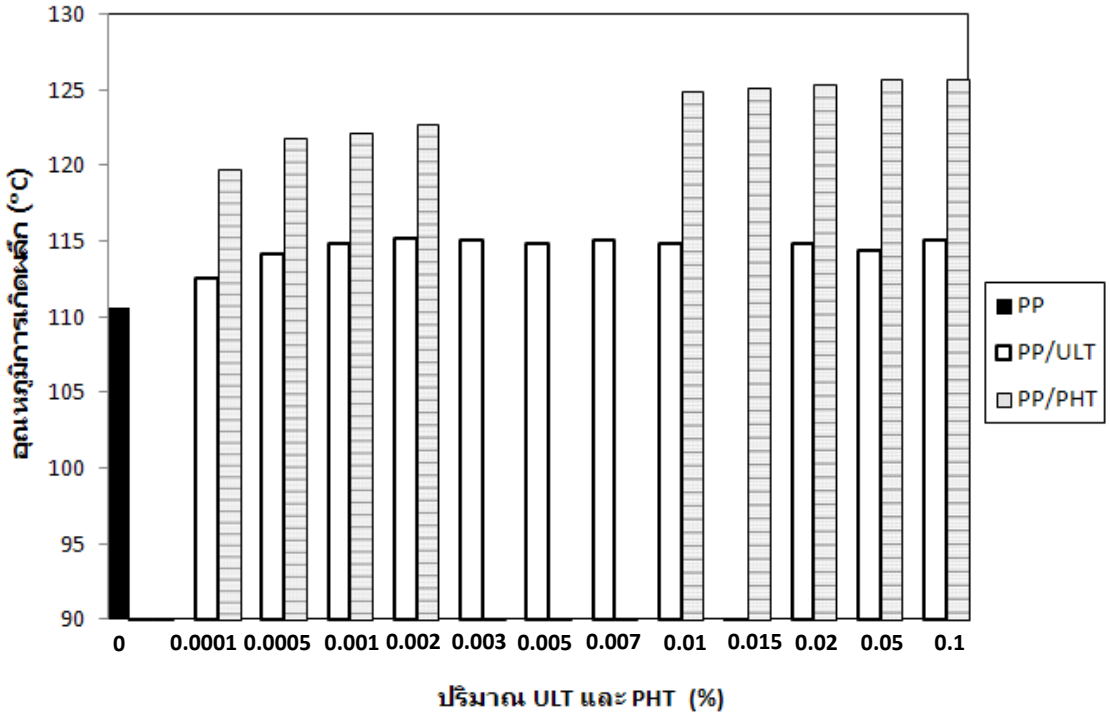
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเกิดผลึก T_c (^oC)	อุณหภูมิหลอมเหลว T_m (^oC)	ดีกรีของความเป็นผลึก X_c (%)
PP	110.6	159.2	31.21
PP/ULT 0.0001%	112.6	158.8	41.00
PP/ULT 0.0005%	114.2	159.8	38.78
PP/ULT 0.001%	114.9	160.3	42.47
PP/ULT 0.002%	115.2	160.4	40.13
PP/ULT 0.003%	115.1	160.2	30.71
PP/ULT 0.005%	114.9	160.5	30.10
PP/ULT 0.007%	115.1	160.4	29.47
PP/ULT 0.01%	114.8	160.2	30.09
PP/ULT 0.02%	114.9	160.6	30.40
PP/ULT 0.05%	114.4	161.5	28.54
PP/ULT 0.1%	115.1	160.5	28.39
PP/PHT 0.0001%	119.8	161.6	38.41
PP/PHT 0.0005%	121.8	161.9	41.39
PP/PHT 0.001%	122.2	162.1	40.44
PP/PHT 0.002%	122.8	162.4	42.02
PP/PHT 0.01%	124.9	163.0	41.49
PP/PHT 0.015%	125.1	162.5	41.26
PP/PHT 0.02%	125.4	162.6	42.86
PP/PHT 0.05%	125.7	163.9	33.32
PP/PHT 0.1%	125.7	163.6	34.55



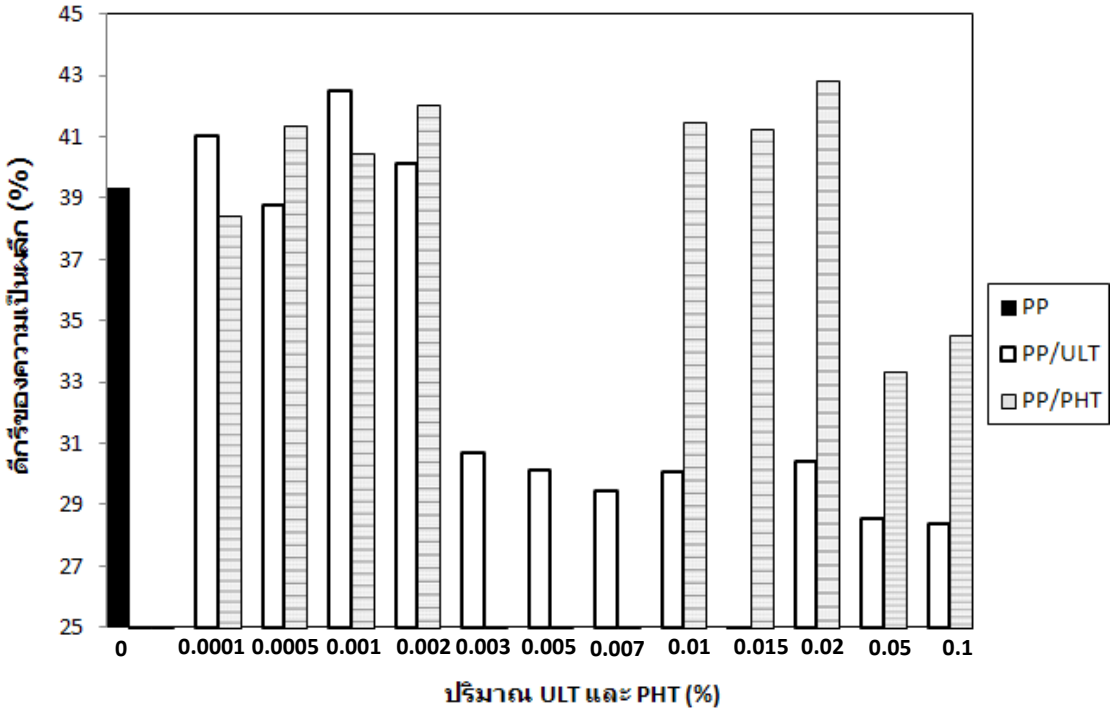
ภาพที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีนและเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู ปริมาณ 0.0001%-0.1% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีนและ
เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู ปริมาณ 0.0001%-0.1% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิการเกิดผลึกของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู



ภาพที่ 4.11 ดีกรีของความเป็นผลึกของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน จะเห็นได้ว่า พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งกรณีที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลู ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูสูงกว่าของพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูมาก แสดงให้เห็นว่าสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสูงกว่าสารสีอัลตรามารีนบลูมาก ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีขนาดเล็กมาก (0.150 – 0.2 ไมโครเมตร) เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของสารสีอัลตรามารีนบลู (1 – 4 ไมโครเมตร) จึงทำให้มี heterogeneous nuclei จำนวนมากกว่า ซึ่งส่งผลชักนำให้พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้เร็วและเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

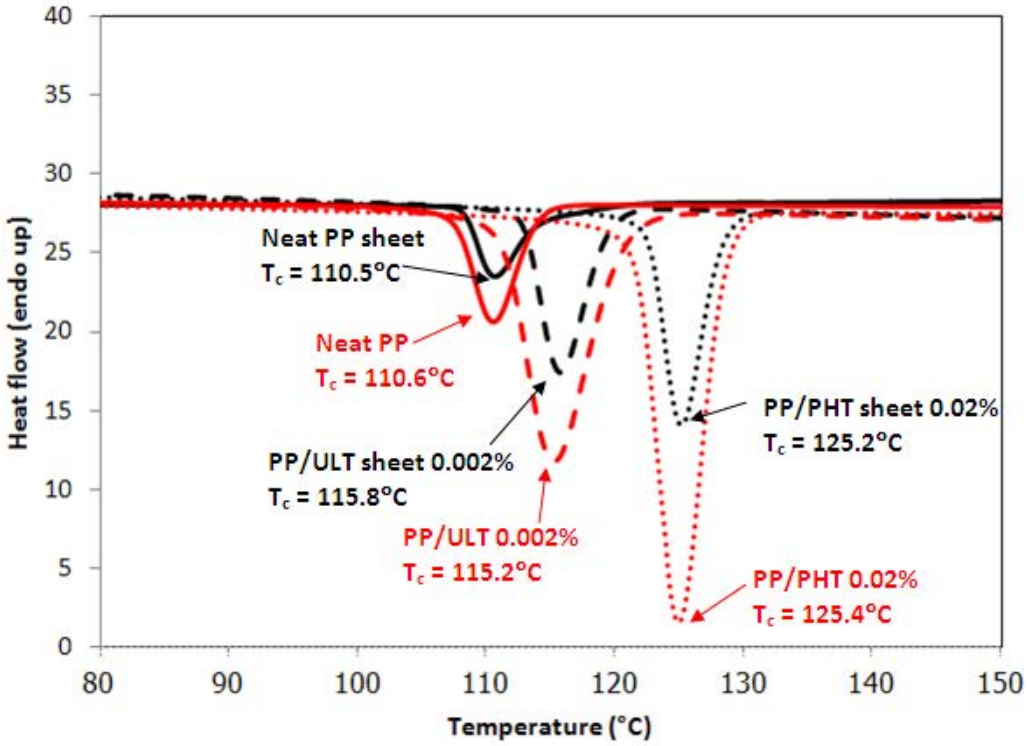
จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีที่พบว่า เมื่อปริมาณอัลตรามารีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก ความสามารถการก่อนิวเคลียสผลึกไม่ขึ้นกับความเข้มข้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001-0.002 โดยน้ำหนัก ในทำนองเดียวกันการใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูตั้งแต่ปริมาณร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ดีกรีของความเป็นผลึกมีค่าลดลง ดังนั้นจึงนำพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001-0.02 โดยน้ำหนัก มาขึ้นรูปเป็นแผ่น แล้วนำแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ได้ไปทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป

เพื่อเป็นการศึกษาผลของสภาวะการขึ้นรูปเป็นแผ่นต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน จึงได้นำแผ่นพอลิโพรพิลีนรวมทั้งแผ่นพอลิโพรพิลีนผสมสารสีไปตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC อีกครั้งหนึ่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของทั้งพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีแทบไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 110.5 องศาเซลเซียส (ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่นมีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 110.6 องศาเซลเซียส) ในขณะที่แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุดเท่ากับ 115.8 องศาเซลเซียส และ 125.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.12 (ก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่น อุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 115.2 องศาเซลเซียส และ 125.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เป็นการยืนยันว่าสารสีทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน โดยฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ดีกรีของความเป็นผลึกของแผ่น

พอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีมีค่าสูงกว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่สารสี อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนก่อนการขึ้นรูป (ตารางที่ 4.1) พบว่า หลังผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นพอลิโพรพิลีนทุกสูตรมีดีกรีของความเป็นผลึกลดลง ทั้งนี้น่าจะเป็นผลมาจากความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการขึ้นรูป ทำให้สายโซ่พอลิโพรพิลีนเกิดการขาดออก ส่งผลให้มีดีกรีของความเป็นผลึกลดลง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเกิดผลึก T_c (^oC)	อุณหภูมิหลอมเหลว T_m (^oC)	ดีกรีของความเป็นผลึก X_c (%)
PP	110.5	163.1	21.19
PP/ULT 0.0001%	115.5	163.2	26.84
PP/ULT 0.0005%	115.1	163.6	31.33
PP/ULT 0.001%	115.0	162.8	28.69
PP/ULT 0.002%	115.8	162.8	29.89
PP/PHT 0.0001%	119.8	163.1	34.35
PP/PHT 0.0005%	121.8	163.0	37.93
PP/PHT 0.001%	122.0	163.4	37.07
PP/PHT 0.002%	122.2	163.6	38.12
PP/PHT 0.01%	124.3	162.8	38.99
PP/PHT 0.015%	124.7	162.1	39.64
PP/PHT 0.02%	125.2	163.6	39.07



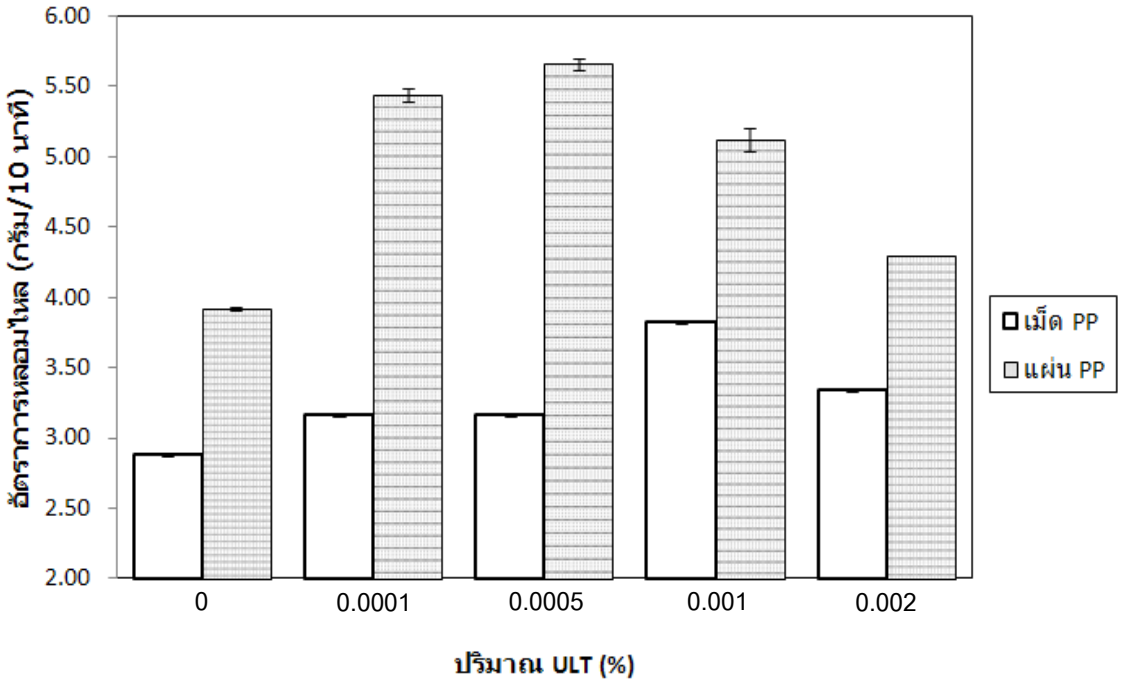
ภาพที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูเทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าสายโซ่พอลิโพรพิลีนเกิดการขาดออกระหว่างการขึ้นรูปหรือไม่ จึงได้นำเม็ดและแผ่นพอลิโพรพิลีนไปทดสอบหาอัตราการหลอมไหล ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.13-4.14 โดยพบว่า เม็ดพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนมีอัตราการหลอมไหลเท่ากับ 2.88 กรัม/10 นาที และ 3.92 กรัม/10 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปเป็นแผ่นทำให้พอลิโพรพิลีนมีอัตราการหลอมไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการขึ้นรูป ทำให้สายโซ่ของพอลิโพรพิลีนเกิดการขาดออก หรือพอลิโพรพิลีนมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง จึงทำให้พอลิโพรพิลีนไหลได้ง่ายขึ้น ในทำนองเดียวกัน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูทุกสูตรหลังผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่น ก็มีอัตราการหลอมไหลเพิ่มขึ้น

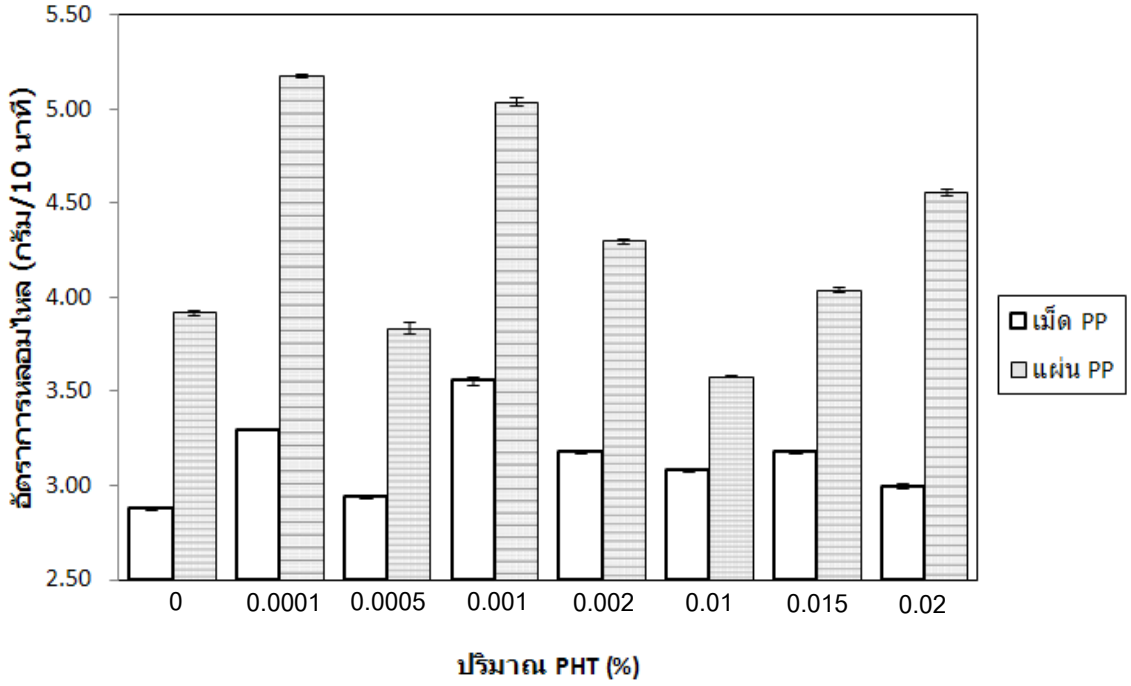
จากผลการตรวจสอบอัตราการหลอมไหล ทำให้สรุปได้ว่า เมื่อนำเม็ดโพรพิลีนไปขึ้นรูปเป็นแผ่น สายโซ่พอลิโพรพิลีนได้เกิดการขาดออกเนื่องมาจากความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการขึ้นรูปจริง

ตารางที่ 4.3 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

ตัวอย่าง	เม็ด (กรัม/10 นาที)	แผ่น (กรัม/10 นาที)
PP	2.88 ±0.00	3.92 ±0.01
PP/ULT 0.0001%	3.16 ±0.01	5.44 ±0.05
PP/ULT 0.0005%	3.16 ±0.01	5.66 ±0.04
PP/ULT 0.001%	3.82 ±0.01	5.12 ±0.08
PP/ULT 0.002%	3.34 ±0.01	4.30 ±0.00
PP/PHT 0.0001%	3.30 ±0.00	5.18 ±0.01
PP/PHT 0.0005%	2.94 ±0.01	3.84 ±0.03
PP/PHT 0.001%	3.56 ±0.02	5.04 ±0.02
PP/PHT 0.002%	3.18 ±0.01	4.30 ±0.02
PP/PHT 0.01%	3.08 ±0.00	3.58 ±0.00
PP/PHT 0.015%	3.18 ±0.00	4.04 ±0.01
PP/PHT 0.02%	3.00 ±0.01	4.56 ±0.02



ภาพที่ 4.13 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู เทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู



ภาพที่ 4.14 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู เทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีน และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

4.2.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

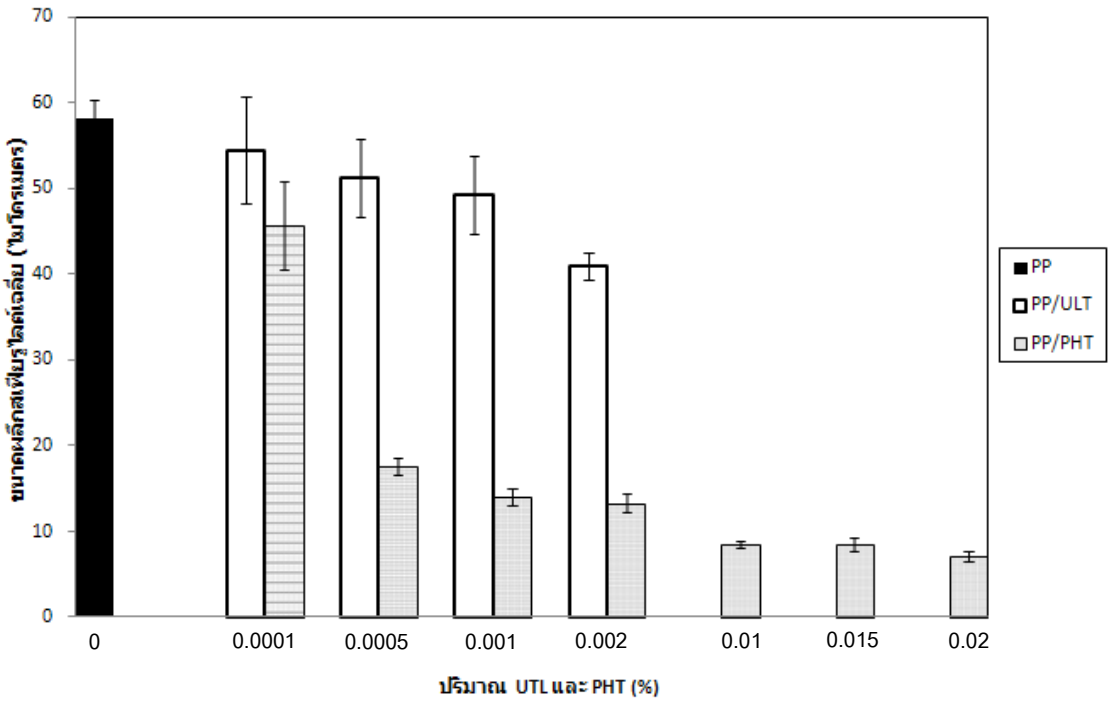
การใส่สารก่อนิวเคลียสผลึกลงไปในพอลิเมอร์จะทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำแผ่นพอลิโพรพิลีนทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารสีไปตรวจสอบขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า ได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.15 โดยพบว่า ผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยของพอลิโพรพิลีนมีขนาดเท่ากับ 58.25 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสี พบว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด ทำให้ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กลง โดยในกรณีของพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลู จะเห็นได้ว่าผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กลงเล็กน้อยตามความเข้มข้นของอัลตรามารีนบลู โดยขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยมีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 40.99 ไมโครเมตร

สำหรับกรณีของพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลู พบว่า ที่ปริมาณสารสีตั้งแต่ร้อยละ 0.0001-0.01 โดยน้ำหนัก ผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณสารสีที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณฟแทโลไซยานีนบลูเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 8 ไมโครเมตร) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนที่แสดงให้เห็นว่า การใส่ฟแทโลไซยานีนบลูในปริมาณสูงกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น เป็นการยืนยันว่า เมื่อความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ความสามารถการก่อนิวเคลียสผลึกของสารสีฟแทโลไซยานีนบลูไม่ได้แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูที่ปริมาณเท่ากันต่อขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน จะเห็นได้ว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กกว่า ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีขนาดของอนุภาคที่เล็กมาก (0.150 – 0.2 ไมโครเมตร) เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของสารสีอัลตรามารีนบลู (1 – 4 ไมโครเมตร) ทำให้มี heterogeneous nuclei จำนวนมากกว่าและขนาดเล็กกว่า ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ที่พบว่า ฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสูงกว่าอัลตรามารีนบลู

ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

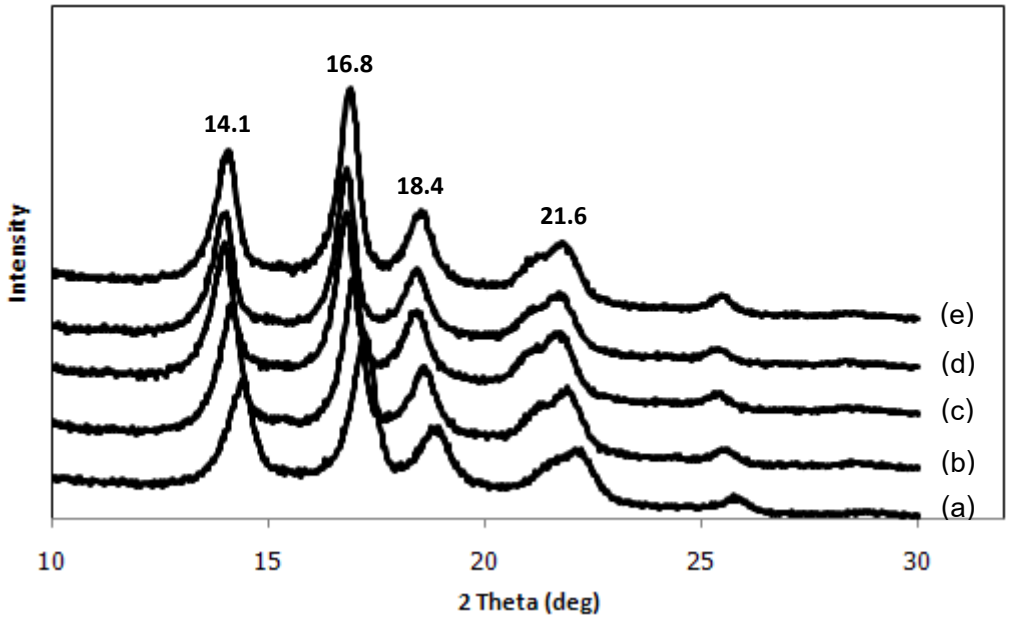
ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)
PP	58.25	-	-
PP/ULT 0.0001%	54.46	PP/PHT 0.0001%	45.72
PP/ULT 0.0005%	51.24	PP/PHT 0.0005%	17.64
PP/ULT 0.001%	49.28	PP/PHT 0.001%	14.10
PP/ULT 0.002%	40.99	PP/PHT 0.002%	13.32
-	-	PP/PHT 0.01%	8.46
-	-	PP/PHT 0.015%	8.49
-	-	PP/PHT 0.02%	7.11



ภาพที่ 4.15 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

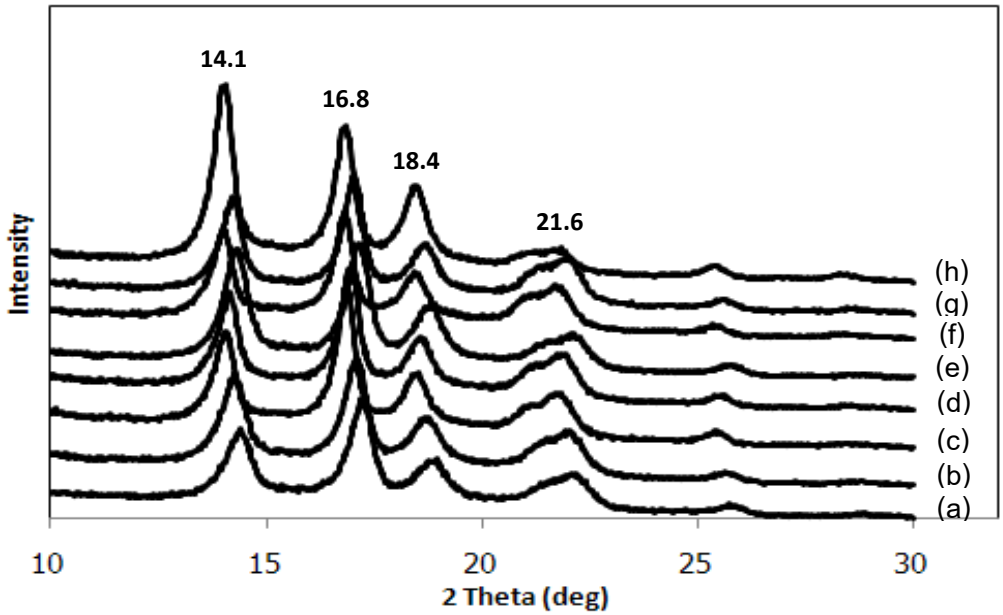
4.2.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูด้วยเทคนิค WAXD เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึก ได้ผลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรม ดังแสดงในภาพที่ 4.16-4.17 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.16 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู (a) PP, (b) PP/ULT 0.0001%, (c) PP/ULT 0.0005%, (d) PP/ULT 0.001%, (e) PP/ULT 0.002%

จากภาพที่ 4.16 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นทดสอบพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูกับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของทั้งพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1, 16.8, 18.4 และ 21.6° ซึ่งเป็นพีกของรูปผลึกแบบแอลฟาเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูทุกสูตรมีรูปผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.17 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู (a) PP, (b) PP/PHT 0.0001%, (c) PP/ PHT 0.0005%, (d) PP/ PHT 0.001%, (e) PP/ PHT 0.002%, (f) PP/PHT 0.01%, (g) PP/PHT 0.015%, (h) PP/PHT 0.02%

ในทำนองเดียวกัน จากภาพที่ 4.17 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูกับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1, 16.8, 18.4 และ 21.6° ซึ่งเป็นตำแหน่งของผลึกแบบแอลฟา แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูทุกสูตรมีรูปผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณารูปผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค WAXD ทำให้สรุปได้ว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด ทำให้พอลิโพรพิลีนมีรูปแบบผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ทั้งสารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบแอลฟา หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด ไม่ได้ทำให้รูปผลึกของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนไป

4.3 การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของแผ่นพอลิโพรพิลีน

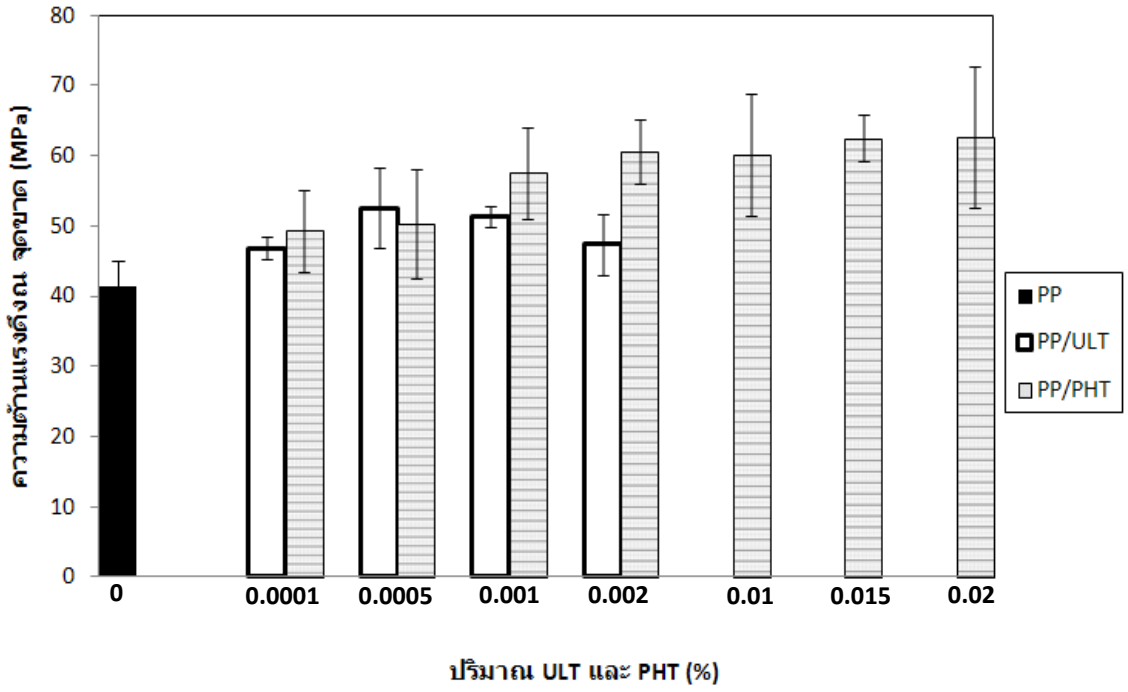
เมื่อนำแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมาทดสอบหาความต้านแรงดึงเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ไม่ใส่สารสี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.6 และภาพที่ 4.18-4.19

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.18 ซึ่งแสดงค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู จะเห็นได้ว่า แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาดเท่ากับ 41.4 MPa และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาดสูงกว่า โดยแผ่นทดสอบที่ใส่อัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0005 โดยน้ำหนักมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาดสูงที่สุด (เท่ากับ 52.5 MPa) และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001 โดยน้ำหนักมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาดต่ำที่สุด (เท่ากับ 46.8 MPa) ซึ่งที่เป็นดังนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการใส่อัลตรามารีนบลูที่ปริมาณร้อยละ 0.0005 โดยน้ำหนัก ทำให้พอลิโพรพิลีนมีดีกรีของความเป็นผลึกสูงที่สุด (เท่ากับ 31.33% ดูตารางที่ 4.2) ในขณะที่แผ่นทดสอบที่มีอัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001 โดยน้ำหนักมีดีกรีของความเป็นผลึกต่ำสุด (เท่ากับ 26.84%)

ผลการทดสอบหาค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก ของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.19 พบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านแรงดึง ณ จุดขาด โดยแผ่นพอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึง ณ จุดครากเท่ากับ 30.4 MPa และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูมีความต้านแรงดึง ณ จุดครากสูงกว่า โดยแผ่นทดสอบที่ใส่อัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0005 โดยน้ำหนักมีความต้านแรงดึง ณ จุดครากสูงที่สุด (เท่ากับ 35.9 MPa) และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูปริมาณร้อยละ 0.0001 โดยน้ำหนักมีความต้านแรงดึง ณ จุดครากต่ำที่สุด (เท่ากับ 30.5 MPa)

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

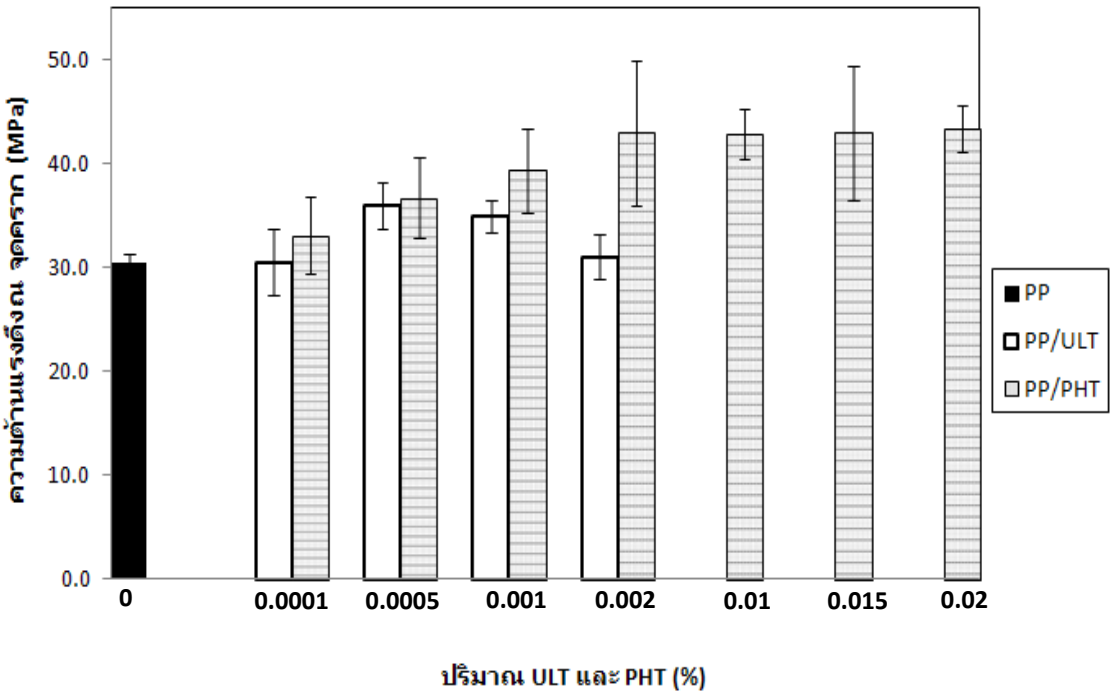
ตัวอย่าง	ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ตัวอย่าง	ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)
PP	41.4 ±3.68	-	-
PP/ULT 0.0001%	46.8 ±1.60	PP/PHT 0.0001%	49.3 ±5.87
PP/ULT 0.0005%	52.5 ±5.75	PP/PHT 0.0005%	50.4 ±7.78
PP/ULT 0.001%	51.3 ±1.45	PP/PHT 0.001%	57.5 ±6.48
PP/ULT 0.002%	47.4 ±4.34	PP/PHT 0.002%	60.6 ±4.50
-	-	PP/PHT 0.01%	60.2 ±8.70
-	-	PP/PHT 0.015%	62.6 ±3.27
-	-	PP/PHT 0.02%	62.7 ±10.00



ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

ตัวอย่าง	ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	ตัวอย่าง	ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)
PP	30.4 ±0.90	-	-
PP/ULT 0.0001%	30.5 ±3.15	PP/PHT 0.0001%	33.2 ±3.75
PP/ULT 0.0005%	35.9 ±2.28	PP/PHT 0.0005%	36.7 ±3.91
PP/ULT 0.001%	34.9 ±1.52	PP/PHT 0.001%	39.4 ±4.08
PP/ULT 0.002%	31.0 ±2.15	PP/PHT 0.002%	43.0 ±6.96
-	-	PP/PHT 0.01%	42.9 ±2.44
-	-	PP/PHT 0.015%	43.0 ±6.48
-	-	PP/PHT 0.02%	43.4 ±2.27



ภาพที่ 4.19 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

เมื่อพิจารณาค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลู ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.18 พบว่า ความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูที่ปริมาณร้อยละ 0.0001-0.002 โดยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารสีและสูงกว่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่สารสี ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากดีกรีของความเป็นผลึกของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีมีค่าสูงกว่า (ดูตารางที่ 4.2) อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณฟแทโลไซยานีนบลูเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนักเป็นต้นไป พบว่า แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากดีกรีของความเป็นผลึกของแผ่นพอลิโพรพิลีนทุกสูตรดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 38-39% ดังแสดงในตารางที่ 4.2) ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านแรงดึง ณ จุดขาด ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.19

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาด และจุดครากของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู จะเห็นได้ว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีความต้านแรงดึง ณ จุดขาด และจุดครากสูงกว่าแผ่นที่ใส่อัลตรามารีนบลู ซึ่งเป็นผลมาจากดีกรีของความเป็นผลึกที่สูงกว่านั่นเอง

จากผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่พบว่า การใส่สารสีทั้ง 2 ชนิดทำให้พอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูสามารถปรับปรุงสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิโพรพิลีนได้

4.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของแผ่นพอลิโพรพิลีน

เมื่อนำแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและสารสีฟแทโลไซยานีนบลูมาทดสอบสมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดความใส haze-gard plus เพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ไม่ใส่สารสี ได้ผลดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.20 โดยพบว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนมีความใส (clarity) เท่ากับ 82.2% และการใส่สารสีทั้ง 2 ชนิด ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความใสสูงขึ้น โดยแผ่นทดสอบที่ใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูมีความใสสูงที่สุดเท่ากับ 88.6% และ 98.8% ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กกว่า (ดูตารางที่ 4.4) จึงทำให้แสงส่องผ่านแผ่นทดสอบได้มากกว่า

ในกรณีที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู พบว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนมีความใสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของอัลตรามารีนบลู เนื่องจากขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนเล็กลงเพียงเล็กน้อยตามความเข้มข้นของอัลตรามารีนบลูที่เพิ่มขึ้น

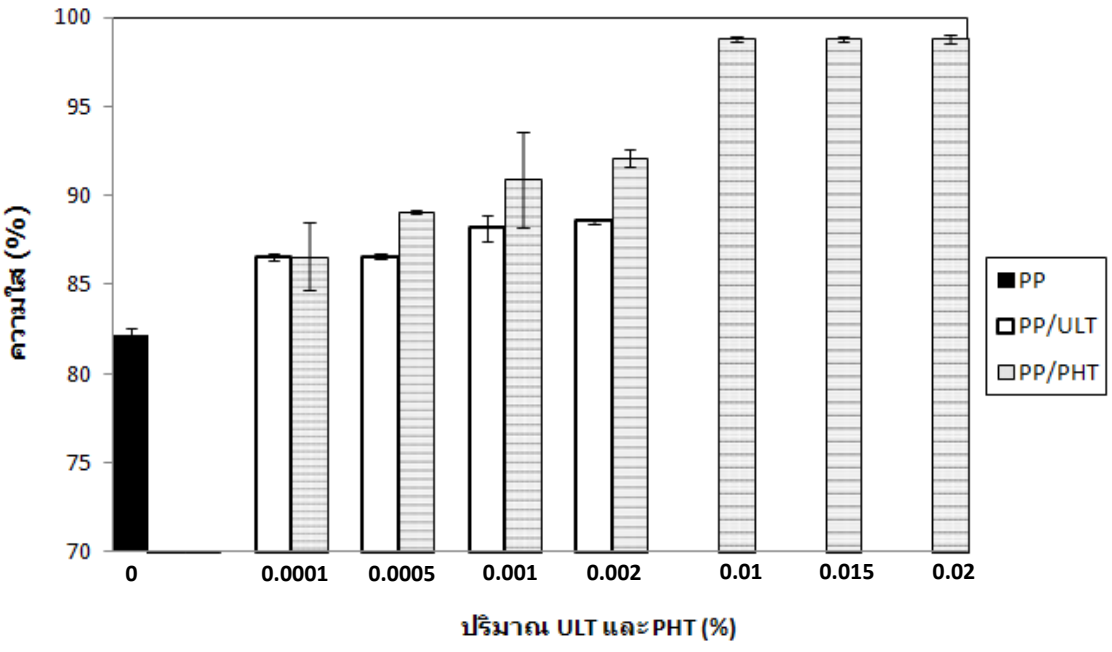
เมื่อพิจารณาความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลู พบว่า ที่ปริมาณสารสีตั้งแต่ร้อยละ 0.0001-0.01 โดยน้ำหนัก แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความใสสูงขึ้นตามปริมาณสารสีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ที่เล็กลง อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณฟแทโลไซยานีนบลูเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักเป็นต้นไป จะเห็นได้ว่าความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ที่พบว่า ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนที่ความเข้มข้นข้างต้นมีค่าค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 8 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.4)

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูที่ปริมาณเท่ากันต่อความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีน จะเห็นได้ว่า แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีความใสสูงกว่าแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่อัลตรามารีนบลู ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ที่เล็กกว่านั่นเอง

ผลการทดสอบสมบัติทางแสงของแผ่นทดสอบพอลิโพรพิลีน แสดงให้เห็นว่าการใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูในพอลิโพรพิลีน ทำให้แสงส่องผ่านแผ่นทดสอบได้มากขึ้น และช่วยให้แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความใสเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

ตัวอย่าง	ความใส (%)	ตัวอย่าง	ความใส (%)
PP	82.2 ±0.35	-	-
PP/ULT 0.0001%	86.6 ±0.19	PP/PHT 0.0001%	86.6 ±1.89
PP/ULT 0.0005%	86.6 ±0.13	PP/PHT 0.0005%	89.1 ±0.12
PP/ULT 0.001%	88.2 ±0.72	PP/PHT 0.001%	90.9 ±2.64
PP/ULT 0.002%	88.6 ±0.15	PP/PHT 0.002%	92.1 ±0.50
-	-	PP/PHT 0.01%	98.8 ±0.12
-	-	PP/PHT 0.015%	98.8 ±0.15
-	-	PP/PHT 0.02%	98.8 ±0.21



ภาพที่ 4.20 ความใสของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาผลของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมสารสีอัลตรามารีนบลูหรือฟแทโลไซยานีนบลูที่ปริมาณร้อยละ 0.0001-0.1 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว นำเม็ดพอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาผลของปริมาณสารสีต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน จากนั้น นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นสกรูเดี่ยว นำแผ่นพอลิโพรพิลีนมาทดสอบสมบัติต่างๆ โดยผลการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการนำสารสีไปตรวจสอบรูปร่างและขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า สารสีอัลตรามารีนบลูมีรูปร่างอนุภาคเป็นแผ่นอยู่ในช่วง 1-4 ไมโครเมตร และเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อน ในขณะที่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีรูปร่างอนุภาคกลมค่อนข้างรีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และจับกลุ่มรวมกันแน่น

5.1.2 ผลการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู ด้วยเทคนิค WAXD แสดงให้เห็นว่า สารสีทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน โดยมีพีกสำคัญที่ตำแหน่งไม่ตรงกับตำแหน่งพีกสำคัญของพอลิโพรพิลีน ที่มีรูปผลึกทั้งแบบแอลฟาและแบบบีตา

5.1.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู ทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้น โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุดเท่ากับ 125.7 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่สารสีถึง 15 องศาเซลเซียส ในขณะที่สารสีอัลตรามารีนบลูทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นประมาณ 5 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า ทั้งอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ โดยฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลตรามารีนบลูมาก นอกจากนี้ ยังพบด้วยว่าที่ปริมาณอัลตรามารีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.002 โดยน้ำหนัก และฟแทโลไซยานีนบลูสูงกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ผลของสารสีต่อความสามารถการก่อนิวเคลียสผลึกไม่ขึ้นกับความเข้มข้น

5.1.4 ผลการตรวจสอบอัตราการหลอมไหลของพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก แสดงให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนทุกสูตรหลังการขึ้นรูปเป็นแผ่นมีอัตราการหลอมไหลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ความร้อนและแรงเฉือนในกระบวนการขึ้นรูปน่าจะมีผลทำให้สายโซ่พอลิโพรพิลีนขาดออก

5.1.5 ผลการตรวจสอบขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า แสดงให้เห็นว่า การใส่อัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูในพอลิโพรพิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนมีผลึกสเฟียรูไลต์เล็กลง จึงกล่าวได้ว่า สารสีทั้ง 2 ชนิดทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กกว่า เป็นการยืนยันว่า ฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลตรามารีนบลู

5.1.6 ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค WAXD แสดงให้เห็นว่า การใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลูในพอลิโพรพิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนมีรูปแบบผลึกเป็นแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว นั่นคือ สารสีทั้ง 2 ชนิดไม่ได้ทำให้รูปผลึกของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนไป

5.1.7 ผลการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงและสมบัติการส่องผ่านของแสง แสดงให้เห็นว่า การใส่สารสีอัลตรามารีนบลูและฟแทโลไซยานีนบลู ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความต้านแรงดึงและความใสเพิ่มขึ้น โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่ฟแทโลไซยานีนบลูมีสมบัติดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่พบว่า สารสีฟแทโลไซยานีนบลูมีประสิทธิภาพการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนสูงกว่าสารสีอัลตรามารีนบลูมาก ดังนั้น การศึกษาต่อไปน่าจะมุ่งเน้นในการนำฟแทโลไซยานีนบลูมาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก โดย

5.2.1 ศึกษาอิทธิพลของภาวะและเทคนิคการขึ้นรูป เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็นในการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงาน หรือการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งอาจมีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ใช้สารสีฟแทโลไซยานีนบลูเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก

5.2.2 ศึกษาผลของสารสีฟแทโลไซยานีนบลูต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนแบบอื่นๆ เช่น พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบสุ่มหรือแบบบล็อก หรือการใช้ฟแทโลไซยานีนบลูเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

รายการอ้างอิง

[1] Karger-Kocsis, J. Polypropylene structure, blends and composites. Volume 1 Structure and morphology. Chapman, London (1995).

[2] Vogl, O. Polypropylene: An introduction. Journal macromolecular science – Pure and applied chemistry A36, No.11 (1999) : 1547-1559.

[3] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์. กรุงเทพ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[4] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. ฟิล์มพลาสติก. กรุงเทพ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

[5] Cheremisinoff, N.P. Handbook of polymer science and technology Vol.2: Performance properties of plastics and elastomers. Marcel Dekker, New York (1989) : 507-555.

[6] Keith, H.D., Padden Jr., F.J., Walter, N.M. and Wyckoff, H.W. Evidence for a second crystal form of polypropylene. Journal of applied physics 30, No.10 (1959) : 1485-1488.

[7] อรอุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1. กรุงเทพ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[8] อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์). กรุงเทพ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[9] อรอุษา สรวารี. สารให้สีสำหรับพลาสติก. โลหะ วัสดุ และแร่ 6,(ธันวาคม 2539) : 21-24.

[10] อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. Additives. (ออนไลน์). 2554. แหล่งที่มา : http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~sanongn1/additives.pdf (2554, กรกฎาคม 31)

[11] นพดล เกิดดอนแฝก. การเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนโดยสารก่อผลึกที่ได้จากการรีไซเคิลขวดเพทที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[12] พนิตนันท์ ศรีสุวรรณ. ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[13] Osowiecka, B., Bukowski, A., Zielinski, J., Clesinska, W. and Zielinski, T. Investigations on nucleated polypropylene with using thermal analysis method. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 74 (2003) : 673-679.

[14] Mingliang, G., Demin, J. and Weibing, X. Study on the crystallization properties of polypropylene/montmorillonite composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 46 (2007) : 985-990.

[15] Kanu, R. C., Spotts, T.H. and Chesebrough, M. The effects of some organic and inorganic pigments on the tensile and impact properties of injection-molded polypropylene. International Journal of Modern Engineering. (ออนไลน์). 2001 แหล่งที่มา : http://www.ijme.us/issues/fall2001/articles/polypropylene.htm (2553, กันยายน 4)

[16] Broda, J. Nucleating activity of the quinacridone and phthalocyanine pigments in polypropylene crystallization. Journal of Applied Polymer Science 90 (2003) : 3957-3964.

[17] Broda, J. Structure of polypropylene fibres coloured with a mixture of pigments with different nucleating ability. Polymer 44 (2003) : 6943-6949.

[18] Broda, J., Gawlowski, A., Slusarczyk, C., Wlochowicz, A. and Fabia, J. The influence of additives on the structure of polypropylene fibres. Dyes and Pigments 74 (2007) : 508-511.

[19] Leng, P.B., Akil, H.M. and Lin, O.H. Thermal properties of microsillica and nanosilica filled polypropylene composite with epoxy as dispersing aid. Journal of Reinforced Plastics and Composites 26 (2007) : 761-770.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

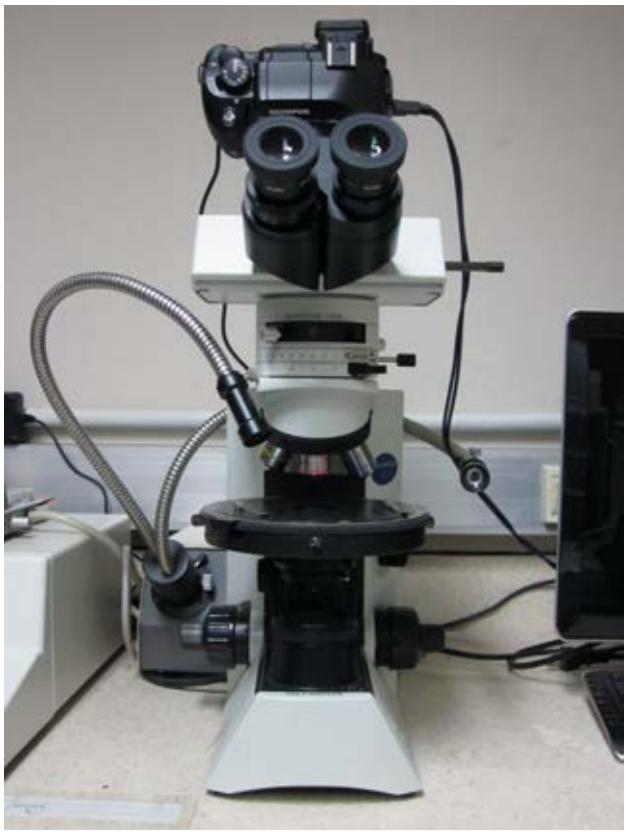
ภาพ ก-1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single-screw extruder, Haake)

ภาพ ก-2 เครื่องตัด (pelletizer, Haake)

ภาพ ก-3 เครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet, Collin)

ภาพ ก-4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM 6400)

ภาพ ก-5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD, JEOL รุ่น JDX 3530)



ภาพ ก-6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy, Olympus รุ่น CX31)

ภาพ ก-7 Hot stage (METTLER TOLEDO รุ่น FP82HT)

ภาพ ก-8 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ (DSC, Perkin-Elmer)

ภาพ ก-9 เครื่องวัดอัตราการหลอมไหลของพลาสติก

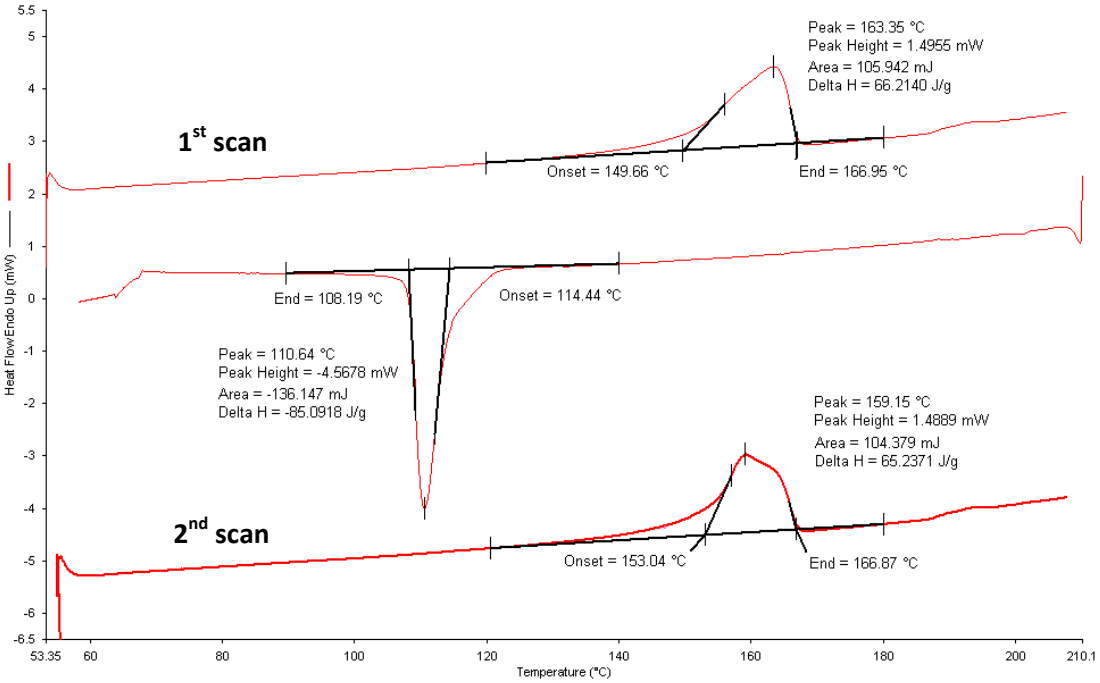
(Galaxy I Melt Indexer, KAYENESS INC. รุ่น D 7053)

ภาพ ก-10 เครื่องวัดความใส (Haze-gard Plus)

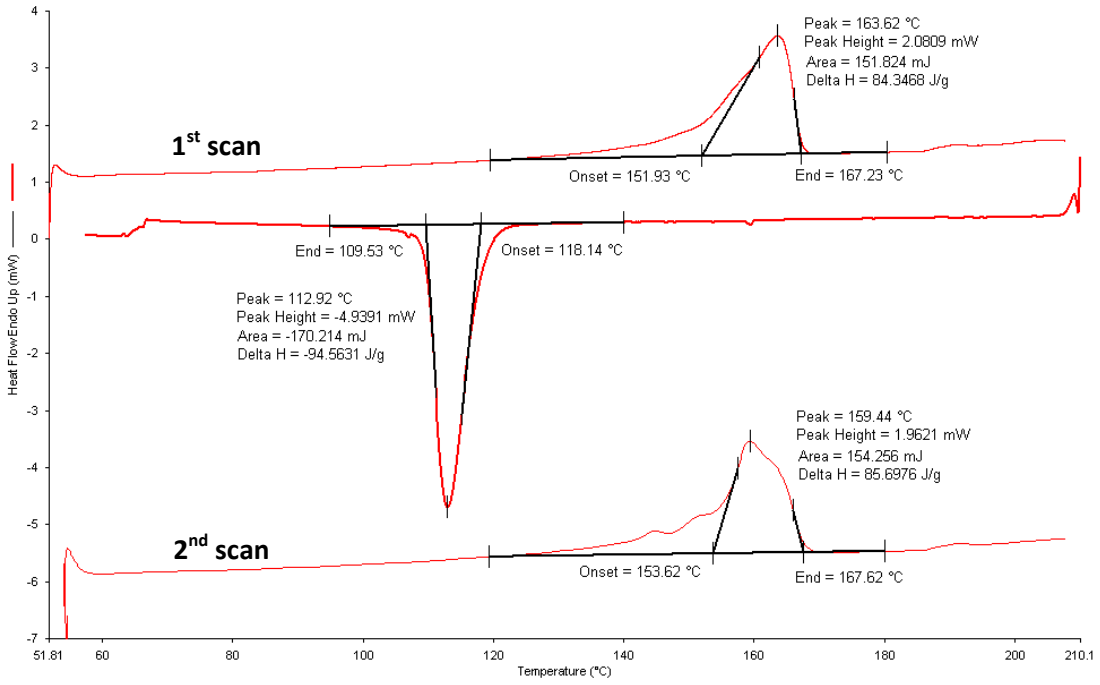
ภาพ ก-11 เครื่องทดสอบแรงดึง (LLOYD Universal Testing Machine รุ่น LR 100K)

ภาคผนวก ข

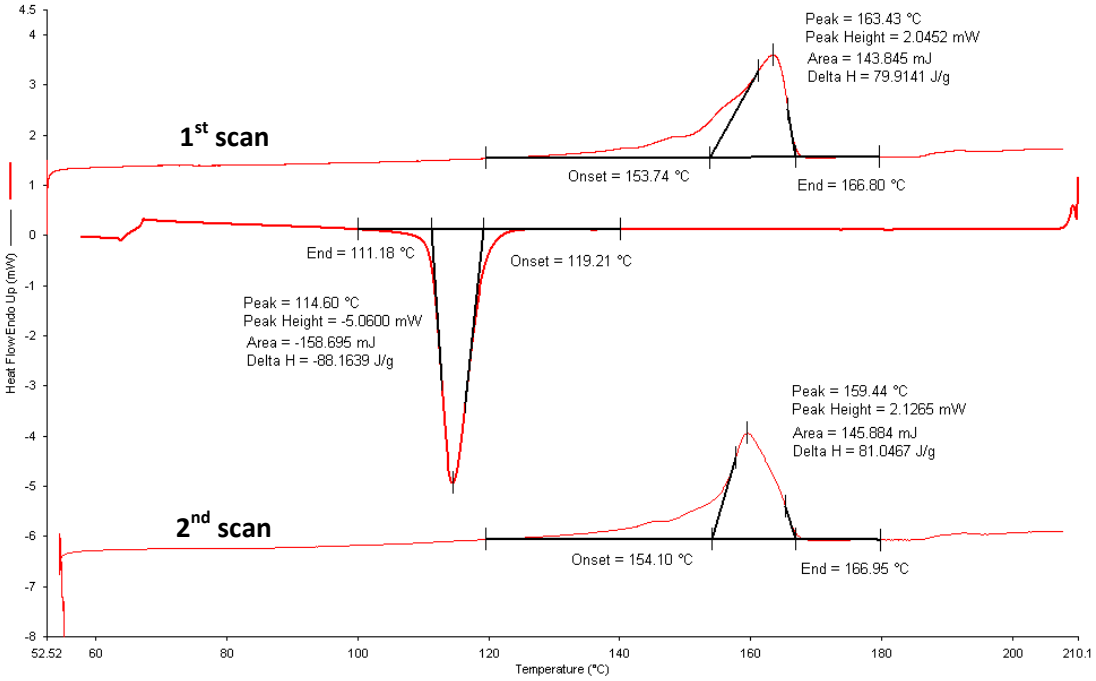
การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์



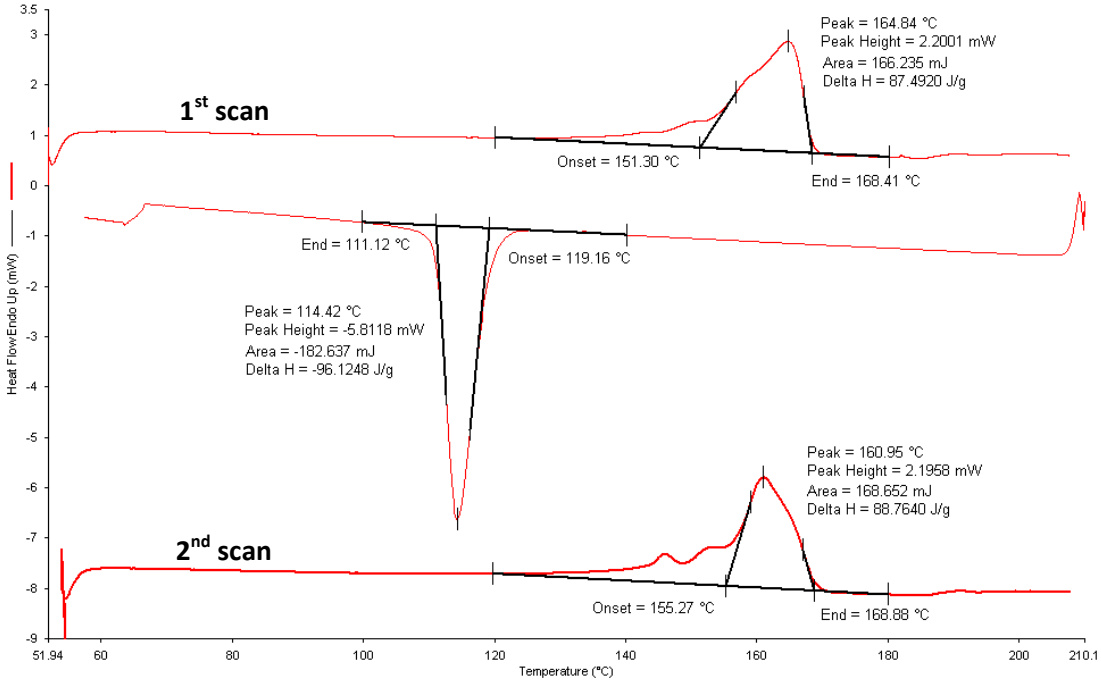
ภาพ ข-1 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีน



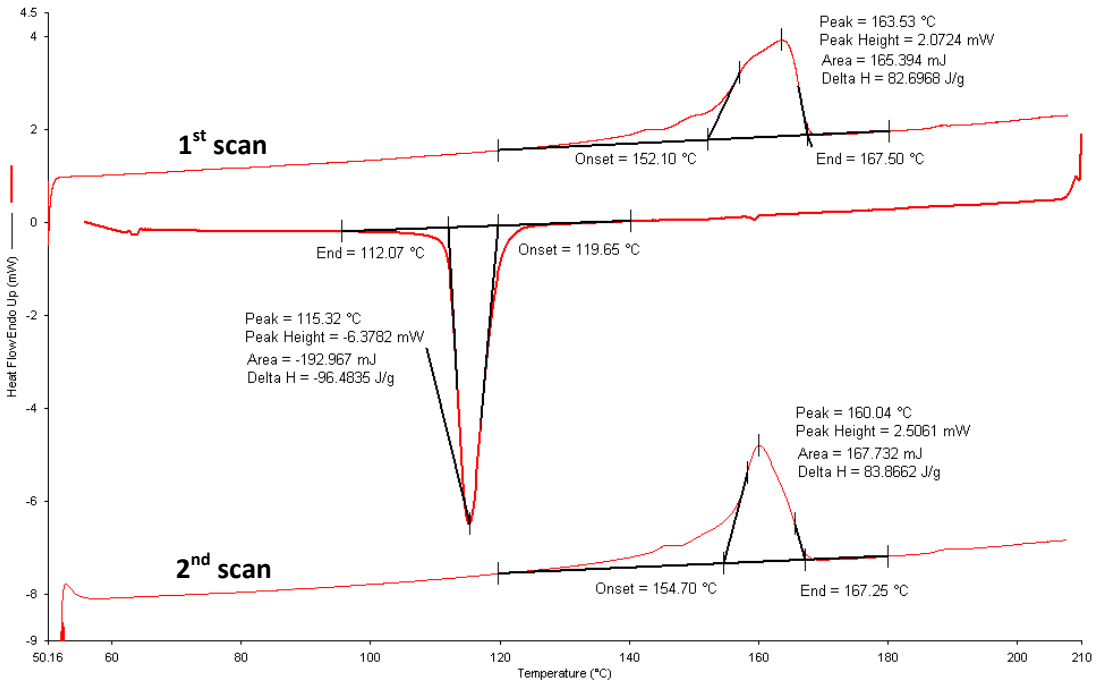
ภาพ ข-2 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก



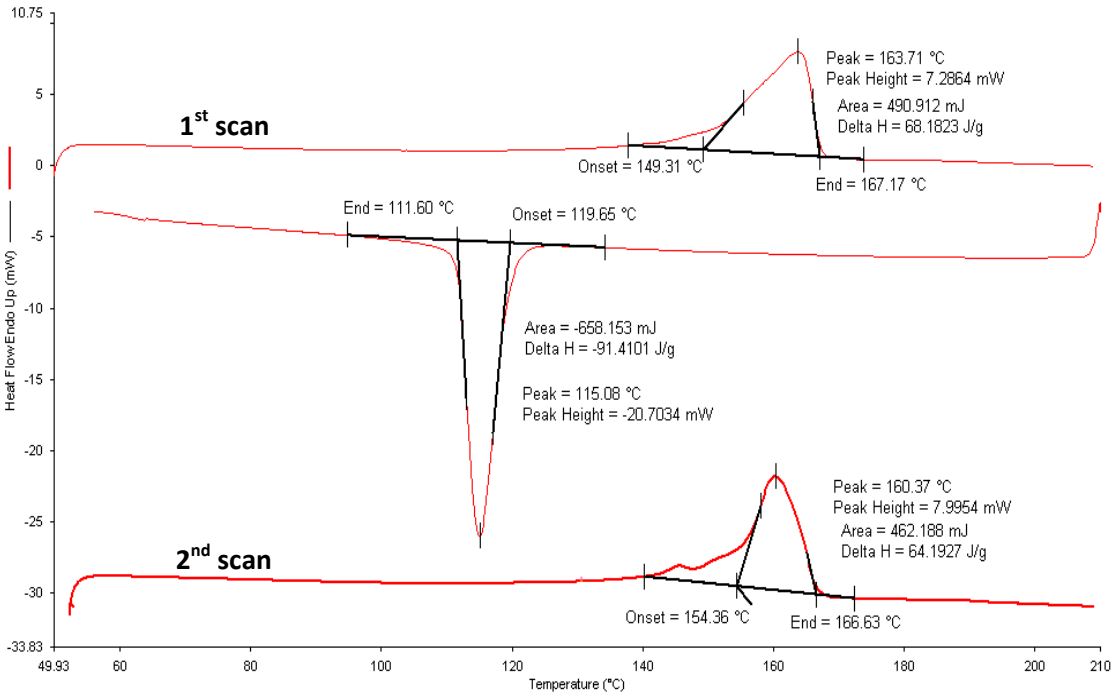
ภาพ ข-3 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก



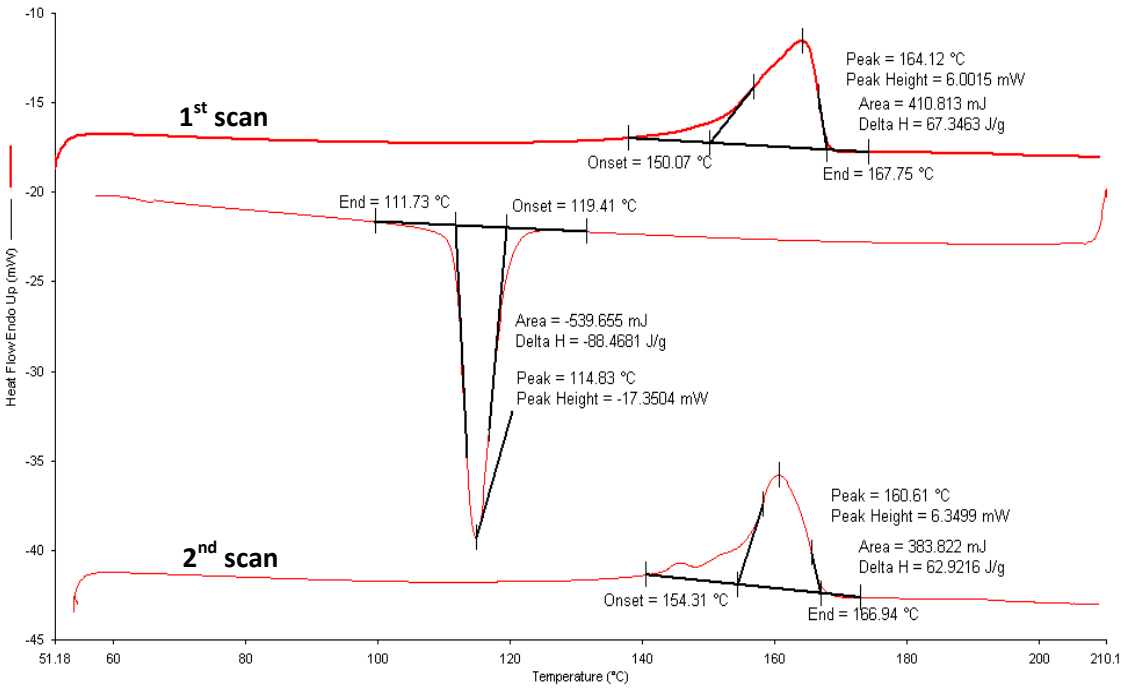
ภาพ ข-4 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก



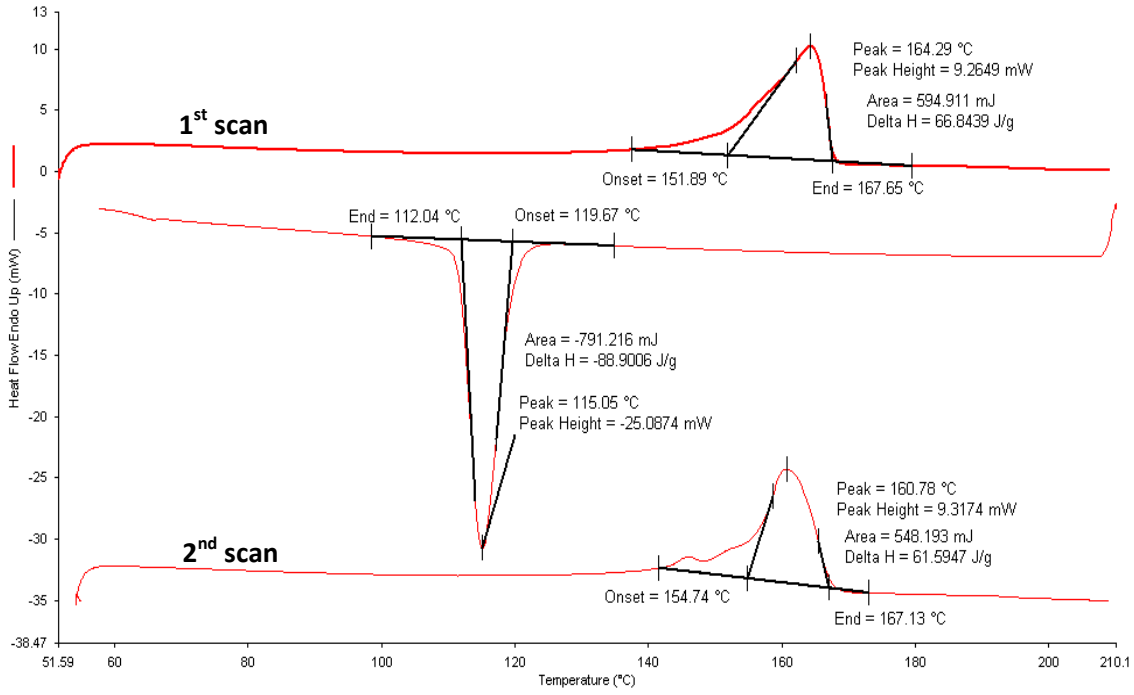
ภาพ ข-5 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก



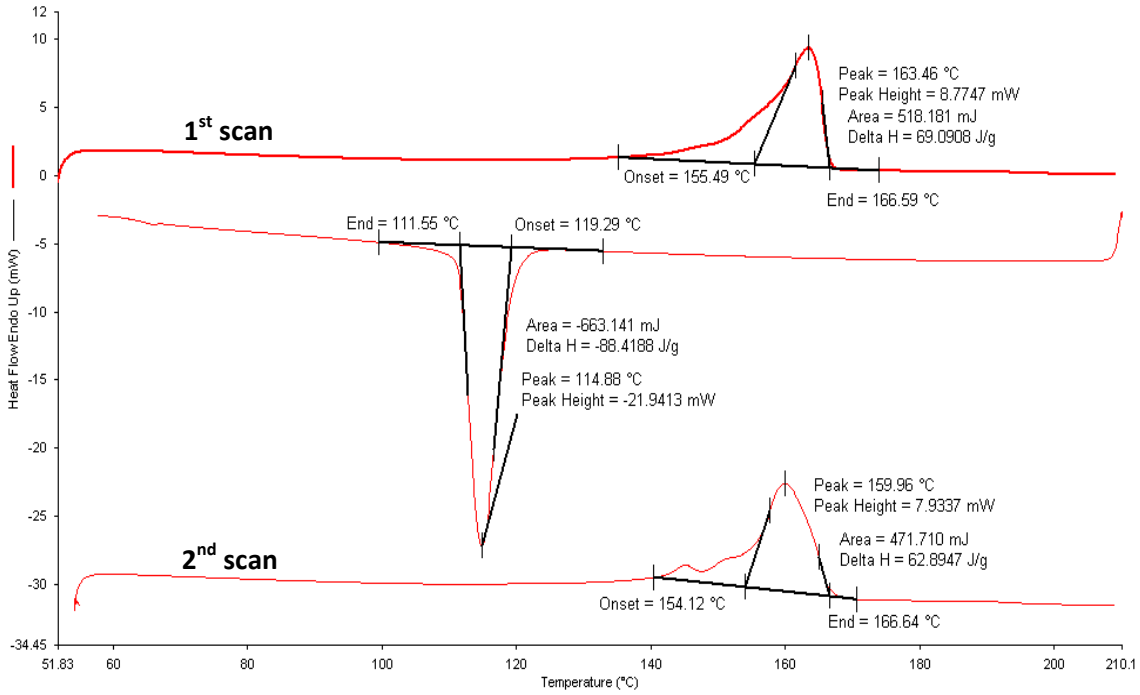
ภาพ ข-6 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.003% โดยน้ำหนัก



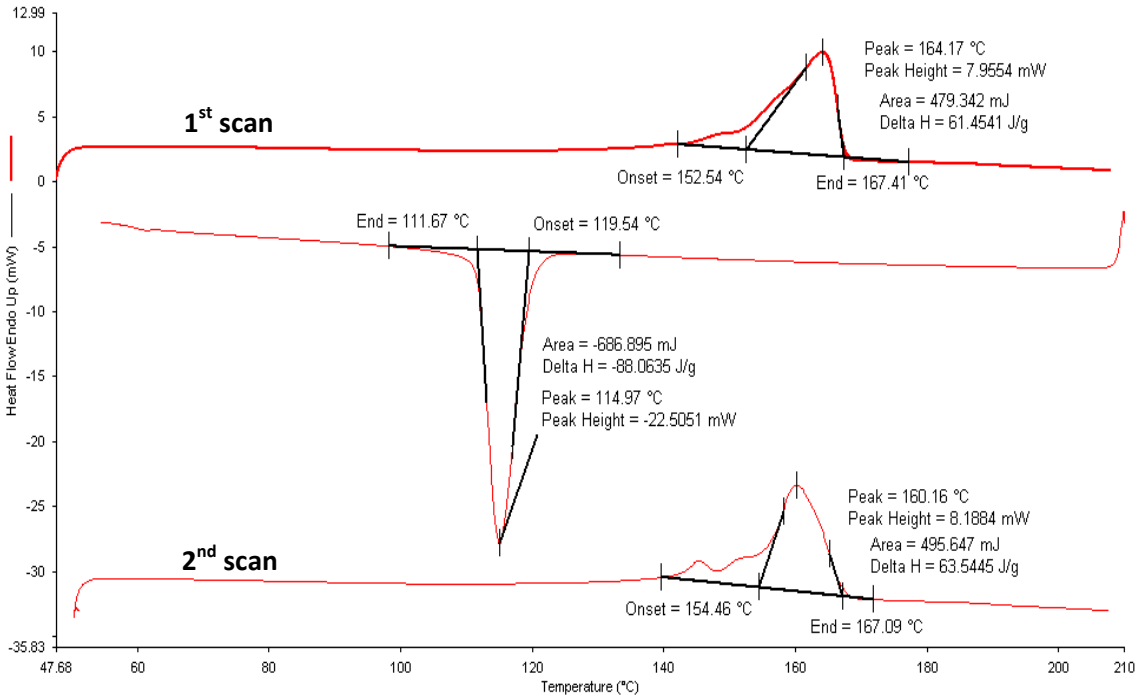
ภาพ ข-7 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.005% โดยน้ำหนัก



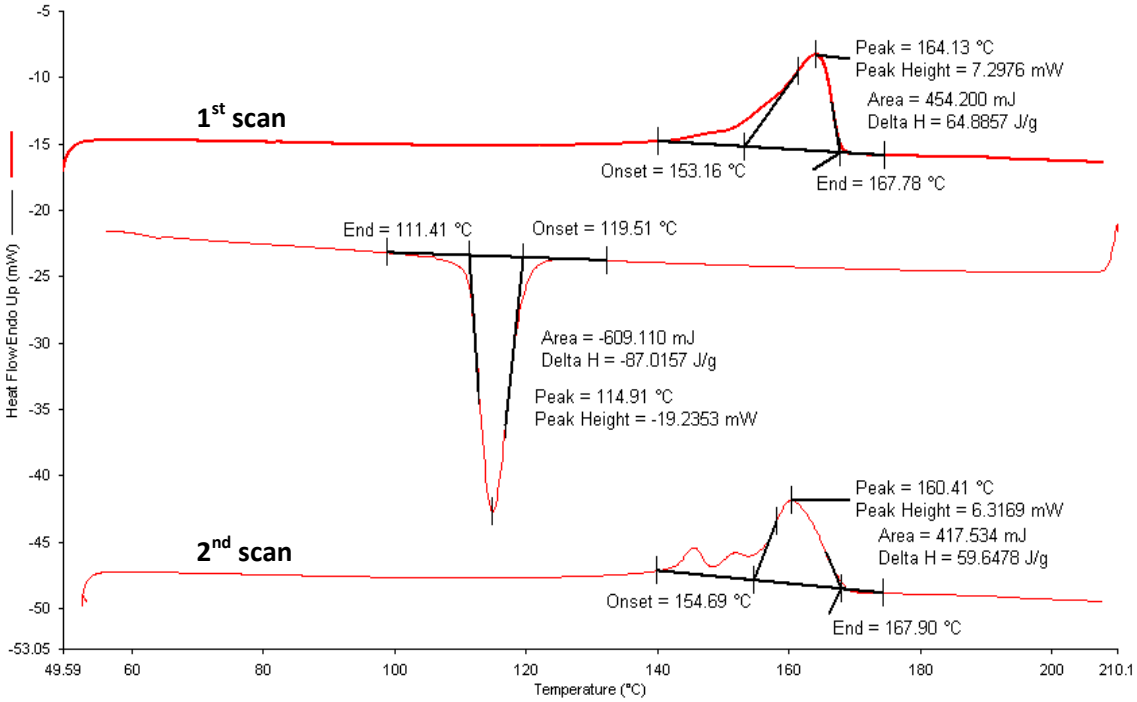
ภาพ ข-8 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.007% โดยน้ำหนัก



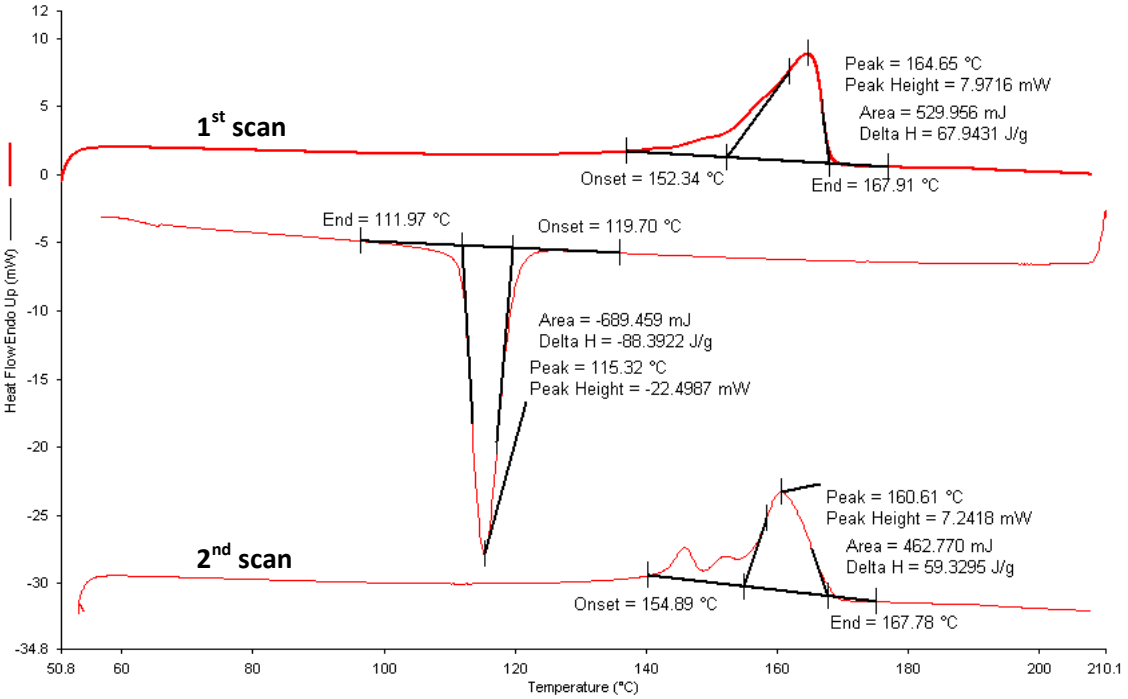
ภาพ ข-9 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.01% โดยน้ำหนัก



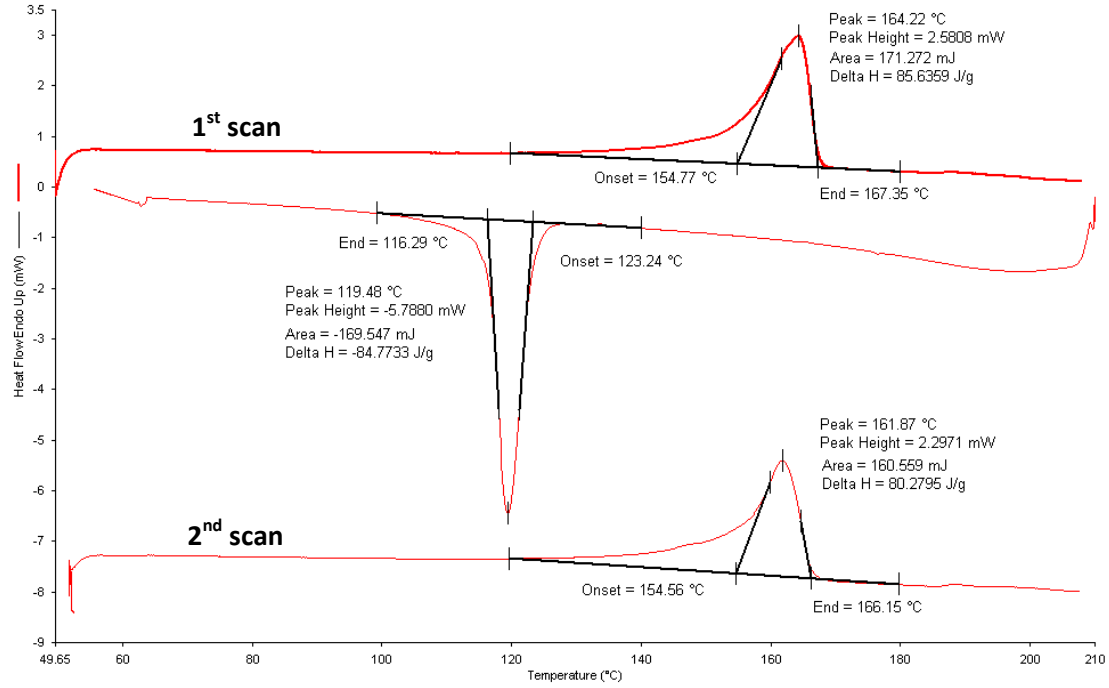
ภาพ ข-10 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.02% โดยน้ำหนัก



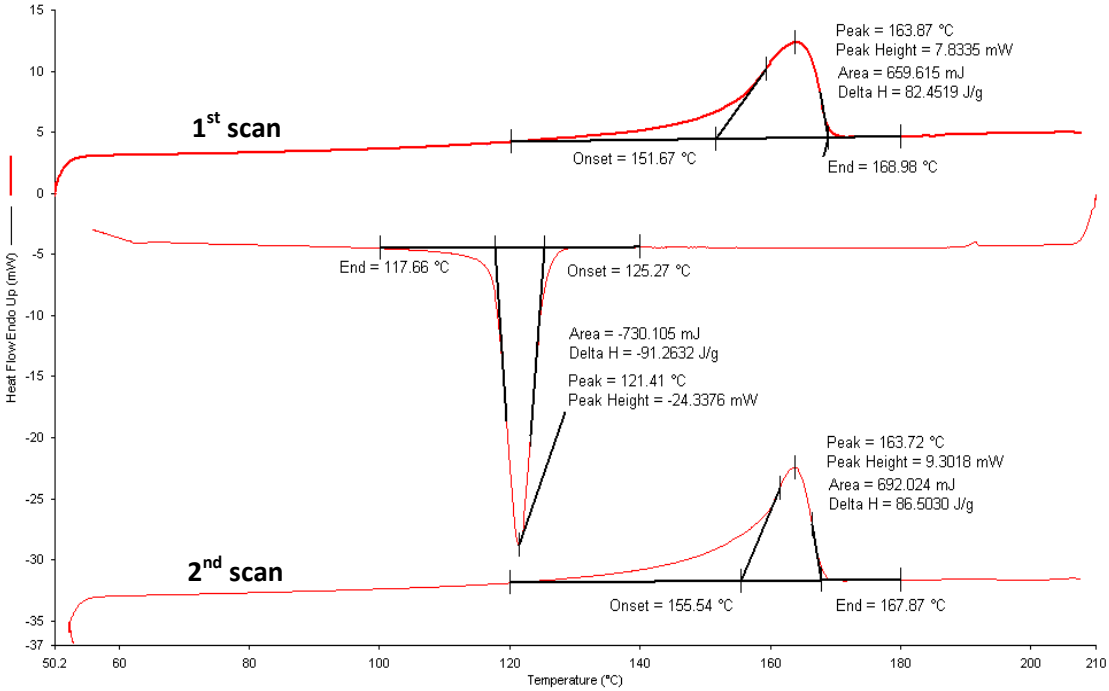
ภาพ ข-11 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.05% โดยน้ำหนัก



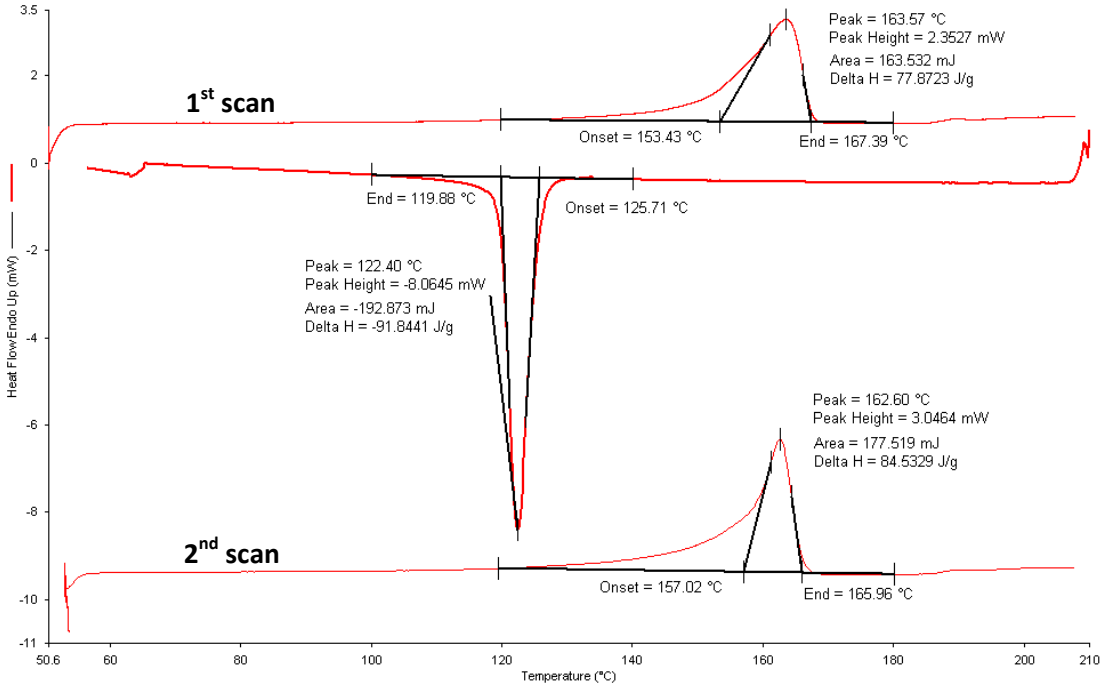
ภาพ ข-12 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.1% โดยน้ำหนัก



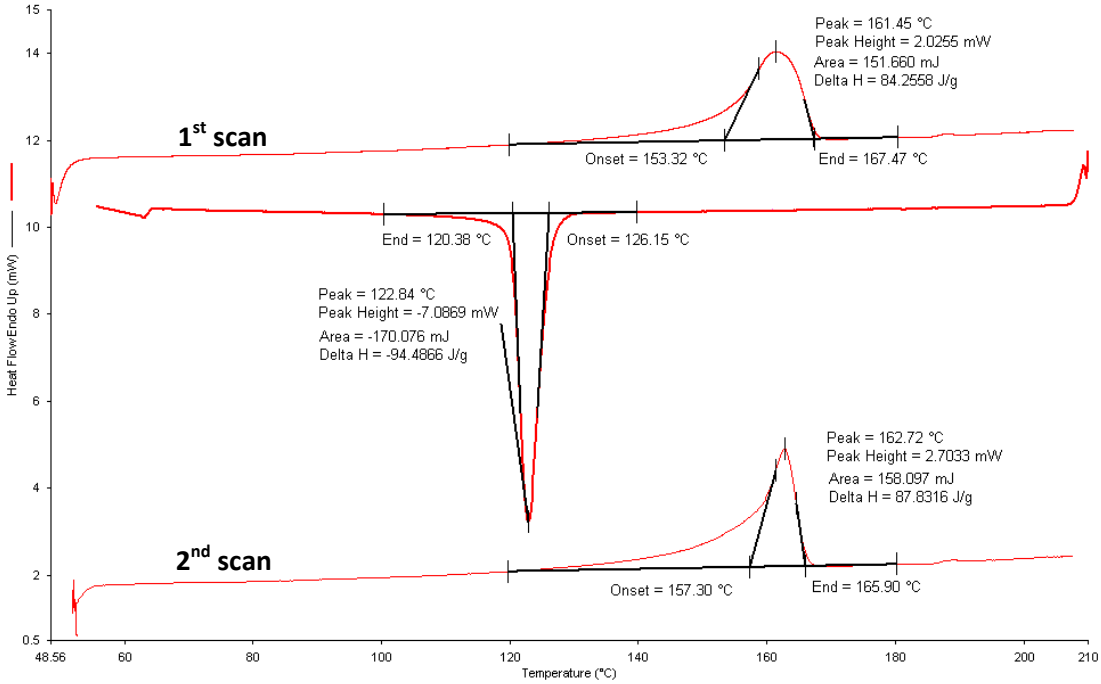
ภาพ ข-13 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก



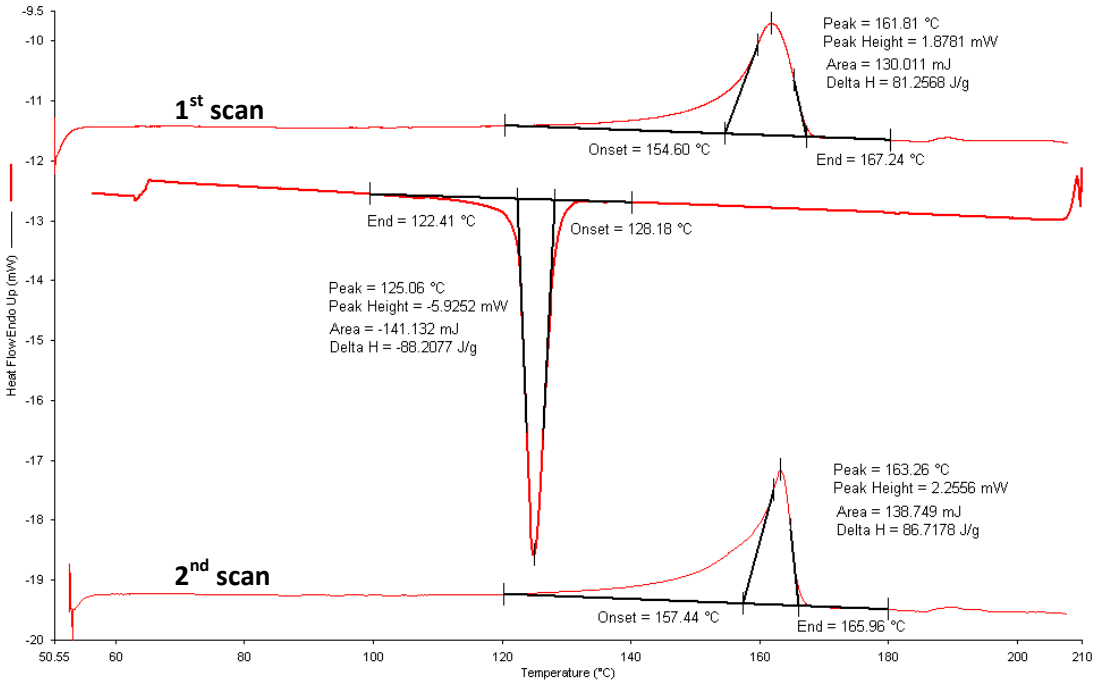
ภาพ ข-14 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก



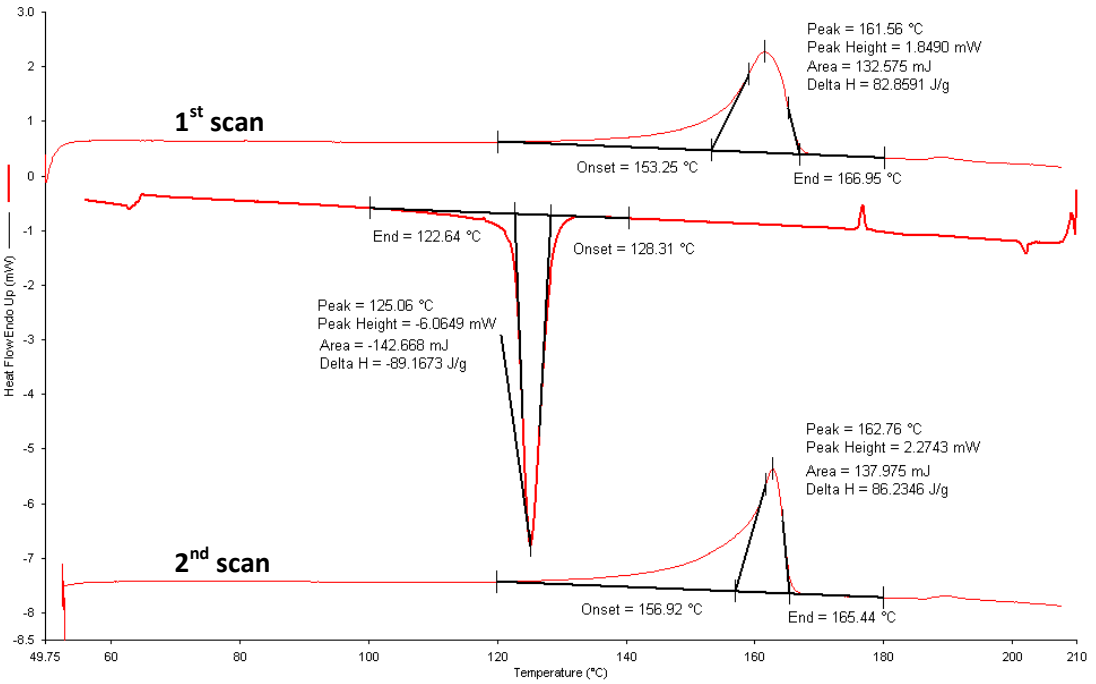
ภาพ ข-15 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก



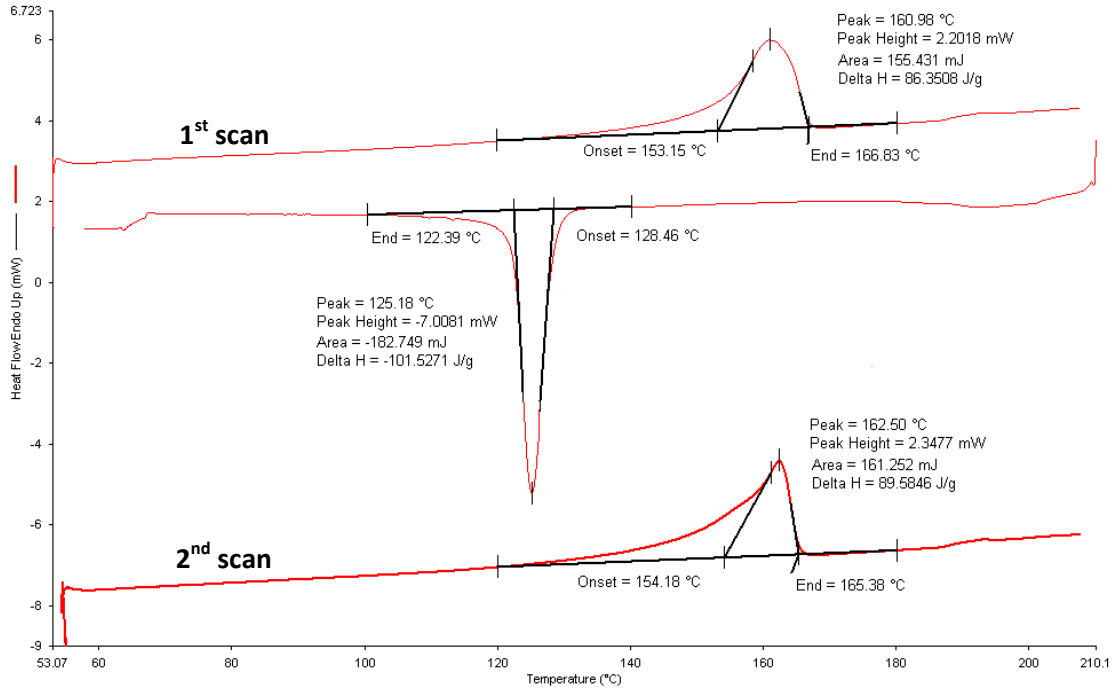
ภาพ ข-16 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก



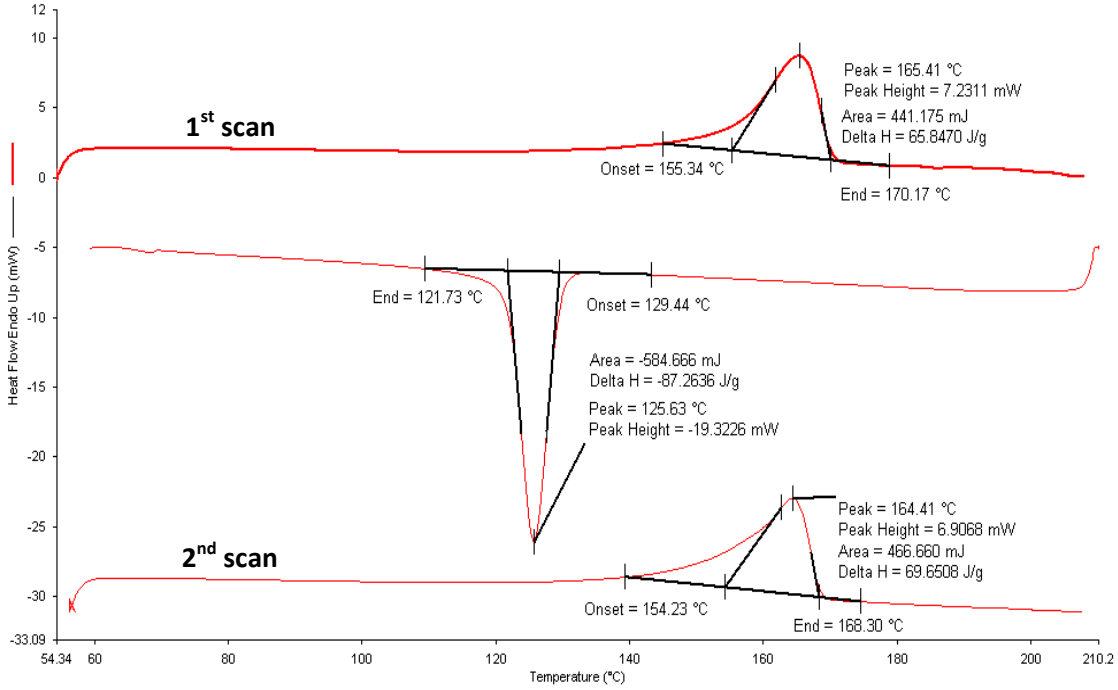
ภาพ ข-17 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.01% โดยน้ำหนัก



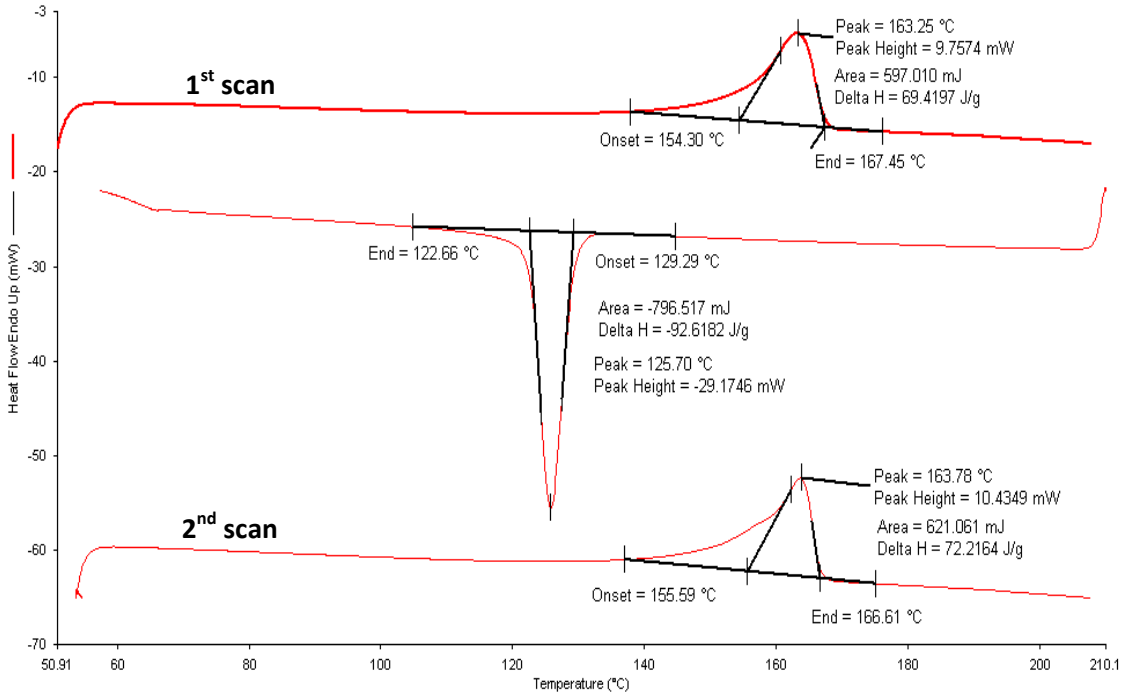
ภาพ ข-18 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.015% โดยน้ำหนัก



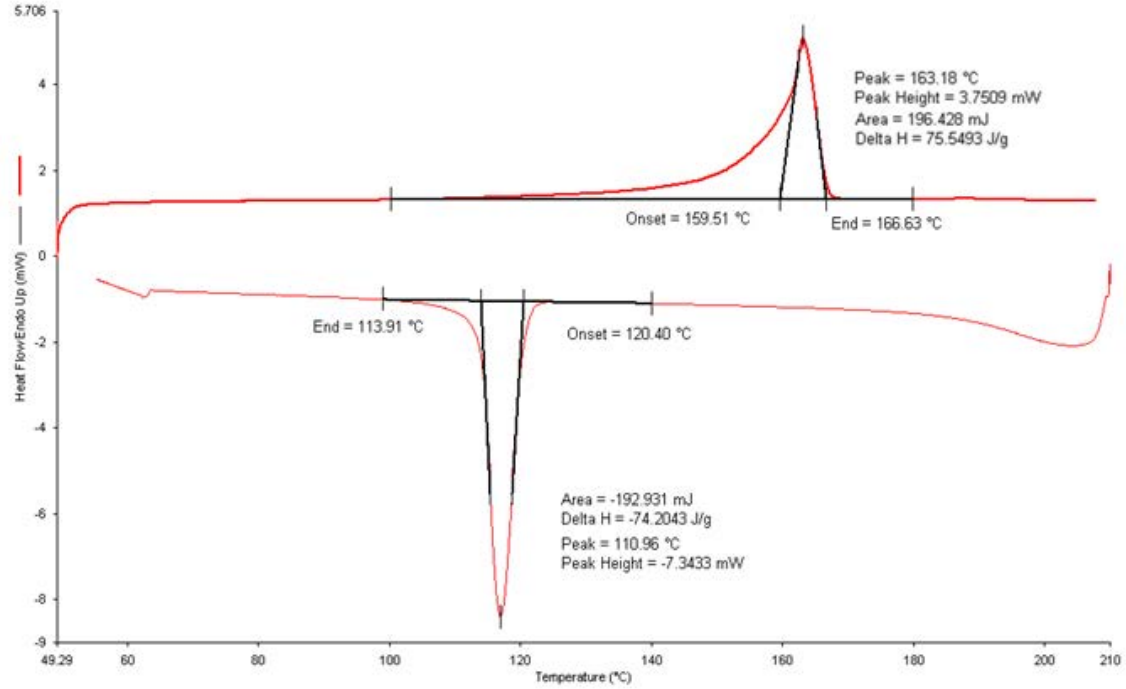
ภาพ ข-19 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.02% โดยน้ำหนัก



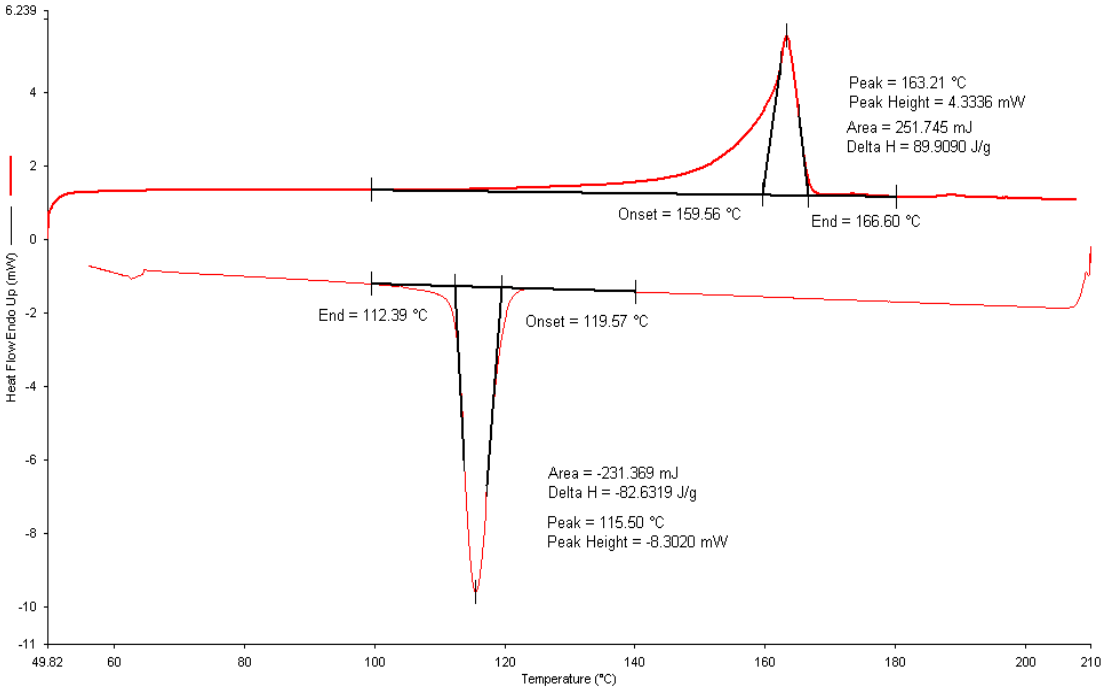
ภาพ ข-20 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.05% โดยน้ำหนัก



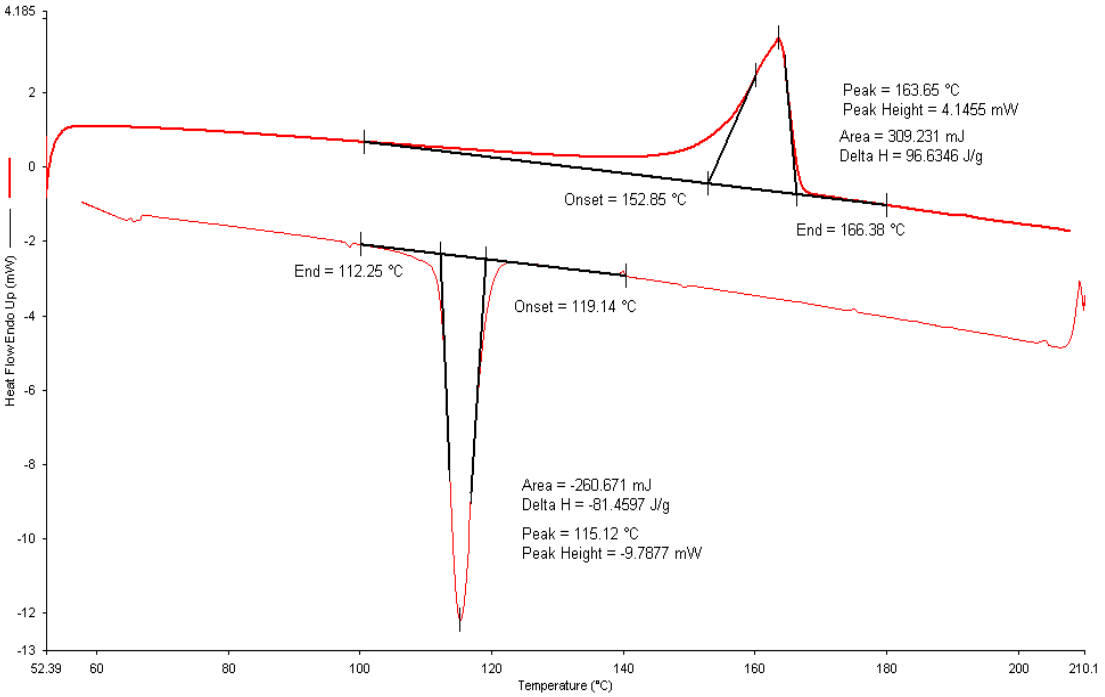
ภาพ ข-21 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.1% โดยน้ำหนัก



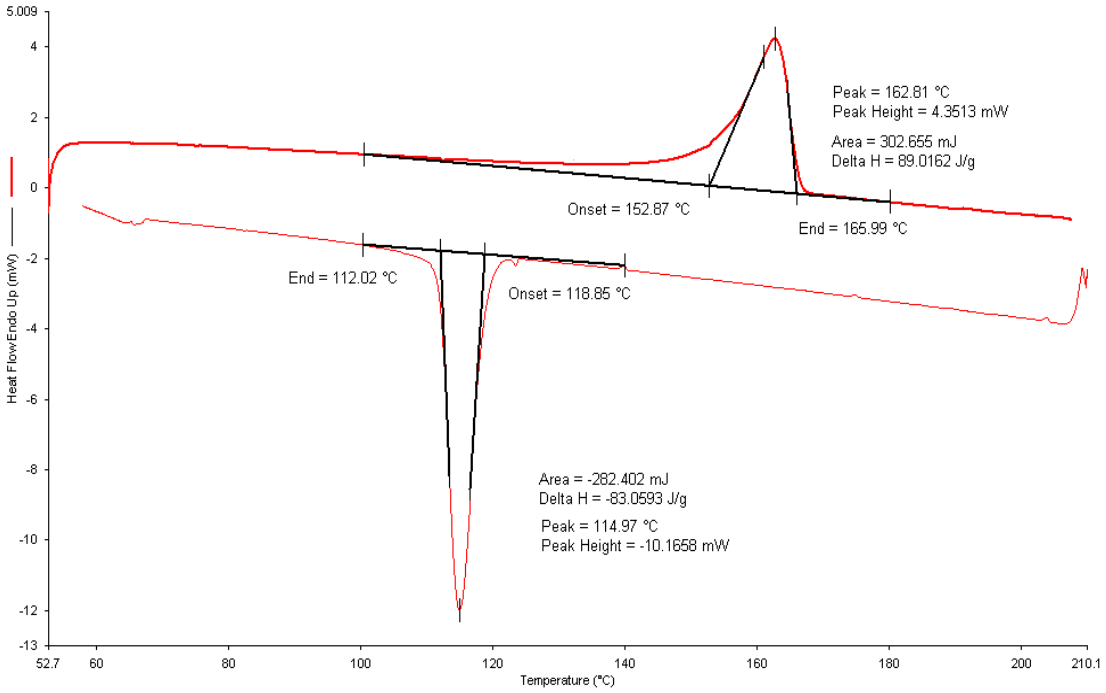
ภาพ ข-22 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีน
ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



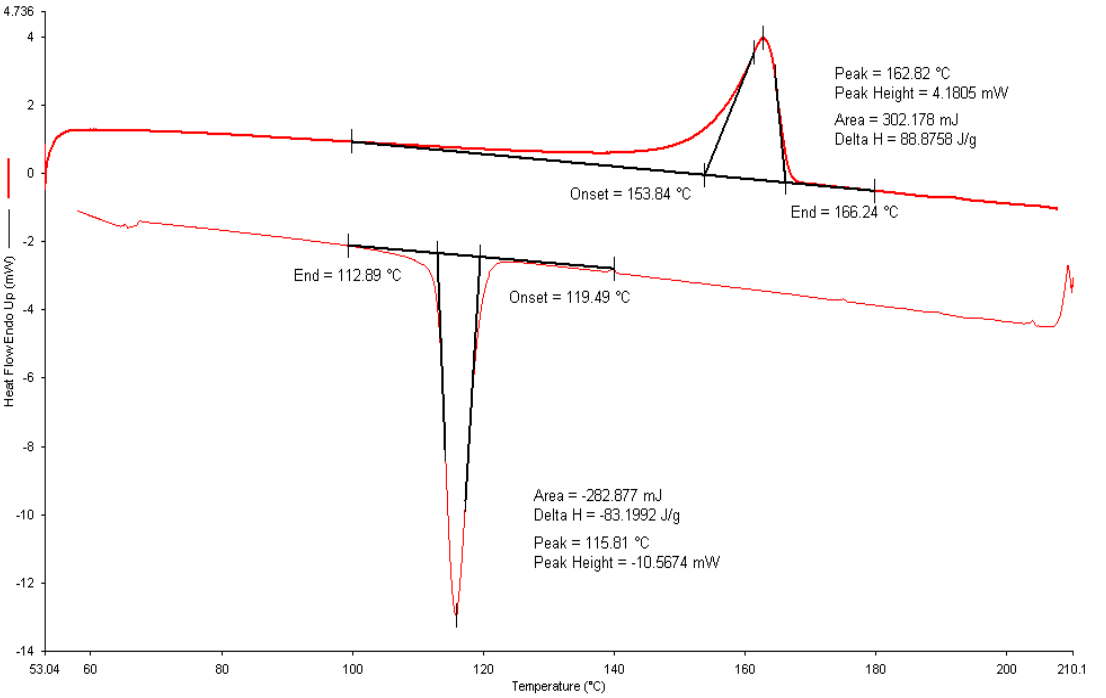
ภาพ ข-23 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



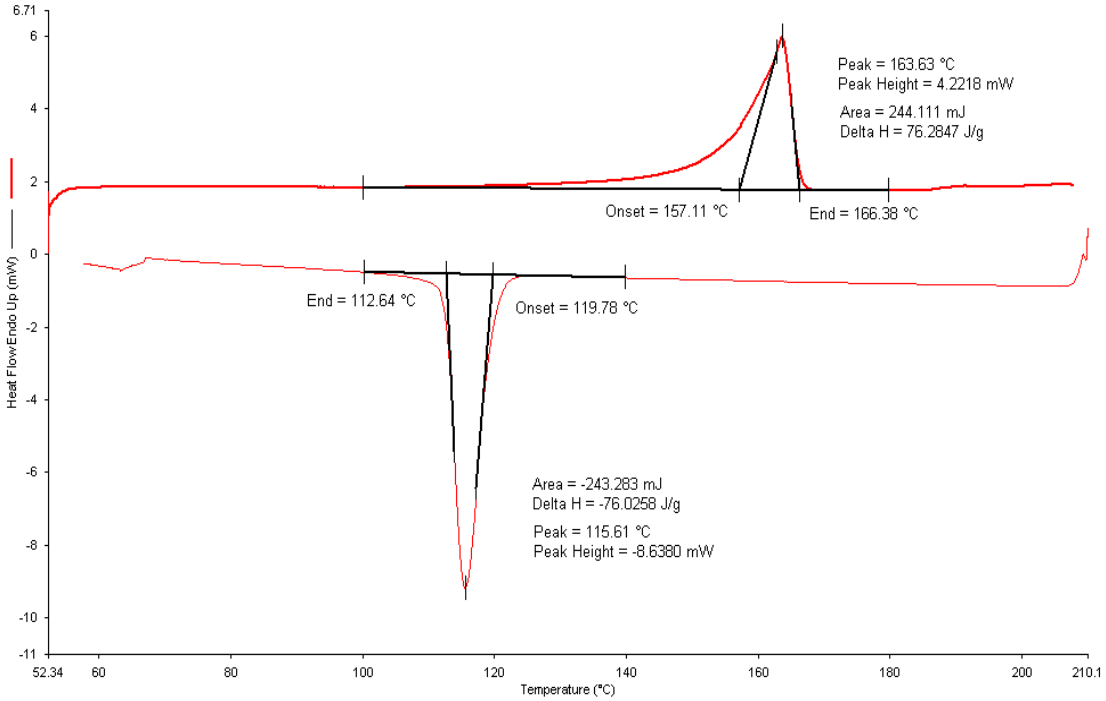
ภาพ ข-24 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



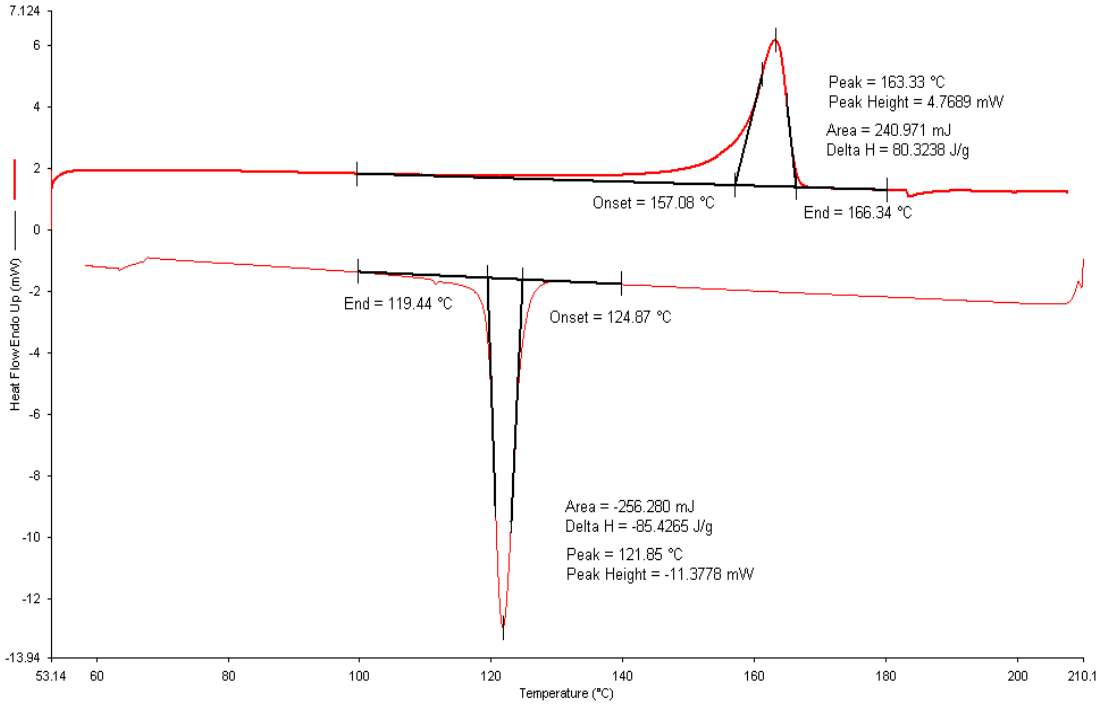
ภาพ ข-25 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



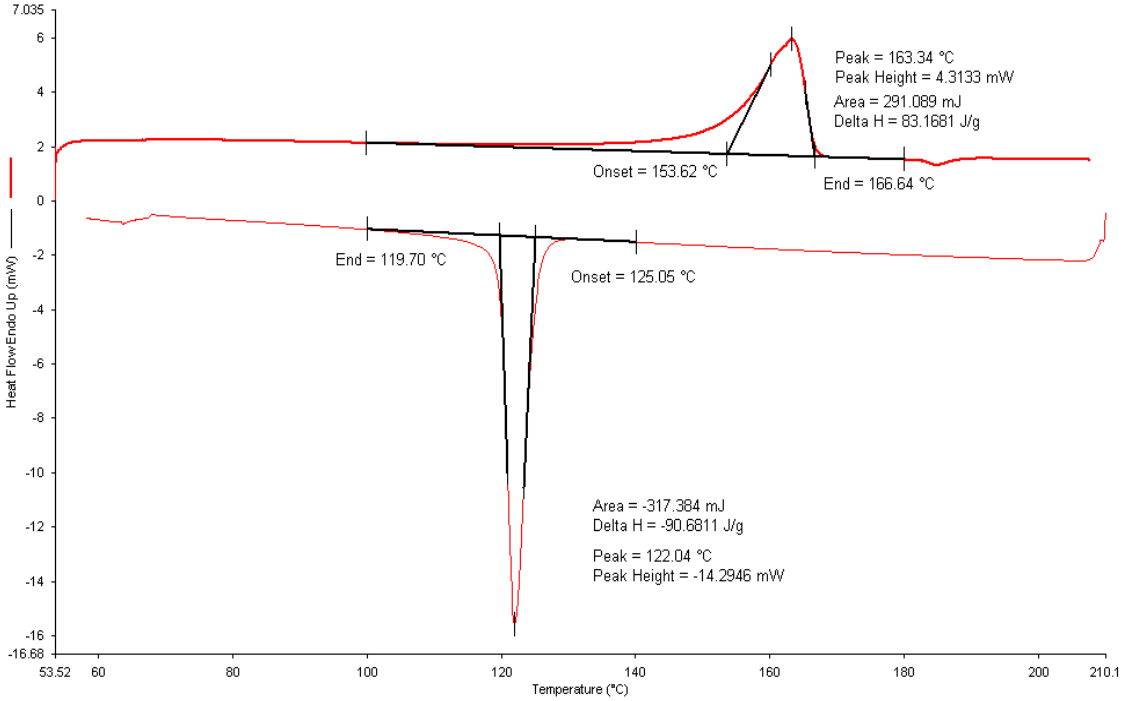
ภาพ ข-26 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



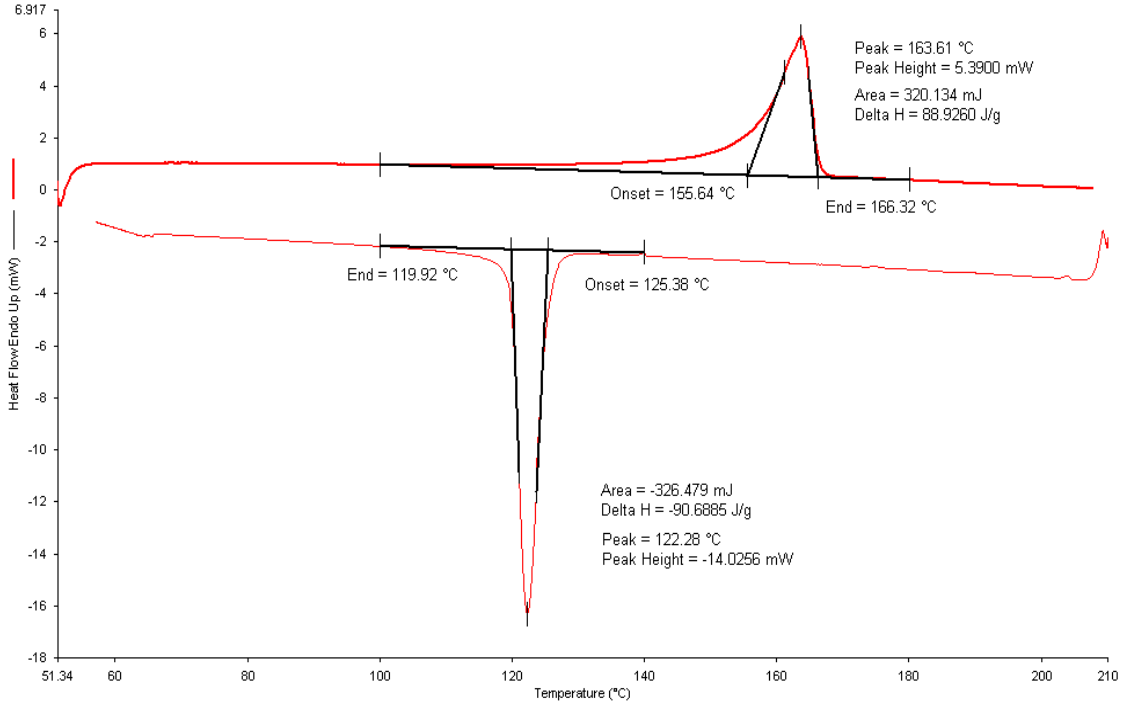
ภาพ ข-27 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



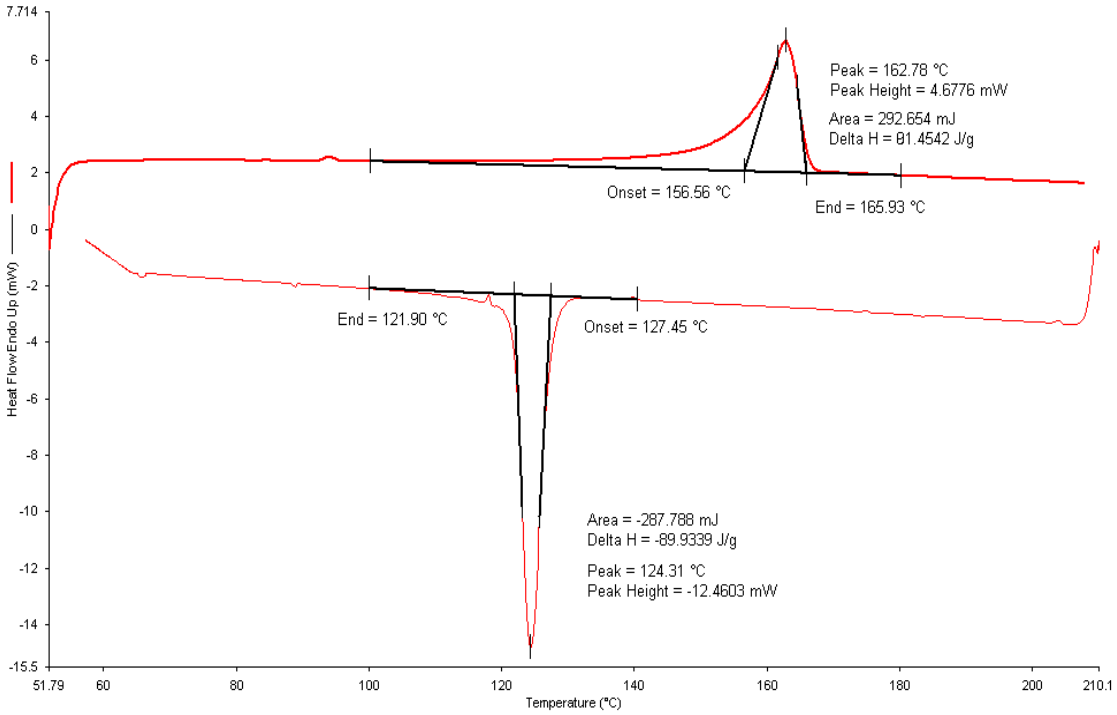
ภาพ ข-28 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



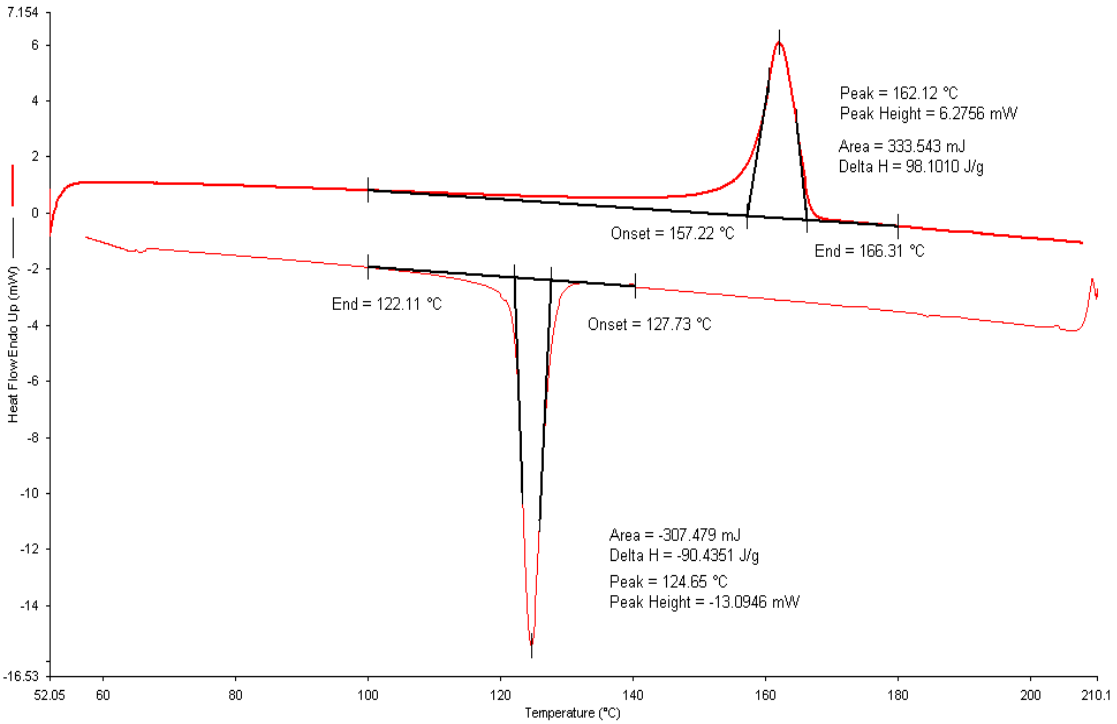
ภาพ ข-29 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



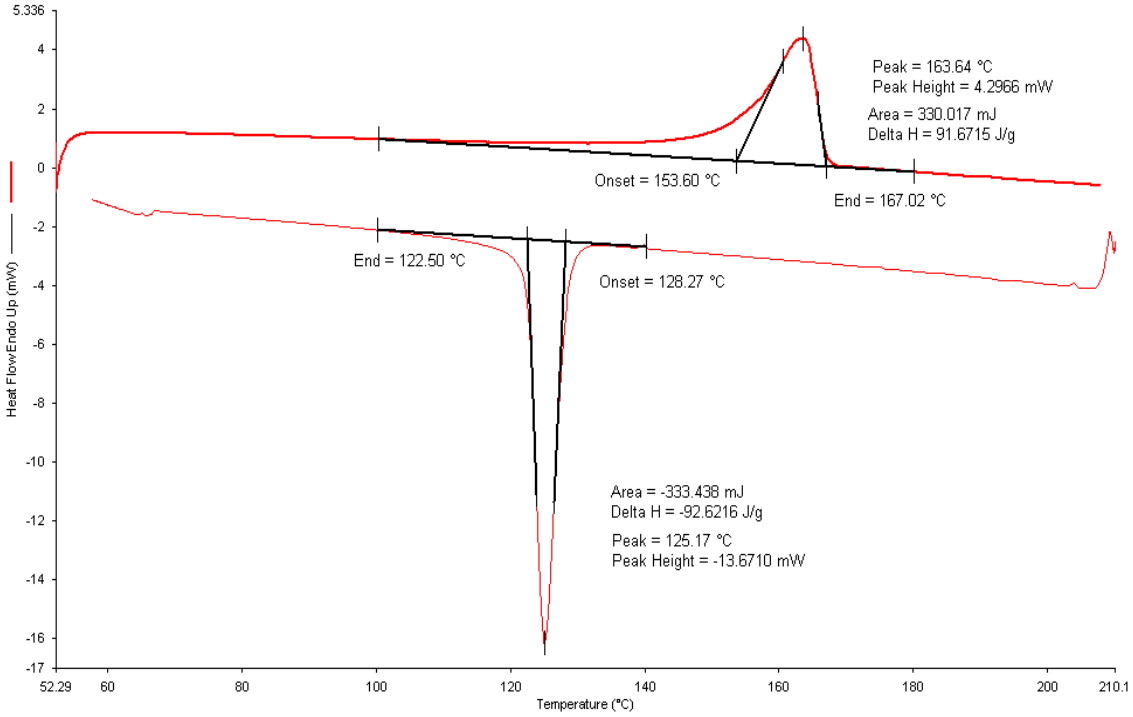
ภาพ ข-30 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



ภาพ ข-31 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.01% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

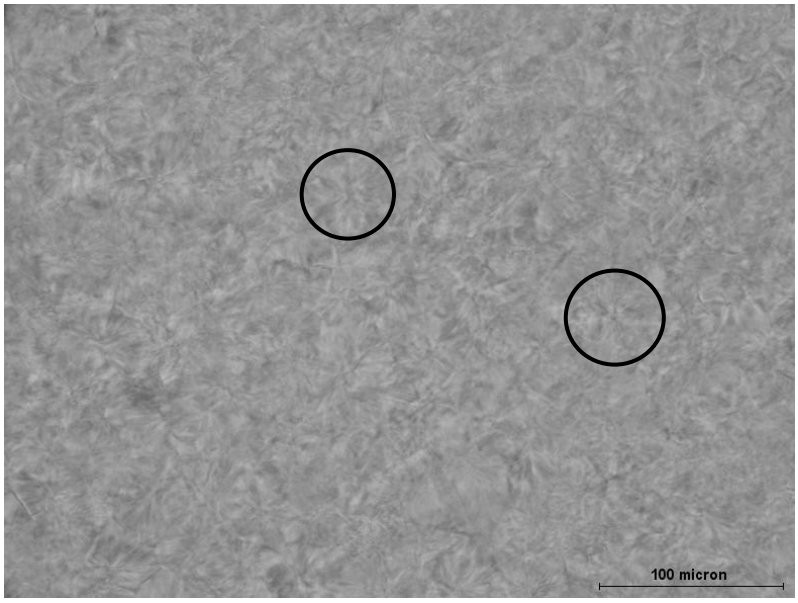


ภาพ ข-32 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.015% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

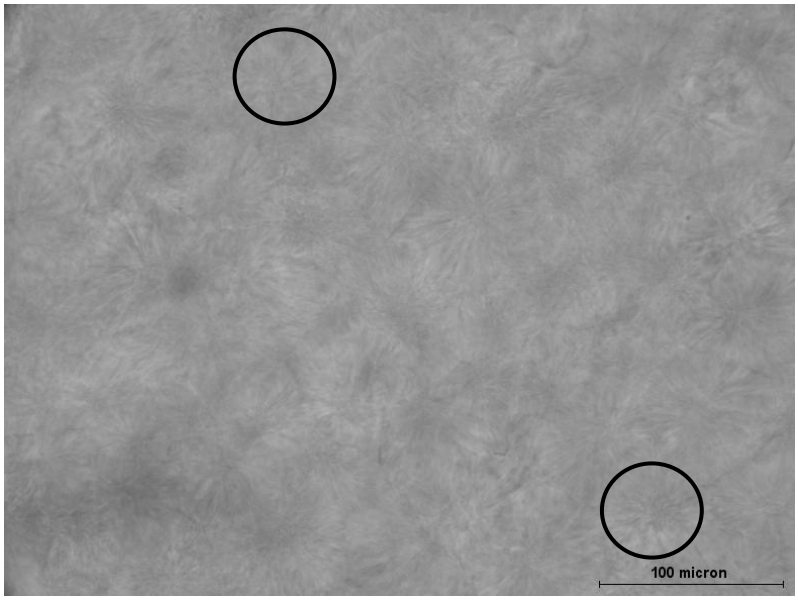


ภาพ ข-33 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู 0.02% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นภาพแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

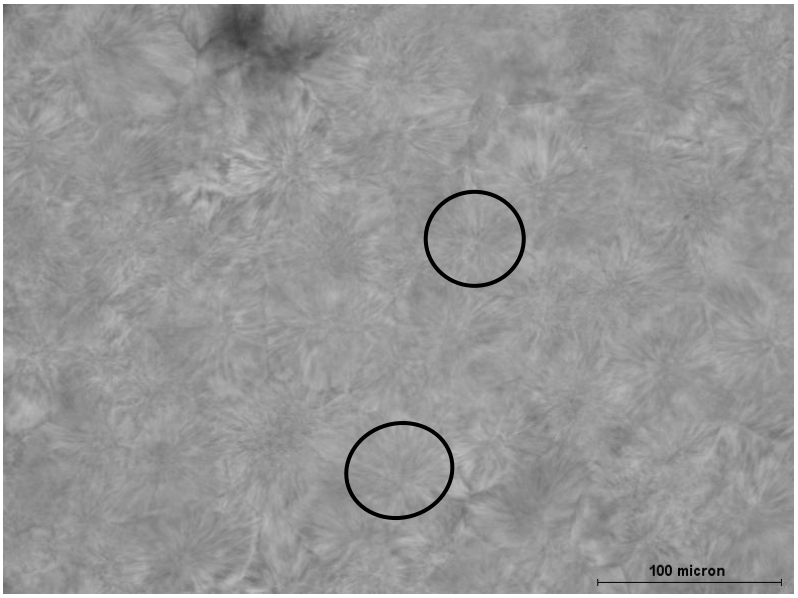
ภาคผนวก ค
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



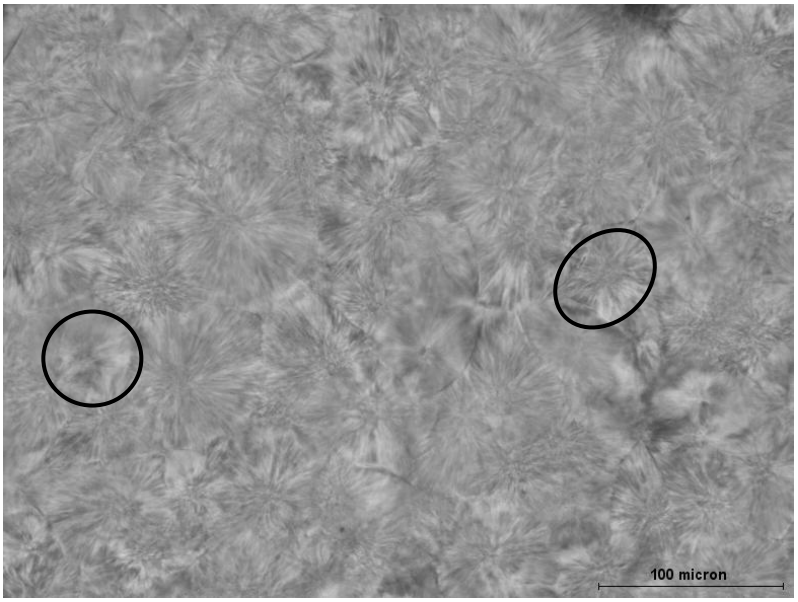
ภาพ ค-1 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



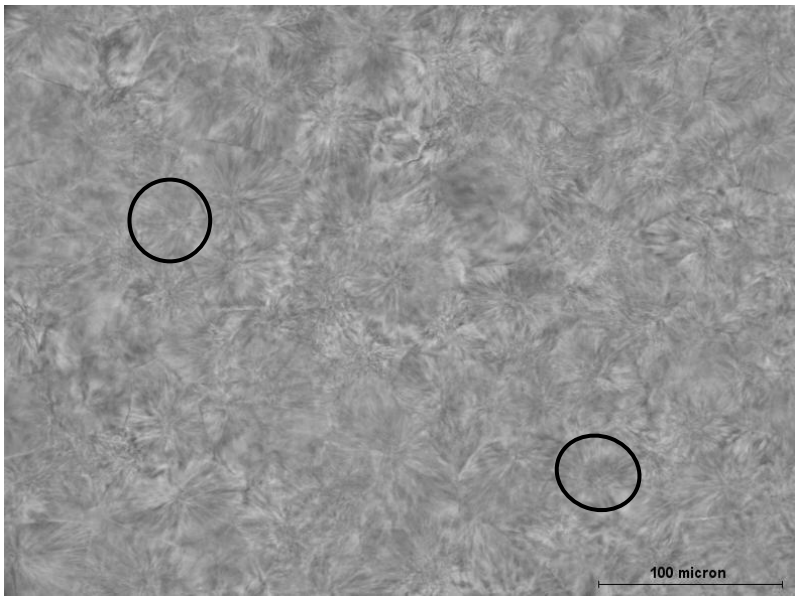
ภาพ ค-2 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



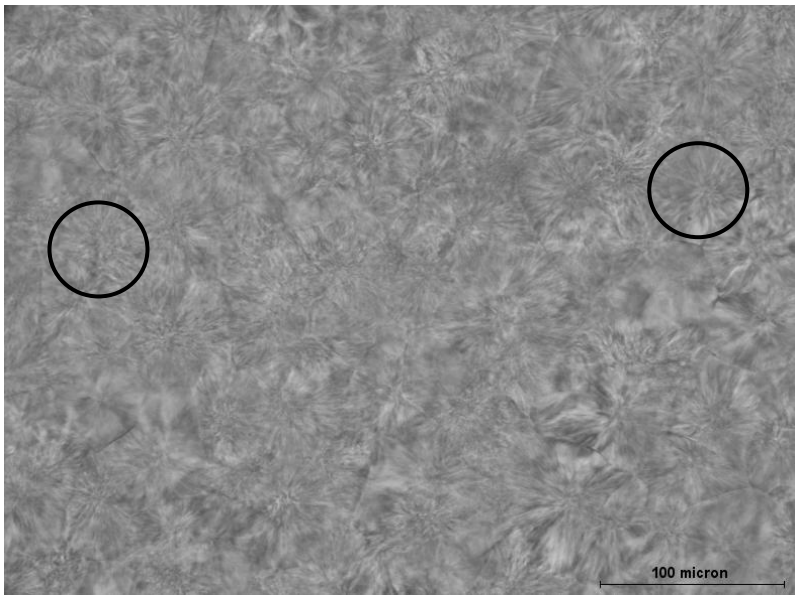
ภาพ ค-3 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



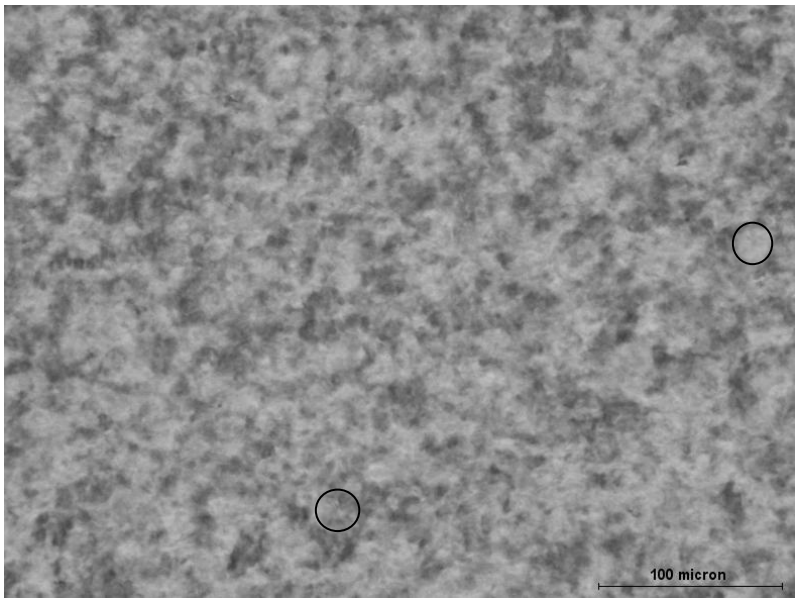
ภาพ ค-4 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



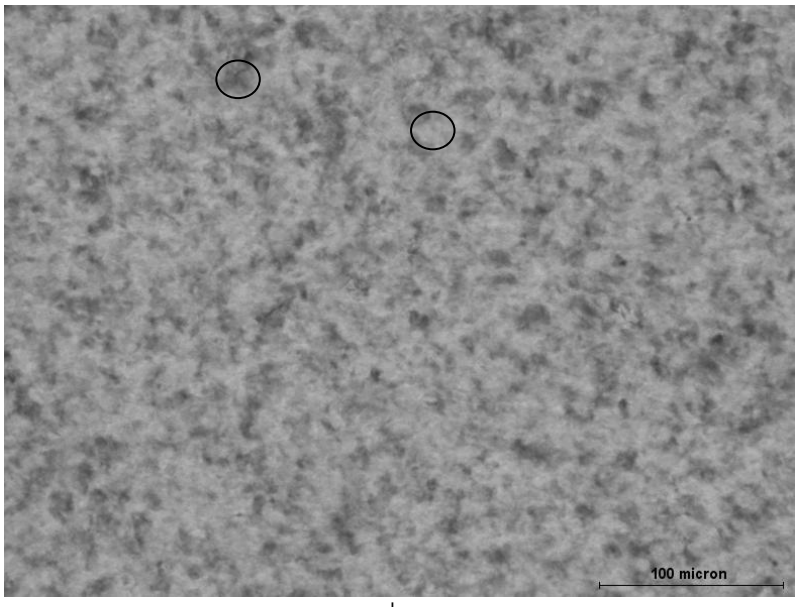
ภาพ ค-5 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



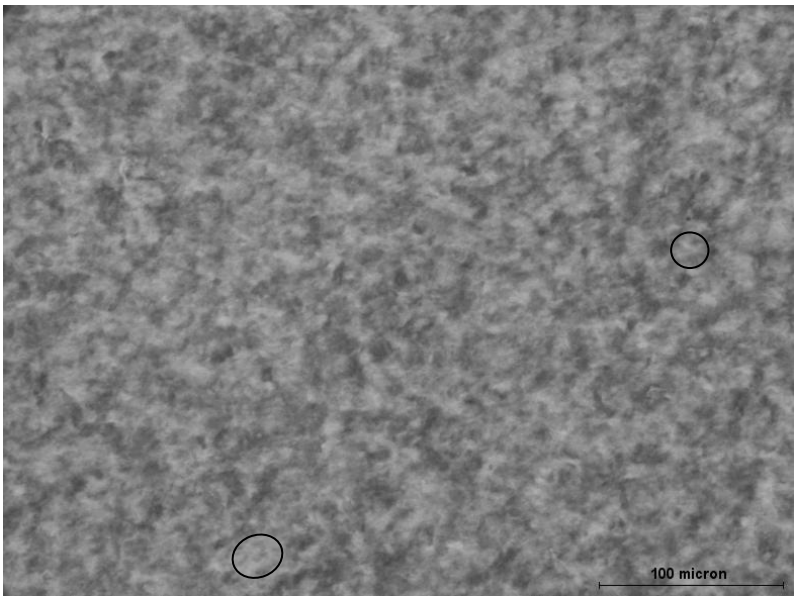
ภาพ ค-6 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.0001% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



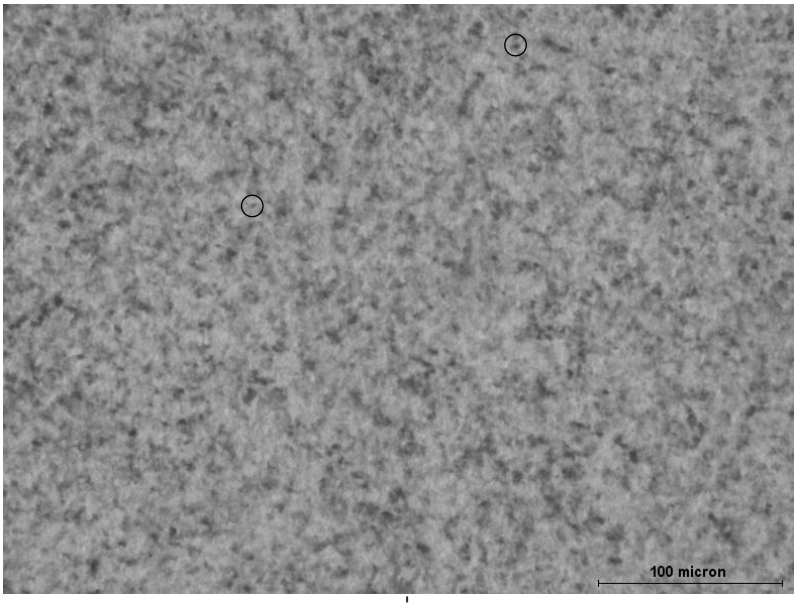
ภาพ ค-7 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.0005% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



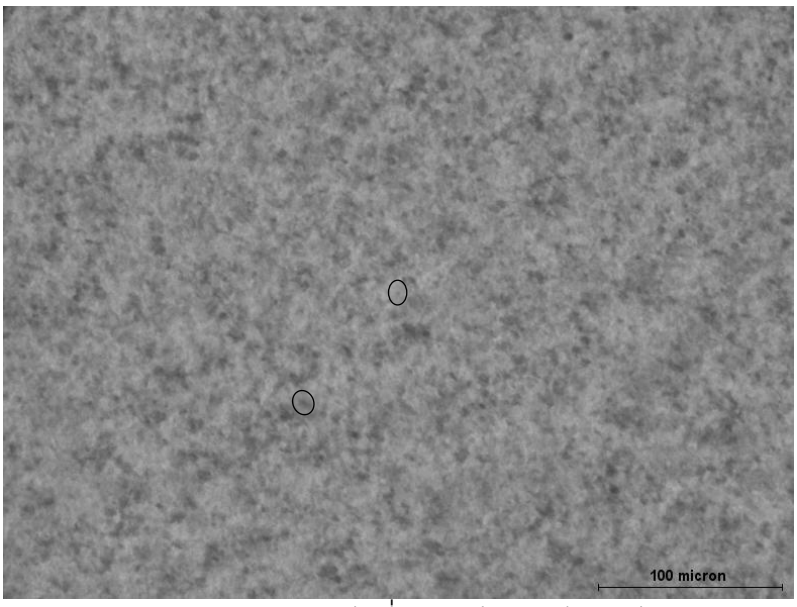
ภาพ ค-8 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.001% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



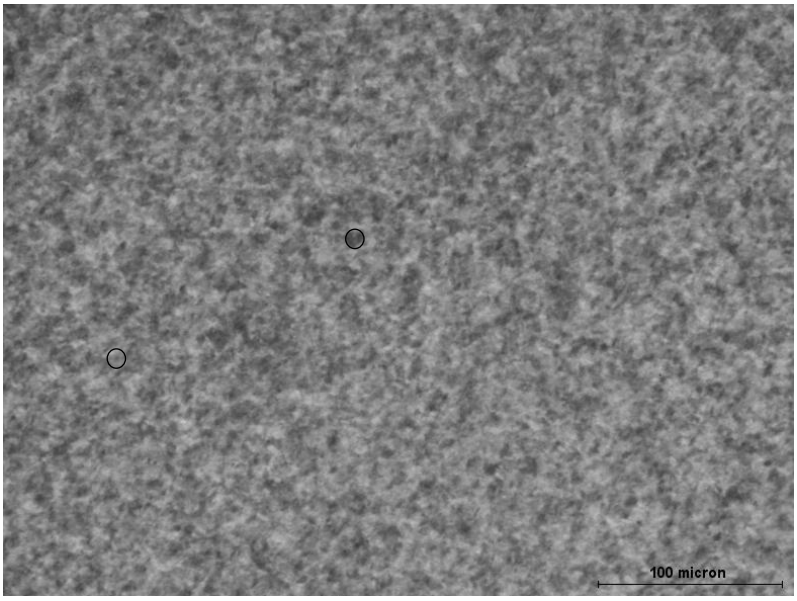
ภาพ ค-9 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.002% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



ภาพ ค-10 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.01% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



ภาพ ค-11 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.015% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



ภาพ ค-12 ภาพถ่ายของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีนบลู 0.02% โดยน้ำหนัก จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

ตารางที่ ค-1 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีน

sample	spherulites size (micrometer)							X	SD
	1	2	3	4	5	6	7		
PP	60.80	59.37	57.72	54.20	57.28	59.72	58.64	58.25	2.15
PP/ULT 0.0001%	52.01	59.71	50.08	60.56	49.10	62.44	47.32	54.46	6.23
PP/ULT 0.0005%	45.21	53.42	45.86	54.16	55.16	48.68	56.20	51.24	4.56
PP/ULT 0.001%	56.34	54.71	45.11	47.68	46.46	49.51	45.11	49.28	4.56
PP/ULT 0.002%	42.23	39.24	41.81	43.44	41.34	39.52	39.36	40.99	1.62
PP/PHT 0.0001%	55.64	42.34	47.30	44.00	47.70	41.24	41.77	45.72	5.08
PP/PHT 0.0005%	19.24	17.04	16.50	17.77	17.98	18.46	16.50	17.64	1.02
PP/PHT 0.001%	14.61	13.97	15.94	13.20	14.30	13.47	13.20	14.10	0.98
PP/PHT 0.002%	12.47	14.03	13.92	14.86	11.82	14.02	12.12	13.32	1.14
PP/PHT 0.01%	7.97	8.27	8.52	9.21	8.60	8.66	7.97	8.46	0.42
PP/PHT 0.015%	8.04	8.24	10.18	8.87	8.12	7.97	8.03	8.49	0.84
PP/PHT 0.02%	6.04	6.74	7.20	7.21	7.42	7.42	7.70	7.11	0.53

ภาคผนวก ง
การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง

ตารางที่ ง-1 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดขาดของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีน

	Tensile strength at break (MPa)						
sample	1	2	3	4	5	X	SD
PP	42.7	43.2	35.0	41.9	44.3	41.4	3.68
PP/ULT 0.0001%	45.6	49.3	47.5	45.7	45.8	46.8	1.60
PP/ULT 0.0005%	44.3	57.8	55.3	56.5	48.7	52.5	5.75
PP/ULT 0.001%	53.5	50.0	51.6	51.3	49.9	51.3	1.45
PP/ULT 0.002%	50.6	44.4	41.3	50.9	49.9	47.4	4.34
PP/PHT 0.0001%	44.1	47.1	56.8	54.3	44.3	49.3	5.87
PP/PHT 0.0005%	42.9	59.9	41.8	54.7	52.4	50.4	7.78
PP/PHT 0.001%	62.0	60.5	46.1	59.4	59.7	57.5	6.48
PP/PHT 0.002%	64.5	57.5	56.8	57.8	66.4	60.6	4.50
PP/PHT 0.01%	50.9	66.4	63.7	69.1	50.9	60.2	8.70
PP/PHT 0.015%	67.3	62.2	60.0	64.1	59.2	62.6	3.27
PP/PHT 0.02%	69.2	51.9	51.6	70.9	69.7	62.7	10.00

ตารางที่ ง-2 ค่าความต้านแรงดึง ณ จุดคราก ของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟทาโลไซยานีน

sample	Tensile strength at yield (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	31.4	29.8	30.0	31.4	29.6	30.4	0.90
PP/ULT 0.0001%	29.0	29.4	28.5	36.1	29.0	30.5	3.15
PP/ULT 0.0005%	39.9	34.9	34.4	34.7	35.7	35.9	2.28
PP/ULT 0.001%	34.7	33.0	37.2	35.4	34.4	34.9	1.52
PP/ULT 0.002%	31.8	30.9	32.9	32.0	27.4	31.0	2.15
PP/PHT 0.0001%	26.6	34.8	35.7	35.0	33.7	33.2	3.75
PP/PHT 0.0005%	36.5	43.5	35.7	33.7	34.4	36.7	3.91
PP/PHT 0.001%	37.8	37.8	37.5	37.3	46.7	39.4	4.08
PP/PHT 0.002%	49.3	45.9	35.1	35.9	48.8	43.0	6.96
PP/PHT 0.01%	45.0	41.6	45.6	39.7	42.6	42.9	2.44
PP/PHT 0.015%	43.2	36.7	36.8	46.5	51.8	43.0	6.48
PP/PHT 0.02%	42.4	40.1	44.2	43.9	46.3	43.4	2.27

ภาคผนวก จ
การวัดอัตราการหลอมไหล

ตารางที่ จ-1 อัตราการหลอมไหลของเม็ดพอลิโพรพิลีน เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

sample	Melt flow rate (g/10 min)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	2.88	0.00
PP/ULT 0.0001%	0.31	0.31	0.32	0.33	0.31	3.16	0.01
PP/ULT 0.0005%	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	3.16	0.01
PP/ULT 0.001%	0.38	0.37	0.38	0.39	0.39	3.82	0.01
PP/ULT 0.002%	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33	3.34	0.01
PP/PHT 0.0001%	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	3.30	0.00
PP/PHT 0.0005%	0.28	0.30	0.30	0.29	0.30	2.94	0.01
PP/PHT 0.001%	0.33	0.35	0.38	0.34	0.38	3.56	0.02
PP/PHT 0.002%	0.31	0.32	0.31	0.32	0.33	3.18	0.01
PP/PHT 0.01%	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	3.08	0.00
PP/PHT 0.015%	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32	3.18	0.00
PP/PHT 0.02%	0.30	0.29	0.31	0.29	0.31	3.00	0.01

ตารางที่ จ-2 อัตราการหลอมไหลของแผ่นพอลิโพรพิลีน แผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีอัลตรามารีนบลู และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ใส่สารสีฟแทโลไซยานีนบลู

sample	Melt flow rate (g/10 min)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	0.41	0.39	0.37	0.40	0.39	3.92	0.01
PP/ULT 0.0001%	0.58	0.52	0.51	0.61	0.50	5.44	0.05
PP/ULT 0.0005%	0.58	0.62	0.53	0.57	0.53	5.66	0.04
PP/ULT 0.001%	0.65	0.46	0.47	0.46	0.52	5.12	0.08
PP/ULT 0.002%	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	4.30	0.00
PP/PHT 0.0001%	0.52	0.51	0.53	0.52	0.51	5.18	0.01
PP/PHT 0.0005%	0.40	0.41	0.40	0.35	0.36	3.84	0.03
PP/PHT 0.001%	0.50	0.48	0.53	0.49	0.52	5.04	0.02
PP/PHT 0.002%	0.41	0.45	0.44	0.43	0.42	4.30	0.02
PP/PHT 0.01%	0.36	0.36	0.35	0.36	0.36	3.58	0.00
PP/PHT 0.015%	0.39	0.39	0.41	0.42	0.41	4.04	0.01
PP/PHT 0.02%	0.46	0.45	0.48	0.44	0.45	4.56	0.02

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกชกร กีรติจิรัฐิติกาล เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคปลายของปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2554