

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราอย่างมากมาย ซึ่งรู้จักในนามของพลาสติกประเภทต่างๆ โดยที่วัสดุอุปกรณ์ เครื่องใช้ต่าง ๆ ล้วนมีส่วนประกอบที่เป็นพอลิเมอร์ เนื่องจากเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถนำพอลิเมอร์มาดัดแปลงขึ้นรูปเป็นสิ่งต่างๆ ได้อย่างมากมาย แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ เมื่อวัสดุอุปกรณ์เหล่านี้เกิดการชำรุดเสียหายไม่สามารถใช้งานได้จะมีการกำจัดขยะเหล่านี้ได้อย่างไร ซึ่งปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อพัฒนาให้สามารถย่อยสลายได้เอง นำมาฝึกลบหรือนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ ซึ่งการนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่จำเป็นจะต้องแยกประเภทของพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกัน ในทางปฏิบัติ สามารถนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาผสมกันได้โดย เรียกว่า พอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำ PVC ผสมกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) [1] เนื่องจากการใช้งานในปัจจุบัน เช่น บรรจุภัณฑ์ มักนิยมใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิดนี้และทำให้เกิดขยะจากพลาสติก 2 ชนิดนี้อย่างมากมาย ซึ่งในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมเกี่ยวกับพลาสติกรีไซเคิล ดังนั้น จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [2-4] มีการศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) โดยพบว่า PVC ทำให้เกิดการตอ้งกิ่งบนสายโซ่ของ LDPE และเกิดการตอ้งกิ่งมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE และยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้ง ซึ่งเกิดขึ้นจากการตอ้งกิ่งของ PVC บนสายโซ่ของ LDPE [5]

สำหรับการนำวัสดุเสริมแรงมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกกำลังเป็นที่นิยม ซึ่งเรียกว่า วัสดุคอมโพสิต กำลังเป็นที่นิยมเนื่องจากวัสดุนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เรียกได้ว่าคอมโพสิตมีความแข็งแรงจำเพาะสูง ตัวอย่างวัสดุที่ใช้เสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลาร์ เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้มีราคาแพง ดังนั้นจึงได้มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น จากไม้หรือจี้เลื้อย ซึ่งมีราคาถูกและไม่ทำให้เครื่องจักรเกิดการสึกกร่อนอันเนื่องจากการขัดถูในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังให้ความรู้สึกที่เป็นธรรมชาติกับผลิตภัณฑ์

พลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้า รถยนต์และเฟอร์นิเจอร์ นอกเหนือจากการนำมาทำเป็นท่อที่พบเห็นในปัจจุบัน โดยทั่วไป ส่วนประกอบในรถยนต์หรือ

อุปกรณ์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง จึงได้มีการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตกันอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นที่ทราบกันว่าในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จาก PVC ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจาก PVC เสื่อมสภาพได้ในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ PVC เปลี่ยนไป โดยการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนทำให้เกิด กรดไฮโดรคลอริกทั้งนี้เพราะในโครงสร้างของ PVC มีส่วนประกอบของธาตุคลอรีน นอกจากนี้การเสื่อมสภาพดังกล่าวยังทำให้เกิดพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวในโครงสร้างส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเปลี่ยนไป และน้ำหนักโมเลกุลลดลง ดังนั้นจึงมักมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิตด้วย

ในงานวิจัยนี้จึงเกี่ยวข้องกับการเตรียม การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสถานะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ จากนั้นปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม เนื่องจากความไม่เข้ากันของ PVC ซึ่งมีสมบัติมีขั้วและ LDPE ซึ่งมีสมบัติไม่มีขั้ว ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่าง 2 วัสดุไม่ดี เป็นผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE ส่งผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุดีขึ้น สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจึงสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ คลอรีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง เมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl-methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และ พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate, Elvaloy®) จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมนี้มาผลิตเป็นคอมโพสิตโดยใช้ซีเมนต์ไม้อย่างพาราเป็นวัสดุเสริมแรงและศึกษาสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
2. เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม
3. เพื่อผลิตคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ซีเมนต์ไม้อย่างพาราเป็นสารเสริมแรง
4. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสถานะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีเมนต์ไม้อย่างพาราที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง
2. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน ดังนี้ PVC : LDPE เป็น 100 : 10 100 : 20 100 : 30 100 : 40 และ 100 : 50
3. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมชนิดต่างๆ คือ คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต โดยใช้ปริมาณ 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ LDPE
4. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง โดยปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 และ 50 phr

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตพอลิเมอร์ผสมและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมเพื่อให้มีสมบัติโดยรวมดีขึ้น
2. สามารถใช้ประโยชน์จากขี้เลื่อยที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตไม้เฟอร์นิเจอร์ในการเสริมแรงพลาสติก เพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์ผสม [6]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิมซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (Additives) ในการปรับปรุงสมบัติเหล่านั้นได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นและมีการผลิตเป็นการค้ากันอย่างกว้างขวาง

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสม คือ วิธีการผสม เครื่องมือและเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

2.1.1 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

- เพื่อทำให้สมบัติดีขึ้นแต่มีราคาถูกลง
- เพื่อพัฒนาสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ
- เพื่อทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
- เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของการผสมตามที่ถูกคำต้องการ
- เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติก

หลายๆ ชนิด กลับมาขึ้นรูปใหม่

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ [7]

ประเภท	ชื่อย่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
Polyamide	PA	มีความแข็งแรงกระแทกสูง	เกิดการเสีรูปจากความร้อนได้ง่าย
Polycarbonate	PC	มีความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ ทนต่อการเสีรูปจากความร้อน	ไม่ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมี

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท	ชื่อย่อ	ข้อดี	ข้อเสีย
Polyoxymethylene	POM	ความแข็งแรงดึงและ มอดุลัสสูง	ไม่ทนต่อแรงกระแทกและ เกิดการแตกหักได้ง่าย
poly(ethylene terephthalate) poly(butylene terephthalate)	PET PBT	ทนต่อสารละลายและ สารเคมีได้ดี	การหดตัวสูงและความ เหนียวต่ำที่อุณหภูมิต่ำ
High impact polystyrene	HIPS	ความแข็งแรงกระแทกสูง	เสียรูปจากความร้อนได้ง่าย
Acrylonitrile butadiene styrene copolymer	ABS	ความแข็งแรงกระแทกสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ได้ดี	เสียรูปจากความร้อนได้ง่าย
Poly(vinyl chloride)	PVC	ความสามารถในการ หน่วงไฟสูง	เปราะ แตกหักง่าย
Polyethylene	PE	ความสามารถในการยืด ตัวสูง ทนต่อตัวทำละลาย และสารเคมี	
Polyphenylene ether	PPE	ทนต่อการเสียรูปจาก ความร้อน มีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการ หน่วงไฟสูง	ความแข็งแรงกระแทกต่ำ

2.1.2 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม [8]

- พอลิเมอร์ผสม คือ พอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์รวมอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป

- พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวิญญาคเดียว (Miscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing, ΔG_m) $\Delta G_m < 0$

- พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิญญาค (Immiscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่มี $\Delta G_m > 0$

- พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้ (Compatible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวิญญาคเดียวแต่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมดีโดยไม่คำนึงถึงพลังงานอิสระของการผสม

- กระบวนการตัดแปรรวมพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ (Compatibilization) คือ วิธีที่ใช้ในการตัดแปรรวมพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียวโดยการเติมพอลิเมอร์ร่วมหรือสารตัดแปรรวมผิวเพื่อให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

- สารช่วยผสม (Compatibilizer) คือ พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมซึ่งใช้ในการเติมในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียว เพื่อตัดแปรรวมผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

2.1.3 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ [6]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Miscibility) ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดียวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ องค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดที่เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ต่อทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่เข้ากันไม่ได้ในระดับโมเลกุล (Immiscible) และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ทำให้เกิดการปรับปรุงระบบผสมเพื่อให้แต่ละวัฏภาคเกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นซึ่งเป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

2.1.4 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม [9]

โดยทั่วไปสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี 3 แบบ ซึ่งใช้ความสามารถในการเข้าได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นหลักเกณฑ์ในการจำแนก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในรูปที่ 2.1 (ก) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวัฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล (Miscible) ลักษณะของสันฐานวิทยาลายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบบิสระ (Random copolymer) การที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B รูปที่ 2.1 (ข) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวัฏภาค (Immiscible) ซึ่งเป็นแบบที่พบมากในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่าง ๆ เช่น ความ

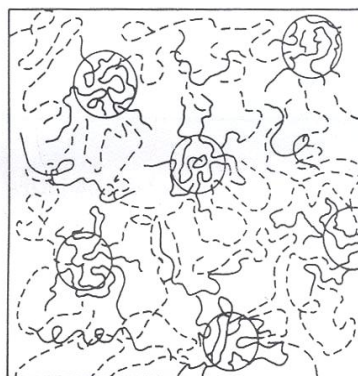
ชนิดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความมีขั้ว สมบัติการละลาย นอกจากนี้ยังมีฐานวิทยาแบบที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน (Partially miscible) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.1 ฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และ พอลิเมอร์ B (____) โดย (ก) miscible (ข) immiscible และ (ค) partially miscible [9]

ฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จากฐานวิทยาในรูปที่ 2.1 (ข) และ (ค) การกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี ทำให้เกิดรอยค้ำหนึระหว่างวัฏภาค ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบความสามารถในการเข้ากันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมในรูปที่ 2.2

	LDPE	HDPE	Ethylene Copolymers		PP	EPDM	PS	SAN	ABS	PVC	PA	PC	PMMA	PBT	PET	SEBS
HDPE	1															
Ethylene Copolymers	1	1														
PP	4	4	2													
EPDM	4	4	3	1												
PS	4	4	4	4	4											
SAN	4	4	4	4	4	4										
ABS	4	4	4	4	4	4	1									
PVC	4	4	2	4	4	4	2	3								
PA	4	4	1	4	1	4	4	4	4							
PC	4	4	4	4	4	4	2	1	4	4						
PMMA	4	4	3	4	4	4	2	2	2	4	2					
PBT	4	4	2	4	4	4	4	2	4	4	1	4				
PET	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	1	4	2			
SEBS	4	4	4	4	4	1	3	2	3	3	4	4	4	4		

รูปที่ 2.2 ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม 1 = ดีมาก 2 = ดี 3 = อาจเข้ากันได้ แต่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ และ 4 = ไม่ดี [10]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เข้ากันได้ไม่ดี ดังนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิธีกาให้มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสดีขึ้น

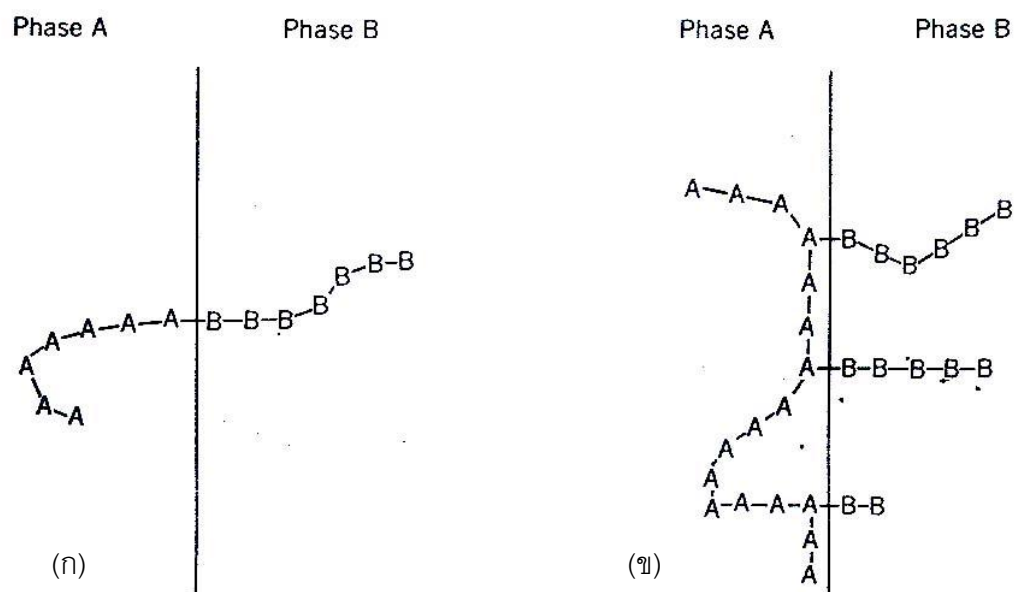
2.1.5 กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ [7, 9]

การเติมสารช่วยผสมเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลทำให้

- แรงตึงผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลง ทำให้กระจายตัวในวัฏภาคได้ดีขึ้น
- เพิ่มการยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัส ทำให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) เกิดได้ดีขึ้น

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือตอกิ่ง ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ดังในรูปที่ 2.3 แสดงพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม โดยในรูป

ที่ 2.3 (ก) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และในรูปที่ 2.3 (ข) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าพอลิเมอร์ร่วมทั้ง 2 แบบนี้จะมีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมโดยส่วนที่เหมือน A จะแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ A และส่วนที่เหมือน B จะแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ B จากวิธีการนี้เป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น



รูปที่ 2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง A และ B ที่เติมสารช่วยผสมแบบ (ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และ (ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง [9]

ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงปัจจัยของน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไปทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมต่ำ เช่นเดียวกัน ซึ่งตัวอย่างของสารช่วยผสมที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสม แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมในทางการค้า [11]

ลำดับ	พอลิเมอร์ผสม	สารช่วยผสม	ตัวอย่างรหัสสินค้า
1	PA6/PE	PE-g-MAH or E-MAA (Zn)	Fusabond® E Surlyn® 1652
2	PA6/PP	PP-g-MAH	Fusabond® P
3	PBT/PP	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
4	PBT/PA	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
5	PET/Polyolefin	E-BA-GMA	Elvaloy® PTW
6	PC/ABS	E-Acrylate	Elvaloy® AC และ Elvaloy® PTW
7	PC/PBT	E-Acrylate	Elvaloy® AC

2.2 คอมโพสิต

คอมโพสิต (Composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่กว้าง เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายรูปแบบคือ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

2.2.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต [12]

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

2.2.1.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยเคฟลาร์

(Kevlar fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) นอกจากนี้ อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ

2.2.1.2 เมทริกซ์

เมทริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดุลลีส้นน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมทริกซ์จะทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

วัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมทริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และ เซรามิกส์

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรงขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตน้อยกว่า แม้ว่าจะมีแนวโน้มการประยุกต์เป็นคอมโพสิตมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่มีข้อดีคือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง

การใช้วัสดุโลหะเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงแต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมทริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

2.2.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

สามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลลีสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย สูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต ดังนี้

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์ เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [12-13]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ 2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก 3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้ 4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน 5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	1. วัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิตมีราคาสูง 2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ 3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ 4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมทริกซ์เกิดการเสียดสภาพ 5. ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น 6. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [12]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospacecraft) อุปกรณ์กีฬา (Sporting goods)

ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต [12]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู่ ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ คัดฟ้า
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝาผนัง ประตู่ เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า กล่องคอมพิวเตอร์

2.3 เส้นใยไม้ [14]

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร การผลิตไอน้ำ การทำเฟอร์นิเจอร์ การสร้างบ้าน นอกจากนี้ต้นไม้ยังเป็นแหล่งน้ำอีกด้วย

ในทางการค้าแบ่งไม้เป็น 2 ชนิด คือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwoods) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods) โดยอาศัยวิชาการทางพฤกษศาสตร์เป็นรากฐานในการแบ่งดังนี้

- ไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้พวกสน Coniferae ที่มีลักษณะใบเรียวยาวเล็ก (Needle leaves) ผลมีรูปลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Cone) ไม้เนื้ออ่อนไม่มีส่วนที่เป็นท่อลำเลียงน้ำในโครงสร้างของเนื้อเยื่อ
- ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้ที่มีใบกว้างและมีท่อลำเลียงน้ำมักรวมอยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช ตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้เต็ง ไม้สัก

องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งแตกต่างกันในด้านปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในเนื้อไม้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [15]

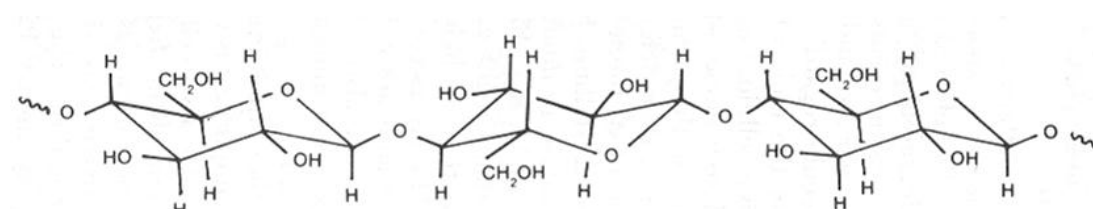
รายละเอียด	ชนิดของไม้ (% ของน้ำหนัก)	
	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
ส่วนประกอบทางเคมี (ไม้แห้ง)		
เซลลูโลส	43-61	43-64
เฮมิเซลลูโลส	28-32	15-35
ลิกนิน	29-37	22-35
การวิเคราะห์ธาตุ (ไม้แห้ง)		
H	6.1	6.2
C	53.0	51.0
O	38.3	39.0
S	-	-
N	0.1	0.2
จีเถ้า	1.7	2.5

2.3.1 องค์ประกอบของเส้นใยไม้ [15]

องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไม้ มาจากส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ โดยมี 2 โครงสร้างหลักที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต 65-75% และ ลิกนิน 18-35% และมีส่วนที่เป็นสารสกัดอินทรีย์ต่างๆ นอกจากนี้ มีส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ประมาณ 4-10%

2.3.1.1 เซลลูโลส

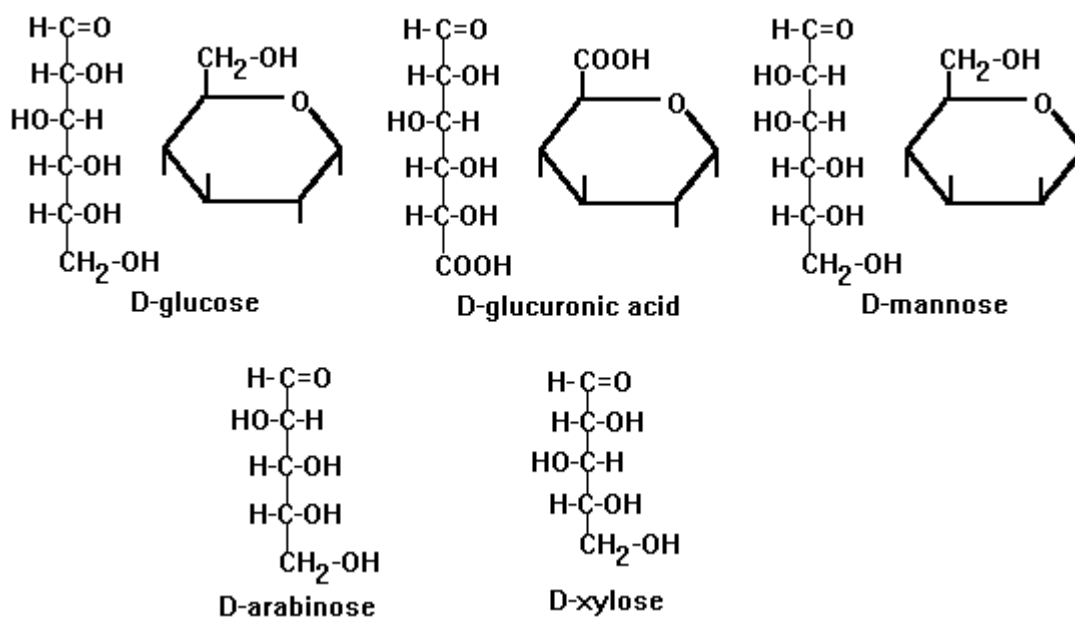
เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในเนื้อไม้ที่มีอยู่ประมาณ 40- 50 % พบอยู่ในผนังเซลล์ (Cell wall) ของไม้ เซลลูโลสจัดเป็น กลูแคนพอลิเมอร์ (Glucan polymer) ที่ประกอบด้วยสายโซ่ตรงของ 1,4-β-bonded anhydroglucose unit มอนอเมอร์ของเซลลูโลส คือ กลูโคสซึ่งมีสูตรเคมี $C_6H_{12}O_6$



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส [15]

2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส

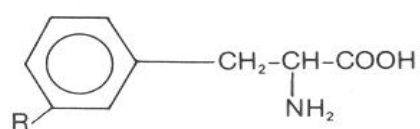
เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบในเนื้อไม้ซึ่งมีอยู่ 25-35% โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่มีส่วนที่แตกต่าง คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส แมนโนส กาแลกโตส ไซโลส อราบินอส กรดกลูคูโรนิกและกรดกาแลกทูโรนิก ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่



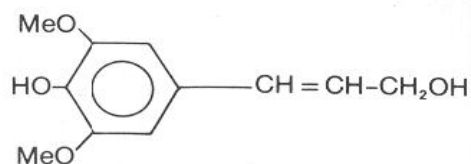
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนอเมอร์ที่พบในเฮมิเซลลูโลส [16]

2.3.1.3 ลิกนิน

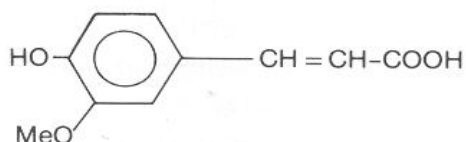
ลิกนินทำหน้าที่เหมือนเป็นกาวที่ช่วยยึดเกาะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกอยู่ร่วมกัน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากจะมีความแข็งแรงสูง



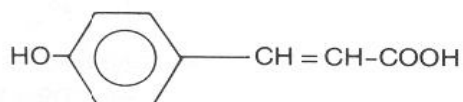
a) PHENYLALANINE



b) SINAPYL ALCOHOL

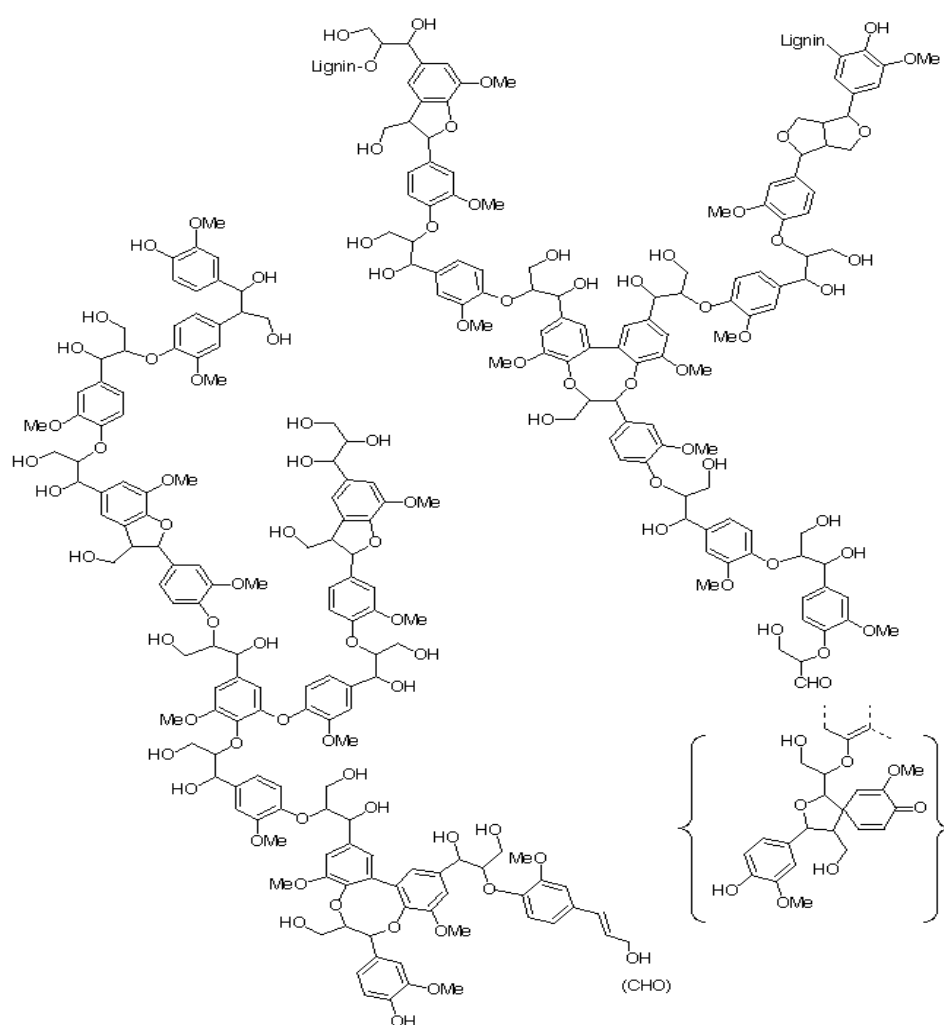


c) CONIFERYL ALCOHOL



d) PARA COUMARYL ALCOHOL

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอนอเมอร์ในลิกนิน [15]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน [17]

2.3.1.4 สารอินทรีย์อื่นๆ

สารอินทรีย์ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วย น้ำ หรือ แอลกอฮอล์ เช่น แวกซ์ อัลคาลอยด์ โปรตีน ฟีนอลิก เพกติน กาว เรซิน ไกลโคไซด์ สารเหล่านี้ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวกลางในกระบวนการเมตาบอลิซึมของต้นไม้ ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน และทำหน้าที่ต่อต้านจุลินทรีย์

2.3.1.5 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีในเนื้อไม้ เช่น แคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน

2.3.2 ไม้ยางพารา [18-19]

จีเลื้อยที่ใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับงานวิจัยนี้เป็นเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตไม้อัดที่ทำจากไม้เนื้ออ่อนชนิดไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*)

ไม้ยางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชื่อทางพฤกษศาสตร์ *Hevea brasiliensis*

วงศ์ Euphorbiaceae

ลักษณะที่เกิด มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกา ในประเทศไทยปลูกมากทางภาคใต้ ภาคตะวันออก และในปัจจุบันขยายพื้นที่ปลูกสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ลักษณะทั่วไปของไม้ ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นประเภทเนื้ออ่อน เมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 25-30 เมตร เปลือกนอกมีสีค่อนข้างคล้ำ ได้เปลือกมีสีชมพูไปจนถึงสีแดงหรือสีม่วงอ่อน เปลือกหนาประมาณ 6.5-15.0 มิลลิเมตร ต้นอ่อนมีเปลือกบางกว่าต้นแก่

ลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้ เมื่อผ่าลำต้นตามขวางจะเห็นเป็นชั้นๆ อย่างชัดเจน ชั้นในสุดเป็นเนื้อไม้ค่อนข้างแข็งเรียกว่าแกน (Central axis) ถัดออกมาเป็นเนื้อไม้ (Wood หรือ Xylem) ชั้นเยื่อเจริญ (Cambium) เปลือกอ่อน (Soft bark) ซึ่งมีท่อลำเลียงอาหาร เปลือกแข็ง (Hard bark) เยื่อเปลือก (Cork cambium) และเปลือกแห้ง (Cork) ตามลำดับ ระหว่างเปลือกอ่อนและเปลือกแข็งมีท่อน้ำยาง (Latex vessels) เป็นจำนวนมาก

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fang Z. และคณะ [3] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ PVC เมื่อใส่สารช่วยผสม (Compatibilizer) และสารช่วยการกระจายตัว (Dispersant) โดยใช้อัตราส่วนในการผสม LDPE/PVC เท่ากับ 70/30 และใช้คลอรีเนตเต็ด พอลิเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene (CPE)) เป็นสารช่วยผสมและยางบิวตะไดอิน (Butadiene rubber (BR)) เป็นสารช่วยกระจายตัวโดยใช้อัตราส่วนในการผสม LDPE/PVC/CPE หรือ BR เท่ากับ 70/30/7.5 และใช้เครื่องผสมระบบปิด HBI 90 Hakke Rheocord อุณหภูมิในการผสม 160 °C ซึ่งในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบผลของความเร็วรอบในการผสมต่อลักษณะทางสถานะวิทยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วรอบสูง (150 รอบ/นาที) มีขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ผสมเล็กลง เป็นผลให้มีการกระจายตัวดีกว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใส่ CPE และ BR ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น โดยเฉพาะ CPE ทำให้ขนาดของพอลิเมอร์ผสมคงตัว คือ เมื่อมีการลดความเร็วรอบในการผสมลงอนุภาคเล็กๆ ไม่กลับมารวมตัวกันอีก ซึ่งต่างจากการเติม BR เมื่อลดความเร็วรอบในการผสมลงพบว่า เกิดการรวมตัวของอนุภาคเล็กๆ ทำให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลง

Xu C. และคณะ [4] ได้ศึกษาการกระจายตัวและการเกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ BR เป็นสารช่วยกระจายตัว และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยานุมูลอิสระเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC/LDPE เมื่อมีการเติม BR และ DCP ชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมทั้ง BR และ DCP เมื่อตรวจสอบสถานะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติม BR เพียงอย่างเดียวมีการกระจายของวัฏภาคดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม BR ส่วนการเติม DCP เพียงอย่างเดียว พบว่ามีการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม แต่การกระจายตัวของวัฏภาคไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม BR แต่เมื่อมีการเติมทั้ง BR และ DCP พบว่า การกระจายของวัฏภาคดีขึ้นและมีการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลที่ได้

Ma G. และคณะ [20] ได้ศึกษาการกระจายตัว การเชื่อมโยง และปรากฏการณ์การดักจับ (Entrapping phenomenon) ที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งมี DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยานุมูลอิสระ และมียางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยผสม PVC และสารเติมแต่งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ใช้อุณหภูมิในการ

ผสม 145-160 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม LDPE และ SBR ผสมให้เข้ากันแล้วจึงเติม DCP ผสมต่อไปอีก 5 นาที จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด นำชิ้นงานที่ได้มาละลายด้วยเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) เพื่อสกัด PVC ออกจากพอลิเมอร์ผสม แล้วนำส่วนที่เหลือจากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมเป็น PVC/LDPE (100/10) และ PVC/LDPE/DCP (100/10/1) พบว่าเมื่อนำส่วนที่เหลือจากการสกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบพีคที่ตำแหน่ง 1426 cm^{-1} และ 1256 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่บ่งบอกว่าเป็นของ PVC แสดงว่าไม่เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง PVC และ LDPE แต่เมื่อใช้อัตราส่วน PVC/LDPE/DCP (50/50/1) และ PVC/LDPE/DCP (10/100/1) ปรากฏว่าไม่สามารถสกัด PVC ออกจากพอลิเมอร์ผสมด้วย THF ได้ทั้งหมด แสดงว่าเกิดปรากฏการณ์การดักจับของ PVC ด้วย LDPE เนื่องจาก LDPE เกิดการเชื่อมโยงเป็นร่างแหโดยมี DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ และพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสม DCP และ SBR มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเชื่อมโยงของ LDPE และมีการกระจายวัฏภาคที่ดีโดยตรวจสอบได้จากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

Fang Z. และคณะ [1] ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ PE ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยได้ผสมพอลิเมอร์ในอัตราส่วน PVC/PE (50/50) ด้วยเครื่องผสมระบบปิด HBI 90 Hakke Rheocord และขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ในระหว่างการผสมได้เปรียบเทียบความเร็วรอบที่ 30 50 และ 100 rpm เพื่อศึกษาอัตราส่วนของความหนืด จากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ความเร็วรอบ 50 rpm อัตราส่วนของความหนืด PVC/PE มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด คือ มีค่า 0.99 สำหรับการใช้ความเร็วรอบ 30 และ 100 rpm มีค่าอัตราส่วนความหนืด 0.82 และ 1.13 ตามลำดับ และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าที่อัตราส่วนความหนืดใกล้เคียง 1 ให้สมบัติต้านทานแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สูงสุด เนื่องจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีความต่อเนื่องกันทั้งสองวัฏภาค ส่วนในกรณีที่ใช้ความเร็วรอบ 30 rpm พบว่ามี PE เป็นวัฏภาคต่อเนื่องทำให้มีสมบัติต้านทานแรงกระแทกสูงสุด

Sombatsompop N. และคณะ [2] ได้ศึกษาการเกิดการตอ้งระหว่าง LDPE และ PVC ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยใช้เทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) และ Solid-State ^{13}C -NMR ปริมาณ LDPE ที่ใช้ในการศึกษา คือ 0-16.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้เครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ในการผสม อุณหภูมิในการผสม 140-150-160 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค GPC พบว่า $\overline{M}_w$ ของ PVC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ LDPE เท่ากับ 13.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่

M_n มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอธิบายได้ว่า Macroradical ของ PVC และ LDPE ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมซึ่งมีความร้อนและแรงเฉือนเกิดการรวมกัน (Cross-recombination) จึงทำให้ M_w ของ PVC มีค่าสูงขึ้น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมเทียบกับโครงสร้างของ PVC และ LDPE โดยใช้เทคนิค Solid-State ^{13}C -NMR พบว่าใน PVC แสดงพิกที่ 57.3 ppm ซึ่งหมายถึงโครงสร้างของ $-\text{CHCl}-$ และ 46.2 ppm แสดงถึง $-\text{CH}_2-$ ในส่วนของ LDPE พบพิกที่ 32.5 ppm แสดงถึง $-\text{CH}_3-$ ส่วนในพอลิเมอร์ผสมพบพิกเพิ่มจากใน PVC และ LDPE ที่ตำแหน่ง 26 และ 22 ppm ซึ่งเป็นไปได้ว่าเป็นตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างของ LDPE ที่ต่อกิ่งอยู่บนโครงสร้างของ PVC นอกจากนี้การตรวจสอบโดยใช้สมบัติการละลายของ PVC ใน THF พบว่าในพอลิเมอร์ผสม PVC ไม่สามารถละลายได้หมด จากข้อมูลนี้เป็นการสนับสนุนว่าเกิดการต่อกิ่งระหว่างพอลิเมอร์ผสม 2 ชนิดนี้

Marcovich N. E. และคณะ [21] ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) และผงไม้ เมื่อผสมออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งใช้ 2,5-dimethyl 2,5-diterbutyl-peroxyhexane (DBPH) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride (MA)) โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ อุณหภูมิในการผสม 180 190 180 220 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากการตรวจสอบความเป็นผลึกพบว่า เมื่อเติม DBPH และ MA ค่าความเป็นผลึกของ LLDPE ลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่าง LLDPE และ MA เมื่อมีเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอนุมูลอิสระเกิดเป็น มาเลอเตดพอลิเอทิลีน (Maleated PE) ซึ่งเป็นการรบกวนการเกิดผลึกของ LLDPE แต่เมื่อผสมผงไม้ค่าความเป็นผลึกสูงขึ้น เนื่องจากผงไม้ทำตัวเป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) แต่เมื่อเติม MA และ DBPH ค่าความเป็นผลึกลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์และผงไม้ยึดเกาะกันได้ดีขึ้นจึงเป็นการรบกวนการเคลื่อนที่ของสายโซ่ LLDPE ในการตกผลึก ส่วนสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตพบว่าเมื่อเติม MA และ DBPH สมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเติมเฉพาะ DBPH เนื่องจากเป็นการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิว (Interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์และผงไม้ ส่วนสมบัติทางความร้อนเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค Derivative thermogravimetry (DTG) พบว่าอุณหภูมิการเสถียรภาพของ LLDPE ที่มีการเติม MA และ DBPH ลดลง คือ 482 และ 479 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ซึ่งมีอุณหภูมิการเสถียรภาพเท่ากับ 484 องศาเซลเซียส ส่วนในคอมโพสิตมีการเสถียรภาพทางความร้อน 3 ขั้นตอนโดยใน 2 ขั้นตอนแรกเป็นการเสถียรภาพของผงไม้ส่วนขั้นที่ 3 เป็นของ LLDPE

Rozman H. D. และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) และไม้ยางพารา โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผงไม้และเส้นใยไม้ในการทำคอมโพสิต ปริมาณไม้ที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 30 และ 40 % นอกจากนี้ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบสารคู่ควบ 2 ชนิด ระหว่าง 3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate (TPM) และ 3-Aminopropyltriethoxysilane (APE) ปริมาณที่ใช้ในการศึกษา คือ 1 3 และ 5% โดยเปรียบเทียบกับปริมาณผงไม้ที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้ผงไม้และเส้นใยไม้มีค่ามอดุลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) และมอดุลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณไม้มากขึ้น และพบว่าคอมโพสิตที่ได้จากผงไม้ให้ค่าที่สูงกว่าการใช้เส้นใยไม้ เนื่องจากผงไม้สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยซึ่งมักเกิดการรวมตัวเป็นมัดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ทำให้กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ไม่ดี ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเป็นลำดับ เมื่อเติมผงไม้หรือเส้นใยไม้ในปริมาณที่มากขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเติมสารคู่ควบพบว่าคอมโพสิตที่ใช้ TPM เป็นสารคู่ควบมีค่ามอดุลัสการดึงยืดต่ำลง แต่มีร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ทั้งในคอมโพสิตจากผงไม้และเส้นใยไม้ ส่วนคอมโพสิตที่ใช้ APE เป็นสารคู่ควบ พบว่าคอมโพสิตที่ทำจากผงไม้มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงยืดสูงขึ้น สำหรับความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณผงไม้หรือเส้นใยมากขึ้นและเมื่อใช้ TPM เป็นสารคู่ควบในคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยไม้พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น

Liao B. และคณะ [23] ได้ศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงเส้นใยไม้ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LLDPE และเส้นใยไม้แอสเพน (Aspen fiber) โดยใช้สารคู่ควบไททานเตต (Titanate coupling agent) 2 ชนิด คือ TC-PBT และ TC-POT (มีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R คือ TC-PBT มี C_4 Chain alkyl และ TC-POT มี $C_8 - C_{10}$ Chain alkyl) และการต่อกิ่งด้วยอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) เครื่องมือในการผสม LLDPE และ เส้นใยไม้ คือ เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง อุณหภูมิในการผสม คือ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การปรับปรุงเส้นใยไม้ทั้งการใช้สารคู่ควบและการต่อกิ่ง (Grafting) ให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ที่ดีกว่าการไม่ปรับปรุงเส้นใยไม้ โดยเฉพาะการปรับปรุงเส้นใยไม้ด้วยการต่อกิ่งด้วยอะคริโลไนไตรล์ ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจากการต่อกิ่งเป็นการทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystalline) ของไม้มีค่าลดลงเกิดเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากขึ้น ทำให้เกิดการเกาะติดกับ LLDPE ได้ดีขึ้น

Zhang F. และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึก และการหลอมเหลวของ พอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MPE) และคอมโพสิตระหว่าง MPE และ เส้นใยเซลลูโลส จากการวิเคราะห์ MPE ด้วยเทคนิค DSC พบว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเมื่อปริมาณ MA เพิ่มขึ้น ส่วนในคอมโพสิตได้ศึกษา PE ที่ตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MPE) และพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้ตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (UPE) เป็นเมทริกซ์ โดยใช้ปริมาณเส้นใย 5 15 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากเทคนิค DSC พบว่าในคอมโพสิตระหว่าง UPE และเส้นใยเซลลูโลสมีพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ส่วนคอมโพสิตระหว่าง MPE และ เส้นใยเซลลูโลสมีอุณหภูมิการตกผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเซลลูโลส 5 % และอุณหภูมิหลอมเหลวค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง MPE และเส้นใยเซลลูโลส ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ PE เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

Canche -Escamilla G. และคณะ [25] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลสที่ตอกิ่งด้วยเมทิลเมทาไครเลต (Methyl methacrylate, (MMA)) และบิวทิลอะไครเลต (Butyl acrylate, (BA)) นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่าง PVC และเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และปรับปรุงพื้นผิวด้วยการตอกิ่งกับพอลิเมทิลเมทาไครเลต (Poly(methyl methacrylate), PMMA) และ พอลิบิวทิลอะไครเลต (Poly(butyl acrylate), PBA) โดยผสมเส้นใยเซลลูโลส และสารประกอบ PVC ในเครื่องผสมระบบปิด Brabender torque rheometer อุณหภูมิในการผสม 160 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PMMA และ PBA ในการตอกิ่งบนเส้นใยมีผลให้มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และความแข็งแรงดึงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความเป็นผลึก (Crystallinity) ของเส้นใยเซลลูโลสลดลงจากการตอกิ่งด้วย PMMA และมีส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PMMA เกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลส สำหรับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารประกอบ PVC และเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้ปริมาณเส้นใย 5 10 15 20 25 และ 30 % พบว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และคอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ตอกิ่งด้วย PMMA ให้ค่าสูงสุด แต่ความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณเส้นใย 15 % เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 30 % คอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ตอกิ่งด้วย PMMA ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นและสูงกว่าคอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย PBA ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA และ PVC มีความสามารถในการเข้ากัน (Compatibility) ได้ดี

Sombatsompop N. และคณะ [26] ได้ศึกษาแรงบิด (Torque) ในการผสม สมบัติด้านแรงดึง แรงกระแทก และสมบัติด้านความร้อนของคอมพอลิسترระหว่าง PVC และ จีลโดยใช้สารควบไซเลนชนิดต่าง ๆ คือ *N*-2(aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (KBM602), *N*-2(aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (KBM603) *N*-2(aminoethyl)-3-aminopropyltriethoxysilane (KBE603) วิธีการทดลองเริ่มจากปรับปรุงพื้นผิวของจีลโดยใช้สารควบไซเลนแต่ละชนิดปริมาณที่ใช้ 0 – 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของจีล จากนั้นผสมจีลและพีวีซีคอมปาวด์ในเครื่องผสมชนิดความเร็วสูงเป็นเวลา 5 นาที และผสมต่อด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ อุณหภูมิที่ใช้ 165 175 175 185 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 rpm โดยในการทดลองนี้ศึกษาปริมาณจีลที่ 9.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 41.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า แรงบิดในการผสมคอมพอลิสเตอร์ของจีลที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน มีค่าสูงกว่าคอมพอลิสเตอร์ที่จีลที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในคอมพอลิสเตอร์ที่จีล 41.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แรงบิดที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของจีลและไซเลน สมบัติด้านความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของคอมพอลิสเตอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดในช่วง 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยคอมพอลิสเตอร์ที่ใช้ไซเลนชนิด KBM 603 ให้สมบัติด้านแรงดึงสูงที่สุด ผลของไซเลนต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกพบว่า KBE 603 ให้สมบัติแรงกระแทกสูงที่สุดที่ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับสมบัติทางความร้อนของ PVC ในคอมพอลิสเตอร์เมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองแสดงว่า โครงสร้างและปริมาณของไซเลนที่ต่างกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอลิสเตอร์

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) : B0401 CLA จากบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด มหาชน ซึ่ง PVC Compound ที่ใช้ในการผลิตประกอบด้วยสารเติมแต่งหลายชนิดดังนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของ PVC Compound*

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
Suspension PVC grade K 66	100
Tetrabasic lead sulfate	1.2
Calcium stearate	1.2
Polyethylene wax	0.1
CaCO ₃	4

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) : LD1905F จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ *

สมบัติทั่วไป	หน่วย	LD1905F	Test method
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	5.0	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (Density)	g/cm ³	0.919	ASTM D 1505
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	kg/cm ²	MD:210 TD:170	ASTM D 638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	MD:200 TD:720	ASTM D 638
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	kg/cm ²	2,100	ASTM D 790

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

สมบัติทั่วไป	หน่วย	LD1905F	Test method
ความแข็งผิวหน้า (Hardness)	-	46	ASTM D 2240
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	110	ASTM D 2117

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

** MD หมายถึง Machine direction และ TD หมายถึง Transverse direction

3. คลอรีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) จาก บริษัท เสรีเคมี จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.3 สมบัติของคลอรีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (CPE 135A)*

สมบัติทั่วไป	หน่วย	CPE 135A	Test method
ปริมาณคลอรีน (Chlorine content)	%	35	Q/WYX003-2002
ความร้อนในการหลอม (Heat of fusion)	J/g	0.6	Q/WYX003-2002
ความหนาแน่น (Bulk density)	g/cm ³	0.58	GB/3402-1994
ความแข็งผิวหน้า (Shore hardness A)	-	56	GB/T531-1999
ความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity ML(1+4) 125 °C)	-	98	GB/T3232-1992
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	MPa	10	GB/T328-1998
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	850	GB/T528-1998

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง เมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl-methacrylate-co-butylacrylate) : PA 20 ของบริษัท Kaneka Corporation จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (PA 20)*

สมบัติทั่วไป	PA 20	Test method
ความถ่วงจำเพาะที่พบ (Apparent specific gravity)	0.42 – 0.52	JIS K6721
การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution %)	0 (≥ 1000 μm)	Wet sieve method
ความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity , η_{sp})	0.84 – 1.15	200 mg material in 50 ml toluene
เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)	Equal to STD	Geer's Oven (190°C)

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Ethylene and methyl acrylate) : Elvaloy® 1125 AC จากบริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.5 สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Elvaloy® 1125 AC)*

สมบัติทั่วไป	หน่วย	Elvaloy® 1125 AC	Test method
ปริมาณเมทิลอะครีเลต (Methyl acrylate)	%	25	DuPont Method
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	0.4	ISO 1133 / ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	kg/m ³	944	ISO 1183 / ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C (°F)	90(194)	ISO 3146 / ASTM D3418
อุณหภูมิอ่อนตัว (Vicat softening temperature)	°C (°F)	48(118)	ISO 306 / ASTM D155
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	MPa	14	ISO 527-2 / ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	760	ISO 527-2 / ASTM D638
มอดุลัสการดึงยืด (Tensile modulus)	MPa	25	ISO 527-2 / ASTM D638

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

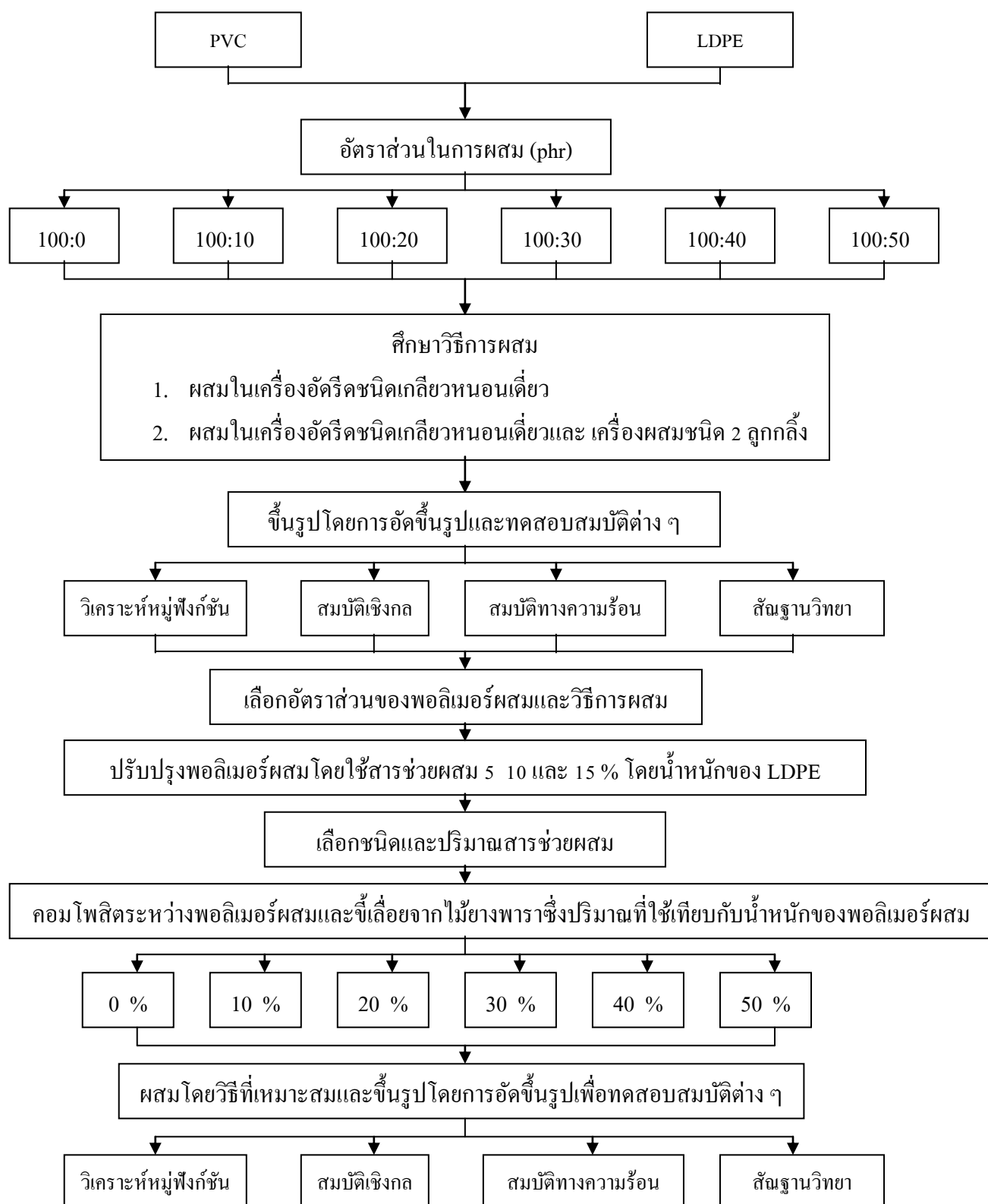
6. จีเลื่อยจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) : จากโรงทำเฟอร์นิเจอร์ทั่วไป วิธีการเตรียมจีเลื่อยในหัวข้อ 3.3.4.1

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) : THERMO HAAKE POLY DRIVE รุ่น Axon ab.Plasma : Sew Eurodrive
2. เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) LABTECH ENGINEERING รุ่น LRM 110
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP20
4. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal testing machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K

5. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester) : บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho รุ่น 258-PC
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : บริษัท LEO รุ่น L455 VP
7. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
8. เครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (Thermal Gravimeter, TGA) : รุ่น Pyris 1 TGA Perkin Elmer
9. เครื่อง Differential scanning calorimeter, DSC : Mettler Toledo DSC822°
10. เครื่อง Dynamic mechanical analyzer, DMA : Mettler Toledo DMA/SDTA 861°
11. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) รุ่น Bruker advance 300 system
12. เครื่องบด (Grinder) : Bosco Engineering
13. เครื่องร่อนแยกขนาด
14. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 50 และ 80 เมช
15. ตู้อบ
16. เกียง
17. เครื่องชั่ง
18. ถังมือกันความร้อน
19. เวอร์เนียร์
20. ไมโครมิเตอร์

แผนการดำเนินงาน



3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาวิธีการผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ปริมาณ (phr)	
	PVC	LDPE
1	100	0
2	100	10
3	100	20
4	100	30
5	100	40
6	100	50

2. นำ PVC และ LDPE ในอัตราส่วนต่างๆ ผสมในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยใช้อุณหภูมิ 170 180 190 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงป้อนสาร (Feed section) ช่วงการส่งผ่านสาร (Transition section) ช่วงการผสม (Metering section) และหัวดาย (Die) ตามลำดับ ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที

3. นำของผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด

4. แบ่งของผสมเป็น 2 ส่วน

5. นำของผสมส่วนที่ 1 ไปขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการอัดรีด 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1300 kg/cm^2 เป็นเวลา 8 นาที โดยแบ่งช่วงเวลาในการอัดรีดเป็นดังนี้ คือ อัดรีด 4 นาที จากนั้นทำการกดอัดขึ้นลงเพื่อไล่ฟองอากาศที่อยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลว จำนวน 5 ครั้ง และให้ความร้อนต่อไปอีก 4 นาที หลังจากนั้นอัดเย็น 4 นาที โดยอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 3-5 องศาเซลเซียส

6. นำของผสมส่วนที่ 2 ไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิ 165-175 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 10 นาที จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปโดยใช้สภาวะเดียวกับ ข้อ 5

7. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 5 และ 6 ไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่

- ทดสอบสมบัติแรงดึง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด
- ทดสอบสมบัติการโค้งงอ ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ
- ความแข็งแรงกระแทก

8. นำชิ้นงานที่ได้จากการผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว ศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยเทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA)

9. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้ FTIR

10. วิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมโดยเทคนิค ^{13}C - NMR

11. ศึกษาสัณฐานวิทยา โดยเทคนิค SEM

12. ศึกษาสมบัติความเป็นผลึกของ LDPE ด้วยเทคนิค DSC

13. ศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ด้วยเทคนิค DMA

14. นำพอลิเมอร์ผสมที่มีวิธีผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสมปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนโดยใช้สารช่วยผสม

3.3.2 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

1. ผสมพอลิเมอร์และสารช่วยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.7 โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE

สูตรที่	ปริมาณ		
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)
1	100	*	5
2	100	*	10
3	100	*	15

หมายเหตุ * คือ ปริมาณ LDPE ที่ 10 20 30 40 และ 50 phr

2. ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปตามหัวข้อที่ 3.3.1 ในข้อ 2, 3 และ 6
3. เลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมเพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ตามหัวข้อ 3.3.1 ในข้อ 7-9 และ 11-13

3.3.3 ศึกษาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้สารช่วยผสม CPE, PA 20 และ Elvaloy

1. ผสมพอลิเมอร์และสารช่วยผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.8 โดยเปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE, PA 20 และ Elvaloy[®]

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วย CPE, PA 20 และ Elvaloy[®]

สูตรที่	ปริมาณ		
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)
1	100	*	5
2	100	*	10
3	100	*	15

หมายเหตุ * คือ เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

- ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปตามหัวข้อที่ 3.3.1 ในข้อ 2, 3 และ 6
- เลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมเพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3.3.1 ในข้อ 7-9 และ 11-13

3.3.4 การเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา

3.3.4.1 การเตรียมขี้เลื่อย

- นำขี้เลื่อยผ่านเครื่องแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 50 และ 80 เมช โดยสัมพันธ์กับความยาวในช่วง 180 ถึง 300 ไมครอน
- นำขี้เลื่อยที่ได้เข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำขี้เลื่อยที่ได้ไปใช้ในการผสมและเตรียมคอมโพสิตต่อไป

3.3.4.2 ขั้นตอนการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต

1. ผสมจีลียกับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สูตรผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำคอมโพสิต

สูตร	ปริมาณ			
	PVC (phr)	LDPE (phr)	สารช่วยผสม (%/wt LDPE)	จีลีย (%/wt polymer blend)
1	100	*	-	10
2	100	*	-	20
3	100	*	-	30
4	100	*	-	40
5	100	*	-	50
6	100	**	-	10
7	100	**	-	20
8	100	**	-	30
9	100	**	-	40
10	100	**	-	50
11	100	*	***	10
12	100	*	***	20
13	100	*	***	30
14	100	*	***	40
15	100	*	***	50
16	100	**	***	10
17	100	**	***	20
18	100	**	***	30
19	100	**	***	40
20	100	**	***	50

หมายเหตุ * คือ เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

** คือ เลือกปริมาณ LDPE ที่ให้สมบัติเชิงกลต่ำ

*** คือ เลือกชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

2. ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปตามหัวข้อที่ 3.3.1 ในข้อ 2, 3 และ 6
3. เลือกอัตราส่วนของคอมโพสิตศึกษาสมบัติต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3.3.1 ในข้อ 7-9 และ

11-12

3.4 วิธีการตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ

3.4.1 การตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต

3.4.1.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การทดสอบทำได้โดยนำสารตัวอย่างที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว แล้วบดด้วยเครื่องบดหยาบ จากนั้นนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (1400 รอบต่อนาที) ทำให้ได้สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 0.025 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปบดกับ KBr วิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ Resolution เท่ากับ 4 และจำนวนรอบของการ scan เท่ากับ 16

3.4.1.2 ^{13}C - NMR

การทดสอบทำได้โดยใช้วิธีเตรียมตัวอย่างเหมือนในหัวข้อที่ 3.4.1.1 และตรวจวัดด้วยเครื่อง Nuclear Magnetic Resonance ที่ความถี่ 75.4 MHz ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Zirconia rotor 7 mm Recycle delay และ Contact times เท่ากับ 2 s และ 1 ms ตามลำดับ โดยทุกสเปกตรัมได้จากการสแกนซ้ำ 2000 ครั้ง

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D 790	MPa

3.4.2.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และโปรแกรม WINDAP ในการคำนวณชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในรูปคัมเบลล์ ดังรูปที่ 3.1 ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 8 ชิ้นในแต่ละสูตรและใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	5	กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการดึง (Test speed)	5	มิลลิเมตร/นาที
- Grammage	1.0	กรัม/ตารางเมตร
- ระดับเซลล์ (Cell class)	0.5	
- ความยาวของเกจ (Gauge length)	25	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [27]

ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถหาได้จาก สมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, } \sigma) = \frac{F_1}{A}$$

$$\text{มอดุลัส (Tensile modulus, } E) = \frac{((F_3 / A) - (F_2 / A))}{1/100}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break, } A_t) = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$$

เมื่อ F_1 คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดสูงสุด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 F_2 และ F_3 คือ แรงที่ใช้ในการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 และ 3 % ความเครียด (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่างตอนเริ่มต้น (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร; mm^2)
 l คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

l_0 คือ ระยะที่ขึ้นงานตัวอย่างแบบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm เท่ากับ 25 mm)

3.4.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น รูปที่ 3.2 เป็นภาพการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ สภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

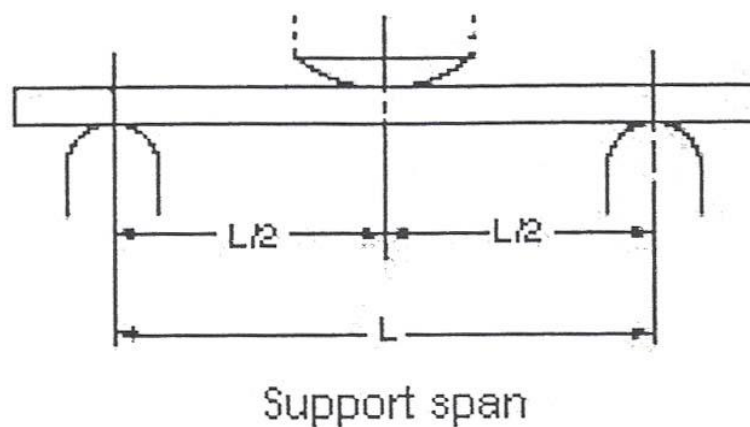
- โหลดเซลล์ (Load cell)	5	กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression speed)	5	มิลลิเมตร/นาที
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	มิลลิเมตร
- Gramage	1.0	กรัม/ตารางเมตร
- ระดับเซลล์ (Cell class)	0.5	

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงโค้งงอ ; } \sigma_f = \frac{1.5FL}{bh^2}$$

$$\text{มอดุลัสโค้งงอ ; } E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

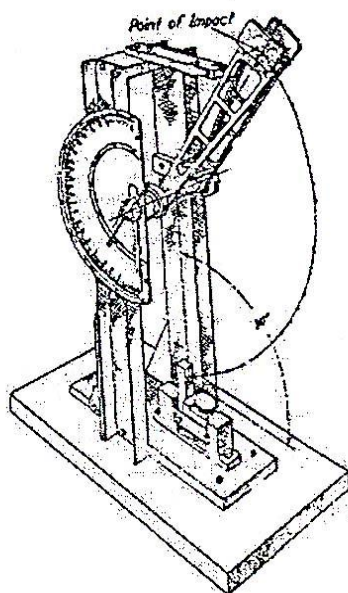
เมื่อ	F	คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงาน โค้งงอ (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
	L	คือ Span length เท่ากับ 40 mm
	b	คือ ความกว้างของตัวอย่าง
	h	คือ ความหนาของตัวอย่าง
	ΔF	คือผลต่างของแรงกด ณ จุดเริ่มต้นถึงแรงกดที่ 20 N ในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
	Δd	คือ ระยะกดโค้งงอในช่วงแรงกด 0-20 N (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)



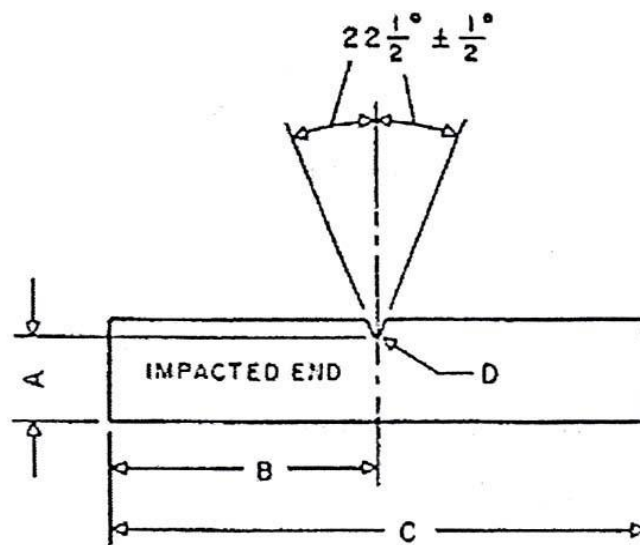
รูปที่ 3.2 การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [28]

3.4.2.3 ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ขึ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการบาก (Notch) ขึ้นงานก่อนทดสอบ รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องมือ Izod impact ที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด [29]



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก [29]

- โดย A แสดงความยาว 10.16 ± 0.05 มิลลิเมตร
 โดย B แสดงความยาว $31.5 - 32.00$ มิลลิเมตร
 โดย C แสดงความยาว $60.30 - 63.50$ มิลลิเมตร
 โดย D แสดงมุมรูปตัว V เท่ากับ $22.5^\circ \pm 0.5^\circ$

ความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = W/A$$

- เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร; kJ/m^2)
 W คือ ค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล; kJ)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร; m^2)

3.4.3 สันฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้มาศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการกดอัดมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม เส้นใยและศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

3.4.4 สมบัติทางความร้อน

3.4.4.1 อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d)

เทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA) ใช้เข้ามาศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์ผสม และคอมโพสิต สภาวะในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 600 องศาเซลเซียส และทดสอบในบรรยากาศไนโตรเจน

3.4.4.2 Differential scanning calorimeter (DSC)

DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้หาอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) และพื้นที่ใต้กราฟซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (Enthalpy of fusion, ΔH_f) เพื่อคำนวณองศาของการเกิดผลึก (Degree of crystallinity) ของสารจากสูตรดังต่อไปนี้

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{\Delta H_f \times 100}{100 - \% \text{ โดยน้ำหนักของสารที่ไม่มีผลึก}}$$

$$\text{Degree of crystallinity} = \frac{\Delta H_n}{\Delta H_{f0}} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f = Enthalpy of fusion ของสารหรือพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งได้จากเครื่อง

ΔH_{f0} = Enthalpy of fusion ของพอลิเอทิลีนที่มีองศาการเป็นผลึก 100 % เท่ากับ 293.6 J/g [30]

$\Delta H_{\text{normalised}}, \Delta H_n$ = Enthalpy of fusion ของพอลิเอทิลีนในของผสมโดยคิดเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีน 100 % โดยน้ำหนัก

สภาวะที่ใช้ศึกษา คือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 150 องศาเซลเซียส

3.4.4.3 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ทดสอบโดย Dynamic Mechanical Analyzer (DMA, Mettler Teledo DMA/SDTA 861) ลักษณะตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างที่ขึ้นรูปโดยใช้

กระบวนการอัดขึ้นรูป แบบของการทดสอบ คือ แบบใช้แรงเฉือน (Shear – bending mode) สภาวะในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 4 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 130 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 1 Hz

บทที่ 4

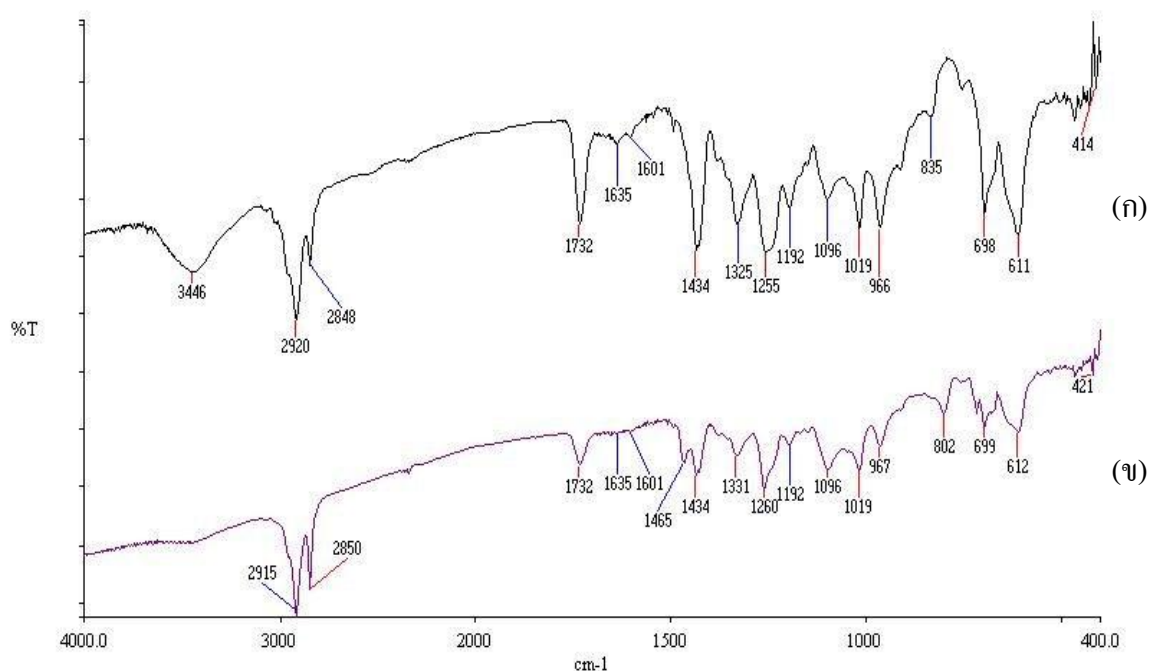
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้อัตราส่วนในการผสม PVC100 : LDPE10 20 30 40 และ 50 โดยได้ศึกษาวิธีการผสมระหว่างการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียวและการใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง หลังจากผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวรวมทั้งได้ศึกษาการใช้สารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยได้เปรียบเทียบสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ คลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate copolymer, Elvaloy[®]) นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและชี้แจงจากไม้ยางพารา ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

4.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR และพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC100 : LDPE 10 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100 : LDPE 0 และ (ข) PVC 100 : LDPE 10

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยในรูปที่ 4.1 (ก) เป็นสเปกตรัมของ PVC 100% ซึ่งพบพีกอินฟราเรดสเปกตรัมช่วง $2835 - 2962 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ C-H Stretching ของ CH_2 ที่มีอยู่ในสายโซ่ของ PVC ส่วนพีกช่วง $1700 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ Carbonyl stretching ซึ่งหมู่ Carbonyl เกิดจากกระบวนการเสียดสภาพเนื่องจากความร้อนโดยมีออกซิเจนร่วมอยู่ด้วย (Thermal oxidative degradation) ที่เกิดขึ้นใน PVC [31] และตำแหน่งพีกที่ 1635 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ -C=C- Stretching ซึ่งเกิดจากการเสียดสภาพของ PVC เนื่องจากกระบวนการดีไฮโดรคลอรีนชัน (Dehydrochlorination process) ทำให้มีโครงสร้างของพันธะคู่ (-CH=CH-) เกิดขึ้น [5] ส่วนพีกช่วง $1430 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending ของ CH_2 ซึ่งมีอยู่ในสายโซ่ของ PVC แถบพีกช่วง $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของ CH_2 สำหรับพีกช่วง $600 - 800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-Cl Stretching ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของ PVC ส่วนในรูปที่ 4.1 (ข) แสดงสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งความเข้ม (Intensity) ของพีกที่ตำแหน่ง 1635 cm^{-1} ลดลงเล็กน้อยแสดงว่า LDPE ที่ผสมอยู่ใน PVC กีดขวางการเกิด polyene และ หมู่คาร์บอนิล เนื่องจากส่วนที่เสียดสภาพของ PVC อาจถูกห่อหุ้มด้วย LDPE ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็น polyene ได้ และลดโอกาสที่จะสัมผัสกับ O_2 ซึ่งทำให้แนวโน้มความเข้มของพีกหมู่คาร์บอนิลลดลง [5]

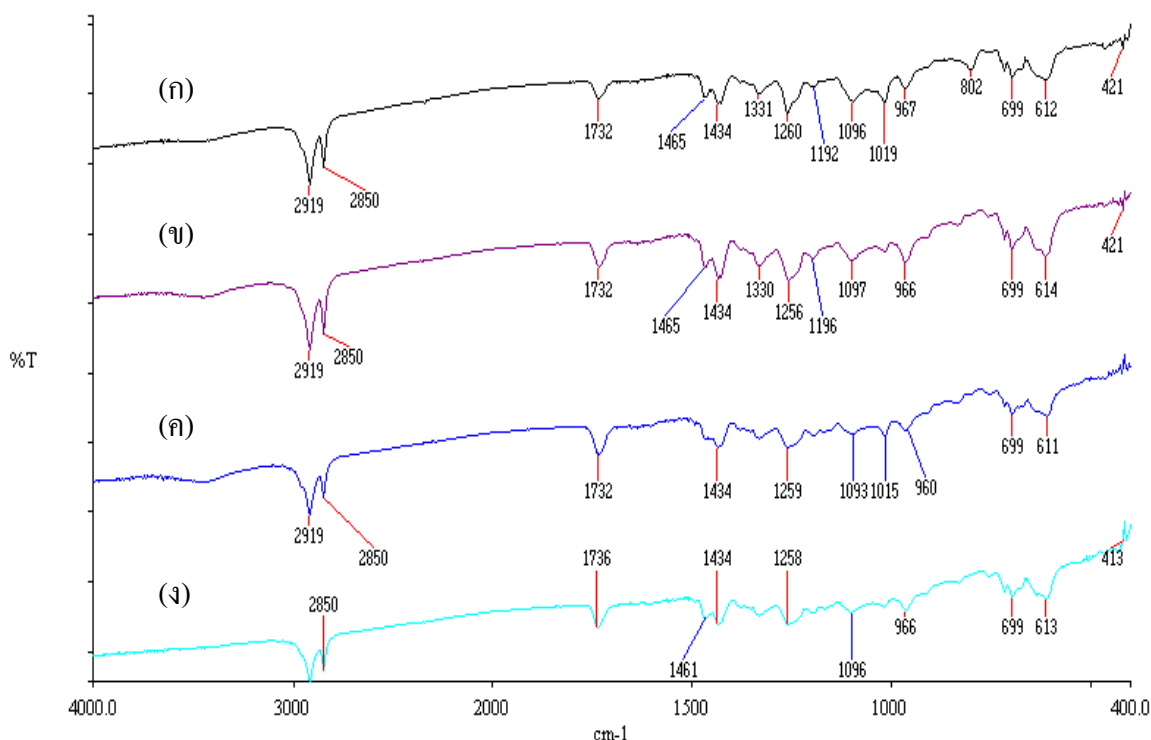
ตำแหน่งของสเปกตรัมที่สำคัญของ PVC และพอลิเมอร์ผสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งสเปกตรัมของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

ตำแหน่งพีก (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น	เอกสารอ้างอิง
2835 – 2962	C-H Stretching ของ CH_2	32-33
1700 – 1750	C=O Stretching ของคาร์บอนิล	32-33
1635	-C=C- Stretching	5, 32-33
1430 – 1470	C-H Bending ของ CH_2	32-33
1300 – 1400	C-H Deformation ของ CH_2	32-33
600 – 800	C-Cl Stretching	32-33

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม 3 ชนิด โดยใช้ PVC 100 phr และ LDPE 10 phr และสารช่วยผสม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



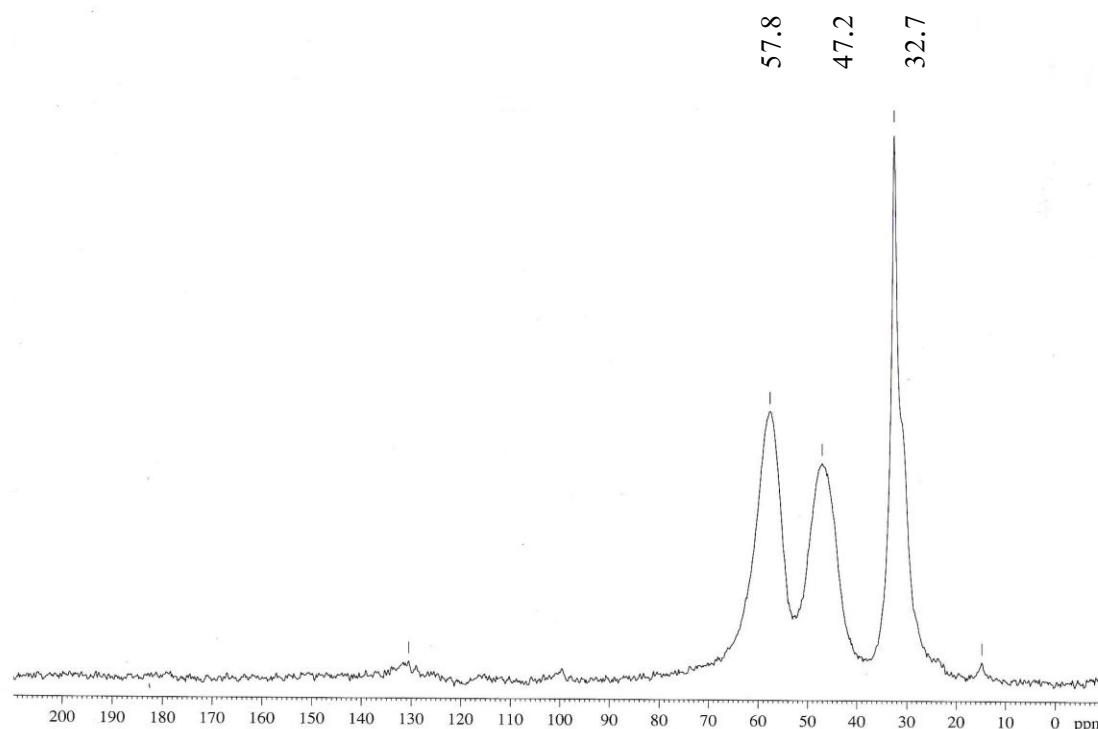
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC 100 : LDPE 10 (ข) PVC 100 : LDPE 10 : CPE 15

% (ค) PVC 100 : LDPE 10: PA 20 15% และ (ง) PVC 100 : LDPE 10 : Elvaloy[®] 15 %

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ PVC และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ซึ่งใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด โดยรูปที่ 4.2 (ข) เป็นสารช่วยผสมชนิด CPE จากสเปกตรัมพบว่ามีตำแหน่งต่าง ๆ ของพีคคล้ายกับของ PVC 100 : LDPE 10 เนื่องจาก CPE มีโครงสร้างคล้าย PVC และ LDPE คือ มี CH_2 และ C-Cl จึงทำให้พบพีคช่วง $2835 - 2962 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H Stretching $1430 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H Bending และ $600 - 800 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-Cl Stretching ส่วนรูปที่ 4.2 (ค)-(ง) เป็นสารช่วยผสมชนิด PA 20 และ Elvaloy[®] โดยในโครงสร้างประกอบด้วยอะโครเลตซึ่งมีหมู่คาร์บอนิล ดังนั้นตำแหน่งของพีคจึงเกิดการซ้อนทับกับหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นใน PVC คือ ในช่วง $1700 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ เป็นผลให้ตำแหน่งของพีคใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

4.1.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิค Solid-State ^{13}C -NMR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของ PVC 100 : LDPE 10

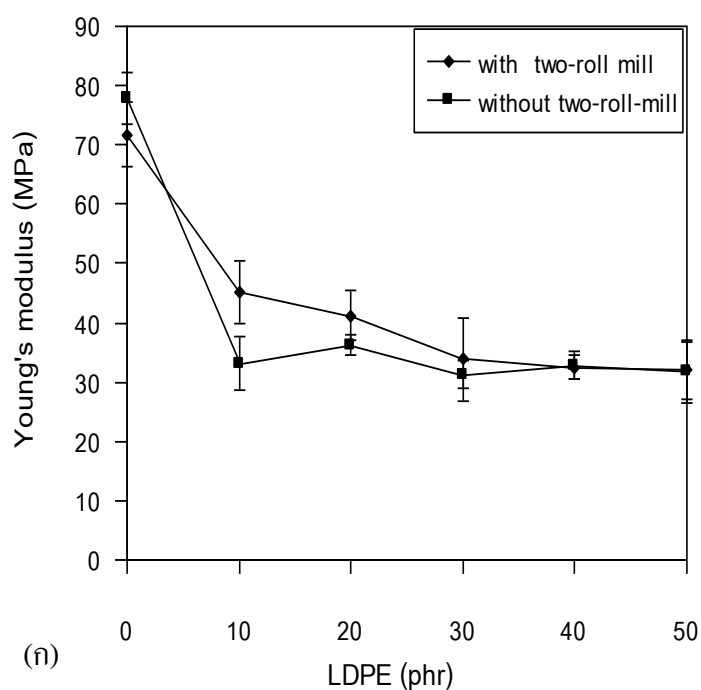
จาก ^{13}C -NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน PVC 100 : LDPE 10 พบว่ามีพีคที่ตำแหน่ง 57.8 และ 47.2 ppm ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมของ PVC [2] และพีคที่ 32.747 ppm สอดคล้องกับสเปกตรัมของ LDPE [2] ซึ่งอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์ผสมไม่เกิดการต่อกิ่ง (Graft) หรือไม่เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์ผสม สาเหตุที่พอลิเมอร์ผสมในงานวิจัยนี้ไม่เกิดการต่อกิ่งนั้นอาจเกิดจากสภาวะที่ใช้ในการผสมต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2] คือ มีการผสมเพียงรอบเดียว ซึ่งอาจไม่ทำให้เกิดการเสียหายและไม่เกิดอนุมูลอิสระของ PVC และ LDPE จึงไม่เกิดการต่อกิ่ง แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการผสมถึง 5 รอบ ทำให้ PVC และ LDPE เกิดการเสียหายและมีอนุมูลอิสระ (Free radical) อยู่ในระบบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการต่อกิ่งระหว่าง PVC และ LDPE

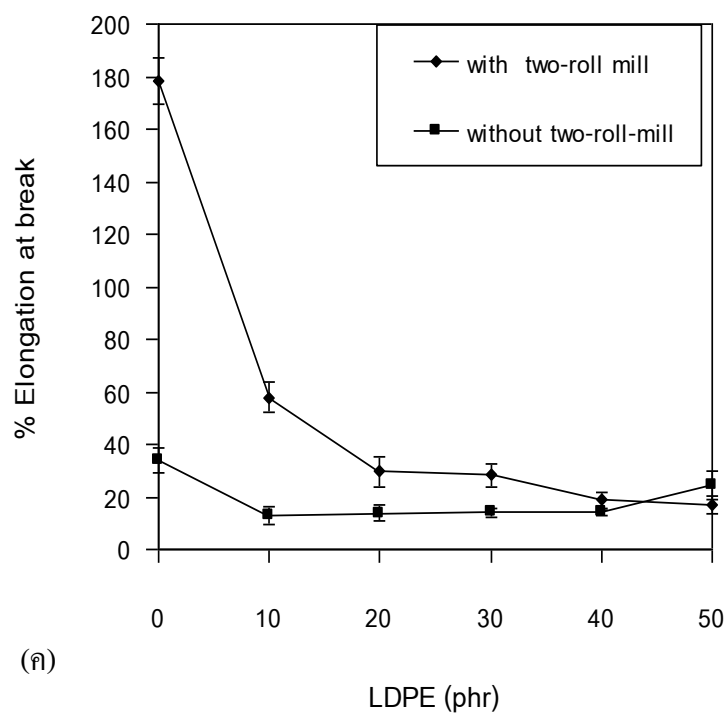
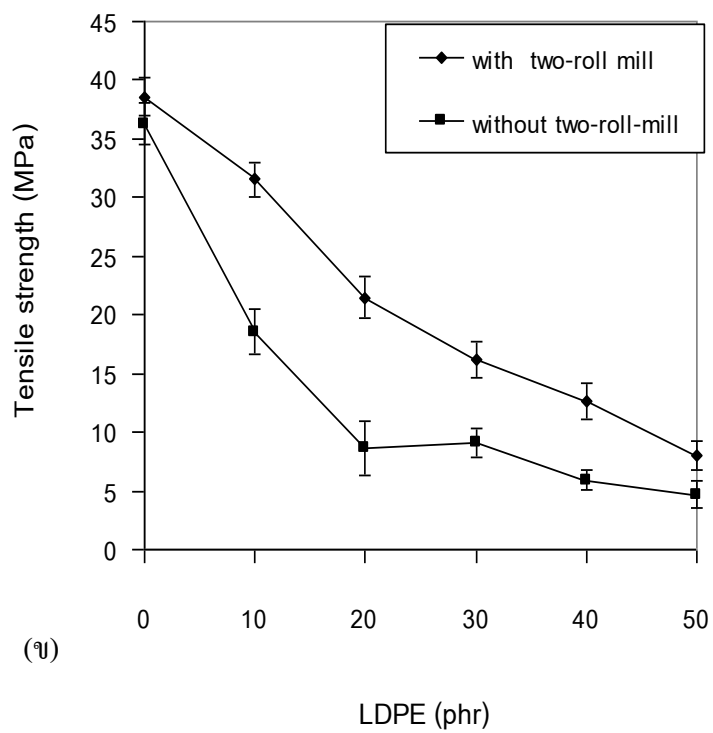
4.1.4 สมบัติเชิงกล

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ได้แบ่งการศึกษานอกเป็นการศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE และผลของการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม

4.1.4.1 การศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสมและผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ในการศึกษาวิธีการผสมของพอลิเมอร์ผสม 2 แบบ ได้แก่ การใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวในการผสมเพียงขั้นตอนเดียว และการเพิ่มขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง โดยศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PVC 100 phr และ LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr

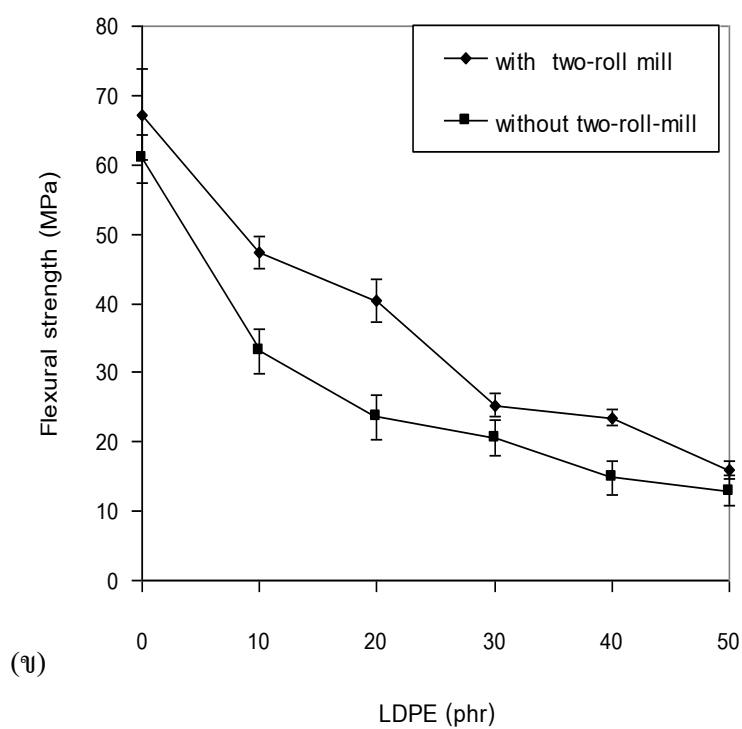
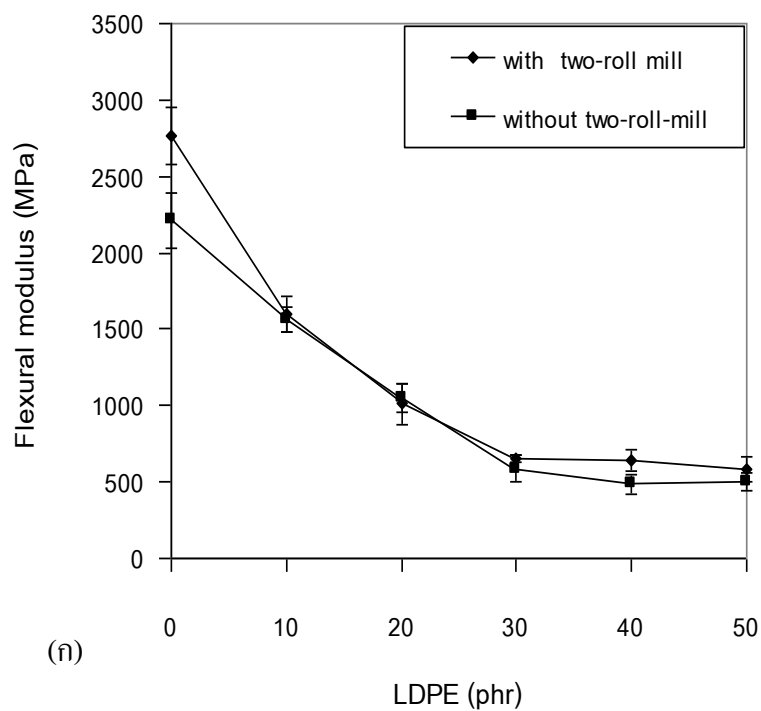




รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

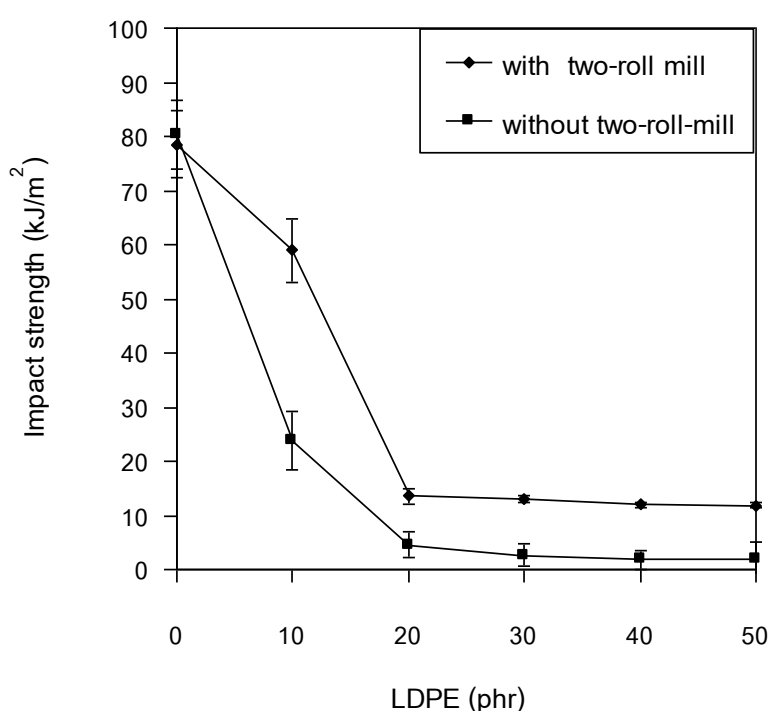
ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อมีการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง หลังจากที่ได้ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วนั้น ทำให้สมบัติทางแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง เนื่องจากการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง มีการให้ความร้อนในการผสม ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดสามารถหลอม (Fuse) รวมกันได้มากขึ้นและเกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม จึงเป็นผลให้รอยตำหนิ (Defects) มีน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมจากใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงอย่างเดียว แต่พบว่าสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 แบบเป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การเติม LDPE ลงใน PVC ทำให้ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้นยังทำให้สมบัติทางแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสมบัติด้านแรงดึงนั้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อมีการให้ความเค้น (Stress) ดึงให้พอลิเมอร์ยืดยาวออก โดยในช่วงต้นของการดึงจะเกิดการเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) คือ สามารถหดกลับมาในตำแหน่งเดิมได้เมื่อปล่อยแรงและในช่วงนี้เราจะพิจารณาถึงค่ายังมอดุลัส การผสม LDPE ซึ่งมีความอ่อนนุ่ม (Soft) มากกว่า PVC ทำให้ค่ายังมอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความสามารถต้านทานต่อการเสียรูปได้น้อยลง เมื่อให้แรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเสียสภาพและขาดออกจากกัน เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงดึงสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ตามแนวแรงที่ถูกดึงในช่วงความเครียดสูงๆ หลังจากจุดคราก (Yield point) สายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการเลื่อนหลุด (Slip) ออกจากการยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ เกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation) สายโซ่ของพอลิเมอร์ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ และจากที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจาก PVC แสดงความมีขั้วส่วน LDPE ไม่มีขั้วจึงไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ทำให้มีลักษณะเหมือนมีรอยตำหนิในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงสายโซ่จึงเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่าย สมบัติด้านความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดจึงมีค่าลดลง เมื่อ LDPE มีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE (ก)

มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอเป็นไปในแนวเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มการผสมด้วยเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าการผสมเพียงขั้นตอนเดียว โดยการผสมทั้ง 2 แบบนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE ค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากค่ามอดุลัสพิจารณาถึงความแข็ง (Stiffness) ของชิ้นงาน ดังนั้นมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LDPE ซึ่งมีความอ่อนนุ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้แก่ชิ้นงานก่อนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกดจะเกิดการกระจายแรง แต่เมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิทำให้ไม่สามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง เพราะความไม่เข้ากันของ PVC และ LDPE เมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE จึงเหมือนเป็นการเพิ่มรอยตำหนิในชิ้นงาน ความแข็งแรงโค้งงอจึงลดลง



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณ LDPE ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

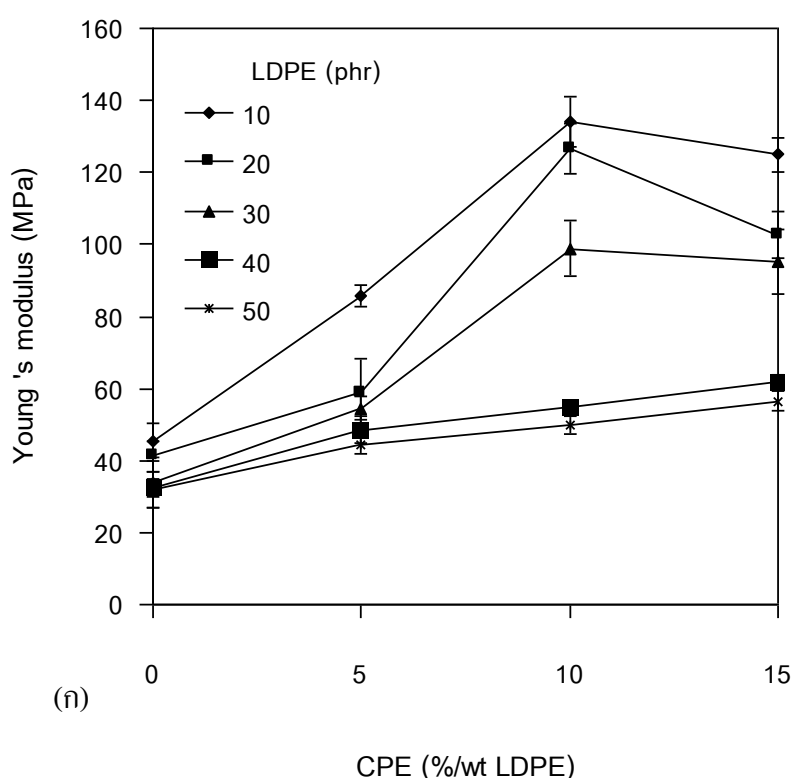
PVC / LDPE

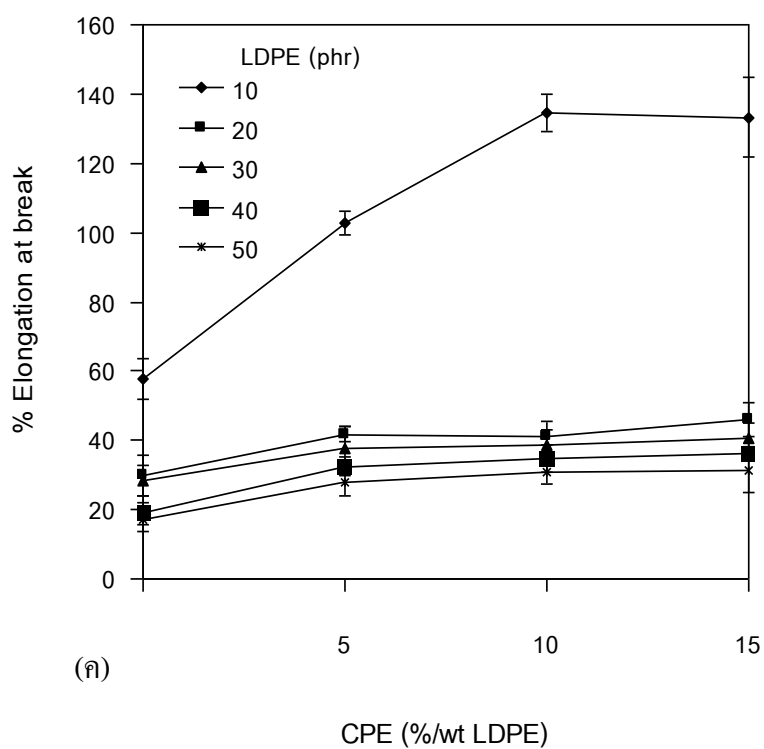
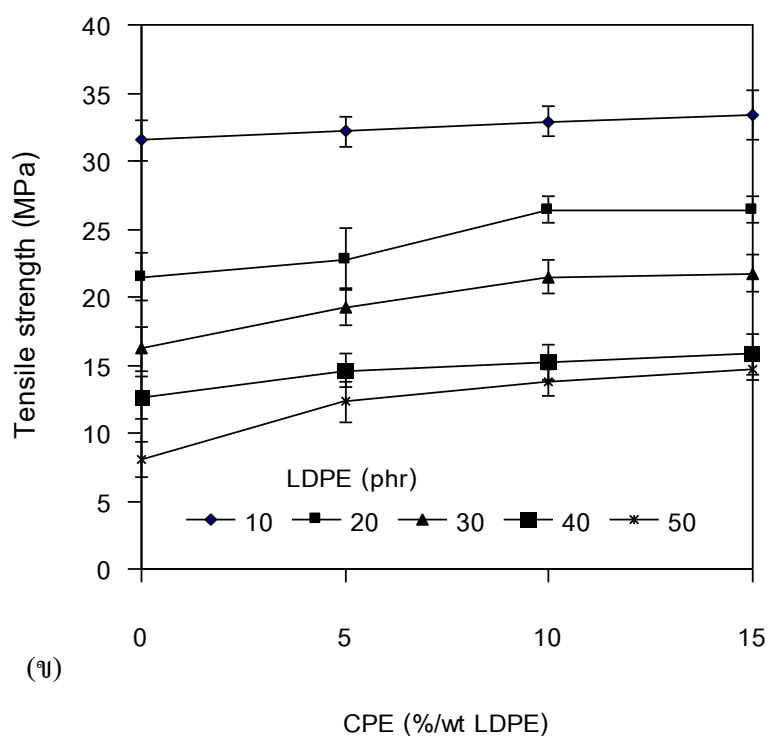
จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกจากวิธีการผสมทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น โดยการผสมด้วย 2 ขั้นตอนให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความแข็งแรงกระแทกเป็นการให้พลังงานแก่ชิ้นงานทันทีก่อนที่จะเกิดการแตกหักอย่างถาวรเกิดความเค้นบริเวณรอยบากของชิ้นงานในวัสดุภายใต้แรงเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงสายโซ่โมเลกุลเริ่มหลุดออกจากกันเกิดการแตกหักเริ่มต้นแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาเกิดการแตกหักต่อเนื่อง

ดังนั้นเมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทำให้ไม่สามารถส่งผ่านแรงระหว่างสายโซ่ได้ สมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง

4.1.4.2 ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่มีค่าต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้ ศึกษาผลของสารช่วยผสมชนิดคลอรีเนตเต็ดพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ปริมาณในการศึกษา ดังนี้ PVC 100 phr และ LDPE ในปริมาณต่าง ๆ คือ 10 20 30 40 และ 50 phr และใช้ CPE ในปริมาณ 5 10 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และจากผลทดสอบที่ได้จะเลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม 1 อัตราส่วนเพื่อนำมาปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยผสมชนิดพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต (Methyl methacrylate-co-butylacrylate, PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต (Ethylene and methyl acrylate copolymer, Elvaloy[®])



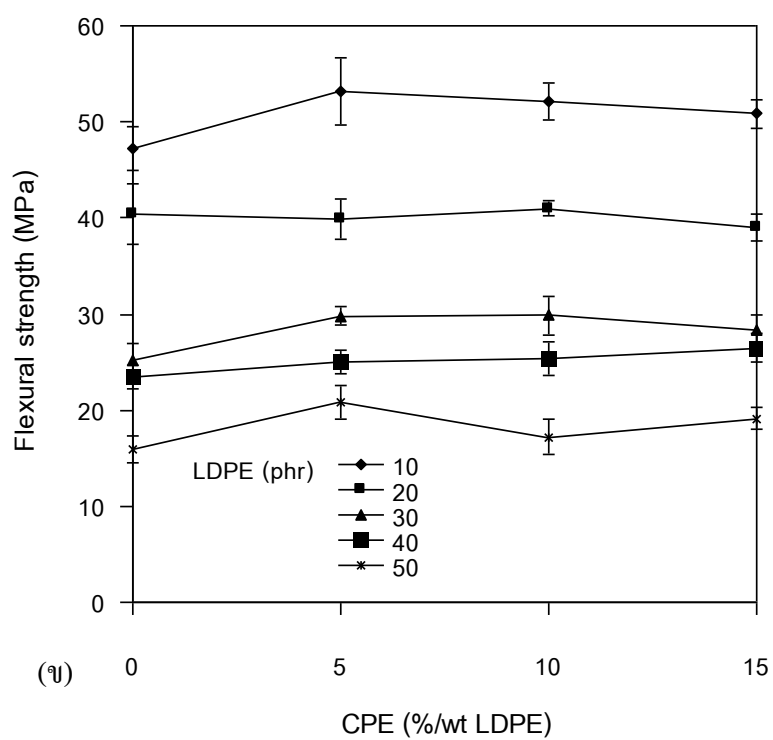
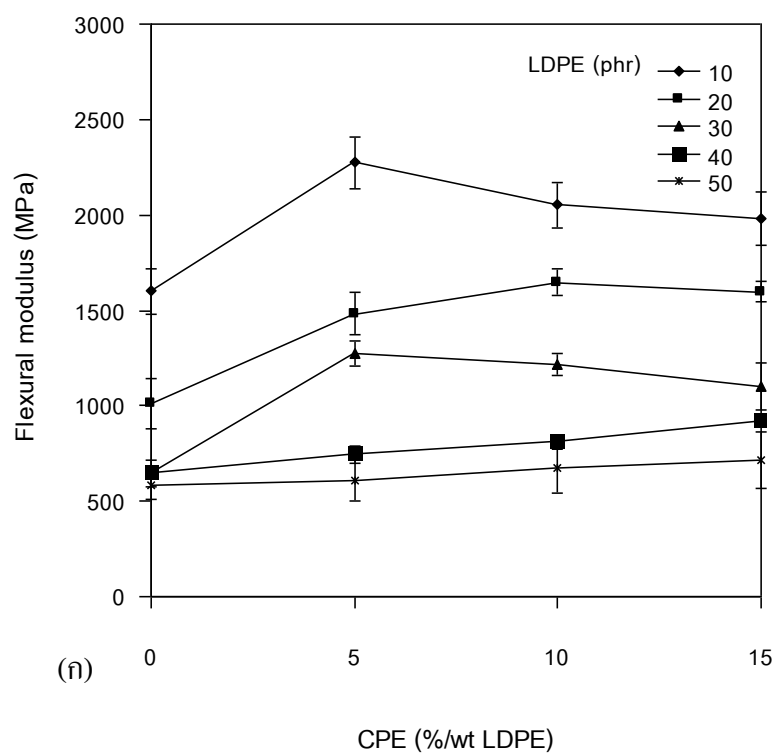


รูปที่ 4.7 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

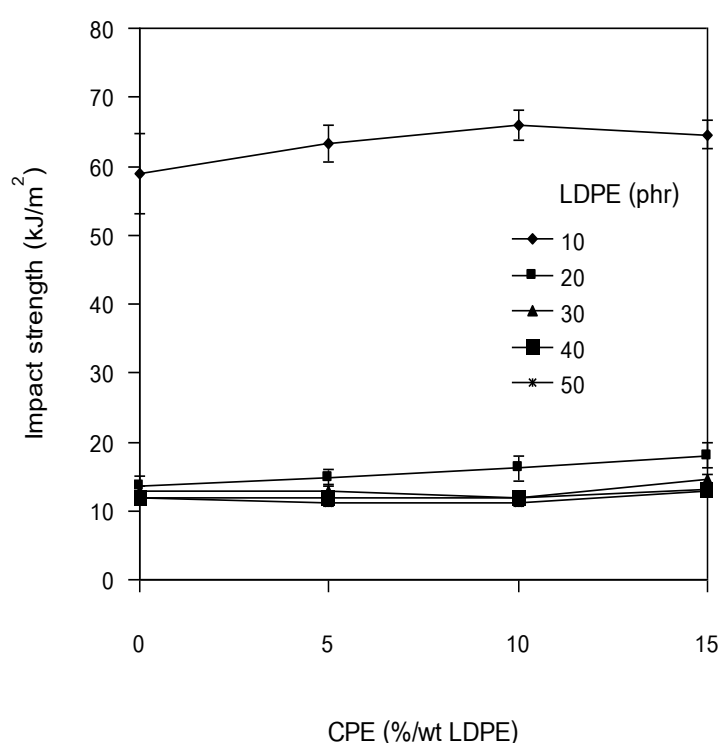
ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสมชนิด CPE แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อใช้สารช่วยผสมทำให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคจะช่วยต้านทานการเสียรูปหรือการหลุดลอกของสายโซ่เมื่อได้รับแรงดึงทำให้การเสียสภาพแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากสายโซ่มีการเกี่ยวพันกันทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก คือ มีความแข็ง (Stiffness) ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้จากโครงสร้างของสารช่วยผสม คือ CPE มีโครงสร้าง C-Cl เหมือนกับโครงสร้างของ PVC จึงเกิดการยึดเหนี่ยวกันได้โดยลักษณะของความมีขั้ว นอกจากนี้ CH_2 ในโครงสร้างของ CPE สามารถเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) กับ LDPE ได้ สำหรับค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ พอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติด (Adhesion) ระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมมีผลให้รอยตำหนิของชิ้นงานลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงสามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง สมบัติทางแรงดึงจึงสูงขึ้น

ในส่วนของปริมาณการใช้ CPE ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 20 และ 30 เมื่อใช้ปริมาณ CPE 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE มอดุลัสมีค่าลดลง ทั้งนี้ อธิบายได้ว่าเนื่องจากในโครงสร้างของ CPE ที่ประกอบด้วย CH_2 ซึ่งมีความอ่อนนุ่ม ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงมอดุลัสจึงมีแนวโน้มต่ำลง สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE 40 และ 50 มอดุลัสมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE จากผลดังกล่าวแสดงว่าในการเลือกใช้ปริมาณสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของพอลิเมอร์ด้วย สำหรับความแข็งแรงดึงพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ทำให้พอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนมีความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แต่สังเกตได้ว่าค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม ส่วนร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 แต่ในอัตราส่วนอื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าในชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของ LDPE ในปริมาณมากทำให้มีรอยตำหนิหรือช่องว่างระหว่างรอยต่อของวัฏภาคมาก เมื่อถูกดึงยืดจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง สมบัติที่ได้จึงมีค่าต่ำ



รูปที่ 4.8 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE
(ก) โมดูลัสโค้งงอและ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมเป็นไปในแนวทางเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง คือ เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE ทำให้มอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างวัฏภาค ทำให้เมื่อรับแรงกดสามารถกระจายแรงได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับปริมาณการใช้ CPE พบว่ามีลักษณะเหมือนกับสมบัติด้านแรงดึง คือ ที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 20 และ 30 มอดุลัสโค้งงอเริ่มลดลงเมื่อใช้ปริมาณ CPE 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก LDPE ในอัตราส่วน PVC100 : LDPE40 และ 50 มอดุลัสมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณ CPE 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ส่วนความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ CPE เป็น 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE

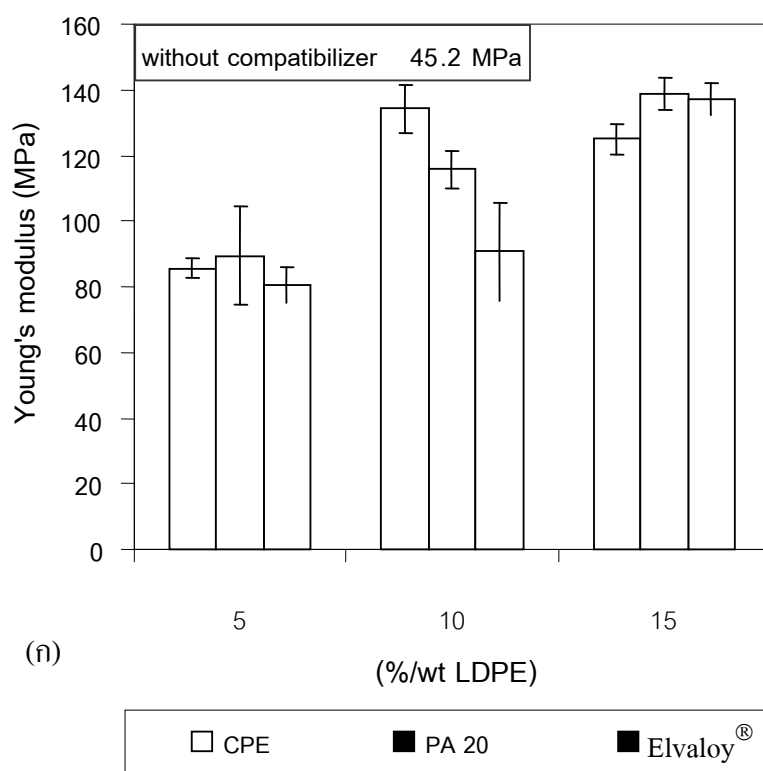


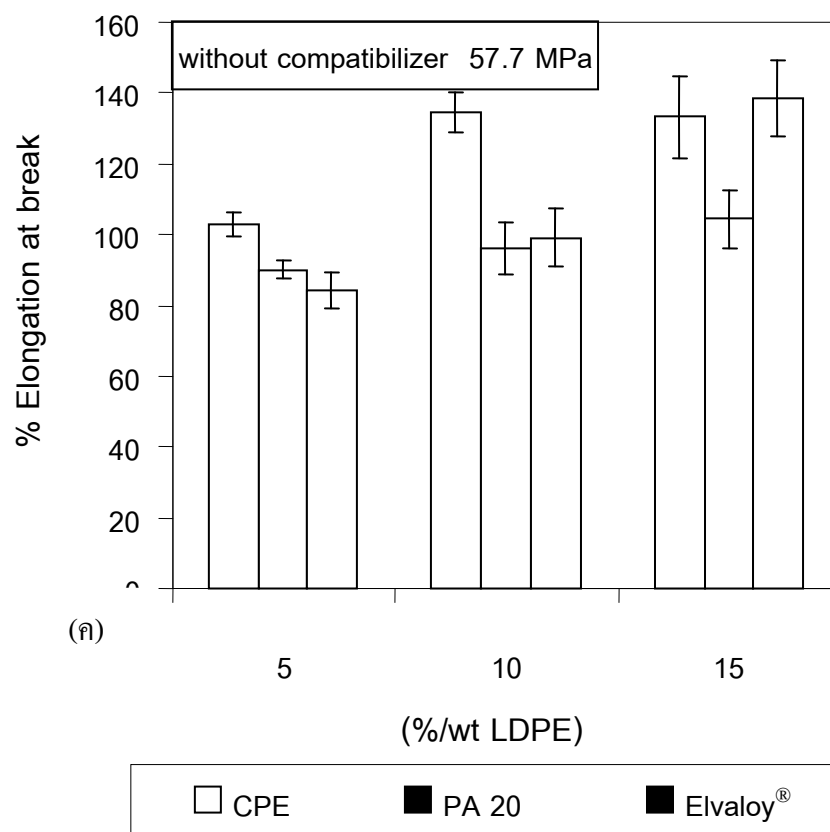
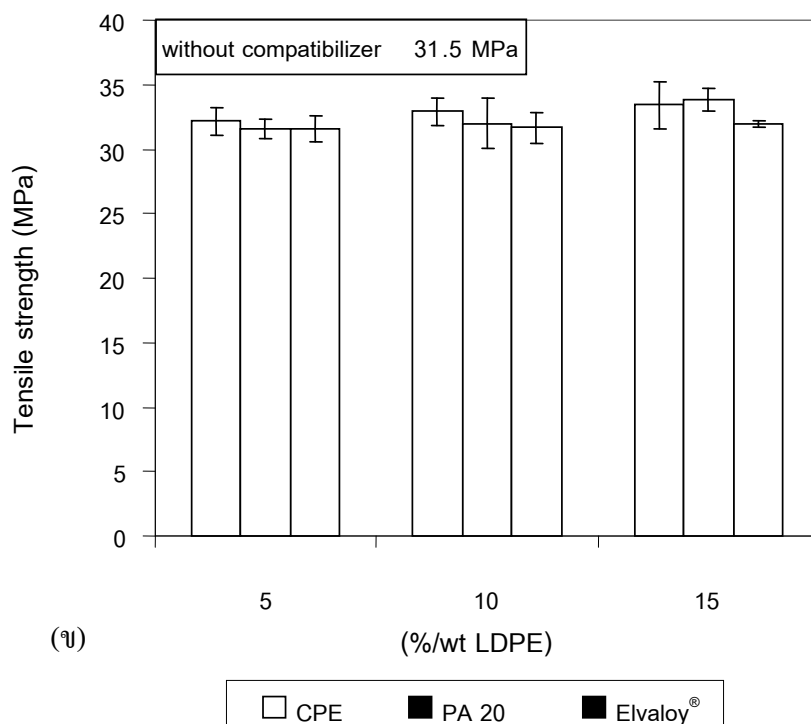
รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC / LDPE โดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PVC และ LDPE ด้วยสารช่วยผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) ระหว่างรอยต่อของวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ ทำให้ด้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณ CPE ที่เหมาะสมในอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 คือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE แต่ในอัตราส่วนอื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากแรงกระแทกเป็นการทดสอบโดยให้แรง

กระแทกแบบตันที่ทันใด ดังนั้นเมื่อชิ้นงานยังมีรอยตำหนิอยู่จึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่องความแข็งแรงกระแทกจึงมีค่าลดลง

จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด CPE พบว่ามีสมบัติโดยรวมดีขึ้นในทุกอัตราส่วนของการผสม โดยเฉพาะค่ามอดูลัส มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลเลอร์จากไม้ยางพารา จึงต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน จากเหตุผลนี้จึงเลือกอัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยผสมชนิด CPE PA 20 และ Elvaloy[®] ในปริมาณ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ก่อนนำพอลิเมอร์ผสมไปทำเป็นวัสดุคอมพอสิตต่อไป

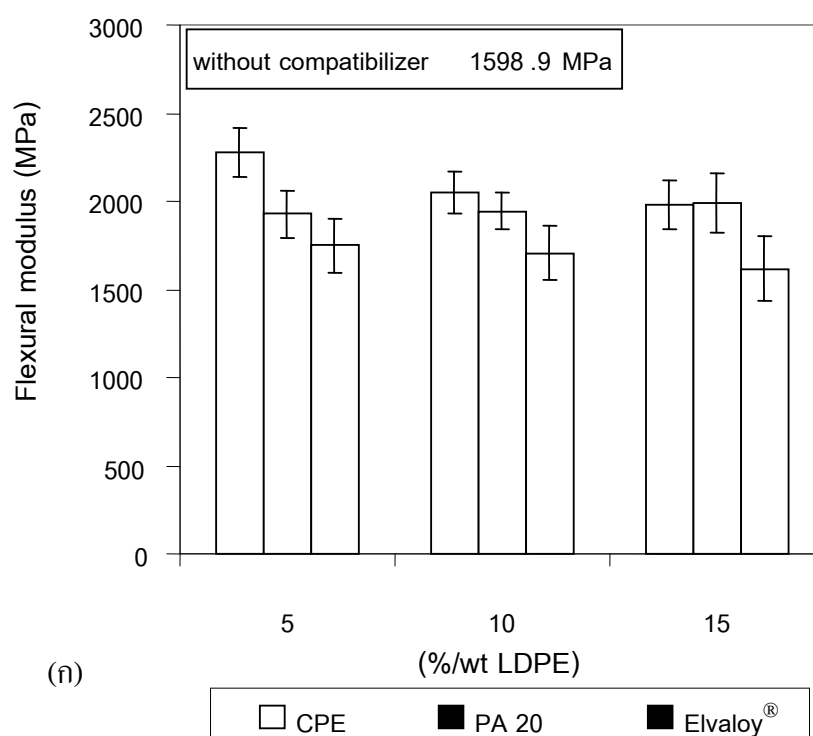


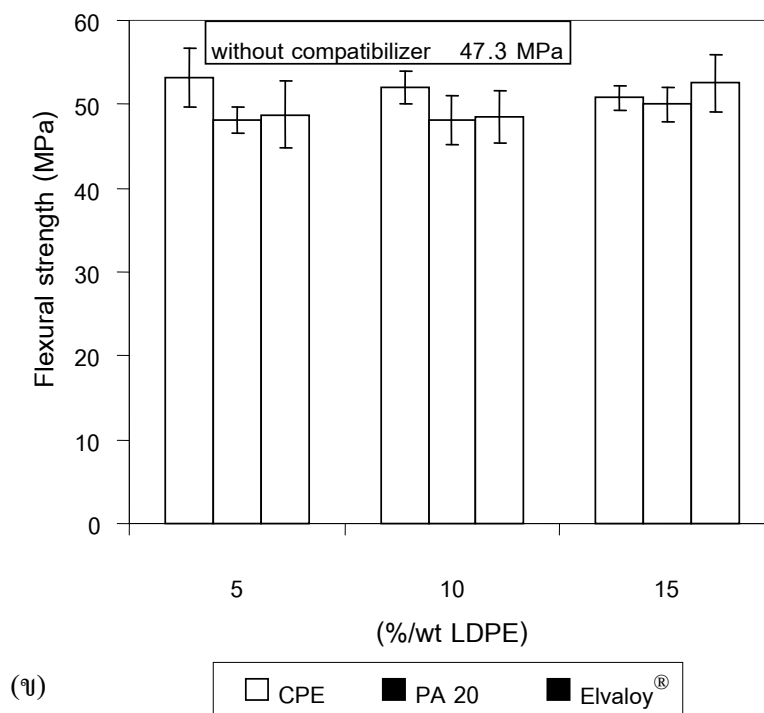


รูปที่ 4.10 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด

(ก) มอดุลัส (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

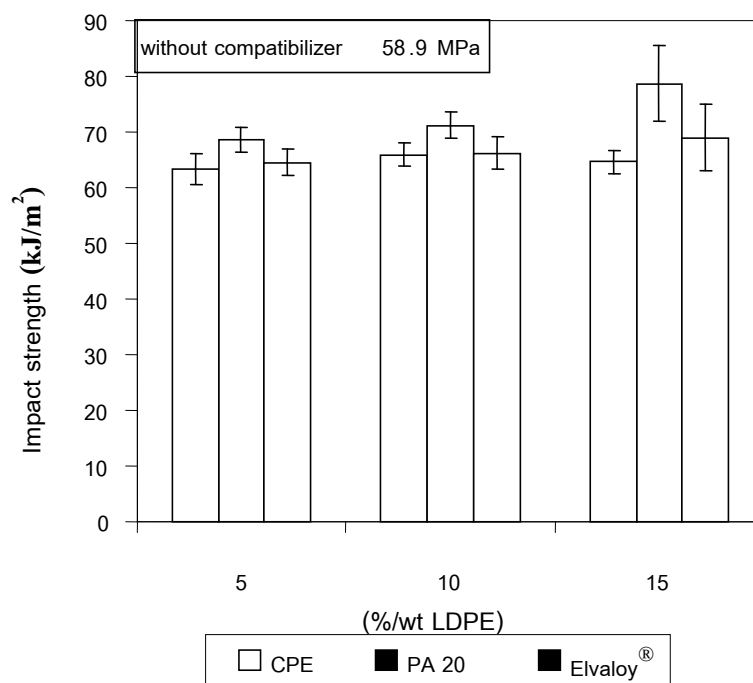
จากรูปที่ 4.10 พบว่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้สารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของสารช่วยผสมจากที่กล่าวถึงในสารช่วยผสมชนิด CPE ไปแล้วนั้น สำหรับ PA 20 และ Elvaloy[®] ซึ่งในโครงสร้างมีหมู่อะไโรเลตซึ่งมีสภาพขั้วจึงเกิดการยึดเหนี่ยวกับ PVC โดยใช้สมบัติความมีขั้วและ CH₂ เกี่ยวพันกับสายโซ่ของ LDPE นอกจากนี้ PA 20 ยังมีหน้าที่ช่วยในกระบวนการผลิตสำหรับ PVC คือ ช่วยในการหลอมได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงมีผลในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดรอยตำหนิบริเวณรอยต่อของวัฏภาค เป็นผลให้สมบัติด้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้น โดย PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้มอดุลัสและความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด ส่วน Elvaloy[®] ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดที่สูงที่สุด





รูปที่ 4.11 สมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด
(ก) มอดุลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.11 พบว่ามอดุลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้สารช่วยผสมทั้งสามชนิดในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมเช่นเดียวกับสมบัติด้านแรงดึง โดยสมบัติด้านการโค้งงอมีค่าสูงสุดเมื่อปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ผสมชนิด CPE ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE



รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด

จากรูปที่ 4.12 พบว่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดย PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้ค่าที่สูงที่สุด

จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม ชนิด CPE PA 20 และ Elvaloy® สามารถแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม (PVC100 : LDPE10)
เมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมในชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับ
พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม

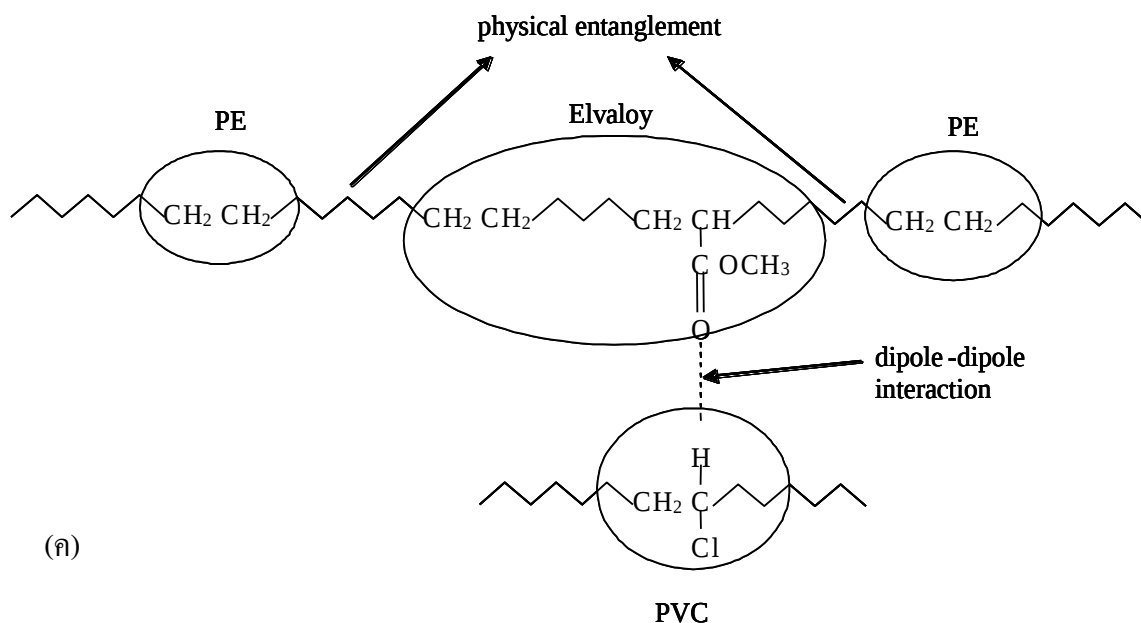
Mechanical Properties	CPE			PA 20			Elvaloy [®]		
	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %
Young's modulus (MPa)	+89.4	+196.7	+176.3	+97.7	+155.9	+207.3	+78.2	+100.8	+203.6
Tensile strength (MPa)	+2.0	+4.4	+6.0	+0.1	+1.4	+7.3	+0.2	+0.4	+1.4
% Elongation at break	+78.0	+133.2	+131.1	+56.1	+66.5	+81.0	+45.8	+71.8	+140.3
Flexural modulus (MPa)	+42.3	+28.3	+24.0	+21.0	+21.5	+24.7	+9.4	+0.8	+1.2
Flexural strength (MPa)	+12.3	+10.1	+7.5	+1.6	+0.9	+5.6	+3.2	+2.7	+11.1
Impact strength (kJ/m ²)	+7.4	+11.9	+9.7	+16.4	+21.0	+33.5	+9.4	+12.5	+17.1

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy[®] ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณ PA 20 ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ PA 20 แต่การเพิ่มปริมาณของ CPE และ Elvaloy[®] ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น โดยกรณีที่ใช้ CPE และ Elvaloy[®] ในปริมาณ 10 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติด้านมอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ใช้ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมมีความสำคัญต่อสมบัติ

เชิงกล และจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมแต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ลักษณะของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ Elvaloy[®] เป็นสารช่วยผสมมีการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ที่ดีที่สุด แต่ไม่ได้ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ทั้งนี้อธิบายได้ว่าลักษณะการทำหน้าที่ของ PA 20 นอกจากจะช่วยให้ LDPE มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวใน PVC ได้ดีขึ้นแล้วนั้นยังเป็นการปรับปรุงสมบัติของ PVC คือ PA 20 โดยปกติทำหน้าที่เป็นสารช่วยหลอม (Processing aid) ในกระบวนการผสม PVC โดยในโครงสร้างของ PA 20 ประกอบด้วย เมทิลเมทาไครเลตและบิวทิลอะไครเลต ซึ่งเข้ากับ PVC ได้ดีโดยใช้สมบัติความมีขี้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นการปรับปรุง PVC ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ต่อเนื่องในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าการใช้สารช่วยชนิด CPE และ Elvaloy[®] ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและจีเลี่ยจากไม้ยางพารา ดังนั้นในการเลือกปริมาณและสารช่วยผสมจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติในด้านความแข็งแรง ซึ่งจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติโดยรวมที่สูงกว่าใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy[®] โดยเฉพาะความแข็งแรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับผลของ T_g ที่แสดงในตารางที่ 4.4 (ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.17) คือ จากการใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ทำให้ค่า T_g ใกล้เคียงกับ PVC Compound มากกว่าการใช้ CPE และ Elvaloy[®] และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม นอกจากนี้มีงานวิจัย [34] ที่พบว่าการใช้สารเติมแต่งที่ประกอบด้วยอะคริลิก (Acrylic-based modifier) ในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่าง PVC และเส้นใยไม้มีผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกสูงขึ้นและในงานวิจัย [35] ที่ใช้ PA 20 ในการปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตระหว่าง PVC และไม้ จากผลดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า PA 20 เหมาะสมในการเป็นสารช่วยผสมและสารที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทก ดังนั้นในการศึกษาสมบัติของคอมโพสิตจึงได้เลือกใช้ PA 20 ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE

จากสมบัติที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงความสัมพันธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมและสารช่วยผสม ดังนี้



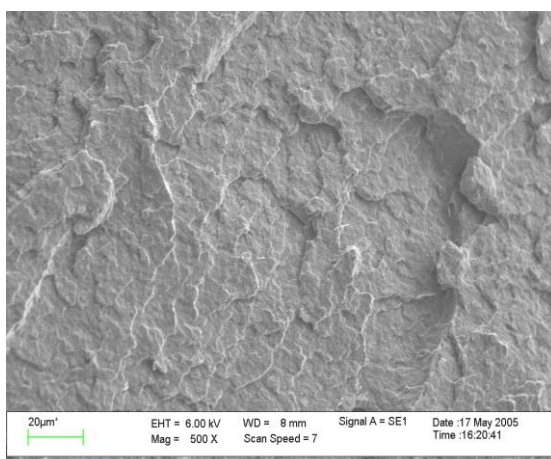
รูปที่ 4.13 กลไกของอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และ สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE (ข) PA 20 และ (ค) Elvaloy[®]

จากรูปที่ 4.13 (ก) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ CPE เป็น สารช่วยผสมซึ่งจะเห็นได้ว่า CPE มีโครงสร้างที่คล้ายกับ PVC และ LDPE จึงทำให้เกิดการยึดกัน โดยความมีขั้ว (Dipole-dipole interaction) และ CH_2 ในโครงสร้างของ CPE เกี่ยวพันกับสายโซ่ (Chain entanglement) ของ LDPE สำหรับรูปที่ 4.13 (ข) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในสารช่วยผสม ชนิด PA 20 โดยจากโครงสร้างของ PA 20 ประกอบด้วยพอลิเมทิลเมทาไครเลตและบิวทิล อะไครเลต ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาได้โดยใช้สมบัติความมีขั้วของหมู่อะไครเลต ส่วน LDPE เกี่ยวพันกับ CH_2 ที่มีอยู่ในโครงสร้าง และจากรูปที่ 4.13 (ค) เป็นกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในสารช่วยผสมชนิด Elvaloy[®] จากโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะไครเลต ดังนั้น ส่วนที่มีขั้ว คือ เมทิลอะไครเลตจะเกิดอันตรกิริยากับ PVC และเอทิลีนจะเกี่ยวพันกับสายโซ่ของ LDPE จากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ก็สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับแรงจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น

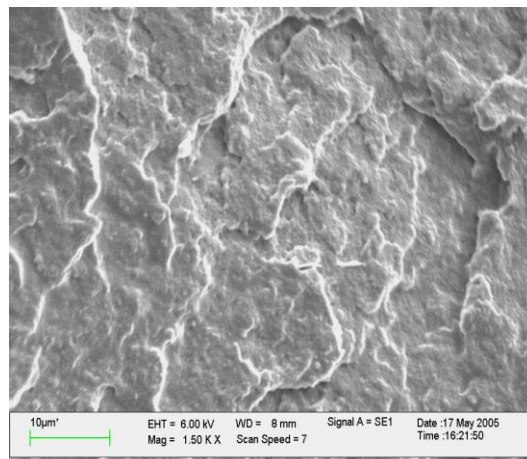
4.1.5 การศึกษาฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE

4.1.5.1 การศึกษาฐานวิทยาของ PVC และพอลิเมอร์ผสม

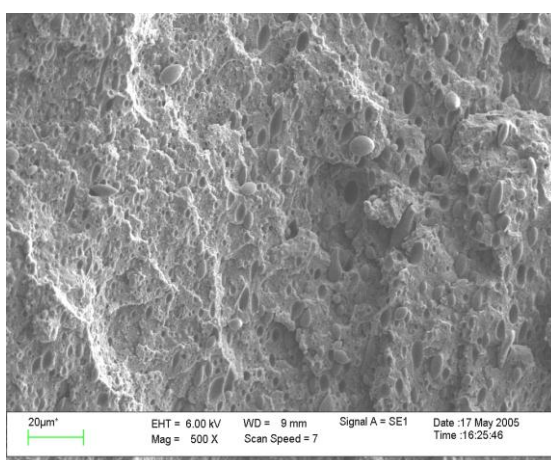
การศึกษาฐานวิทยาประกอบด้วย PVC 100 เปอร์เซ็นต์ และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.14



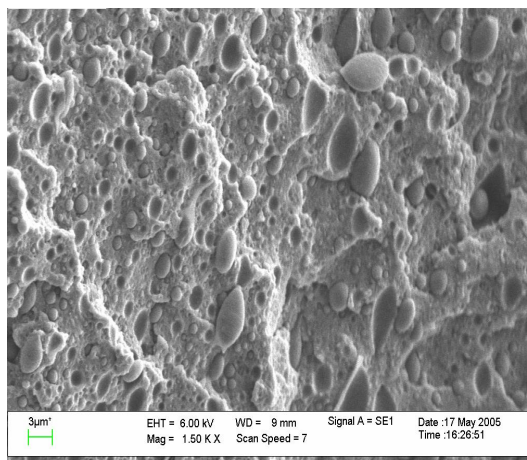
(ก)



(ข)



(ค)



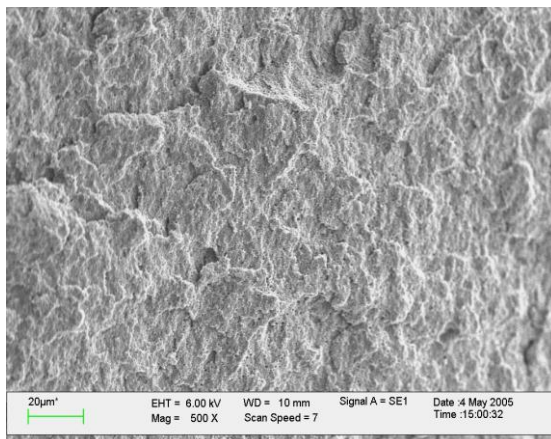
(ง)

รูปที่ 4.14 พื้นผิวแตกหักของ (ก) PVC (500X) (ข) PVC (1500X) (ค) PVC100 : LDPE10 (500X) และ (ง) PVC100 : LDPE10 (1500X)

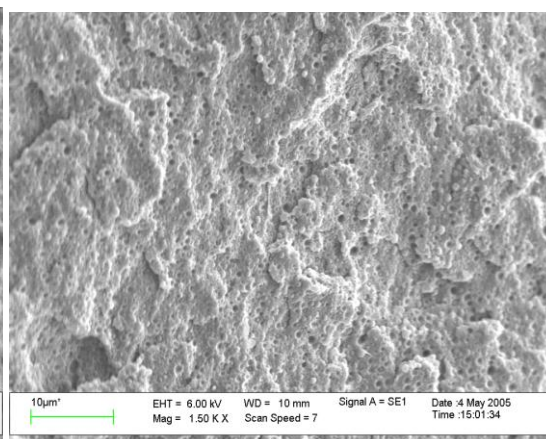
จากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ค) พบว่าสัณฐานวิทยาของ PVC เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE มีลักษณะต่างกัน คือ ในส่วนของ PVC พื้นผิวมีลักษณะเรียบ แต่ในพอลิเมอร์ผสมมีส่วนที่เป็นเม็ดกระจายตัวอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ จากลักษณะที่แตกต่างกันนี้แสดงว่าส่วนที่กระจายตัวอยู่ คือ อนุภาคของ LDPE และในรูปที่ 4.14 (ง) พบว่าอนุภาคของ LDPE ที่กระจายตัวอยู่มีลักษณะเป็นเม็ดและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้พื้นผิวของ PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ไม่เกิดการยึดเกาะกับ LDPE ซึ่งเป็นส่วนที่กระจายตัวอยู่ โดยสังเกตได้จากบริเวณหลุมซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของ LDPE หลุดออกไปนั้นพื้นผิวมีลักษณะเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่มีค่าต่ำลงเมื่อผสม LDPE ลงไปใน PVC เมทริกซ์

4.1.5.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

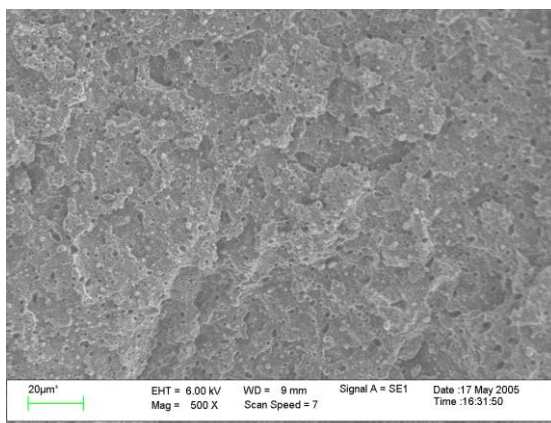
อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่นำมาศึกษา คือ PVC100 : LDPE 10 และสารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE Elvaloy และ PA 20 โดยใช้ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE



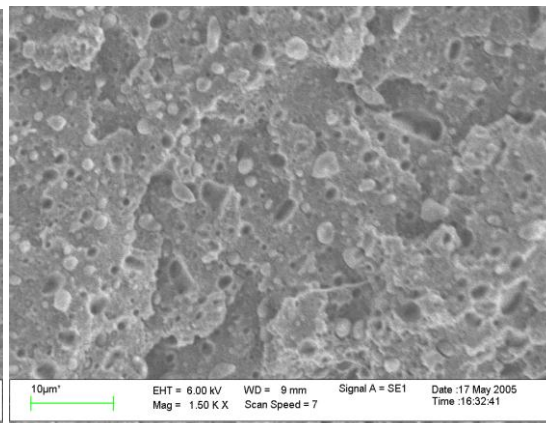
(ก)



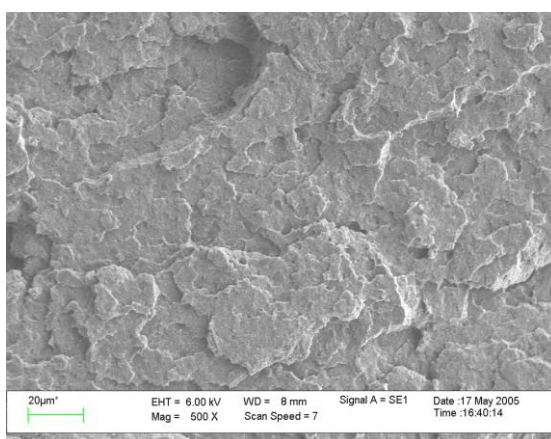
(ข)



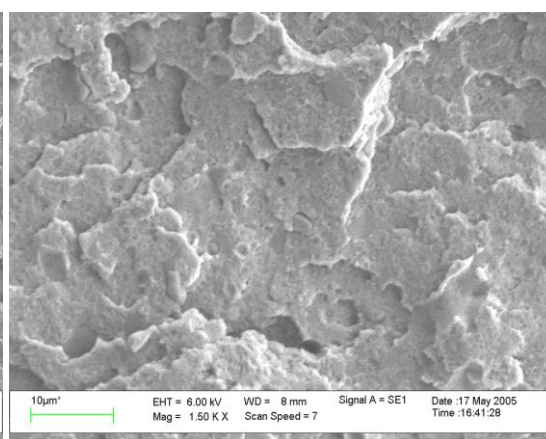
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.15 พื้นผิวแตกหักของ PVC100 : LDPE10 โดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด (ก) CPE 15%

(500X) (ข) CPE 15% (1500X) (ค) PA 20 15% (500X) (ง) PA 20 15% (1500X)

(จ) Elvaloy[®] 15% (500X) และ (ฉ) Elvaloy[®] 15% (1500X)

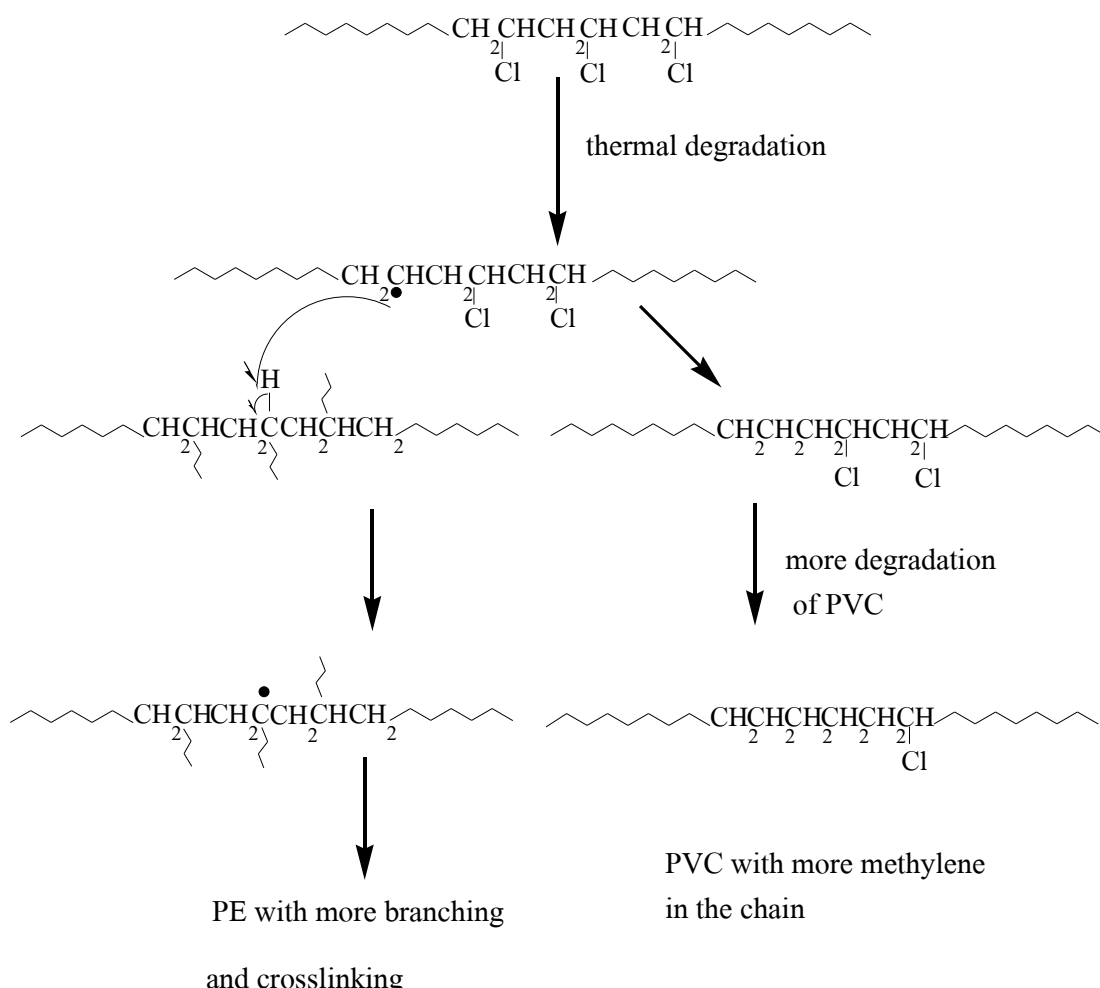
จากรูปที่ 4.15 (ก) (ค) และ (จ) พบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด มีการกระจายตัวของ LDPE ใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ได้ดีขึ้น คือ มีอนุภาคของ LDPE แทรกอยู่ใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอและในรูปที่ 4.15 (ข) (ง) และ (ฉ) พบว่าอนุภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสารช่วยผสมทำหน้าที่เสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE จึงเป็นการป้องกันการรวมตัวของ PVC หรือ LDPE ในระหว่างกระบวนการผสมจึงมีผลทำให้ขนาด LDPE ลดลงการกระจายตัวดีขึ้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น

4.1.6 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC 100 เปอร์เซนต์เปรียบเทียบกับ PVC ในพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC 100 เปอร์เซนต์ และ PVC ในพอลิเมอร์ผสม

รายการ	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
PVC 100 %	287.9
PVC 100 : LDPE 10	291.3
PVC 100 : LDPE 10 : CPE 15 %	284.0
PVC 100 : LDPE 10 : PA 20 15 %	289.9
PVC 100 : LDPE 10 : Elvaloy [®] 15 %	281.1

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE 10 มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอนุมูลอิสระ (Radical transfer reaction) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กลไกการเกิดการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการผสม [36]

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงกลไกการเกิดการถ่ายโอนอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการผสม โดยเริ่มจากอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเสถียรภาพของ PVC ด้วยกระบวนการดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation process) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขนาดใหญ่ (Macro-radical) ของ PVC ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนที่เกิดจากการหลุดออกจากสายโซ่ของ LDPE และอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนนี้อาจจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระขนาดใหญ่ของ PVC ได้ซึ่งจะทำให้ในสายโซ่ของ PVC มีหมู่ CH_2 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเสถียรภาพของ PVC เพิ่มขึ้น ส่วนอนุมูลอิสระในโครงสร้างของ LDPE อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในโครงสร้างของ LDPE ทำให้โครงสร้างของ LDPE มีกิ่งก้าน (Branching) หรือเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งจากปฏิกิริยานี้จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการดีไฮโดรจิเนชันเกิดได้น้อยลงเป็นผลให้ PVC มีเสถียรภาพมากขึ้น [36] ทำให้ T_g สูงขึ้น แต่เมื่อมีสารช่วยผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสมทำให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าต่ำลงซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อผสมสารช่วยผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความ

เข้ากันได้มากขึ้น คือ ส่วนที่มีขั้วใน CPE PA 20 และ Elvaloy[®] ยึดเหนี่ยวกับ PVC และส่วนที่มีโครงสร้างเหมือน LDPE จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งลักษณะนี้มีผลทำให้ปฏิกิริยาการถ่ายโอนอนุมูลอิสระที่เกิดใน PVC และ LDPE เกิดได้น้อยลง ดังนั้นการเสถียรภาพของ PVC จึงมีโอกาสเกิดได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

4.1.7 การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PVC

ตารางที่ 4.4 ค่า T_g ของ PVC

สูตรพอลิเมอร์	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
PVC 100 %	91
PVC100 : LDPE10	89
PVC100 : LDPE10 : CPE 15 %	88
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	90
PVC100 : LDPE10 : Elvaloy [®] 15 %	89

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า T_g ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PVC 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเติม LDPE ซึ่งมีโครงสร้างที่อ่อนนุ่ม (Flexible) เมื่อได้รับความร้อนสายโซ่จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อผสมสารช่วยผสมพบว่า T_g ของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ T_g ของ PVC 100% แสดงว่าการทำหน้าที่ของสารช่วยผสมชนิด PA 20 ซึ่งมีลักษณะเสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง PVC และ LDPE มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิด CPE และ Elvaloy[®] T_g ที่ได้จากการใช้ PA 20 สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.8 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม

เพื่อศึกษาผลกระทบของการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้วิธีการผสม 2 แบบ คือ ใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และ ใช้เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้งหลังจากผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

4.1.8.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) ทำได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในการทดสอบได้ศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
LDPE 100 %	112.2
PVC100 : LDPE10 (Single screw)	111.4
PVC100 : LDPE10 (Single screw + Two roll mill)	111.1
PVC100 : LDPE10 : CPE 15 %	111.6
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	110.9
PVC100 : LDPE10 : Elvaloy [®] 15 %	111.9

จากตารางที่ 4.5 พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวหลักของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ที่มีการผสมด้วยขั้นตอนที่ต่างกันและการใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าวิธีการผสมไม่ทำให้พฤติกรรมการหลอมเหลวหลักของ LDPE เปลี่ยนไป

4.1.8.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการตกผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีเป็นผลึกใช้เทคนิคเดียวกับการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวหลักซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีเป็นผลึกของ LDPE

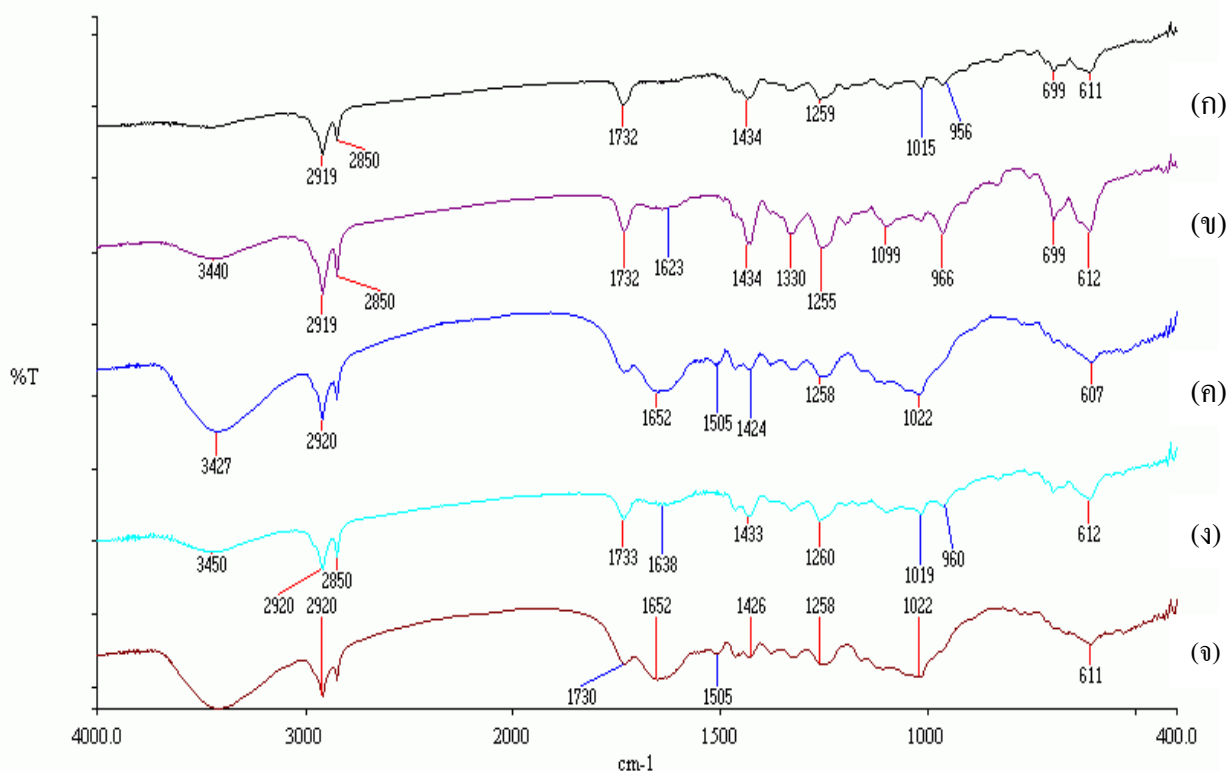
ตัวอย่าง	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	ΔH_n (J/g)	% Crystallinity
LDPE 100 %	97.6	93.01	93.01	31.68
PVC 100 : LDPE10 (Single screw)	97.9	3.49	38.39	13.08
PVC 100 : LDPE10 (Single screw + Two roll mill)	98.1	3.22	35.42	12.06
PVC 100 : LDPE10 : CPE 15 %	97.7	3.89	43.37	14.77
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 %	98.1	3.37	37.57	12.79
PVC 100 : LDPE10 : Elvaloy [®] 15 %	97.3	3.79	42.25	14.39

จากตารางที่ 4.6 พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนโทรปีความเป็นผลึกมีปริมาณใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีวิธีการผสมที่ต่างกันหรือใช้สารช่วยผสมต่างกัน แสดงว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่ทำให้สมบัติเกี่ยวกับความเป็นผลึกของ LDPE เปลี่ยนไป

4.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

4.2.1 การศึกษาหุ้ฟังก์ชันของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

จากการศึกษาหุ้ฟังก์ชันของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 และไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมโดยใช้ PVC 100 phr LDPE 10 phr PA 20 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ LDPE และซีลี้อย 10 และ 50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% (ข) PVC100 : LDPE10 : SD10% (ค) PVC100 : LDPE10 : SD 50% (ง) PVC100 : LDPE10 : SD10% : PA 20 15% และ (จ) PVC100 : LDPE10 : SD50% : PA 20 15%

จากรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 และซีลี้อยู่โดยใช้ปริมาณ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.17 (ข)-(จ) เมื่อผสมซีลี้อยู่ในพอลิเมอร์ผสมพบฟีกที่ต่างไปจากสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ลักษณะฟีกกว้างในช่วง $1650-1720\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O Stretching ของคาร์บอนิลซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยไมไคโดยที่คอมโพสิตที่มีซีลี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ มีฟีกที่ตำแหน่งนี้เด่นชัดกว่าคอมโพสิตที่ใช้ซีลี้อยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีฟีกการยืดตัวของวงแหวนอะโรมาติกซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของลิกนินที่มีอยู่ในเส้นใยไมไคเป็นฟีกใหญ่ในช่วง $1650-1450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเห็นชัดเจนในคอมโพสิตที่ใช้ปริมาณซีลี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการสั่นแบบ O-H Stretching พบในช่วง $3450 - 3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีอยู่ในเนื้อไม้ นอกจากนี้พบว่า ในรูปที่ 4.17 (ค)และ (จ) มีฟีกปรากฏที่ตำแหน่ง 1505 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=C Stretching ที่อยู่ในวงแหวนอะโรมาติกซึ่งเป็นโครงสร้างของลิกนิน [32,33] สำหรับคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมพบว่า ตำแหน่งของฟีกมีลักษณะคล้ายกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20

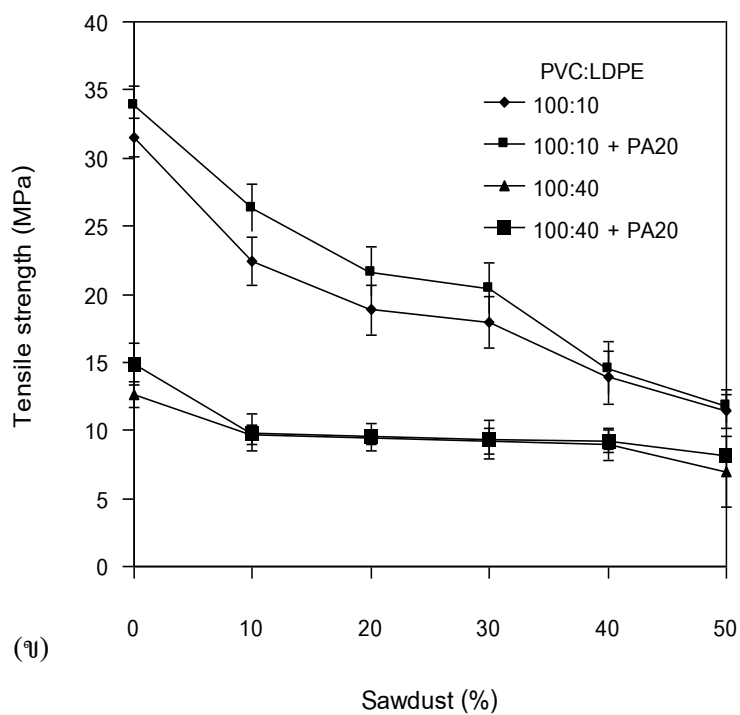
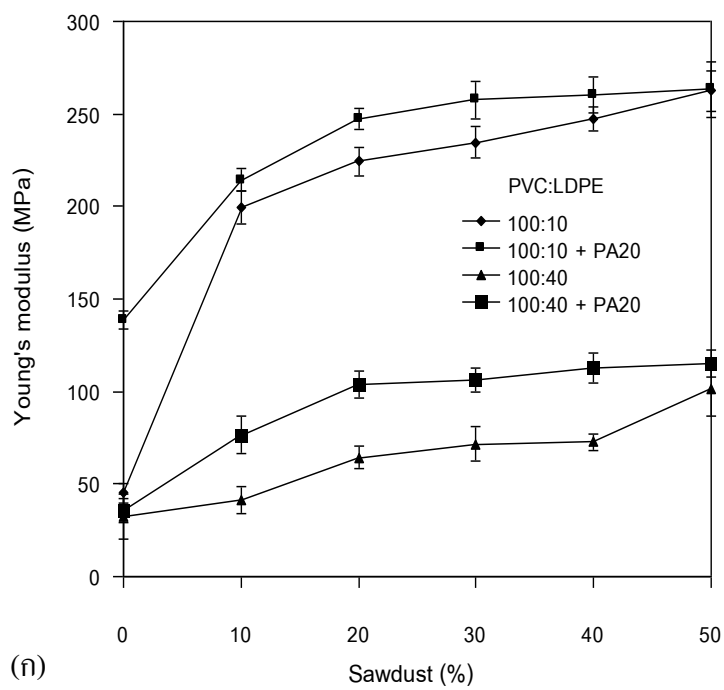
ตำแหน่งของสเปกตรัมที่สำคัญของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพาราสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

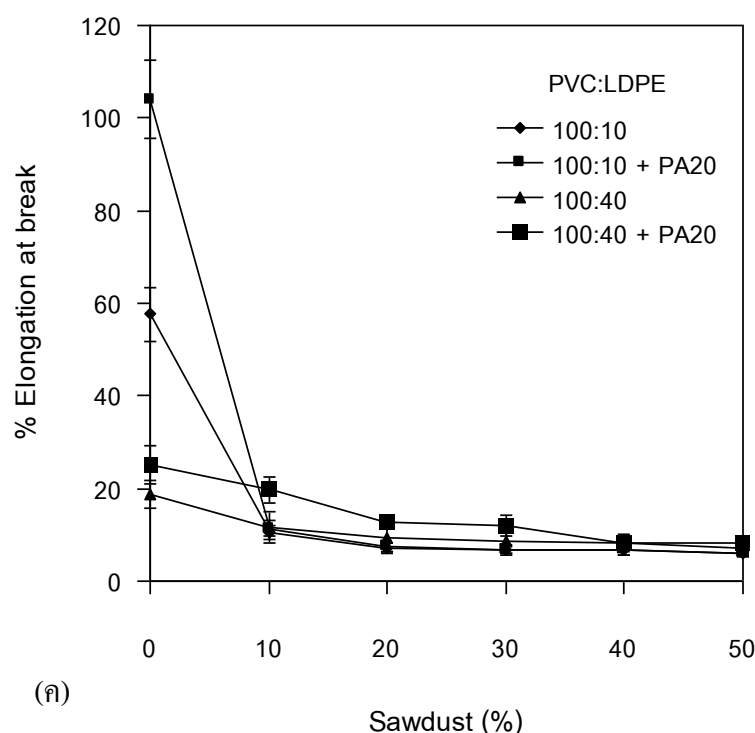
ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งสเปกตรัมของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา

ตำแหน่งพิก (cm ⁻¹)	ลักษณะการสั่น	เอกสารอ้างอิง
3450 – 3500	O-H Stretching	32,33
1450-1650	วงแหวนอะโรมาติก	32,33
1650-1720	C=O Stretching	32,33
1500-1600	C=C Stretching in aromatic	32,33
1430 – 1470	C-H bending ของ CH ₂	32,33
1300 – 1400	C-H Deformation ของ CH ₂	32,33
600 – 800	C-Cl Stretching	32,33

4.2.2 สมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา

การศึกษาผลของปริมาณขี้เลื่อยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพาราโดยอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่นำมาทำเป็นคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 และ PVC100 : LDPE40 ซึ่งศึกษา 2 แบบ คือ ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสม ชนิดและปริมาณสารช่วยผสม คือ PA 20 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE สำหรับขี้เลื่อยได้ศึกษาปริมาณขี้เลื่อยที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมและใช้ขนาดของขี้เลื่อย 50 – 80 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวของขี้เลื่อยในช่วง 180 – 300 ไมครอน ได้ผลการทดลองดังนี้





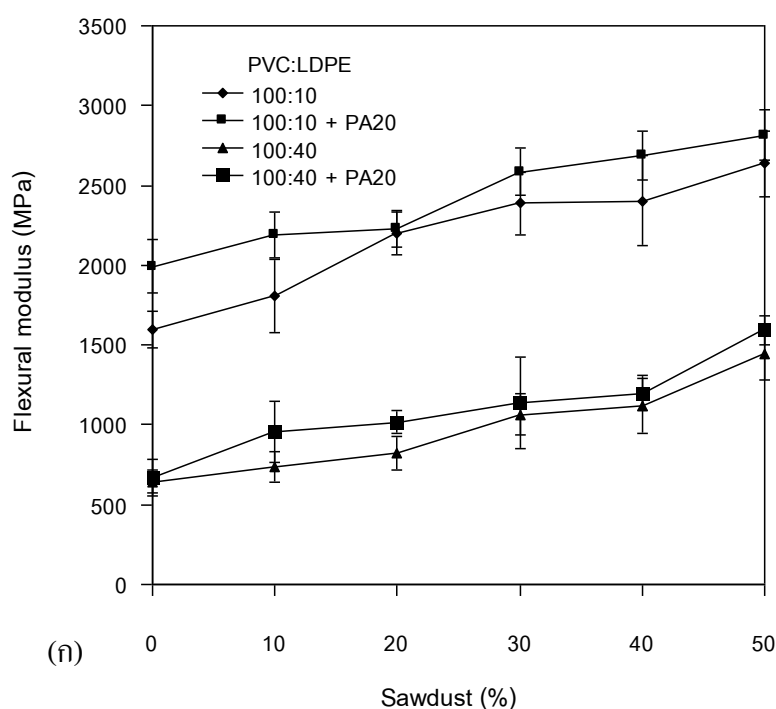
รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

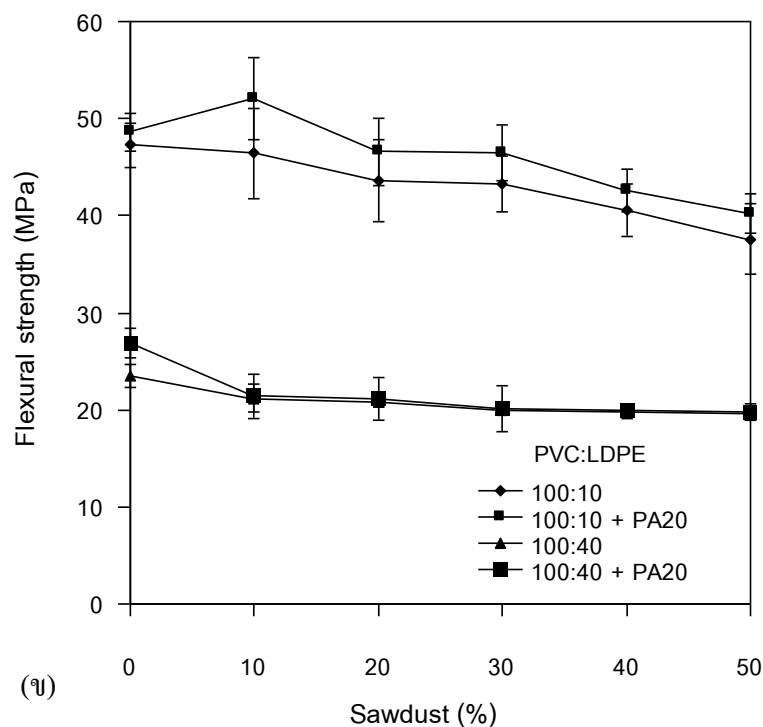
(ก) มอดุลัสความแข็งแรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง และ (ค) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณขี้เลื่อย แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่ามอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากขี้เลื่อยมีมอดุลัสที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นมอดุลัสโดยรวมของคอมโพสิตจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 ให้ค่าที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 เนื่องจาก LDPE มีลักษณะที่อ่อนนุ่มดังนั้นเมื่อใช้ขี้เลื่อยในปริมาณที่เท่ากันคอมโพสิตที่มีปริมาณ LDPE ต่ำกว่าจึงมีมอดุลัสที่สูงกว่า นอกจากนี้พบว่าคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสมให้มอดุลัสที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสม แต่เมื่อปริมาณไม้มากขึ้น คือ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามอดุลัสของคอมโพสิตที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

สำหรับความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 และ 40 มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ต่ำ ทำให้ชิ้นงานมีรอยตำหนิ (Defects) ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานบริเวณที่เส้นใยติดต่อกับวัฏภาคเมทริกซ์นั้นเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมเลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มมากขึ้นนั้นขี้เลื่อยอาจกระจายตัวไม่ดี บางส่วนมีการจับตัว

เป็นกลุ่มก้อนซึ่งบริเวณที่มีขี้เลื่อยรวมกันเป็นก้อน ดังแสดงได้จากฐานวิทยากรูปร่างที่ 4.21 นั้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์ ทำให้เกิดเป็นตำหนิในชิ้นงาน แต่เนื่องจากวิธีการผสมคอมโพสิตเป็นแบบสุ่ม คือ ผสม PVC LDPE และ PA 20 พร้อมกัน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการยึดเหนี่ยวกันโดยใช้สมบัติความมีขี้ของ PVC และ PA 20 กับขี้เลื่อยได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยต่อของวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์กับขี้เลื่อย เป็นผลให้รอยตำหนิในชิ้นงานลดลง ทำให้ส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้ความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยึดฉีกขาด ของคอมโพสิตที่ใช้พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ใช้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม แต่เมื่อปริมาณขี้เลื่อยมากขึ้น สมบัติด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตที่มีและไม่มีสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่ขี้เลื่อยจะเกิดอันตรกิริยากับสารช่วยผสมมีมากขึ้น เป็นผลให้สารช่วยผสมไม่สามารถทำหน้าที่ปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมได้ จึงทำให้ความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกัน

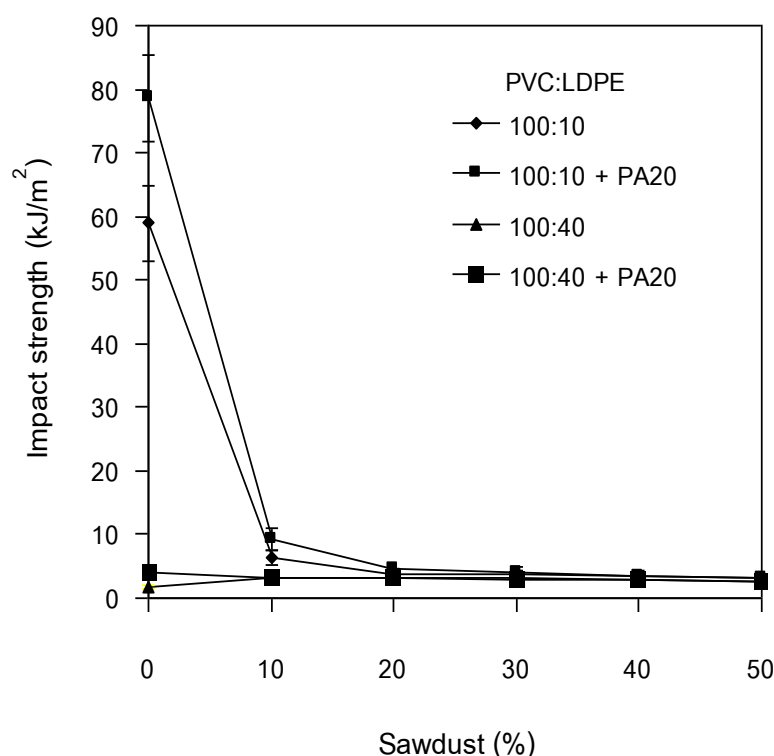




รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

(ก) โมดูลัสโค้งงอ และ (ข) ความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.19 พบว่าค่าโมดูลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม เนื่องจากขี้เลื่อยมีโมดูลัสสูงจึงทำให้โมดูลัสโค้งงอของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลงเนื่องจากแรงกดอัดแบบโค้งงอทำให้เกิดความเค้นขึ้นบริเวณภายในของคอมโพสิต โดยค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ให้แก่ชิ้นงานก่อนเกิดการเสียรูปของชิ้นงานอย่างถาวรเมื่อได้รับแรงกดจะเกิดการกระจายแรงจากเมทริกซ์สู่เส้นใยโดยถ่ายเทความเค้นที่ได้รับไปตามความยาวของเส้นใย แต่เนื่องจากความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และขี้เลื่อย นอกจากนี้เมื่อขี้เลื่อยมีปริมาณมากขึ้นอาจรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ไม่สามารถกระจายแรงได้ความแข็งแรงโค้งงอจึงมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของขี้เลื่อย โดยที่คอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 ให้โมดูลัสโค้งงอและความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 และเมื่อมีสารช่วยผสมในระบบทำให้ความแข็งแรงโค้งงอสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติด้านความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมคอมโพสิต

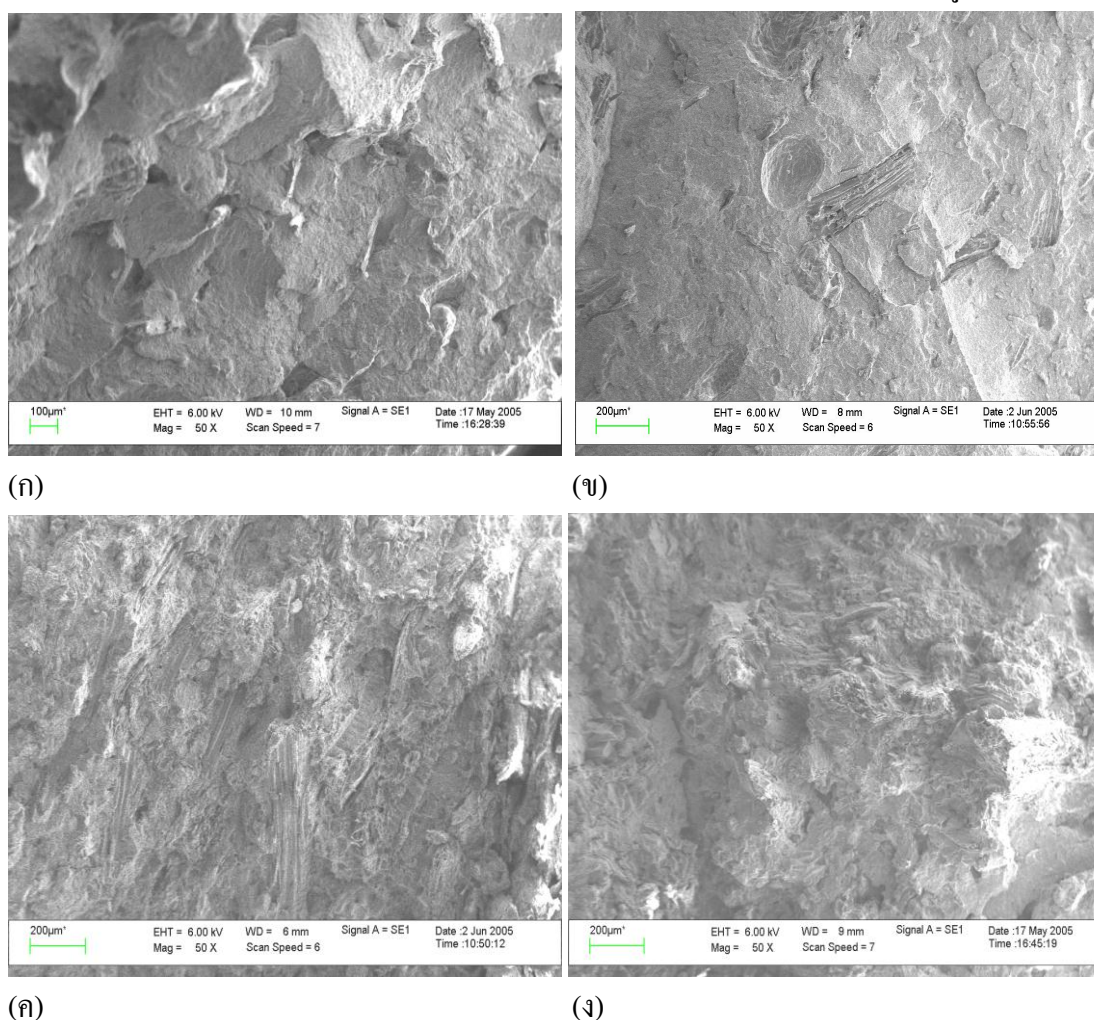
จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงอย่างมากทั้งในคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม เนื่องจากการเติมขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคต่ำ เมื่อรับแรงกระแทกจึงไม่สามารถถ่ายเทความเค้นจากเมทริกซ์สู่เส้นใยได้ โดยคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 40 ให้ความแข็งแรงกระแทกที่ต่ำกว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ LDPE 10 แต่เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ได้ไม่แตกต่างกันซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับสารช่วยผสม คือ สังเกตได้ว่าปริมาณขี้เลื่อยที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมให้ค่าสูงกว่า แต่เมื่อปริมาณขี้เลื่อยเพิ่มเป็น 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตทั้ง 2 ตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการให้แรงกระแทกนั้นเป็นการให้แรงอย่างทันทีทันใดตรงบริเวณรอยบาก ดังนั้นเมื่อชิ้นงานมีรอยตำหนิไม่สามารถส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าจะมีสารช่วยผสม แต่ปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นอาจมีการรวมตัวของขี้เลื่อยเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ผลจากการใช้สารช่วยผสมไม่เด่นชัด ดังนั้นจึงเกิดบริเวณที่ไม่ติดต่อกับเมทริกซ์และเกิดเป็นรอยตำหนิในชิ้นงาน ความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตเพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสมและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างทั้งสองวัสดุ โดยได้พิจารณาในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PVC 100 : LDPE 10 ปริมาณสารช่วยผสม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณขี้เลื่อย 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลดังนี้

4.2.3.1 ลักษณะการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะการกระจายตัวของขี้เลื่อยในพอลิเมอร์ผสมพิจารณาได้ตามรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10 (ข)

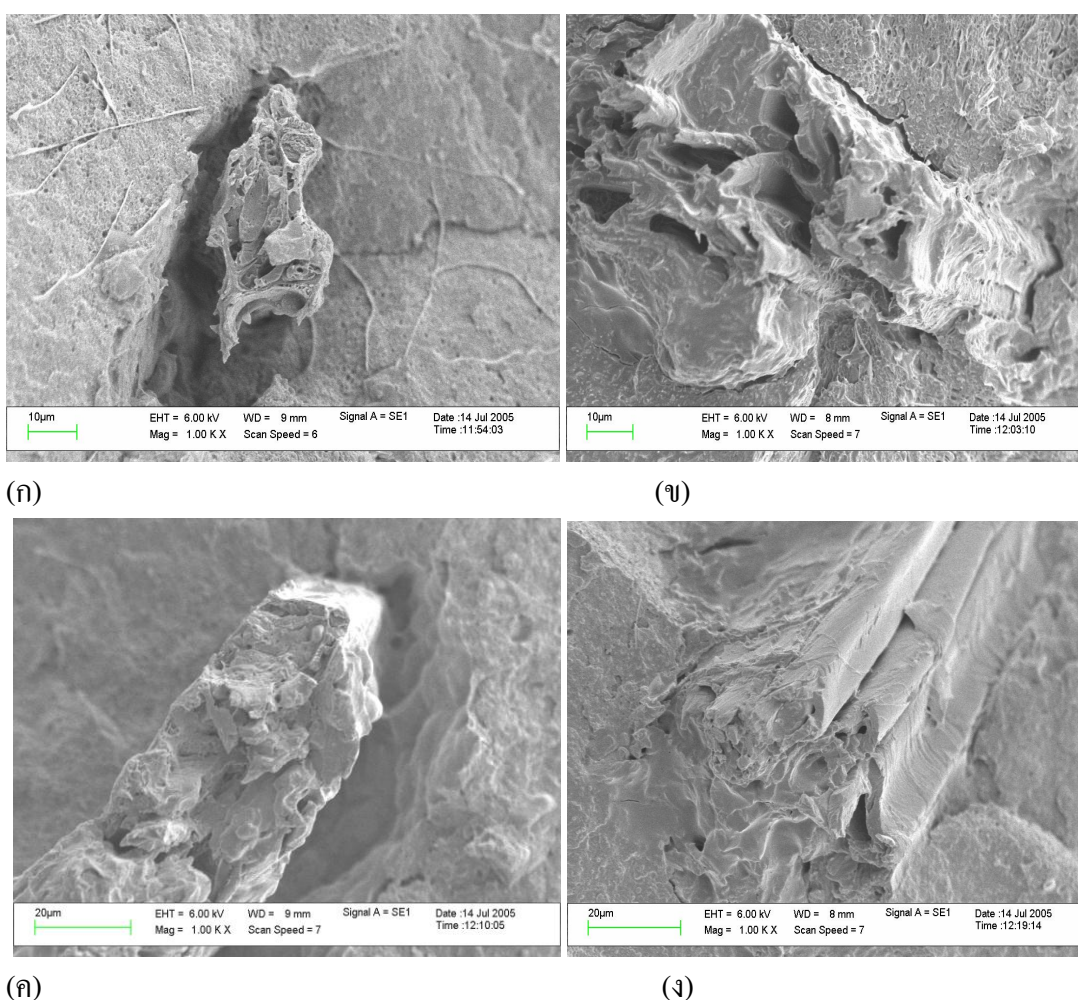
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 และ (ง)

PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50

จากรูปที่ 4.21 พบว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณไม้ 10 เปอร์เซ็นต์ กระจายตัวดีกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณไม้ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อปริมาณไม้มากขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มกันเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในเนื้อไม้ ทำให้ไม้ชอบที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนี้พบว่า เมื่อมีสารช่วยผสมอยู่ในระบบลักษณะการกระจายตัวของผงไม้ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.2.3.2 ลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสม

ศึกษาการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสมโดยพิจารณาได้จากรอยต่อระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิวของคอมโพสิต ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ก) PVC100 : LDPE10 : SD10

(ข) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD10 (ค) PVC100 : LDPE10 : SD50 และ

(ง) PVC100 : LDPE10 : PA 20 15% : SD50

ลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์ผสม จากรูปที่ 4.22 (ก) และ (ค) ซึ่งเป็นคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสม พบว่าช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของซีลี้อยและพอลิเมอร์มีขนาดกว้างกว่าช่องว่างในคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) และ (ง) ซึ่งเป็นไปได้ว่า PA 20 อาจยึดเกาะกับซีลี้อยโดยใช้สมบัติความมีขี้ เป็นผลให้สามารถยึดเกาะกับ PVC ซึ่งเป็นวัฏภาคหลักในพอลิเมอร์ผสมได้ดีขึ้น

4.2.4 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไมยางพารา

อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของ PVC ในคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 นอกจากนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวเมื่อปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

รายการ	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)
PVC100 : LDPE10	291.3
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 %	289.9
PVC100 : LDPE10 : SD10	243.7
PVC100 : LDPE10 : SD 50	234.9
PVC100 : LDPE10 : SD10 : PA 20 15 %	254.0
PVC100 : LDPE10 : SD50 : PA 20 15 %	238.3

จากตารางที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของ PVC ลดลงเนื่องจากความไม่เข้ากันของไม้ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ส่วน PVC และ LDPE มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [37,38] พบว่าปริมาณไม้ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC คือ พันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเนื้อไม้มีความสามารถทำให้อะตอมของ Cl หลุดออกจาก PVC เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีความเป็นบวกมากและสามารถดึงดูดคู่อิเล็กตรอนโคเวเลนต์จากอะตอมของโมเลกุลอื่นที่อยู่ข้างเคียงซึ่งในกรณีนี้ คือ Cl แรงที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน ดังนั้นเมื่อในระบบมีความร้อน PVC เกิดการเสียสภาพจึงทำให้ Cl หลุดไปสร้างพันธะกับไฮโดรเจนอะตอมได้ แต่เมื่อใช้สารช่วยผสม พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะการทำงานของสารช่วยผสม คือ ส่วนที่มีขี้ใน PA 20 จะยึดเหนี่ยวกับส่วนที่มีขี้ใน PVC คือ C-Cl ดังนั้น Cl จึงมีโอกาสเกิดพันธะกับไฮโดรเจนได้น้อยลงเป็นผลให้ T_d มีค่าสูงขึ้น

4.2.5 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและซีลี้อยจากไม้ยางพารา

การศึกษาใช้อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 โดยใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมชนิด PA 20 ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณซีลี้อยที่ศึกษา คือ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ทำได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในการทดสอบจะศึกษาช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.2.5.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ LDPE

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
PVC100 : LDPE10	111.1
PVC100 : LDPE10 : SD10	110.4
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10	110.7
PVC 100 : LDPE10 : SD50	110.4
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50	109.7

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อผสมซีลี้อยปริมาณ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE ที่ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมไม่ทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงมากนัก

4.2.5.2 อุณหภูมิการตกผลึกของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการตกผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีเป็นผลึกใช้เทคนิคเดียวกับการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกของ LDPE

ตัวอย่าง	$T_c (^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ΔH_n (J/g)	% Crystallinity
PVC100 : LDPE10	98.1	3.22	35.42	12.06
PVC100 : LDPE10 : SD10	97.1	4.12	50.37	17.15
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD10	96.3	3.93	48.64	15.57
PVC100 : LDPE10 : SD50	95.4	2.42	53.19	18.12
PVC100 : LDPE10 : PA 20 15 : SD50	95.3	2.28	50.55	17.22

อุณหภูมิการเกิดผลึกเป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของพอลิเมอร์ โดยจากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า การเติมซีลี้อยลงไปในพอลิเมอร์ผสมในแต่ละอัตราส่วนที่นำมาศึกษาไม่ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีซีลี้อยู่ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นสามารถเกิดผลึกเล็ก ๆ ขึ้นแบบตั้งฉาก (Transcrystallization) [39] ที่บริเวณพื้นผิวของซีลี้อยได้ คือ ซีลี้อยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกโดยเมื่อปริมาณซีลี้อยมากขึ้นทำให้องศาความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสมมีผลทำให้เอนทัลปีและเอนทาลปีความเป็นผลึกมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปได้ว่าสารช่วยผสมอาจเกิดการยึดเหนี่ยวกับซีลี้อยโดยใช้สมบัติความมีขั้วทำให้ซีลี้อยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ลดลงหรืออาจเกิดจากสารช่วยผสมทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่าง PVC และ LDPE ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของ LDPE เป็นไปได้ยากขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกจึงลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC และ LDPE โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นสารเสริมแรง ศึกษาวิธีการผสมระหว่างการใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียวและการเพิ่มขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง การใช้สารช่วยผสม ได้แก่ คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE) พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเมทิลเมทาไครเลต และ บิวทิลอะครีเลต (PA 20) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและเมทิลอะครีเลต (Elvaloy®) ในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ซึ่งสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC 100 phr และ LDPE 10 20 30 40 และ 50 phr พบว่าการผสม 2 ขั้นตอน คือ ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้งให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวเพียงขั้นตอนเดียว และจากการตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ด้วยเทคนิค ^{13}C -NMR พบว่า PVC ไม่เกิดการตอกรัดกับ LDPE ภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมสำหรับในงานวิจัยนี้

2. การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสม 3 ชนิด คือ CPE PA 20 และ Elvaloy® ปริมาณที่ศึกษา 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งพบว่าสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิดทำให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม คือ เมื่อใช้สารช่วยผสมทำให้ขนาดของ LDPE เล็กลงและสามารถกระจายตัวใน PVC ซึ่งเป็นเมทริกซ์ได้ดีขึ้นโดยชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมในการนำพอลิเมอร์ผสมไปทำวัสดุคอมโพสิต คือ PA 20 ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก LDPE เนื่องจากให้สมบัติโดยรวมสูงกว่า โดยเฉพาะความแข็งแรงกระแทกสูงซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นในการนำไปทำเป็นวัสดุคอมโพสิต ต่อไป

3. การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ในพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตโดยเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริกพบว่าที่อัตราส่วนของ PVC100 : LDPE10 อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสม แต่เมื่อมีสารช่วยผสมหรือขี้เลื่อยทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวมีค่าต่ำลง

4. การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการตกผลึกและองศาความเป็นผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ระหว่างการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวนอนเดี่ยวเพียงอย่างเดียวและเพิ่มขึ้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง พบว่าสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและเมื่อใช้สารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมสมบัติที่ได้มีผลใกล้เคียงกับเมื่อยังไม่ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสม

5. การศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมและขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา โดยใช้อัตราส่วน PVC100 : LDPE 10 และ 40 phr สารช่วยผสมชนิด PA 20 15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ LDPE และปริมาณขี้เลื่อยที่ศึกษา คือ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณไม้มากขึ้น โมดูลัสสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงดิ่งรอยและการดิ่งยึด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง โดยพบว่าคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE10 ให้สมบัติที่ดีกว่าคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE40 และคอมโพสิตที่มีสารช่วยผสมให้สมบัติโดยรวมสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีสารช่วยผสมเล็กน้อย

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการผสมมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสามารถปรับปรุงได้โดยใช้สารช่วยผสมเพื่อให้มีความสามารถเข้ากันได้ดีขึ้นซึ่งเป็นการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมทำเป็นวัสดุคอมโพสิตพบว่าสารช่วยผสมมีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตเพียงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสมและขี้เลื่อยไม้ยางพาราซึ่งคาดว่าหากมีการปรับปรุง เช่น ใช้สารคู่ควบจะทำให้สมบัติของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้งานเป็นวัสดุคอมโพสิต
2. เพื่อศึกษาคุณภาพของชิ้นงานคอมโพสิตควรทดสอบในด้านการใช้งานจริง เช่น ทดสอบการทนต่อแสง UV การเปลี่ยนสีของชิ้นงานและการทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fang Z., Ma G., Shentu B., Ca B. and Xu C. “Influence of Viscosity Ratio on Morphology of PVC/PE Blend” **Journal of European Polymer**, vol. 36, 2000. pp. 2309-2311.
- [2] Sombatsompop N., Sungsanit K. and Thongpin C. “Analysis of Low-Density Polyethylene-g-Poly(vinyl chloride) Copolymers Formed in Poly(vinyl chloride)/Low-Density Polyethylene MeltBlends with Gel Permeation Chromatography and Solid-State ¹³C-NMR” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 92, 2004. pp. 3167-3172.
- [3] Fang Z., Ma G., Liu C. and Xu C. “Morphology Evolution of Immiscible LDPE/PVC Blends in the Presence of Compatibilizer and Phase Dispersant” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 91, 2004. pp. 763-772.
- [4] Xu C., Fang Z. and Zhong J. “ Study on phase dispersion-crosslinking synergism in binary blends of poly(vinyl chloride) with low density polyethylene” **Journal of Polymer**, vol. 38, no. 1, 1997. pp. 155-158.
- [5] Sombatsompop N., Sungsanit K. and Thongpin C. “Structural Changes of PVC in PVC/LDPE Melt-Blends: Effects of LDPE Content and Number of Extrusion” **Polymer Engineering and Science**, vol. 44, 2004. pp. 487-495.
- [6] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เอกสารประกอบการสอน วิชา สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [7] Paul D.R. and Bucknall C.B. **Polymer Blends** Vol 1. New York : John Wiley & Son. 2000.
- [8] Work W.J. “Defination of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials” **Pure Applied Chemical**, vol. 76, 2004. pp. 1985-2007.
- [9] Jacqueline I. and Kroschwitz. **High performance Polymers and Composite**. New York. 1995.
- [10] Paul D.R. and Bucknall C.B. **Polymer Blends** Vol 2. New York : John Wiley & Son. 2000.
- [11] Dupont company. “**DuPont Polymer Modifiers.**” [Online]. Available : <http://www.DuPont> Polymer Modifiers - Compatibilizing polymer blends.htm.1995

- [12] อธิพิณ แจ่มชัด. **เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต**. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [13] M. M. Schwartz . **Composite Materials**. Vol 1. New Jersey : Prentice Hall PTR. 1996.
- [14] กรมป่าไม้. “หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้.” [Online]. Available : <http://www.หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้.htm>. 2004.
- [15] Fung J., Li B., Sun S. and Zeng C. “**Hardwood vs Softwood – Chemistry Aspect.**” [Online]. Available : <http://www.alumni.ca/~libe4b0/chemistry.html>. 2004.
- [16] ESB, Porto, Portugal. “**Hemicellulos.**”[Online]. Available : www.Hemicellulose.htm. 1996.
- [17] Lignin Chemistry. “**The structure of softwood lignin.**” [Online]. Available : <http://www.The structure of softwood lignin.htm>. 2005.
- [18] สุรัช มัจฉาชีพ. **พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร : แพรวพิทยา. 2535.
- [19] วิจิต สุวรรณปรีชา. ยางพารา. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2541.
- [20] Ma G., Fang Z. and Xu C. “Phase Dispersion-Crosslinking Synergism in Binary Blend of Poly(vinyl chloride) with Low-Density Polyethylene: Entrapping Phenomenon in PVC/LDPE/DCP Blend” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 88, 2003. pp. 1296-1303.
- [21] Norma E. M. and Marcelo A. V. “Thermal and Mechanical Characterization of Linear Low Density Polyethylene/Wood Flour Composites” **Journal of Applied Polymer Science**, vol.90, 2003. pp. 2775-2784.
- [22] Rozman H.D., Kon B. K., Abusamah A., Kumar R. N. and Mohd. Ishak Z. A. “Rubberwood – High-Density Polyethylene Composite: Effect of Filler Size and Coupling Agents on Mechanical Properties” **Journal of Applied Polymer Science**, vol 69, 1998. pp. 1993-2004.
- [23] Liao B., Huang Y. and Cong G. “Influence of Modified Wood Fibers on the Mechanical Properties of Wood Fiber-Reinforced Polyethylene” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 66, 1997. pp. 1561-1568.
- [24] Zhang F., Qiu W., Yang L., Endo T. and Hirotsu T. “Crystallization and Melting

Behaviors of Maleated Polyethylene and Its Composite with Fibrous Cellulose”

Journal of Applied Polymer Science, vol.89, 2003. pp. 3292-3300.

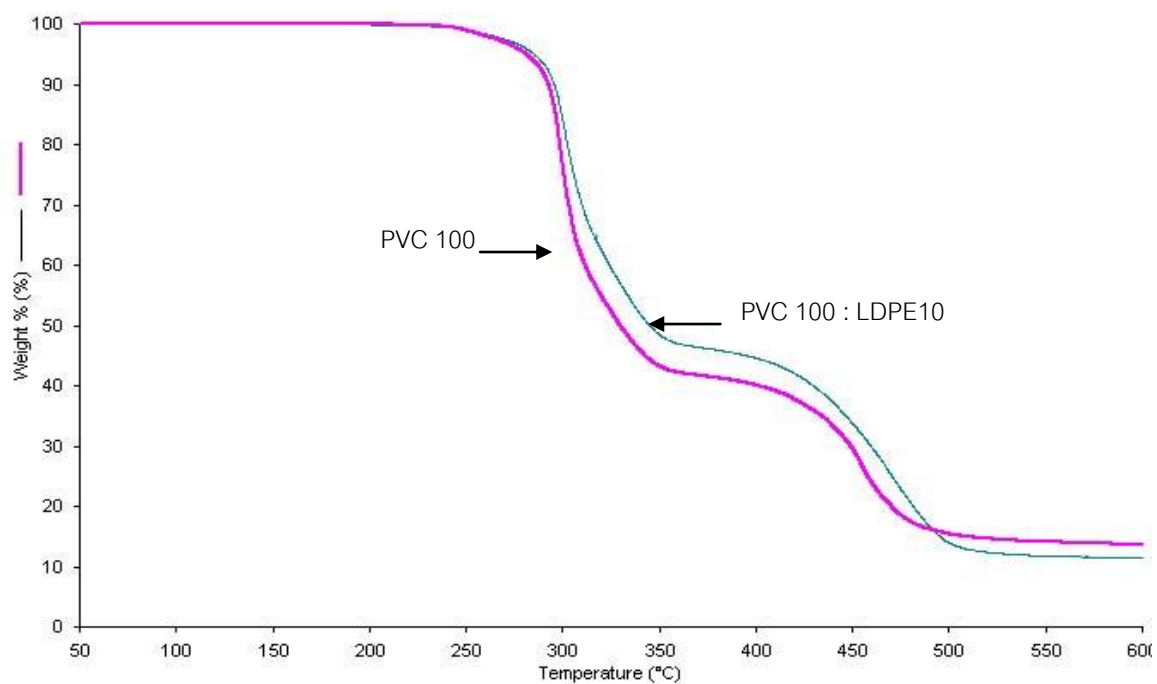
- [25] Canche'-Escamilla G., Cauich-Cupul J.I., Mendiza'bal E., Puig J.E., Va'zquez-Torres H. and Herrera-Franco P.J. “Mechanical properties of acrylate-grafted henequen cellulose fiber and their application in composites” **Composite Part A**, vol. 30, 1999. pp. 349-359.
- [26] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K. “Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of Poly(vinyl chloride)/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 96, 2005 pp. 213-221.
- [27] ASTM D 638, “Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)” **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia. 1993.
- [28] ASTM D 790, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic and Electrical Insulating Materials” **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia. 1993.
- [29] ASTM D 256, “Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrical Insulating Materials” **American Society for Testing and Materials**. Philadelphia 1993.
- [30] Kroschwitz J.I. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering** vol. 6. 2nd ed. New York : John Wiley& Sons. 1990.
- [31] Specialchem S.A. “**Tin Stabilizers Center-Thermal oxidative degradation of PVC.**”
[Online]. Available : <http://www.specialchem4polymers.com/home/forgot/index.aspx>. 2505.
- [32] Galen W.E. **Instrumental Methods of Chemical Analysis**. United states of America 1985. pp. 95-98.
- [33] Skoog D.A., Holler F.J. and Nieman T.A. **Principles of Instrumental Analysis**. United states of America 1998. pp. 410-411.
- [34] Mengelloglu F., Matuana L.M. and King J.A. **Journal of Vinyl Additive Technology**, vol.6, 2000. pp. 153.
- [35] Sombatsompop N. and Phromchirasuk C. “Effects of Acrylic Based Processing Aids on Processability, Rheology, Thermal and Structural Stability, and Mechanical Properties of PVC/Wood Sawdust Composites” **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 92, 2004.

pp. 782-790.

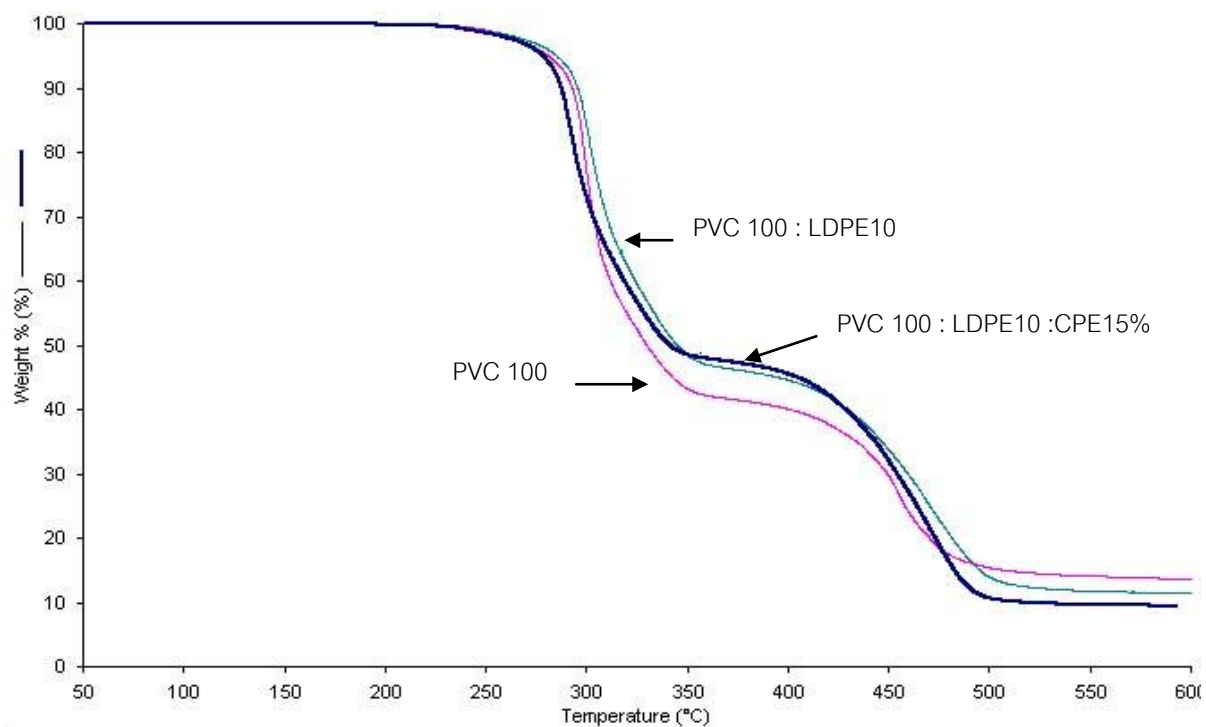
- [36] Thongpin C., Santavitee O. and Sombatsompop N. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, (submitted).
- [37] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K. “Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites” **Polymer International**, vol. 53, 2004, pp. 1210-1218.
- [38] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K., Phromchirasuk C. and Thongsang S. “Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites” **Polymer International**, vol. 52, 2003, pp.1847-1855.
- [39] Schultz J.M. “Polymer Crystallization : The Development of Crystalline Order in Thermoplastic Polymers” **American Chemistry Society**. Washington D.C. 2001. pp. 57-92.

ภาคผนวก

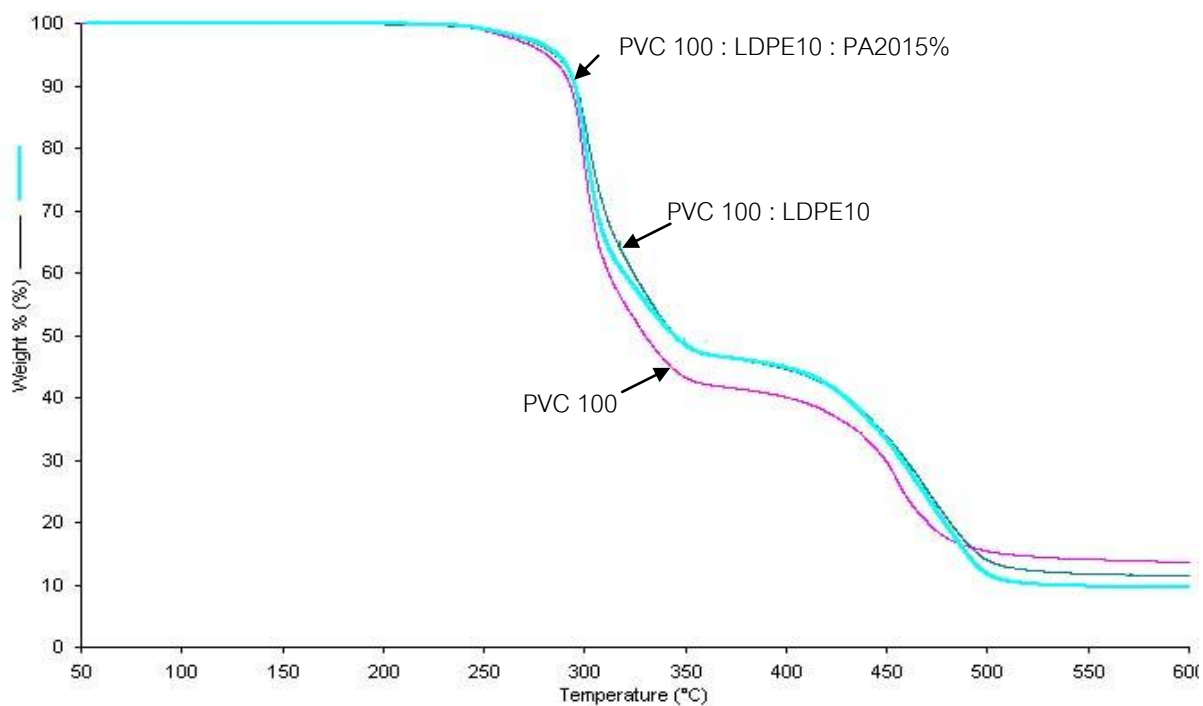
ภาคผนวก ก



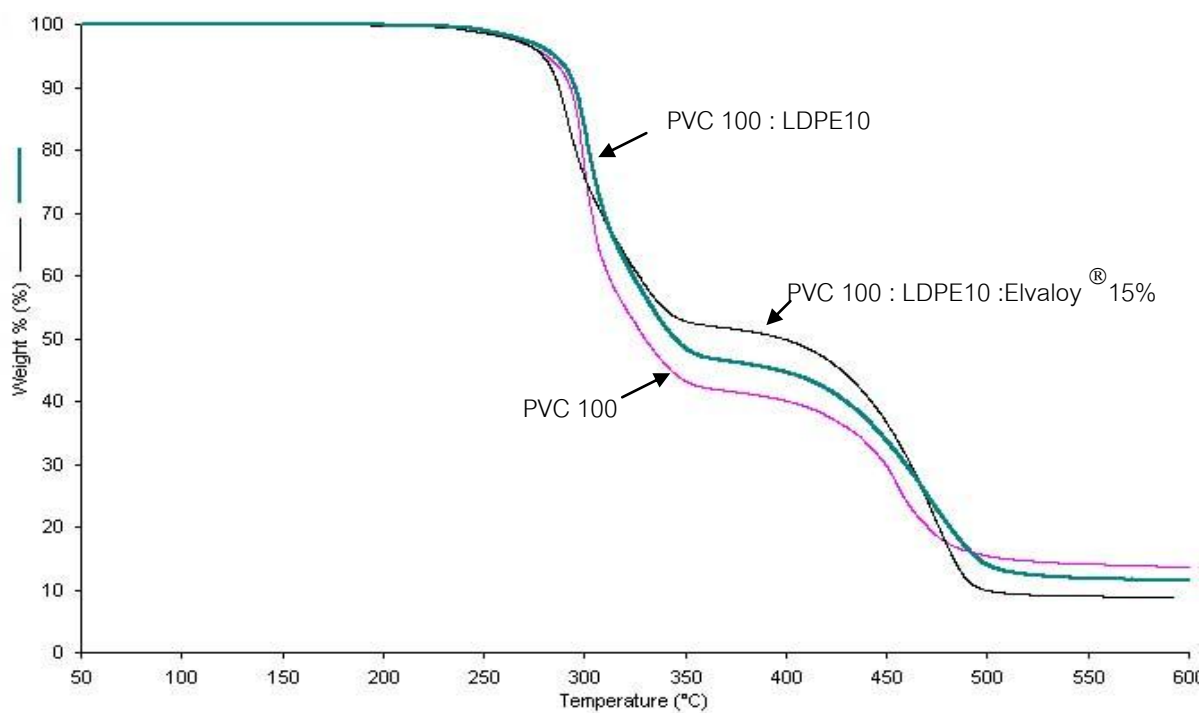
รูป ก.1 เทอร์โมแกรมของ PVC และ พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน PVC100 : LDPE 10



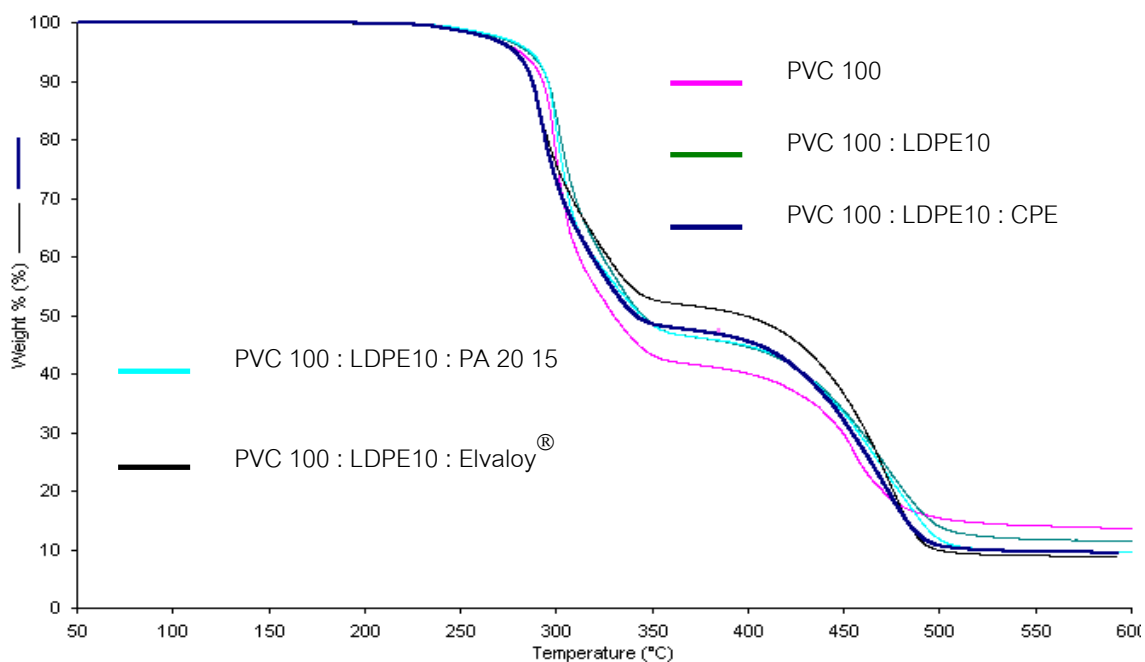
รูป ก.2 เทอร์โมแกรมของ PVC พอลิเมอร์ผสม PVC100:LDPE 10 และ PVC100:LDPE10:CPE



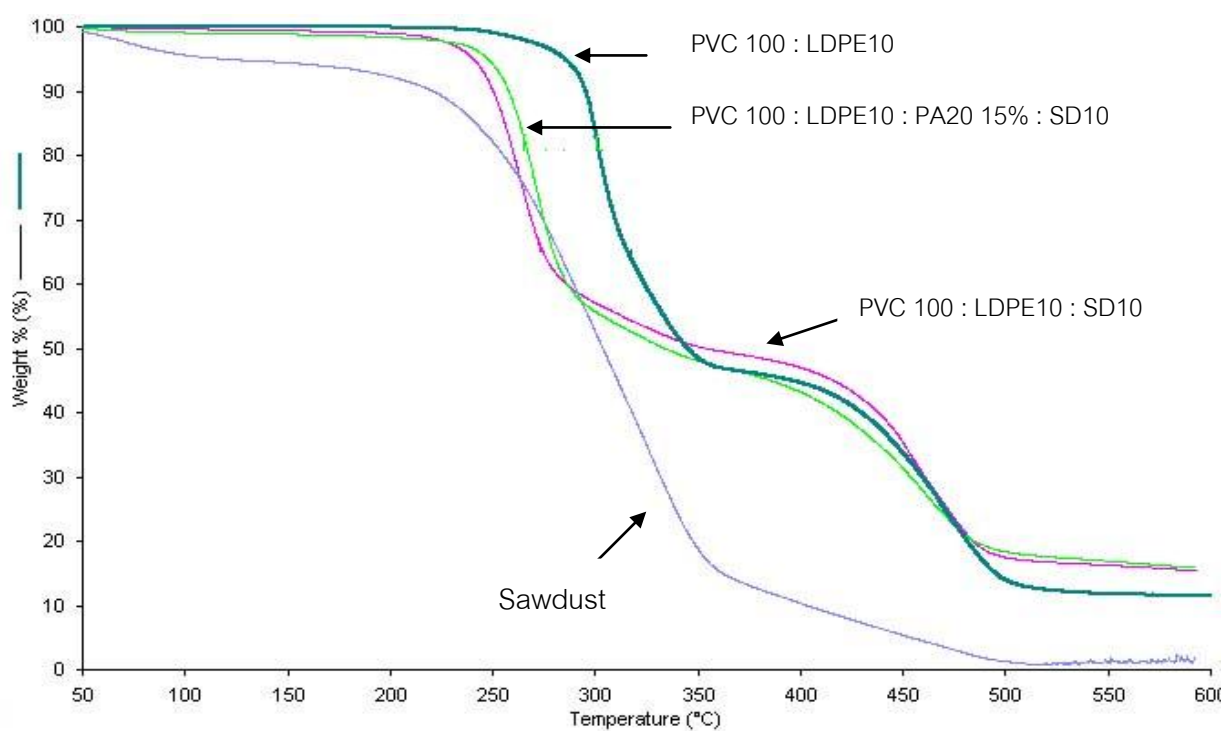
รูป ก.3 เทอร์โมแกรมของ PVC พอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และ PVC100 :LDPE10:PA 20



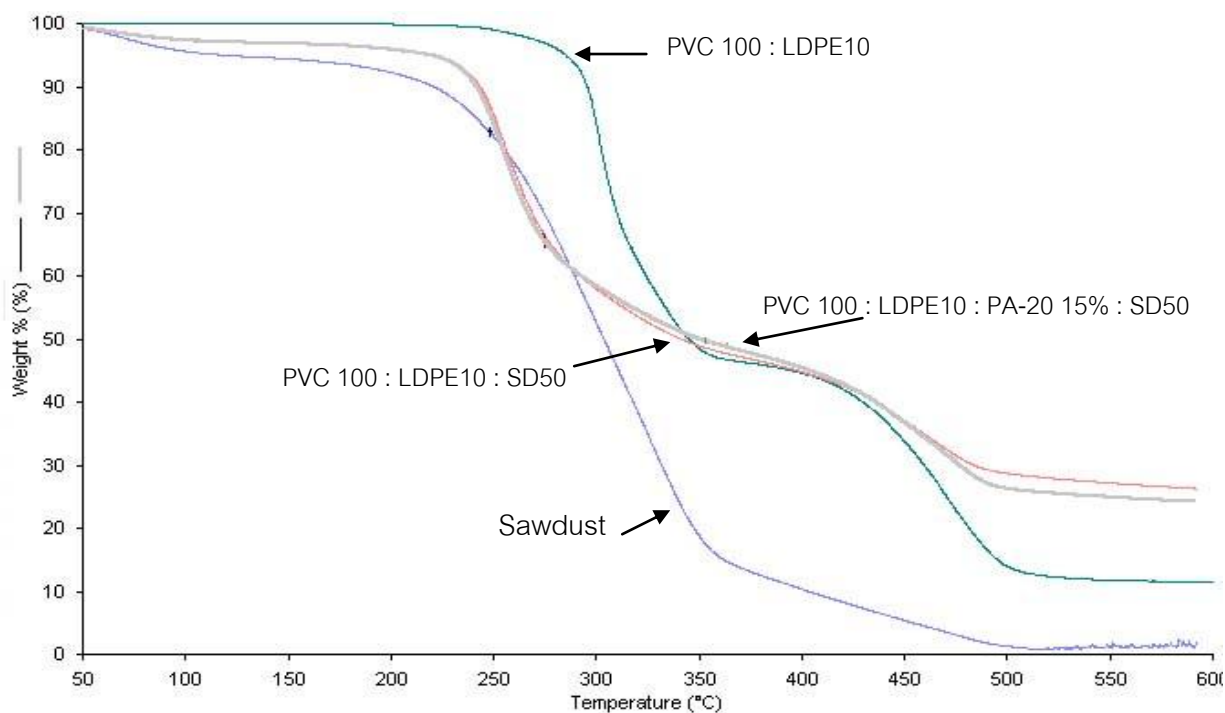
รูป ก.4 เทอร์โมแกรมของ PVC พอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 และ PVC100 : LDPE10 :
Elvaloy®



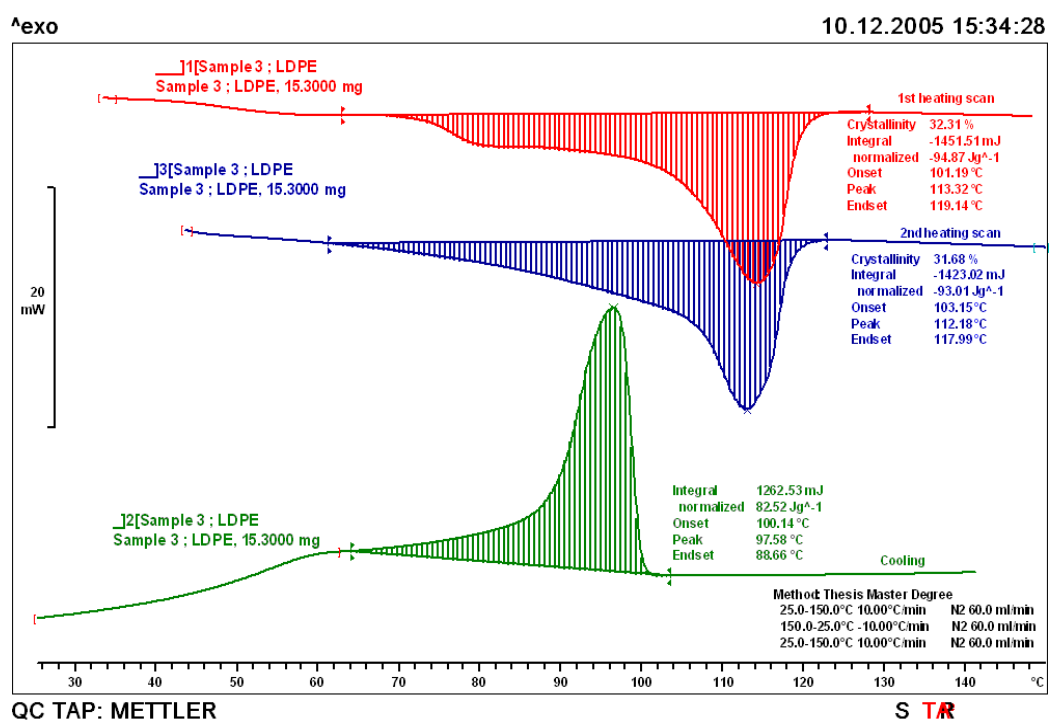
รูป ก.5 เทอร์โมแกรมของ PVC และพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 ที่ใช้สารช่วยผสมชนิดต่างๆ



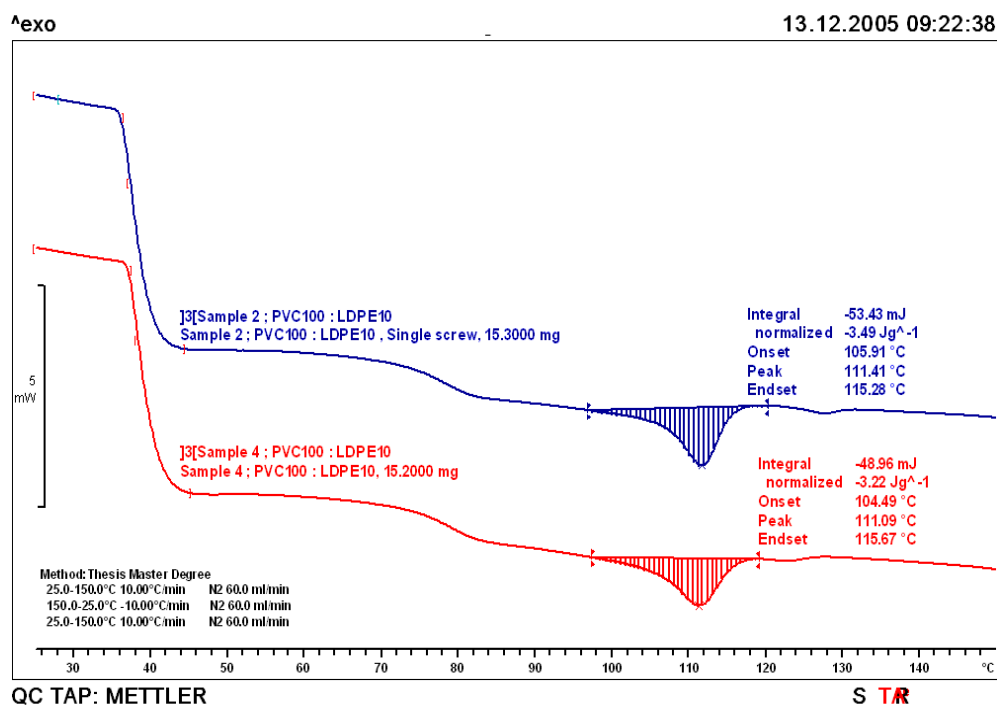
รูป ก.6 เทอร์โมแกรมของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA20 โดยใช้ปริมาณนี้เฉลี่ย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม



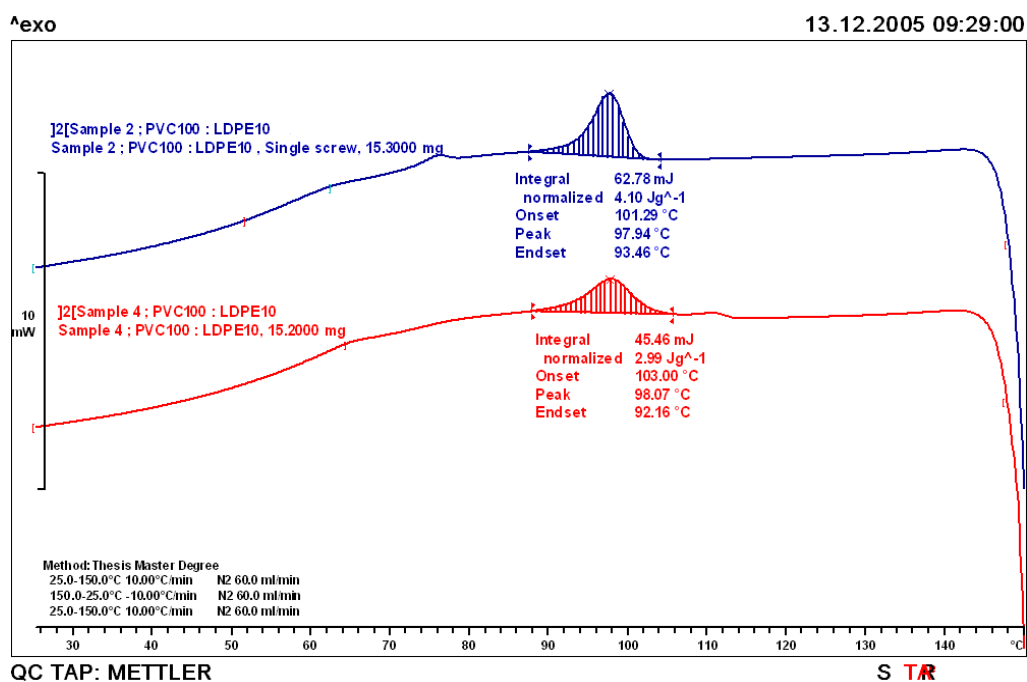
รูป ก.7 เทอร์โมแกรมของคอมโพสิตของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารช่วยผสมชนิด PA 20 โดยใช้ปริมาณขี้เลื่อย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม



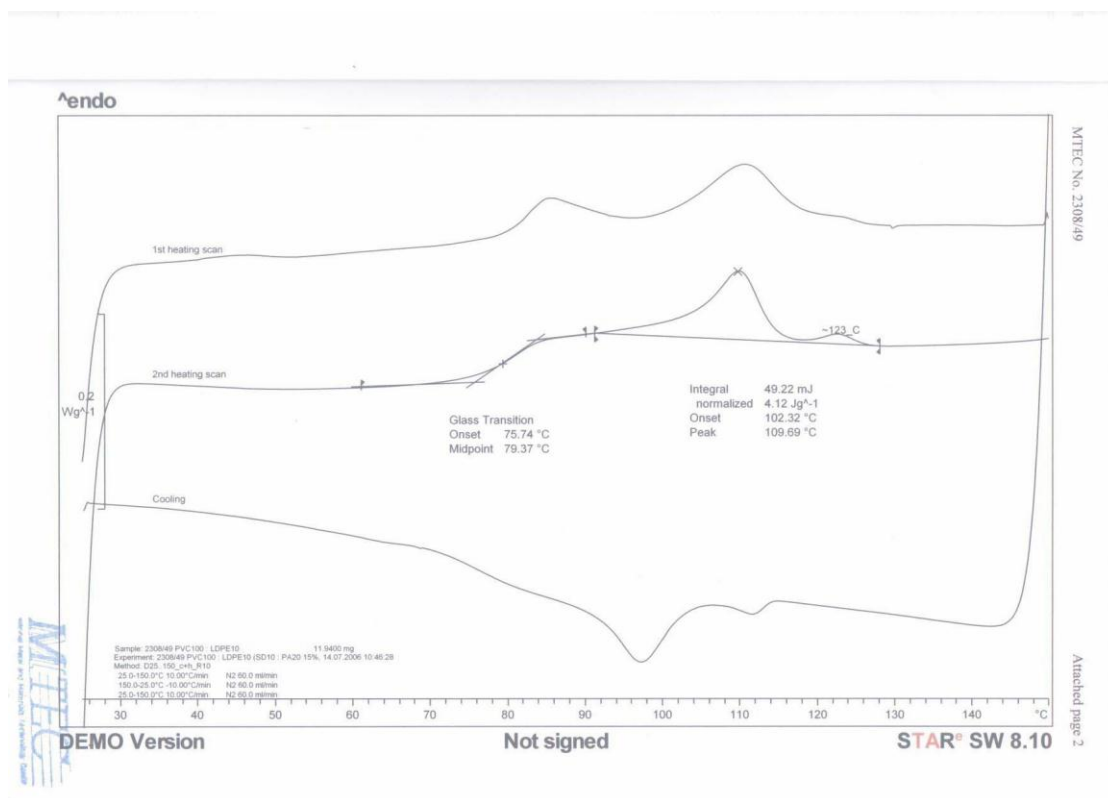
รูป ก.8 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก LDPE



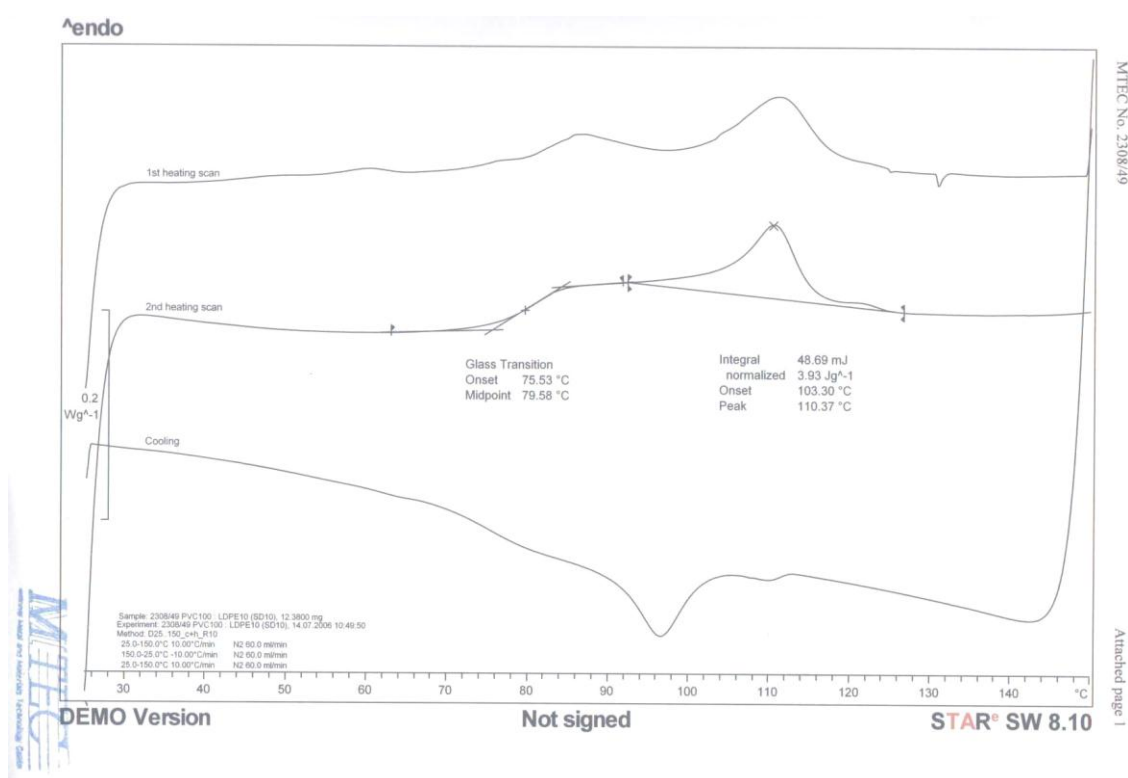
รูป ก.9 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 คือ พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและ คือ พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง



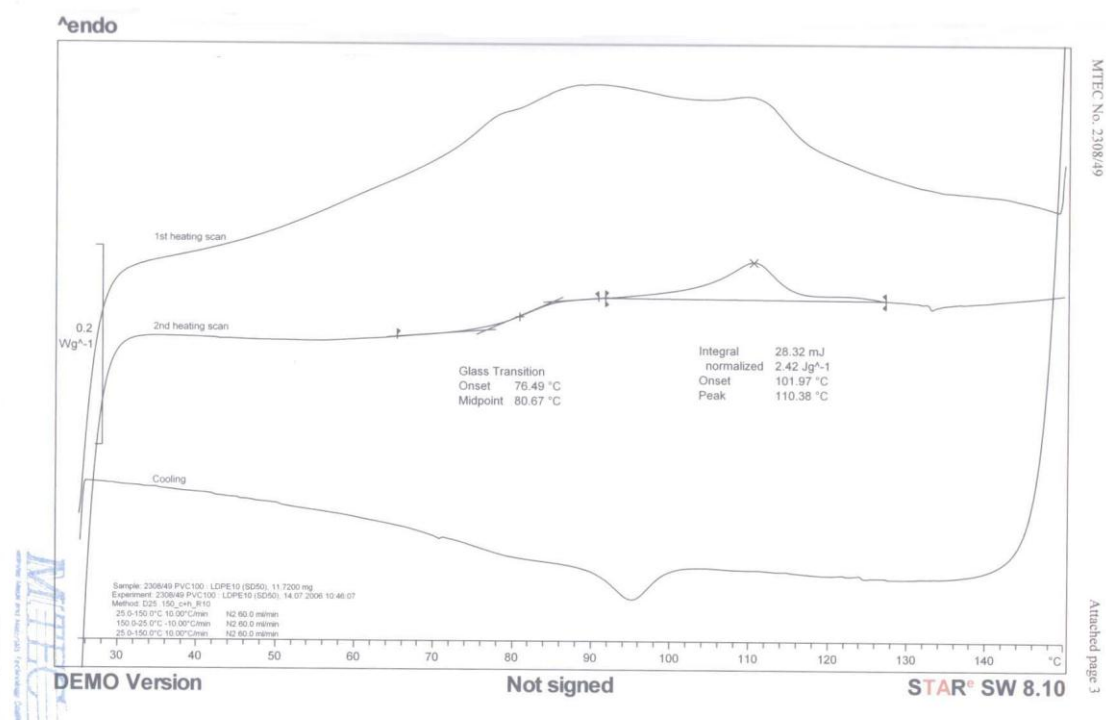
รูป ก.10 อุณหภูมิการเกิดผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม PVC100 :LDPE10 คือ พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและ คือ พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องผสมชนิด 2 ลูกกลิ้ง



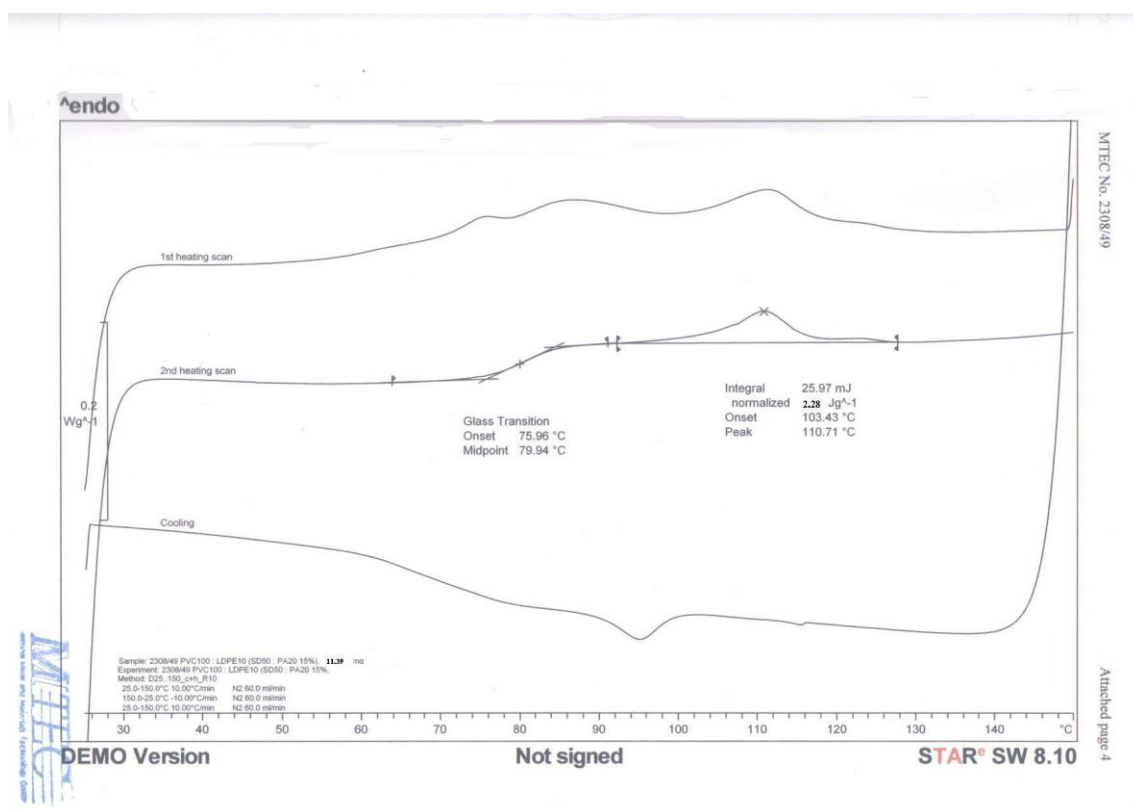
รูป ก.11 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 : SD10



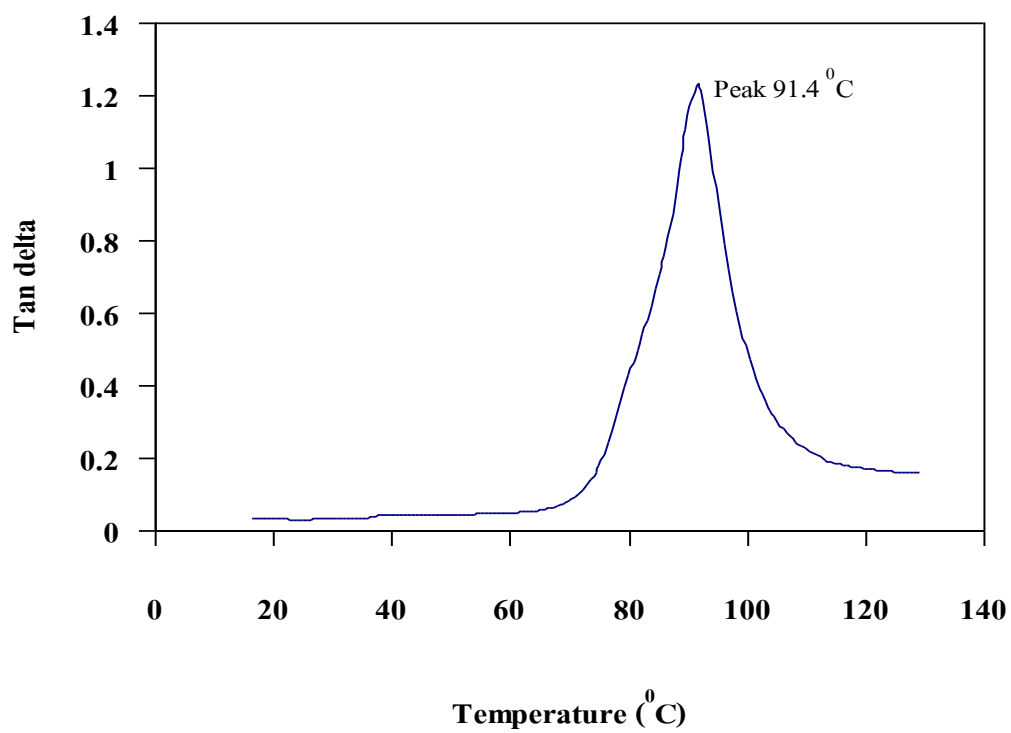
รูป ก.12 อุณหภูมิการเกิดผลึกของ LDPE ในคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 : SD10 : PA 20



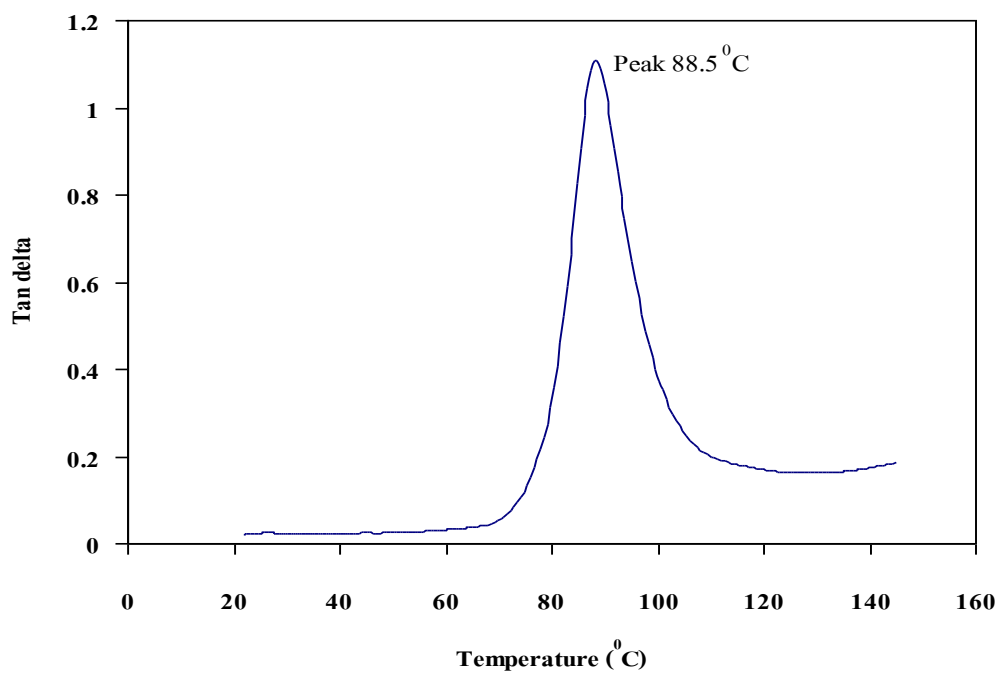
รูป ก.13 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 : SD50



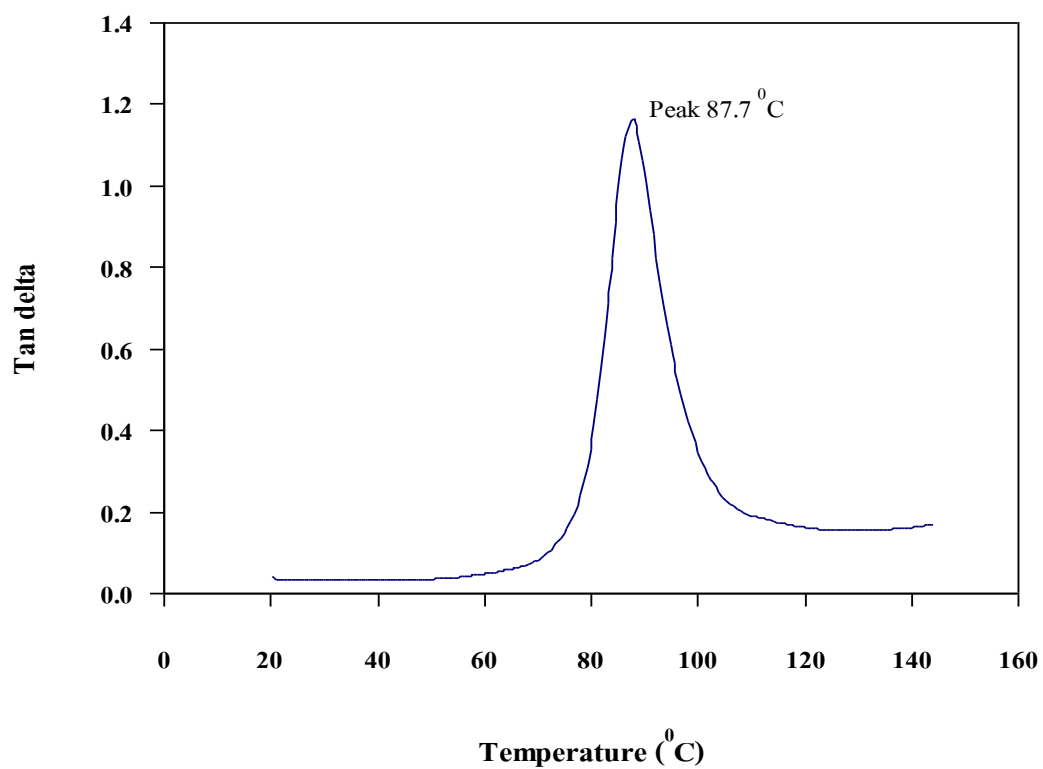
รูป ก.14 อุณหภูมิการเกิดผลึกของ LDPE ในคอมโพสิต คือ PVC100 : LDPE10 : SD50 : PA 20



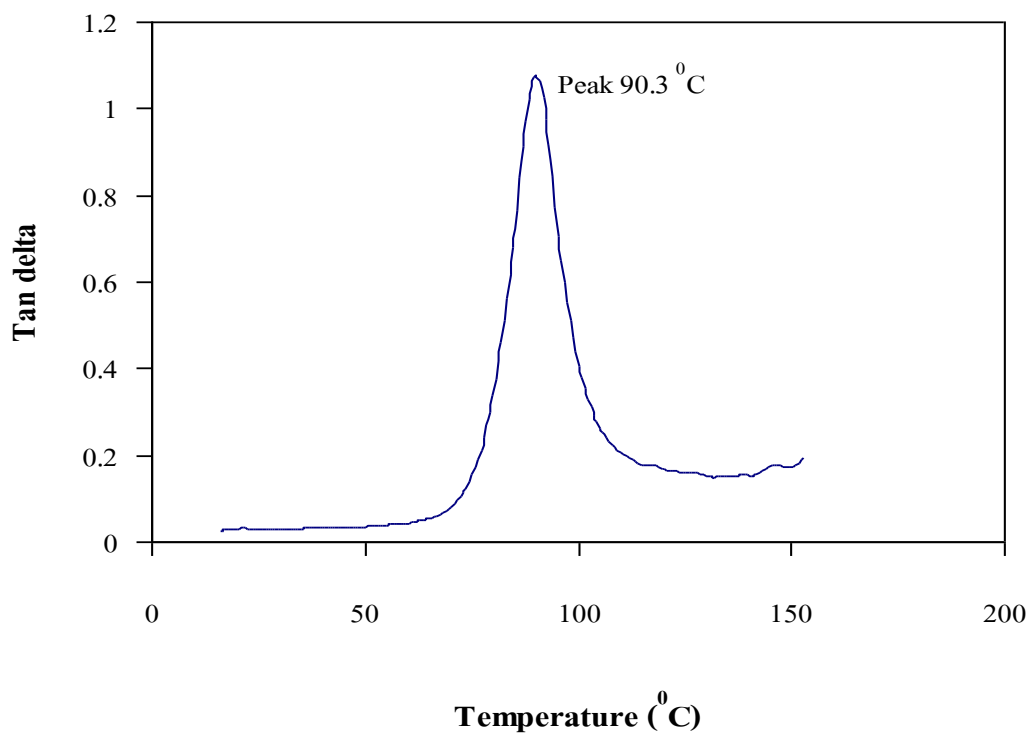
รูป ก.15 ค่า T_g ของ PVC 100 %



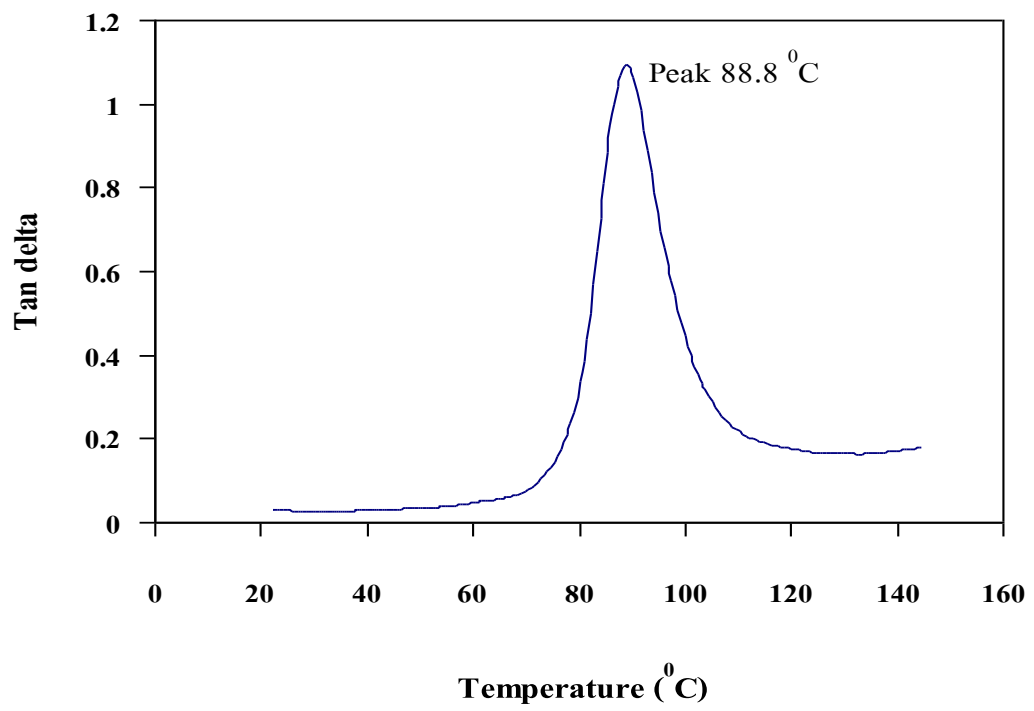
รูป ก.16 ค่า T_g ของ PVC ใน PVC 100 : LDPE 10



รูป ก.17 ค่า T_g ของ PVC ใน PVC 100 :LDPE 10 :CPE 15%



รูป ก.18 ค่า T_g ของ PVC ใน PVC 100 :LDPE 10 :PA 20 15%



รูป ก.19 ค่า T_g ของ PVC ใน PVC 100 :LDPE 10 :Elvaloy[®] 15%

ภาคผนวก ข

แสดงการคำนวณองศาการเกิดผลึก (% crystallinity) ของ LDPE

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเกิดผลึก เอนทัลปีและองศาความเป็นผลึกของ LDPE

ตัวอย่าง	T _c (°C)	ΔH _f (J/g) (จากเครื่อง)	ΔH _n (J/g) (normalized)	% Crystallinity
LDPE 100 %	97.6	93.01	93.01	31.68
PVC 100 : LDPE10 (Single screw)	97.9	3.49	38.39	13.08
PVC 100 : LDPE10 (Single screw + Two roll mill)	98.1	3.22	35.42	12.06
PVC 100 : LDPE10 : CPE 15 %	97.7	3.89	43.37	14.77
PVC 100 : LDPE10 : PA 20 15 %	98.1	3.37	37.57	12.79
PVC 100 : LDPE10 : Elvaloy [®] 15 %	97.3	3.79	42.25	14.39

องศาการเกิดผลึก สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{\Delta H_f \times 100}{100 - \% \text{ โดยน้ำหนักของ PVC}}$$

$$\text{Degree of crystallinity} = \frac{\Delta H_{\text{normalised}} \times 100}{\Delta H_{f0}}$$

ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม PVC100 : LDPE10 พบว่าในพอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักรวม 100(PVC) + 10(LDPE) เท่ากับ 110 กรัม ดังนั้นมี PVC 90.91 %

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{3.22 \times 100}{100 - 90.91} = 35.42$$

$$\text{Degree of crystallinity} = \frac{35.42 \times 100}{293.6} = 12.06$$

ประวัติผู้เขียน

นางสาว จีราภรณ์ คำศรี เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน 2519 ที่จังหวัดอยุธยา สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2542 จากนั้นทำงานที่บริษัท สยามพลาสติก จำกัด จนถึงปัจจุบัน และศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในปีการศึกษา 2546 ที่คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

