

การปรับปรุงความต้านทานต่อการขีดข่วนของชั้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิ
ลีน



นางสาวพิชามณูชู่ องค์กรีตระกูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVING SCRATCH RESISTANCE OF AUTOMOTIVE INTERIOR PART PRODUCED FROM
POLYPROPYLENE COMPOUND

Miss Pichamon Ongsritrakul



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงความต้านทานต่อการขีดข่วนของชิ้นส่วน ภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีน
โดย	นางสาวพิชามญชุ์ องค์กรีตระกูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวตล เพ็ชรวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ โทณานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวตล เพ็ชรวัฒนา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์ตรี)

พิชามณูชู่ องค์ศรีตระกูล : การปรับปรุงความต้านทานต่อการขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีน (IMPROVING SCRATCH RESISTANCE OF AUTOMOTIVE INTERIOR PART PRODUCED FROM POLYPROPYLENE COMPOUND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. นวตล เพ็ชรวัฒนา, 158 หน้า.

พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ทดแทนชิ้นส่วนจากโลหะเพื่อลดน้ำหนักยานยนต์ แต่ PP ยังมีปัญหาเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงมุ่งปรับปรุงความต้านทานการขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์ PP ด้วย 2 แนวทาง แนวทางแรกโดยใช้สารก่อผลึกแอลฟา (α -NA) และสารก่อผลึกเบตา (β -NA) ปริมาณร้อยละ 0.1-0.4 โดยน้ำหนัก พบว่า PP/ α -NA มีความต้านทานรอยขีดข่วนสูงกว่า PP/ β -NA และคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 47-69 และ 8-46 ตามลำดับ โดยสามารถต้านทานรอยขีดข่วนดีที่สุดเมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก แนวทางที่สองโดยใช้สารตัวเติม Talc และ Wollastonite ปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก พบว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมมีความต้านทานรอยขีดข่วนกลับต่ำกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งทั้งหมด โดยการใส่ Wollastonite มีความต้านทานรอยขีดข่วนน้อยที่สุด จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดผลึกพบว่า PP/ α -NA มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ α -NA โดยมีค่าสูงสุดร้อยละ 42 เมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักและเป็นผลึกแบบ α ทั้งหมด PP/ β -NA มีระดับความเป็นผลึกใกล้เคียงกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง คือรวร้อยละ 36 ส่วน PP/Talc และ PP/Wollastonite มีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 27-32 และ 22-27 ตามลำดับ จากสมบัติความแข็งพบว่า PP/ α -NA 0.3wt% มีความแข็งสูงสุดราว 74 ซึ่งมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 12.46 ในขณะที่ PP/ β -NA มีความแข็งมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง เพียงร้อยละ 1.5 ส่วน PP/Talc และ PP/Wollastonite มีความแข็งน้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 3-11 และ 22 ตามลำดับ การศึกษาสมบัติด้านแรงดึงและแรงดัดโค้ง พบว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมมีมอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570554721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYPROPYLENE, SCRATCH RESISTANCE, NUCLEATING AGENT, 158 FILLER

PICHAMON ONGSRITRAKUL: IMPROVING SCRATCH RESISTANCE OF AUTOMOTIVE INTERIOR PART PRODUCED FROM POLYPROPYLENE COMPOUND. ADVISOR: SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH, CO-ADVISOR: NAWADON PETCHWATTANA, pp.

PP is often the material of choice due to its relatively low cost and light weight. It has been introduced for automotive application to replace metals to save weight. However, PP still suffers the problem of susceptibility to scratch and mar damages. The present research aims to promote scratch resistance of automotive interiors made from PP compound by two approaches namely by utilizing nucleating agent and by using the fillers. Specifically an investigation on utilize alpha and beta nucleating agents (α -NA and β -NA) from 0.1 to 0.4 wt% and the use of talc and wollastonite as fillers at concentration ranging from 15 to 25 wt%. The α -NA compounded PP exhibited higher scratches resistance than that of unfilled PP compound around 15-36 % and they were also significantly higher than those found in PP/ β -NA. The addition of only 0.3 wt% α -NA was the best in terms of endurance against scratch. The PP/filler compounds all exhibited lower scratches resistance than that of the unfilled PP compound. However, a minimum scratch resistance was found in PP/wollastonite. DSC analysis indicated that the degree of crystallinity of PP/ α -NA was found to increase with α -NA content. A maximum degree of crystallinity at nearly 42% in the PP/ α -NA with only 0.3 wt% α -NA as compared with nearly 27-32% in the PP/talc and 22-27% in the PP/wollastonite. The degree of crystallinity at around 36% in the PP/ β -NA remained close to that of the unfilled PP compound, all crystals exhibited monoclinic structure of the alpha phase. A maximum hardness of PP compound with 0.3 wt% α -NA was higher than that of the unfilled PP compound around 12.46 % while PP/ β -NA was higher than only 1.5 %. However, the hardness of the PP/talc and the PP/wollastonite were lower than that of the unfilled PP compound around 3-11 % and 22 %, respectively. The tensile and flexural tests verified that the tensile modulus and flexural modulus of PP/filler compound increased significantly more than PP/nucleating agent compound

Department: Chemical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช เป็นอย่างสูงสำหรับความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆในการทำวิจัย รวมถึงการตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.นวดล เพ็ชรวัฒนา จากคณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสำหรับคำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆในการทำวิจัย และความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ผศ.ดร.ณัฐพร โทณานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.วิจิตรา จงวิศาล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์ตรี จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับคำแนะนำต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และทุนอุดหนุน รวมถึงความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือจาก บริษัท แกรนด์ สยาม คอมพอสิต จำกัด ขอขอบคุณ คุณวิญญู ตัณฑะพานิชกุล และคุณณัฐ ลุมพิกานนท์ สำหรับคำปรึกษา ข้อเสนอแนะดีๆ และความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำงานวิจัย ณ บจ.แกรนด์ สยาม คอมพอสิต ตลอดจนพี่ๆในบริษัททุกคนสำหรับการดูแลเอาใจใส่ตลอดเวลาที่ทำวิจัยที่โรงงาน

นอกจากนี้ ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในห้องวิจัยพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ กำลังใจ และคำแนะนำในระหว่างการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบทุกคนในครอบครัว สำหรับการสนับสนุน ดูแลเอาใจใส่ และให้ความสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษาปริญญาโทมาบัดนี้

ทั้งนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ปัญหาและความเป็นมา	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	3
1.3. ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1. วัตถุดิบ	6
2.1.1. พอลิโพรพิลีน.....	6
2.1.2. สารก่อผลึก	10
2.1.3. ฟิล์ม.....	11
2.1.3. วอลลาสโตไนท์	12
2.2. กระบวนการผสมและขึ้นรูป.....	13
2.2.1. การอัดรีด.....	13
2.2.2. การฉีดขึ้นรูป.....	15
2.3. การทดสอบสมบัติของพอลิโพรพิลีน	16
2.3.1. การทดสอบความทนแรงดึง	16

2.3.2. การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	17
2.3.3. การทดสอบความทนแรงกระแทก.....	18
2.3.4. การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริ มิเตอร์.....	18
2.3.5. การทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน.....	20
2.3.6. การทดสอบความแข็ง.....	21
2.3.7. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	21
2.3.8. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	22
2.3.9. การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	22
2.3.10. ศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดผลึกด้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแทนความร้อน.....	23
2.3.11. การศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนด้วยเครื่องทดสอบรอยขีดข่วน.....	23
2.3.12. การวัดความหยาบผิว.....	24
2.3.13 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ.....	25
2.3.14 การทดสอบอัตราการหลอมไหล.....	25
บทที่ 3 วารสารปริทัศน์.....	26
3.1 การใช้สารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน.....	26
3.2 การใช้สารก่อผลึกในพอลิโพรพิลีน.....	31
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
4.1 วัตถุประสงค์.....	35
4.1.1 พอลิโพรพิลีน.....	35
4.1.2 สารก่อผลึก.....	36
4.1.2.1 สารก่อผลึกแอลฟา.....	36
4.1.2.2 สารก่อผลึกเบตา.....	36

4.1.3 สารตัวเติมทัลค์.....	36
4.1.4 สารตัวเติมวอลลาสโตไนท์	37
4.2 การผสมและการเตรียมชิ้นงาน	38
4.2.1 การผสมและเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีน	38
4.2.2 การฉีดขึ้นรูป	40
4.2.3 การอัดขึ้นรูป	41
4.3 วิธีการทดสอบสมบัติของคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีน	42
4.3.1. สมบัติเชิงความร้อน	42
4.3.1.1. อุณหภูมิแก้วผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว.....	42
4.3.1.2. อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน	43
4.3.2. การเกิดผลึก	44
4.3.2.1. การทดสอบระดับความเป็นผลึก	44
4.3.2.2. การตรวจสอบโครงสร้างผลึก.....	44
4.3.2.3. การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึก	45
4.3.3. การทดสอบสมบัติเชิงกล	46
4.3.3.1. สมบัติด้านความทนแรงดึง	46
4.3.3.2. สมบัติด้านการต้านทานการตัดโค้ง.....	47
4.3.3.3. สมบัติด้านความทนแรงกระแทก	48
4.3.4. สมบัติเชิงกายภาพ.....	48
4.3.4.1. ความแข็ง	48
4.3.4.2. อัตราการหลอมไหล.....	49
4.3.4.3. ความถ่วงจำเพาะ	50
4.3.5. สันฐานวิทยา	50

4.3.5.1 โครงสร้างระดับจุลภาค	50
4.3.6. การทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วน.....	51
4.3.6.1 การวัดความต้านทานรอยขีดข่วน.....	51
4.3.6.2 ลักษณะรอยขีดข่วนในระดับจุลภาค.....	52
บทที่ 5 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย	53
5.1. สมบัติด้านการเกิดผลึก	53
5.1.1. ระดับความเป็นผลึก	53
5.1.2. โครงสร้างผลึก.....	56
5.1.3. พฤติกรรมการเกิดผลึก	58
5.2. สมบัติเชิงความร้อน	68
5.2.1. อุณหภูมิการหลอมเหลว	68
5.2.2. อุณหภูมิก่อผลึก.....	71
5.2.3. อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อน	73
5.3. สมบัติเชิงกล	75
5.3.1. สมบัติภายใต้แรงดึง.....	75
5.3.2. สมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง.....	79
5.3.3. สมบัติภายใต้แรงกระแทก	83
5.4. สมบัติเชิงกายภาพ	85
5.4.1. ความแข็ง	85
5.4.2. อัตราการหลอมไหล.....	87
5.4.3. ความถ่วงจำเพาะ	89
5.5. สัณฐานวิทยา.....	91
5.5.1. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค.....	91

5.6. ความต้านทานการขีดข่วน	96
5.6.1. ความถี่รอยขีดข่วน	97
5.6.2. แนวเส้นรอยขีดข่วน.....	100
5.6.3. ความหยาบรอยขีดข่วน	103
5.6.4. ความกว้างรอยขีดข่วน.....	103
5.6.5. ความแข็งรอยขีดข่วน.....	108
5.6.6. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกและความแข็งรอยขีดข่วน กับ ความ แข็งและความแข็งรอยขีดข่วน	112
5.6.7. ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วน	115
5.6.8. ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope	118
5.6.9. ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ.....	122
5.6.10 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน.....	126
5.7 การวิเคราะห์ต้นทุน	130
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	133
6.1. สรุปผลการวิจัย.....	133
6.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อ	134
รายการอ้างอิง	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	158

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 สมบัติพื้นฐานของ PP เกรด P740J จากบริษัท SCG Chemicals	36
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของ Talc	37
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของ Wollastonite	38
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนในการผสมคอมพาวนด์ PP กับ สารเติมแต่ง	39
ตารางที่ 5.1 ผล DSC scan ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	69
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความถี่รอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆกับคอมพาวนด์ PP ที่.....	99
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบแนวเส้นรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง.....	102
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความหนาของรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง.....	105
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP	107
ตารางที่ 5.6 ความแข็งรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีด ข่วน 5 10 และ 15 N.....	110
ตารางที่ 5.7 ราคาเม็ดคอมพาวนด์ PP สารตัวเติม และสารก่อผลึกชนิดต่างๆ.....	130
ตารางที่ 5.8 ราคาของสารเติมแต่งแต่ละชนิดเมื่อเติมในปริมาณต่างๆ.....	130
ตารางที่ 5.9 ราคาเม็ดคอมพาวนด์ PP เมื่อเติมสารเติมแต่งแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ	131
ตารางที่ ก.1 พื้นที่ใต้กราฟและค่าสัดส่วนผลึกเบตา.....	146
ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature) ...	147

ตารางที่ ค.1 สมบัติภายใต้แรงดึงของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	148
ตารางที่ ค.2 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ	149
ตารางที่ ค.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ	150
ตาราง ง.1 สมบัติความแข็งของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	151
ตาราง ง.2 อัตราการหลอมไหลของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	152
ตาราง ง.3 ความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	153
ตาราง จ.1 ความถี่รอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N	154
ตาราง จ.2 แนวสันรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N.....	155
ตาราง จ.3 ความหยาบรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N.....	156
ตาราง จ.4 ความกว้างรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N.....	157

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของ PP.....	6
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงโครงสร้างหมู่ตำแหน่งแทนที่ใน PP	7
รูปที่ 2.3 รูปแบบหน่วยผลึก (Unit cell schematic)	9
รูปที่ 2.4 แบบจำลองลักษณะการเกิดผลึกเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์	11
รูปที่ 2.5 (ก) รูปผลึกแบบโมโนคลินิก (ข) โครงสร้างการจัดเรียงตัวของ Talc	12
รูปที่ 2.6 Talc (x1,000) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบแผ่น	12
รูปที่ 2.7 Wollastonite NYGLOS 4W (x1,000) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Acicular	13
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดรีด (Extruder) [45].....	14
รูปที่ 2.9 ลักษณะการหมุนของเกลียวหนอนคู่.....	15
รูปที่ 2.10 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	16
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด	17
รูปที่ 2.12 การทดสอบสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งโดยวิธีการใส่แรงกระทำ 3 จุด.....	17
รูปที่ 2.13 รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy	18
รูปที่ 2.14 ภาพจำลองตัวอย่างเครื่อง DSC [46].....	19
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างกราฟแสดงผลที่ได้จากเครื่อง DSC	20
รูปที่ 2.16 ภาพจำลองตัวอย่างเครื่อง HDT [47]	20
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง hardness แบบ Rockwell.....	21
รูปที่ 2.18 เครื่อง Multi-Finger Scratch/Mar Tester [50]	24
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของเครื่อง Profilometer [51].....	24

รูปที่ 4.1 เม็ดพลาสติก PP ที่ใช้ในงานวิจัย	35
รูปที่ 4.2 Talc.....	37
รูปที่ 4.3 Wollastonite	38
รูปที่ 4.4 เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler).....	39
รูปที่ 4.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder).....	40
รูปที่ 4.6 เม็ดคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนจากกระบวนการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	40
รูปที่ 4.7 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) (FANUC ROBOSHOT S-2000i100B)	41
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วน (ซ้าย) สมบัติด้านความทนแรงดึง (กลาง) ความต้านทานแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทก (ขวา)	41
รูปที่ 4.9 เครื่องกดอัด (Hydraulic Press, LabTech/Scientific).....	42
รูปที่ 4.10 เครื่อง Differential scanning calorimeter (PerkinElmer DSC 4000).....	43
รูปที่ 4.11 เครื่องวัดอุณหภูมิโก่งตัวภายใต้แรงดัดโค้ง	43
รูปที่ 4.12 เครื่อง X-ray Diffractometer, XRD.....	45
รูปที่ 4.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแท่นร้อน (Hot Stage Optical Microscope)	46
รูปที่ 4.14 เครื่องทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Instron รุ่น 5566).....	47
รูปที่ 4.15 เครื่องทดสอบสมบัติด้านทานการดัดโค้ง (Instron รุ่น 5566)	47
รูปที่ 4.16 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก	48
รูปที่ 4.17 เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell (Wilson Rockwell tester series 2000)	49
รูปที่ 4.18 เครื่อง Dynisco melt flow index tester	49
รูปที่ 4.19 เครื่องทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ	50
รูปที่ 4.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-6400).....	50
รูปที่ 4.21 เครื่อง Multi-Finger Scratch/Mar Tester Model 710	51
รูปที่ 4.22 เครื่องวัดความหยาบพื้นผิว (Profilometer, Taylor Hobson, Talyscan 150)	51
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างโปรไฟล์ (profile) ของผิวรอยขีดข่วน	52

รูปที่ 4.24 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (KEYENCE/VHX-600).....	52
รูปที่ 5.1 ระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	55
รูปที่ 5.2 XRD pattern ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	57
รูปที่ 5.3 สัดส่วนของผลึก β จากการคำนวณ (Fraction of β crystalline phase, K Value)	57
รูปที่ 5.4 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึก.....	59
รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ α -NA 0.1wt%.....	60
รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ α -NA 0.2wt%.....	61
รูปที่ 5.7 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ α -NA 0.3wt%.....	62
รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ α -NA 0.4wt%.....	63
รูปที่ 5.9 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ β -NA 0.1wt%.....	64
รูปที่ 5.10 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ β -NA 0.2 wt%.....	65
รูปที่ 5.11 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ β -NA 0.3 wt%.....	66
รูปที่ 5.12 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/ β -NA 0.4 wt%.....	67
รูปที่ 5.13 DSC scans แสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	70
รูปที่ 5.14 DSC scans แสดงอุณหภูมิการก่อผลึกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	72
รูปที่ 5.15 อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	74
รูปที่ 5.16 มอดูลัสแรงดึงของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	76
รูปที่ 5.17 แรงดึง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	78
รูปที่ 5.18 มอดูลัสดัดโค้งคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	80
รูปที่ 5.19 ความต้านทานแรงดัดโค้งคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	82
รูปที่ 5.20 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	84
รูปที่ 5.21 ความแข็งรีออคเวลล์ ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	86
รูปที่ 5.22 อัตราการหลอมไหลของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	88

รูปที่ 5.23 ความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	90
รูปที่ 5.24 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง.....	92
รูปที่ 5.25 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง.....	93
รูปที่ 5.26 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง	94
รูปที่ 5.27 พื้นผิวรอยแตกของ ก) PP/ α -NA 0.1 wt%	95
รูปที่ 5.28 พื้นผิวรอยแตกของ ก) PP/ β -NA 0.1 wt%	96
รูปที่ 5.29 เส้นรูปทรง (profile) ของผิวรอยขีดข่วน.....	97
รูปที่ 5.30 ความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ	98
รูปที่ 5.31 แนวสันรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	101
รูปที่ 5.32 ความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	104
รูปที่ 5.33 ความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	106
รูปที่ 5.34 ความแข็งรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	111
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N ระหว่าง (ก) ระดับความเป็นผลึกและความแข็งรอยขีดข่วน.....	113
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N ระหว่าง (ก) ความต้านทานแรงกระแทกและความแข็งรอยขีดข่วน.....	114
รูปที่ 5.37 ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และPP/สารตัวเติม ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N.....	116
รูปที่ 5.38 ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และPP/สารก่อผลึก ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N.....	117
รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้ แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ	119
รูปที่ 5.40 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้ แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	120

รูปที่ 5.41 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้ เกิดรอยขีดข่วน 15 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ.....	แรงทำให้ 121
รูปที่ 5.42 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน	123
รูปที่ 5.43 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน.....	124
รูปที่ 5.44 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน.....	125
รูปที่ 5.45 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน.....	127
รูปที่ 5.46 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน.....	128
รูปที่ 5.47 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน.....	129
รูปที่ ก.1 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง	142
รูปที่ ก.2 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.1 โดย น้ำหนัก.....	142
รูปที่ ก.3 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.2 โดย น้ำหนัก.....	143
รูปที่ ก.4 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.3 โดย น้ำหนัก.....	143
รูปที่ ก.5 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.4 โดย น้ำหนัก.....	144
รูปที่ ก.6 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.1 โดย น้ำหนัก.....	144
รูปที่ ก.7 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.2 โดย น้ำหนัก.....	145
รูปที่ ก.8 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.3 โดย น้ำหนัก.....	145
รูปที่ ก.9 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.4 โดย น้ำหนัก.....	146



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ปัญหาและความเป็นมา

รอยขีดข่วน (Scratch) เป็นปัญหาหลักของชิ้นงานพลาสติกที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง เช่น รถยนต์ และนวัตกรรมใหม่ๆ เช่น คอมพิวเตอร์และเครื่องมือสื่อสารแบบพกพา งานวิจัยด้านรอยขีดข่วนจึงเป็นหัวข้อที่อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ ต่างต้องการเร่งปรับปรุงเพราะเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน

ความตื่นตัวด้านการประหยัดพลังงานกระตุ้นให้อุตสาหกรรมยานยนต์หันมาใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากพลาสติกเป็นส่วนประกอบเพิ่มมากขึ้น เพราะพลาสติกโดยเฉพาะพอลิโพรพิลีน (PP) ซึ่งแม้จะเป็นพลาสติกโภคภัณฑ์ (Commodity) แต่ก็มีการพัฒนาในรูปของคอมพาวนด์ และโคพอลิเมอร์จนสามารถใช้งานในระดับเดียวกับพลาสติกวิศวกรรม โดยคอมพาวนด์ PP มีคุณสมบัติพิเศษทั้งทนความร้อนสูง ทนรังสีอัลตราไวโอเล็ต แข็งแรงรับแรงกระแทกได้ดีมีความปลอดภัยสูงใช้งานได้ยาวนานโดยที่สมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยน อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่และที่สำคัญคือน้ำหนักเบา เมื่อตัวรถมีน้ำหนักเบาทำให้ประหยัดน้ำมันได้มากขึ้นส่งผลต่อเนื่องให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ลดลงด้วย ดังนั้นคอมพาวนด์ PP จึงเป็นวัสดุที่ซึ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เน้นผลิตรถยนต์ประหยัดน้ำมันและให้ความสำคัญเรื่องสิ่งแวดล้อมนิยมเลือกใช้ [1] แต่ยังมีปัญหาสำคัญที่ต้องเร่งแก้ไขคือ ชิ้นส่วนคอมพาวนด์ PP มักประสบปัญหาเกิดรอยขีดข่วน และปรากฏเป็นตำหนิได้ง่ายสำหรับชิ้นส่วนทั้งภายในและภายนอกรถยนต์

ชิ้นส่วนรถยนต์เป็นชิ้นงานที่พื้นผิวต้องมีคุณภาพสูงมาก บริษัทรถยนต์ต้องการให้ชิ้นส่วนเหล่านี้คงสภาพไว้ตำหนิไม่เพียงเฉพาะในรถใหม่ แต่ยังต้องทนต่อการจะถูกขีดข่วนขณะรถถูกใช้งาน ด้วยการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดรอยขีดข่วน (Scratch resistance) จึงเป็นปัญหาหลักที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไทย ถูกบังคับด้วยมาตรฐานของบริษัทรถยนต์ต่างชาติที่ได้มาลงทุนในประเทศไทย ทำให้ต้องเร่งปรับปรุงชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์ PP ให้มีระดับรอยขีดข่วนเข้าใกล้ศูนย์ แต่ขณะเดียวกันยังต้องรักษาสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพอื่นๆในระดับเทียบเท่าหรือดีกว่า ก่อนปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วนอีกด้วย

แนวทางการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความต้านทานรอยขีดข่วนมีหลายวิธี เช่น การเคลือบพื้นผิวของชิ้นส่วน [2-6] การใส่สารเติมแต่งอนินทรีย์ [7-30] การใส่ nanoclay [19, 31, 32] และการใส่สารก่อผลึก [10, 33-39] วิธีการเคลือบพื้นผิวเหมาะสำหรับชิ้นส่วนภายนอกรถยนต์ ส่วนการใส่สารเติมแต่งอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ (Talc) วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) มักต้องใส่เป็นปริมาณมาก จะช่วยลดต้นทุน และมีผลต่อเนื้อวัสดุสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อน แต่ประสิทธิภาพการปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วนด้วยสารเติมแต่งอนินทรีย์ยังขึ้นกับอีกหลายปัจจัย เช่น ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาค อัตราส่วนระหว่างความยาวเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect ratio) ของอนุภาค รอยขีดข่วนในชิ้นส่วนที่เติมทัลค์มักปรากฏเป็นรอยสีขาว (Scratch whitening) การปรับปรุงโดยการเติม nanoclays มักมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดความหนาแน่น เพิ่มระดับมอดูลัส และลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ก็มีผลข้างเคียงทำให้ความต้านทานรอยขีดข่วนดีขึ้นได้ด้วย ส่วนการเติมสารก่อผลึกทั่วไปมักเหนียวน้ำให้เกิดผลึกแอลฟา เช่น ในชิ้นงาน PP ที่ขึ้นรูปโดยการฉีด (injection molding) หรือการอัดรีด (extrusion) มักเกิดผลึกแอลฟาเป็นปริมาณกว่าร้อยละ 95 ของผลึกทั้งหมดแต่เกิดผลึกเบตา ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่ช่วยให้ PP ทนต่อการกระแทกได้มากขึ้น มักเกิดเพียงเล็กน้อยราวร้อยละ 5 เท่านั้น จากงานวิจัย [40] พบว่าชิ้นงานจากการฉีด PP เข้าแม่พิมพ์ส่วนใหญ่จะเกิดโครงสร้างลักษณะ ผิว-แกน (skin-core) ผิวเป็นผนังบางที่เกิดขึ้นจากการที่ PP เหลวซึ่งถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ที่เย็นกว่าได้เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปผิวมักเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นอสัณฐานสูง เพราะอุณหภูมิของ PP เหลวถูกลดลงเร็วมากจนโมเลกุลของ PP ไม่มีเวลาพอจะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบแบบผลึกเท่าใดนัก ส่วนโมเลกุลของ PP ที่อยู่ถัดจากผิวมีโอกาสเรียงตัวเป็นระเบียบจากแรงเฉือนเมื่อ PP เหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ ส่วนอื่นๆ ที่อยู่ถัดจากผิวก็มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงเช่นกัน ทำให้แกนกลาง (core) ของชิ้นงานฉีดมีโครงสร้าง มีระดับการเรียงตัวเป็นระเบียบสูงกว่าผิว และแข็งกว่าผิว

งานวิจัยนี้มุ่งเพิ่มความทนทานต่อรอยขีดข่วนสำหรับชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์ PP โดยการใส่สารเติมแต่ง งานวิจัยนี้มี 2 แนวทาง แนวทางแรกใช้สารก่อผลึกเพื่อเหนียวน้ำให้เกิดผลึกมากขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ความต้านทานรอยขีดข่วนที่ผิวชิ้นงานฉีดสูงขึ้น เพราะวัสดุผลึกมีความแข็งสูงกว่าวัสดุอสัณฐาน ส่วนแนวทางที่สองโดยการเติมสารเติมอนินทรีย์ที่มีราคาไม่สูง ได้แก่ ผงทัลค์ (Talc) และ ผงวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ในปริมาณต่างๆ เพราะสารทั้งสองเป็นสารเติมแต่งอนินทรีย์ที่มีค่ามอดูลัสและความแข็งสูงกว่า PP มาก นิยมใส่ในเซรามิกเพราะทำให้ผิวงานเรียบเนียนและเพิ่มความทนทานต่อการขีดขูดและขีดสีในเซรามิกได้เป็นอย่างดี [41, 42] ทัลค์และวอลลาสโตไนท์จึงน่าจะช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสและความแข็งแรงให้แก่คอมพาวนด์ PP ให้ทนต่อการถูกขีดข่วนได้ดีขึ้น

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงความต้านทานการขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนโดยใช้สารก่อผลึกแอลฟา สารก่อผลึกเบตา และสารเติมอนินทรีย์ ได้แก่ ทัลค์ (Talc) และ วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ปริมาณต่างๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารก่อผลึกแอลฟา สารก่อผลึกเบตา และสารเติมอนินทรีย์ ได้แก่ ทัลค์ (Talc) และ วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ปริมาณต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลเชิงความร้อนและเชิงกายภาพของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากการปรับปรุงคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนด้วยสารดังกล่าว

1.3. ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1. พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ คอมพาวนด์ PP
- 1.3.2. สารก่อผลึกที่ใช้มี 2 ชนิด คือ
 - 1.3.2.1 สารก่อผลึกชนิดเหนี่ยวนำการเกิดผลึกแบบแอลฟา (α -nucleating agent)
 - 1.3.2.2 สารก่อผลึกชนิดเหนี่ยวนำการเกิดผลึกแบบเบตา (β -nucleating agent)
- 1.3.3. สารตัวเติมอนินทรีย์ที่ใช้คือ
 - 1.3.3.1 ทัลค์ (Talc) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.6 ไมโครเมตร
 - 1.3.3.2 วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.4 ไมโครเมตร
- 1.3.4. ปริมาณการผสมสารก่อผลึกกับคอมพาวนด์ PP คือตั้งแต่ร้อยละ 0.10 ถึง 0.40 โดยน้ำหนัก
- 1.3.5. ปริมาณการผสมสารเติมอนินทรีย์กับคอมพาวนด์ PP คือตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก
- 1.3.6. การทดสอบเพื่อประเมินอิทธิพลของสารก่อผลึกและสารตัวเติมอนินทรีย์ที่ใช้ผสมกับคอมพาวนด์ PP ครอบคลุมด้านต่างๆ ดังนี้
 - 1.3.6.1 ศึกษาความต้านทานต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนพื้นผิว ด้วยเครื่อง Scratch Testing Machine สังเกตรอยขีดข่วนด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ศึกษาวิเคราะห์รอยขีดข่วนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องวัดความหยาบพื้นผิว (Profilometer)

1.3.6.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลได้แก่ ความทนแรงดึง (Tensile Properties) ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Propertie) และความทนแรงกระแทก (Impact Properties) โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล

1.3.6.3 สมบัติเชิงความร้อนได้แก่ อุณหภูมิก่อผลึก (Crystallization Temperature, T_c), อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Crystalline Temperature, T_m) ระดับความเป็นผลึก โดยใช้ Differential scanning calorimeter (DSC) และอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature, HDT) โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิโก่งตัวภายใต้แรงดัดโค้ง

1.3.6.4 สมบัติเชิงกายภาพได้แก่ ความหนาแน่น (Density) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก อัตราการหลอมไหล (Melt flow rate) ด้วยเครื่อง melt flow index tester และความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell

1.3.7 ศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแท่นร้อน (Hot stage Optical Microscope)

1.3.8 ศึกษารูปแบบผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD)

1.3.9 วิเคราะห์ต้นทุน (Cost analysis)

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ได้องค์ความรู้ใหม่ด้านอิทธิพลของสารก่อผลึกต่อความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP
- 1.4.2. พัฒนาความสามารถในการต้านทานรอยขีดข่วนเพื่อขยายและยกระดับการใช้งานของคอมพาวนด์ PP ในชิ้นส่วนภายในรถยนต์
- 1.4.3 สร้างแนวทางการพัฒนาสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ต้องการพื้นผิวคุณภาพที่ทนต่อการขีดข่วนเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา เป็นต้น



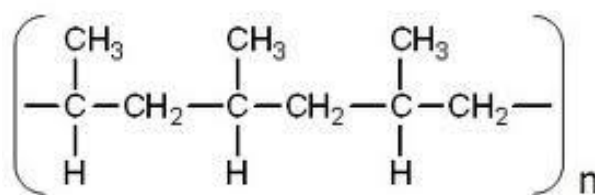
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1. วัสดุดิบ (Materials)

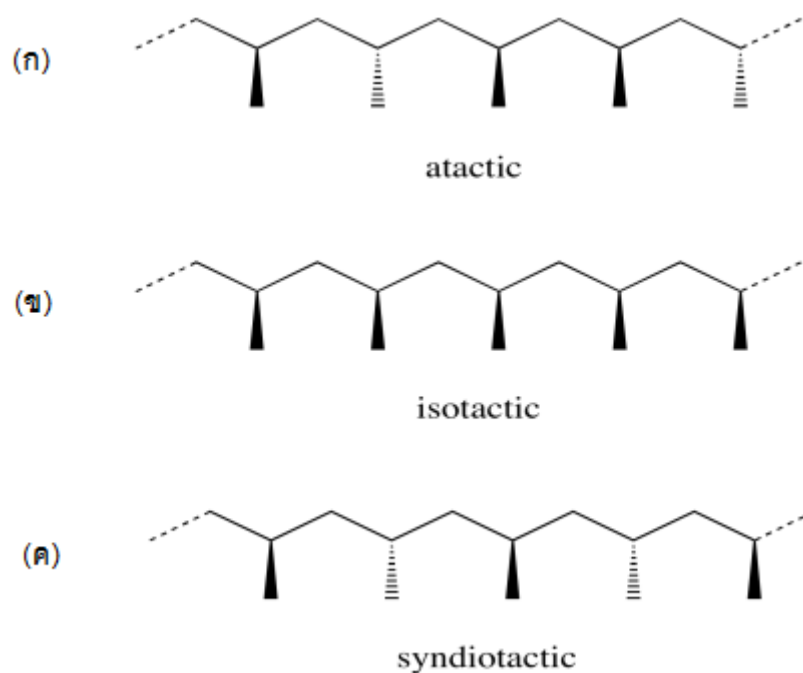
2.1.1. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

พอลิโพรพิลีน (PP) มีชื่อทางเคมี (Chemical Name) : poly (1-methylethylene) สูตรเคมีคือ $(C_3H_6)_n$ และมีสูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดย Giulio Natta และนักเคมีชาวเยอรมัน Karl Rehn เมื่อเดือนมีนาคม ค.ศ. 1954 ในประเทศสเปน โดย PP ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงแบบ isotactic การค้นพบครั้งนี้นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อมาในปี 1957 [43]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของ PP

PP เป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่สามารถขึ้นรูปซ้ำๆโดยใช้ความร้อนได้หลายครั้ง มีโมเลกุลเป็นเส้น (linear) ประกอบด้วยโมโนเมอร์ propylene (C_3H_6) หลายๆหน่วยต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของก๊าซ propylene โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ การใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสถานะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 แบบคือ isotactic syndiotactic และ atactic ขึ้นอยู่กับการจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงโครงสร้างหมู่ตำแหน่งแทนที่ใน PP

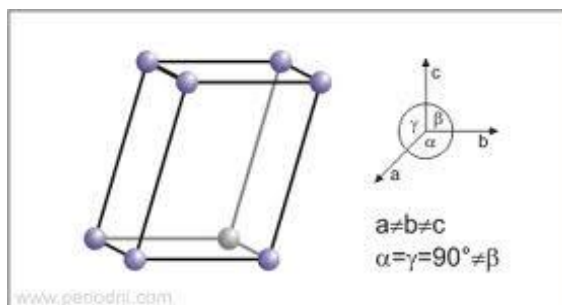
(ก) ไอโซแทคติก (Isotactic) (ข) ซินดีโอแทคติก (Syndiotactic) (ค) อะแทคติก (Atactic)

PP ชนิด isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกที่ใช้ทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมธิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง ตรงข้ามกับชนิด atactic ที่จะมีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมธิลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous)

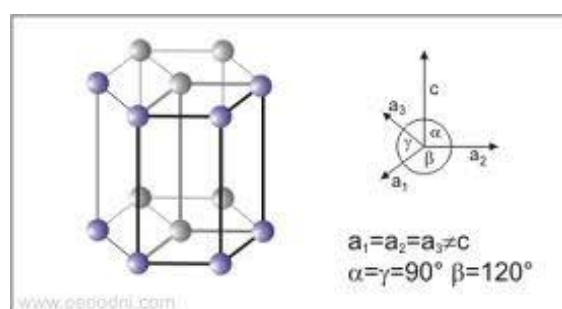
PP จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline polymer) คือมีส่วนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบหรือผลึก (Crystalline) และส่วนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างไม่เป็นระเบียบหรืออสัณฐาน (Amorphous) อยู่ร่วมกันในโครงสร้าง โดยมีอัตราส่วนของผลึกประมาณร้อยละ 30-70 ขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างสายโซ่ของ PP โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ ผลึกแอลฟา (Alpha Crystalline, α) ผลึกเบตา (Beta crystalline, β) และผลึกแกมมา (Gamma Crystalline, γ) กล่าวคือ

- ก) ผลึกแอลฟา (α crystal): เป็นผลึกที่พบมากที่สุดในโครงสร้าง PP ในกระบวนการผสมหรือขึ้นรูปสถานะทั่วไป คือ มากกว่าร้อยละ 95 ของผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นผลึกชนิดนี้ ผลึกแอลฟามีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 160 °C ความหนาแน่นประมาณ 0.94 g/cm³ ผลึกมีลักษณะหน่วยเซลล์ (Crystal Unit Cell) เป็นรูปแบบหนึ่งแกนเอียง (Monoclinic unit cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ผลึกแอลฟาเป็นผลึกที่มีความเสถียรทางความร้อน
- ข) ผลึกเบตา (β Crystal): เป็นผลึกที่เกิดขึ้นน้อยในโครงสร้าง PP ในกระบวนการผสมหรือขึ้นรูปสถานะทั่วไป มักพบผลึกเบตาปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 ของผลึกที่เกิดขึ้น ลักษณะหน่วยเซลล์ผลึกเป็นรูปแบบสามแกนราบ (Hexagonal unit cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข) ผลึกเบตามีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวน้อยกว่าผลึกแบบแอลฟาประมาณ 12-14 °C มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 g/cm³ เนื่องจากผลึกเบตาเกิดขึ้นน้อยในสภาวะปกติ แต่มีสมบัติบางประการที่เป็นที่ต้องการ เช่น มีค่าความต้านทานแรงกระแทกและความเหนียวที่สูงกว่าและมีอัตราการเกิดผลึกที่เร็วกว่าผลึกแอลฟา จึงมีการพยายามส่งเสริมให้เกิดผลึกเบตาหลายวิธี เช่น การตกผลึกภายใต้อุณหภูมิที่ต่างกัน (Crystallization in High Temperature gradients) การให้ PP ที่หลอมอยู่ใต้สภาวะแรงเฉือน (Melt exposed to shear stress) และการใช้สารก่อผลึกชนิดเหนียวนำการเกิดผลึกเบตา (Introduction of beta nucleating agents) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่ผลึกเบตามีจุดด้อยด้านความเสถียรทางความร้อนต่ำ กล่าวคือเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้งจะเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวเป็นผลึกแอลฟา
- ค) ผลึกแกมมา (γ Crystal): เป็นผลึกที่พบน้อยมากในสถานะทั่วไป ผลึกแกมมามีลักษณะหน่วยเซลล์ผลึก (Crystal unit cell) แบบสามแกนต่าง (Orthorhombic unit cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) มีความหนาแน่นประมาณ 0.94 g/cm³ การเกิดผลึกแกมมามักเกิดขึ้นภายใต้ความดันสูงคือประมาณ 5000 atm

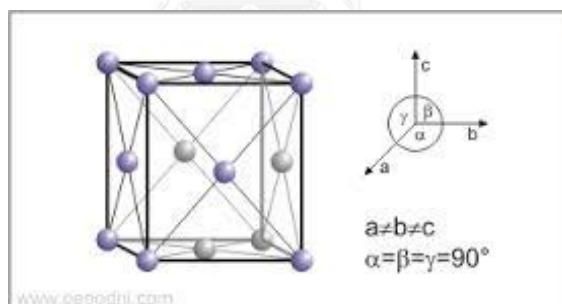
(ก) Monoclinic



(ข) Hexagonal



(ค) Orthorhombic



รูปที่ 2.3 รูปแบบหน่วยผลึก (Unit cell schematic)

พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมเหลวสูงราว 130–171 °C เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมากแม้ที่อุณหภูมิสูง มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง 0.855 - 0.946 g/cm³ จึงสามารถลอยน้ำได้ มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อได้ (Sterilization : 100 °C) ผสมสีได้ง่ายทั้งลักษณะโปร่งแสงและทึบแสง เมื่อไม่ได้ผสมสีมีลักษณะขาวขุ่น ไม่ทึบแต่ไม่ใส

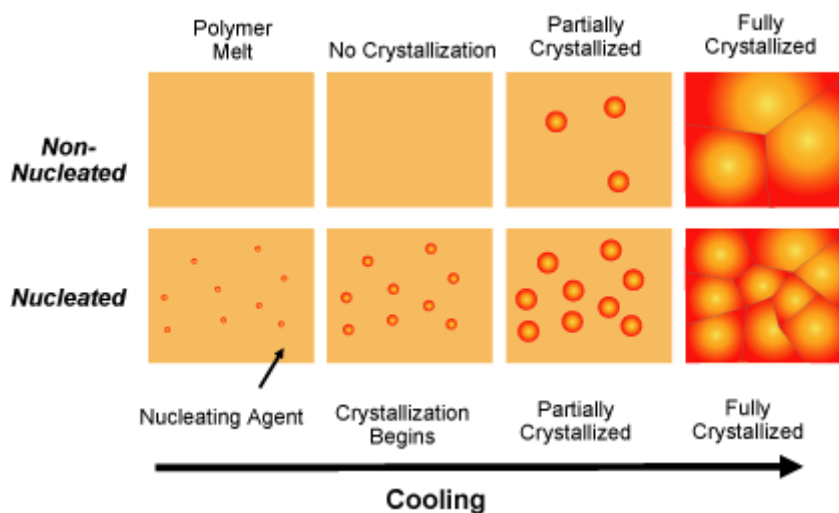
ในอุตสาหกรรมการผลิต PP ยังมีการใช้สารเติมแต่ง (Additives) อื่นๆ เพื่อช่วยปกป้องสายโซ่โมเลกุลพอลิโพรพิลีนระหว่างกระบวนการผลิตและการขึ้นรูปหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของ PP สำหรับ

การนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเฉพาะ เช่น สารหล่อลื่น (Lubricant) สารต้านการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidation) และสารแต่งสี (Pigment) เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิโพรพิลีนได้แก่ ก่อของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย ไหมเทียม พรมและแผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ซองขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว อุปกรณ์ภายในรถยนต์ ก่อเครื่องมือ กระเป่า ปกแฟ้มเอกสาร ก่อและดัดเครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือน ก่อบรรจุอาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ ขวดใส่สารเคมี กระบอมน้ำมันเครื่อง และกระสอบข้าว พลาสติกสำหรับใช้งานในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการส่วนมากทำจาก PP ซึ่งมีข้อดีคือทนต่อความร้อนสูงได้สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารก็สามารถนำเข้าเครื่องล้างจานอัตโนมัติและภาชนะบรรจุอาหารสำหรับไมโครเวฟได้ ภาชนะที่ทำจาก PP ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก ได้รับการจำแนกชนิดของพลาสติก เพื่อนำกลับไปเวียนขึ้นรูปใหม่ (Recycle) มีสัญลักษณ์เป็นเลข 5 (Resin Identification Code 5)

การใช้ PP มีความปลอดภัยต่อสุขภาพจากความเป็นพิษของสารเคมี ในโรงงานผลิต PP ที่อุณหภูมิสูงที่ปลดปล่อยไอที่อาจระคายเคืองต่อระบบหายใจและตา ก็ยังไม่มีรายงานถึงความเป็นพิษเมื่อต้องสัมผัสกับพลาสติกชนิดนี้ในระยะยาว

2.1.2. สารก่อผลึก (Nucleating Agent, NA)

การเติมสารก่อผลึกในกระบวนการผลิตและขึ้นรูป PP จะช่วยเพิ่มจุดก่อผลึก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในกระบวนการเกิดผลึกสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ทำให้ระดับความเป็นผลึกและปริมาณผลึกสูงขึ้นตลอดจนช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึกและลดขนาดของผลึก รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองเปรียบเทียบลักษณะการเกิดผลึกระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึก และพอลิเมอร์ที่เติมสารก่อผลึก [44] โดยสารก่อผลึกจะช่วยเร่งการเริ่มกระบวนการก่อผลึก ทำให้ผลึกในพอลิเมอร์มีจำนวนมากขึ้น สามารถขยายตัวจนขอบของผลึก (Boundary) สัมผัสกับผลึกข้างเคียงจนกระทั่งเต็มพื้นที่ ทำให้หยุดการโตของผลึกเร็วขึ้นและผลึกมีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึก



รูปที่ 2.4 แบบจำลองลักษณะการเกิดผลึกเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์
ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึกและเติมสารก่อผลึก

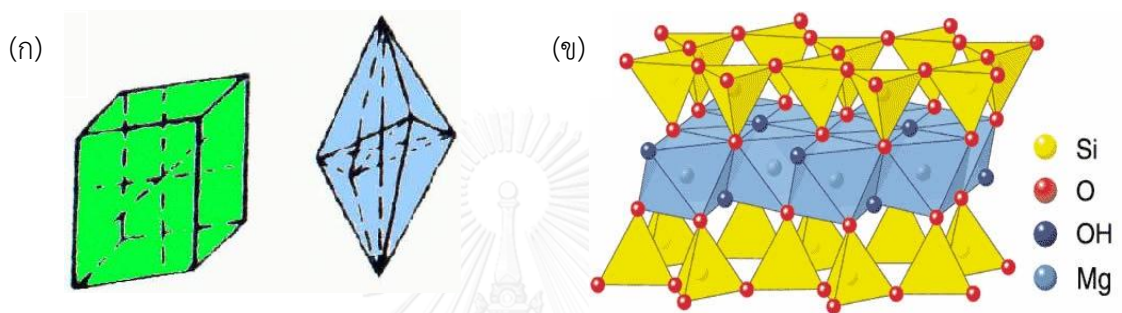
ลักษณะของ PP ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าและสมบัติทางกายภาพของ PP นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของ spherulite และการจัดเรียงตัวของผลึก ใน PP ที่ใส่สารก่อผลึกการเริ่มตกผลึกในกระบวนการเย็นตัว จะเกิดเร็วขึ้นและตกผลึกในอัตราเร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของ PP ทำให้มีจุดก่อผลึกเพิ่มขึ้นและผลึก spherulite มีขนาดเล็กลง การเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกด้วยสารก่อผลึกเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างสูงเนื่องจากส่งผลต่อต้นทุนการผลิตและกระบวนการผลิตน้อย และสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการให้กับ PP ได้ เช่น มอดูลัส ความทนแรงดึง เป็นต้น

ระดับความเป็นผลึกเป็นตัวกำหนดสมบัติที่สำคัญของ PP โดย PP ที่มีความเป็นผลึกสูงจะมีความหนาแน่นสูง มีความทนแรงดึง และความแข็ง สมบัติที่สำคัญของ PP นอกจากจะขึ้นกับระดับความเป็นผลึกแล้ว ยังขึ้นกับขนาดผลึกด้วย การมีผลึกขนาดใหญ่จะทำให้ PP นั้นเปราะ ดังนั้น PP ที่มีผลึกขนาดเล็กจะเหนียวและทนแรงกระแทกได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีผลึกขนาดใหญ่

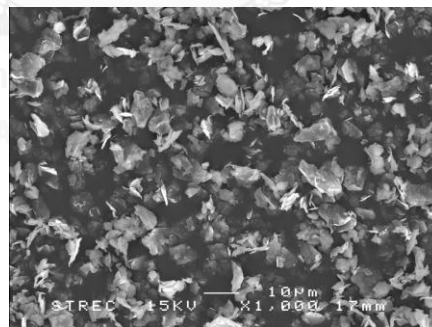
2.1.3. ทัลค์ (Talc)

ทัลค์ (Talc) จัดอยู่ในกลุ่มหินแร่ภูเขาไฟ เป็นสารประกอบของ แมกนีเซียมซิลิเกตและน้ำ (hydrated magnesium silicate) สูตรเคมี $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ มี MgO 31.7 % SiO_2 63.5% และ H_2O 4.8% อาจมีนิกเกิล (Ni) ปนบ้างเล็กน้อย เป็นวัตถุดิบแมกนีเซียมตามธรรมชาติที่มีราคาถูก ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7-2.8 ทัลค์มีรูปผลึกแบบโมโนคลินิก ลักษณะผลึกเป็นแผ่นหนารูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนและหกเหลี่ยมจัดเรียงตัวในรูปแบบ three-disc shape layers โดยมีชั้นตรงกลางคือ magnesium-oxygen/hydroxyl octahedra ในขณะที่ชั้นด้านนอกทั้งสองด้านประกอบด้วย

silicon-oxygen tetrahedral ดังรูปที่ 2.5 ชั้นต่างๆเหล่านี้ยึดกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (van der waals) เท่านั้น แต่ละชั้นสามารถเลื่อนหลุดออกจากกันได้โดยง่าย ทำให้เมื่อสัมผัสแล้วรู้สึกลื่นมือ มีค่าความแข็ง Moh's scale 1 ใช้มีดตัดเป็นชิ้นได้ ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของ Talc เช่น ความอ่อน (softness) ความไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (chemical inertness) ความลื่น (Slipping) และราคาถูก ทำให้ Talc ถูกใช้มาเป็นเวลาหลายปีในฐานะสารตัวเติม (filler) ที่น่าสนใจ และใช้เป็นวงกว้างในอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมกระดาษ ยา เครื่องสำอางค์ สี สารหล่อลื่น เซรามิกและพอลิเมอร์



รูปที่ 2.5 (ก) รูปผลึกแบบโมโนคลินิก (ข) โครงสร้างการจัดเรียงตัวของ Talc



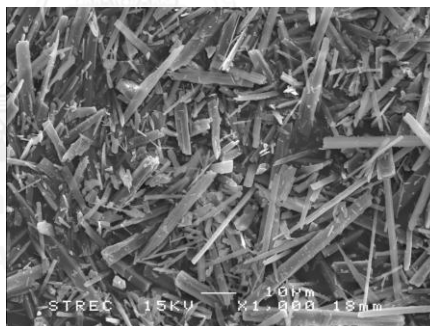
รูปที่ 2.6 Talc (x1,000) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบแผ่น

2.1.3. วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite)

Wollastonite มาจากชื่อของ William Hyde Wollaston (1766-1828) นักเคมีชาวอังกฤษ มีสูตรเคมีคือ CaSiO_3 มีปริมาณ SiO_2 51% CaO 48% Wollastonite เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สามารถเกิดได้ทั่วโลก ความถ่วงจำเพาะ 2.8-2.9 มีความแข็ง 4.5-5 ใน Moh's scale และมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ $1540\text{ }^{\circ}\text{C}$ วอลลาสโตไนท์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก รวมทั้ง

อุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่นวัสดุก่อสร้าง แต่ปัจจุบันยังใช้งานไม่แพร่หลายนัก มักใช้ในโรงงาน กระเบื้องขนาดใหญ่และโรงงานผลิตถ้วยชามขนาดใหญ่เท่านั้น ในอุตสาหกรรมเซรามิกใช้ Wollastonite ทั้งในเนื้อดินและในสีเคลือบของเซรามิก ซึ่งช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงของเคลือบ เนื่องจาก Wollastonite มีค่า % Loss of Ignition ต่ำมาก <math><1.5\%</math> (ค่า Loss on Ignition (LOI) คือ ส่วนที่สลายไปเมื่ออุณหภูมิสูงซึ่งเป็นน้ำและอินทรีย์สาร เช่น Additives ที่ผู้ผลิตอาจเติมเข้าไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ) ทำให้เกิดรูพรุน ๆ และโพรงขนาดเล็กจำนวนน้อย ดังนั้นการใช้ในงานเคลือบทำให้ผิวเคลือบมีความเรียบกว่าการใช้ CaCO_3 และทำให้มีรูเข็มลดลง สามารถใช้เป็นตัวช่วย หลอมได้ถ้าใส่ในปริมาณไม่สูงนัก แต่ถ้าใส่ในปริมาณมากจะตกผลึกเป็น CaSiO_3 ทำให้ผิวเคลือบด้าน เนียน สวยงาม และทำให้เกิดความทนทานต่อการขีดขูดและขีดสีได้เป็นอย่างดี

อุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ Wollastonite ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสริมแรงในเนื้อพลาสติกเนื่องจาก Wollastonite มีผลึกแบบ Acicular หรือ Needle-like structure ลักษณะผลึกเป็นรูปเข็มแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้มีค่า aspect ratio สูง คือ $L/D = 10:1-20:1$ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเรื่องการเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความทนไฟดีขึ้น Wollastonite ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะ ช่วยปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดขูดและการกระแทกได้ดี [42]



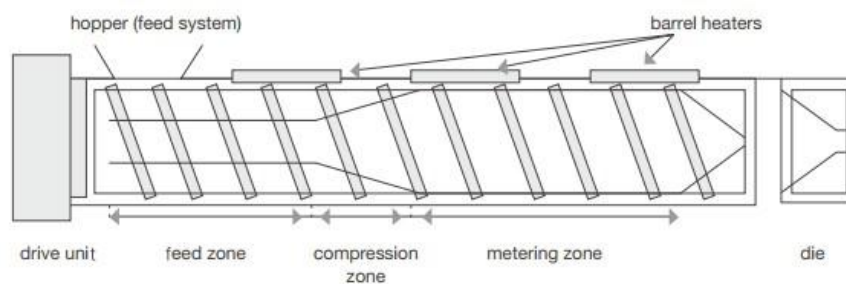
รูปที่ 2.7 Wollastonite NYGLOS 4W (x1,000) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Acicular

2.2. กระบวนการผสมและขึ้นรูป

2.2.1. การอัดรีด (Extrusion)

หลักของการรีดพลาสติกคือการเม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาในเครื่องรีด (Extruder) ถูกอัด หลอมและผสมในระหว่างเกลียวหนอน (Screw) และกระบอกของเครื่องรีด (Barrel) ทั้งนี้โดยอาศัย ความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นในพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ระหว่างผิวของเกลียวหนอน และกระบอกทำให้เกิดพลังงานที่ได้จากแรงเฉือนช่วยในการหลอมและการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงถูกอัดผ่านหัวตาย (Die) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกยึดติดกับส่วนปลายของกระบอกต่อจากแผ่นเบรก

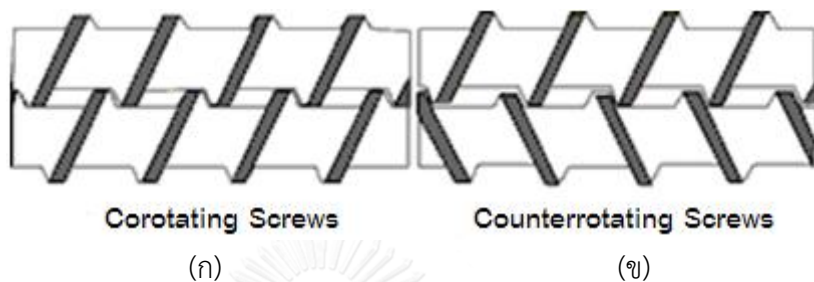
เกอร์และตะแกรงกรอง (Perforated breaker plate) ที่จำเป็นต้องใช้เนื่องจากเป็นตัวกรองเศษโลหะที่อาจปนเปื้อนหรือพลาสติกที่ยังหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นการก่อให้เกิดความดันพอเพียงในการรีดพลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวตายด้วย รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องอัดรีดโดยแบ่งหน้าที่ของส่วนต่างๆเป็น 3 ส่วนคือ นับจากด้านท้ายของเครื่องที่ติดกับกรวยเติมคือ Feed Compression และ Metering โดย feed section มีหน้าที่หลักคือ การดึงเม็ดหรือผง พลาสติก จากกรวยเติมพลาสติกลงในกระบอก เริ่มให้ความร้อนแก่พลาสติกและทำให้เกิดการผสมของพลาสติกกับวัสดุชนิดต่างๆ นอกจากนี้ส่วนป้อนยังทำหน้าที่ในการส่งพลาสติกไปยังส่วนต่อไปของ screw ใน compression zone ความลึกของร่องเกลียวหอนค่อยๆลดลงเพื่อให้เกิดแรงดันของพลาสติกหลอมเหลว และทำให้ความหนาของชั้นพลาสติกที่ห่อหุ้ม screw ลดลง จึงเกิดการส่งผ่านความร้อนจากกระบอกได้ดีขึ้น ความร้อนและแรงเสียดทานเนื่องจากการหมุนของ screw ในช่วงนี้สูงมาก ทำให้พลาสติกหลอมผสมกันเป็นเนื้อเดียว ส่วนสุดท้ายของ screw คือ metering มีความลึกของร่องเกลียวคงที่ แต่มีความลึกน้อยกว่าในส่วนป้อน พลาสติกหลอมในส่วนนี้มี ความดันเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.8 เครื่องอัดรีด (Extruder) [45]

เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่พัฒนาขึ้นมาโดยภายในกระบอกกลางมีเกลียวหอน 2 อันวางขนานกันตามแนวนอน ช่วยให้การลำเลียงและผสมวัสดุดิบเข้ากันได้ดีกว่าเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยว เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของเกลียวหอนคู่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยลักษณะการหมุนของเกลียวหอนคู่มีสองแบบ ได้แก่ แบบแรกคือ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) ทุกๆรอบของการหมุนของเกลียวหอนคู่แบบหมุนไปทางเดียวกันจะส่งพลาสติกเหลวจากร่องของเกลียวหอนตัวหนึ่งไปยังร่องของเกลียวหอนอีกตัวหนึ่ง ซึ่งกลไกในการส่งพลาสติกและแรงลากจูง (Drag Force) เทียบได้กับตัวเกลียวหอนเดี่ยว แต่จะมีการเฉือน (Shear Element) กับส่วนที่ทำหน้าที่นวดผสม (Kneading Element) รวมอยู่ด้วย เกลียวหอนคู่แบบนี้จึงนิยมนำมาใช้ในงานทำเม็ดผสม (Compounding) แบบที่สองคือ การหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating screw) หลักการของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่หมุนสวนทางกันนั้นกลไกการทำงาน

ต่างกับเกลียวหนอนคู่แบบหมุนทางเดียวกัน กล่าวคือ เกลียวหนอนแต่ละส่วนจะปรับสภาพเป็นห้องปิด (Closed Chamber) ทำหน้าที่ลำเลียงพลาสติกจากกรวยเติม (Hopper) ไปยังปลายเกลียวโดยไม่มีการส่งผ่านให้กับห้องใกล้เคียง โดยหลักการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงลากจูง (Drag Forces) ซึ่งมีผลทำให้การฉีกตัวและความร้อนเกิดขึ้นจากการฉีกน้อย ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำมาใช้ในงานผลิตท่อและโพรไฟล์ (Profile) ที่ทำจาก PVC



รูปที่ 2.9 ลักษณะการหมุนของเกลียวหนอนคู่

(ก) การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Corotating screw)

(ข) การหมุนสวนทางกัน (Counterrotating screw)

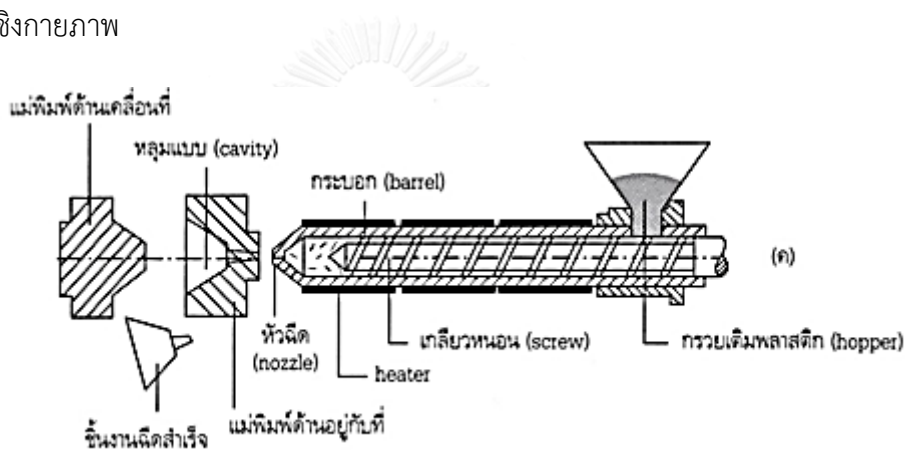
2.2.2. การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

การฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding นี้เครื่องฉีดประกอบด้วยเกลียวหนอนเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้หลายลักษณะงาน จึงทำให้มีความนิยมในการฉีดพลาสติกแบบนี้มาก ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนของการฉีดพลาสติกได้ 9 จังหวะ ดังต่อไปนี้

- ก) แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิดและล็อกแน่น เพื่อป้องกันการแยกด้วยแรงดันภายในแม่พิมพ์
- ข) ชุดฉีดเคลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์จนกระทั่งชนกับแม่พิมพ์ และค้างไว้ด้วยแรงที่พอเหมาะ เพื่อป้องกันชุดฉีดถอยหลังกลับ ในขณะที่ทำการฉีด
- ค) ฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยเกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน
- ง) ย้ำรักษาความดันให้กับพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น และไม่เกิดรอยยุบตัวที่ผิวของชิ้นงาน
- จ) หล่อเย็นชิ้นงานฉีดในแม่พิมพ์ โดยที่จังหวะนี้จะมีอิทธิพลมากต่อเวลาการทำงานทั้งวงจร
- ฉ) การหลอมและป้อนพลาสติกไปหน้าปลายเกลียวหนอน เมื่อได้ปริมาณพลาสติกเหลวตามที่ต้องการแล้วเกลียวหนอนจะหยุดหมุน

- ข) ชุดฉีดจะถอยหลังกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิของหัวฉีดลดต่ำลงเกินไป เพราะจะทำให้พลาสติกหนืดเกินไปและไหลไม่ได้
- ช) แม่พิมพ์จะเปิดออกหลังจากสิ้นสุดเวลาในการหล่อเย็น
- ฅ) ทำการปลดชิ้นงาน เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกสุดแล้ว

อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลโดยตรงต่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน PP โดยอัตราการเย็นตัวที่สูงจะส่งผลให้ชิ้นงานมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปอัตราการเย็นตัวต่ำ เนื่องจากระยะเวลาในการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของ PP ที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่มีเวลาจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมากย่อมเกิดความเป็นระเบียบภายในโครงสร้างสูง กล่าวคือมีระดับความเป็นผลึกสูง ซึ่งระดับความเป็นผลึกสูง ซึ่งระดับความเป็นผลึกดังกล่าวจะส่งผลสัมพันธ์โดยตรงต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงกายภาพ



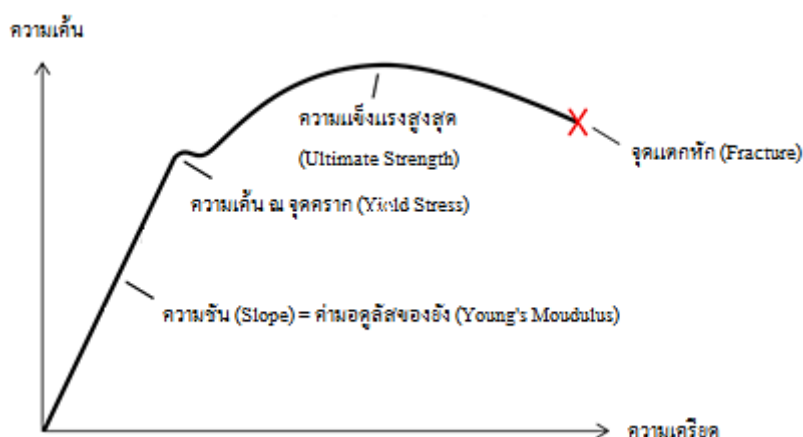
รูปที่ 2.10 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

2.3. การทดสอบสมบัติของพอลิโพรพิลีน

2.3.1. การทดสอบความทนแรงดึง (Testing of Tensile Properties)

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงขึ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ใต้สภาวะการยืด และเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลง รูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลง ขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั่นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น การทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ข้อมูลการทดสอบแรงดึงสามารถสร้างเป็นกราฟแรงเค้น ความเครียดของชิ้นทดสอบ ผลลัพธ์ในการทดสอบแสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุในการใช้งาน โดยมีสองจุดที่สำคัญ เกิดขึ้นบนกราฟคือจุดครากและแรงเค้นดึงสูงสุดหรือความแข็งแรงดึงของวัสดุ ซึ่งเป็น

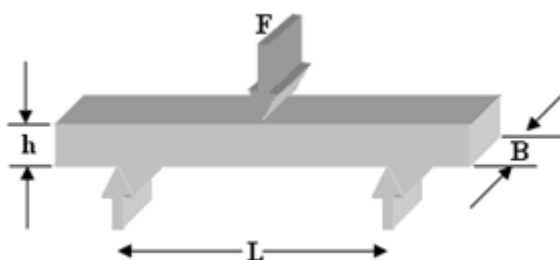
ข้อมูล ที่บ่งบอกถึงสมรรถภาพการรับแรงของวัสดุ ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึง โดยทั่วไปได้แก่ ร้อยละการยืด (percent elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) จุดคราก (yield point) และความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) เป็นต้น ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะเหล่านี้ใช้ในการบ่งชี้การเสีรูปของวัสดุในระหว่างการทดสอบ ปริมาณการเสีรูปของวัสดุที่ปรากฏก่อนแตกหักบ่อยครั้งใช้เป็นตัวแบ่งวัสดุว่าเป็นวัสดุเหนียวหรือเปราะ มาตรฐานการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงที่ใช้คือ ISO 527



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

2.3.2. การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Testing of flexural Properties)

การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวชิ้นงาน โดยแรงที่กระทำนั้นทำให้เกิดทั้งความเค้นของแรงกด (Compressive stress) และ ความเค้นของแรงดึง (Tensile stress) การทดสอบใช้วิธีดัดโค้งโดยการใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) ดังรูปที่ 2.12 ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 178 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ แรงดัดโค้งที่จุดคราก (Flexural stress at yield) โมดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) เป็นต้น

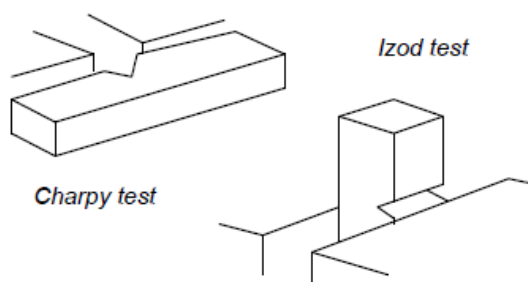


รูปที่ 2.12 การทดสอบสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งโดยวิธีการใส่แรงกระทำ 3 จุด

2.3.3. การทดสอบความทนแรงกระแทก (Testing of Impact Properties)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกเป็นการวัดพลังงานที่ทำให้วัสดุแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทกด้วยความเร็วสูง ซึ่งทดสอบความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานที่กระทำต่อวัตถุอย่างเฉียบพลันหรือพลังงานที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของมวลที่เคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานทดสอบลักษณะ

การทดสอบแบบใช้ลูกตุ้ม (Pendulum impact test) จะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากาะแท่งชิ้นงาน ชิ้นงานทดสอบต้องมีการทำรอยบากเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress concentration point) การวางชิ้นงานทำได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบของการทดสอบกล่าวคือถ้าเป็นการทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy) จะวางชิ้นทดสอบแนวนอนและเหวี่ยงค้อนกระแทกชิ้นทดสอบตรงกลางโดยให้รอยบากอยู่ตรงข้ามกับตำแหน่งที่จะถูกค้อนกระแทก แต่ถ้าเป็นการทดสอบแบบไอซอด (Izod) จะวางชิ้นทดสอบแนวตั้งโดยให้รอยบากอยู่ด้านที่จะถูกกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 180

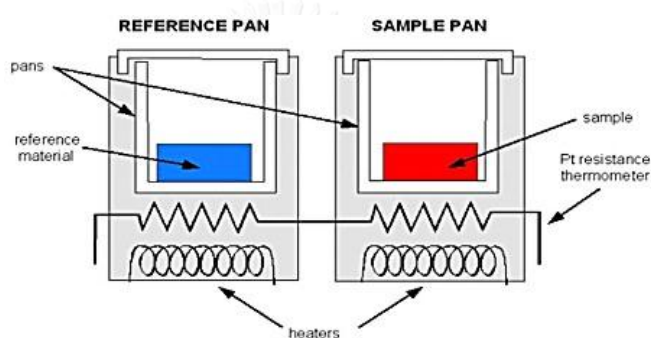


รูปที่ 2.13 รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy

2.3.4. การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

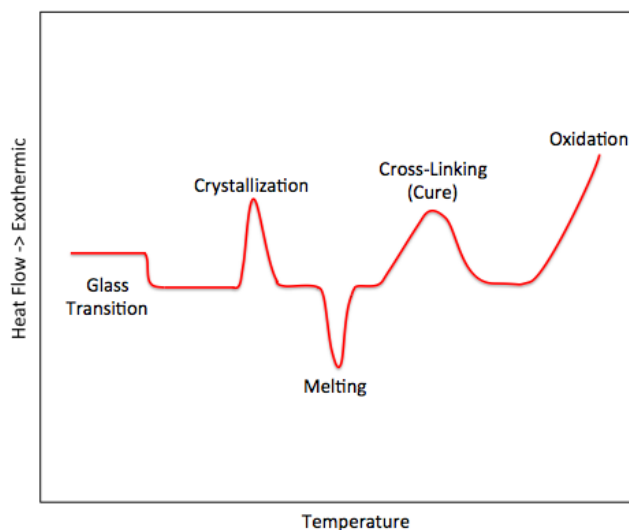
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (thermal transition) ของสารตัวอย่าง ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่มหรือลด อุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุม หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำภาตมา 2 ภาต ได้แก่ ภาตที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) และภาตอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นภาตเปล่าไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ชนิดเดียวกัน เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ภาตทั้งสอง โดยเครื่อง DSC ควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) ควบคุมให้ความร้อนภาตทั้งสองที่วางแยกกันด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลองหลังการให้ความร้อน อุณหภูมิของภาตทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน

เนื่องจาก sample pan มีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ reference pan ไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ sample pan มีสารในปริมาณที่มากกว่า reference pan นั้นหมายความว่า furnace ต้องให้ความร้อน sample pan มากกว่าที่ให้ reference pan เพื่อจะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน การวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก furnace ทั้งสองนี้ คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (melting) furnace ต้องให้ความร้อน sample pan มากกว่าที่ให้ reference pan เพื่อคุมอุณหภูมิของ sample pan และ reference pan ให้เท่ากัน ความร้อนถูกส่งผ่านไปยัง sample pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง reference pan นั้นขึ้นอยู่กับว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic



รูปที่ 2.14 ภาพจำลองตัวอย่างเครื่อง DSC [46]

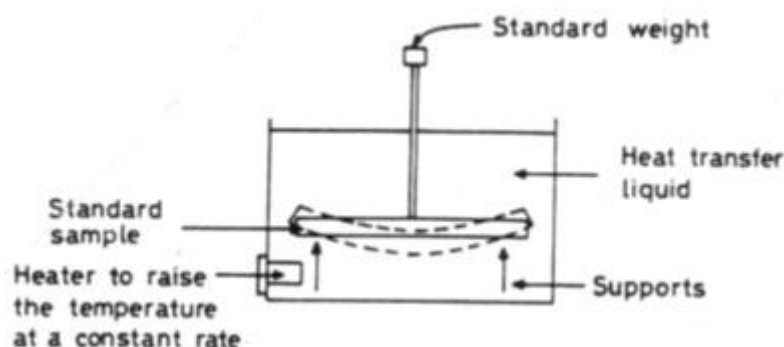
ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น จุดหลอมเหลว (Melting point, T_m) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) อุณหภูมิก่อผลึก (Crystallization Temperature, T_c) Oxidation stability (ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน) reaction kinetics (จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา) หรือ purity (ความบริสุทธิ์) รวมไปถึงระดับความเป็นผลึกด้วย



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างกราฟแสดงผลที่ได้จากเครื่อง DSC

2.3.5. การทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature, HDT)

การทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (HDT) เป็นการวัดอุณหภูมิของชิ้นทดสอบมาตรฐานที่เกิดจากการหักเหไปในระยะที่กำหนดภายใต้แรงที่กำหนด มาตรฐานการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวภายใต้แรงกดที่ใช้คือ ISO 75 กำหนดให้ทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบมาตรฐานมาใส่ในอ่างน้ำมัน (Oil Bath) เพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้แรงกด 0.455 MPa หรือ 1.82 MPa จนกระทั่งชิ้นทดสอบมาตรฐานเกิดการโค้งงอเป็นระยะ 0.340 มิลลิเมตร การทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถทราบระดับอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถนำวัสดุไปใช้งานในสภาวะต่างๆที่มีความร้อนได้อย่างเหมาะสม โดยไม่เกิดการโค้งงอ

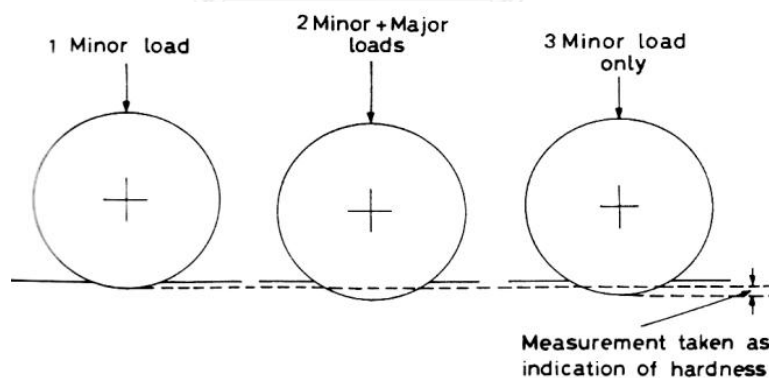


รูปที่ 2.16 ภาพจำลองตัวอย่างเครื่อง HDT [47]

2.3.6. การทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness)

ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่เป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (relative term) มาตรฐานการทดสอบความแข็งที่ใช้คือ ISO 2039-2

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือ การวัดความลึกของลูกบอลเหล็กที่ใช้เป็นตัวกดวัด (indenter) โดยในการทดสอบมี 3 ขั้นตอนหลัก (รูปที่ 2.17) คือ เริ่มจากการวางน้ำหนักรอง (minor load) ประมาณ 10 กิโลกรัม ลงบนลูกบอลเหล็ก เพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงทำการ set zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าอาจเปลี่ยนแปลงไปอีกเนื่องจากความเป็น viscoelastic ของพอลิเมอร์) หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (major load) ให้กับลูกบอลเหล็ก เป็นเวลานาน 15 วินาที จากนั้นจึงยกน้ำหนักกดออก ปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (recover) ต่อไปอีกประมาณ 15 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็ง hardness จากสเกลของเครื่องวัด โดยมีหน่วยกำกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลข ขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช่ว่า โดยสเกล R และ L ใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง hardness ต่ำ ส่วนสเกล M และ E ใช้กับพลาสติกที่มีความแข็ง (hardness) สูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้น ถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 ถือว่าความไว (sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไป และต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง hardness แบบ Rockwell

2.3.7. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

Optical Microscope คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมาก เนื่องจากใช้งานง่าย ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแสง (แสงที่ตามนุษย์มองเห็น) เป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ และมีการส่งไปที่วัตถุ ก่อนที่แสงส่องผ่านเข้าสู่สายตา

เรา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราทำให้เราเห็นภาพได้ Optical microscope มีหลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่ถูกแบ่งไปตามลักษณะการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ [48] ซึ่งปัจจุบันสามารถดูภาพผ่านจอทีวี หรือ คอมพิวเตอร์ได้ ทำให้พิมพ์ภาพ หรือเก็บข้อมูลเพื่อใช้ประมวลผล เช่น การวัดขนาดอนุภาค ได้สะดวกขึ้น แต่ Optical microscope ก็มีข้อจำกัดที่ความชัดลึก (Depth of field) ของภาพขยาย ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง

2.3.8. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้แสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว การกระจายตัวของอนุภาค ขนาดอนุภาค เป็นต้น รูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นภาพ 2 มิติ

2.3.9. การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิด ของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุ ที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) [49] เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

2.3.10. ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแทนความร้อน

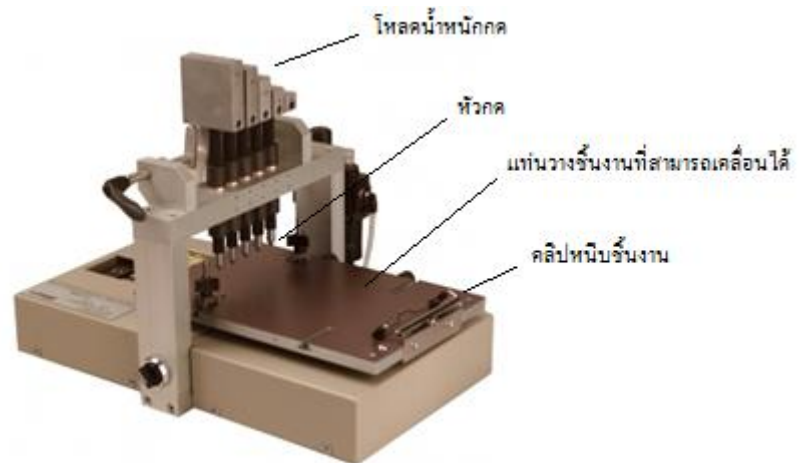
(Hot stage microscope, HSM)

Hot stage microscopy คือ การรวมกันของการใช้กล้องจุลทรรศน์และการวิเคราะห์เชิงความร้อนเพื่อที่สามารถศึกษาวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและเวลา นอกจากการได้รับข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของอนุภาคและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคแล้ว การตรวจสอบโดยการมองเห็นภาพก็สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ของสารประกอบที่เกี่ยวกับจุดหลอมเหลวและการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ ที่มีในระหว่างการให้ความร้อน กล้องจุลทรรศน์แบบแทนร้อนให้โอกาสที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อความร้อนเปลี่ยน นอกจากนี้ลักษณะที่สามารถวิเคราะห์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแทนร้อนรวมถึงช่วงการละลาย (ซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์) คือ จุดก่อผลึกและการเจริญเติบโตของผลึก, การเปลี่ยนแปลงของผลึกและการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบและสารเติมแต่ง (การตรวจสอบความเข้ากันได้) เป็นต้น

2.3.11. การศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนด้วยเครื่องทดสอบรอยขีดข่วน

(Multi-Finger Scratch/Mar Tester)

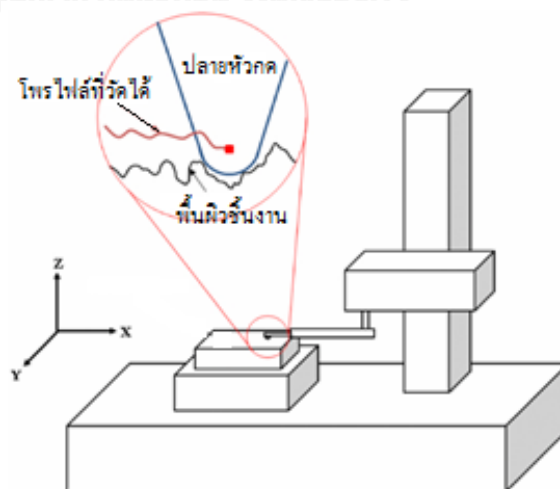
Multi-Finger Scratch/Mar Tester ถูกนำมาใช้ในการวัดความสัมพันธ์ของความต้านทานหรือความอ่อนแอของพื้นผิวของวัสดุต่อรอยขีดข่วน และความเสียหายทางกายภาพอื่น ๆ ที่คล้ายกัน ซึ่งไม่ได้จัดว่าเป็นการสึกหรอทั่วไป โดย Multi-Finger Scratch/Mar Tester ขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยลม แพลตฟอรม์ที่เคลื่อนย้ายขึ้นงานทดสอบติดตั้งอยู่โดยเคลื่อนที่แบบเส้นตรง ดำเนินการโดยปั๊มควบคุมสำหรับการทดสอบ เครื่องจับเวลาอิเล็กทรอนิกส์แสดงอัตราความเร็วที่สามารถควบคุมได้โดยการลดหรือเพิ่มความดันอากาศ ปลายปากกา (arm finger) มีทั้งหมด 5 อัน สามารถเลือกได้ว่าให้ปลายปากกาเคลื่อนที่ทั้งหมดกี่อัน โดยหากมีปลายปากกาไหนที่ไม่ต้องการให้เคลื่อนที่สามารทำให้ไว้ในตำแหน่งพัก (rest position) ปลายปากกานั้นจะไม่สัมผัสกับชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ น้ำหนักในการทำให้เกิดรอยขีดข่วนจะวางไว้เหนือปากกาโดยสามารถเลือกน้ำหนักได้ เช่น 3N, 5N, 10N, 15N, 20N เป็นต้น



รูปที่ 2.18 เครื่อง Multi-Finger Scratch/Mar Tester [50]

2.3.12. การวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Tester) โดยใช้เครื่อง Profilometer

Profilometer คือ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความหยาบผิว (surface roughness) สามารถวัดในแนวตั้งเล็กๆได้ คือ ช่วงความสูงประมาณ 10 nm – 1 mm โดยใช้ปลายวัด (stylus) เพชรซึ่งมีรัศมีอยู่ในช่วง 20 nm – 50 μm ลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด สร้างสัญญาณอนาล็อก (analog) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ทั้งในการวิเคราะห์และแสดงผล นอกจากค่าคุณสมบัติของผิวแล้ว เครื่องจะแปลผลออกมาในรูปแบบกราฟ ซึ่งเรียกว่า เส้นรูปทรง (profile) หมายถึง เส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบตัด (sectioning plane) หรือระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิวดัดกับระนาบพื้นผิว



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของเครื่อง Profilometer [51]

2.3.13 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่น

โดยนิยามแล้วค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของพอลิเมอร์หมายถึงสัดส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุพอลิเมอร์ที่ทดสอบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุ ณ อุณหภูมิที่กำหนด (เช่น 23 องศาเซลเซียส) ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะจึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ในขณะที่ค่าความหนาแน่น (density) หมายถึงน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น ซึ่งเป็นค่าที่มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต โดยมาตรฐานการทดสอบที่ใช้คือ ISO 1183 ค่าความถ่วงจำเพาะถือเป็นจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น เช่น โลหะ หรือ เซรามิกส์ นอกจากนี้ในบางกรณีผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จะมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) ลงไปด้วยซึ่งส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการวัดความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญในแง่ของการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.3.14 การทดสอบอัตราการหลอมไหล

อัตราการไหลของมวลขณะหลอมเหลวหรือ MFR หมายถึงอัตราไหลของมวลที่มีหน่วยวัด (หน่วยเอสไอ) คือ กรัม/10 นาที หลักการทำงานพื้นฐานได้แก่การทำให้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก (เริ่มต้นอยู่ในรูปของเม็ด ผง หรือชิ้นย่อย) เปลี่ยนเป็นของไหลด้วยความร้อนและให้แรงกระทำเพื่อให้ไหลออกจากกระบอก ผ่านออกไปยังหัวตายแคปิลลารี ลูกสูบสำหรับการรีดจะถูกกดด้วยตุ้มน้ำหนัก (ไม่เกิน 21.6 กิโลกรัม) ค่า MFR ถูกวัดค่าภายใต้สภาวะมาตรฐานของอุณหภูมิและแรงกระทำซึ่งกำหนดขึ้นตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 1133

บทที่ 3

วารสารปริทัศน์

PP เป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลากหลาย แต่ PP ยังมีปัญหาสำคัญคือ มักเกิดรอยขีดข่วนและปรากฏเป็นตำหนิได้ง่าย จึงมีการศึกษา ปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการพัฒนาที่เปลี่ยนแปลงสูงขึ้น โดยวิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือการทำคอมพาวนด์ เนื่องจากเป็นแนวทางที่สะดวก มีกระบวนการผลิตที่ง่าย การทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาได้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การใช้สารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน และการใช้สารก่อผลึกในพอลิโพรพิลีน

3.1 การใช้สารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน

A. Dasari และคณะ [25] ศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนของ PP composites ที่ใส่ wollastonite เป็นสารเสริมแรง ทดสอบตัวอย่าง 5 ประเภทคือ (i) PP บริสุทธิ์ (ii) PP+20% wollastonite ขนาด 8 μm (W1) (iii) PP+20% fine wollastonite ขนาด 3 μm (W2) (iv) PP+20% coated-coarse wollastonite (W3) (v) PP + 20% coarse coated-wollastonite + สารคู่ควบ (W4) พบว่าเกิดการเปลี่ยนรูปพลาสติก (plastic deformation) มากขึ้นถ้า wollastonite ที่ใส่นั้นเชื่อมกับ PP matrix ไม่แข็งแรงพอ ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรง (rigid) หรือเพิ่มมอดูลัส ของ PP + wollastonite (W1-W3) ให้มากกว่า PP บริสุทธิ์จึงไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานรอยขีดข่วน ยกเว้นกรณีที่สารเพิ่มเนื้อ (filler) มีพันธะที่แข็งแรงเชื่อมกับแมทริกซ์แล้วจึงทำให้การเพิ่มมอดูลัสสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการขีดข่วนได้ แต่เนื่องจาก PP ไม่มีขี้ การเชื่อมติดและความเข้ากันได้กับวัสดุชนิดอื่นจึงค่อนข้างจำกัด ดังนั้น การใช้สารคู่ควบ (W4) เพื่อให้เกิดการเชื่อมของสารตัวเติมและแมทริกซ์จึงสามารถช่วยเพิ่มมอดูลัสมากกว่า uncoated-wollastonite (W1) และ coated- wollastonite (W3) เนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่ดีจะทำให้เกิดการแตก (crack) และเกิดช่องว่าง (void) ผลจาก SEM ให้ข้อสังเกตได้ว่า วัสดุที่มีมอดูลัสสูงจึงไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานการขีดข่วนสูงตามถ้าการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับแมทริกซ์ไม่ดี นอกจากนี้การเติม wollastonite แบบละเอียด (W2) มีมอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก PP+20% wollastonite ขนาด 8 μm (W1) เนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น การปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการขีดข่วน การเปรียบเทียบของความลึก ความกว้าง ความหยาบของรอยขีดข่วน สามารถสรุปได้ว่า ความต้านทาน

การขีดข่วนเรียงตามลำดับได้ดังนี้ PP+20% coarse coated-wollastonite+สารเคลือบ (W4) > PP บริสุทธิ์ > PP+ wollastonite ละเอียด > PP+ wollastonite หยาบ > PP+ coated wollastonite

A.Mehrjerdi และ คณะ [22] ศึกษาสมบัติเชิงกลและความร้อนเชิงกายภาพของ HDPE ที่ใส่ talc โดย HDPE นี้จะมีการ precompound ด้วย carbon black 2.5 % ของปริมาณ HDPE และใส่ talc ที่ 0 5 8 12 15 25 35 wt% และตัวอย่าง ที่เป็น neat HDPE (PE_n) กับ HDPE ที่ใส่เพียง carbon black (PE_c) ใช้ twin screw extruder ในช่วงอุณหภูมิ 180-220 °c screw speed ที่ 230 และ 300 rpm และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) จากการทดสอบพบว่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (tensile strength at yield) ค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ Talc นอกจากนี้ HDPE ที่ใส่เพียง carbon black 2.5% (PE_c) มี tensile strength at yield ลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ neat HDPE (PE_n) และความทนแรงดึง ณ จุดขาด (tensile strength at break) ก็เช่นเดียวกันคือจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ talc ค่า modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ talc รวมทั้ง PE_c ก็มี modulus สูงกว่า neat HDPE ความเครียด ณ จุดคราก (strain at yield) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ talc ยกเว้น PE_c ที่เติม talc 8 wt% จากผลการทดลองความทนแรงกระแทกชาร์ปี (charpy impact strength) พบว่า HDPE ที่ใส่ carbon black 2.5 % (PE_c) มี charpy impact strength ลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ ลดลง 34% เมื่อเทียบกับ neat HDPE (PE_n) หลังจากนั้น impact strength จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ HDPE เติม talc 8 wt% ซึ่งใกล้เคียงกับ neat HDPE หลังจากนั้น impact strength ก็จะลดลงอย่างช้าๆเมื่อเติมปริมาณ talc เพิ่มขึ้น %elongation at yield ของ neat HDPE มีค่าสูงที่สุด และ %elongation ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ talc (ยกเว้น PE_c ที่เติม talc 8%) เนื่องจากมันไปลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ จาก SEM ของ PE_c/talc ที่ 8 และ 35 wt% แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีและกระจายอย่างทั่วถึงของ talc เนื่องมาจากโครงสร้างคล้ายแผ่น และมี aspect ratio สูงของ talc แต่ละชั้นของ talc เชื่อมต่อกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นชั้นของ talc สามารถหลุดออกจากกันได้ง่าย ทำให้พอลิเมอร์สามารถอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นอนุภาคของ talc หลุดออกมาจากพื้นผิว ซึ่งขนาดบน imprint สอดคล้องเป็นอย่างดีกับขนาดของ talc แสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่าง talc กับ matrix ไม่ดี จึงอธิบายได้ว่าทำไม tensile strength จึงเพิ่มได้เพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีการรวมตัวของอนุภาค (agglomeration) ที่รุนแรง จึงทำให้ยืนยันได้ว่าทำไม modulus จึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติม talc

U. Singh และคณะ [18] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP ที่ใส่ Wollastonite และ Silicon rubber โดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง PP + Wollastonite ปริมาณต่างๆ คือ 10%(S1)

20%(S2) 30%(S3) 40%(S4) และ PP + Silicon rubber 5% + Wollastonite ปริมาณต่างๆ คือ 10% (SR1) 20% (SR2) 30% (SR3) 40% (SR4) จากความต้านทานแรงกระแทกไอซอดแบบมีรอยบาก (Izod impact (notched) strength) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Wollastonite มีความทนแรงกระแทก (impact strength) เพิ่มขึ้น แต่หลังจากเติม Silicon rubber 5% พบว่า impact strength มีค่าลดลง จาก PP + 5% Silicon rubber + 10% Wollastonite (SR1) พบว่ามี impact strength สูงสุด และ impact strength มีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ คือ 20-23.17 J/m การเติม Silicon rubber 5% (SR1 , SR2) สามารถช่วยปรับปรุง impact strength ให้ดีขึ้นได้กว่าแบบไม่เติมยาง ผลความต้านทานแรงกระแทกไอซอดแบบไม่มีรอยบาก (Izod impact unnotched strength) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Wollastonite ใน PP (S1-S4) มีผลทำให้ impact strength ลดลง โดย impact strength ที่ดีที่สุด อยู่ที่ยังการเติม Wollastonite 10% มีค่า 524 J/m และหลังจากการเติม Silicon rubber 5% SR1 , SR2 มี impact strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ S1 และ S2 ในขณะที่ SR3 และ SR4 ลดลงเพียงเล็กน้อย ผล Izod impact (unnotched) strength ของ PP + Wollastonite + 5% Silicon rubber มีค่าต่ำกว่า PP + Wollastonite ในทุกๆปริมาณ การเติม Wollastonite จาก HDT พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Wollastonite (S1-S4) มีผลทำให้มี HDT เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงแคบๆคือ 111-115 °c และหลังจากการเติมยาง พบว่ามี HDT ดีที่สุด ที่การเติม Wollastonite 40% (SR4) คือ สามารถเพิ่ม HDT ได้ถึง 19 °c จากผลความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural strength) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Wollastonite ใน PP composite ค่า flexural strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่หลังจากเติมยาง 5% พบว่า flexural strength เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ SR4 คือ เพิ่มขึ้น 24% จากผล flexural modulus พบว่า การเติม Wollastonite 30% มีมอดูลัสดัดโค้ง (flexural modulus) สูงสุด คือ 21,152 kg/cm² และหลังจากการเติมยาง (SR1-SR4) มีผลทำให้ flexural modulus ลดลงประมาณเกือบ 50%

R.Thridandapani และคณะ [31] ศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนใน PP-clay นาโนคอมโพสิต โดยเปรียบเทียบระหว่าง neat PP , PP+4 wt% clay , PP+8 wt% clay โหลดของการทำให้เกิดรอยขีดข่วนอยู่ในช่วง 0.2-6 kgf ที่ความเร็วประมาณ 10 mm/s รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นเกิดในทิศทางยาวตามแนวการหลอมไหล จากผล DSC พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกของ PP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเติม clay โดยอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้นถึง 13 °C เมื่อเติม clay 8 wt% จากผล DMA พบว่าเมื่อเสริมแรง PP ด้วย clay มีผลทำให้ความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ ค่า modulus เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิโก่งตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 20 °C เมื่อเติม clay 8 wt% ความเสียหายของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นสามารถบอกปริมาณ ในเทอมของ stress whitening และ scratch

hardness (ใช้ความลึกและความกว้างของรอยขีดข่วนในการคำนวณ) จากความลึกรอยขีดข่วน (scratch depth) และ ความแข็งรอยขีดข่วน (scratch hardness) พบว่า 2 ค่านี้มีความสัมพันธ์กัน โดยตรงคือ วัสดุที่มี scratch hardness สูงกว่า จะมีความลึกรอยขีดข่วนลดลง คือ มีความสามารถในการต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนที่ดีกว่านั่นเอง และจากผลการทดลองพบว่า PP-clay นาโนคอมโพสิต มีความต้านทานต่อการเกิดรอยขีดข่วนได้ดีกว่า neat PP จาก stress whitening ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดรอยขีดข่วนสามารถหาปริมาณ stress whitening โดยหาได้จากระดับความแตกต่างของ grey level ระหว่างบริเวณที่เกิดรอยขีดข่วนและบริเวณที่ไม่เกิดรอยขีดข่วน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง grey level ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ clay ซึ่งหมายความว่า PP พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตมีค่า stress whitening ลดลง แสดงให้เห็นว่า PP ที่เติม clay มีความต้านทานต่อรอยขีดข่วนได้ดีกว่า neat PP

S. Zokaei R. Khosh M และ R. Bagher [52] ได้ศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนในโฮโมโพลิโพรพิลีน(homo-polypropylene, homo-PP) และโคโพลิโพรพิลีน(co-polypropylene, co-PP) ที่ใส่แคลเซียมคาร์โบเนตขนาดระดับนาโนเมตร(nanometric calcium carbonate , CaCO₃) โดยโหลดในการทำให้เกิดรอยขีดข่วนอยู่ในช่วง 2-8 N ที่ความเร็วประมาณ 0.2-4 mm/s จากผลสมบัติเชิงกลพบว่า อีลาสติคโมดูลัส (Elastic Modulus) มีค่าสูงขึ้นและความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมแคลเซียมคาร์โบเนตระดับนาโนเมตร จากผลการทดลอง พบว่า CaCO₃ สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสใน homo-PP ได้ ในขณะที่ใน co-PP ค่ามอดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากปัญหาเรื่องการไม่ยึดติดระหว่างสารตัวเติมกับแมทริกซ์ นอกจากนี้การเติม CaCO₃ สามารถเพิ่มสมบัติต้านทานแรงกระแทก (impact strength) ใน homo-PP ได้แต่ไม่เปลี่ยนแปลงใน co-PP โดยที่ PP+15 wt% CaCO₃ ของทั้ง 2 ชนิด จะมีสมบัติต้านทานแรงกระแทก ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากเกิดการรวมตัวกัน (agglomeration) ของอนุภาคที่มีปริมาณมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตาม co-PP มีค่า impact strength สูงกว่า homo-PP จากผลความต้านทานรอยขีดข่วน (scratch resistance) พบว่า nano CaCO₃ สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานรอยขีดข่วนใน homo-PP ได้โดยการเพิ่มมอดูลัสของยัง แต่ผลความต้านทานรอยขีดข่วนไม่มีนัยสำคัญใน co-PP เนื่องจากการยึดติดที่ไม่ดีของระหว่างแมทริกซ์และเฟสยางใน co-PP ทำให้เกิดการยึดติดที่ไม่ดีของสารตัวเติมอนุภาคนาโนและแมทริกซ์ใน co-PP/CaCO₃ ไปด้วย จาก TOM พบว่า homo-PP และ co-PP ที่มีการเติม nano-CaCO₃ สามารถช่วยลดโซนและขนาดของความเสียหายจากการเกิดรอยขีดข่วนได้ เนื่องมาจากผลของการเพิ่มความแข็งแรงของอนุภาคในระบบ และนอกจากนี้ยังพบว่าขอบเขตของความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้นจากชั้นผิว (skin) และขนาดของสเฟียรูไลท์ (Spherulite) ก็มีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน คือ จะเพิ่มขนาดอย่างช้าๆจากผิวไปยังแกนกลาง

R. Hadal และคณะ [11] ศึกษาการเกิดรอยขีดข่วนของ PP composites ที่ใส่ wollastonite และ PP composites ที่ใส่ talc ตัวอย่างในการศึกษานี้มี 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือใช้ PP ที่มีความเป็นผลึกสูง ได้แก่ PP บริสุทธิ์ (N1) PP+20wt% wollastonite 8 μm (W1) และ PP+20wt% Talc 7.5 μm (T1) ส่วนกลุ่มที่ 2 คือใช้ PP ที่มีความเป็นผลึกต่ำ ได้แก่ PP บริสุทธิ์ (N2) PP+20wt% wollastonite 8 μm (W2) และ PP+20wt% Talc 7.5 μm (T2) โดยผสมขึ้นรูปด้วยวิธี injection molding ทดสอบการเกิดรอยขีดข่วน (scratch test) ด้วยความเร็วของการขีดข่วน 2 mm/s ใช้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 7 N จาก DSC พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ PP/wollastonite และ PP/talc สูงกว่า PP บริสุทธิ์ เป็นไปได้ว่าการเติม wollastonite หรือ talc ทำให้เกิด nucleation site เพิ่ม ทำให้เพิ่มจำนวนของ spherulites แต่ขนาดลดลง ทำให้ระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น โดยกลุ่มแรกคือ PP ที่มีความเป็นผลึกสูงมีระดับความเป็นผลึกสูงกว่า PP กลุ่มที่สองที่มีความเป็นผลึกต่ำกว่า จากลักษณะพื้นผิวของการเกิดรอยขีดข่วนใน PP ที่มีความเป็นผลึกสูงพบว่า T1 มีความผิดปกติของพื้นผิวรุนแรงกว่า เมื่อเทียบกับ N1 และ W1 และพบว่า N1 และ W1 มีรูปแบบการเกิดร่องรอยการขีดข่วนแบบซิกแซกปกติ ในขณะที่ T1 มีรูปแบบการเกิดร่องรอยการขีดข่วนที่มีความผิดปกติสูงมากและไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน งานศึกษานี้เชื่อว่า รูปแบบรอยขีดข่วนแบบซิกแซกที่พบใน N1 W1 เป็นรอยการขีดข่วนที่บอกถึงการมีคุณสมบัติด้านทานรอยขีดข่วนที่เหนือกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ N1 พบว่า W1 T1 มี void ที่ใหญ่กว่า เนื่องมาจากการเกิด debonding ระหว่างอนุภาค โดย T1 มีการเกิด debonding มากกว่า W1 ส่วน PP ที่มีความเป็นผลึกต่ำพบว่าพื้นผิวของการเกิดรอยขีดข่วนใน N2 และ W2 มีรูปแบบการเกิดร่องรอยการขีดข่วนแบบซิกแซก ในขณะที่ T1 เกิดร่องรอยการขีดข่วนที่ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ขนาดของรอยขีดข่วนรุนแรง PP ที่มีความเป็นผลึกต่ำ (N2,W2,T2) มีขนาดของรอยขีดข่วนรุนแรงมากกว่าใน PP ที่มีความเป็นผลึกสูง (N1,W1,T1) ทั้งนี้เพราะ PP ที่มีระดับความเป็นผลึกสูง มีความแข็งแรงมากกว่า จากการทดลองหา scratch visibility ของ PP บริสุทธิ์ ทั้งที่มีความเป็นผลึกสูงและต่ำ (N1, N2) พบว่ามี scratch visibility น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PP/wollastonite และ PP/talc (W1, T1 และ W2, T2) และ PP/wollastonite (W1, W2) มีค่า scratch visibility ต่ำกว่า PP/talc (T1,T2) นอกจากนี้ PP/talc (T1, T2) มีการแยกชั้น (delamination) และมี void ที่ใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ PP/wollastonite (W1, W2) ดังนั้น การจะเพิ่มมอดูลัสของ PP โดยการเสริมแรงนั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติความต้านทานรอยขีดข่วนถ้าไม่มีพันธะระหว่างเฟสที่เหมาะสมพอเพราะพันธะระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์นั้นสำคัญต่อการเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานรอยขีดข่วน

R. Misra และคณะ [13] ศึกษาพฤติกรรมรอยขีดข่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยสารตัวเติมอนินทรีย์ทดสอบตัวอย่าง 4 ประเภทคือ (i) PP บริสุทธิ์ (PP) (ii)

PP+20vol%wollastonite (PP-W) (iii) ethylene-propylene บริสุทธิ์ (EP) (iv) ethylene-propylene+20vol%wollastonite (EP-W) ขึ้นรูปด้วยวิธี injection molding โหลดของการทำให้เกิดรอยขีดข่วนคือ 7 N ที่ความเร็วประมาณ 2 mm/s จากผล DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเติม wollastonite ใน PP หรือ EP ส่วนอุณหภูมิการตกผลึกพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเสริมแรง มีช่วงอุณหภูมิการตกผลึกที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จึงอาจกล่าวได้ว่า กระบวนการตกผลึก (crystallization) และกระบวนการก่อผลึก (nucleation) เกิดได้ดีขึ้นเมื่อมีการเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ จากผลมอดูลัสแรงดึง (tensile modulus) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้ง PP และ EP แต่อย่างไรก็ตามกลับไม่มีผลต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) จาก SEM พบว่า EP มีรอยขีดข่วนแบบพาราโบลา ในขณะที่ PP PP-W EP-W เป็นแบบซิกแซก ความหนาแน่นของรอยขีดข่วนใน PP และ EP มากกว่าใน PP-W และ EP-W จาก AFM หาความลึกรอยขีดข่วน (scratch depth) ความหยาบรอยขีดข่วน (scratch roughness) สามารถสรุปได้ว่า ความต้านทานรอยขีดข่วน เรียงตามลำดับดังนี้ PP-W \approx EP-W > PP > EP ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเสริมแรงและการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสให้กับ PP และ EP copolymer ด้วย wollastonite นั้นนำไปสู่การลดความหนาแน่นของรอยขีดข่วน

3.2 การใช้สารก่อผลึกในพอลิโพรพิลีน

M. Meng และ Q. Dou [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของ pimelic acid ต่อการเกิดผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของ PP composites ที่ใส่ wollastonite โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 2 กลุ่มคือ PP+wollastonite และ PP+wollastonite ที่ปรับผิวด้วย pimelic acid ผลการทดลองจาก Wide angle x-ray diffraction (WAXD) พบว่า PP+wollastonite ที่ปรับผิวด้วย pimelic acid มีเปอร์เซ็นต์ปริมาณผลึกเบตาสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สูงกว่า PP+wollastonite แบบไม่ปรับผิว หรืออีกนัยหนึ่งคือ PP+wollastonite ที่ไม่ปรับผิวมีผลึกแบบแอลฟาสูงกว่า ผลจาก SEM พบว่า pimelic acid สามารถเพิ่มความยึดติดระหว่าง PP แมทริกซ์ กับ wollastonite ได้ การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าความทนแรงกระแทก (Impact strength) ของ PP+Wollastonite ที่ปรับผิวด้วย pimelic acid มีค่ามากกว่า PP+Wollastonite ที่ไม่มีการปรับผิว ค่าความทนแรงดึง (Tensile Strength) และความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ของ PP+Wollastonite ที่ปรับผิวด้วย pimelic acid มีค่ามากกว่า PP+Wollastonite ที่ไม่มีการปรับผิว เมื่อเติม Wollastonite ไม่เกิน 5 wt% แต่เมื่อเติม Wollastonite มากกว่า 5 wt% แล้วความทนแรงดึง (Tensile Strength) และความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ของ PP+Wollastonite ที่ไม่ปรับผิวมีค่ามากกว่า PP + Wollastonite ที่ปรับผิวด้วย pimelic acid ส่วนมอดูลัสของยัง (Young's modulus) และมอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) นั้น PP + Wollastonite ที่ไม่ปรับผิวมีค่ามากกว่า PP + Wollastonite ที่ปรับผิวด้วย

pimelic acid ทั้งหมด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การปรับผิว Wollastonite ด้วย pimelic acid สามารถเหนียวนำไปเกิดผลึกแบบเบตาได้ซึ่งมีผลทำให้ impact strength ดีขึ้น แต่ทำให้ tensile strength yield stress และ modulus แย่ลง

P. Zhang และคณะ [53] ศึกษาสารก่อผลึกเบตาต่อสมบัติเชิงกลและการตกผลึกของ PP โดยใช้ acylamino-nucleator เป็นสารก่อผลึกความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 wt% จากผลการทดลองพบว่าสารก่อผลึก β มีสมบัติที่ดีในการเพิ่มความเหนียว (toughness) ให้ PP การทดลองสมบัติเชิงกล พบว่า การเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกเบตาทำให้ ความทนแรงดึง (tensile strength) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ความต้านทานแรงกระแทก (impact strength) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% elongation at break) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกเบตาและเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อใส่สารก่อผลึกเป็นปริมาณ 0.3wt% ค่า % elongation at break สามารถเพิ่มได้สูงสุดถึง 499 % จากเดิม 144 % และความต้านทานแรงกระแทก (impact strength) จากเดิม 36.09 J/m² เพิ่มขึ้นเป็น 67.76 J/m² เมื่อเติมสารก่อผลึกเบตา 0.3 wt% จาก XRD และสมการโดย Turner Jones พบว่าที่การเติมสารก่อผลึกเบตาที่ 0.3 wt% สามารถเหนียวนำไปเกิดผลึกเบตาได้ถึง 87% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สาร acylamino-nucleator มีประสิทธิภาพในการเหนียวนำไปเกิดผลึกเบตา และ ผลึกเบตาสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านของ impact strength และ % elongation at break ได้แต่ทำให้สมบัติ tensile strength แย่ลง

X. Zhang และ คณะ [35] ศึกษาอิทธิพลของสารก่อผลึกต่อสมบัติของ PP สารก่อผลึกที่ใช้คือ 1,3,2,4-di(p-hydroxy)benzylidene sorbitol (DHDBS) ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.1-0.5 wt% ผสมกับ PP ด้วยวิธีการอัด (compression mold) จาก Polarizing microscope พบว่าที่ DHDBS ปริมาณ 0.3 wt% มีขนาดของกลุ่มผลึกเล็กที่สุด จากภาพ SEM ของ PP บริสุทธิ์ และ PP+DHDBS 0.3 wt% พบว่าสเฟียรูไลต์ (spherulites) หรือผลึก ของ PP ที่ใส่ DHDBS นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบโดย spherulites มีขนาดประมาณ 12 μm แต่อย่างไรก็ตาม spherulites ที่ใหญ่ที่สุดและเล็กที่สุดสามารถสังเกตเห็นได้ใน PP บริสุทธิ์ โดยปกติแล้ว spherulites จะหยุดการโตขึ้นเมื่อมันชนกันเอง พฤติกรรมการตกผลึกของ PP บริสุทธิ์ ซึ่งมีปริมาณจุดก่อผลึกน้อยกว่า ดังนั้น PP บริสุทธิ์ จึงมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันน้อยกว่า ทำให้ขนาด spherulites มีขนาดใหญ่กว่า PP ที่ใส่สารก่อผลึก จากกราฟ XRD ของ PP บริสุทธิ์ และ PP ที่ใส่สารก่อผลึก (0.3 wt% DHDBS) พบว่า ตกผลึกในรูปแบบของผลึกแอลฟาทั้งหมด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระดับความเป็นผลึก (degrees of crystallization) ของ PP เพิ่มขึ้น 17.48% เมื่อเติม DHDBS 0.3 wt% ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นว่า DHDBS มีประสิทธิภาพในการเหนียวนำไปเกิดผลึกแอลฟาได้อย่างมีประสิทธิภาพ จาก DSC พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพีคหลอมเหลวของ PP บริสุทธิ์กับพีคหลอมเหลว

ของ PP+DHDBS 0.3 wt% พบว่าพีคหลอมเหลวของ PP+DHDBS 0.3 wt% มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3 องศาเซลเซียส พีคมีความคมมากขึ้น และ ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวแคบลง จาก TG พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของ PP เพิ่มขึ้น 36 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเพิ่ม DHDBS 0.3 wt% สามารถเพิ่มระดับความเป็นผลึกและเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ PP ได้ จากสมบัติเชิงกลของ PP+DHDBS 0.3 wt% พบว่าสมบัติต้านทานแรงกระแทก (notched izod impact strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสดัดโค้ง (flexural modulus) และความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural strength) เพิ่มขึ้น 19.37% 44.94% 69.59% 47.87% และ 85.34% ตามลำดับ

Q. Ding และคณะ [7] ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและลักษณะการหลอมเหลวของ β -isotactic PP composites ที่เติม wollastonite (W) โดยใช้ wollastonite ที่ถูกปรับผิวด้วย pimelic acid (W^*) มีอัตราส่วนมวลของ wollastonite/pimelic acid (W/PA) ตั้งแต่ 100 200 400 800 1000 2000 10,000 15,000 ใช้แทนสัญลักษณ์ด้วย W_x^* การเตรียม PP composites ที่ใส่ W และที่ใส่ W^* มีอัตราส่วนปริมาณน้ำหนักของ PP/ W และ PP/ W_x^* เท่ากับ 99/1 95/5 90/10 80/20 70/30 60/40 การทดสอบ DSC พบว่า การเพิ่ม wollastonite มีผลทำให้พีคการตกผลึกเลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ wollastonite เพิ่มขึ้น พีคอุณหภูมิของการหลอมเหลวประมาณ 160-162 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิการหลอมของ α -phase ในขณะที่สองพีคอุณหภูมิการหลอมเหลวประมาณ 146-147 และ 154-155 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของ β -phase การทดสอบ Wide-angle-X-ray diffraction พบว่า ปริมาณพีคหลอมเหลวของ β -phase ลดลงจนกระทั่งหายไปเมื่อเพิ่มปริมาณ wollastonite อธิบายได้ว่า wollastonite ที่ใส่ใน PP มักจะมี α -phase มากกว่า อย่างไรก็ตามในกรณี PP บริสุทธิ์จะมีแค่ α -phase เท่านั้น ดังนั้น ทั้งผลจาก DSC และ XRD ยืนยันว่า การใส่ wollastonite ใน PP ผลึกมักจะเกิดในรูป α -phase มากกว่า และ อุณหภูมิการตกผลึกของ PP เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ wollastonite ผลการทดลองนี้แตกต่างจากผลของ PP composites ซึ่งใส่ wollastonite ที่ถูกปรับผิวด้วย pimelic acid (W^*) เช่นที่ iPP/ W_{200}^* จะมีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับ iPP/ W คือไม่มีพีคหลอมเหลวของ α -phase เลย แต่ปรากฏแค่พีคของ β -phase โดยอุณหภูมิสูงสุดในการเกิดผลึกเกิดขึ้นใน PP ที่ใส่ wollastonite ณ อัตราส่วนมวลของ W/PA ที่ 200 จาก W_x^* (x มีค่า 100 ถึง 2000) เมื่อใส่ใน PP ผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็น β -phase โดยความสามารถในการก่อผลึก β และ ปริมาณ β -phase ใน iPP ที่เติม W^* เพิ่มขึ้นตามปริมาณ W^* และ pimelic acid

V. Chivatanasontorn และคณะ [54] ศึกษาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวต่อพฤติกรรม การเกิดรอยขีดข่วนของชิ้นงานพลาสติก เงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนได้แก่ น้ำหนักที่ใช้ใน

การทำให้เกิดรอยขีดข่วน ความเร็วในการทำให้เกิดรอยขีดข่วน หัวหรือปลายของสิ่งที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน สมบัติของวัสดุที่ต้องรับรอยขีดข่วน เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ความทนแรงดึง (tensile strength) ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพลาสติก และ ลักษณะพื้นผิว โดยการทดลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยขีดข่วนของบนพื้นผิวแผ่นพอลิโพรพิลีน (PP) และ แผ่นพอลิคาร์โบเนต (PC) พบว่าแผ่นพลาสติกซึ่งมีระยะระหว่างพื้นผิวกลมมน (spherical bumps) ที่กว้างที่สุดเกิดรอยเสียหายระดับรุนแรงที่สุด ทั้งในด้านพื้นที่ความเสียหายที่ใหญ่กว่า และ ลึกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพลาสติกที่มีระยะระหว่าง spherical bumps ที่แคบกว่า ดังนั้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติการต้านทานการเกิดรอยขีดข่วนของทั้ง PP และ PC เพิ่มขึ้น เมื่อระยะทางระหว่าง spherical bumps ลดลง

N. Petchwattana และคณะ [12] ได้ศึกษาผลของยางนาโนสไตรีนบิวตะไดอินปริมาณ 0-0.5 wt% ที่ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกเบตาใน PP ต่อสมบัติเชิงความร้อน การตกผลึก และสมบัติทางกายภาพ ขึ้นรูปด้วยวิธี injection molding จาก DSC พบว่า PP บริสุทธิ์มีพีคหลอมเหลวพีคเดียว แต่ PP ที่ใส่สารก่อผลึกเกิดพีคหลอมเหลวขึ้น 2 พีค ที่ประมาณ 150 °C และ 168 °C โดยพีคที่มีอุณหภูมิ 150 °C สอดคล้องกับอุณหภูมิหลอมเหลวของ β -phase ในขณะที่พีคที่มีอุณหภูมิสูงกว่าคือ 168 °C คือ พีคของ α -phase จากอุณหภูมิการตกผลึก พบว่า PP ที่ใส่สารก่อผลึก มีอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเพิ่มจากเดิม 108 °C ใน PP บริสุทธิ์ไปเป็น 120 °C เมื่อเติมสารก่อผลึกเบตาปริมาณ 0.2 wt% หรือมากกว่า แสดงให้เห็นว่าผลึกเบตาเริ่มเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิสูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นสารก่อผลึกเบตาสามารถเร่งให้เกิดการตกผลึกได้เร็วขึ้น ไวขึ้นกว่า PP ที่ไม่ได้ใส่สารก่อผลึก จากผล XRD พบว่า PP บริสุทธิ์มีผลึกแบบ α -phase เท่านั้น แต่ PP ที่มีการใส่สารก่อผลึกเบตาในทุกๆความเข้มข้นพบพีคที่ 16.0° และ 21.0° ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของผลึก β -phase จากการทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) พบว่า ที่การเติมสารก่อผลึกเบตา 0.05 wt% ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PP บริสุทธิ์ แต่เมื่อเติมสารก่อผลึกเบตาใน PP บริสุทธิ์ แต่เมื่อเติมสารก่อผลึกเบตาใน PP ปริมาณ 0.1-0.2 wt% สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากการมีสัดส่วนของผลึก β -phase ที่มากขึ้น จากการทดสอบความเป็นฝ้าหมอก (haze) พบว่ามีความเป็นฝ้าหมอกมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารก่อผลึกเบตา ความขาว (Whiteness) ของ PP ที่ใส่สารก่อผลึกเบตาลดลง เนื่องจากความเป็นผลึกที่มากขึ้น เป็นสาเหตุของการขัดขวางการส่งผ่านของแสง ในส่วนของความเหลือง (Yellowness) นั้นไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง PP บริสุทธิ์ และ PP ที่ใส่สารก่อผลึกเบตา

บทที่ 4

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งปรับปรุงความต้านทานการขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนโดยใช้สารก่อผลึกแอลฟา สารก่อผลึกเบตา และสารตัวเติมอนินทรีย์ ได้แก่ ทัลค์ และวอลลาสโตไนท์ โดยศึกษาความรุนแรงของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น พฤติกรรมการเกิดผลึกและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการเติมสารก่อผลึกแต่ละชนิด ตลอดจนศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกายภาพ ซึ่งทั้งหมดล้วนเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการผลิตขึ้นรูปและการนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งาน

4.1 วัสดุดิบ

4.1.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรดฉีดขึ้นรูป (SCG Chemicals, EL-Pro/P740J) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ไม่ทึบแสง สีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และแสดงสมบัติพื้นฐานของ PP 740J ตามที่ SCG Chemicals ได้รายงานไว้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เม็ดพลาสติก PP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติพื้นฐานของ PP เกรด P740J จากบริษัท SCG Chemicals

สมบัติ (หน่วย)	ค่าที่ทดสอบได้	มาตรฐานการทดสอบ
อัตราการหลอมไหล (กรัม/10นาทีก)	27	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.910	ASTM D 1505
แรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	29.3	ASTM D 638
แรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	20.3	ASTM D 638
มอดูลัสตัดโค้ง (GPa)	1.25	ASTM D 790
ความต้านทานแรงกระแทก แบบ Izod (kg.cm/cm)	8	ASTM D 256
อุณหภูมิการโค้งตัวภายใต้ความร้อน(°C)	110	ASTM D 648

4.1.2 สารก่อผลึก (Nucleating agent)

4.1.2.1 สารก่อผลึกแอลฟาอนุภาคไมโครเมตร (α -nucleating agent, α -NA)

สารก่อผลึกแอลฟาอนุภาคไมโครเมตรที่ใช้เป็นสารประกอบฟอสเฟสเอสเทอร์ (Phosphate ester compound)

4.1.2.2 สารก่อผลึกเบตาอนุภาคนาโนเมตร (β -nucleating agent, β -NA)

สารก่อผลึกเบตาอนุภาคนาโนเมตรเป็นสารประกอบยางสไตรีน บิวตะไดอีน (Styrene Butadiene rubber) เกลือโซเดียม (Sodium Salt) และโซเดียมเบนโซเอท (Sodium Benzoate)

4.1.3 สารตัวเติมทัลค์ (Talc) มีลักษณะเป็นผง สีขาว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.6 μm ดัง

แสดงในรูปที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติพื้นฐานของ Talc



รูปที่ 4.2 Talc

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของ Talc

สมบัติ	หน่วย	ระดับ
ความขาว (แห้ง)	%	≥ 92
ความขาว (เปียก)	%	≥ 39
ส่วนที่เหลือบนตะแกรงขนาด 45 μm		≤ 0.005
ความชื้น	%	≤ 0.5
ความหนาแน่น	g/ml	0.1~0.2
เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ย	μm	4.0~5.2

4.1.4 สารตัวเติมวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) (NYCO, NYGLOS 4W10992) มีลักษณะเป็นผง สีขาว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.4 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติพื้นฐานของ Wollastonite



รูปที่ 4.3 Wollastonite

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของ Wollastonite

สมบัติ	หน่วย	ระดับ
ความชื้น	%	0.1
พื้นที่ผิว (BET)	m ² /g	2.9
ดัชนีหักเห		1.63
ความสามารถในการละลายน้ำ	g/100 cc	0.0095
น้ำหนักโมเลกุล		116
ความถ่วงจำเพาะ		2.9
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	µm	7

4.2 การผสมและการเตรียมชิ้นงาน

4.2.1 การผสมและเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีน

การผสม PP กับสารก่อผลึกแอลฟา (α -NA) หรือกับสารก่อผลึกเบตา (β -NA) ใช้สารก่อผลึกในอัตราส่วนร้อยละ 0.0 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ส่วนการผสม PP กับสารตัวเติมทัลค (Talc) หรือกับวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ใช้สารตัวเติมในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.4

การผสม PP และสารเติมแต่งแต่ละชนิด ใช้เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ณ ความเร็ว 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนในการผสมคอมพาวนด์ PP กับ สารเติมแต่ง

สูตรคอมพาวนด์	สารเติมแต่ง	สัดส่วนที่เติมสารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
PP/Talc	Talc	15, 20, 25
PP/Talc+coupling agent	Talc+0.35 phc Maleic anhydride	15, 20, 25
PP/Wollastonite	Wollastonite	15, 20, 25
PP/ α -NA	α -Nucleating agent	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
PP/ β -NA	β -Nucleating agent	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

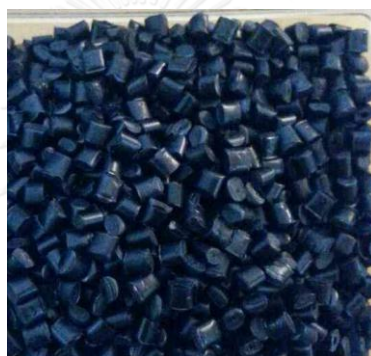


รูปที่ 4.4 เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler)

การหลอมผสม PP กับสารเติมแต่งแต่ละชนิด ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผสมแบ่งเป็น 4 ช่วงอุณหภูมิคือ 100 180 160 210 °C ความเร็วสกรู 1200 รอบต่อนาที แต่ละสูตรถูกอัดรีดผ่านหัวตาย แล้วจึงลดอุณหภูมิลงเหลือ 35 °C โดยระบบหล่อเย็น (Cooling system) แบบน้ำหล่อเย็น จากนั้นตัดคอมพาวนด์ PP เป็นเม็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มม. ยาวประมาณ 2-3 มม. ดังแสดงในรูป 4.6



รูปที่ 4.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)



รูปที่ 4.6 เม็ดคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนจากกระบวนการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

4.2.2 การฉีดขึ้นรูป

ขึ้นรูปเม็ดพอลิโพรพิลีนแต่ละสูตรเป็นชิ้นงานทดสอบโดยการฉีด ใช้เครื่องฉีดเข้าแม่พิมพ์ (FANUC ROBOSHOT S-2000i100B) ดังรูปที่ 4.7 ในการฉีดใช้อุณหภูมิหลอมผสมที่กระบอกสูบ (barrel) ประมาณ 190-200 °C ส่วนอุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปคือ 40 °C รูปที่ 4.8 แสดงรูปทรงชิ้นงานเพื่อการทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วน และสมบัติเชิงกล ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วนมีลักษณะแผ่นมีขนาดกว้าง 14.5 ซม. หนา 2.8 ซม. ยาว 20.3 ซม. ส่วนชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงมีลักษณะรูปดัมเบลล์ (Dumbbell Shape) ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านความต้านทานแรงดัดโค้งมีขนาดกว้าง 10.0 มม. หนา 4.0 มม. ยาว 170.0 มม. และชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกมีขนาดกว้าง 10.0 มม. หนา 4.0 มม. ยาว 80.0 มม. ทำการบาก (Notch) รูปตัวอักษรวี (V) ด้วยมุม 45° ลึก 2.5 มม. โดยหลังจากการขึ้นรูป ชิ้นงานถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะ (Condition room) ที่อุณหภูมิ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์

ร้อยละ 50 เป็นเวลา 90 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ ก่อนจะนำไปทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วน สมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นฐานต่อไป



รูปที่ 4.7 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) (FANUC ROBOSHOT S-2000i100B)



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านทานการขีดข่วน (ซ้าย) สมบัติด้านความทนแรงดึง (กลาง) ความต้านทานแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทก (ขวา)

4.2.3 การอัดขึ้นรูป

ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น (sheet) ด้วยกระบวนการอัด (Compression molding) เป็นแผ่นคอมพาวนด์ PP หนาประมาณ 0.03-0.05 มม. โดยใช้เครื่องกดอัด (Hydraulic Press, LabTech/Scientific) ดังรูปที่ 4.9 ที่อุณหภูมิ 230 °C ความดัน 133 bar ชิ้นงานแผ่นเหล่านี้

ใช้สำหรับการทดสอบโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer, XRD) และตรวจสอบพฤติกรรมของการเกิดผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแท่นร้อน (Hot stage-Polarized optical microscope)



รูปที่ 4.9 เครื่องกดอัด (Hydraulic Press, LabTech/Scientific)

4.3 วิธีการทดสอบสมบัติของคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีน

4.3.1. สมบัติเชิงความร้อน

4.3.1.1. อุณหภูมิก่อผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว

ทดสอบโดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น PerkinElmer DSC 4000) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 น้ำหนักตัวอย่างทดสอบประมาณ 4 ถึง 6 มก ดำเนินการทดสอบตั้งแต่ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อน $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เริ่มการทดสอบโดยให้ความร้อนจากระดับอุณหภูมิห้องเพิ่มสูงขึ้นจนถึง $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ คงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำลายพฤติกรรมของคอมพาวนด์ PP จากการขึ้นรูป (History behavior) แล้วจึงลดอุณหภูมิจนถึง $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ คงระดับอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทดสอบระดับอุณหภูมิการก่อผลึก (Crystallization Temperature, T_c) จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิจาก $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ อีกครั้งเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m)



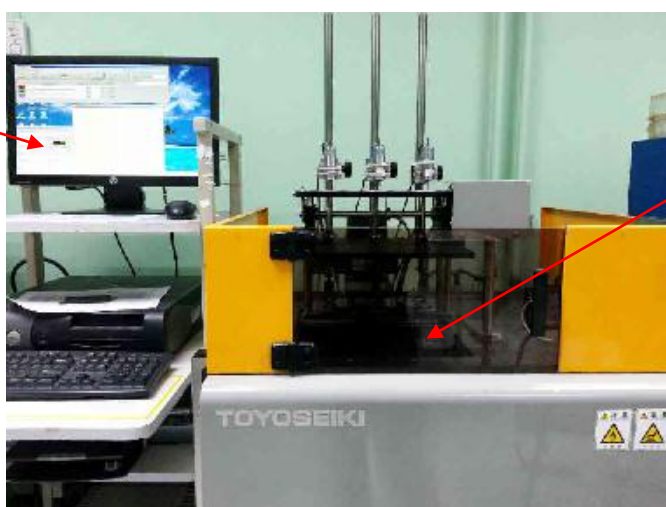
รูปที่ 4.10 เครื่อง Differential scanning calorimeter (PerkinElmer DSC 4000)

4.3.1.2. อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature, HDT)

การทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 75 เป็นการวัดค่าการเสถียรภาพของชิ้นงานภายใต้แรงดัดโค้งด้วยวิธีการใส่แรงกระทำ อุปกรณ์ทดสอบตั้งอยู่ในอ่างน้ำมัน (Oil Bath) ซึ่งบรรจุอยู่ในห้องร้อน (Heat Chamber) โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อน $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ความเค้นในการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนคือ 0.455 MPa ทดสอบจนชิ้นงานเกิดการโค้งงอเป็นระยะ 0.340 มม. แต่ละสูตรทดสอบ 3 ครั้ง รายงานค่าเฉลี่ย

การศึกษานี้ใช้ชิ้นงานทดสอบที่ได้ขึ้นรูปแบบฉีด ชิ้นงานมีขนาดกว้าง 10.0 มม. ยาว 80.0 มม. และหนา 4.0 มม.

จอแสดงอุณหภูมิและ
สภาวะการทดสอบ



ห้องร้อน
(Heat Chamber)

รูปที่ 4.11 เครื่องวัดอุณหภูมิโก่งตัวภายใต้แรงดัดโค้ง

4.3.2. การเกิดผลึก

4.3.2.1. การทดสอบระดับความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity)

ระดับความเป็นผลึกใน PP สามารถตรวจหาได้ในขณะเดียวกับการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน (อุณหภูมิก่อผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลว) โดยใช้เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scan Calorimetry, DSC) ระดับความเป็นผลึกคำนวณได้จากปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PP (Melting enthalpy, ΔH_m) เปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ PP ที่เป็นผลึกทั้งหมด (100% crystalline PP, $\Delta H_{m 100\%}$) ค่าพลังงานการหลอมผลึกโฮโมพอลิโพรพิลีนมีค่าคงที่ 207 J/g

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m}{f \cdot \Delta H_{m 100\%}} \times 100 \quad (4.1)$$

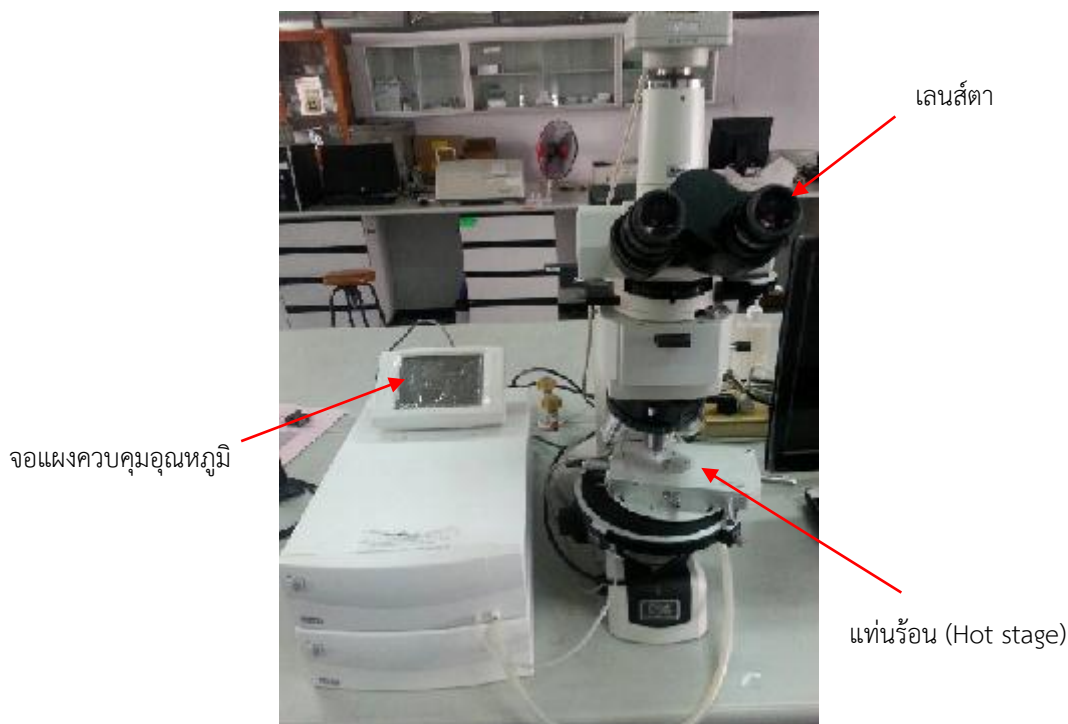
เมื่อ $\%X_c$ คือ ร้อยละของระดับความเป็นผลึก (Percent of the degree of crystallinity) f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบ PP (Fraction of PP compound) ΔH_m คือ พลังงานที่ใช้จริง (The measured melting enthalpy) $\Delta H_{m 100\%}$ คือ พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก PP ร้อยละ 100 (Enthalpy of melting 100% crystalline Homo-PP)

4.3.2.2. การตรวจสอบโครงสร้างผลึก (Crystalline Structure)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกดำเนินการโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Bruker AXS Diffractometer D8) แสดงดังในรูปที่ 4.12 ด้วยการใช้ความยาวคลื่นของทองแดง (Cu) มีขนาดความยาวคลื่น 1.5406 Å โดยมีแหล่งกระตุ้นรังสีขนาด 40 kV และ 40 mA ทำการทดสอบการหักเหของรังสีด้วยมุมระหว่าง 2° ถึง 60° อัตราการตรวจสอบ (Scanning rate) 2.4° ต่อนาที ผลการทดสอบแสดงการเลี้ยวเบนรังสีที่มุมต่างๆเนื่องจากมีลักษณะหน่วยผลึก (Unit cell) รูปแบบแตกต่างกัน และยังแสดงถึงปริมาณผลึกหรือระดับความเป็นผลึกแต่ละชนิดโดยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของมุมเลี้ยวเบนผลึกรูปแบบต่างๆที่ได้จากการทดสอบอีกด้วย ซึ่งค่าที่ได้สามารถนำไปหาอัตราส่วนของผลึกชนิดนั้นๆจากปริมาณผลึกทั้งหมด (Fraction of crystalline phase, K value) ด้วยสมการของ Turner Jones และคณะ [10, 53] ดังสมการที่ (4.2)

$$K \text{ Value} = \frac{\beta_{(300)}}{\beta_{(300)} + \alpha_{(110)} + \alpha_{(040)} + \alpha_{(130)}} \quad (4.2)$$

เปลี่ยนแปลงความร้อน 10 °C/min และลดอุณหภูมิจนถึง 140 °C จึงเริ่มคงระดับอุณหภูมิไว้และเก็บข้อมูลลักษณะการเกิดผลึกในช่วงเวลาต่างๆต่อเนื่อง

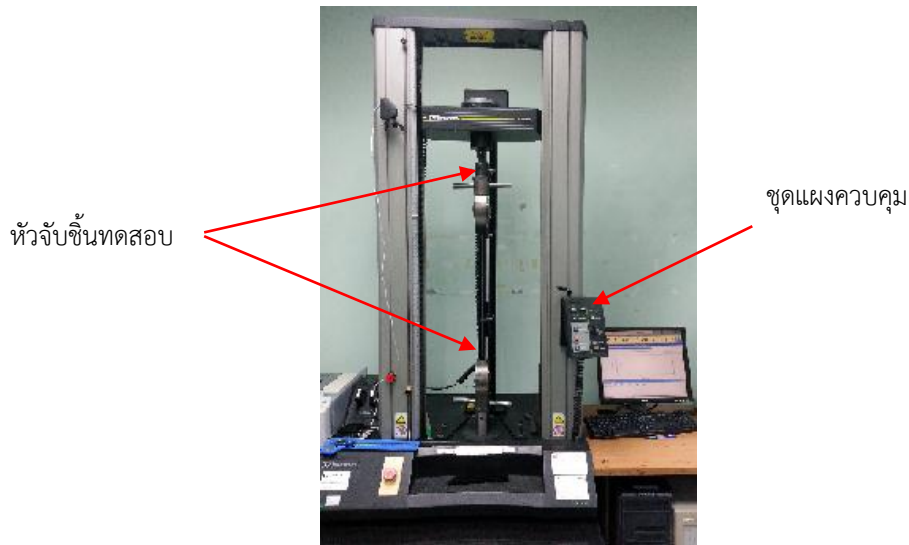


รูปที่ 4.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแท่นร้อน (Hot Stage Optical Microscope)

4.3.3. การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.3.3.1. สมบัติด้านความทนแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile properties) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ PP งานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 527 ใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Instron รุ่น 5566) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ความเร็วในการดึง 50 มม./นาที ความยาวเกจ (gauge length) 50 มม. ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน สำหรับแต่ละสูตร รายงานค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.14 เครื่องทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Instron รุ่น 5566)

4.3.3.2. สมบัติด้านการต้านทานการดัดโค้ง

การทดสอบสมบัติด้านการต้านทานการดัดโค้ง (Flexural properties) เพื่อศึกษาความสามารถของคอมพาวนด์ PP ในการต้านแรงที่มากกระทำในทิศตั้งฉากกับความยาวของชิ้นงาน ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 178 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Instron รุ่น 5566) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ทดสอบแบบแรงกระทำ 3 จุด (Three point bending) ความเร็วในการทดสอบ 2 มม./นาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 แต่ละสูตรทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน รายงานค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.15 เครื่องทดสอบสมบัติด้านการดัดโค้ง (Instron รุ่น 5566)

4.3.3.3. สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก (Impact properties) สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับแรงหรือพลังงานของ PP งานวิจัยนี้ทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ตามมาตรฐาน ISO 179 ใช้เครื่อง Impact tester (Toyoseiki) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 หัวค้อนขนาด 4 จูล ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 23 °C ทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 10 ชิ้นงานสำหรับคอมพาวนด์ PP แต่ละสูตร



รูปที่ 4.16 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก

4.3.4. สมบัติเชิงกายภาพ

4.3.4.1. ความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว งานวิจัยนี้ทดสอบความแข็งแบบ Rockwell R scale ตามมาตรฐาน ISO 2039-2 ใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (Instron /Wilson Rockwell tester series 2000) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 หัวกดแบบลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มม. เริ่มจากการวางน้ำหนักรอง (minor load) 98 N (10 kg) ลงบนลูกบอลเหล็กเพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึง set zero ภายใน 10 วินาที หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (major load) 588 N (60 kg) ให้กับลูกบอลเหล็ก เป็นเวลา 15 วินาที โดยชิ้นงานที่มีความแข็งมากจะมีดัชนีความแข็งสูง แต่ละสูตรทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน รายงานค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.17 เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell (Wilson Rockwell tester series 2000)

4.3.4.2. อัตราการหลอมไหล

อัตราการไหลของมวลขณะหลอมเหลว (Melt flow rate, MFR) มักถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อควบคุมคุณภาพและควบคุมกระบวนการผลิต วัดเป็นอัตราไหลของมวลที่มีหน่วยเป็นกรัมต่อเวลา 10 นาที ณ อุณหภูมิ 230 °C น้ำหนักกด 2,060 กรัม งานวิจัยนี้ทดสอบอัตราการหลอมไหลตามมาตรฐาน ISO 1133 ด้วยเครื่อง Dynisco melt flow index tester ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่ละสูตรทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง รายงานค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.18 เครื่อง Dynisco melt flow index tester

4.3.4.3. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของวัตถุ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของของน้ำ งานวิจัยนี้ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ISO 1183 ด้วยเครื่อง Weighting (Sartorius MSUJ24S-100) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยการห้ำน้ำหนักเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของ PP ในอากาศกับน้ำหนักในน้ำ แต่ละสูตรทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง รายงานค่าเฉลี่ย

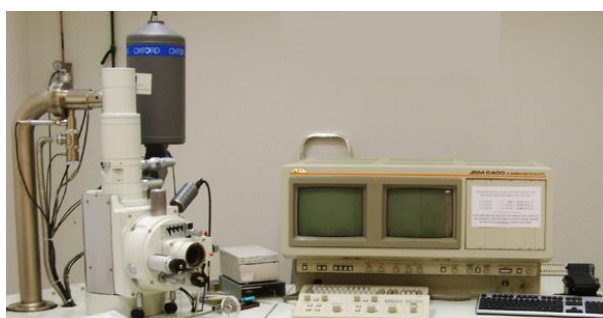


รูปที่ 4.19 เครื่องทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

4.3.5. สัณฐานวิทยา

4.3.5.1 โครงสร้างระดับจุลภาค

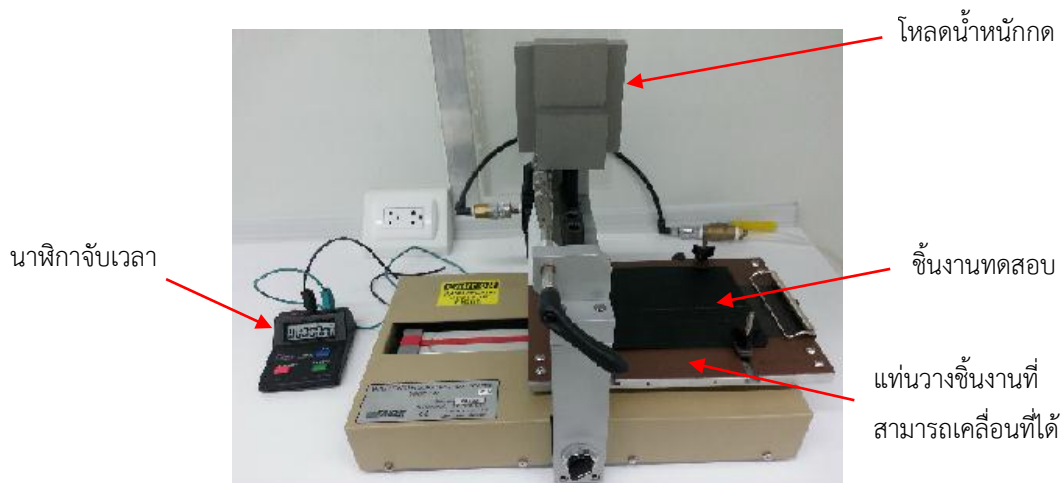
ศึกษาโครงสร้างของ PP แต่ละสูตรต่างๆ ใช้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าแม่พิมพ์ นำชิ้นงานทดสอบแช่ไนโตรเจนเหลว ทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็ว (cryogenic freezing) จนกว่าไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาที่ผิว แล้วจึงหักชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำไปเคลือบทอง การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL/JSM 6400) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ (kV)



รูปที่ 4.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-6400)

4.3.6. การทดสอบสมบัติต้านทานการขีดข่วน

ความต้านทานรอยขีดข่วนเป็นอีกหนึ่งสมบัติสำคัญสำหรับการจะประยุกต์ใช้ PP ให้เกิดความเหมาะสมและไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน ชิ้นงานถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วนโดยใช้ Multi-Finger Scratch/Mar Tester Model 710 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โหลดที่ใช้ทำให้เกิดรอยขีดข่วนคือ 5 10 และ 15 N ความเร็วประมาณ 100 mm/s



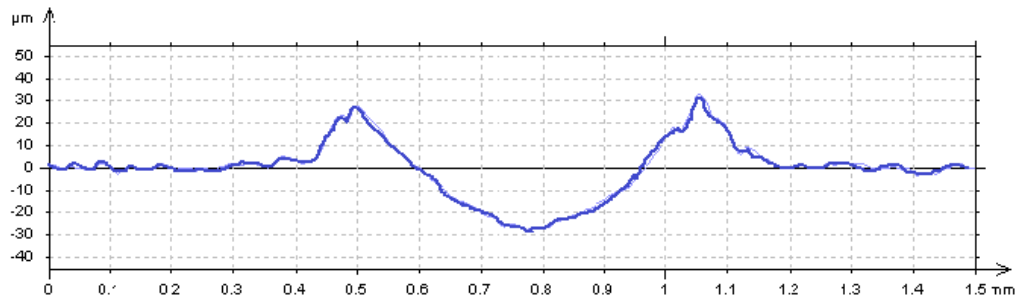
รูปที่ 4.21 เครื่อง Multi-Finger Scratch/Mar Tester Model 710

4.3.6.1 การวัดความต้านทานรอยขีดข่วน

วัดความลึก (Depth) ความกว้าง (Width) และความหยาบ (Roughness) ของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องวัดความหยาบพื้นผิว (Profilometer, Taylor Hobson, Talyscan 150) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 วัดทั้งหมด 603 โพรไฟล์ (Profile) ตามแนวรอยขีดข่วนแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



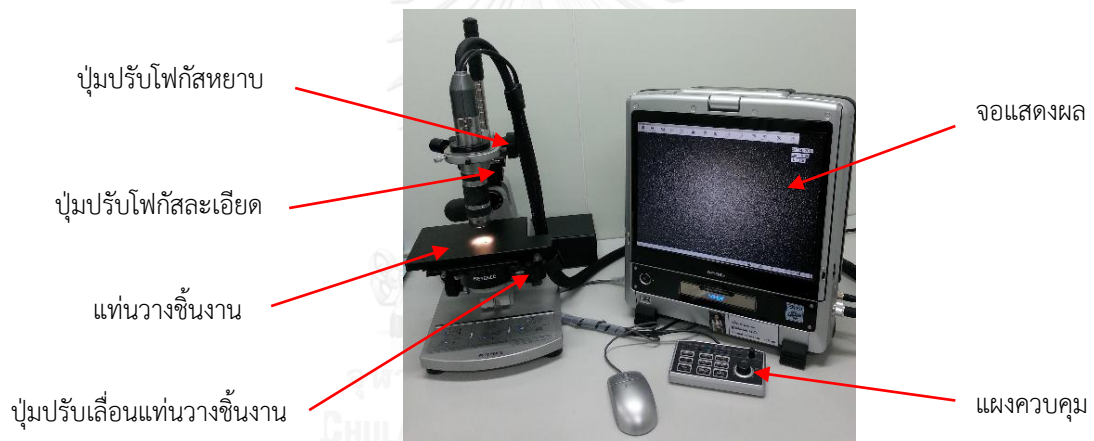
รูปที่ 4.22 เครื่องวัดความหยาบพื้นผิว (Profilometer, Taylor Hobson, Talyscan 150)



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างโพรไฟล์ (profile) ของผิวรอยขีดข่วน

4.3.6.2 ลักษณะรอยขีดข่วนในระดับจุลภาค

นำชิ้นงาน PP ที่ถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วนโดยใช้ Multi-Finger Scratch/Mar Tester Model 710 ไปวิเคราะห์รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (KEYENCE/VHX-600) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ใช้กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะพื้นผิวรอยขีดข่วน ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.24 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (KEYENCE/VHX-600)

บทที่ 5

ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาความต้านทานการขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนโดยใช้สารก่อผลึกแอลฟา สารก่อผลึกเบตา สารตัวเติมอนินทรีย์ ได้แก่ ทัลค วอลลาสโตไนท์ การเติมแต่งด้วยสารเหล่านี้ส่งผลไปถึงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกายภาพ

5.1. สมบัติด้านการเกิดผลึก

5.1.1. ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)

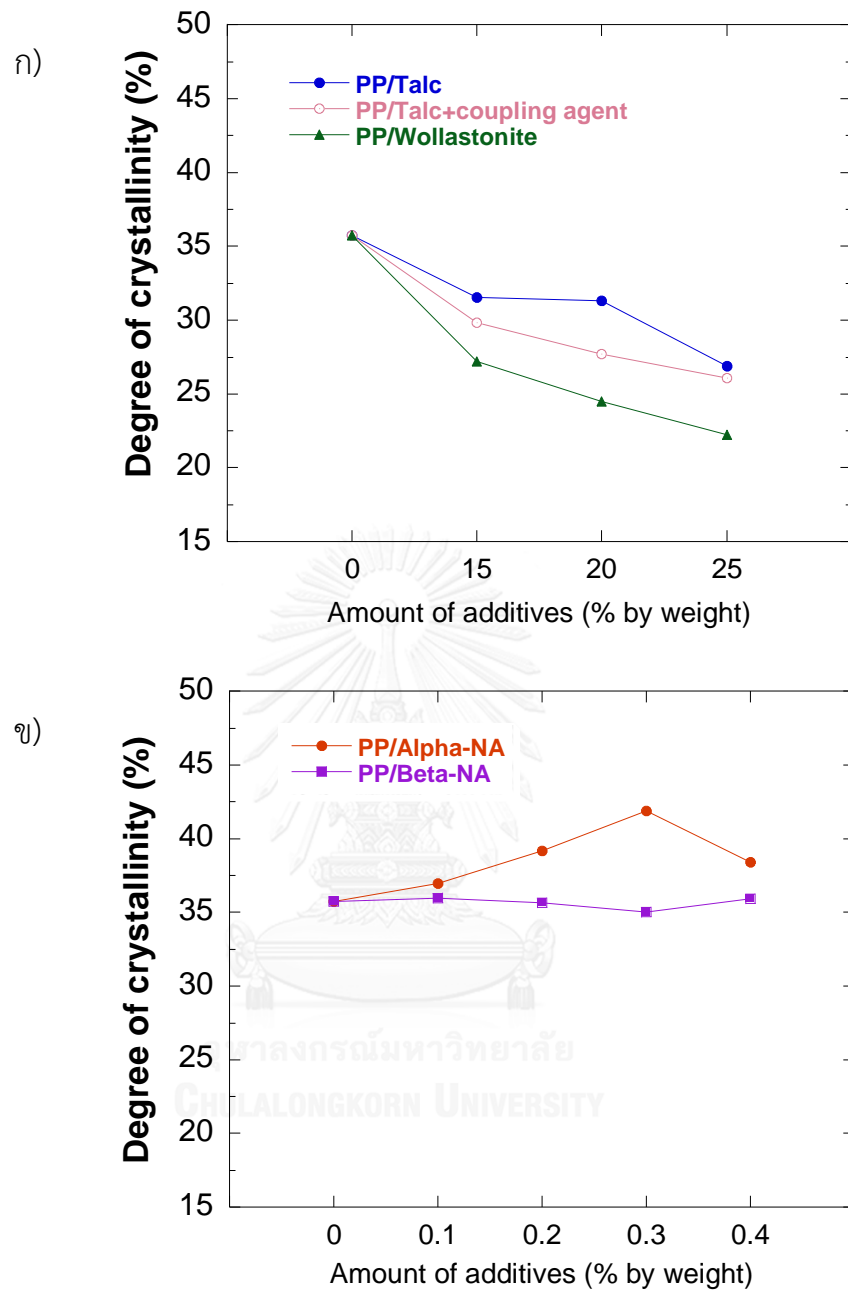
PP จัดเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (semicrystalline polymer) มีความเป็นผลึกบางส่วนและอสัณฐานบางส่วน PP จึงมีสมบัติร่วมกันทั้งของแข็งแบบผลึกและของแข็งอสัณฐาน โดยความเป็นผลึก (crystallinity) ของ PP เกิดจากความมีระเบียบและการเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอของสายโซ่ในโครงร่างผลึก ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมของ PP มีแนวโน้มแข็งเกร็งมากกว่ายืดหยุ่นเนื่องจากความสามารถในการยับยั้งตัวของสายโซ่ PP ลดลง โดยใช้ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity, %X_c) บอกค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความสามารถในการเป็นผลึกสูงสุดของ PP สูตรนั้นๆ

ผลจากการวิเคราะห์ DSC แสดงระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมและคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก ดังรูปที่ 5.1 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.1 ก) พบว่าระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Talc และ Wollastonite เนื่องจากสารตัวเติมมีขนาดใหญ่ มีแนวโน้มทำให้ขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่ PP จึงเกิดส่วนที่เป็นระเบียบในโครงสร้างลดลง โดย PP/Talc ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักมีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 27-32 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งคิดเป็นร้อยละ 11-25 และ PP/Talc + coupling agent พบว่ามีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 26-30 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเป็นผลึกของ PP/Talc และคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณร้อยละ 4-6 และร้อยละ 17-28 ตามลำดับ ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มีระดับความเป็นผลึกน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 22-27 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 25-39

จากรูปที่ 5.1 ข) ซึ่งแสดงระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึกพบว่า PP/ α -NA มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกและเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก โดยมีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 42 ซึ่งมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 36 คิดเป็นร้อยละ 14.3 ส่วน PP/ β -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนักมีระดับความเป็นผลึกค่อนข้างคงที่เฉลี่ยประมาณร้อยละ 35.6 ใกล้เคียงกับระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

PP/ β -NA มีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่า PP/ α -NA เนื่องจากผลึกแบบ α เป็นผลึกที่มีความเสถียรทางความร้อนสามารถเกิดในกระบวนการผลิต PP ในสภาวะทั่วไป จึงมีระดับความเป็นผลึกสูง แต่ผลึก β เป็นผลึกที่เกิดขึ้นในสภาวะจำเพาะ เช่น การให้ PP หลอมภายใต้ภาวะแรงเฉือน หรือการใช้สารก่อผลึกเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก β นอกจากนี้ผลึก β ยังมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้ระดับความเป็นผลึกของ PP/ β -NA ต่ำกว่าระดับความเป็นผลึกของ PP/ α -NA





รูปที่ 5.1 ระดับความเป็นผลึกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

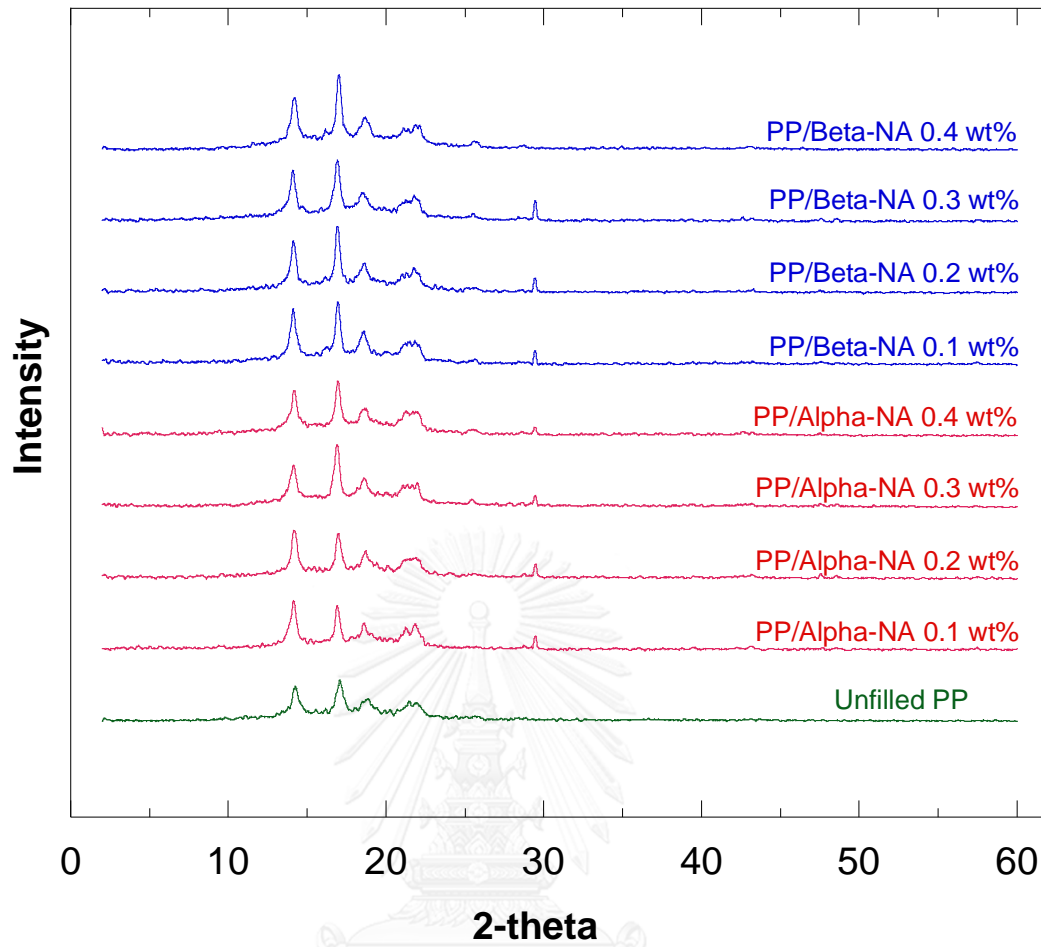
5.1.2. โครงสร้างผลึก (Crystalline Structure)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ผ่านหน่วยผลึกที่มีระนาบต่างกัน ทำให้เกิดมุมเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน

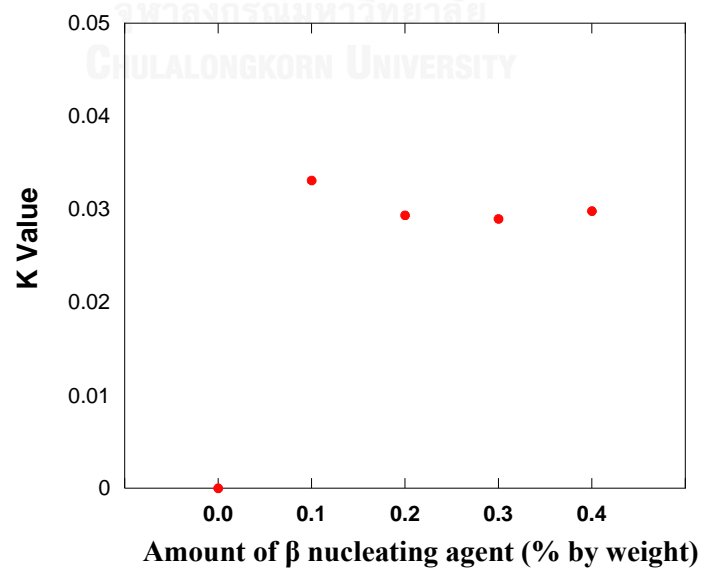
สำหรับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งพบว่าเกิดมุมเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังนี้ 14.1° , 16.9° , 18.8° , 21.7° , และ 25.5° โดยสัมพันธ์กับรูปแบบหน่วยผลึก (1 1 0), (0 4 0), (1 3 0), (1 1 1) และ (4 0 0) ตามลำดับ พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละมุมเลี้ยวเบนแสดงถึงปริมาณของหน่วยผลึกชนิดนั้นๆ [37, 53] แสดงดังรูปที่ 5.2 สำหรับคอมพาวนด์ PP/ α -NA พบว่ามุมเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มุม 14.1° , 16.9° , 18.8° , 21.7° , และ 25.5° มีพื้นที่ใต้กราฟของมุมเลี้ยวเบนเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งสัมพันธ์กับหน่วยผลึกแบบ (1 1 0), (0 4 0), (1 3 0), (1 1 1) และ (4 0 0) ตามลำดับ ซึ่งหน่วยผลึกทั้ง 5 แบบนี้จัดอยู่ในกลุ่มผลึกโครงสร้าง Monoclinic cell หรือผลึกแบบ α ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสารก่อผลึก α สามารถเหนี่ยวนำการเกิดผลึกแบบ Monoclinic หรือผลึกแบบ α ได้

ส่วน PP/ β -NA พบว่าเกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใต้กราฟของมุมเลี้ยวเบนที่แตกต่างจากคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งและ PP/ α -NA กล่าวคือ พบมุมเลี้ยวเบนที่ 16° เล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงหน่วยผลึกรูปแบบ (3 0 0) เป็นผลึกโครงสร้าง Trigonal cell หรือผลึกแบบ β เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามยังพบว่ามีพื้นที่ใต้กราฟของมุมเลี้ยวเบนของหน่วยผลึกโครงสร้างแบบ Monoclinic cell หรือผลึกแบบ α ดังแสดงในรูปที่ 5.2

ผลการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของ PP/ β -NA ในปริมาณต่างๆกัน เมื่อนำปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นมาคำนวณหาสัดส่วนของผลึก β (Fraction of Beta crystalline phase, K Value) ด้วยสมการที่ (4.2) ของ Turner Jones และคณะ [53] แสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่า PP/ β -NA นั้น สัดส่วนของผลึก β ในคอมพาวนด์ PP มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณการใส่สารก่อผลึก β



รูปที่ 5.2 XRD pattern ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

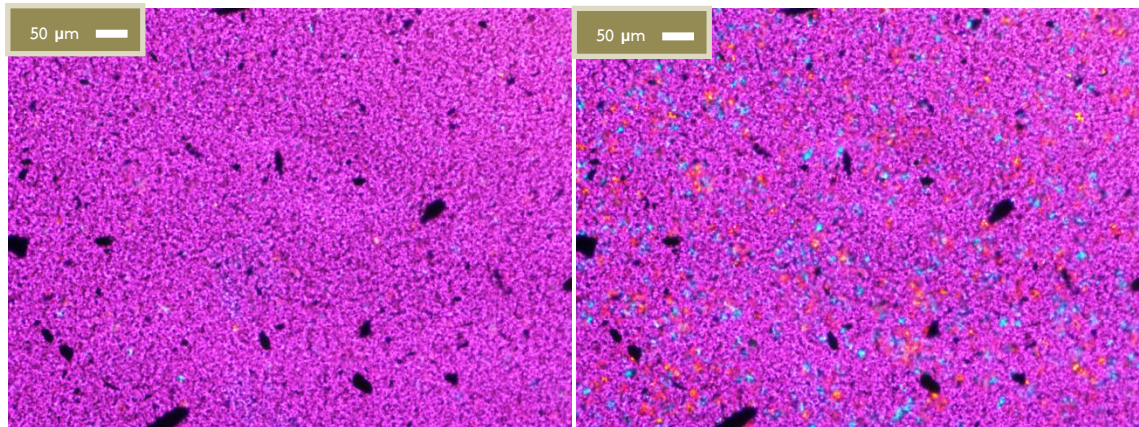


รูปที่ 5.3 สัดส่วนของผลึก β จากการคำนวณ (Fraction of β crystalline phase, K Value)

5.1.3. พฤติกรรมการเกิดผลึก (Crystallization behavior)

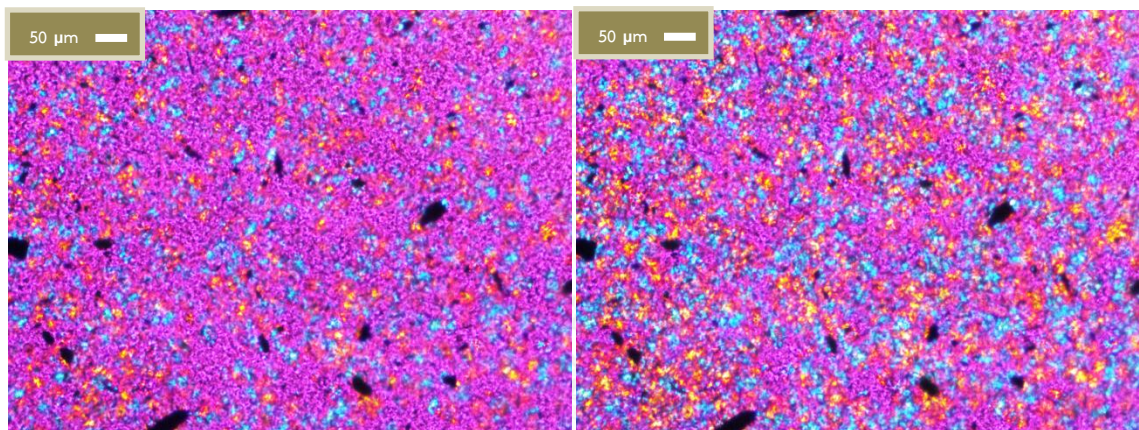
รูปที่ 5.4-5.12 แสดงพฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึก และ PP/สารก่อผลึก ที่อุณหภูมิ 140 °C พบว่า การเติมสารก่อผลึกในคอมพาวนด์ PP ทำให้พฤติกรรมการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทั้งด้านขนาดผลึกและเวลาที่ใช้ในการก่อผลึก โดย PP/ α -NA และ PP/ β -NA ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า และใช้เวลาในการก่อผลึกน้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึกอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึกเริ่มเกิดผลึกเมื่อเวลาผ่านไป 2 นาทีที่อุณหภูมิ 140 °C และค่อยๆเกิดผลึกอย่างช้าๆ กระบวนการเติบโตของผลึกจะเริ่มคงที่และหยุดการเปลี่ยนแปลง ณ เวลาประมาณ 10 นาที และมีขนาดผลึกใหญ่กว่า PP/สารก่อผลึก อย่างเป็นได้ชัด

ส่วน PP/ α -NA และ PP/ β -NA เริ่มเกิดผลึกที่อุณหภูมิ 140 °C และเกิดผลึกอย่างรวดเร็ว โดยกระบวนการเติบโตของผลึกจะเริ่มคงที่และหยุดการเปลี่ยนแปลง ณ เวลาประมาณ 3-4 นาที สำหรับ PP/ α -NA และ PP/ β -NA ปริมาณร้อยละ 0.1-0.2 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาประมาณ 1 นาที สำหรับ PP/ α -NA และ PP/ β -NA ปริมาณร้อยละ 0.3-0.4 โดยน้ำหนัก โดยยิ่งเพิ่มปริมาณการเติมสารก่อผลึกมากขึ้น จะยิ่งมีผลให้ผลึกมีขนาดเล็กลง และใช้เวลาในการก่อผลึกน้อยลง เนื่องจากความหนาแน่นของผลึกมากขึ้นจึงทำให้ผลึกบรรจบกับผลึกข้างเคียงและหยุดการเติบโตเร็วขึ้น ทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลงและเวลาที่ใช้ในกระบวนการเกิดผลึกลดลง อย่างไรก็ตามไม่สามารถวัดขนาดผลึกได้เนื่องจากผลึกมีขนาดเล็กและละเอียดจนไม่สามารถวัดขนาดได้



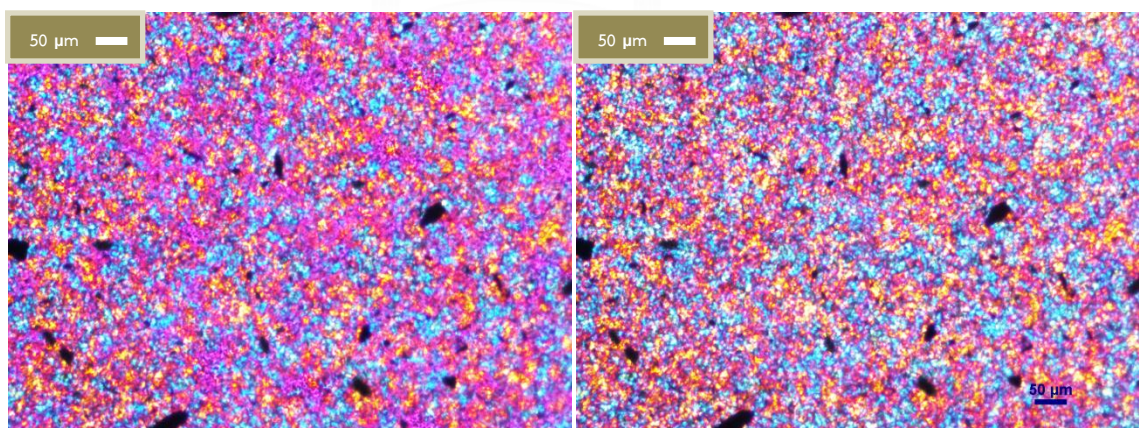
(ก) Unfilled PP at 140 °C

(ข) Unfilled PP, 2 นาที



(ค) Unfilled PP, 3 นาที

(ง) Unfilled PP, 4 นาที



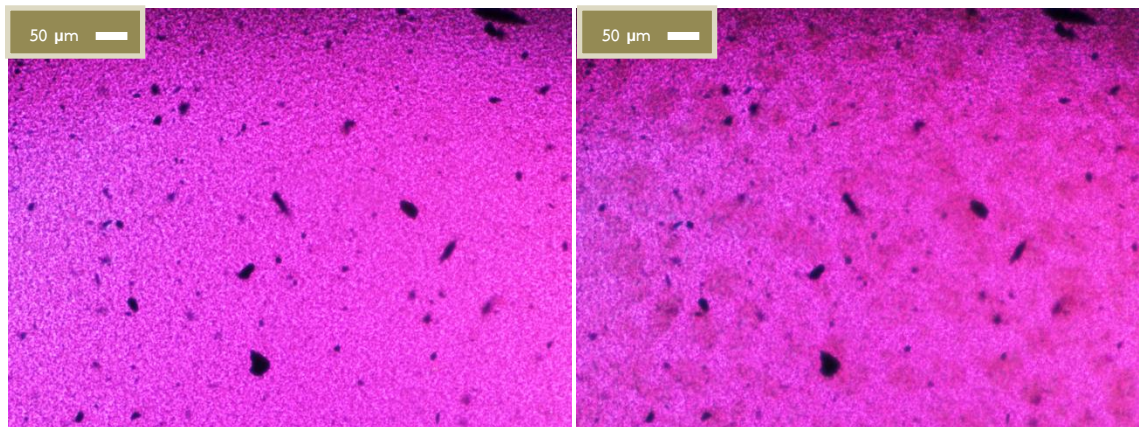
(จ) Unfilled PP, 5 นาที

(ฉ) Unfilled PP, 10 นาที

รูปที่ 5.4 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารก่อผลึก

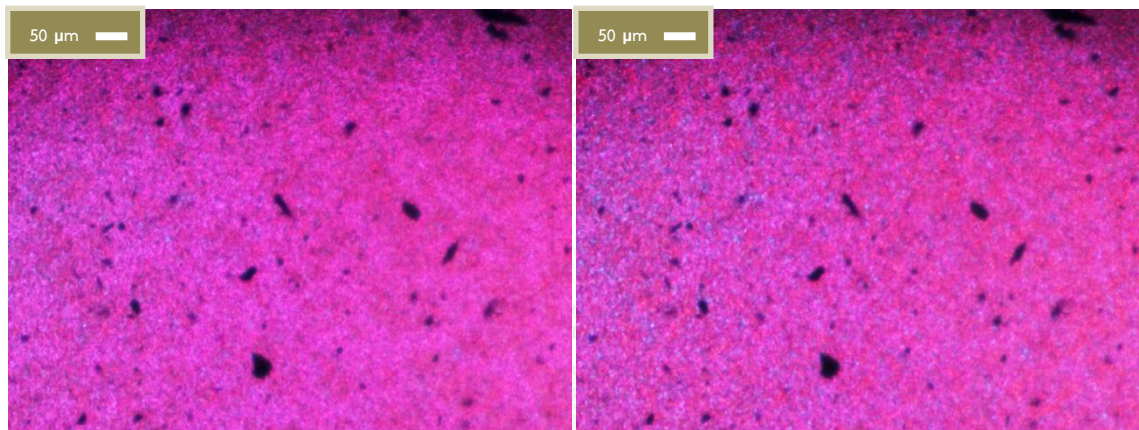
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก (ข) 2 นาที

(ค) 3 นาที (ง) 4 นาที (จ) 5 นาที (ฉ) 10 นาที



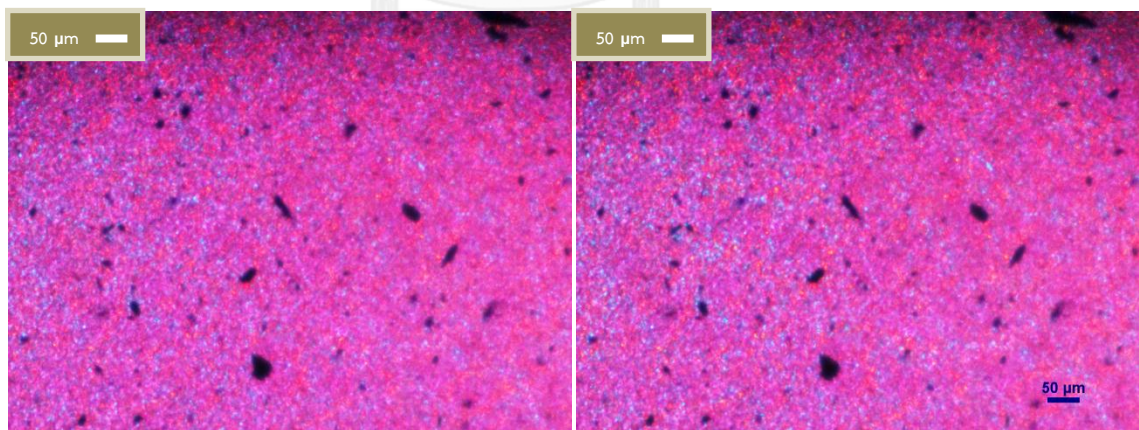
(ก) PP/α-NA 0.1wt% at 145 °C

(ข) PP/α-NA 0.1wt% at 140 °C



(ค) PP/α-NA 0.1wt%, 10 วินาที

(ง) PP/α-NA 0.1wt%, 30 วินาที



(จ) PP/α-NA 0.1wt%, 1 นาฬิกา

(ฉ) PP/α-NA 0.1wt%, 3 นาฬิกา

รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/α-NA 0.1wt%

(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 145 °C (ข) ที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

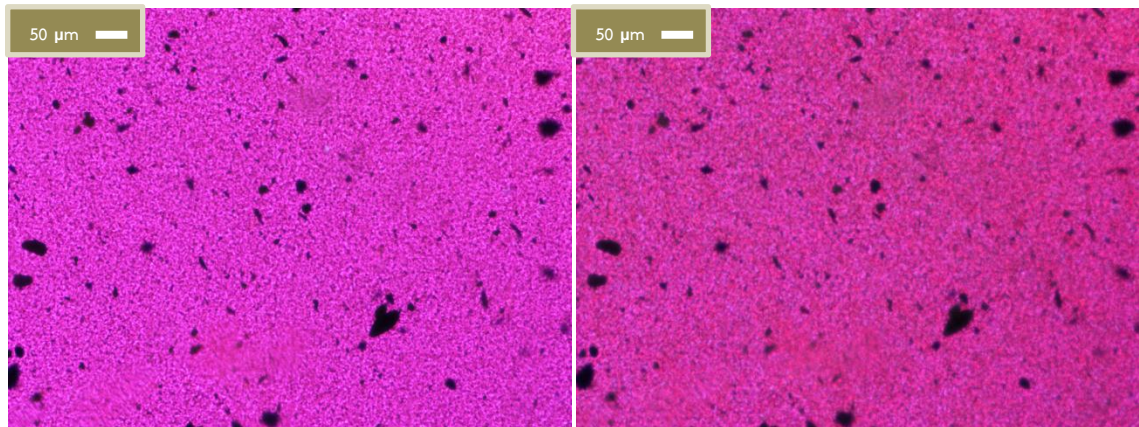
(ค) 10 วินาที (ง) 30 วินาที (จ) 1 นาฬิกา (ฉ) 3 นาฬิกา



รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/α-NA 0.2wt%

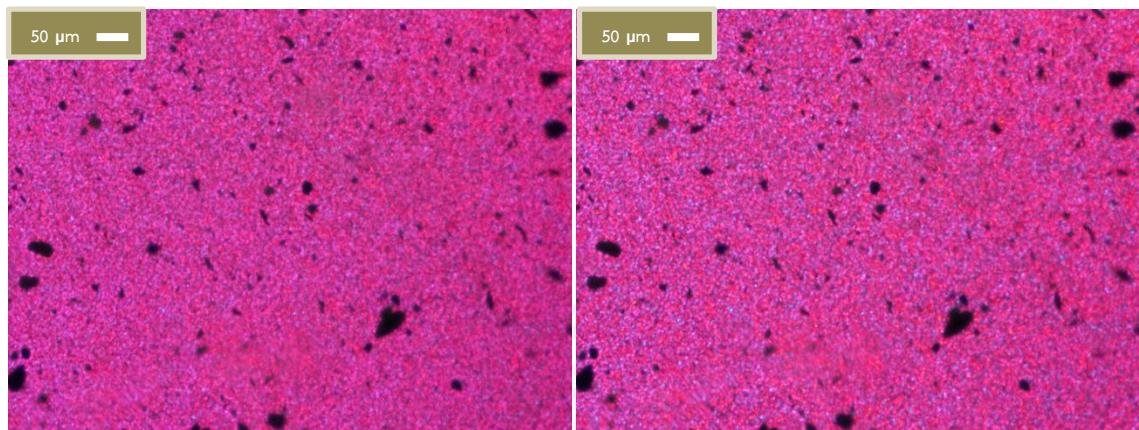
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก (ข) 1 นาที

(ค) 2 นาที (ง) 2.30 นาที (จ) 3 นาที (ฉ) 4 นาที



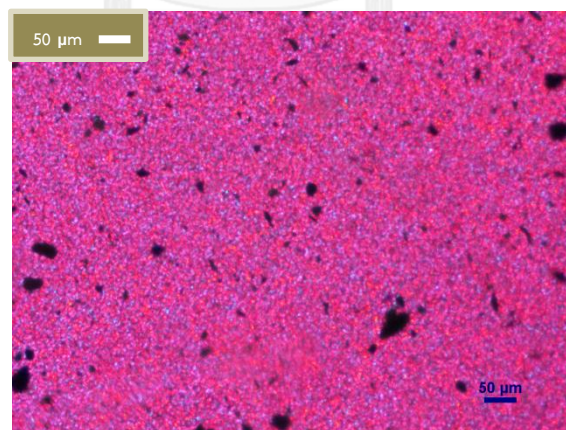
(ก) PP/α-NA 0.3wt% at 150 °C

(ข) PP/α-NA 0.3wt% at 140 °C



(ค) PP/α-NA 0.3wt%, 10 วินาที

(ง) PP/α-NA 0.3wt%, 30 วินาที

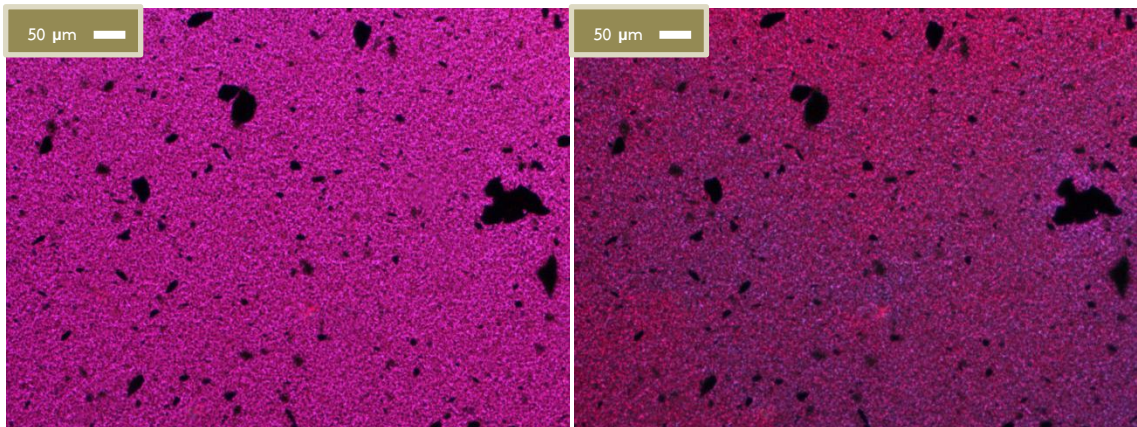


(จ) PP/α-NA 0.3wt%, 1 นาที

รูปที่ 5.7 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/α-NA 0.3wt%

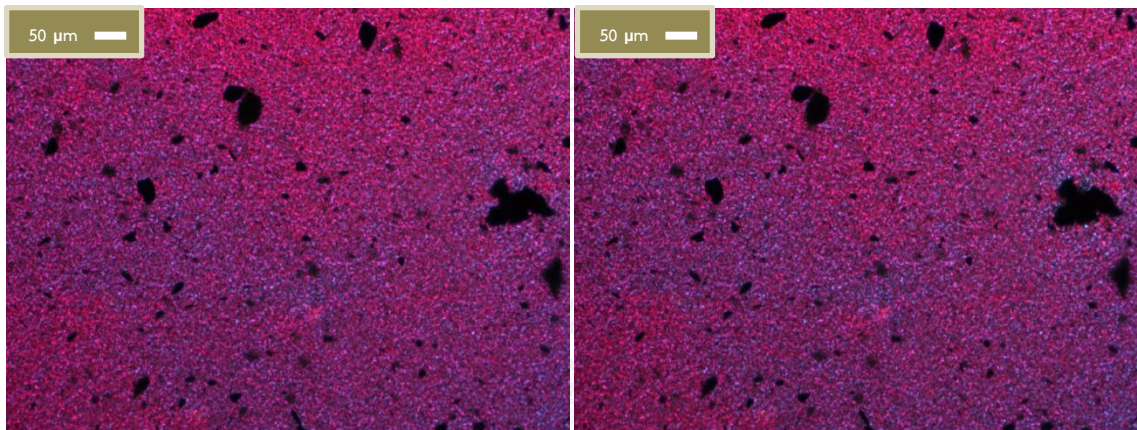
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) ที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

(ค) 10 วินาที (ง) 30 วินาที (จ) 1 นาที



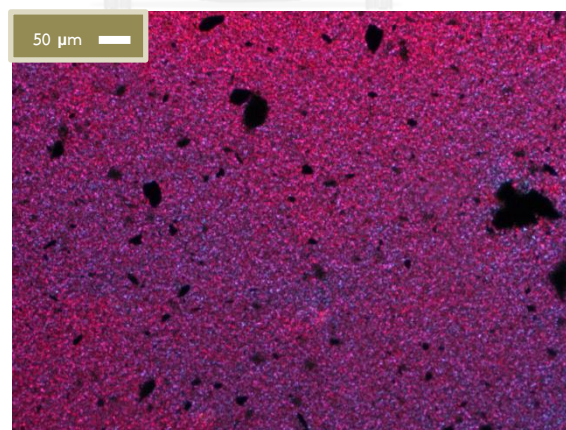
(ก) PP/α-NA 0.4wt% at 150 °C

(ข) PP/α-NA 0.4wt% at 142 °C



(ค) PP/α-NA 0.4wt% at 140 °C

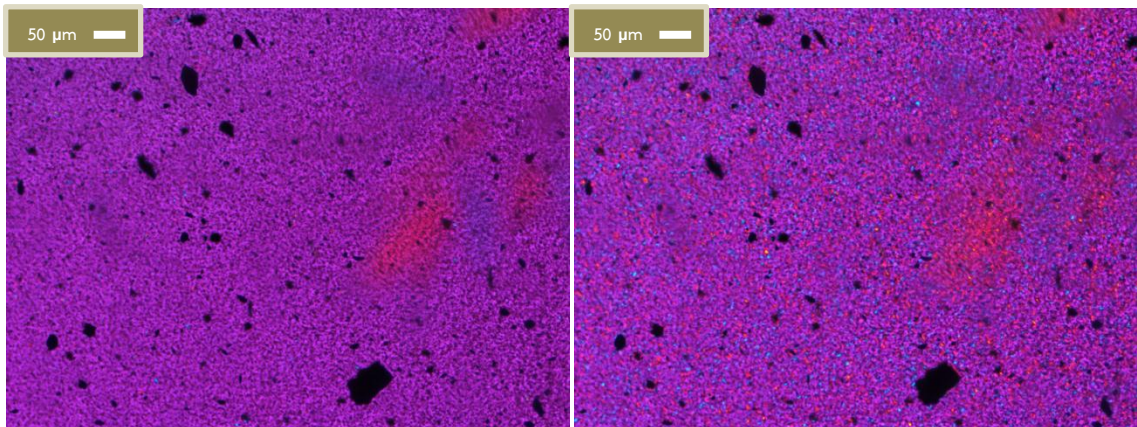
(ง) PP/α-NA 0.4wt%, 30 วินาที



(จ) PP/α-NA 0.4wt%, 1 นาที

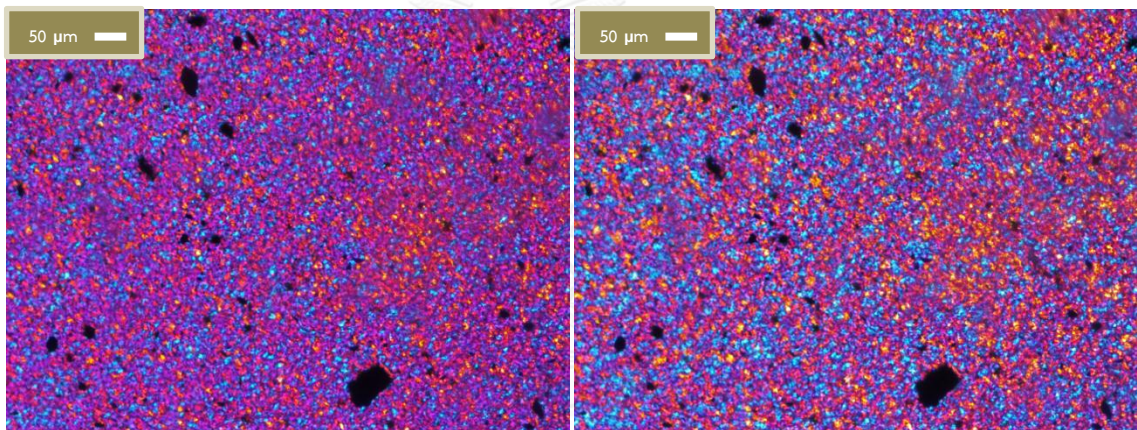
รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/α-NA 0.4wt%

- (ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 142 °C
 (ค) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก (ง) 30 วินาที (จ) 1 นาที



(ก) PP/β-NA 0.1wt% at 140 °C

(ข) PP/β-NA 0.1wt%, 1 นาที



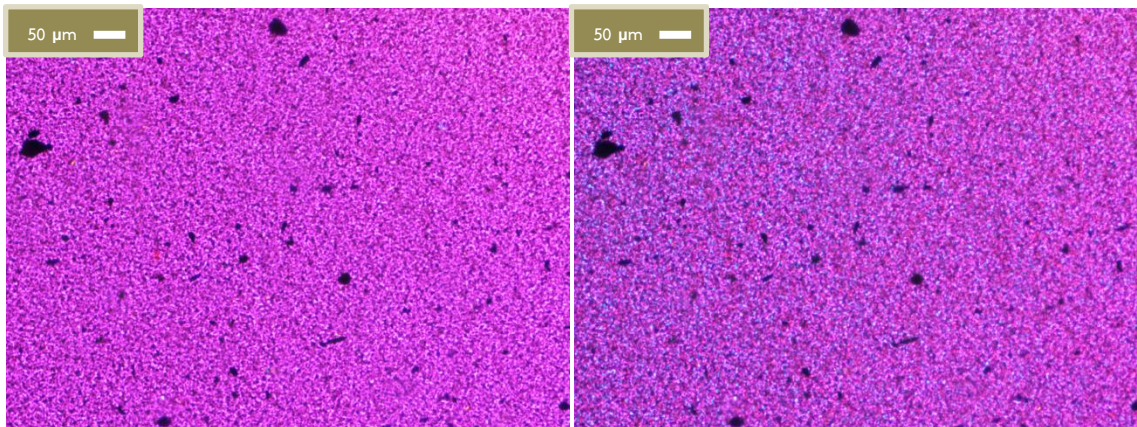
(ค) PP/β-NA 0.1wt%, 2 นาที

(ง) PP/β-NA 0.1wt%, 3 นาที

รูปที่ 5.9 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/β-NA 0.1wt%

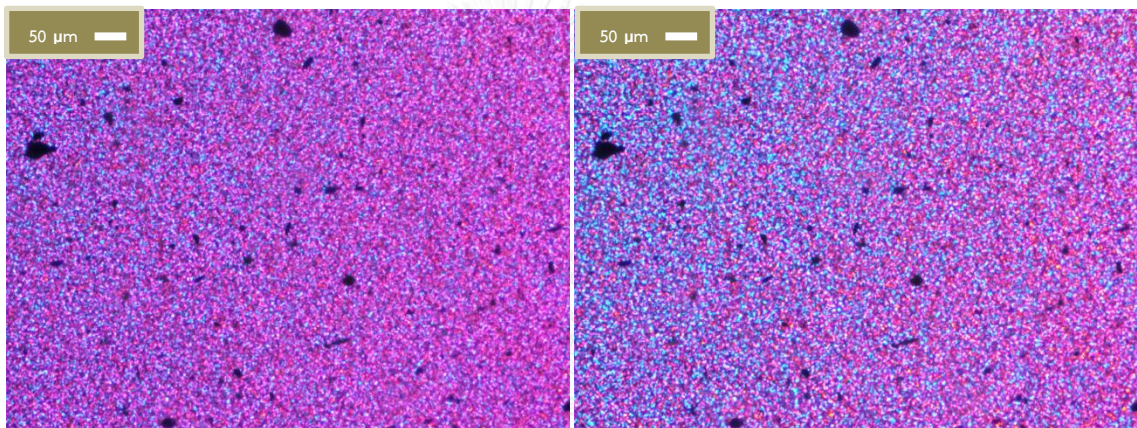
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

(ข) 1 นาที (ค) 2 นาที (ง) 3 นาที



(ก) PP/β-NA 0.2wt% at 150 °C

(ข) PP/β-NA 0.2wt%, at 140 °C



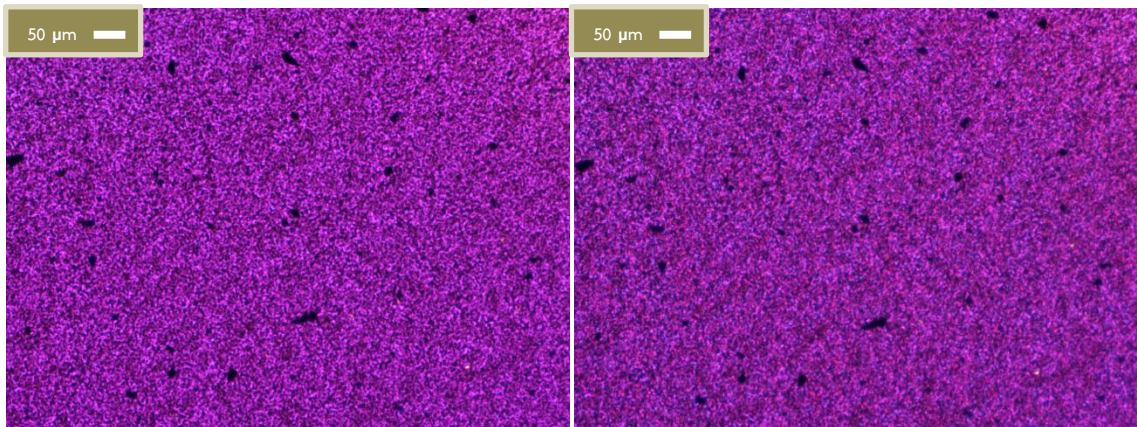
(ค) PP/β-NA 0.2wt%, 30 วินาที

(ง) PP/β-NA 0.2wt%, 1 นาที

รูปที่ 5.10 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/β-NA 0.2 wt%

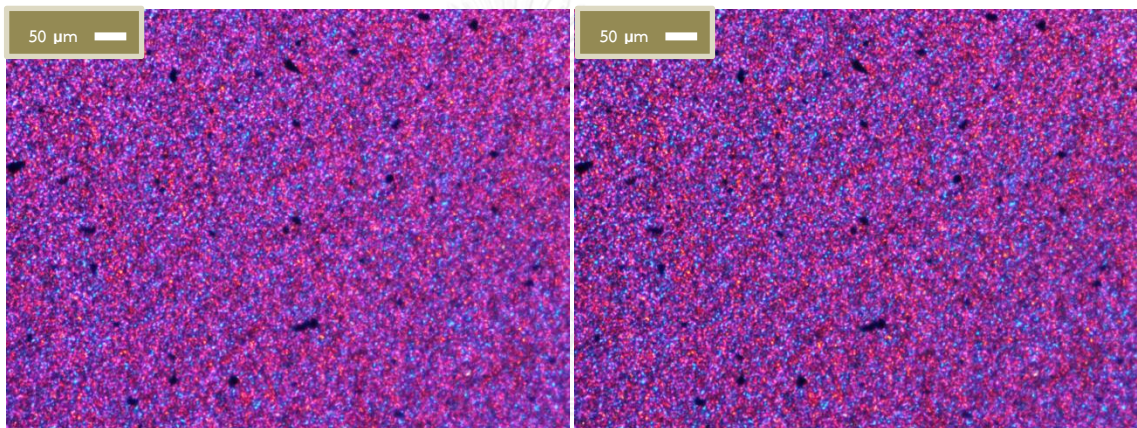
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

(ค) 1 นาที (ค) 2 นาที (ง) 3 นาที



(ก) PP/β-NA 0.3wt% at 150 °C

(ข) PP/β-NA 0.3wt%, at 140 °C



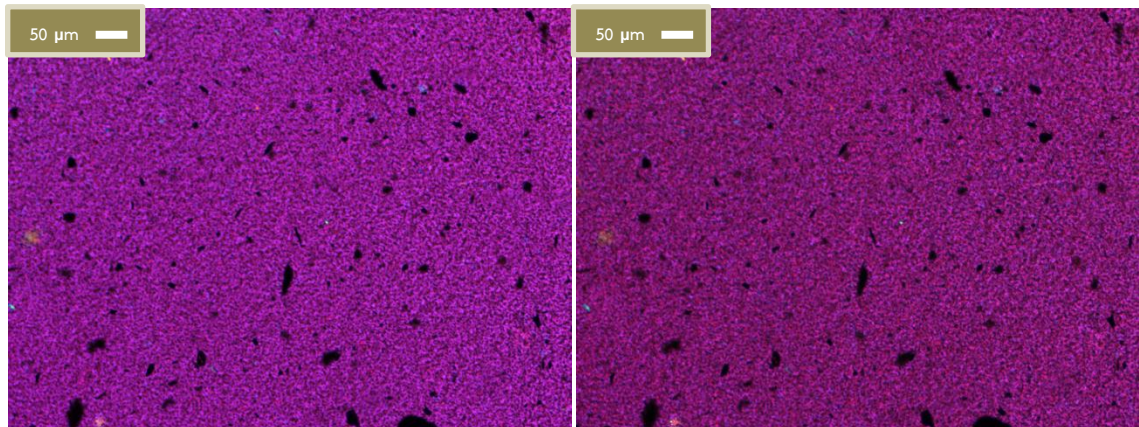
(ค) PP/β-NA 0.3wt%, 30 วินาที

(ง) PP/β-NA 0.3wt%, 1 นาที

รูปที่ 5.11 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/β-NA 0.3 wt%

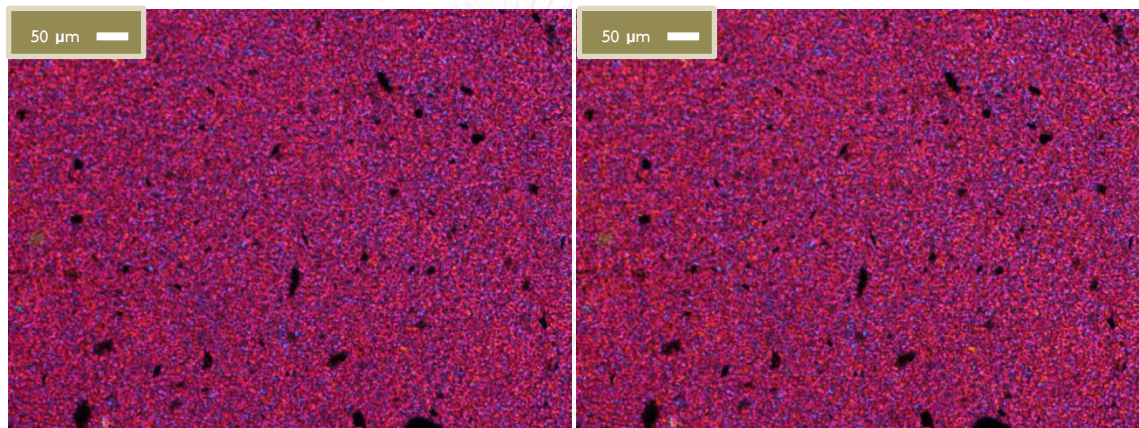
(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

(ข) 1 นาที (ค) 2 นาที (ง) 3 นาที



(ก) PP/β-NA 0.4wt% at 150 °C

(ข) PP/β-NA 0.4wt%, at 140 °C



(ค) PP/β-NA 0.4wt%, 30 วินาที

(ง) PP/β-NA 0.4wt%, 1 นาที

รูปที่ 5.12 พฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ PP/β-NA 0.4 wt%

(ก) ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 140 °C ณ เวลาการตกผลึก

(ข) 1 นาที (ค) 2 นาที (ง) 3 นาที

5.2. สมบัติเชิงความร้อน

สมบัติเชิงความร้อนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิก่อผลึก และ อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน เนื่องจากส่งผลในด้านการขึ้นรูปและการนำไปใช้งาน

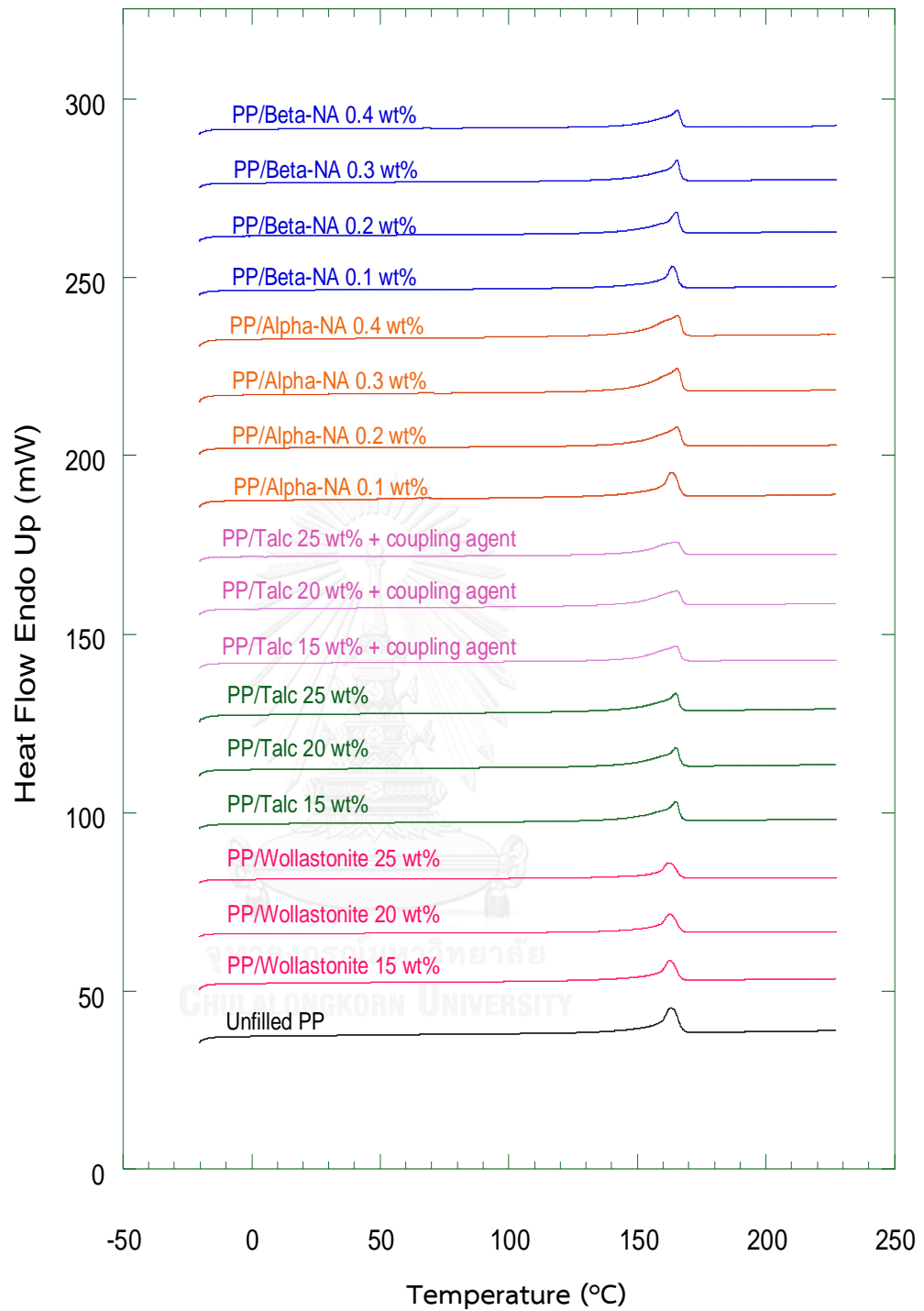
5.2.1. อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Crystalline Temperature, T_m)

อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Crystalline Temperature, T_m) เป็นอุณหภูมิที่บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสถานะของ PP การหลอมเหลวเกิดขึ้นเมื่อสายโซ่ PP ได้รับพลังงานมากพอจนเกิดการขยับหรือเคลื่อนที่ ข้อมูลด้าน T_m มีประโยชน์ต่อการขึ้นรูปเช่น ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป PP ต้องถูกหลอมจนเหลว ณ อุณหภูมิสูงกว่า T_m ของ PP เป็นต้น

ผลจาก DSC scan ในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.13 PP/ α -NA และ PP/ β -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก พบว่ามี T_m ค่อนข้างคงที่เฉลี่ยอยู่ ณ ระดับ 165 ± 0.9 °C PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มี T_m ค่อนข้างคงที่เฉลี่ยอยู่ ณ ระดับ 164.9 ± 0.1 °C ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก พบว่ามี T_m คงที่เฉลี่ยอยู่ที่ 162.5 ± 0.2 °C ผลจาก DSC scan อุณหภูมิการหลอมเหลวของ PP/ α -NA PP/ β -NA PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite ผลึกที่เกิดขึ้น คาดว่าเป็นผลึก α ทั้งหมดเนื่องจากเกิดการหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิเดียวซึ่งเป็นอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก α โดยผลึก α มีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ประมาณ 160 °C

ตารางที่ 5.1 ผล DSC scan ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Heat of fusion (J/g)	Degree of Crystallinity (%)	T _c (°C)	T _m (°C)
Unfilled PP	74.73	35.76	118.44	162.52
PP/ α -NA 0.1 wt%	77.24	36.96	118.90	163.36
PP/ α -NA 0.2 wt%	81.90	39.19	129.92	165.39
PP/ α -NA 0.3 wt%	87.52	41.88	130.66	165.53
PP/ α -NA 0.4 wt%	80.24	38.39	131.16	165.70
PP/ β -NA 0.1wt%	75.16	35.96	122.91	163.72
PP/ β -NA 0.2wt%	74.58	35.68	127.41	165.04
PP/ β -NA 0.3wt%	73.16	35.00	128.58	165.38
PP/ β -NA 0.4wt%	75.11	35.94	129.41	165.57
PP/Talc 15 wt%	62.36	29.84	129.87	165.09
PP/Talc 20 wt%	57.93	27.72	131.20	165.08
PP/Talc 25 wt%	54.50	26.07	132.18	165.10
PP/Talc+coupling agent 15 wt%	65.94	31.55	127.42	164.90
PP/Talc+coupling agent 20 wt%	65.42	31.30	127.76	164.88
PP/Talc+coupling agent 25 wt%	56.23	26.90	127.92	164.88
PP/Wollastonite 15 wt%	56.85	27.20	119.25	162.55
PP/Wollastonite 20 wt%	51.20	24.50	118.21	162.59
PP/Wollastonite 25 wt%	46.53	22.26	118.53	162.25



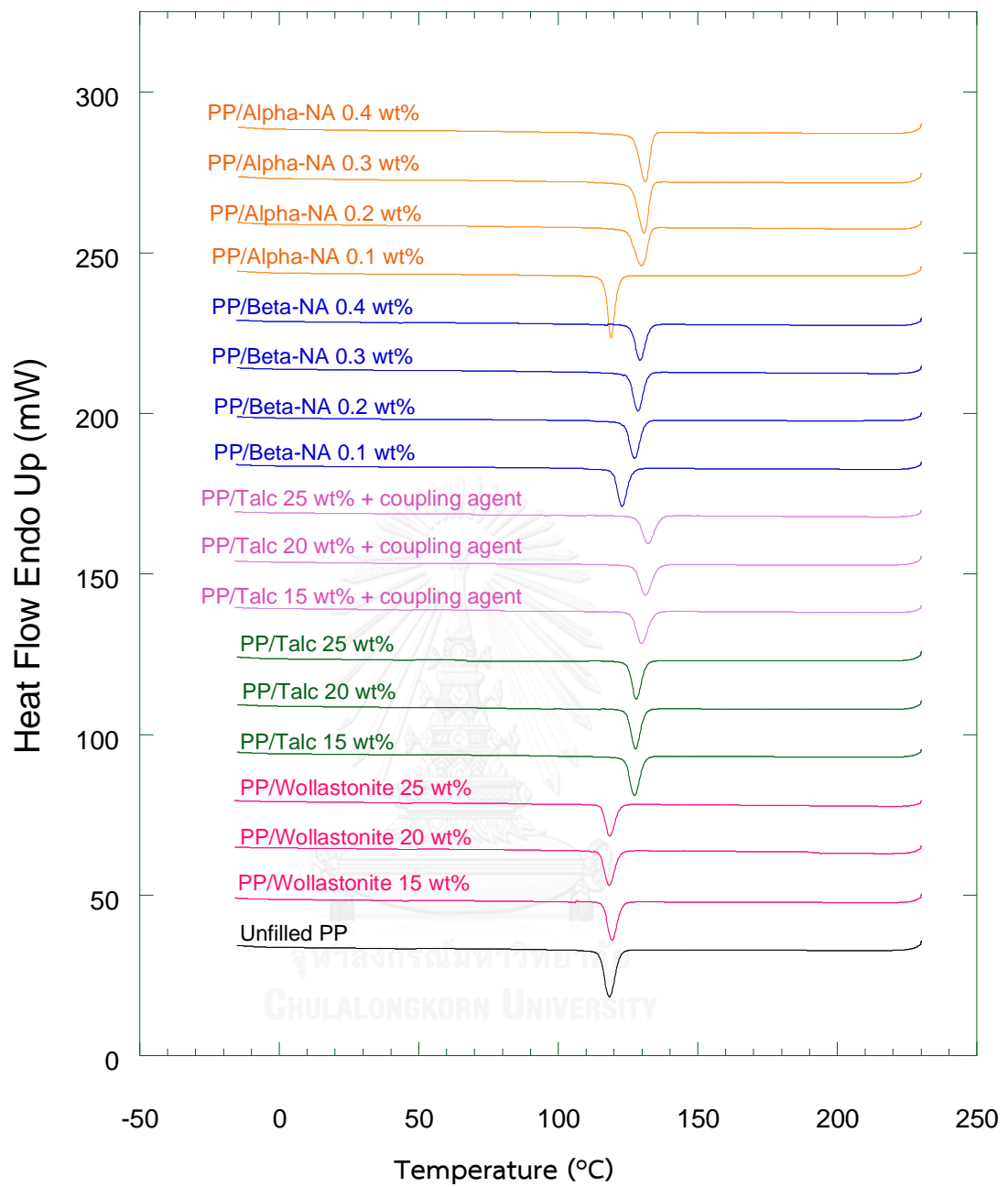
รูปที่ 5.13 DSC scans แสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

5.2.2. อุณหภูมิก่อผลึก (Crystallization Temperature, T_c)

อุณหภูมิก่อผลึกของ PP เป็นช่วงระดับอุณหภูมิที่สายโซ่โพลิเมอร์ PP จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่มีระเบียบ โดยภาคอุตสาหกรรมและผู้ฉีดขึ้นรูปต้องการให้ T_c เพิ่มสูงขึ้นเพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Cycle time)

ตารางที่ 5.1 และและรูปที่ 5.14 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิก่อผลึกด้วย DSC พบว่า PP/ α -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก มี T_c เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารก่อผลึก α ที่เติม โดย T_c เพิ่มขึ้น 11.5 °C จาก 118.44 °C สำหรับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งไปอยู่ ณ 129.92 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 131.2 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า T_c ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณ 12.9 °C ส่วน PP/ β -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก T_c มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึก และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 129.4 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า T_c ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณ 11 °C

ส่วน PP/Talc ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มี T_c คงที่ ณ ระดับ 127.4±0.6 °C ซึ่งมากกว่า T_c ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ประมาณ 9.1 °C และเมื่อเติม coupling agent ลงไปใน PP/Talc พบว่า T_c มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2-4 °C ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มี T_c ค่อนข้างคงที่เฉลี่ย 118.7±0.5 °C ซึ่งใกล้เคียงกับ T_c ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง



รูปที่ 5.14 DSC scans แสดงอุณหภูมิการก่อผลึกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

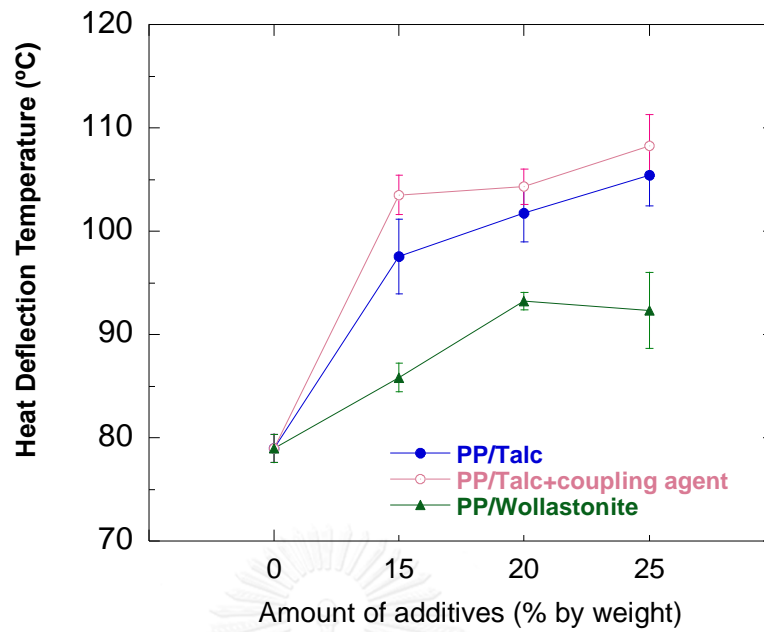
5.2.3. อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature, HDT)

อุณหภูมิโก่งตัวทางความร้อน (HDT) เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ PP สามารถคงรูปอยู่ไม่เกิดการอ่อนตัวหรือโก่งตัว เป็นข้อมูลสำคัญที่บ่งบอกอุณหภูมิสูงสุดหากต้องการนำ PP ไปใช้งาน

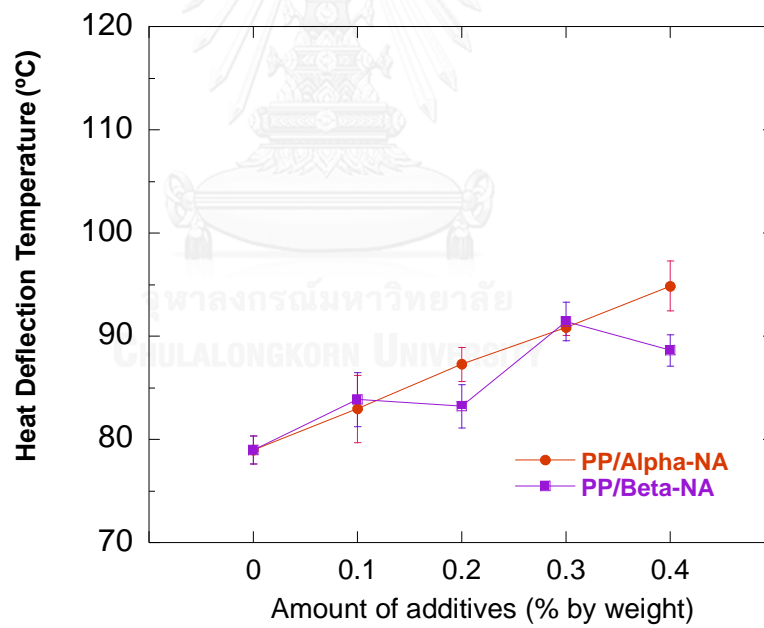
รูปที่ 5.15 ก) แสดงผล HDT ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารตัวเติม พบว่า HDT มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc มีค่า HDT สูงสุดประมาณ 105.43 ± 0.03 °C เมื่อเติม Talc ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า HDT ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีค่าอยู่ระดับ 79 ± 0.03 °C ประมาณ 27 °C และเมื่อเติม coupling agent ลงไปใน PP/Talc พบว่ามีอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ 2-6 °C ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณ Wollastonite โดยมีค่า HDT สูงสุดประมาณ 93.3 ± 0.8 °C เมื่อเติม Wollastonite ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณ 14 °C

รูปที่ 5.15 ข) แสดงผล HDT ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีแนวโน้มมี HDT เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารก่อผลึก α ที่เติม โดยมีค่า HDT สูงสุดประมาณ 94.86 ± 2.41 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก α ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า HDT ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณ 16 °C ส่วน PP/ β -NA มีค่า HDT สูงสุดประมาณ 91.43 ± 1.85 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก β ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า HDT ของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณ 12.4 °C

ก)



ข)



รูปที่ 5.15 อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

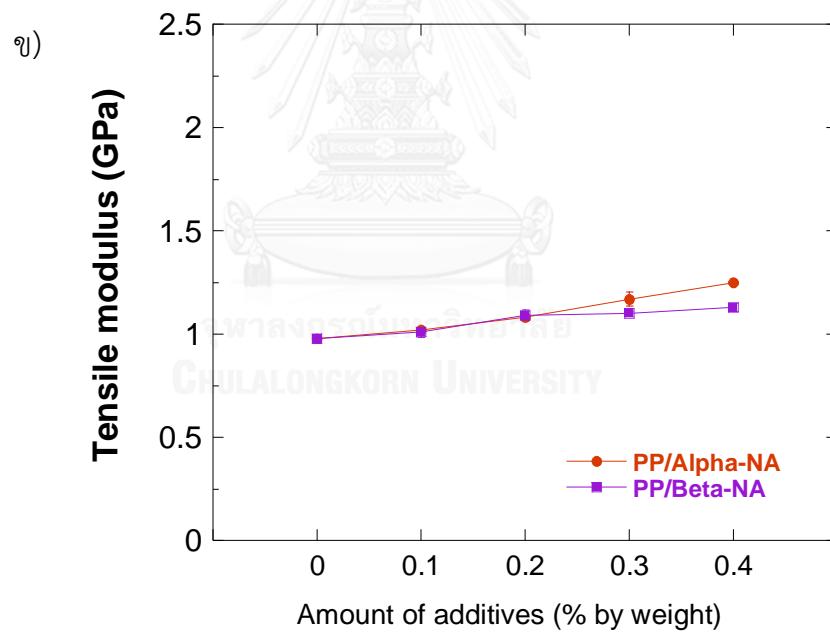
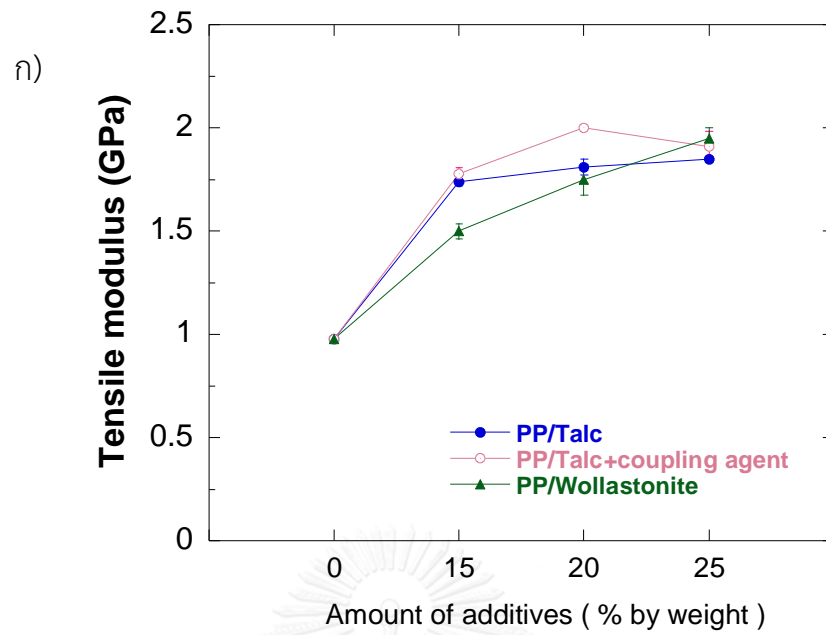
5.3. สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลเป็นพฤติกรรมของ PP ที่ตอบสนองมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ เป็นอีกหนึ่งสมบัติสำคัญสำหรับการพิจารณานำ PP ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดความเหมาะสมและไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน สมบัติเชิงกลที่ศึกษาครอบคลุมถึง ความสามารถในการรับแรงดึงและแรงกด ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก

5.3.1. สมบัติภายใต้แรงดึง

มอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.16 ก) พบว่า มอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดยคอมพาวนด์ PP/Talc ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีมอดูลัสแรงดึงสูงขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มปริมาณ Talc โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.8 ± 0.06 GPa ซึ่งมากกว่ามอดูลัสแรงดึงของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งโดยที่มีค่าอยู่ระดับ 0.98 ± 0.01 GPa ราวร้อยละ 45.5 เมื่อปรับปรุงด้วยการเติม coupling agent ใน PP/Talc พบว่ามีมอดูลัสแรงดึงมากกว่า PP/Talc เล็กน้อย คือมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.89 ± 0.1 MPa ซึ่งมากกว่าของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 48 ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มีมอดูลัสแรงดึงสูงสุดเมื่อเติม Wollastonite ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าประมาณ 1.95 ± 0.05 GPa ซึ่งมากกว่าของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณร้อยละ 49.7

รูปที่ 5.16 ข) แสดงมอดูลัสแรงดึงของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่ามอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึก โดย PP/ α -NA และ PP/ β -NA มีค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมสารก่อผลึกร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ประมาณ 1.25 ± 0.006 GPa และ 1.13 ± 0.02 GPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามอดูลัสแรงดึงของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ราวร้อยละ 27.6 และ 15.3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 มอดูลัสแรงดึงของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

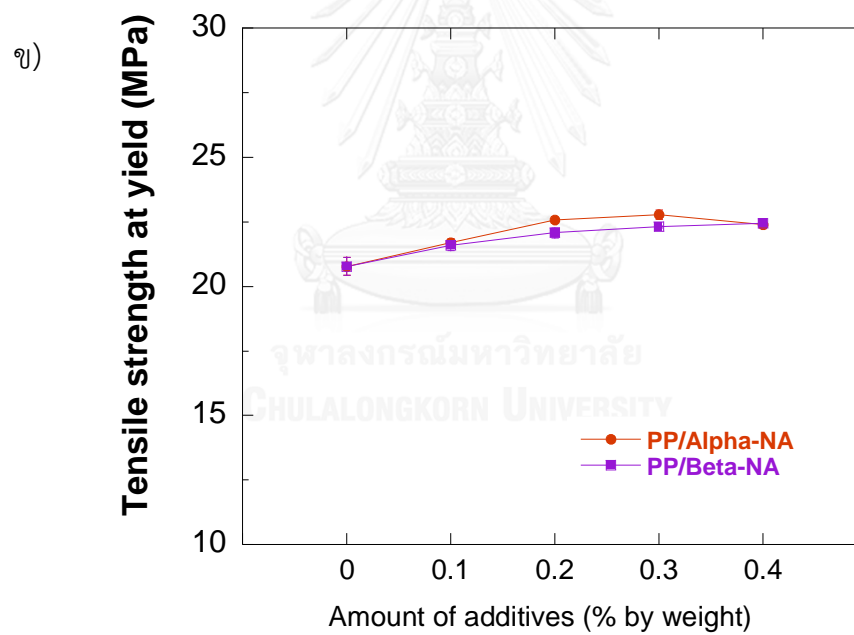
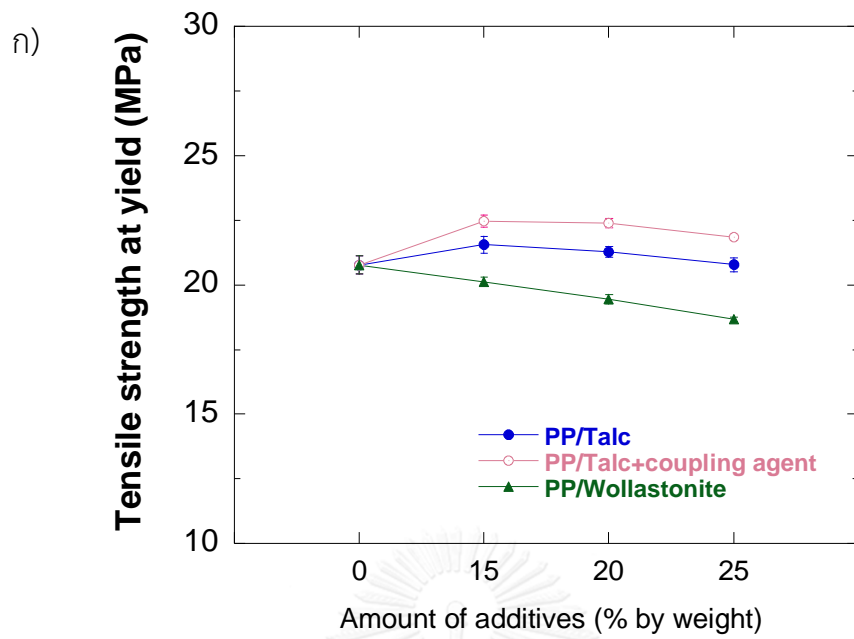
ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

รูปที่ 5.17 แสดงแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมและคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก จากรูป 5.17 ก) พบว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมมีแนวโน้มมีค่าแรงดึง ณ จุดครากลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมโดย PP/Talc ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 จนถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีแรงดึง ณ จุดครากเฉลี่ยประมาณ 21.3 ± 0.5 MPa ซึ่งสูงกว่าแรงดึง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีค่าอยู่ระดับ 20.8 ± 0.02 MPa เล็กน้อยราวร้อยละ 2.4 และ PP/Talc + coupling agent มีค่าเฉลี่ยประมาณ 22.3 ± 0.3 MPa ซึ่งมากกว่า PP/Talc และ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ราวร้อยละ 4.5 และ 6.7 ตามลำดับ ส่วน PP/Wollastonite มีแรงดึง ณ จุดครากเฉลี่ยประมาณ 19.4 ± 0.7 °C ซึ่งน้อยกว่าแรงดึง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 6.7

จากรูปที่ 5.17 ข) นี้แสดงแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at yield) ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่าคอมพาวนด์ PP มีแนวโน้มมีค่าแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึก โดย PP/ α และ PP/ β -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก มีแรงดึง ณ จุดครากเฉลี่ยประมาณ 22.4 ± 0.5 MPa และ 22.1 ± 0.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าแรงดึง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 7.7

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติภายใต้แรงดึง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น ส่งผลให้มีความแข็งเกร็ง (rigid) เพิ่มขึ้น และจากภาพ SEM ในรูปที่ 5.24 - 5.26 แสดงความยึดติดที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติมกับ PP แมทริกซ์ สารตัวเติมที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ขัดขวางการจัดเรียงตัวกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PP จึงมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง PP/Wollastonite ที่มีการยึดติดที่ไม่ดี มีช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาคกับ PP แมทริกซ์ ทำให้ PP/Wollastonite มีสมบัติภายใต้แรงดึงด้อยกว่า PP/Talc แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมส่งผลให้ความต้านทานการเสียรูป (Stiffness) เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) จึงเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารก่อผลึกที่มีต่อสมบัติภายใต้แรงดึง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกมากขึ้น มีผลให้ PP มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ PP มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.17 แรงดึง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

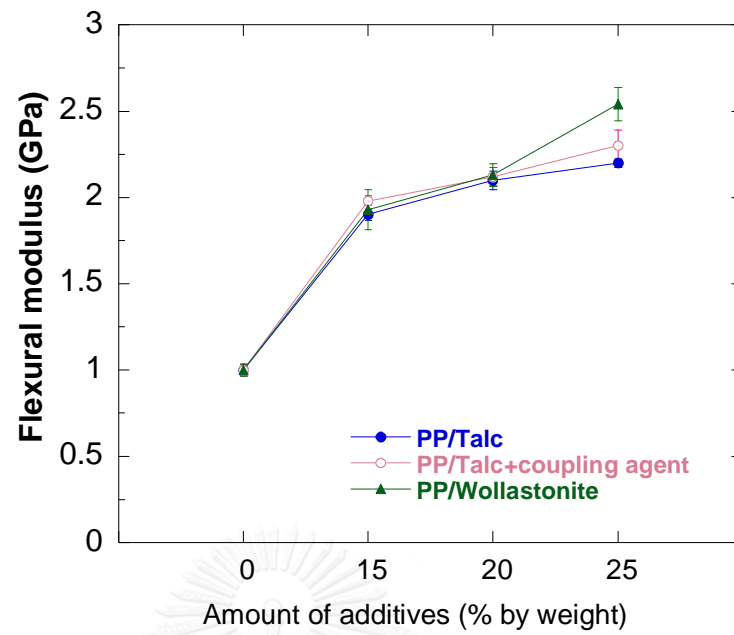
ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

5.3.2. สมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง

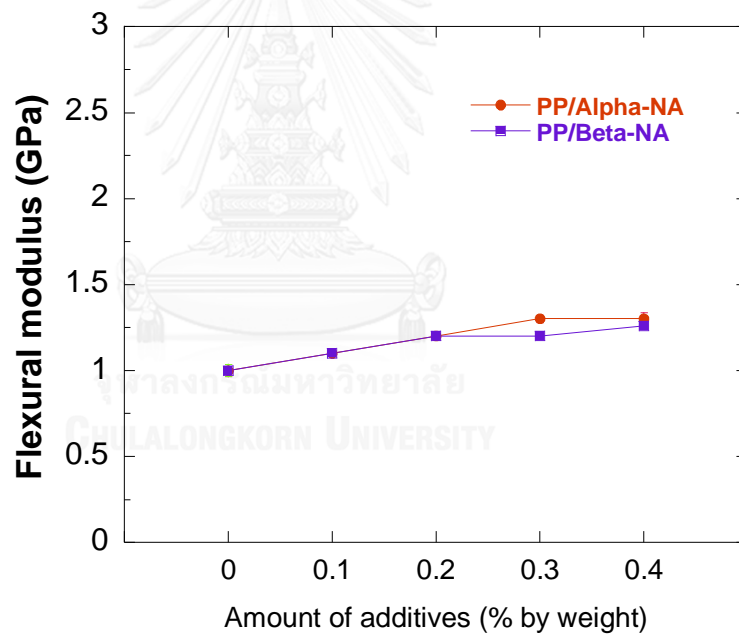
ผลการทดสอบมอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.18 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.18 ก) พบว่า มอดูลัสดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีมอดูลัสดัดโค้งสูงสุดเมื่อเติมปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักคือ 2.2 ± 0.03 GPa 2.3 ± 0.09 GPa และ 2.54 ± 0.097 GPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามอดูลัสดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 120-154

จากรูปที่ 5.18 ข) แสดงมอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่า PP มีมอดูลัสดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึก โดยมีค่าสูงสุดเมื่อเติมสารก่อผลึก α และสารก่อผลึก β ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก มีค่าประมาณ 1.3 ± 0.04 GPa และ 1.1 ± 0.02 GPa ตามลำดับ มากกว่ามอดูลัสดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งประมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 10 ตามลำดับ

ก)



ข)



รูปที่ 5.18 มอดูลัสดัดโค้งคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

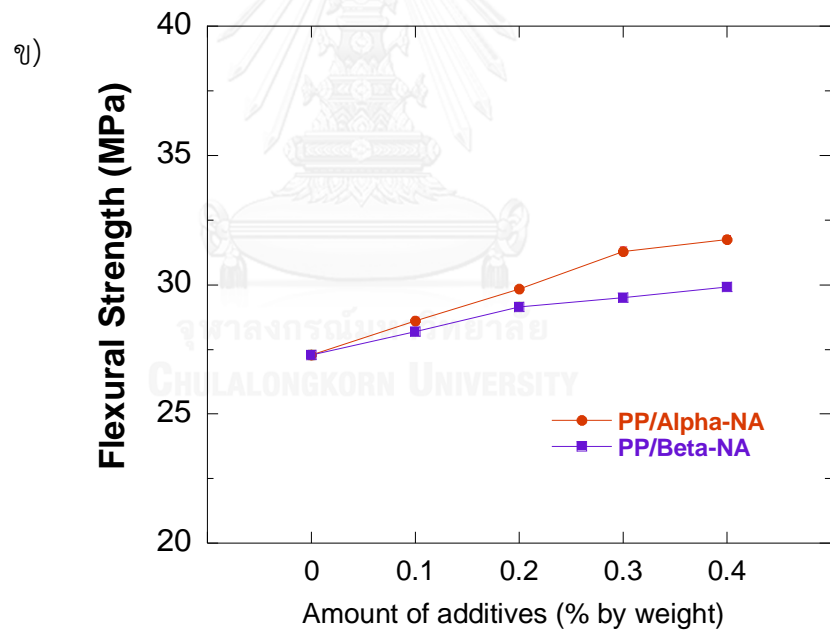
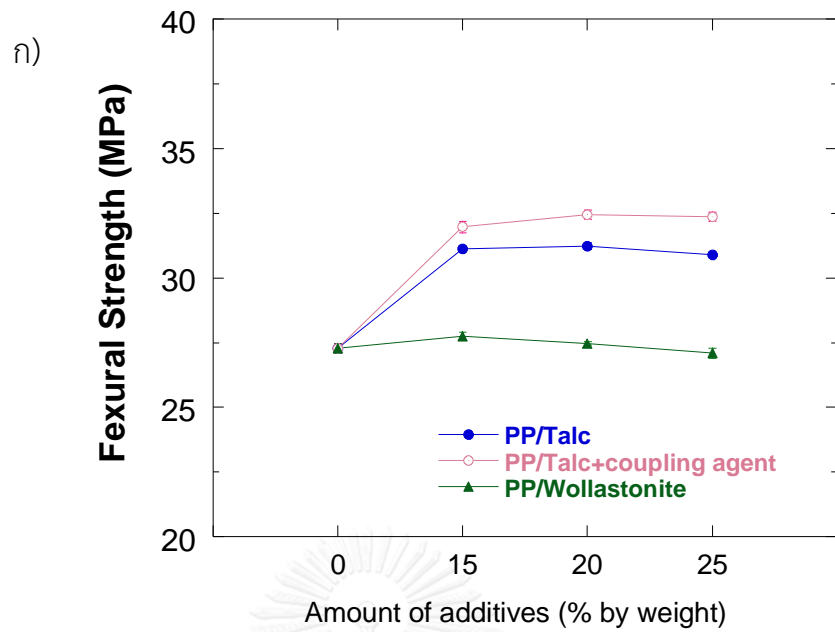
ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง ณ จุดคราก (Flexural strength at yield) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.19 ก) และ 5.19 ข) ตามลำดับ จากรูป 5.19 ก) ความต้านทานแรงดัดโค้งค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักมีความต้านทานแรงดัดโค้งใกล้เคียงกันเฉลี่ยประมาณ 31 ± 0.2 MPa และ 32.27 ± 0.26 MPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าความต้านทานแรงดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีค่า 27.29 ± 0.03 MPa รวร้อยละ 14 ส่วน PP/Wollastonite มีความต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยประมาณ 27.4 ± 0.3 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

รูปที่ 5.19 ข) แสดงความต้านทานแรงดัดโค้ง ณ จุดครากของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่า ความต้านทานแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึก โดยมีค่าสูงสุดเมื่อเติมสารก่อผลึก α และสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 31.76 ± 0.15 MPa และ 29.91 ± 0.11 MPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าความต้านทานแรงดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 16.4 และ 9.6 ตามลำดับ

จากการพิจารณาอิทธิพลสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสมบัติภายใต้แรงดึง คือเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ลดลง แต่มีค่ามอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารก่อผลึกที่มีต่อสมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง พบว่ามีความสัมพันธ์กับระดับความเป็นผลึก คือเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกมากขึ้น มีผลให้ PP มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ PP มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้น ส่วนชิ้นงานคอมพาวนด์ PP ที่มีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่ามักมีความอ่อนตัวจึงทำให้ทนต่อแรงดัดโค้งได้น้อยกว่าจึงสามารถดัดโค้งได้ง่ายขึ้น



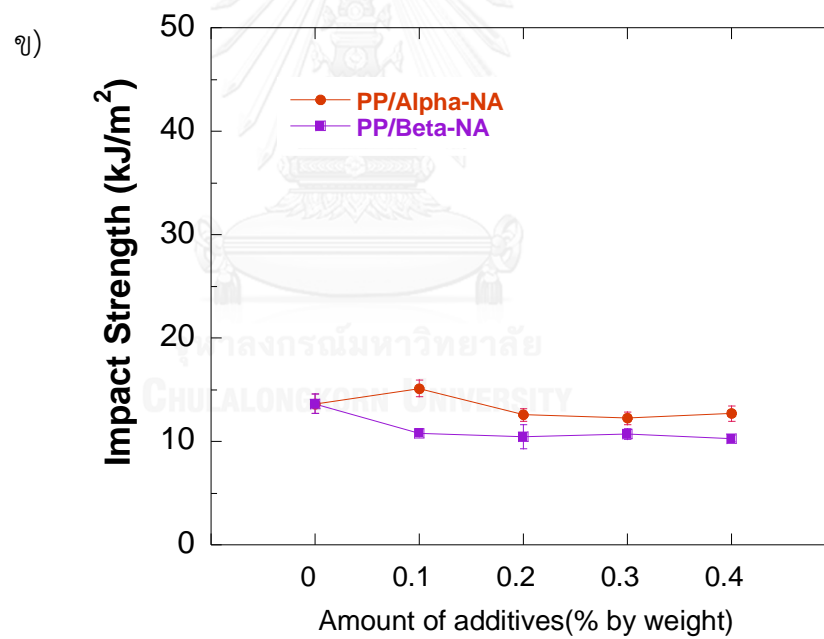
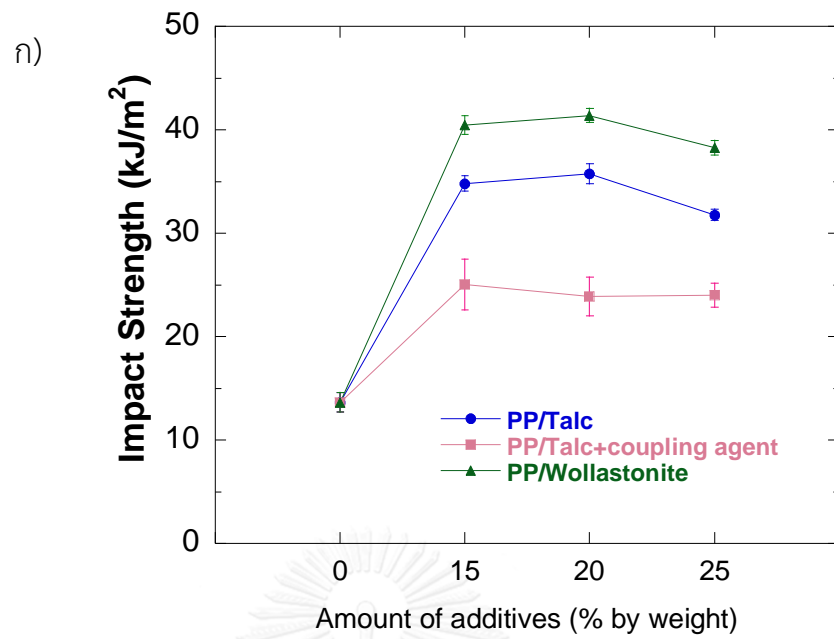
รูปที่ 5.19 ความต้านทานแรงดัดโค้งคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

5.3.3. สมบัติภายใต้แรงกระแทก

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.20 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.20 ก) พบว่า ความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc+coupling agent PP/Talc และ PP/Wollastonite มีความทนแรงกระแทกสูงสุดเฉลี่ยประมาณ 24.32 ± 0.63 34.11 ± 2.07 และ 40.05 ± 1.61 kJ/m^2 ตามลำดับ จากการพิจารณาอิทธิพลสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติต้านทานแรงกระแทก พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น เนื่องจากจุดเริ่มต้นของรอยแตกมักมาจากอนุภาคสารตัวเติมขนาดใหญ่ หรือ อนุภาคขนาดเล็กที่เกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (Agglomeration) มีผลต่อความต้านทานแรงกระแทก เนื่องจากมันสะสมความเค้นและทำตัวเป็นรอยร้าว

รูปที่ 5.20 ข) แสดงความทนแรงกระแทก ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความทนแรงกระแทกสูงสุดคือ 15.14 ± 0.8 kJ/m^2 เมื่อเติมสารก่อผลึก α ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มสารก่อผลึก α เป็นร้อยละ 0.2 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงเป็นระดับใกล้เคียงกันเหลือราว 12.52 ± 0.2 kJ/m^2 ส่วน PP/ β -NA พบว่ามีความทนแรงกระแทกคงที่เฉลี่ย 10.57 ± 0.2 kJ/m^2 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารก่อผลึกที่มีต่อสมบัติต้านทานแรงกระแทก พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อผลึกมากขึ้น มีผลให้ PP มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ PP มีความแข็งเกร็ง (rigid) มากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงกระแทก เนื่องจากอาจเกิดการแตกหักในลักษณะเปราะ และความสามารถในการทนแรงกระแทกลดลง



รูปที่ 5.20 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

5.4. สมบัติเชิงกายภาพ

5.4.1. ความแข็ง

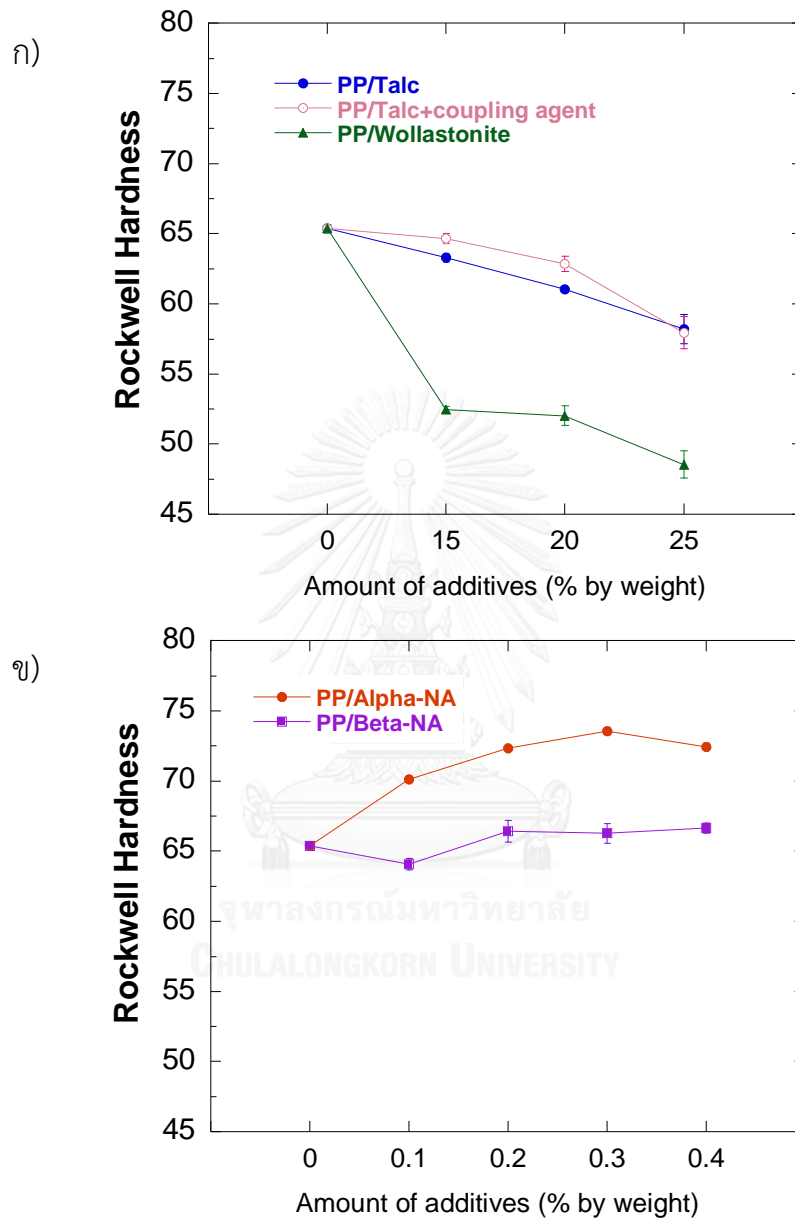
ผลการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.21 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.21 ก) พบว่า ความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มีความแข็งลดลง โดยมีค่าตั้งแต่ 63.3 ถึง 58.2 ซึ่งน้อยกว่าความแข็งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ที่มีค่าอยู่ระดับ 65.4 ประมาณร้อยละ 3.2-11 และเมื่อเติม coupling agent ลงไปใน PP/Talc พบว่ามีความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าตั้งแต่ 64.7 ถึง 57.9 ซึ่งน้อยกว่าความแข็งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ประมาณร้อยละ 1-11 ส่วน PP/Wollastonite ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนัก มีความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีค่าเฉลี่ยประมาณ 51.02 ± 2.15 ซึ่งน้อยกว่าความแข็งของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รว ร้อยละ 22

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อความแข็ง พบว่าการเติมสารตัวเติม Talc และ Wollastonite และการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม มีผลทำให้ความแข็งลดลง การใส่สารตัวเติมไม่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความแข็งให้กับ PP ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับระดับความเป็นผลึก ดังนั้น PP/สารตัวเติม ซึ่งมีระดับความเป็นผลึกลดลงจึงมีผลทำให้ความแข็งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการยึดติดระหว่าง PP และสารตัวเติม มีผลต่อความแข็ง กล่าวคือจากภาพ SEM ในรูปที่ 5.24 - 5.26 PP/Talc มีการยึดติดที่ดีกว่าจึงทำให้มีความแข็งสูงกว่า PP/Wollastonite

รูปที่ 5.21 ข) แสดงความแข็งร็อคเวลล์ของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความแข็งสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดราว 73.55 ± 0.27 เมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีระดับความเป็นผลึกสูงมากที่สุดเมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ซึ่งมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 12.46 ส่วน PP/ β -NA ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.2 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก มีค่าค่อนข้างคงที่เฉลี่ยประมาณ 66.4 ± 0.2 ซึ่งมากกว่าความแข็งของ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง เพียงร้อยละ 1.5

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารก่อผลึกที่มีต่อความแข็ง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ α -NA ใน PP/ α -NA มีผลให้ PP/ α -NA มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณ β -NA ใน PP/ β -NA พบว่า PP/ β -NA มีความแข็งค่อนข้างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกับ

คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง สอดคล้องกับระดับความเป็นผลึกของ PP/ β -NA ที่ค่อนข้างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกันกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง



รูปที่ 5.21 ความแข็งรีอคเวลล์ ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

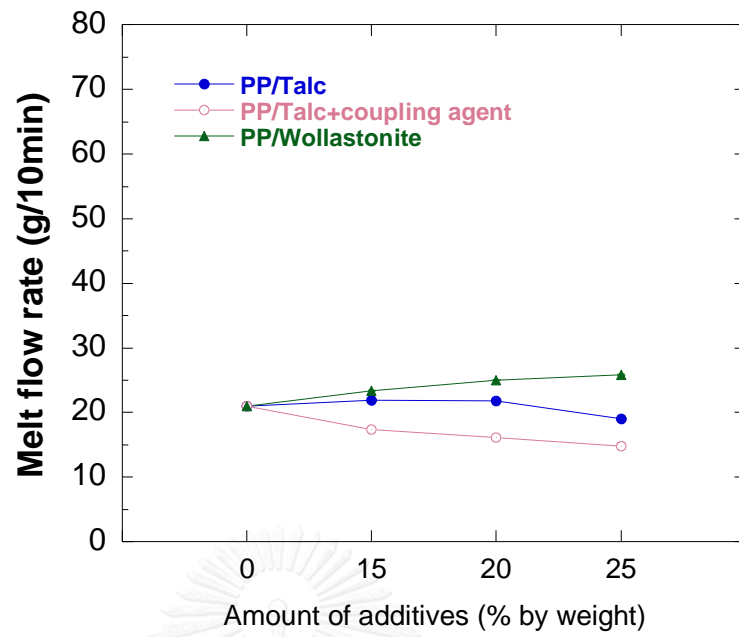
5.4.2. อัตราการหลอมไหล

ผลการทดสอบอัตราการหลอมไหล (Melt flow rate) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.22 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.22 ก) พบว่าอัตราการไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent มีอัตราการไหลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ Talc โดยมีค่าตั้งแต่ 21.9 ถึง 19 กรัม/10นาที่ และ 17.4 ถึง 14.8 กรัม/10นาที่ ตามลำดับ ส่วน PP/Wollastonite มีอัตราการไหลเฉลี่ย 24.73 ± 1.26 กรัม/10นาที่

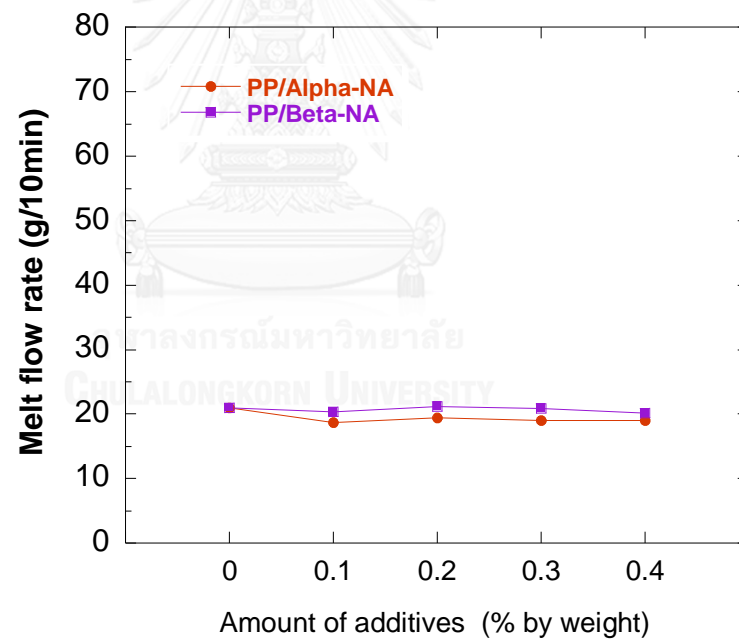
จากการพิจารณาอัตราการหลอมไหลของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม พบว่า PP/Talc มีอัตราการหลอมไหลต่ำกว่า PP/Wollastonite เนื่องจาก Talc มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $5.6 \mu\text{m}$ เล็กกว่า Wollastonite ที่มีอนุภาคเฉลี่ย $10.4 \mu\text{m}$ โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมยังมีขนาดอนุภาคละเอียด ก็ยิ่งทำให้คอมพาวนด์ PP ไหลได้ยากขึ้น จึงทำให้มีอัตราการหลอมไหลลดลง

จากรูปที่ 5.22 ข) แสดงอัตราการไหลของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึกพบว่า PP/ α -NA และ PP/ β -NA มีอัตราการไหลค่อนข้างคงที่เฉลี่ยประมาณ 19.06 ± 0.09 และ 20.63 ± 0.09 กรัม/10นาที่ ซึ่งพบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่มีนัยสำคัญ

ก)



ข)



รูปที่ 5.22 อัตราการหลอมไหลของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

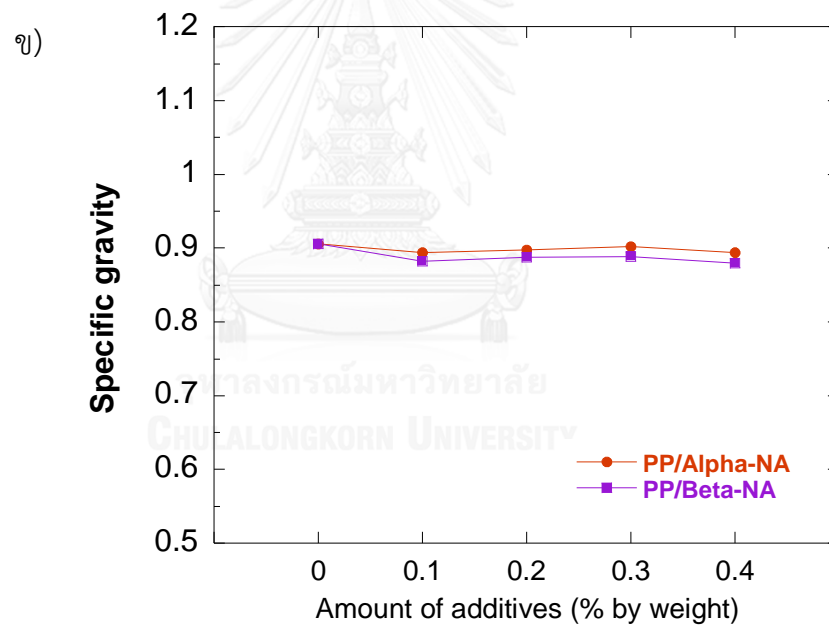
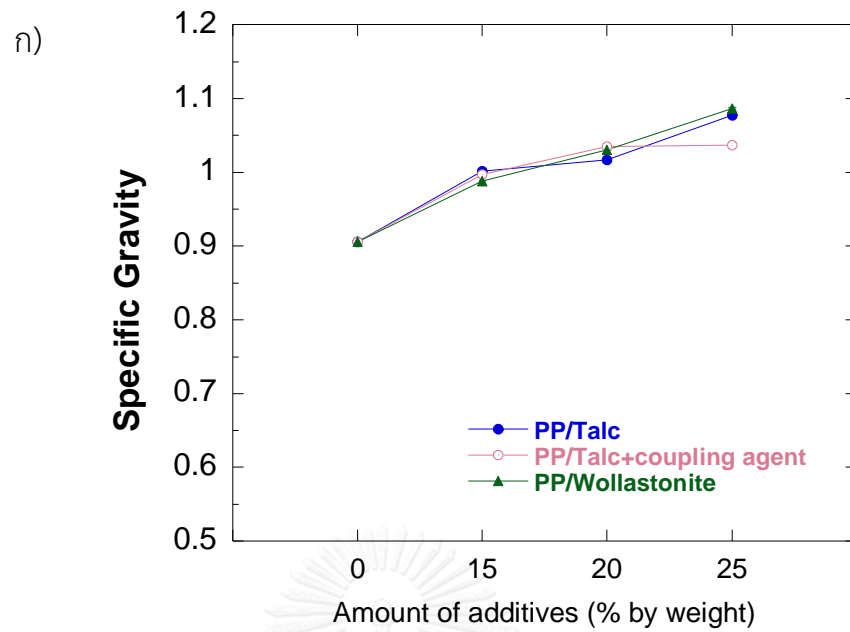
ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

5.4.3. ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 5.23 ก) และ ข) ตามลำดับ จากรูป 5.23 ก) พบว่าคอมพาวนด์ PP ความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดย PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีค่าสูงสุดประมาณ 1.077 ± 0.001 1.0370 และ 1.087 ± 0.001 เมื่อเติมปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 5.23 ข) แสดงความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA และ PP/ β -NA มีความถ่วงจำเพาะค่อนข้างคงที่เฉลี่ยประมาณ 0.897 ± 0.004 และ 0.885 ± 0.001 กรัม/10นาทีก ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีค่าประมาณ 0.906 ± 0.001

การพิจารณาความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารตัวเติม พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม และเมื่อพิจารณาความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP ที่ใส่สารก่อผลึก พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.23 ความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ก) PP/สารตัวเติม ข) PP/สารก่อผลึก

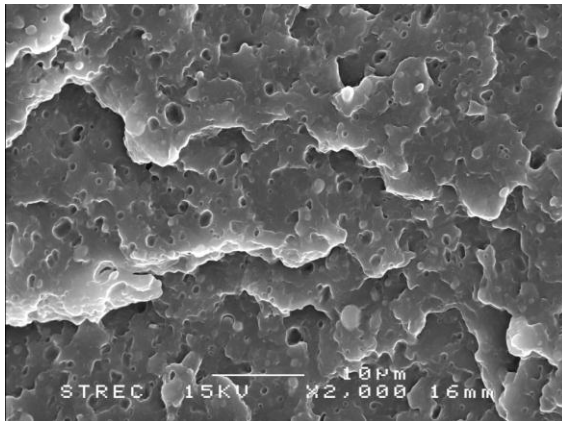
5.5. สันฐานวิทยา

5.5.1. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

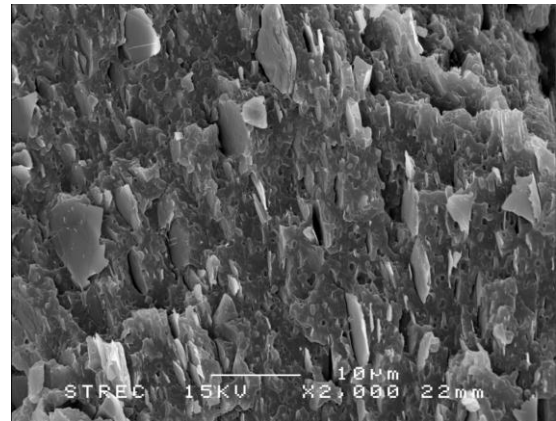
รูปที่ 5.24 – 5.26 แสดงพื้นผิวรอยแตกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม ได้แก่ Talc Talc+coupling agent และ Wollastonite ในปริมาณต่างๆ พบว่า Talc มีการกระจายตัวที่ดีในวัฏภาคของ PP แต่เห็นชัดว่าการยึดติดระหว่างวัฏภาคทั้งสองนั้นมีไม่เพียงพอ ยังมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน จึงเกิดเป็นช่องว่างระหว่างวัฏภาคทำให้การถ่ายโอนแรงจากแมทริกซ์ (Matrix) คือ PP สู่ Talc เป็นไปได้น้อย และในสูตรที่มีการเติม coupling agent ลงไป ไม่มีผลให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคทั้งสองนั้นดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนคอมพาวนด์ PP ที่เติม Wollastonite พบว่ามีการกระจายตัวที่ดี แต่เห็นได้ชัดว่าการยึดติดระหว่างวัฏภาคทั้งสองนั้นแทบจะไม่มี มีร่องรอยการหลุดออกไปของ Wollastonite สังเกตได้จากช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาคกับ แมทริกซ์ PP จึงเป็นเหตุผลว่าทำไม PP/Wollastonite จึงมีสมบัติภายใต้แรงดึง แรงดัดโค้ง ความแข็ง และความต้านทานรอยขีดข่วนที่ด้อยกว่า เมื่อเทียบกับ PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent

แม้ว่า PP/Talc จะมีการยึดติดที่ดีกว่า PP/Wollastonite แต่อย่างไรก็ตามก็ยังพบร่องรอยของการหลุดไปอยู่บ้าง และการยึดติดที่ไม่ดีนั้นของอนุภาค Talc กับแมทริกซ์ PP จึงเป็นสาเหตุว่าแม้ Talc และ Wollastonite จะสามารถเพิ่มมอดูลัสให้กับคอมพาวนด์ PP ได้แต่ก็ยังทำให้ความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ด้อยลงเมื่อเติม Talc และ Wollastonite ลงไป

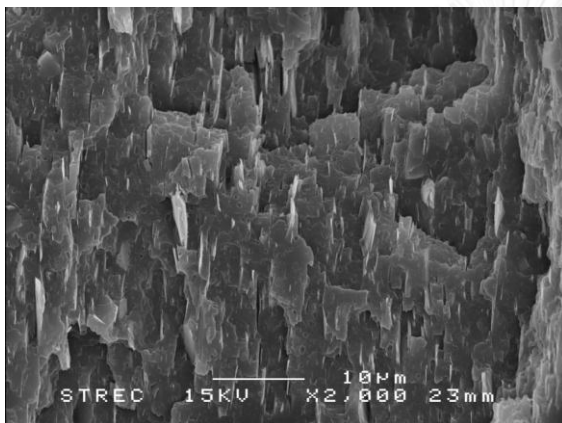
รูปที่ 5.27 – 5.28 แสดงพื้นผิวรอยแตกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก ได้แก่ สารก่อผลึก α และสารก่อผลึก β ในปริมาณต่างๆ พบว่าพื้นผิวแตกหักมีลักษณะขรุขระทั้งสิ้น และมีลักษณะพื้นผิวแตกหักในลักษณะใกล้เคียงกันกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งซึ่งเป็นผลจากการแปรสภาพเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ซึ่งให้เห็นว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึกและคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง มีความเหนียว (ductility) เนื่องจากพื้นผิวรอยแตกมีความขรุขระ



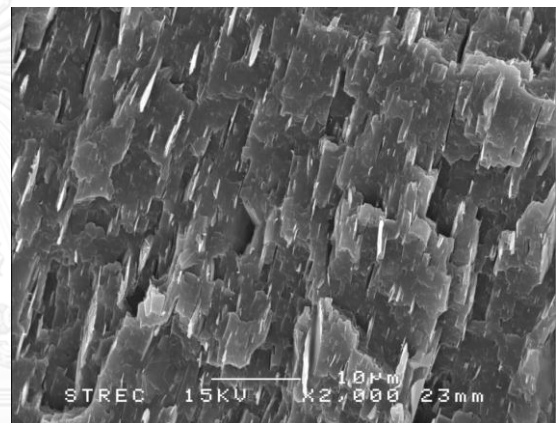
ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง



ข) PP/Talc 15 wt%



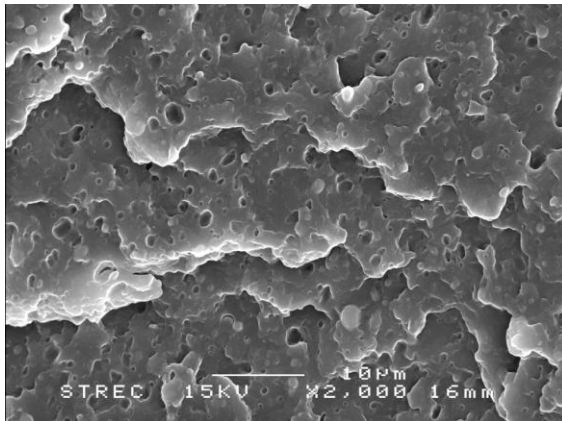
ค) PP/Talc 20 wt%



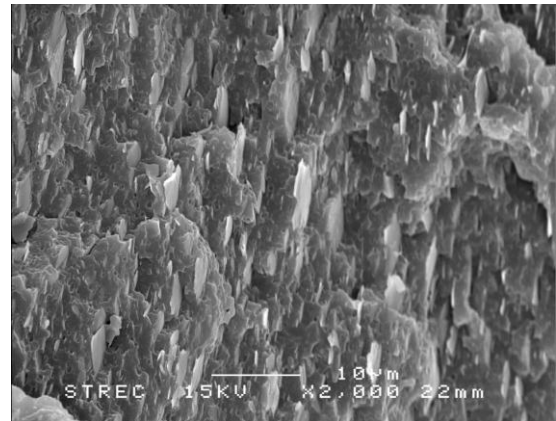
ง) PP/Talc 25 wt%

รูปที่ 5.24 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

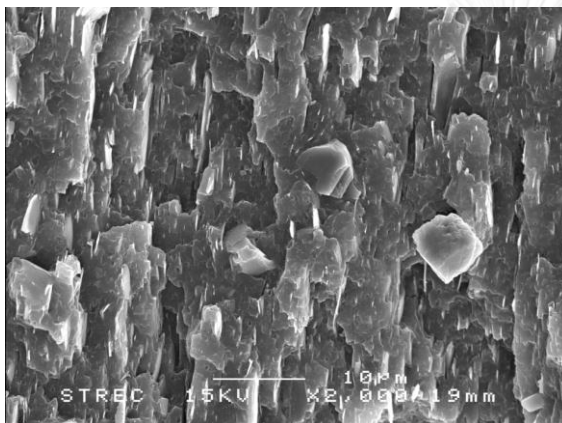
ข) PP/Talc 15 wt% ค) PP/Talc 20 wt% ง) PP/Talc 25 wt%



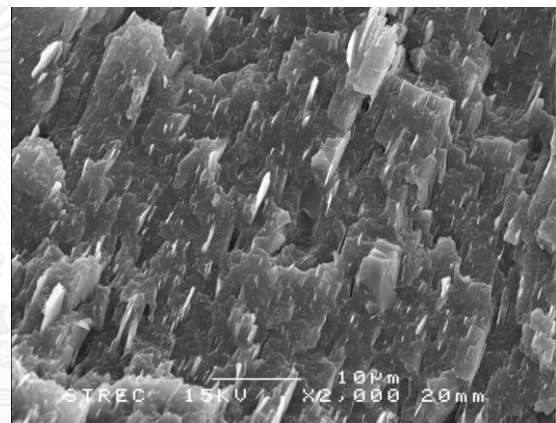
ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง



ข) PP+Talc 15 wt%+coupling agent



ค) PP+Talc 20 wt%+coupling agent

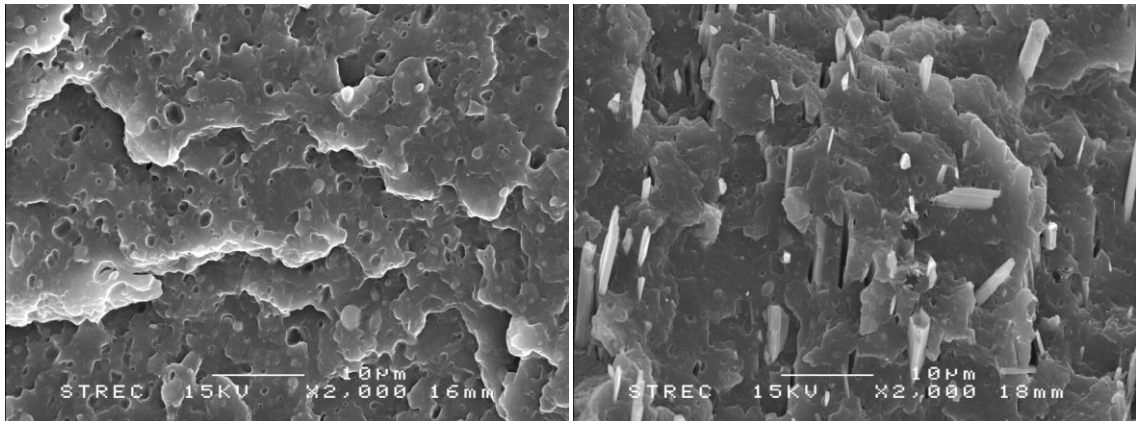


ง) PP+Talc 20 wt%+coupling agent

รูปที่ 5.25 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

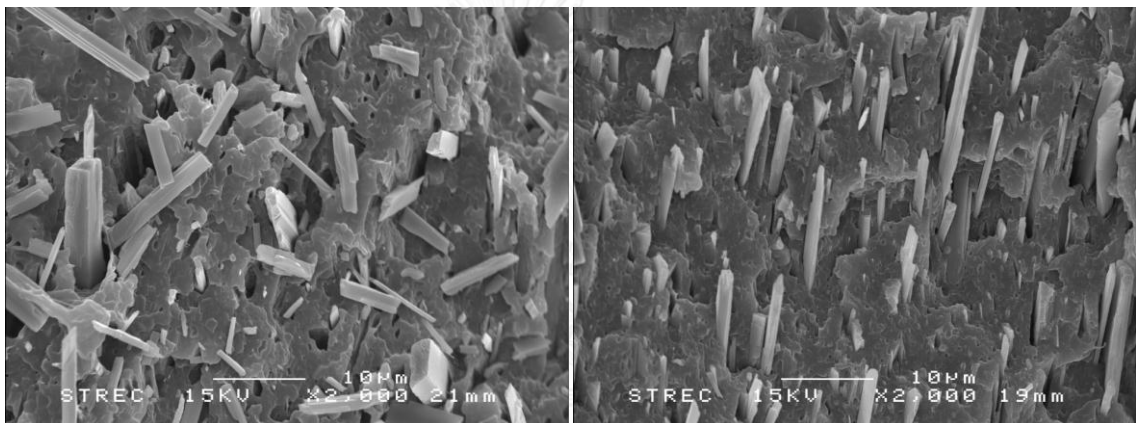
ข) PP/Talc 15 wt%+coupling agent ค) PP/Talc 20 wt%+coupling agent

ง) PP/Talc 25 wt%+coupling agent



ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

ข) PP/Wollastonite 15 wt%

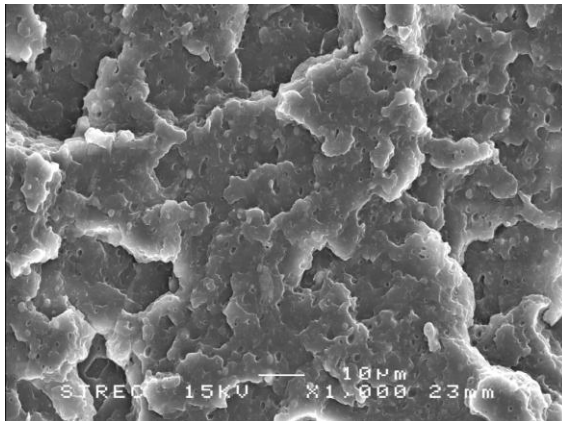


ค) PP/Wollastonite 20 wt%

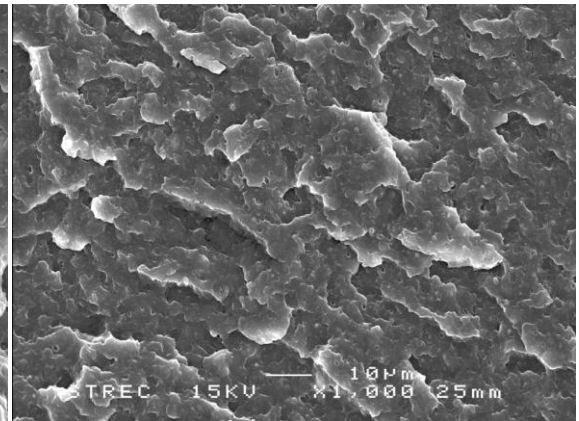
ง) PP/Wollastonite 25 wt%

รูปที่ 5.26 พื้นผิวรอยแตกของ ก) คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

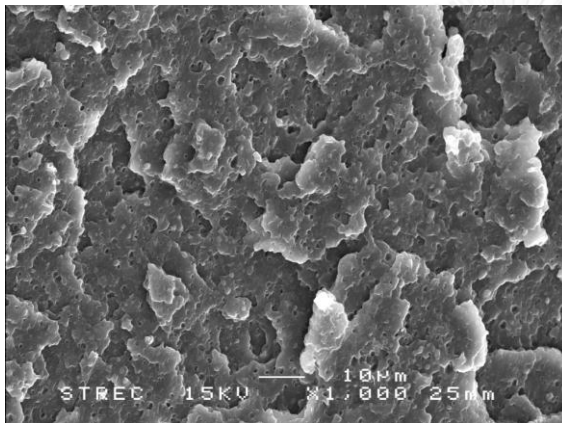
ข) PP/Wollastonite 15 wt% ค) PP/Wollastonite 20 wt% ง) PP/Wollastonite 25 wt%



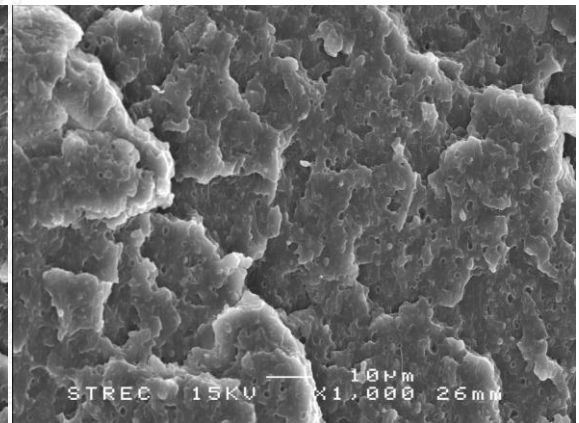
ก) PP/α-NA 0.1 wt%



ข) PP/α-NA 0.2 wt%



ค) PP/α-NA 0.3 wt%

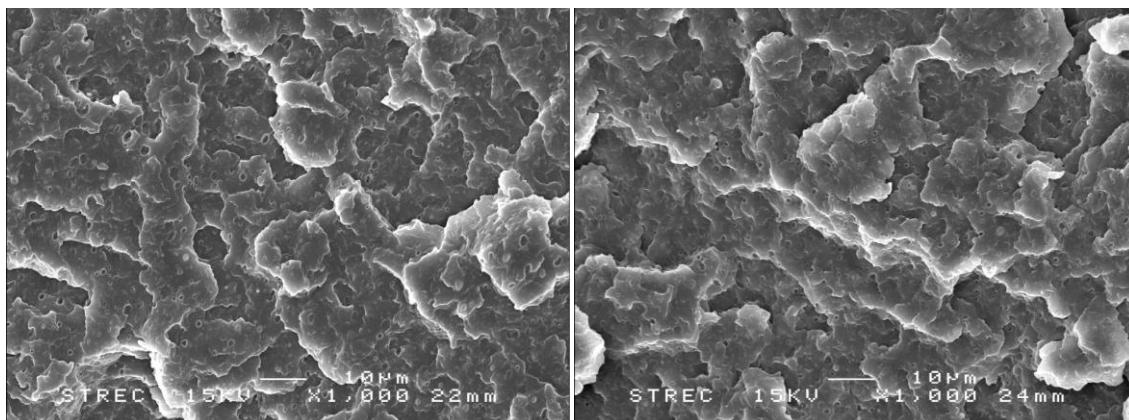


ง) PP/α-NA 0.4 wt%

CHULALONGKORN UNIVERSITY

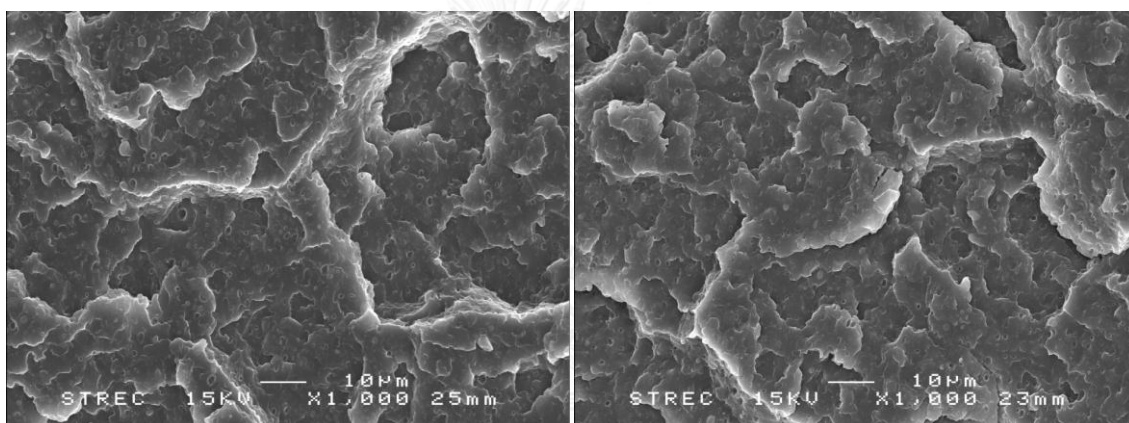
รูปที่ 5.27 พื้นผิวรอยแตกของ ก) PP/α-NA 0.1 wt%

ข) PP/α-NA 0.2 wt% ค) PP/α-NA 0.3 wt% ง) PP/α-NA 0.4 wt%



ก) PP/β-NA 0.1 wt%

ข) PP/β-NA 0.2 wt%



ค) PP/β-NA 0.3 wt%

ง) PP/β-NA 0.4 wt%

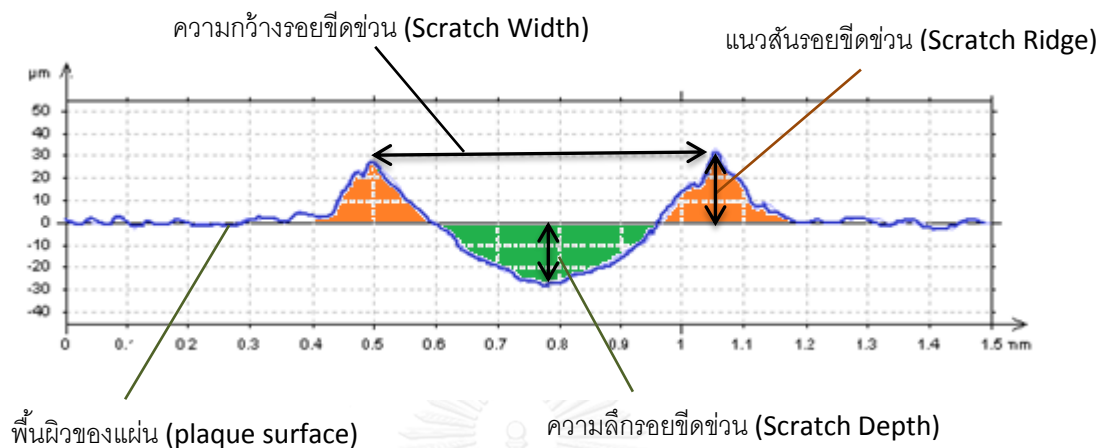
รูปที่ 5.28 พื้นผิวรอยแตกของ ก) PP/β-NA 0.1 wt%

(ก) PP/β-NA 0.2 wt% ค) PP/β-NA 0.3 wt% ง) PP/β-NA 0.4 wt%

5.6. ความต้านทานการขีดข่วน

งานวิจัยนี้ทดสอบการขีดข่วนโดยใช้น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนขนาด 5 10 และ 15 นิวตัน โดยใช้หัวกดเหล็กกล้าเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ± 0.1 มิลลิเมตร ความเร็วที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 100 มิลลิเมตรต่อวินาที วิเคราะห์ความต้านทานการขีดข่วนโดยดูลักษณะเส้นรูปทรง (profile) ของพื้นผิวด้วยเครื่อง Profilometer โดยใช้ปลายวัด (stylus) ลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด เครื่องจะแปรและแสดงผลออกมาในรูปเส้นรูปทรง (profile) คือเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบตัด (sectioning plane) หรือระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิวตัดกับระนาบพื้นผิว ดังรูปที่ 5.29 แสดงเส้นรูปทรง (profile) ของผิวรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น แนวสัน (Ridge) ที่เกิดขึ้นทั้งสองข้างของรอย

ขีดข่วน ความลึกรอยขีดข่วน คือ ระยะทางระหว่างพื้นผิวของแผ่น (plaque surface) กับส่วนที่ต่ำสุดของรอยขีดข่วน (bottom) ทำการวัดอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ตามแนวรอยขีดข่วน

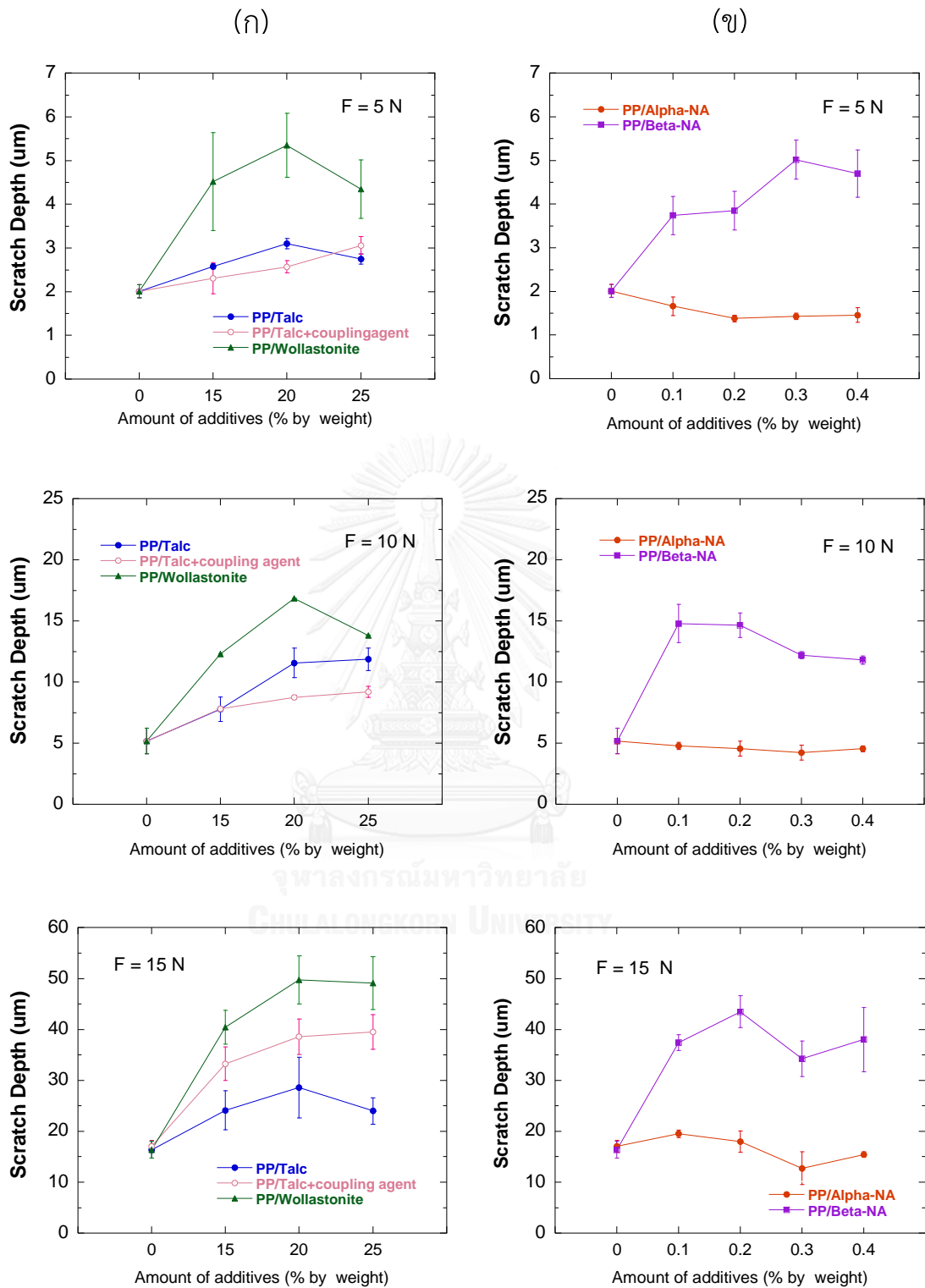


รูปที่ 5.29 เส้นรูปทรง (profile) ของผิวรอยขีดข่วน

5.6.1. ความลึกรอยขีดข่วน (Scratch Depth)

รูปที่ 5.30 แสดงผลการทดสอบความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมและคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง พบว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม Talc และ Wollastonite มีความลึกรอยขีดข่วนมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งทั้งหมด โดย PP/Wollastonite มีความลึกรอยขีดข่วนมากที่สุด มากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 116-226 ส่วน PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent มีความลึกรอยขีดข่วนที่ใกล้เคียงกันซึ่งลึกมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 28-131 และ 15-130 ตามลำดับ

คอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความลึกรอยขีดข่วนลดลง โดยความลึกรอยขีดข่วนมีระดับต่ำสุด เมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งลึกน้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ราวร้อยละ 18-29 ส่วน PP/ β -NA มีความลึกรอยขีดข่วนมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 86-186



รูปที่ 5.30 ความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N (ก) PP/สารตัวเติม (ข) PP/สารก่อผลึก

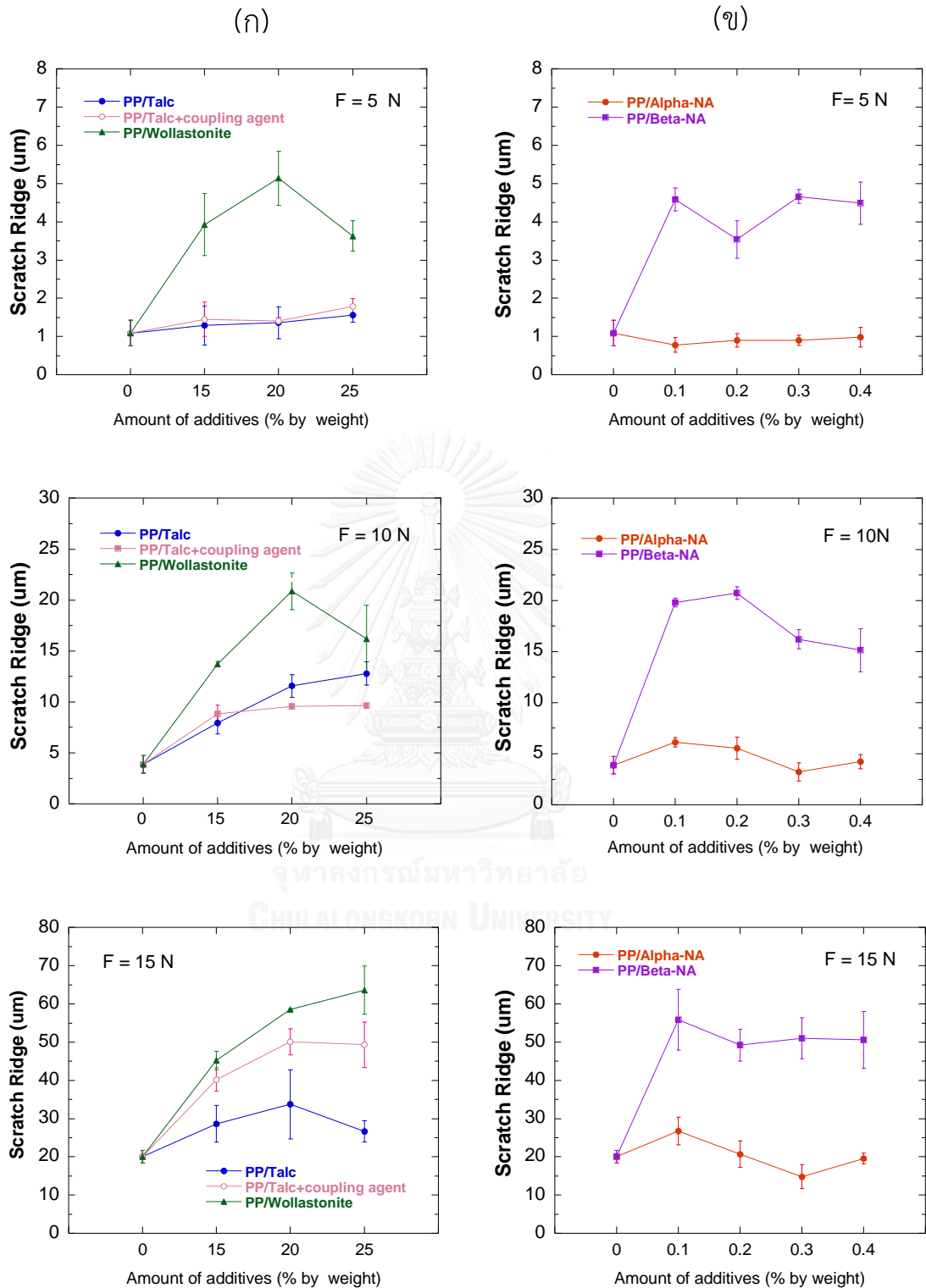
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ชนิดสาร	เปรียบเทียบความลึกรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (%)					
	5 N		10 N		15 N	
	ลึกขึ้น	ตื้นขึ้น	ลึกขึ้น	ตื้นขึ้น	ลึกขึ้น	ตื้นขึ้น
PP/ α -NA 0.1 wt%		17		8	14	
PP/ α -NA 0.2 wt%		31		12	5	
PP/ α -NA 0.3 wt%		29		18		25
PP/ α -NA 0.4 wt%		27		12		9
PP/ β -NA 0.1wt%	86		186		119	
PP/ β -NA 0.2wt%	92		184		155	
PP/ β -NA 0.3wt%	150		136		101	
PP/ β -NA 0.4wt%	134		128		123	
PP/Talc 15 wt%	28		51		95	
PP/Talc 20 wt%	54		69		126	
PP/Talc 25 wt%	37		78		131	
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	15		50		41	
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	28		124		68	
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	52		130		41	
PP/Wollastonite 15 wt%	125		138		137	
PP/Wollastonite 20 wt%	166		226		191	
PP/Wollastonite 25 wt%	116		168		188	

5.6.2. แนวสันรอยขีดข่วน (Scratch Ridge)

รูปที่ 5.31 แสดงผลการทดสอบแนวสันรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบแนวสันรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง พบว่าเมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วนคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม Talc และ Wollastonite มีแนวสันรอยขีดข่วนสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งทั้งหมด โดย PP/Wollastonite มีแนวสันรอยขีดข่วนสูงมากที่สุด มากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 120-438 ส่วน PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent แนวสันรอยขีดข่วนมีความสูงที่ใกล้เคียงกันซึ่งสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 18-230 และ 33-148 ตามลำดับ

คอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความสูงแนวสันรอยขีดข่วนลดลงมากที่สุด เมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีแนวสันรอยขีดข่วนต่ำกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ราวร้อยละ 17-28 ส่วน PP/ β -NA มีแนวสันรอยขีดข่วนสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 140-434



รูปที่ 5.31 แนวสันรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N (ก) PP/สารตัวเติม (ข) PP/สารก่อผลึก

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบแนวสัณรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ชนิดสาร	เปรียบเทียบแนวสัณรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (%)					
	5 N		10 N		15 N	
	สูงขึ้น	ต่ำลง	สูงขึ้น	ต่ำลง	สูงขึ้น	ต่ำลง
PP/ α -NA 0.1 wt%		28	58		31	
PP/ α -NA 0.2 wt%		17	43		1	
PP/ α -NA 0.3 wt%		17		17		28
PP/ α -NA 0.4 wt%		10	9			5
PP/ β -NA 0.1wt%	321		410		173	
PP/ β -NA 0.2wt%	225		434		140	
PP/ β -NA 0.3wt%	328		318		149	
PP/ β -NA 0.4wt%	312		290		147	
PP/Talc 15 wt%	18		105		40	
PP/Talc 20 wt%	25		198		65	
PP/Talc 25 wt%	43		230		30	
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	33		128		96	
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	29		146		144	
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	64		148		141	
PP/Wollastonite 15 wt%	261		254		120	
PP/Wollastonite 20 wt%	372		438		186	
PP/Wollastonite 25 wt%	233		318		210	

5.6.3. ความหยาบรอยขีดข่วน (Scratch Roughness)

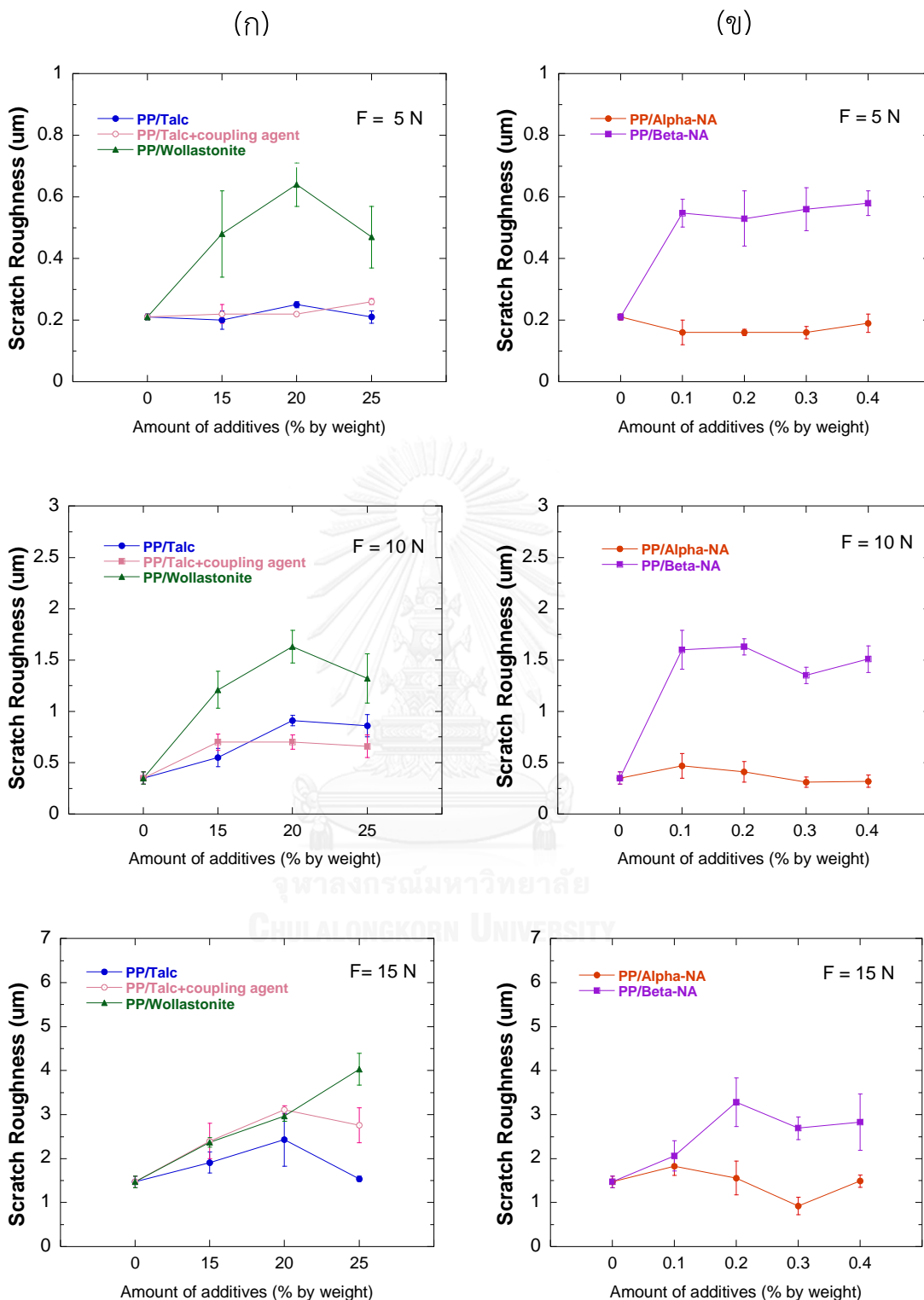
รูปที่ 5.32 แสดงความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง พบว่า PP/Wollastonite มีความหยาบรอยขีดข่วนเพิ่มขึ้นมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 61-366 ส่วน PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent มีความหยาบรอยขีดข่วนใกล้เคียงกัน ซึ่งหยาบมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 19-160 และ 5-111 ตามลำดับ

คอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความหยาบรอยขีดข่วนลดลงมากที่สุด เมื่อเติม α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความหยาบรอยขีดข่วนต่ำกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 10-37 ส่วน PP/ β -NA มีความหยาบรอยขีดข่วนสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 40-366

5.6.4. ความกว้างรอยขีดข่วน (Scratch Width)

รูปที่ 5.33 แสดงความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง พบว่าคอมพาวนด์ PP แต่ละสูตรมีความกว้างค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดย PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีความกว้างมากกว่า คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 3-9 3-16 และ 7-19 ตามลำดับ

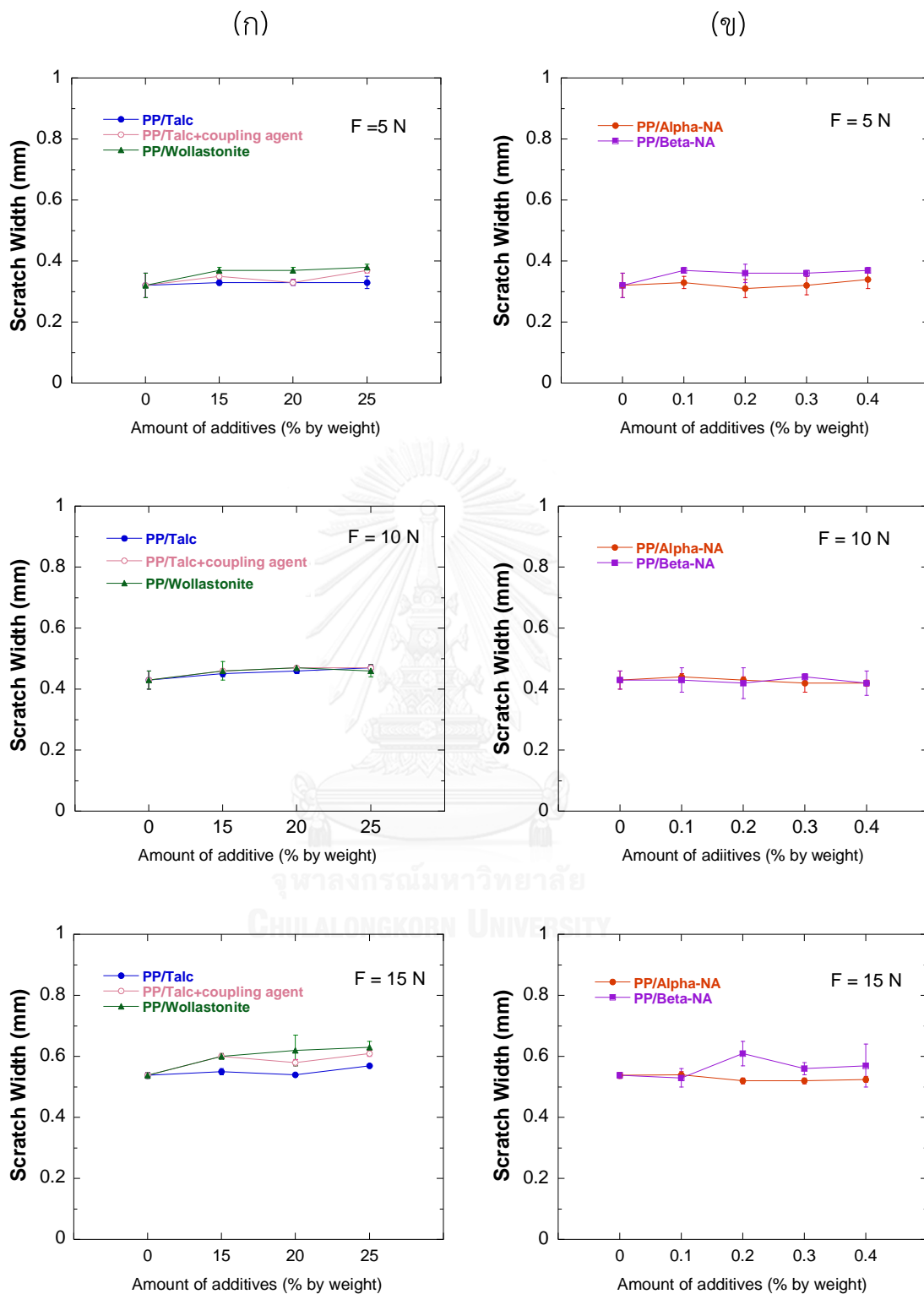
คอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความกว้างรอยขีดข่วนน้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 2-4 ส่วน PP/ β -NA มีความกว้างรอยขีดข่วนมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง รวร้อยละ 2-16



รูปที่ 5.32 ความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N (ก) PP/สารตัวเติม (ข) PP/สารก่อผลึก

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ชนิดสาร	เปรียบเทียบความหยาบรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (%)					
	5 N		10 N		15 N	
	หยาบขึ้น	หยาบ ลดลง	หยาบขึ้น	หยาบ ลดลง	หยาบขึ้น	หยาบ ลดลง
PP/ α -NA 0.1 wt%		24	34		24	
PP/ α -NA 0.2 wt%		24	17		6	
PP/ α -NA 0.3 wt%		24		11		37
PP/ α -NA 0.4 wt%		10		9	1	
PP/ β -NA 0.1wt%	161		357		40	
PP/ β -NA 0.2wt%	152		366		123	
PP/ β -NA 0.3wt%	167		286		83	
PP/ β -NA 0.4wt%	176		331		93	
PP/Talc 15 wt%		5	57		30	
PP/Talc 20 wt%	19		160		65	
PP/Talc 25 wt%	-	-	146		5	
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	5		100		63	
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	5		100		111	
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	24		89		88	
PP/Wollastonite 15 wt%	129		246		61	
PP/Wollastonite 20 wt%	205		366		102	
PP/Wollastonite 25 wt%	124		277		174	



รูปที่ 5.33 ความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N (ก) PP/สารตัวเติม (ข) PP/สารก่อผลึก

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ กับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง
 ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ชนิดสาร	เปรียบเทียบความกว้างรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆกับ คอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (%)					
	5 N		10 N		15 N	
	กว้างขึ้น	กว้าง ลดลง	กว้างขึ้น	กว้าง ลดลง	กว้างขึ้น	กว้าง ลดลง
PP/ α -NA 0.1 wt%	3		2		-	-
PP/ α -NA 0.2 wt%		3	-	-		4
PP/ α -NA 0.3 wt%	-	-		2		4
PP/ α -NA 0.4 wt%	6			2		4
PP/ β -NA 0.1wt%	16		-	-		2
PP/ β -NA 0.2wt%	13			2	13	
PP/ β -NA 0.3wt%	13		2		4	
PP/ β -NA 0.4wt%	16			2	6	
PP/Talc 15 wt%	3		5		2	
PP/Talc 20 wt%	3		7		-	-
PP/Talc 25 wt%	3		9		6	
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	9		7		11	
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	3		9		7	
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	16		9		13	
PP/Wollastonite 15 wt%	16		7		11	
PP/Wollastonite 20 wt%	16		9		15	
PP/Wollastonite 25 wt%	19		7		17	

จากพฤติกรรมการเกิดรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงขีดข่วน 5 10 และ 15 N ความลึกรอยขีดข่วน แนวสันรอยขีดข่วน และ ความหยาบรอยขีดข่วน มีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ ในคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมนั้นพบว่ามีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง โดย PP/Wollastonite มีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วน มากที่สุดเมื่อเทียบกับ PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent โดย PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent มีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วนลดลง เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ แต่ PP/ β -NA กลับมีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วนรุนแรงมากขึ้น จากความกว้างรอยขีดข่วนพบว่าคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5.6.5. ความแข็งรอยขีดข่วน

ความแข็งรอยขีดข่วน (Scratch Hardness) เป็นตัวแทนที่ใช้อธิบายความต้านทานของวัสดุ ต่อแรงขีดข่วน ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนและความลึกรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นคำนวณได้ ดังสมการที่ (5.6) [26]

$$H = \frac{L}{\pi(2rd - d^2)} \quad (5.6)$$

เมื่อ	H	คือ	ความแข็งรอยขีดข่วน
	L	คือ	แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
	r	คือ	รัศมีของหัวกด
	d	คือ	ความลึกรอยขีดข่วน

ความแข็งรอยขีดข่วนบ่งบอกถึงความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ซึ่งแปรผกผันกับความลึกรอยขีดข่วน แนวสันรอยขีดข่วน และความหยาบรอยขีดข่วน กล่าวคือ ใน PP/Talc PP/Talc+coupling agent PP/Wollastonite และ PP/ β -NA ซึ่งมีความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วน มากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง นั้นพบว่ามีความแข็งรอยขีดข่วนต่ำกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งทั้งหมด มีเพียง PP/ α -NA ที่สามารถลดความลึก แนวสัน และ ความหยาบรอยขีดข่วนน้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง โดยมีความแข็ง

รอยขีดข่วนหรือความต้านทานรอยขีดข่วนสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งและสามารถต้านทานรอยขีดข่วนได้ดีเมื่อเติม α -NA ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 5.34 ตารางที่ 5.6 พบว่า ยิ่งเพิ่มแรงทำให้เกิดรอยขีดข่วนมากขึ้น ยิ่งทำให้ความสามารถในการต้านทานรอยขีดข่วนลดลง โดยเมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน พบว่า PP/Wollastonite มีความแข็งแรงรอยขีดข่วนน้อยที่สุดประมาณ 101-367 MPa เมื่อเทียบกับ PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent ที่มีความแข็งแรงรอยขีดข่วนใกล้เคียงกันประมาณ 172-618 MPa และ 126-690 MPa ตามลำดับ โดย PP/Wollastonite PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent มีความแข็งแรงรอยขีดข่วนลดลงประมาณ ร้อยละ 54-69 22-56 และ 13-56 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง

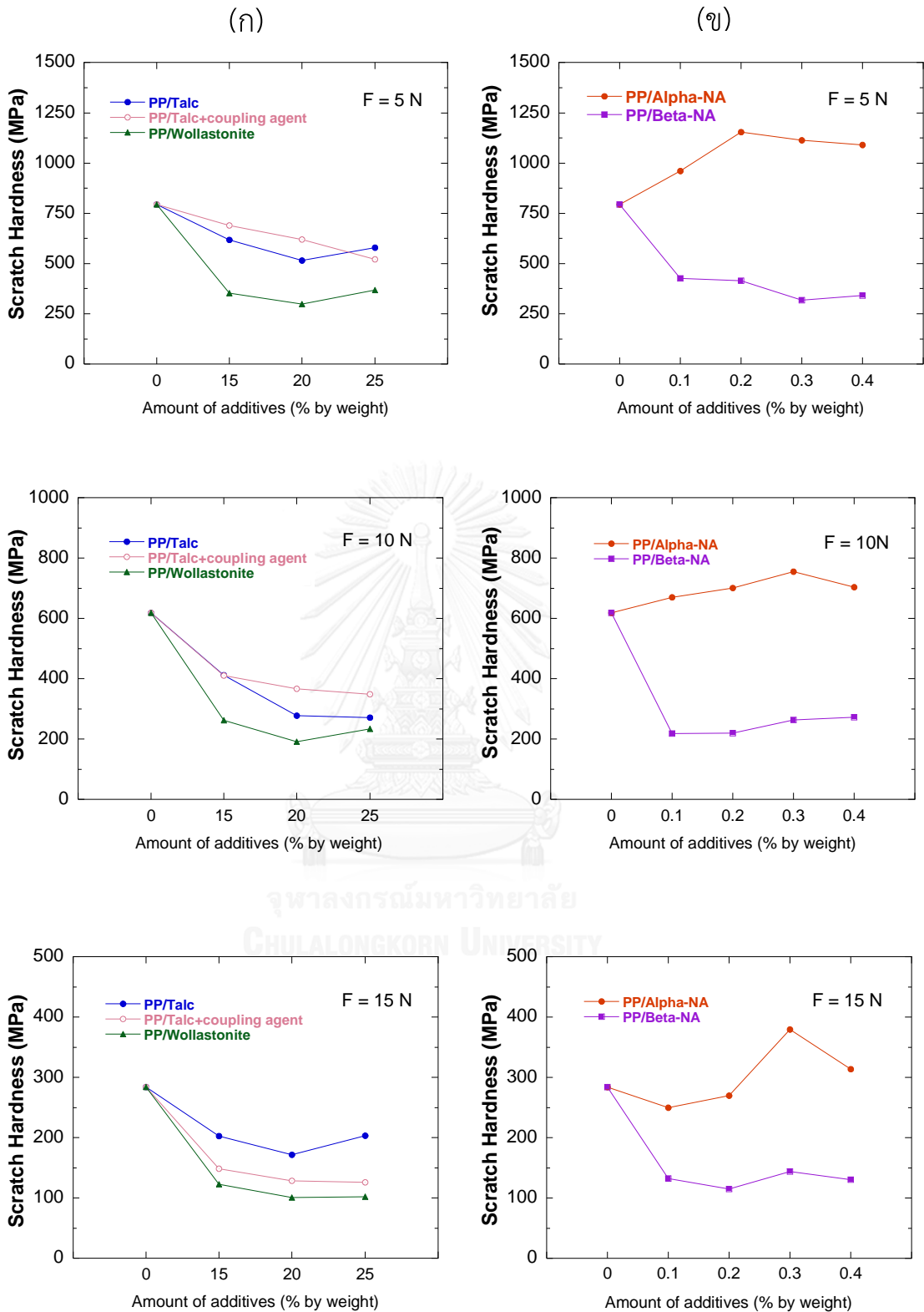
คอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA มีความแข็งแรงรอยขีดข่วนประมาณ 250-1154 MPa ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ โดยมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 8-46 ส่วน PP/ β -NA มีความแข็งแรงรอยขีดข่วนประมาณ 115-427 MPa น้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 46-65

การยึดติดระหว่างสารตัวเติมและแมทริกซ์ PP เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP กล่าวคือ หากมีการยึดติดที่ไม่ดีเกิดเป็นช่องว่างระหว่างวัฏภาค จะทำให้การถ่ายโอนแรงจากแมทริกซ์ PP ไปยังสารตัวเติมเป็นไปได้น้อยมีผลให้สมบัติเชิงกลและความสามารถในการต้านทานรอยขีดข่วนแยกลงตามไปด้วย จากภาพสัณฐานวิทยารูปที่ 5.26 แสดงพื้นผิวรอยแตกของ PP/Wollastonite เห็นได้ชัดว่าการยึดติดระหว่าง PP กับ Wollastonite น้อยมาก มีช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างวัฏภาค และจากภาพสัณฐานวิทยารูปที่ 5.24 - 5.25 แสดงพื้นผิวรอยแตกของ PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent พบว่ามีการยึดติดที่ดีกว่า PP/Wollastonite แต่อย่างไรก็ตาม ในสูตรที่มีการเติม coupling agent ลงไป ไม่มีผลให้การยึดติดระหว่าง PP กับ Talc นั้นดีขึ้นในระดับที่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลความต้านทานรอยขีดข่วนที่พบว่า PP/Wollastonite มีความต้านทานรอยขีดข่วนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent ที่มีความต้านทานรอยขีดข่วนใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการยึดติดระหว่างสารตัวเติมและแมทริกซ์ PP เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP กล่าวคือ หากมีการยึดติดที่ไม่ดีก็จะมีผลให้ความต้านทานรอยขีดข่วนนั้นแยกลงตามไปด้วย ซึ่งจากผลการทดลองเห็นว่าการเติมสารตัวเติมลงไปใน PP ถึงแม้จะมีผลช่วยให้ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) เพิ่มสูงขึ้น แต่นั่นก็ยังไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วนได้ หากขาดการยึดติดที่ดีระหว่างแมทริกซ์ PP และสารตัวเติม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ A.

Dasari และคณะ [25, 55] ที่พบว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสสูงไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานรอยขีดข่วนที่สูงเสมอไป หากมีการยึดติดที่ไม่ดี

ตารางที่ 5.6 ความแข็งแรงรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N

น้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ชนิดสาร	ความแข็งแรงรอยขีดข่วน (MPa)		
	5 N	10 N	15 N
Unfilled PP	793	619	284
PP/ α -NA 0.1 wt%	960	670	250
PP/ α -NA 0.2 wt%	1154	701	270
PP/ α -NA 0.3 wt%	1114	755	380
PP/ α -NA 0.4 wt%	1091	704	314
PP/ β -NA 0.1wt%	427	218	133
PP/ β -NA 0.2wt%	415	220	115
PP/ β -NA 0.3wt%	319	264	144
PP/ β -NA 0.4wt%	340	273	131
PP/Talc 15 wt%	618	412	203
PP/Talc 20 wt%	515	278	172
PP/Talc 25 wt%	580	271	204
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	690	411	148
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	621	367	129
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	522	349	126
PP/Wollastonite 15 wt%	354	262	123
PP/Wollastonite 20 wt%	299	192	101
PP/Wollastonite 25 wt%	367	233	102

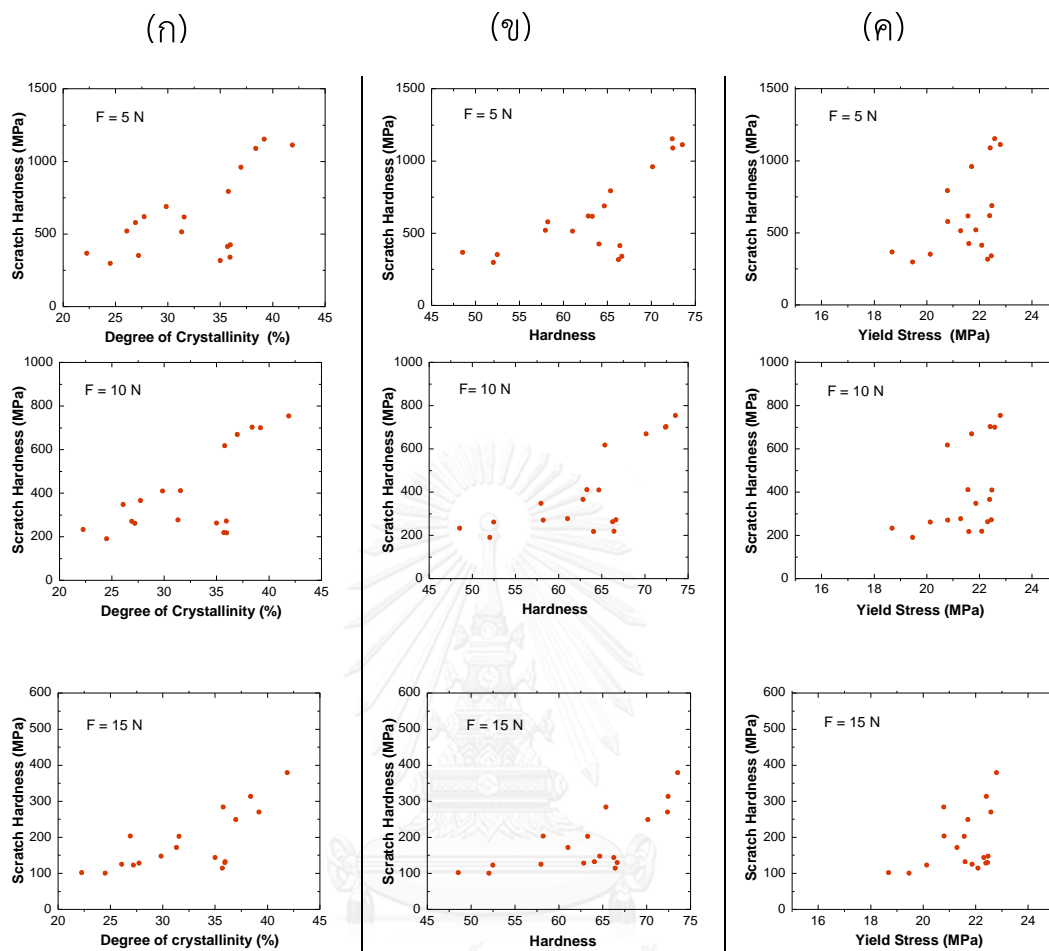


รูปที่ 5.34 ความแข็งรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N (ก) PP/สารตัวเติม (ข) PP/สารก่อผลึก

5.6.6. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกและความแข็งรอยขีดข่วน กับ ความแข็งและความแข็งรอยขีดข่วน

ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ความแข็ง (Hardness) และความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งรอยขีดข่วน (Scratch Hardness) คือ เมื่อมีระดับความเป็นผลึก ความแข็ง หรือ ความเค้น ณ จุดคราก สูงขึ้น ก็จะมีผลทำให้ความแข็งรอยขีดข่วนหรือความต้านทานรอยขีดข่วนมีแนวโน้มสูงมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามระดับความเป็นผลึกและความแข็ง มีความสัมพันธ์กับความแข็งรอยขีดข่วนอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าความเค้น ณ จุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 5.35 ดังนั้นการปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วน สามารถทำได้โดยการเพิ่มระดับความเป็นผลึกในคอมพาวนด์ PP ซึ่งจะมีผลทำให้ความแข็งสูงขึ้น จึงทำให้ต้านทานต่อการขีดข่วนได้ดีขึ้น ดังเช่น PP/ α -NA ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีระดับความเป็นผลึกสูงที่สุดประมาณร้อยละ 42 และมีความแข็งหรือคเวลล์สูงสุดเมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ จึงสามารถลดความลึก แนวสัน และความหยาบรอยขีดข่วนได้ดีที่สุด และมีความแข็งรอยขีดข่วนหรือความต้านทานรอยขีดข่วนมากที่สุด

ความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามหรือแปรผกผันกับความแข็งรอยขีดข่วน เนื่องจากโดยปกติแล้วสมบัติความเหนียวเป็นสมบัติที่ตรงกันข้ามกับสมบัติความแข็ง ส่วนมอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับความแข็งรอยขีดข่วนในระดับที่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 5.36

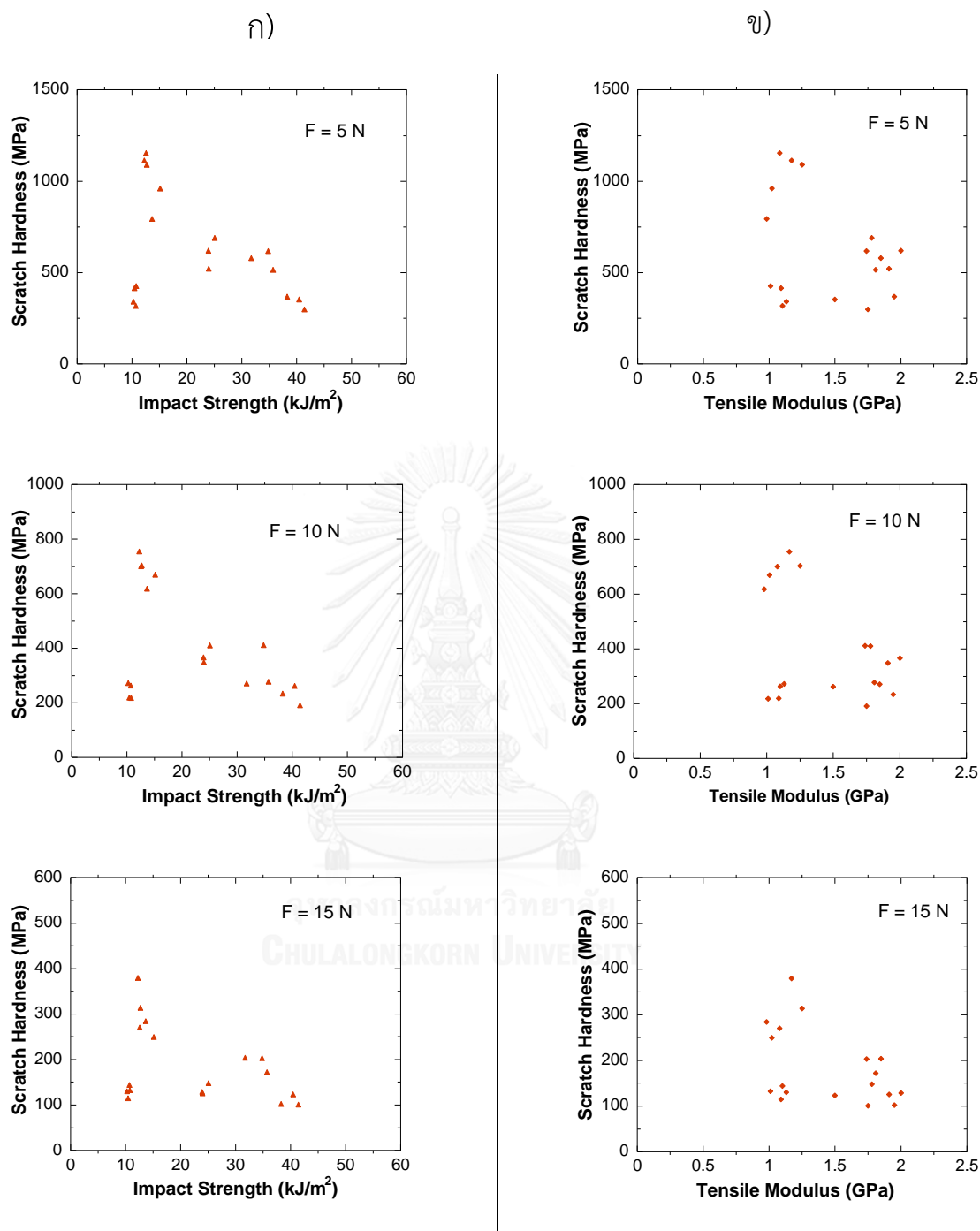


รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10

และ 15 N ระหว่าง (ก) ระดับความเป็นผลึกและความแข็งรอยขีดข่วน

(ข) ความแข็งและความแข็งรอยขีดข่วน

(ค) ความเค้น ณ จุดครากและความแข็งรอยขีดข่วน

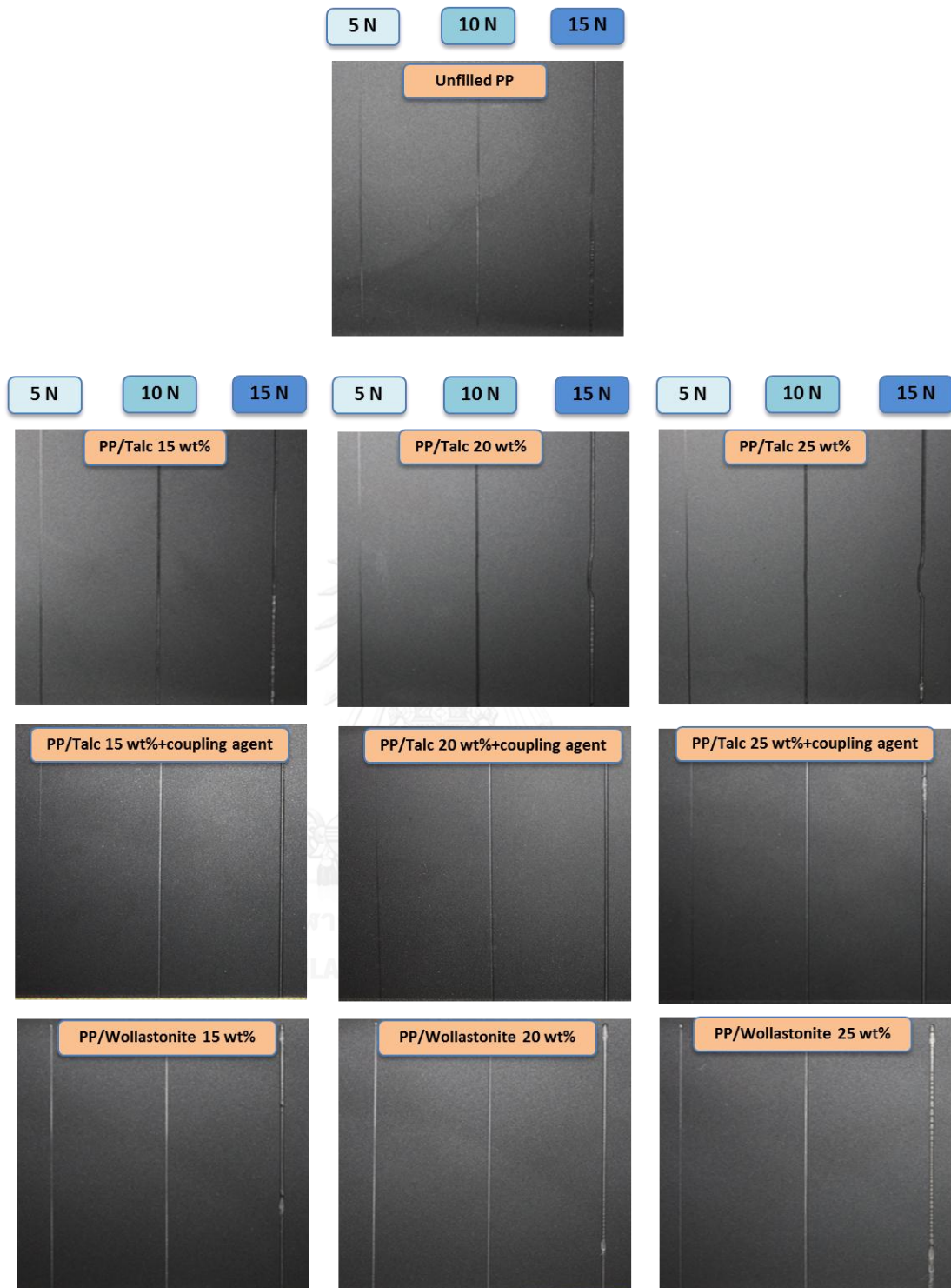


รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N ระหว่าง (ก) ความต้านทานแรงกระแทกและความแข็งรอยขีดข่วน
(ข) มอดูลัสแรงดึงและความแข็งรอยขีดข่วน

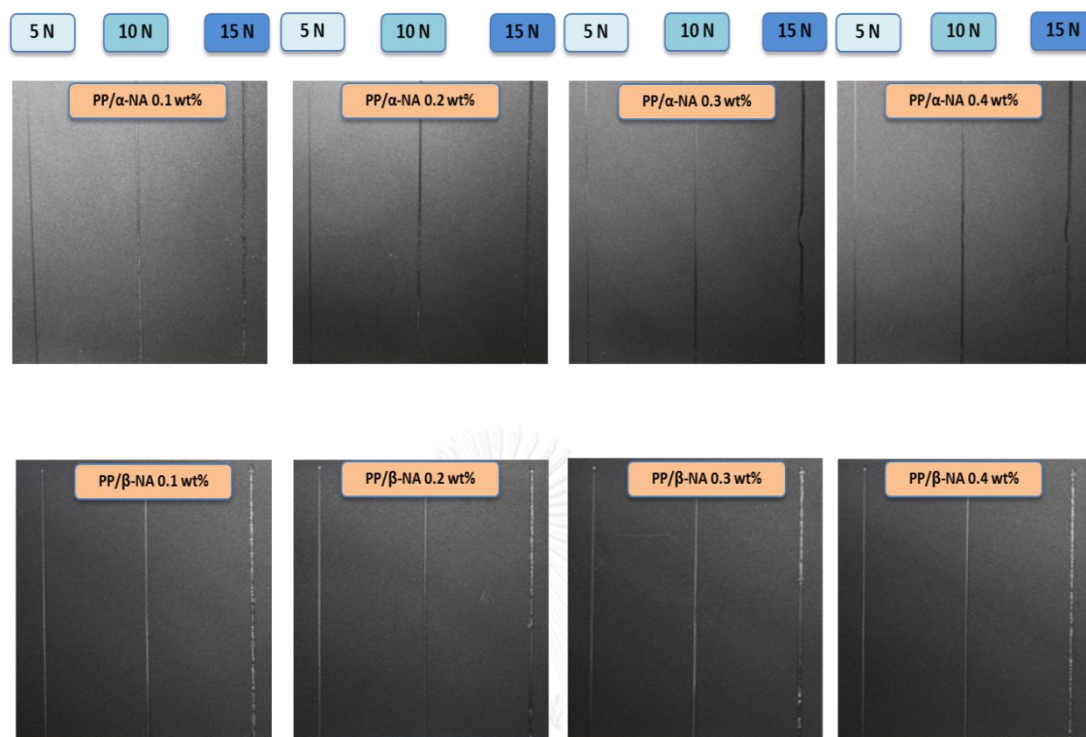
5.6.7 ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วน (Scratch Appearance)

รูปที่ 5.37 แสดงลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนเมื่อใช้แรง 5 10 และ 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่าคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก ปรากฏมีรอยขีดข่วนชัดเจนมากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง โดย PP/Wollastonite รอยขีดข่วนมีความขาวมากกว่า PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent โดยเริ่มปรากฏเห็นความขาวชัดเจนตั้งแต่การใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วนเพียง 5 N อย่างไรก็ตาม PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent มีลักษณะรอยขีดข่วนใกล้เคียงกัน เริ่มปรากฏเห็นความขาวชัดเจนเมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบทั้ง Talc และ Wollastonite มีลักษณะเป็นสีขาว ทำให้เมื่อเกิดรอยขีดข่วนจึงเป็นรอยสีขาว ปรากฏให้เห็น โดยจากความลึก แนวสัน และความหยาบรอยขีดข่วนของ PP/Wollastonite พบว่าเมื่อรับแรงขีดข่วนเกิดการเสียหายมากกว่า PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent จึงทำให้มีรอยขีดข่วนชัดเจนมากกว่าและเห็นสีขาวชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการกระเจิงแสงของรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) รอยราน (Crazing) ช่องว่าง (voids) การเปลี่ยนรูปพลาสติก (plastic deformation) และจากร่องรอยของสารตัวเติม

รูปที่ 5.38 แสดงลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA ไม่ปรากฏความขาวบนรอยขีดข่วน แต่ PP/ β -NA พบว่ารอยขีดข่วนมีความขาวอย่างชัดเจน และเริ่มปรากฏเห็นความขาวตั้งแต่การใช้โหลดที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนเพียง 5 N โดยจากความลึก แนวสัน และความหยาบรอยขีดข่วนของ PP/ β -NA พบว่าเมื่อรับแรงขีดข่วนเกิดการเสียหายมากกว่า PP/ α -NA จึงทำให้มีรอยขีดข่วนและสีขาวชัดเจน ซึ่งสีขาวที่ปรากฏขึ้นอาจเกิดจากการกระเจิงแสงของรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) รอยราน (Crazing) และการเปลี่ยนรูปพลาสติก (plastic deformation) ที่เกิดขึ้นเมื่อถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน



รูปที่ 5.37 ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และ PP/สารตัวเติม ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N



รูปที่ 5.38 ลักษณะปรากฏรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และ PP/สารก่อผลึก ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N

5.6.8 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope

รูปที่ 5.39 แสดงภาพถ่ายรอยขีดข่วน จาก Digital Microscope (100x) เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนชัดเจน ในขณะที่ PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent เห็นรอยขีดข่วนได้แต่ไม่ชัดเจนนัก โดยเฉพาะ PP/Talc มีรอยขีดข่วนค่อนข้างจางมาก

ภาพถ่ายรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนค่อนข้างจางมากเมื่อเทียบกับ PP/ β -NA และคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วน PP/ β -NA รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีความชัดเจน คล้ายพาราโบลาหงาย

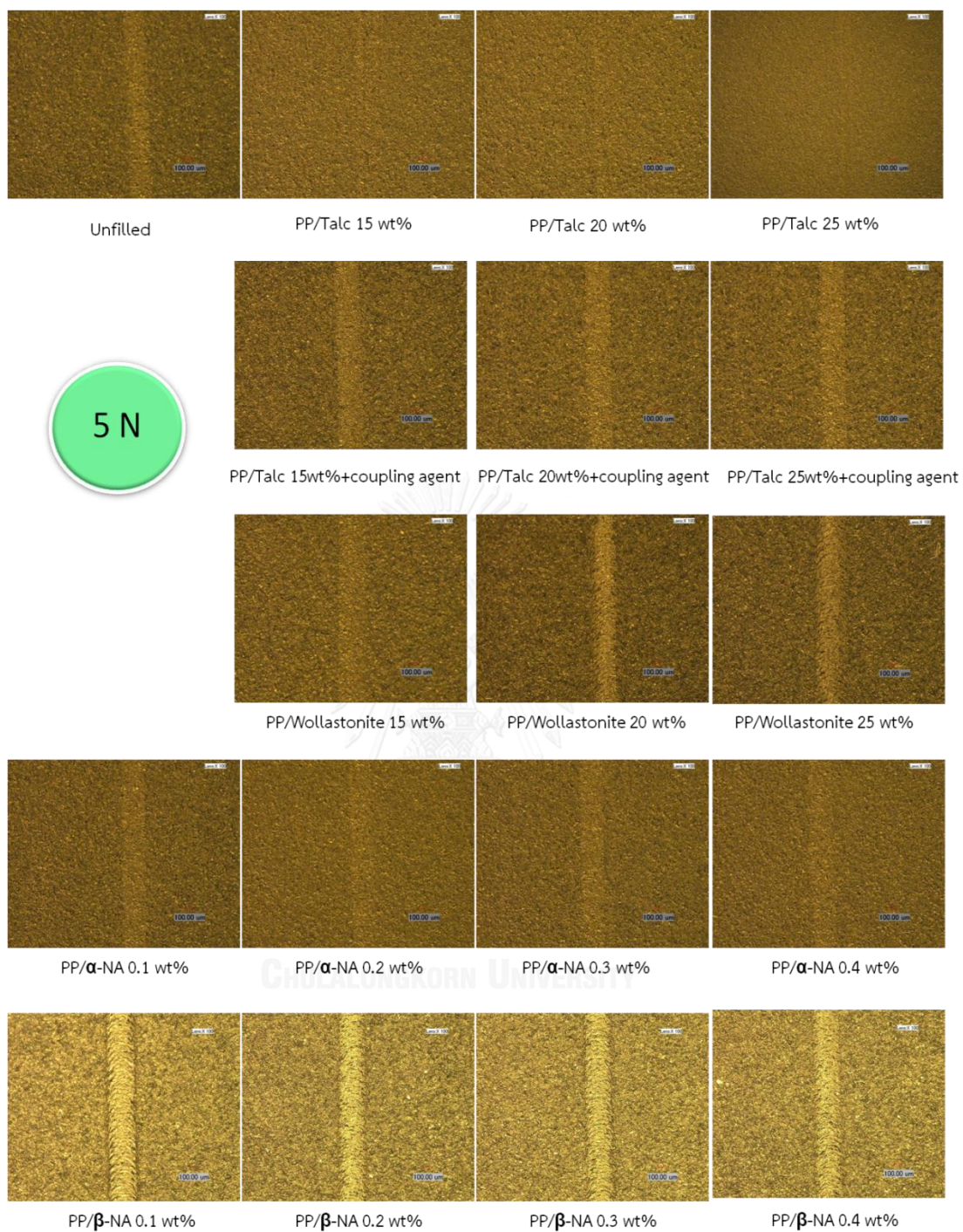
รูปที่ 5.40 แสดงภาพถ่ายรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/สารตัวเติม มีรอยขีดข่วนค่อนข้างชัดเจน คล้ายพาราโบลา โดยเฉพาะ PP/Wollastonite

ภาพถ่ายรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนที่ไม่ชัดเจน ค่อนข้างจางมาก เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วน PP/ β -NA พบว่ารอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนมากคล้ายพาราโบลาหงาย

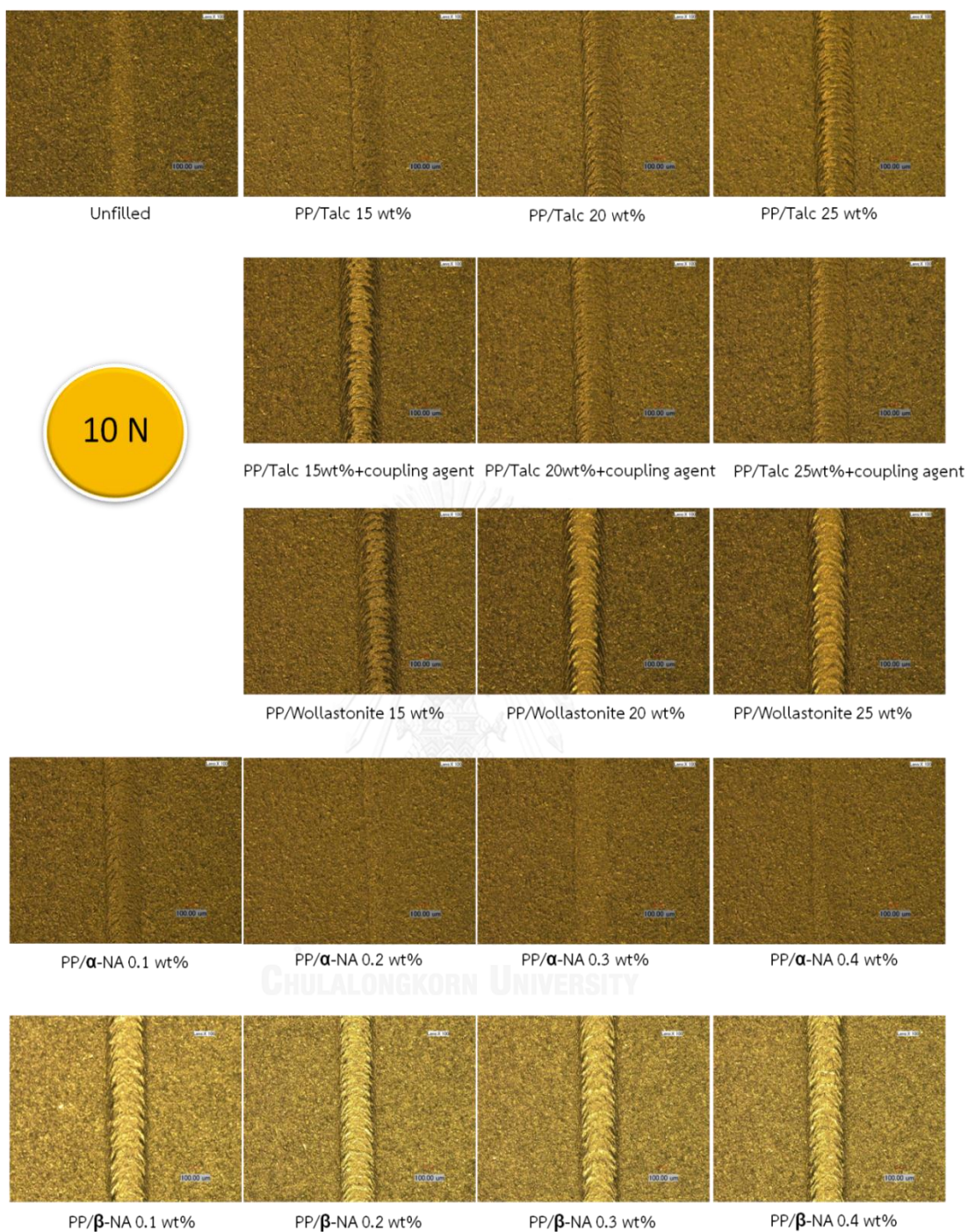
รูปที่ 5.41 แสดงภาพถ่ายรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติมและคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึกพบว่า PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีลักษณะรอยขีดข่วนที่ชัดเจน โดย PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite ที่ปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีรอยขีดข่วนชัดเจน รุนแรง คล้ายรอยไถ

ภาพถ่ายรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 15 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนที่รุนแรงน้อยกว่า และแคบกว่า เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วน PP/ β -NA รอยขีดข่วนมีความชัดเจน และรุนแรง โดยมีรอยขีดข่วนคล้ายพาราโบลาหงายและรอยไถ

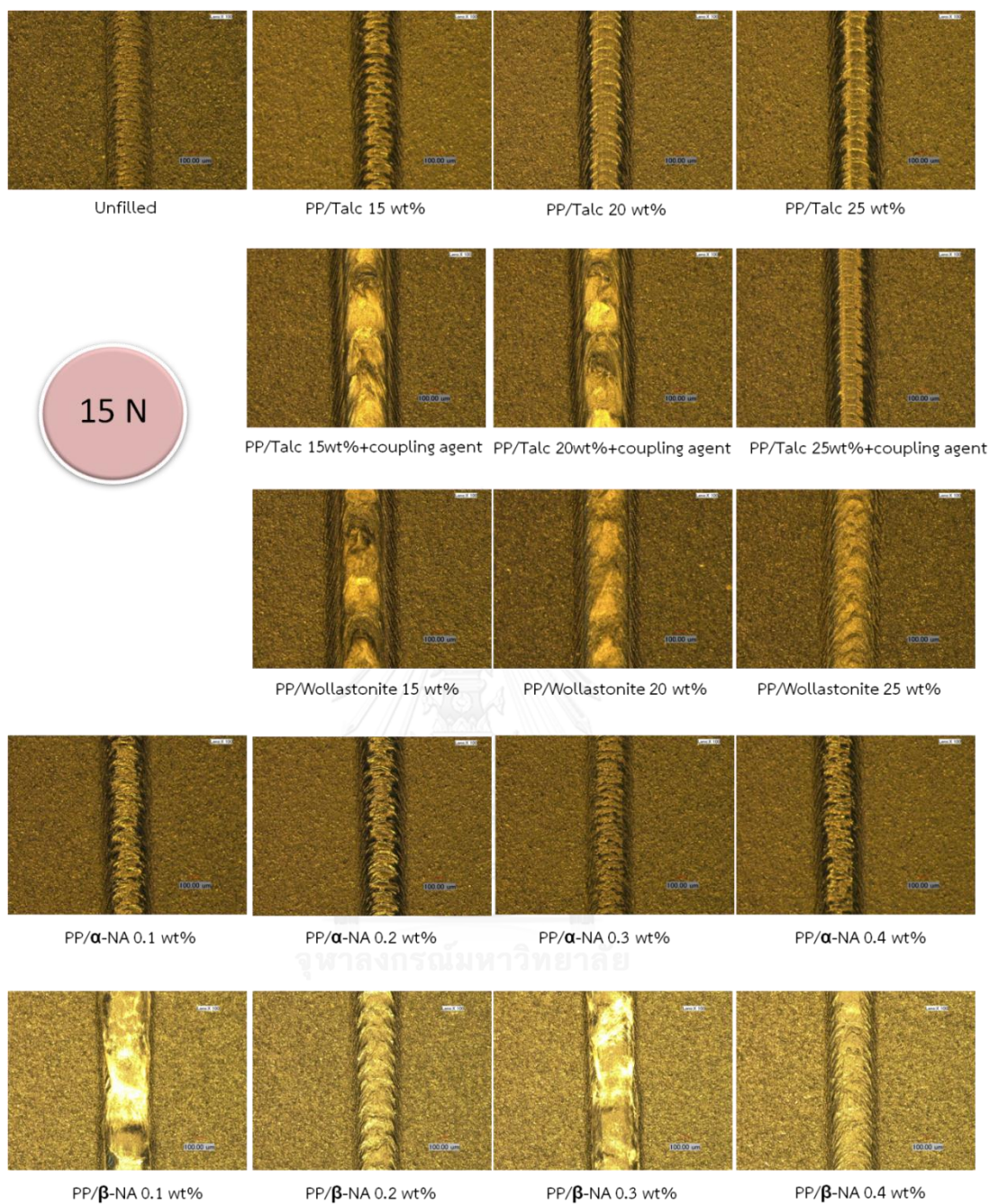
ภาพถ่ายรอยขีดข่วน จาก Digital Microscope เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N มีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งรอยขีดข่วนกล่าวคือ ใน PP/ α -NA ซึ่งมีความแข็งรอยขีดข่วนหรือความต้านทานรอยขีดข่วนสูงกว่าคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ปรากฏภาพถ่ายรอยขีดข่วนที่รุนแรงน้อยกว่า และแคบกว่า เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ



รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.40 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.41 ภาพถ่ายรอยขีดข่วนโดยใช้ Digital Microscope (100x) เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 15 N ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

5.6.9 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ (Photo Simulation)

รูปที่ 5.42 แสดงภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ จากเครื่อง Profilometer เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนชัดเจนที่สุด ลักษณะคล้ายพาราโบลา ส่วน PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent เห็นรอยขีดข่วนได้แต่ไม่ชัดเจนนัก และมีลักษณะใกล้เคียงกัน

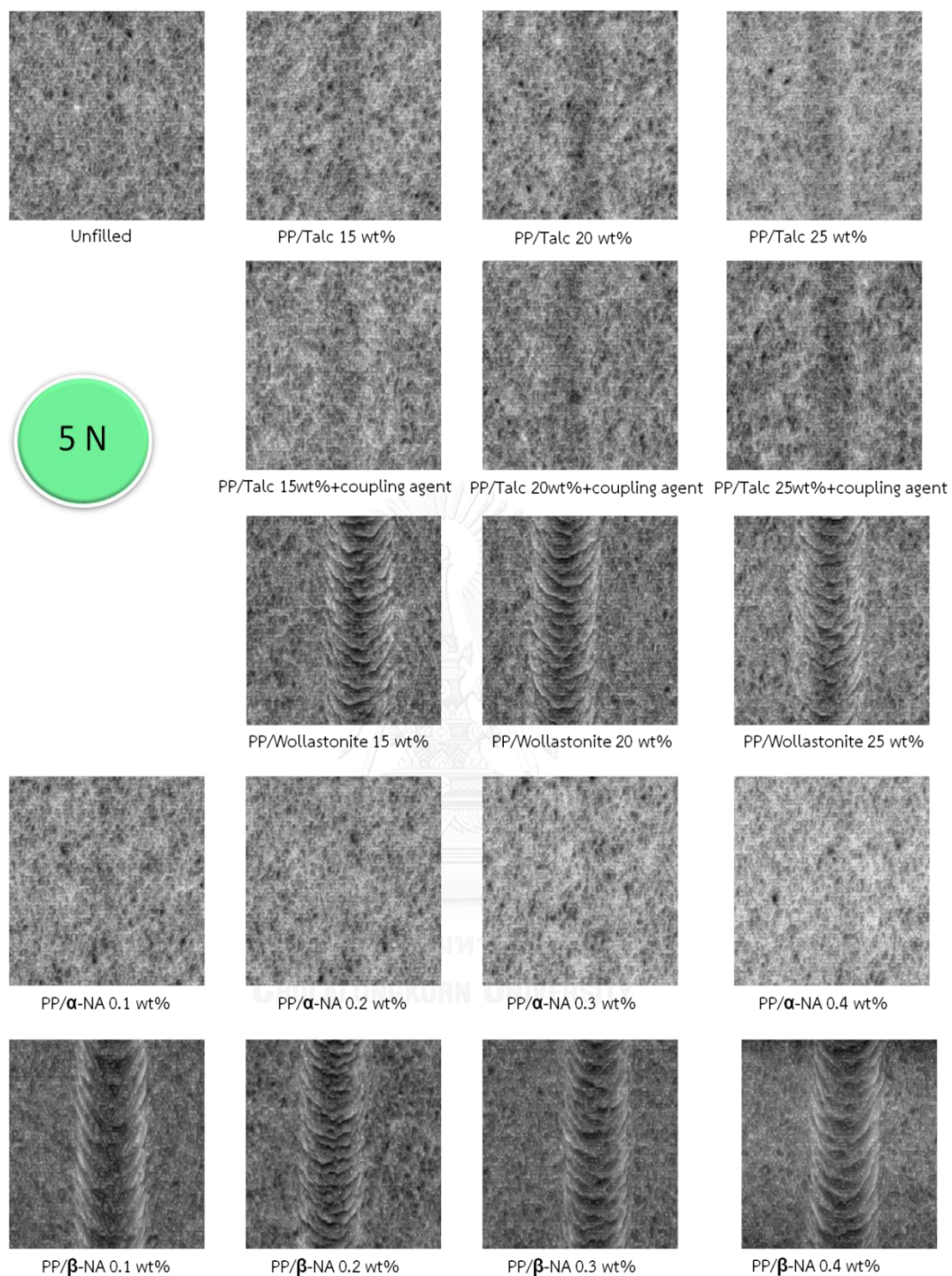
ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนค่อนข้างจางมากจนแทบไม่สามารถสังเกตเห็นรอยขีดข่วนได้ ส่วน PP/ β -NA พบว่ารอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีความชัดเจน คล้ายพาราโบลาหงาย

รูปที่ 5.43 แสดงภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน พบว่า PP/Talc PP/Talc + coupling agent และ PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนค่อนข้างชัดเจน มีลักษณะคล้ายพาราโบลาหงาย

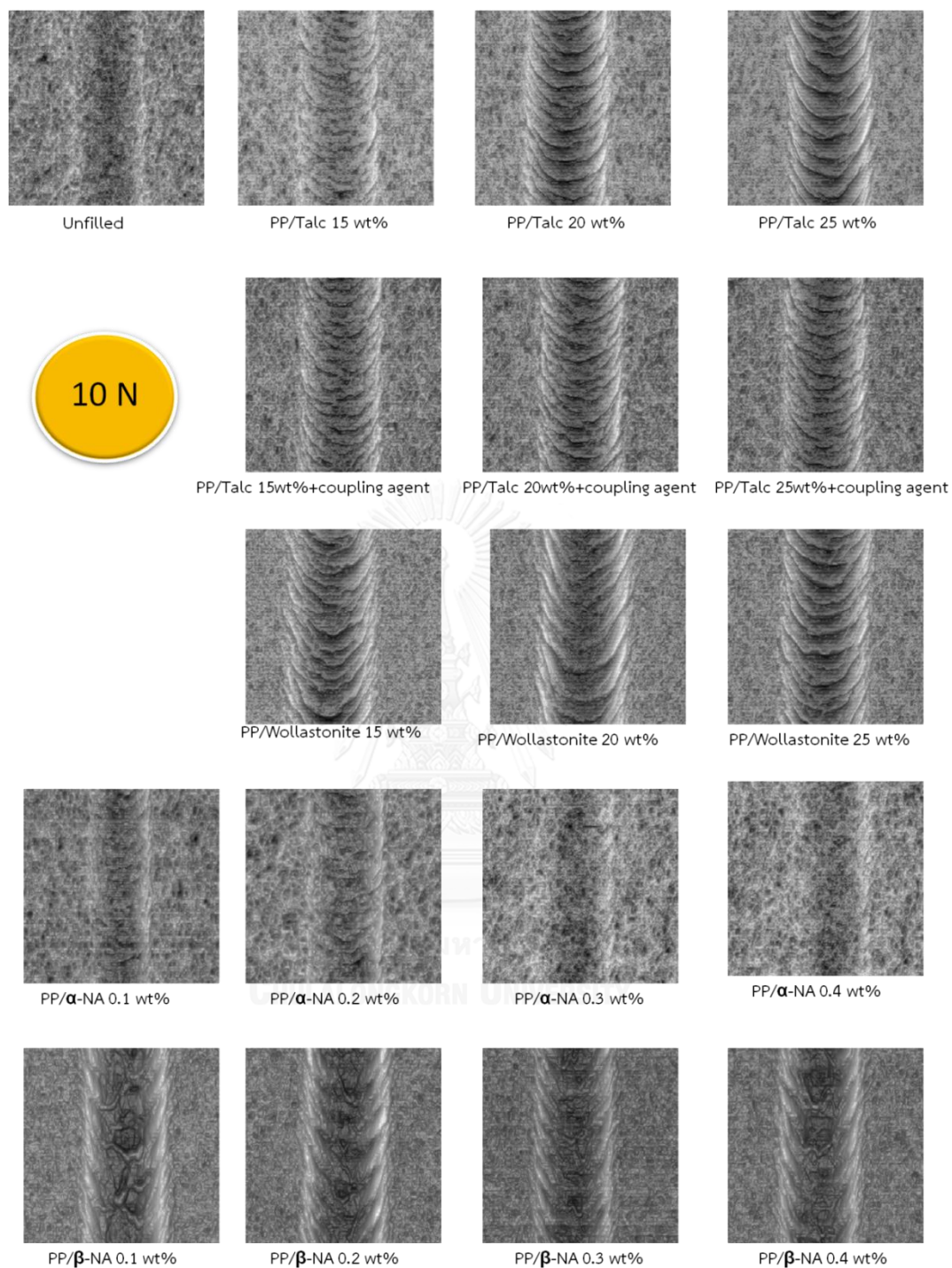
ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนไม่ชัดเจน รุนแรงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วน PP/ β -NA พบว่ารอยขีดข่วนมีความชัดเจน คล้ายพาราโบลาหงาย

รูปที่ 5.44 แสดงภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ของพบว่า PP/Talc PP/Talc + coupling agent และ PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนชัดเจน คล้ายพาราโบลาหงาย โดย PP/Wollastonite 25 wt% มีลักษณะรอยขีดข่วนคล้ายรอยไถ ซึ่งแสดงถึงการมีความต้านทานการเสีรูปต่ำ ทำให้เกิดรอยขีดข่วนง่ายและรุนแรง

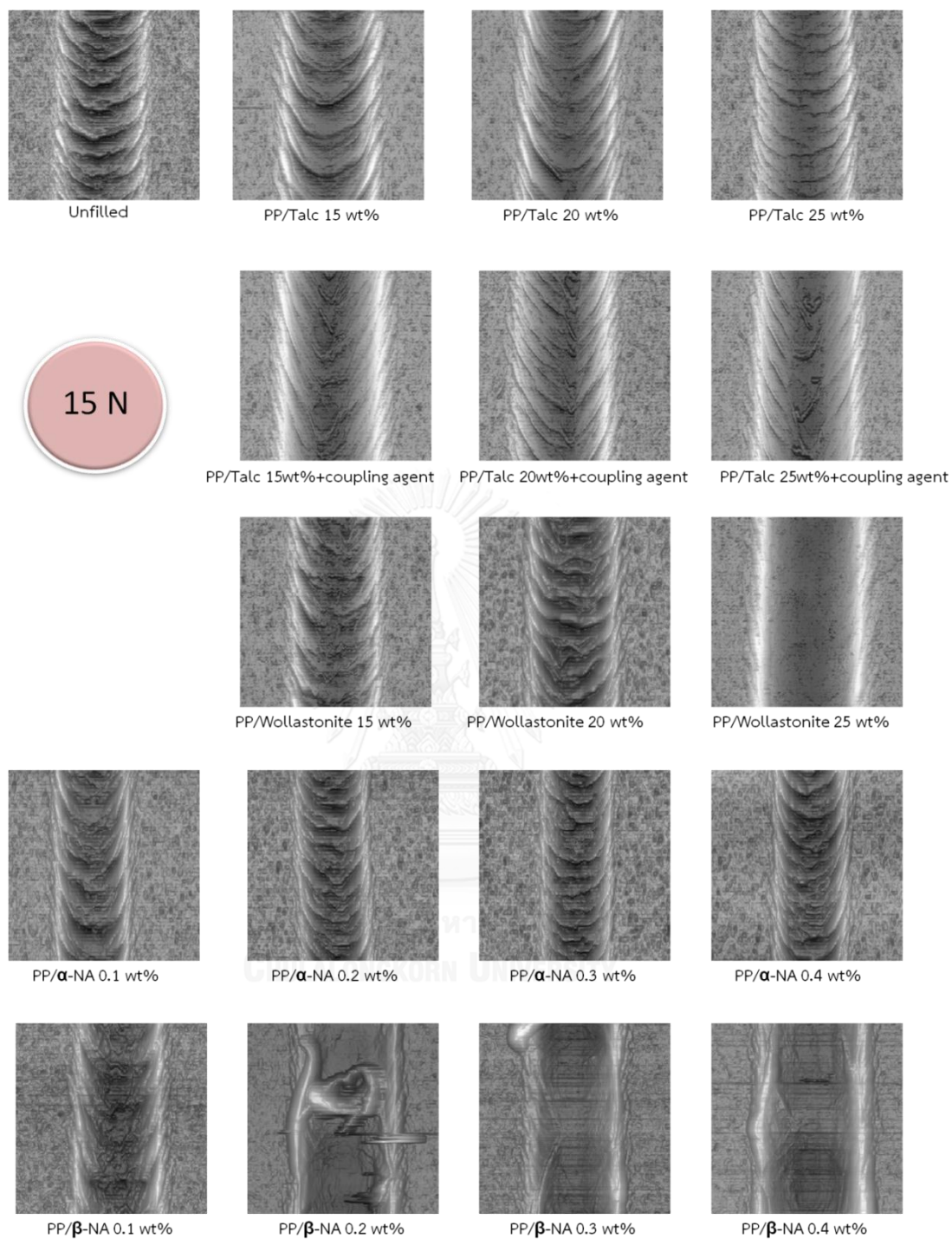
ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 15 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนรุนแรงน้อยกว่า และแคบกว่าคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วนรอยขีดข่วนของ PP/ β -NA นั้นมีความชัดเจน รุนแรง และมีลักษณะรอยขีดข่วนคล้ายรอยไถ



รูปที่ 5.42 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.43 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.44 ภาพจำลองรอยขีดข่วน 2 มิติ เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

5.6.10 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน (Mesh Axonometric)

รูปที่ 5.45 แสดงภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน จากเครื่อง Profilometer เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนที่ดูชัดเจนและลึกที่สุด ส่วน PP/Talc และ PP/Talc + coupling agent รอยขีดข่วนมีความลึกและแนวสันตื้นกว่า PP/Wollastonite

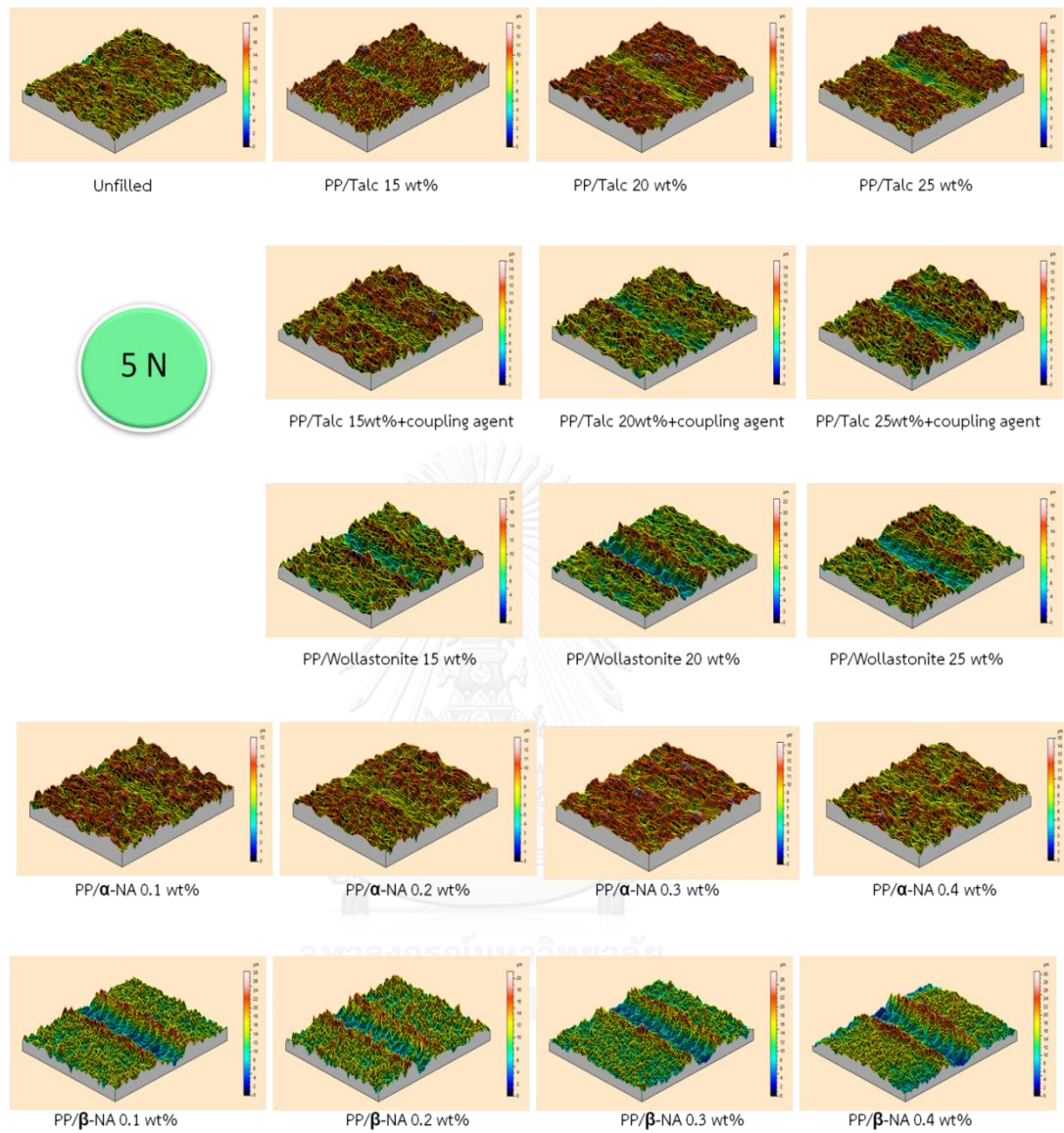
ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนที่ตื้น และค่อนข้างจางจนแทบไม่สามารถสังเกตเห็นรอยขีดข่วนได้ ส่วน PP/ β -NA นั้นรอยขีดข่วนมีความชัดเจน ลึก และมีลักษณะคล้ายพาราโบล่าหงาย

รูปที่ 5.46 แสดงภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน พบว่า PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนค่อนข้างชัดเจน คล้ายพาราโบล่าหงาย

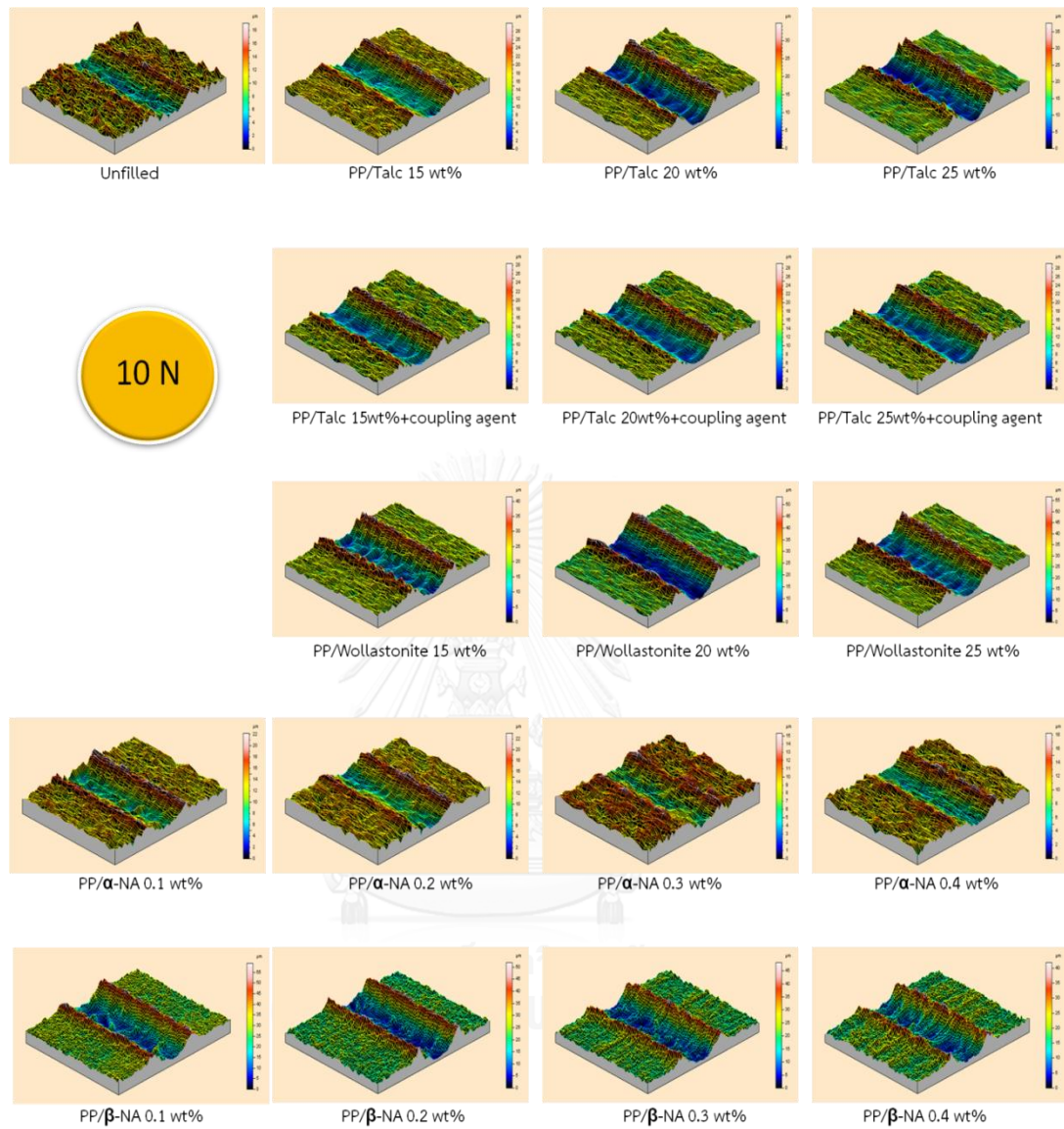
ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 10 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนที่ไม่ชัดเจนและรุนแรงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรอื่นๆ ส่วน PP/ β -NA พบว่ามีรอยขีดข่วนที่ค่อนข้างชัดเจน คล้ายพาราโบล่าหงาย

รูปที่ 5.47 แสดงภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน พบว่า PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite มีรอยขีดข่วนชัดเจน

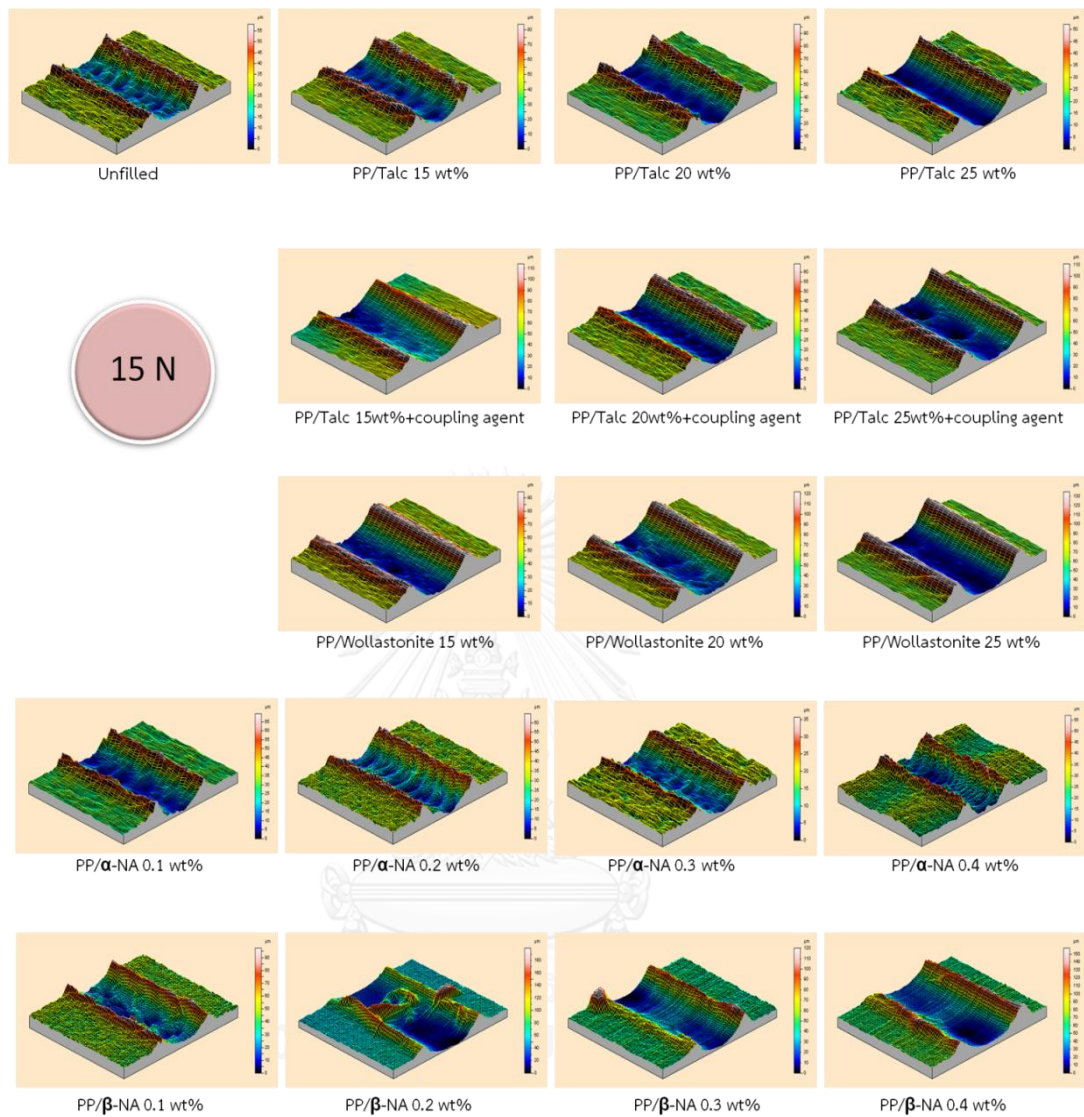
ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน ของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก เมื่อใช้แรงทำให้เกิดรอยขีดข่วน 15 N พบว่า PP/ α -NA มีรอยขีดข่วนที่รุนแรงน้อยกว่า และแคบกว่า PP/ β -NA โดยเห็นได้ว่า PP/ β -NA นั้นมีรอยขีดข่วนที่ชัดเจน



รูปที่ 5.45 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 5 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.46 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 10 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ



รูปที่ 5.47 ภาพ 3 มิติของผิวรอยขีดข่วน เมื่อใช้แรง 15 N ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

5.7 การวิเคราะห์ต้นทุน

การเปรียบเทียบวิเคราะห์ราคาต้นทุนวัตถุดิบจากการใช้สารตัวเติมและสารก่อผลึกแต่ละชนิด โดยใช้ราคาเฉลี่ยที่โรงงานจัดซื้อได้ แสดงดังตาราง 5.7

ตารางที่ 5.7 ราคาเม็ดคอมพาวนด์ PP สารตัวเติม และสารก่อผลึกชนิดต่างๆ

ราคาสาร	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
เม็ด Co-PP (EL-Pro P740J)	50
ทัลก์	25
ทัลก์ + สารประสานคู่ควบ	25.2
วอลลาสโตไนท์	45
สารก่อผลึกแอลฟาอนุภาคไมโคร	760
สารก่อผลึกเบตาอนุภาคนาโน	1,100

ราคาเม็ด Co-PP (EL-Pro P740J) ในท้องตลาดคิดราคาจากต้นทุนสารตั้งต้น ค่าใช้จ่ายจากกระบวนการผลิต แรงงานและสารเติมแต่งต่างๆเรียบร้อยแล้ว และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแค่สารตัวเติมและสารก่อผลึกชนิดต่างๆเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถคิดเฉพาะความแตกต่างด้านราคาของสารเติมแต่งได้โดยตรง การเปรียบเทียบวิเคราะห์ต้นทุนแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ราคาของสารเติมแต่งแต่ละชนิดเมื่อเติมในปริมาณต่างๆ

หน่วย : บาท/กิโลกรัม

ราคาสารก่อผลึก	ปริมาณการเติม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	0.10	0.20	0.30	0.40
α -NA (micron)	0.76	1.52	2.28	3.04
β -NA (nano)	1.10	2.20	3.30	5.50

ราคาสารตัวเติม	ปริมาณการเติม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	15.00	20.00	25.00
ทัลก์	3.75	5.00	6.25
ทัลก์ + สารประสานคู่ควบ	3.78	5.04	6.30
วอลลาสโตไนท์	6.75	9.00	11.25

ตารางที่ 5.9 ราคาเม็ดคอมพาวนด์ PP เมื่อเติมสารเติมแต่งแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ

หน่วย : บาท/กิโลกรัม

ชนิดสารก่อผลึก	ปริมาณการเติม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40
α -NA (micron)	50.00	50.71	51.42	52.13	52.84
β -NA (nano)	50.00	51.05	52.10	53.15	55.30

ชนิดสารตัวเติม	ปริมาณการเติม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	0.00	15.00	20.00	25.00
ทัลก์	50.00	46.25	45.00	43.75
ทัลก์ + สารประสานคู่ควบ	50.00	46.28	45.04	43.80
วอลลาสโตไนท์	50.00	49.25	49.00	48.75

จากตารางที่ 5.7-5.8 พบว่าในการเติมสารตัวเติม Wollastonite มีราคาสูงที่สุดคือ 45 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับ Talc และ Talc+coupling agent ที่มีราคา 25 และ 25.2 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นการเติม Talc Talc+coupling agent และ Wollastonite ปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก มีราคาประมาณ 3.75-6.25 3.78-6.30 และ 6.75-11.25 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยยิ่งเติมมากเท่าไร ราคา ก็จะยิ่งแตกต่างกันมากขึ้น

ส่วนสารก่อผลึก β -NA ราคา 1,100 บาทต่อกิโลกรัม สูงกว่า α -NA ซึ่งมีราคา 760 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นการเติม α -NA และ β -NA ปริมาณร้อยละ 0.1-0.4 โดยน้ำหนัก มีราคาประมาณ 0.76-3.04 และ 1.10-5.50 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยยิ่งเติมมากเท่าไร ราคา ก็จะยิ่งแตกต่างกันมากขึ้น

จากตารางที่ 5.9 พบว่า การเติมสารตัวเติมสามารถช่วยลดต้นทุนของวัตุดิบ PP ได้ โดยยิ่งเติมปริมาณมากเท่าไร ก็จะมีส่วนช่วยลดราคาต้นทุนของวัตุดิบ PP ได้มากขึ้น โดย PP/Talc PP/Talc+coupling agent และ PP/Wollastonite ปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก มีราคาประมาณ 43.75-46.25 43.8-46.28 และ 48.75-49.25 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยเห็นได้ว่า PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent มีราคาใกล้เคียงกัน และสามารถช่วยลดต้นทุนของวัตุดิบ PP ได้มากกว่า PP/Wollastonite ซึ่งลดต้นทุนของวัตุดิบ PP ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ส่วนการเติมสารก่อผลึก พบว่าเพิ่มต้นทุนของวัตุดิบ PP ให้สูงขึ้นเล็กน้อย โดย PP/ α -NA และ PP/ β -NA ปริมาณร้อยละ 0.1-0.4 โดยน้ำหนัก มีราคาประมาณ 50.71-52.84 และ 51.05-55.30 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานรอยขีดข่วนและสมบัติต่างๆของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารตัวเติม พบว่า PP/Talc 15 wt% มีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากมีความต้านทานรอยขีดข่วน ความแข็ง และระดับความเป็นผลึกสูง เมื่อเทียบกับ PP/สารตัวเติม สูตรอื่นๆ ส่วนคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก พบว่า PP/ α -NA 0.3 wt% มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีความต้านทานรอยขีดข่วน ความแข็ง และระดับความเป็นผลึกสูงที่สุด เมื่อเทียบกับคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบราคาระหว่าง 2 สูตรนี้ พบว่า PP/Talc 15 wt% มีราคาถูกกว่า PP/ α -NA 0.3 wt% ราวร้อยละ 11.3 แต่อย่างไรก็ตาม PP/ α -NA 0.3 wt% มีความต้านทานรอยขีดข่วนดีกว่า PP/Talc 15 wt% สูงถึงร้อยละ 80-88 นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิก่อผลึกสูงกว่าซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Cycle time) ได้ และมีน้ำหนักชิ้นงานเบากว่า

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเพื่อปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วนของชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่ผลิตจากคอมพาวนด์พอลิโพรพิลีนโดยใช้สารตัวเติม ได้แก่ ทัลก์ วอลลาสโตไนท์ และสารก่อผลึก ได้แก่ สารก่อผลึกแอลฟา สารก่อผลึกเบตา และศึกษาอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึก สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกายภาพ มีผลการวิจัยสรุปดังนี้

- 6.1.1 ด้านความต้านทานการขีดข่วน PP/ α -NA 0.3wt% สามารถต้านทานรอยขีดข่วนได้ดีที่สุด โดยทนได้มากกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งราวร้อยละ 22-40
- 6.1.2 PP/สารตัวเติม ต้านทานรอยขีดข่วนได้น้อยกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งเลย โดย PP/Wollastonite ต้านทานรอยขีดข่วนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ PP/Talc และ PP/Talc+coupling agent ที่ต้านทานรอยขีดข่วนใกล้เคียงกัน
- 6.1.3 การยึดติดระหว่างสารตัวเติมและแมทริกซ์ PP เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP แม้สารตัวเติมช่วยให้มอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) และมอดูลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) เพิ่มสูงขึ้น แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงความต้านทานรอยขีดข่วนได้หากขาดการยึดติดที่ดี
- 6.1.4 PP/ α -NA 0.3wt% มีระดับความเป็นผลึกสูงสุดประมาณร้อยละ 42 มากกว่า PP/สารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 22-32 และร้อยละ 36 ตามลำดับ ส่งผลให้ PP/ α -NA 0.3wt% มีความแข็งสูงสุดราว 74 ซึ่งมากกว่า PP/สารตัวเติม และคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ที่มีความแข็งประมาณ 51-65 และ 65 ตามลำดับ
- 6.1.5 ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ความแข็ง (Hardness) และความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ส่งผลต่อความแข็งรอยขีดข่วน (Scratch

Hardness) เมื่อระดับความเป็นผลึก ความแข็ง หรือ ความเค้น ณ จุดคราก สูงขึ้น มีผลทำให้ความแข็งแรงรอยขีดข่วนหรือความต้านทานรอยขีดข่วนสูงมากขึ้นตามไปด้วย

- 6.1.6 PP/ α -NA และ PP/ β -NA มีอิทธิพลเพิ่มอุณหภูมิก่อผลึก (T_c) โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเติมปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 131 °C และ 129 °C ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่มีอุณหภูมิก่อผลึก 118 °C ส่วน PP/Talc และ PP/Wollastonite มีอุณหภูมิก่อผลึกค่อนข้างคงที่เฉลี่ยราว 127 °C และ 119 °C ตามลำดับ

6.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อ

- 6.2.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาฉีดขึ้นรูปชิ้นงานคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α : เพื่อลดระยะเวลาที่ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์
- 6.2.2 ปรับปรุงทั้งมอดูลัส อุณหภูมิโค้งตัวทางความร้อนและความต้านทานรอยขีดข่วนของคอมพาวนด์ PP : ศึกษาทั้งการเติมทัลก์และสารก่อผลึกในคอมพาวนด์ PP
- 6.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบสารก่อผลึกแอลฟากับสารก่อผลึกชนิดอื่นๆที่ใช้ในอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

1. *PP Compound...ส่วนหนึ่งที่ร่วมขับเคลื่อนเพื่อสิ่งแวดล้อม*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.scgchemicals.co.th/th/story/1487/> 24 สิงหาคม 2558.
2. J. Malzbender, J.M.J.d.T., A.R. Balkenende, G. de With, *Measuring mechanical properties of coating: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coating on glass*. Journal of Materials science & Engineering, 2002. **R 36**: p. 47-103.
3. S.J. Bull, E.G.B., *An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing*. Journal of Tribology International, 2006. **39**: p. 99-114.
4. Amerio, E., et al., *Scratch resistance of nano-silica reinforced acrylic coatings*. Journal of Progress in Organic Coatings, 2008. **62**: p. 129-133.
5. C. Gauthier, A.L.D., C. Fond, R. Schirrer, *Scratching of a coating polymer and mechanical analysis of a scratch resistance solution*. Journal of Tribology International, 2006. **39**: p. 88-98.
6. M.H. Bles, G.B.W., A.R. Balkenende, J.M.J. den Toonder, *The effect of friction on scratch adhesion testing: application to a sol-gel coating on polypropylene*. Journal of thin solid film, 2000. **359**: p. 1-13.
7. Ding, Q., et al., *Crystallization behavior and melting characteristics of wollastonite filled β -isotactic polypropylene composites*. Journal of Thermochemica Acta 2012. **536**: p. 47-54.
8. Tanniru, M., et al., *The determining role of calcium carbonate on surface deformation during scratching of calcium carbonate-reinforced polyethylene composites*. Journal of Materials science & Engineering, 2005. **A 404**: p. 208-220.
9. Surampadi, N.L., T.C. Pesacreta, and R.D.K. Misra, *The determining role of scratch indenter radius on surface deformation of high density polyethylene and calcium carbonate-reinforced composite*. Journal of Materials science & Engineering, 2007. **A 456**: p. 218-229.

10. Dou, Q. and Q.-L. Lu, *Effect of calcium malonate on the formation of beta crystalline form in isotactic polypropylene*. journal of Polymer Advance Technology, 2008. **19**: p. 1522-1527.
11. Onuegbu, G.C. and I.O. Igwe, *The Effect of Filler Contents and Particle Sizes on the Mechanical and End-Use Properties of snail Shell Powder Filled Polypropylene* Journal of Materials Sciences and Application, 2011. **2**: p. 811-817.
12. Meng, M.-R. and Q. Dou, *Effect of pimelic acid on the crystallization, morphology and mechanical properties of polypropylene/wollastonite composites*. Journal of Materials Science and Engineering, 2008. **A492**: p. 177-184.
13. Obata, Y., T. Sumitomo, and T. Ijitsu, *The effect of Talc on the Crystal Orientation in Polypropylene/Ethylene-Propylene Rubber/Talc Polymer Blends in Injection Molding*. Journal of Polymer Engineering and Science, 2001. **41**.
14. Choi, W.J. and S.C. Kim, *Effect of talc orientation and non-isothermal crystallization rate on crystallization rate on crystal orientation of polypropylene in injection-molded polypropylene/ethylene-propylene rubber/talc blends*. Journal of Polymer, 2004. **45**: p. 2393-2401.
15. Qiu, F., et al., *The effect of talc orientation and transcrystallization on mechanical properties and thermal stability of the polypropylene/talc composites*. Journal of Composites, 2014. **58**: p. 7-15.
16. Hadal, R.S., et al., *Effect of wollastonite and talc on the micromechanisms of tensile deformation in polypropylene composites*. Journal of Materials science & Engineering 2004. **A 372**: p. 296-315.
17. Yu, F., et al., *Effects of Talc on the Mechanical and Thermal Properties of Polylactide*. journal of Applied Polymer Science, 2012. **125**: p. E99-E109.
18. Singh, U.P., B.K. Biswas, and B.C. Ray, *Evaluation of mechanical properties of polypropylene filled with wollastonite and silicon rubber*. Journal of Materials Science and Engineering, 2009. **A501**: p. 94-98.

19. Zhou, Y., et al., *Experimental study on thermal and mechanical behavior of polypropylene, talc/polypropylene and polypropylene/clay nanocomposites*. Journal of Materials science & Engineering, 2005. **A 402**: p. 109-117.
20. Vallittu, P.K., *High-aspect ratio fillers: Fiber-reinforced composites and their anisotropic properties*. Journal of Dental Materials, 2014. **2417**.
21. Guerrica-Echevarria, G., J.I. Eguiazabal, and J.Nazabal, *Influence of molding conditions and talc content on the properties of polypropylene composites*. European Polymer Journal, 1998. **34**: p. 1213-1219.
22. Mehrjerdi, A.K., et al., *Mechanical and Thermo-Physical Properties of High-Density Polyethylene Modified with Talc*. Journal of Applied Polymer Science, 2013. **129**: p. 2128-2138.
23. Mareri, P., et al., *Mechanical Behaviour of Polypropylene Composites Containing Fine Mineral Filler : Effect of Filler Surface Treatment*. Journal of Composites Science and Technology, 1998. **58**: p. 747-752.
24. Luyt, A.S., et al., *Morphology, Mechanical and thermal properties of composites of polypropylene and nanostructured wollastonite filler*. Journal of Polymer testing, 2009. **28**: p. 348-356.
25. Dasari, A., J. Rohrmann, and R.D.K. Misra, *On the scratch deformation of micrometric wollastonite reinforced polypropylene composites*. Journal of Materials Science and Engineering, 2004. **A364**: p. 357-369.
26. J.Chu, C.X., H.-J. Sue, R.Damon Hollis, *Scratch Resistance of Mineral-Filled Polypropylene Materials*. Journal of Polymer Engineering and Science, 2000. **40(4)**.
27. Hadal, R., et al., *Susceptibility to scratch surface damage of wollastonite- and talc-containing polypropylene micrometric composites*. Journal of Materials science & Engineering, 2004. **A 380**: p. 326-339.
28. Chu, J., et al., *Scratch Resistance of Mineral-Filled Polypropylene Materials*. Journal of Polymer Engineering and Science, April 2000. **40(4)**.
29. Chu, J., L. Rumao, and B.Coleman, *Scratch and Mar Resistance of Filled Polypropylene Materials*. Journal of Polymer Engineering and Science, 1998. **38(11)**.

30. Misra, R.D.K., R. Hadal, and S.J. Duncan, *Surface damage behavior during scratch deformation of mineral reinforced polymer composites*. Journal of Acta Materialia, 2004. **52**: p. 4363-4376.
31. Thridandapani, R.R., et al., *Near surface deformation associated with the scratch in polypropylene-clay nanocomposite*. Journal of Materials Science and Engineering, 2006. **A418**: p. 292-302.
32. R. Hadal, Q.Y., J.P. Jog, R.D.K. Misra, *On stress whitening during surface deformation in clay-containing polymer nanocomposites: A microstructural approach*. Journal of Materials Sciences and Engineering, 2006. **A 418**: p. 268-281.
33. Zhou, X., et al., *Different crystallization behavior of olefin block copolymer in alpha- and beta- polypropylene matrix*. Journal of Polymer, 2013. **54**: p. 4719-4727.
34. Zhang, Z., et al., *Preparation and characteristics of nano-CaCO₃ supported beta-nucleating agent of polypropylene*. European Polymer Journal, 2008. **44**: p. 1955-1961.
35. Zhang, X., D. Zhang, and T. Liu. *Influence of Nucleating Agent on Properties of Isotactic Polypropylene*. in *International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems*. 2012. Energy Procedia
36. Yi, Q.-F., et al., *A novel effective way of comprising a beta-nucleating agent in isotactic polypropylene (i-PP): Polymerized dispersion and polymer characterization*. Journal of Polymer, 2008. **49**: p. 5053-5063.
37. Petchwattana, N., S. Covavisaruch, and P. Sripanya, *Effect of nano-scaled styrene butadiene rubber based nucleating agent on the thermal, crystallization and physical properties of isotactic*. Journal of Alloys and Compounds, 2014. **582**: p. 190-195.
38. Cermak, R., et al., *Injection-moulded alpha- and beta- polypropylene : II. Tensile properties vs. processing parameters*. European Polymer Journal 2006. **42**: p. 2185-2191.

39. Barany, T., A. Izer, and J. Karger-Kocsis, *Impact resistance of all-polypropylene composites composed of alpha and beta modifications*. Journal of Polymer Testing, 2009. **28**: p. 176-182.
40. Kong, J., et al., *Study of a skin-core type of crystallinity distribution within polyethylene specimen crystallized under high pressure*. Journal of Polymer, 2005. **46**: p. 7644-7651.
41. ทัลค์ (Talc). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=1029&filename=min5
16 พฤษภาคม 2558
42. วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
http://thaiceramicsociety.com/rm_paint_wollastonite.php 16 พฤษภาคม 2558.
43. พอลิโพรพิลีน (PP). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://at2material.com/materials/polypropylene-pp/> 16 พฤษภาคม 2558.
44. สารก่อผลึก (Nucleating Agent, NA). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.specialchem4polymers.com/tc/polypropylene-nucleation/index.aspx?id=pp-nucleating> 16 พฤษภาคม 2558.
45. ความสำคัญของ *Extrusion Condition* สำหรับงาน *Extrusion Coating*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.scgchemicals.co.th/th/service/commercial/technical-knowledge-library/1474/> 16 พฤษภาคม 2558.
46. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศ.เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์ . Differential scanning calorimeter [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2606/differential-scanning-calorimeter> 16 พฤษภาคม 2558.
47. รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ (มจร.). เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis
48. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.microscopes.in.th/20/light-microscope-หรือ-optical-microscope-คือ.html> 16 พฤษภาคม 2558.
49. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (Scientific Instrument Center for Standard and Industry). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

- <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-driffraction> 16 พฤษภาคม 2558.
50. *Scratch testing machine* [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก : <http://www.taberindustries.com/multi-finger-scratch-mar-tester> 16 พฤษภาคม 2558.
51. *Profilometer* [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก : <http://en.wikipedia.org/wiki/Profilometer> 16 พฤษภาคม 2558.
52. Zokaei, S., R.L.K. M., and R. Bagheri, *Study of scratch resistance in homo- and co-polypropylene filled with nanometric calcium carbonate*. Journal of Materials Science and Engineering, 2007. **A 445-446**: p. 526-536.
53. Zhang, P., X. Liu, and Y. Li, *Influence of β -nucleating agent on the mechanics and crystallization characteristics of polypropylene*. Journal of Materials Science and Engineering, 2006. **A434**: p. 310-313.
54. Chivatanasootorn, V., S. Tsukise, and M. Kotaki, *Influence of surface texture on scratch behavior of molded plastics*. Journal of Polymer Engineering and Science, 2012.
55. Dasari, A. and R.D.K. Misra, *The role of micrometric wollastonite particles on stress whitening behavior of polypropylene composites*. Journal of Acta Materialia, 2004. **52**: p. 1683-1697.



ภาคผนวก

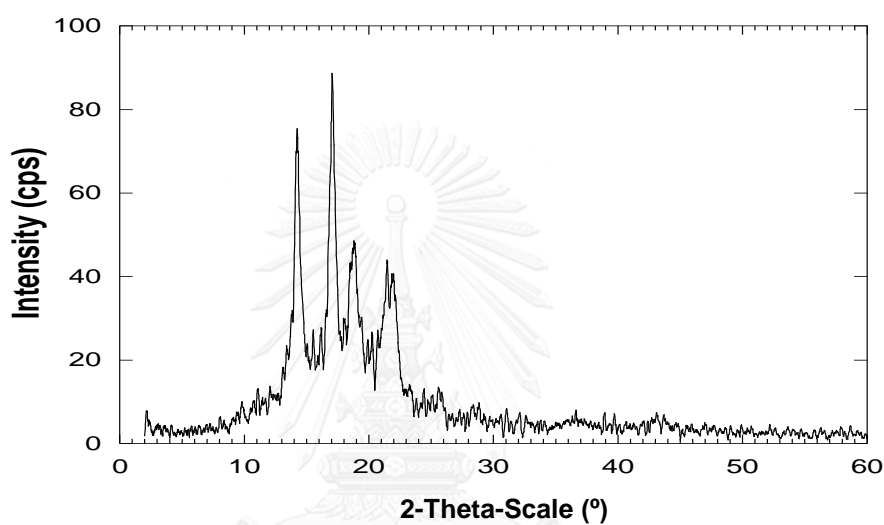
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

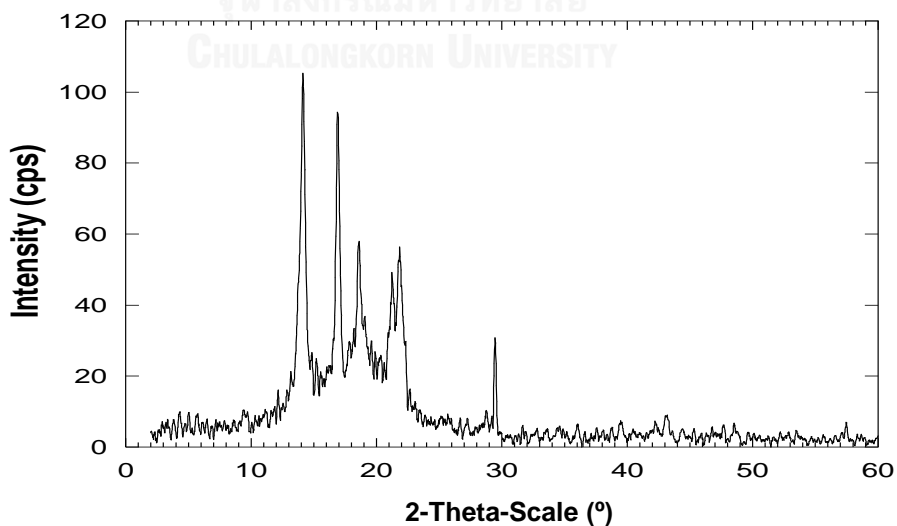
การเกิดผลึก

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

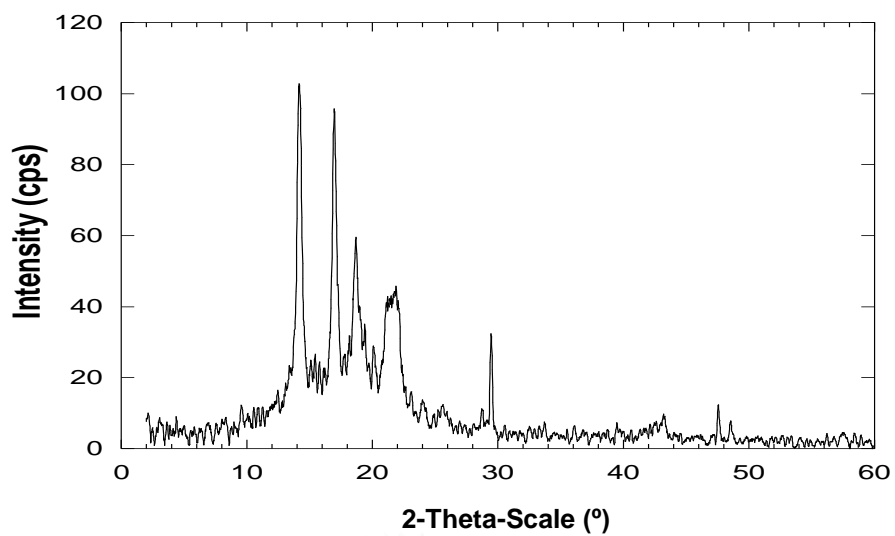
(X-ray Diffractometer, XRD)



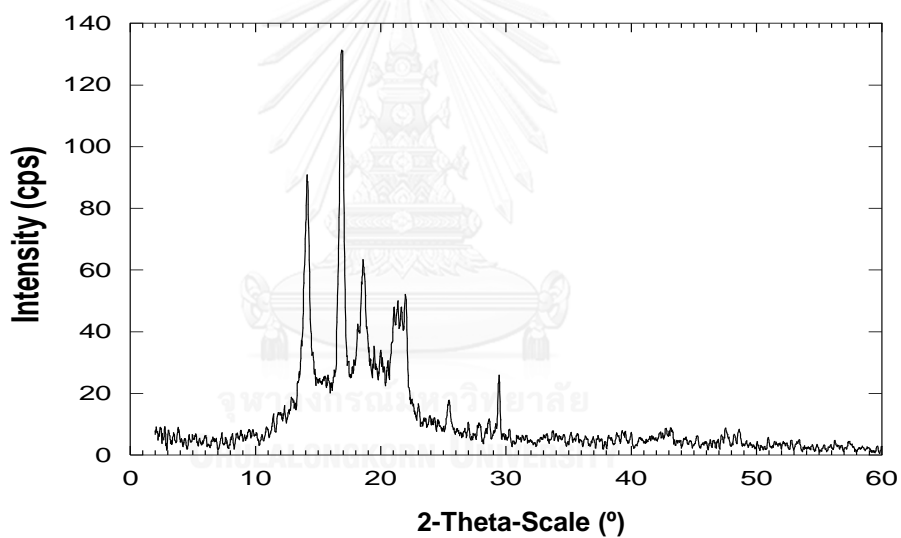
รูปที่ ก.1 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง



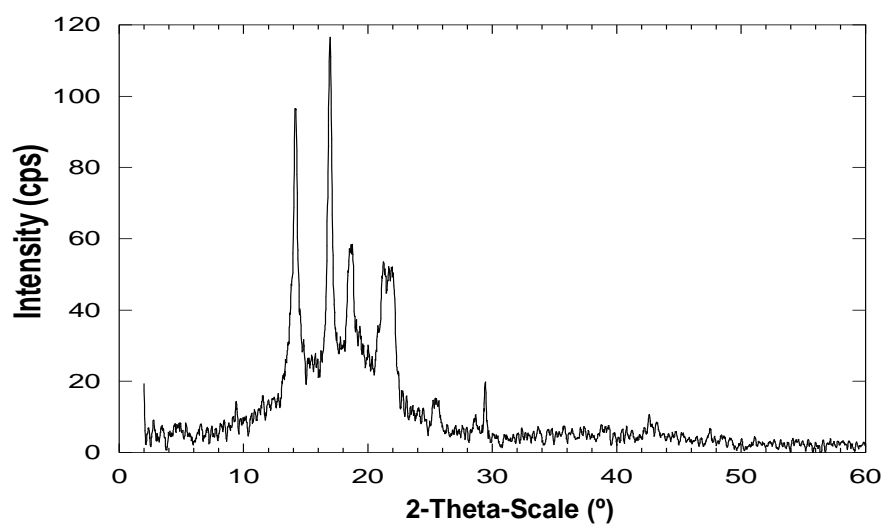
รูปที่ ก.2 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



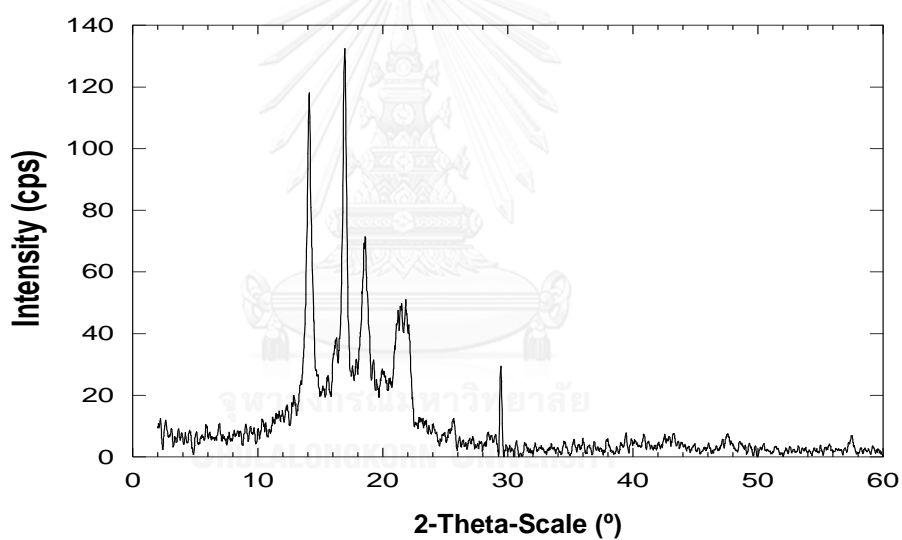
รูปที่ ก.3 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก



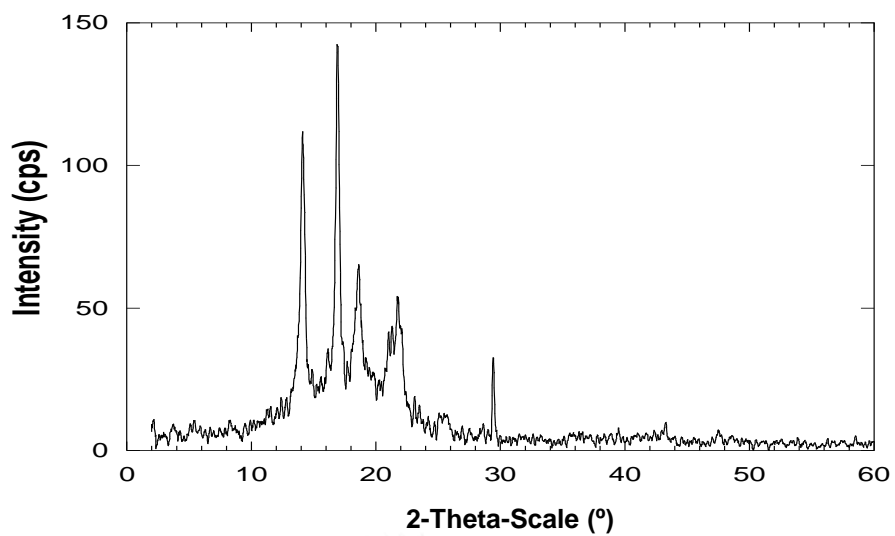
รูปที่ ก.4 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก



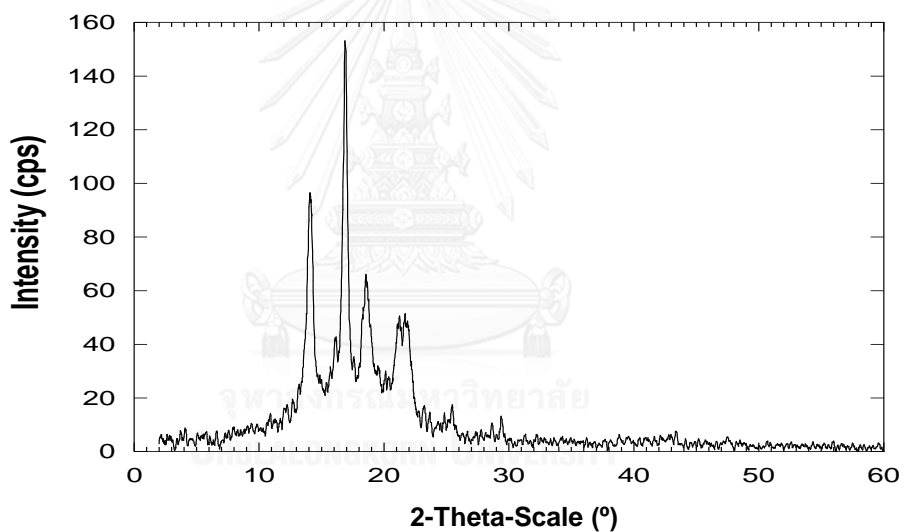
รูปที่ ก.5 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก α ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก



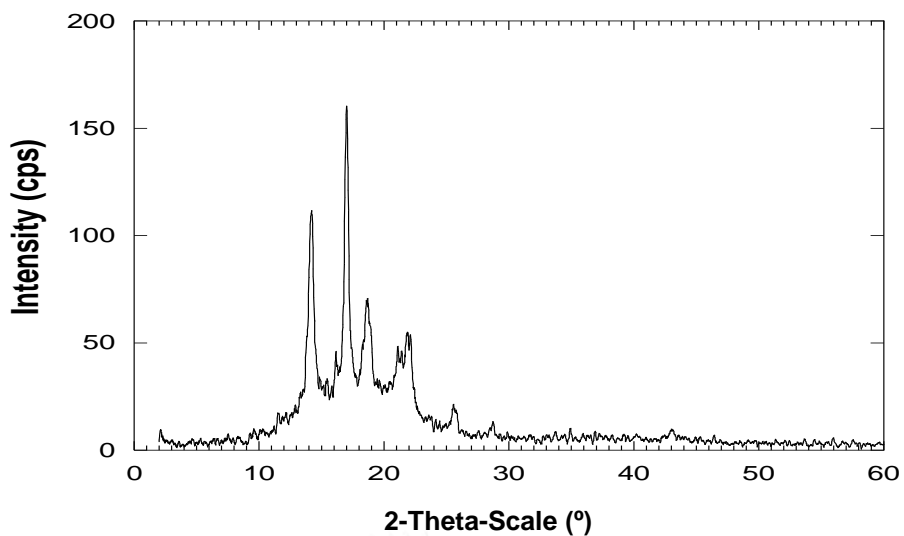
รูปที่ ก.6 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.7 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.8 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.9 โครงสร้างผลึกของคอมพาวนด์ PP ที่เติมสารก่อผลึก β ปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ก.1 พื้นที่ใต้กราฟและค่าสัดส่วนผลึกเบตา

Contents (wt%)		พื้นที่ใต้กราฟ						K value
		14.0	16.0	16.9	18.8	21.8	25.5	
α - NA	0.0	40.96	-	36.28	23.57	34.6	6.70	-
	0.1	50.64	-	28.64	29.23	40.15	3.32	-
	0.2	48.98	-	32.65	27.18	38.12	6.56	-
	0.3	41.19	-	47.16	24.94	41.44	4.41	-
	0.4	45.57	-	37.57	22.41	45.14	6.03	-
β - NA	0.1	51.37	4.20	44.02	27.43	43.51	3.77	0.033
	0.2	49.72	4.12	50.74	35.52	40.01	8.90	0.029
	0.3	49.78	4.025	54.94	30.01	38.18	9.96	0.029
	0.4	55.28	3.71	54.73	25.2	33.11	8.45	0.027

ภาคผนวก ข

อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (Heat Deflection Temperature)

Material	HDT (°C)
Unfilled PP	79.00±1.35
PP/ α -NA 0.1 wt%	82.97±3.27
PP/ α -NA 0.2 wt%	87.30±1.65
PP/ α -NA 0.3 wt%	90.87±0.75
PP/ α -NA 0.4 wt%	94.87±2.41
PP/ β -NA 0.1wt%	83.87±2.63
PP/ β -NA 0.2wt%	83.23±2.11
PP/ β -NA 0.3wt%	91.43±1.85
PP/ β -NA 0.4wt%	88.63±1.52
PP/Talc 15 wt%	97.57±3.61
PP/Talc 20 wt%	101.77±2.78
PP/Talc 25 wt%	105.43±2.95
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	103.53±1.91
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	104.33±1.72
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	108.30±3.05
PP/Wollastonite 15 wt%	85.83±1.39
PP/Wollastonite 20 wt%	93.27±0.83
PP/Wollastonite 25 wt%	92.33±3.68

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค.1 สมบัติภายใต้แรงดึงของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Tensile elongation at break (%)
Unfilled PP	20.78±0.34	0.98±0.01	508.57±5.26
PP/ α -NA 0.1 wt%	21.71±0.15	1.02±0.01	504.06±0.84
PP/ α -NA 0.2 wt%	22.58±0.06	1.08±0.01	503.63±0.84
PP/ α -NA 0.3 wt%	22.79±0.18	1.17±0.03	104.78±1.69
PP/ α -NA 0.4 wt%	22.41±0.16	1.25±0.01	509.05±1.69
PP/ β -NA 0.1wt%	21.59±0.19	1.01±0.03	513.04±15.06
PP/ β -NA 0.2wt%	22.08±0.19	1.09±0.03	516.28±11.51
PP/ β -NA 0.3wt%	22.31±0.04	1.10±0.01	517.48±30.18
PP/ β -NA 0.4wt%	22.45±0.07	1.13±0.02	123.04±22.19
PP/Talc 15 wt%	21.57±0.32	1.74±0.02	519.92±37.62
PP/Talc 20 wt%	21.28±0.21	1.81±0.04	512.62±16.35
PP/Talc 25 wt%	20.79±0.28	1.85±0.01	513.64±21.63
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	22.47±0.22	1.78±0.03	515.80±25.35
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	22.39±0.18	2.00±0.01	509.77±37.06
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	21.86±0.05	1.91±0.08	511.80±37.95
PP/Wollastonite 15 wt%	20.13±0.16	1.50±0.04	514.43±20.49
PP/Wollastonite 20 wt%	19.46±0.18	1.75±0.07	502.52±8.93
PP/Wollastonite 25 wt%	18.68±0.09	1.95±0.05	520.74±11.73

ตารางที่ ค.2 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
Unfilled PP	27.29±0.18	1.00±0.03
PP/ α -NA 0.1 wt%	28.60±0.16	1.10±0.01
PP/ α -NA 0.2 wt%	29.83±0.09	1.20±0.02
PP/ α -NA 0.3 wt%	31.29±0.16	1.30±0.02
PP/ α -NA 0.4 wt%	31.76±0.15	1.30±0.04
PP/ β -NA 0.1wt%	28.20±0.15	1.10±0.02
PP/ β -NA 0.2wt%	29.15±0.17	1.20±0.02
PP/ β -NA 0.3wt%	29.51±0.06	1.20±0.02
PP/ β -NA 0.4wt%	29.91±0.11	1.26±0.01
PP/Talc 15 wt%	31.12±0.08	1.90±0.03
PP/Talc 20 wt%	31.23±0.12	2.10±0.06
PP/Talc 25 wt%	30.89±0.09	2.20±0.03
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	31.98±0.22	1.98±0.03
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	32.46±0.18	2.12±0.05
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	32.38±0.18	2.30±0.09
PP/Wollastonite 15 wt%	27.74±0.15	1.93±0.12
PP/Wollastonite 20 wt%	27.48±0.07	2.13±0.07
PP/Wollastonite 25 wt%	27.09±0.20	2.54±0.09

ตารางที่ ค.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทกของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Impact strength (kJ/m ²)
Unfilled PP	13.65±0.92
PP/ α -NA 0.1 wt%	15.14±0.80
PP/ α -NA 0.2 wt%	12.57±0.62
PP/ α -NA 0.3 wt%	12.27±0.62
PP/ α -NA 0.4 wt%	12.71±0.73
PP/ β -NA 0.1wt%	10.81±0.35
PP/ β -NA 0.2wt%	10.46±1.17
PP/ β -NA 0.3wt%	10.73±0.51
PP/ β -NA 0.4wt%	10.29±0.31
PP/Talc 15 wt%	34.83±0.73
PP/Talc 20 wt%	35.74±0.96
PP/Talc 25 wt%	31.78±0.53
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	25.05±2.47
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	23.90±1.89
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	24.01±1.15
PP/Wollastonite 15 wt%	40.47±0.92
PP/Wollastonite 20 wt%	41.41±0.66
PP/Wollastonite 25 wt%	38.28±0.69

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

ตาราง ง.1 สมบัติความแข็งของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Hardness
Unfilled PP	65.37±0.31
PP/ α -NA 0.1 wt%	70.14±0.11
PP/ α -NA 0.2 wt%	72.36±0.10
PP/ α -NA 0.3 wt%	73.55±0.27
PP/ α -NA 0.4 wt%	72.44±0.24
PP/ β -NA 0.1wt%	64.06±0.42
PP/ β -NA 0.2wt%	66.40±0.77
PP/ β -NA 0.3wt%	66.27±0.69
PP/ β -NA 0.4wt%	66.64±0.36
PP/Talc 15 wt%	63.29±0.29
PP/Talc 20 wt%	61.04±0.16
PP/Talc 25 wt%	58.21±1.05
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	64.66±0.35
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	62.84±0.55
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	57.95±1.15
PP/Wollastonite 15 wt%	52.47±0.20
PP/Wollastonite 20 wt%	52.03±0.71
PP/Wollastonite 25 wt%	48.55±0.97

ตาราง ง.2 อัตราการหลอมไหลของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Melt flow rate (g/10min)
Unfilled PP	21.02±0.06
PP/ α -NA 0.1 wt%	18.76±0.02
PP/ α -NA 0.2 wt%	19.38±0.22
PP/ α -NA 0.3 wt%	19.06±0.09
PP/ α -NA 0.4 wt%	19.02±0.06
PP/ β -NA 0.1wt%	20.37±0.23
PP/ β -NA 0.2wt%	21.14±0.14
PP/ β -NA 0.3wt%	20.88±0.03
PP/ β -NA 0.4wt%	20.14±0.06
PP/Talc 15 wt%	21.91±0.01
PP/Talc 20 wt%	21.77±0.09
PP/Talc 25 wt%	19.05±0.04
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	17.37±0.16
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	16.17±0.05
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	14.82±0.48
PP/Wollastonite 15 wt%	23.34±0.11
PP/Wollastonite 20 wt%	25.05±0.04
PP/Wollastonite 25 wt%	25.81±0.13

ตาราง ง.3 ความถ่วงจำเพาะของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Specific Gravity
Unfilled PP	0.906±0.001
PP/ α -NA 0.1 wt%	0.894±0.001
PP/ α -NA 0.2 wt%	0.898±0.001
PP/ α -NA 0.3 wt%	0.902±0.001
PP/ α -NA 0.4 wt%	0.894±0.001
PP/ β -NA 0.1wt%	0.882±0.001
PP/ β -NA 0.2wt%	0.888±0.002
PP/ β -NA 0.3wt%	0.889±0.002
PP/ β -NA 0.4wt%	0.880±0.002
PP/Talc 15 wt%	1.002±0.001
PP/Talc 20 wt%	1.017±0.002
PP/Talc 25 wt%	1.077±0.001
PP/Talc 15 wt%+coupling agent	0.997±0.001
PP/Talc 20 wt%+coupling agent	1.035±0.001
PP/Talc 25 wt%+coupling agent	1.037±0.001
PP/Wollastonite 15 wt%	0.988±0.001
PP/Wollastonite 20 wt%	1.031±0.001
PP/Wollastonite 25 wt%	1.087±0.001

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบสมบัติด้านทานรอยขีดข่วน

ตาราง จ.1 ความลึกรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Load of Scratch	Scratch Depth (μm)		
		5 N	10 N	15 N
Unfilled PP		2.01 \pm 0.15	5.17 \pm 1.05	17.07 \pm 1.16
PP/ α -NA 0.1 wt%		1.66 \pm 0.21	4.77 \pm 0.29	19.50 \pm 0.71
PP/ α -NA 0.2 wt%		1.38 \pm 0.08	4.56 \pm 0.62	18.00 \pm 2.10
PP/ α -NA 0.3 wt%		1.43 \pm 0.07	4.23 \pm 0.60	12.73 \pm 3.20
PP/ α -NA 0.4 wt%		1.46 \pm 0.17	4.54 \pm 0.24	15.45 \pm 0.49
PP/ β -NA 0.1wt%		3.74 \pm 0.44	14.80 \pm 1.57	37.40 \pm 1.56
PP/ β -NA 0.2wt%		3.85 \pm 0.44	14.67 \pm 1.00	43.50 \pm 3.11
PP/ β -NA 0.3wt%		5.02 \pm 0.45	12.20 \pm 0.30	34.25 \pm 3.46
PP/ β -NA 0.4wt%		4.70 \pm 0.54	11.80 \pm 0.35	38.00 \pm 6.30
PP/Talc 15 wt%		2.58 \pm 0.06	7.78 \pm 0.99	24.13 \pm 3.83
PP/Talc 20 wt%		3.10 \pm 0.12	11.57 \pm 1.22	28.60 \pm 5.94
PP/Talc 25 wt%		2.75 \pm 0.12	11.87 \pm 0.92	24.00 \pm 2.61
PP/Talc 15 wt%+coupling agent		2.31 \pm 0.36	7.81 \pm 0.13	33.27 \pm 3.28
PP/Talc 20 wt%+coupling agent		2.57 \pm 0.14	8.75 \pm 0.16	38.60 \pm 3.47
PP/Talc 25 wt%+coupling agent		3.06 \pm 0.20	9.21 \pm 0.45	39.50 \pm 3.44
PP/Wollastonite 15 wt%		4.52 \pm 1.12	12.30 \pm 0.03	40.43 \pm 3.30
PP/Wollastonite 20 wt%		5.35 \pm 0.73	16.87 \pm 0.00	49.75 \pm 4.74
PP/Wollastonite 25 wt%		4.35 \pm 0.67	13.83 \pm 0.02	49.10 \pm 5.20

ตาราง จ.2 แนวสันรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Load of Scratch	Scratch Ridge (μm)		
		5 N	10 N	15 N
Unfilled PP		1.09±0.34	3.88±0.85	20.05±1.64
PP/ α -NA 0.1 wt%		0.78±0.19	6.12±0.46	26.76±3.66
PP/ α -NA 0.2 wt%		0.90±0.18	5.55±1.09	20.70±3.45
PP/ α -NA 0.3 wt%		0.90±0.13	3.22±0.89	14.83±3.18
PP/ α -NA 0.4 wt%		0.98±0.26	4.23±0.69	19.57±1.39
PP/ β -NA 0.1wt%		4.59±0.30	19.80±0.42	55.87±7.95
PP/ β -NA 0.2wt%		3.54±0.49	20.73±0.61	49.25±4.17
PP/ β -NA 0.3wt%		4.66±0.18	16.20±0.95	51.03±5.35
PP/ β -NA 0.4wt%		4.49±0.55	15.13±2.10	50.60±7.46
PP/Talc 15 wt%		1.29±0.51	7.95±1.08	28.67±4.80
PP/Talc 20 wt%		1.36±0.42	11.57±1.11	33.73±8.99
PP/Talc 25 wt%		1.56±0.18	12.80±1.15	26.67±2.76
PP/Talc 15 wt%+coupling agent		1.45±0.45	8.83±0.86	40.23±3.07
PP/Talc 20 wt%+coupling agent		1.41±0.09	9.56±0.23	50.10±3.46
PP/Talc 25 wt%+coupling agent		1.79±0.20	9.63±0.25	49.33±5.98
PP/Wollastonite 15 wt%		3.93±0.81	13.73±0.25	45.20±2.39
PP/Wollastonite 20 wt%		5.14±0.71	20.87±1.79	58.55±0.21
PP/Wollastonite 25 wt%		3.63±0.40	16.20±3.27	63.60±6.32

ตาราง จ.3 ความหยาบรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Load of Scratch	Scratch Roughness (μm)		
		5 N	10 N	15 N
Unfilled PP		0.21±0.01	0.35±0.06	1.47±0.13
PP/ α -NA 0.1 wt%		0.16±0.04	0.47±0.12	1.83±0.21
PP/ α -NA 0.2 wt%		0.16±0.01	0.41±0.10	1.56±0.38
PP/ α -NA 0.3 wt%		0.16±0.02	0.31±0.05	0.92±0.20
PP/ α -NA 0.4 wt%		0.19±0.03	0.32±0.06	1.49±0.14
PP/ β -NA 0.1wt%		0.55±0.05	1.60±0.19	2.06±0.35
PP/ β -NA 0.2wt%		0.53±0.09	1.63±0.08	3.28±0.55
PP/ β -NA 0.3wt%		0.56±0.07	1.35±0.08	2.69±0.26
PP/ β -NA 0.4wt%		0.58±0.04	1.51±0.13	2.83±0.64
PP/Talc 15 wt%		0.20±0.03	0.55±0.09	1.91±0.24
PP/Talc 20 wt%		0.25±0.01	0.91±0.05	2.43±0.60
PP/Talc 25 wt%		0.21±0.02	0.86±0.11	1.54±0.06
PP/Talc 15 wt%+coupling agent		0.22±0.03	0.70±0.08	2.40±0.40
PP/Talc 20 wt%+coupling agent		0.22±0.00	0.70±0.07	3.10±0.09
PP/Talc 25 wt%+coupling agent		0.26±0.01	0.66±0.11	2.76±0.40
PP/Wollastonite 15 wt%		0.48±0.14	1.21±0.18	2.37±0.11
PP/Wollastonite 20 wt%		0.64±0.07	1.63±0.16	2.97±0.12
PP/Wollastonite 25 wt%		0.47±0.10	1.32±0.24	4.03±0.36

ตาราง จ.4 ความกว้างรอยขีดข่วนภายใต้แรงที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน 5 10 และ 15 N
ของคอมพาวนด์ PP สูตรต่างๆ

Material	Load of Scratch	Scratch Width (mm)		
		5 N	10 N	15 N
Unfilled PP		0.32±0.04	0.42±0.03	0.54±0.01
PP/ α -NA 0.1 wt%		0.33±0.02	0.44±0.01	0.54±0.01
PP/ α -NA 0.2 wt%		0.31±0.03	0.43±0.01	0.52±0.01
PP/ α -NA 0.3 wt%		0.32±0.03	0.42±0.03	0.52±0.01
PP/ α -NA 0.4 wt%		0.34±0.03	0.42±0.01	0.52±0.01
PP/ β -NA 0.1wt%		0.37±0.01	0.43±0.04	0.53±0.03
PP/ β -NA 0.2wt%		0.36±0.03	0.42±0.05	0.61±0.04
PP/ β -NA 0.3wt%		0.36±0.01	0.44±0.01	0.56±0.02
PP/ β -NA 0.4wt%		0.37±0.01	0.42±0.04	0.57±0.07
PP/Talc 15 wt%		0.33±0.01	0.45±0.01	0.55±0.01
PP/Talc 20 wt%		0.33±0.01	0.46±0.01	0.54±0.00
PP/Talc 25 wt%		0.33±0.02	0.47±0.01	0.57±0.00
PP/Talc 15 wt%+coupling agent		0.35±0.01	0.46±0.00	0.60±0.01
PP/Talc 20 wt%+coupling agent		0.33±0.01	0.47±0.00	0.58±0.01
PP/Talc 25 wt%+coupling agent		0.37±0.01	0.47±0.01	0.61±0.01
PP/Wollastonite 15 wt%		0.37±0.01	0.46±0.03	0.60±0.01
PP/Wollastonite 20 wt%		0.37±0.01	0.47±0.00	0.62±0.05
PP/Wollastonite 25 wt%		0.38±0.01	0.46±0.02	0.63±0.02

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล : นางสาวพิชามญชุ์ องค์กรศรีตระกูล

วันเกิด : 3 กุมภาพันธ์ 2532

การศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยาจังหวัด
กรุงเทพมหานครปีการศึกษา 2549

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาบริหารธุรกิจ
ศาสตราจารย์บริหารธุรกิจ ภาควิชาบริหารธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจ จากสถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปีการศึกษา 2553

เข้าการศึกษาระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาบริหารธุรกิจ
กลุ่มวิจัยพอลิเมอร์ สาขาบริหารธุรกิจ ภาควิชาบริหารธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาบริหารธุรกิจ ปีการศึกษา 2555