



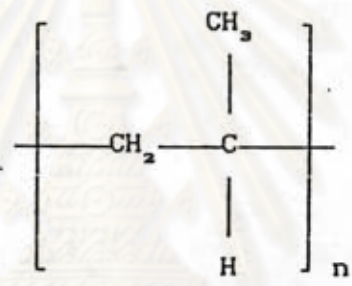
วารสารปริทัศน์

เนื่องจากปัจจุบัน ความต้องการใช้งานพลาสติกมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติของพลาสติก และพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด ตลอดจนค้นหาวิธีการลดต้นทุนการผลิตไปพร้อมกันด้วย ปัจจุบันจึงมีพลาสติกชนิดพิเศษต่าง ๆ สำหรับเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงานเป็นจำนวนมาก เช่น โพลีซัลโฟน (polysulfone) ซึ่งทนความร้อนระดับน้ำเดือดได้ (3) เส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดแข็งแรงเป็นพิเศษ (superstrong polyethylene fibre) ซึ่งแข็งแรงกว่าโลหะ 10 เท่า (3) โพลีอะคริลเอมิด (polyacrylamide) และ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol) สามารถรับความชื้นได้ถึง 1,000 เท่าของน้ำหนักตัว เพื่อใช้ในทางเกษตรกรรม (4) เป็นต้น

การพัฒนาพลาสติกในปัจจุบัน นอกจากปรับปรุงโครงสร้างของพลาสติกแต่ละชนิด เพื่อเพิ่มสมบัติตามต้องการแล้ว ยังพยายามปรับปรุงสมบัติโดยการผสม โพลีเมอร์หลาย ๆ ชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อรวมสมบัติที่ดีของโพลีเมอร์แต่ละชนิด ตลอดจนผสมสารชนิดต่าง ๆ ลงในพลาสติก เช่น ตัวเติม และวัสดุเสริมแรง (reinforcing material) เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มความแข็งแรง เช่น โพลีเอสเตอร์ผสม โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเรต (polybutylene terephthalate) และเสริมด้วยใยแก้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สามารถใช้ทำที่ปิดน้ำฝนแทนโลหะได้โดยไม่เป็นสนิมและมีสารดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต พลาสติกพีวีซีเสริมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ใช้ทำป้ายโฆษณาสามารถทนทานต่อลมพายุและแรงกระแทกกระทึก เมื่อถูกของมีคมจะมีรอยแต่ไม่หักขาดต่อเนื่องโดยแรงลม เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคโพลีเมอร์ สามารถกันกลิ่นและแก๊สในบรรจุภัณฑ์ได้ดี (5) เป็นต้น

2.1 โพลีโพรพิลีน

โพลีโพรพิลีน เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ความถ่วงจำเพาะต่ำ ความแข็งเปราะสูง (brittleness) อุณหภูมิบิดตัวสูง ความทนทานต่อสารเคมีดี มีสมบัติต้านไฟฟ้าดี จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ในครัวเรือน ของเด็กเล่น ตลอดจนชิ้นส่วนรถยนต์ (6) เป็นต้น โพลีโพรพิลีนมีหน่วยย่อยซ้ำ (repeating unit) คือโพรพิลีนโมโนเมอร์ (propylene monomer) มีสูตรทั่วไป คือ



2.1.1 การสังเคราะห์โพลีโพรพิลีน

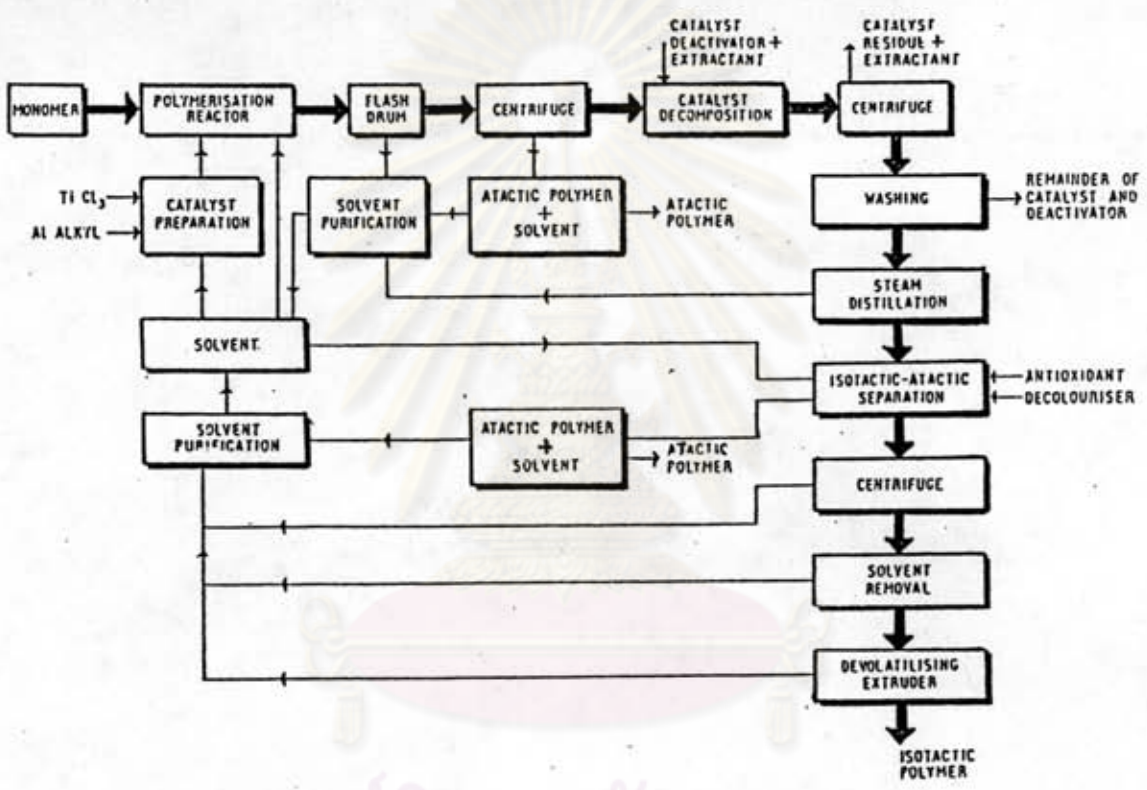
โพลีโพรพิลีน สามารถสังเคราะห์ได้จากโพรพิลีนโมโนเมอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซิกเกิล (ziegler-type catalyst) ซึ่งสมบัติของโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ในการสังเคราะห์โพลิเมอร์นั้น โพรพิลีนโมโนเมอร์จะถูกบรรจุลงในถังสังเคราะห์โพลิเมอร์ (polymerization vessel) ภายใต้อากาศ โดยที่สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารร่วมเกิดปฏิกิริยา (reaction diluent) ซึ่งมักจะเป็นเนพทา จะแยกอยู่อีกส่วนหนึ่ง สำหรับในกระบวนการแบบเต็ยว (batch process) นั้น จะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1-4 ชั่วโมง โดย โพรพิลีนโมโนเมอร์จะปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันได้โพลิเมอร์ ประมาณร้อยละ 80-85 (7)

เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ภายในถังสังเคราะห์โพลิเมอร์ จะประกอบด้วยสารต่าง ๆ ได้แก่ โพลีโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติก (isotactic)

และโพลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบเอแทคติก (atactic) ตัวทำละลาย (solvent) โมโนเมอร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งต้องทำการแยกส่วนผสมต่าง ๆ ออกจากกันโดยผ่านสารทั้งหมดเข้าสู่ถังแยก (flash drum) เพื่อแยกโมโนเมอร์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกไปก่อน และนำกลับไปใช้อีกภายหลังจากการทำให้บริสุทธิ์ สำหรับโพลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบเอแทคติก ซึ่งละลายอยู่ในแนวทาง จะถูกแยกออกจากส่วนผสมโดยการเซนตริฟิวจ์ (centrifugal separation) นำส่วนผสมที่เหลือไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่สามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น เมทานอล ผลสมกรดไฮโดรคลอริกเล็กน้อย ทำการแยกโพลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติกออกอีกครั้งโดยการเซนตริฟิวจ์ ล้างโพลิเมอร์ที่ได้ และทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส นำโพลิเมอร์ที่ได้ไปผสมกับสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน แล้วนำไปทำการรีด (extrude) และตัดเป็นเม็ดต่อไป

การผลิตโพลิโพรพิลีนทางอุตสาหกรรม มีส่วนและเอียงดปลักย่อยอีกมาก รวมทั้งขั้นตอนพิเศษ เพื่อลดปริมาณเอแทคติกโพลิโพรพิลีนให้เหลือน้อยที่สุด แผนผังการผลิตโพลิโพรพิลีนโดยทั่วไป แสดงในรูปที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตโพลิโพรพิลีนทางอุตสาหกรรม

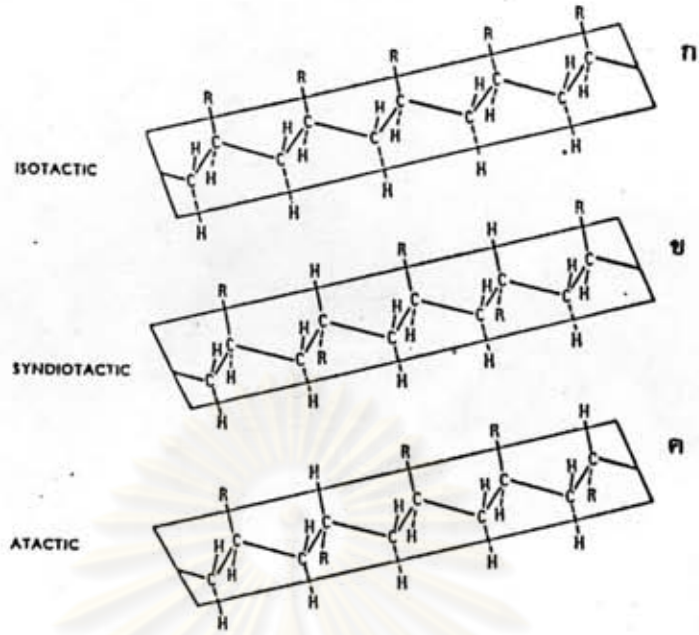
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 โครงสร้างและสมบัติของโพลิโพรลีน

โพลิโพรพิลีนเป็นไฮโดรคาร์บอนโพลิเมอร์ ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง และประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated) น้อยมากหรือไม่มีเลย การสลับที่ของ หมู่เมทิล (methyl group) ไปตามคาร์บอนอะตอมบนสายโซ่โมเลกุลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของโพลิเมอร์แตกต่างกันไปได้มากมาย โดยหมู่เมทิลนี้จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างแทคติซิตี (tacticity) ของโพลิเมอร์ที่ได้ โดยเป็นแบบไอโซแทคติก เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล แบบซินดิโอแทคติก (syndiotactic) เมื่อหมู่เมทิลอยู่สลับกันบนสายโซ่โมเลกุล และเป็นแบบเอแทคติก เมื่อหมู่เมทิลอยู่ไม่เป็นระเบียบแบบแผนบนสายโซ่โมเลกุล (รูปที่ 2.2) โครงสร้างแทคติซิตีนี้จะมีอิทธิพลต่อสมบัติของโพลิเมอร์ ทำให้โพลิโพรพิลีนไม่สามารถเกิดโครงสร้างผลึกในระนาบ แบบโพลิเอทิลีนได้ เนื่องจากหมู่เมทิลเกาะก่อยู่ แต่จะเกิดผลึกในลักษณะเกลียว (hilex) โพลิโพรลีนทางการค้ามักจะประกอบด้วยโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติก ประมาณร้อยละ 90 - 95

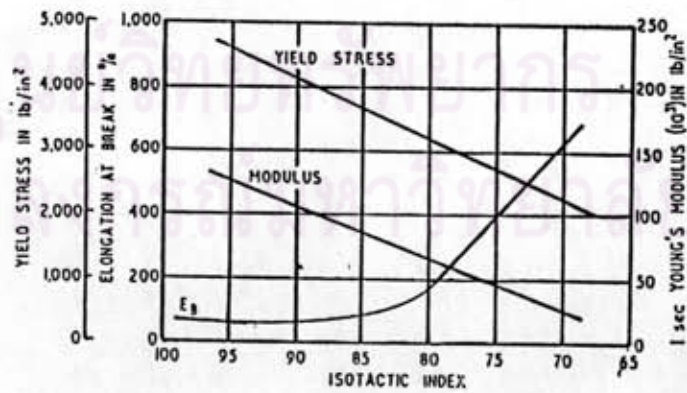
เนื่องจากเอแทคติกโพลิโพรพิลีน มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) จึงมีลักษณะคล้ายยาง ในขณะที่ไอโซแทคติกโพลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกมากกว่า มีจุดหลอมเหลวและสมบัติทางกลสูงกว่า เช่น ความต้านทานแรงดึง โมดูลัส และความแข็งที่ผิว (hardness) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สมบัติและค่าคงที่ทางฟิสิกส์ของโพลิโพรพิลีนแสดงในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1)

โพลิโพรพิลีนเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะมีจุดหลอมเหลวและความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความแข็งตึง (stiffness) อุณหภูมิอ่อนตัว (softening point) และอุณหภูมิเปราะตัว (brittle point) จะลดลง ซึ่งสันนิษฐานว่า เมื่อโพลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะเกิดลักษณะเป็นผลึกได้ยากกว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และปริมาณความเป็นผลึก (degree of crystallisation) มีอิทธิพลต่อสมบัติของโพลิเมอร์ อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของโพลิโพรพิลีน แสดงในตารางที่ 2.1 โดยที่อัตราการไหล (melt flow rate) จะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างแทคติซิตีของโพลิโพรพิลีน

- (ก) โครงสร้างแบบไอโซแทคติค
- (ข) โครงสร้างแบบซินดีโอแทคติค
- (ค) โครงสร้างแบบเอแทคติค



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของโครงสร้างแบบไอโซแทคติคต่อความต้านทานแรงดึงของโพลิโพรพิลีน

2.1.3 สมบัติของ ไอโซแทกติกโพลิโพรพิลีน

สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อน ของโพลิโพรพิลีนนอกจากขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่เป็นแบบไอโซแทกติกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์ด้วย ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของโพลิโพรพิลีนทางการค้า ซึ่งทำการผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทดสอบวิธีเดียวกัน และมีปริมาณโครงสร้างไอโซแทกติกใกล้เคียงกันมาก แต่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ปรากฏว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น คือเมื่อดัชนีการไหล (melt flow index) ลดลง พลาสติกจะมีความต้านทานแรงดึงขาด ความแข็งดึง ความแข็ง และอุณหภูมิจุดเปราะต่ำ ลดลง ในขณะที่ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น

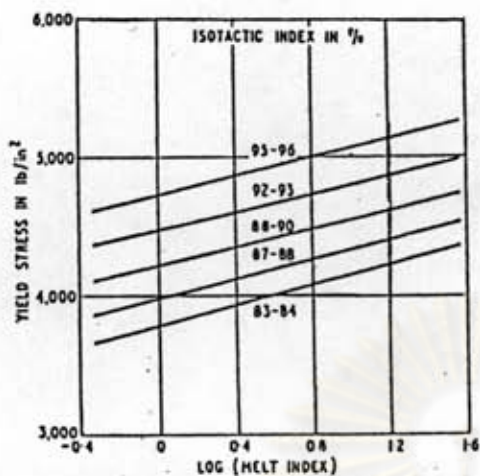
อิทธิพลทั่วไปของดัชนีไอโซแทกติก (isotactic index) และดัชนีการไหล ที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของโพลิโพรพิลีน แสดงในรูปที่ 2.4

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

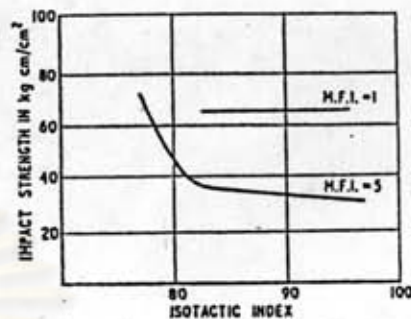
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของโพลิโพรพิลีน

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	โอบิโอโพลิเมอร์		
ดัชนีการไหล	(ก)	3.0	0.7	0.2
ความต้านทานแรงดึงขาด (ปอนด์/ตารางนิ้ว) (เมกะพาสคัล)	(ข)	5000 34	4400 30	4200 29
ร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด	(ข)	350	115	175
มอดุลัสการบิดโค้ง (ปอนด์/ตารางนิ้ว) (*10 ⁵) (เมกะพาสคัล)	-	1.9 1310	1.7 1170	1.6 1100
อุณหภูมิเปราะตัว (องศาเซลเซียส)	ICI / ASTM D.476	+15	0	0
จุดอ่อนตัวไวแคท (vicat softening point) (องศาเซลเซียส)	BS 2782	145 ถึง 150	148	148
ความแข็งตามสเกลรีอ็อคเวล (สเกล อาร์)	-	95	90	90
ความต้านทานแรงกระแทก (ฟุต-ปอนด์) (จูล)	(ค)	10 13.5	25 34	34 46

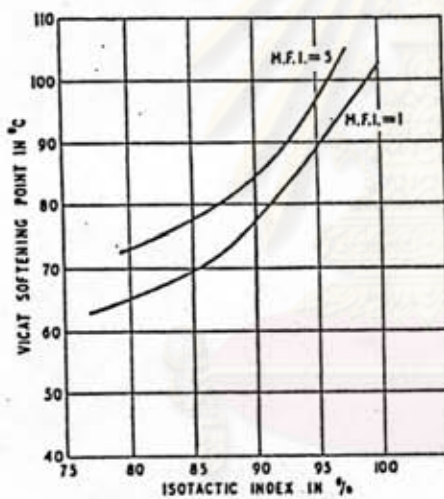
- (ก) ใช้โพลิเอทิลีน เกรดมาตรฐาน : ชิ้นรูปครึ่งละ 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิการขึ้นรูป 230 องศาเซลเซียส
- (ข) อัตราเร็วในการดึง (straining rate) 18 นิ้ว/นาที
- (ค) ทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 นิ้ว ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



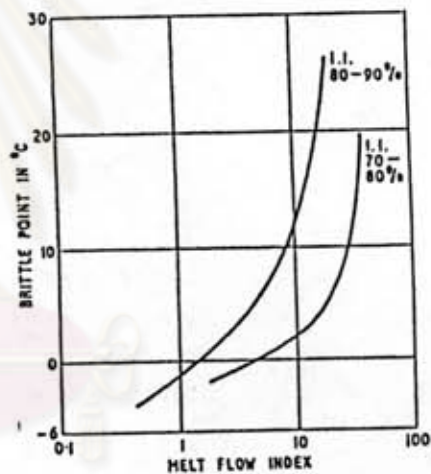
ก



ข



ค



ง

รูปที่ 2.4 อิทธิพลของดัชนีไอโซแทคติก และดัชนีการไหลที่มีต่อสมบัติของโพลิโพรพิลีน

- (ก) ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก
- (ข) ความต้านทานแรงกระแทก
- (ค) อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคท
- (ง) อุณหภูมิเปราะตัว

2.1.4 เอแทคติกโพลิโพรพิลีน

เอแทคติกโพลิโพรพิลีนสามารถทำการผลิตได้โดยตรง หรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ตามปกติโพลิโพรพิลีนชนิดเอแทคติกอย่างสมบูรณ์จะมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน แต่ในทางการค้ายังคงมีส่วนที่เป็นผลึกหลงเหลืออยู่บ้าง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย อยู่ในช่วง 20,000-80,000 และมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอแทคติกโพลิโพรพิลีนมีลักษณะอยู่กึ่งกลางระหว่างไซ (wax) และยาง สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เช่นเดียวกับไฮโซแทคติกโพลิโพรพิลีน แต่เอแทคติกโพลิโพรพิลีนจะเกิดการบวม (swell) อย่างมากในสารไฮโดรคาร์บอนทั้งประเภทอิมตัวและไม่อิมตัว และรวมตัวได้ดีกับตัวเติมจำพวกแร่ บิทูมินัส (bituminus) และ เรซินต่าง ๆ

ในอดีตเอแทคติกโพลิโพรพิลีน เป็นผลพลอยได้ที่ไม่เป็นที่ปรารถนาในการผลิต แต่ปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้งานต่าง ๆ มากขึ้น ในยุโรปใช้ผสมกับบิทูมินัสเพื่อใช้ทารอยต่อต่าง ๆ เช่นกระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น การผสมพลาสติกชนิดนี้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้กับงานโครงสร้างถนน เพื่อช่วยให้ผิวถนนที่เป็นแอสฟัลต์มีความคงทนมากขึ้น สำหรับในสหรัฐอเมริกานิยมใช้ในงานเคลือบผิวหน้ากระดาน เนื่องจากเป็นโพลิเมอร์ที่มีความเหนียว โดยมักจะผสมกับเรซินชนิดอื่น เป็นต้น

2.1.5 สารเติมแต่ง (additives) สำหรับไฮโซแทคติกโพลิโพรพิลีน

โพลิโพรพิลีนทางการค้าอาจจะผสมสารเติมแต่งต่าง ๆ ได้ เช่น ตัวเติม ยาง ผงสี ผงคาร์บอนแบล็ค สารดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultra-violet absorbers) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidants) เป็นต้น โพลิโพรพิลีนที่ใช้งานทั่วไปมักไม่ได้ผสมสารใด ๆ มีเพียงประมาณร้อยละ 3 เท่านั้นที่ผสมทัลลด์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding) และขึ้นรูปเป็นแผ่น ซึ่งการผสมทัลลด์จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งตึง และความทนความร้อน (heat deformation



resistance) แต่ความต้านทานแรงดึงจะลดลง

โพลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว ที่ผ่านการตกแต่งผิวด้วยสารช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวใยแก้วและโพลิเมอร์ (coupling agent) ประเภทไซเลนอินทรีย์ (organofunctional silanes) จะช่วยให้สมบัติด้านความแข็งแรงและความแข็งเปราะของพลาสติกสูงขึ้น เช่น โพลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดยาว ปริมาตรร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานแรงดึงขาด เพิ่มขึ้น 3 เท่า ความแข็งเปราะเพิ่มขึ้น 4 เท่า ณ อุณหภูมิห้อง และเพิ่มขึ้น 8 เท่า ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สำหรับเส้นใยแอสเบสตอสั้น ไม่ค่อยนิยมใช้เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

โพลิโพรพิลีนผสมยาง ทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ยางที่นิยมใช้ เช่น ยางบิวทิล (butyl rubber) ยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene-propylene rubber) เป็นต้น การผสมยางลงในโพลิโพรพิลีน ในระยะแรกจะผสมยางในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พลาสติกผสมที่ได้เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกโพลิโอเลฟิน อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic polyolefin elastomers) ต่อมาได้พยายามผสมยางให้ต่ำกว่าร้อยละ 50

สำหรับการผสมสารให้สีลงในโพลิโพรพิลีน ต้องใช้ความระมัดระวังมาก เนื่องจากเมื่อผสมสารเหล่านี้แล้ว ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้นและความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง

การปรับปรุงสมบัติ ด้านความต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของพลาสติก ทำได้โดยการผสมผงคาร์บอนเพื่อให้ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสี

สมบัติและสภาวะการขึ้นรูปของโพลิโพรพิลีน 5 ชนิดได้แก่โพลิโพรพิลีน โพลิโพรพิลีนโคโพลิเมอร์ โพลิโพรพิลีนผสมตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา โพลิโพรพิลีนผสมแก้วเพื่อช่วยเสริมแรง และโพลิโพรพิลีนผสมยาง ได้แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.2)

2.1.6 การขึ้นรูป

โพลีโพรพิลีนสามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องรีดพลาสติก ที่อุณหภูมิ 400-475 องศาฟาเรนไฮต์ โดยที่อัตราส่วน ระยะความยาวของสกรู/เส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) มีขนาดประมาณ 30:1 แต่อาจจะใช้ขนาดต่ำถึง 16:1 ได้ (8) และนิยมทำการขึ้นรูปโดยวิธีการฉีดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 400 - 450 องศาฟาเรนไฮต์ โดยทั่วไปใช้แรงอัด 5,000 - 20,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว อุณหภูมิแม่แบบ 50-150 องศาฟาเรนไฮต์

โพลีโพรพิลีนสามารถทำการขึ้นรูปได้ โดยวิธีขึ้นรูปแบบรีด-เป่า (extrusion-blow molding) และวิธีขึ้นรูปแบบฉีด-เป่า (injection-blow molding) นอกจากนี้ยังสามารถทำการขึ้นรูปโดยวิธีการยืด-เป่า (stretch-blow process) โดยเทคนิคนี้ชิ้นงานเบื้องต้นที่ขึ้นรูป (preform) จะถูกให้ความร้อนอีกครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว แล้วถูกดึงยืดและเป่าเข้าแม่แบบทันที ซึ่งวิธีการนี้จะได้ชิ้นงานที่โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวใน 2 ทิศทาง มีความใสและความเหนียวเพิ่มขึ้น

2.1.7 การใช้ประโยชน์

การเลือกโพลีเมอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการใช้งาน ความต้องการของตลาด เป็นต้น โพลีโพรพิลีนชนิดโฮโมโพลีเมอร์ และโคโพลีเมอร์นั้นเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานประเภทที่ต้องการสมบัติด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความร้อนได้ดี ลักษณะเด่นของโพลีโพรพิลีน คือชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง ๆ จะมีความทนทานต่อการหักงอไปมาได้สูง จึงนิยมใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานประเภทกล่อง สำหรับประเภทโคโพลีเมอร์ จะมีสมบัติด้านความต้านทานการกระแทกสูง มีจุดเปราะต่ำที่อุณหภูมิต่ำ จึงนิยมใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนของเครื่องซักผ้า และชิ้นส่วนของตัวถังรถยนต์ เช่น ฝาครอบไฟกล่องแบตเตอรี่ เป็นต้น การใช้งานในปัจจุบันพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของโพลีโพรพิลีนให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปแบบฉีด มีการผสมวัสดุจำพวกยางเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น กันชนรถยนต์ หน้าปัด เป็นต้น โพลีโพรพิลีนชนิดที่ผสมทัลค์ ใช้กับงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูง รวมทั้งสมบัติด้านความต้านทานความร้อน

2.2 วัสดุประกอบ (composite material)

วัสดุประกอบ หมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีเฟสที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 เฟส (phase) ขึ้นไป และสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างเฟสได้แม้ในระดับจุลภาค (microscopic) (9)

2.2.1 ประเภทวัสดุประกอบ

วัสดุประกอบ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- ก. วัสดุประกอบที่ผสมด้วยตัวเติมชนิดเป็นอนุภาค (particulate-filled composite) ประกอบด้วยเฟสต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเฟสส่วนใหญ่ของระบบ และเฟสของตัวเติมซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาค เป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง
- ข. วัสดุประกอบที่ผสมด้วยตัวเติมชนิดเป็นเส้นใย (fiber filled composite)
- ค. วัสดุประกอบแบบประสานเป็นโครงข่าย (interpenetrating network composite) ประกอบด้วยเฟสที่ต่อเนื่อง 2 เฟส

วัสดุที่ผลิตขึ้นจากสารโพลีเมอร์เพื่อใช้ในการการค้า ส่วนมากจะเป็นประเภทวัสดุประกอบ เช่น โพลีเมอร์ผสม (polyblend) สารอะครีโลไนไตริล บิวตาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene: ABS) โฟม โพลีไวนิลคลอไรด์ที่ผสมสารเติมแต่งต่าง ๆ ตามประเภทการใช้งาน ยางผสมสารเติมแต่ง เทอร์โมเซตติงเรซินผสมตัวเติม และพลาสติกผสมเส้นใยแก้ว เป็นต้น สาเหตุที่นิยมใช้วัสดุประกอบมากกว่าโพลีเมอร์เนื้อเดียว เนื่องจากวัสดุประกอบของสารโพลีเมอร์มีข้อดีเหนือกว่าโพลีเมอร์เนื้อเดียวหลายประการ เช่น

- เพิ่มความแข็งตึง ความแข็งแรง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- เพิ่มความเหนียว และความต้านทานแรงกระแทก
- ทำให้อุณหภูมิการบิดตัวสูงขึ้น
- ลดการซึมผ่านของแก๊ส และไอน้ำ
- ปรับปรุงสมบัติด้านไฟฟ้า

- ลดต้นทุนการผลิต
- ฯลฯ

วัสดุประกอบชนิดหนึ่ง ๆ อาจมีทั้งข้อดีบางประการดังกล่าว ขณะเดียวกันอาจมีข้อเสียด้วย ดังนั้นในการใช้งานต้องพิจารณาทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุแต่ละชนิดเสียก่อน ข้อเสียของวัสดุประกอบ เช่น ความหนืดเพิ่มขึ้น การขึ้นรูปยาก และอาจทำให้สมบัติทางกลและทางฟิสิกส์บางประการลดลง เป็นต้น สมบัติของวัสดุประกอบขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ลักษณะของตัวเติม ลักษณะของสัณฐานวิทยา (morphology) ของระบบ และลักษณะผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่แตกต่างกัน เป็นต้น

2.2.2 ปฏิกริยาระหว่างโพลิเมอร์และตัวเติม (polymer - filler interaction) (10)

ปฏิกริยาระหว่างโพลิเมอร์และตัวเติม มี 4 แบบ คือ

ก. อนุภาคเดี่ยวและอนุภาคที่รวมตัวเป็นกลุ่มของตัวเติม อยู่ในเนื้อโพลิเมอร์โดยไม่เกิดปฏิกริยาใด ๆ ลักษณะนี้ตัวเติมจะเพิ่มความแข็งแรงของโพลิเมอร์ลดลง

ข. อนุภาคของตัวเติมกระจายตัวอยู่ในเนื้อโพลิเมอร์ โดยโพลิเมอร์จะเคลือบที่ผิวของตัวเติม โพลิเมอร์ผสมตัวเติมลักษณะนี้ จะมีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการยึดตัวลดลง ซึ่งเป็นลักษณะการผสมตัวเติมเพื่อลดต้นทุนการผลิต

ค. เกิดการยึดเกาะ ระหว่างโพลิเมอร์และผิวของอนุภาคตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีนี้ตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง

ง. เกิดพันธะทางเคมีระหว่างโพลิเมอร์ และผิวของอนุภาคตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีนี้ตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง

2.3 วัสดุประกอบที่ผสมระหว่างโพลีเมอร์ กับตัวเติมชนิดเป็นอนุภาค (particulate-filled composite)

วัสดุประกอบที่ผสมระหว่างโพลีเมอร์กับตัวเติมชนิดเป็นอนุภาคนี้ จะมีเฟสต่อเนื่องเป็นโพลีเมอร์ผสมกับตัวเติมซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคแข็ง อิทธิพลของตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ต่อสมบัติของโพลีเมอร์มีหลายประการ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก ความแข็ง การหดตัว เป็นต้น

2.3.1 อิทธิพลของตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ต่อสมบัติด้านความแข็งแรง และพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (stress-strain behavior) ของโพลีเมอร์

ตัวเติมชนิดเป็นอนุภาคแข็ง เมื่อผสมในโพลีเมอร์ จะทำให้ค่ามอดุลัสซึ่งวัดจากความชัน (slope) ในช่วงแรกของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) เพิ่มขึ้น โดยจะปรากฏเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อการยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของเฟสที่แตกต่างกันดี โดยปกติการผสมตัวเติมจะทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวเมื่อขาดของวัสดุประกอบ และความต้านทานแรงดึงลดลง เมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น แต่อาจมีข้อยกเว้นได้สำหรับความต้านทานแรงดึง เช่น กรณีผสมผงคาร์บอนแบล็คในยาง จะทำให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น เป็นต้น รูปแบบกราฟความเค้น-ความเครียดของยางโพลียูเรเทนผสมเกลือหิน (rock salt) แสดงในรูปที่ 2.5 ปรากฏว่าเมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น ร้อยละการยืดตัวและความเค้นจะลดลง (11)

ค่าร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด (ϵ_0) ของวัสดุประกอบจะลดลง เมื่อปริมาณตัวเติมชนิดอนุภาคแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าร้อยละการยืดตัวเมื่อขาดที่เกิดขึ้นเป็นการยืดตัวของโพลีเมอร์ทั้งหมด ซึ่งถ้าหากการยึดเกาะระหว่างเฟสแข็งแรง และรอยแตกมีทิศทางที่จะวิ่งจากอนุภาคหนึ่ง ไปสู่อีกอนุภาคหนึ่ง ทำให้ผิวรอยแตกที่เกิดขึ้นมีลักษณะหยาบ (rough fracture surface) จะสามารถคำนวณค่าร้อยละการยืดตัวเมื่อขาดของโพลีเมอร์ผสมตัวเติมชนิดแข็งได้จากสมการ 2.1 (12, 13)

$$E_B = E_B^0 (1 - \phi_2^{1/3}) \quad (2.1)$$

เมื่อ E_B คือ ค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาดของโพลีเมอร์ผสมตัวเติมชนิดแข็ง

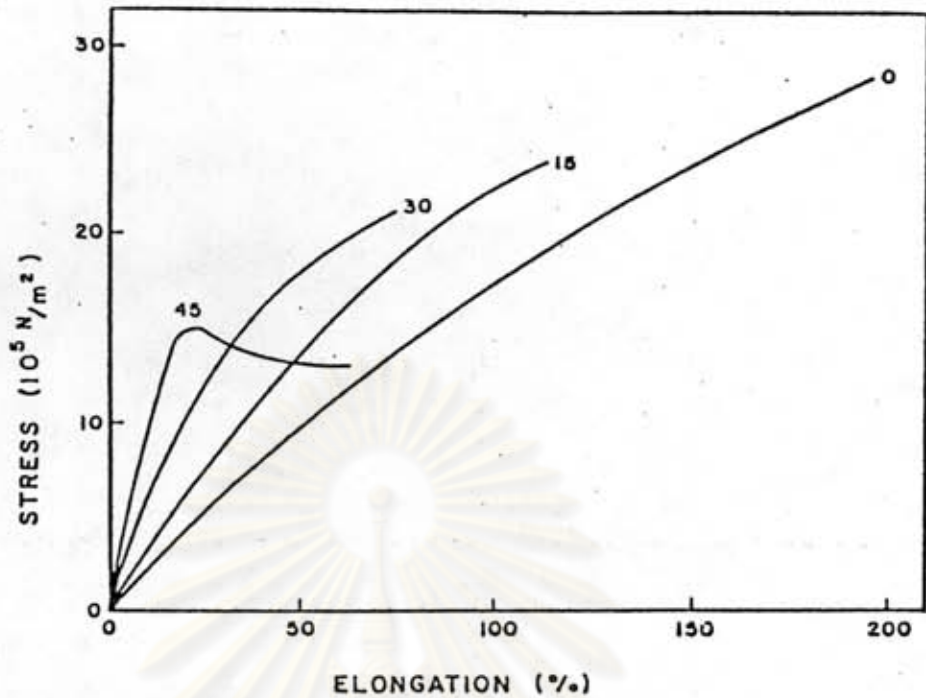
E_B^0 คือ ค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาดของโพลีเมอร์

ϕ_2 คือ สัดส่วนของตัวเติมโดยปริมาตร

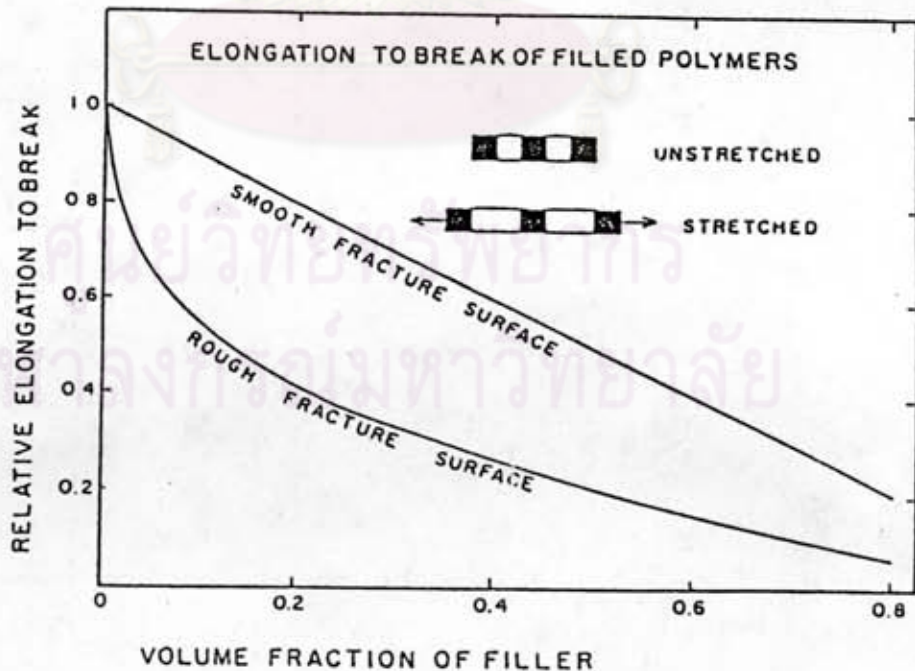
(volume fraction of filler)

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเติมกับ ค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาด จากสมการ 2.1 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาดของโพลีเมอร์ผสมตัวเติมจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าหากการยึดเกาะระหว่างเฟสเลว หรือผิวรอยแตกเรียบ (smooth fracture surface) แล้ว ค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาดจะลดลงทีละน้อย สม่่าเสมอกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ 2.1 ในบางกรณีตัวเติมอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการราน (craze) และหยุดรอยแตกได้ ซึ่งในกรณีนี้โพลีเมอร์ที่ผสมตัวเติมชนิดอนุภาคแข็งจะมีค่าร้อยละการยึดตัวเมื่อขาดเท่ากับหรือสูงกว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ผสมตัวเติมได้ (14)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเติมเกลือหิน (rock salt) ที่มีต่อค่าร้อยละการยืดตัว และความเค้นของยางโพลียูเรเทน (หมายเลขบนกราฟ หมายถึงปริมาณสัดส่วนตัวเติมโดยปริมาตร)



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเติม ที่มีต่อค่าร้อยละการยืดตัว เมื่อขาด ของโพลิเมอร์ผสมตัวเติมตามทฤษฎี เมื่อแรงยึดเกาะระหว่างโพลิเมอร์และตัวเติมดี

สำหรับในกรณีของยาง หรือโพลิเมอร์ประเภทเหนียว (ductile polymer) การผสมตัวเติมจะทำให้เกิดแรงดึง ณ จุดคราก (yield point) ในกราฟความเค้น-ความเครียดขึ้น ปรากฏการณ์ ณ จุดครากนี้ อาจเกิดจากอิทธิพลของการรวน หรืออิทธิพลของการแยกออกจากกัน ณ ผิวสัมผัสระหว่างเฟส (dewetting effect) ทำให้ค่ามอดุลัสของสารลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันก็จะเกิดช่องว่าง (void) ขึ้นในตัวอย่างด้วย การเกิดจุดครากเมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น ได้แสดงในรูปที่ 2.5 จุดครากหรือพฤติกรรมการแยกตัวระหว่างเฟสจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวเติมในโพลิเมอร์ และเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวเติมในวัสดุประกอบ $(\phi_2)^{2/3}$ ถ้าหากในวัสดุประกอบเมื่อได้รับแรงดึงแล้วเกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นมากเพียงพอก่อนที่จะเกิดการแตก จะสามารถคำนวณความเค้น ณ จุดคราก ได้จากสมการ 2.2

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left[1 - (\phi_2 / \phi_m)^{2/3} \right] \quad (2.2)$$

- เมื่อ σ_y คือ ความเค้น ณ จุดครากของโพลิเมอร์ผสมตัวเติมชนิดแข็ง
- σ_{y0} คือ ความเค้น ณ จุดครากของโพลิเมอร์
- ϕ_2 คือ สัดส่วนของตัวเติมโดยปริมาตร
- ϕ_m คือ สัดส่วนการรวมตัวสูงสุด (maximum packing fraction) ของอนุภาคตัวเติม โดยเปรียบเทียบระหว่างปริมาตรที่แท้จริงของตัวเติม กับ ปริมาตรปรากฏของตัวเติมที่อัดแน่น เมื่อน้ำหนักเท่ากัน

อิทธิพลของการแยกออกจากกัน ณ ผิวสัมผัสของเฟสที่แตกต่างกัน เมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเติม ที่มีต่อสมบัติด้านความเค้น-ความเครียด ของพลาสติกไฮต์โพลีไวนิลคลอไรด์ ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (15)

ตัวเติม/100 ส่วนของพลาสติก	ความต้านทานแรงดึง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	ร้อยละ การยืดตัวเมื่อขาด
0	2825	365
5	2780	380
10	2960	335
25	2830	375
50 [*]	2480	320
100 [*]	1765	260
200 [*]	1250	225

* การแยกตัว ณ ผิวสัมผัสระหว่าง 3 เฟส ปรากฏชัดเจน

พฤติกรรมด้านความเค้น-ความเครียด ของโพลีเมอร์ผสมตัวเติม สามารถปรับปรุงได้ โดยการใส่สารช่วยให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเฟส ประเภทซิลเลน (silane coupling agent) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับทั้ง 2 เฟส ช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของเฟสดีขึ้น และเพิ่มความต้านทานแรงดึง ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3 (16)

ตารางที่ 2.3 แสดงอิทธิพลของสารไซเลน ที่มีต่อสมบัติด้านความเค้น-ความเครียดของยางโพลีคลอโรพรีน ผสมดิน 80 ส่วนโดยปริมาตร

สมบัติ	ไม่ผสมไซเลน	ผสมไซเลน
ความต้านทานแรงดึง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	2230	3500
ร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด	700	230
มอดุลัส	950	3480

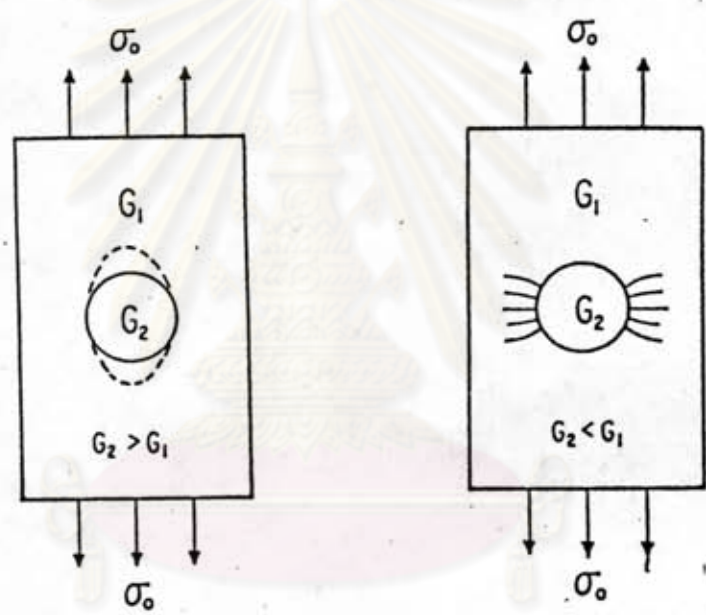
ถึงแม้ว่าขนาดของอนุภาค จะมีอิทธิพลต่อค่ามอดุลัสของวัสดุประกอบ น้อยมาก โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคไม่รวมตัวเป็นกลุ่ม แต่ขนาดอนุภาคจะมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงมาก โดยที่ความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง สาเหตุของปรากฏการณ์นี้ยังคงคลุมเครืออยู่ แต่มีเหตุผลบางประการที่สนับสนุนปรากฏการณ์นี้ เช่น พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยของตัวเติมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง และเมื่อผิวสัมผัสระหว่างเฟสแยกตัวออกจากกันจะเกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อแยกตัวออกจากเฟสของโพลีเมอร์ จะปรากฏเป็นช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าการแยกตัวของอนุภาคขนาดเล็กมาก ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลงมากขึ้น อิทธิพลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติด้านความเค้น-ความเครียดของวัสดุประกอบแสดงในตารางที่ 2.4 (17)

ตารางที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของขนาดอนุภาคเกลือหิน ที่มีต่อสมบัติด้าน
ความเค้น-ความเครียดของยางยูเรเทน

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ปริมาณตัวเติม (ร้อยละโดยปริมาตร)	ความต้านทานแรงดึง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	ร้อยละ การยืดตัวเมื่อขาด
33-40	41	12.6	106
50-60	41	12.1	104
90-105	42	11.4	73
210-300	42	4.8	42
300-480	42	3.8	36

การรวมตัวเป็นกลุ่มของอนุภาค เป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงของวัสดุ
ประกอบลดลง เนื่องจากสามารถแตกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ และจะมีลักษณะเป็น
จุดรวมความเครียด (stress concentration) ในวัสดุประกอบ ดังนั้นถ้าหากตัวเติม
รวมตัวเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่แท้จริงในวัสดุประกอบแล้ว ตัวเติมเหล่านี้
จะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลง การผสมตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด
กับโพลีเมอร์หลอมเหลวที่มีความหนืดสูงให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นทำได้ยากมาก วัสดุประกอบ
ทั่วไปจึงมักมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวเติม ที่รวมตัวเป็นกลุ่มอยู่ในโพลีเมอร์
ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุประกอบต่ำกว่าที่คาดหมาย และมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของ
วัสดุประกอบ โดยที่ความต้านทานแรงดึงของวัสดุประกอบจะลดลง เมื่อปริมาณอากาศที่
แทรกอยู่ในกลุ่มของตัวเติมเพิ่มขึ้น ดังนั้นการผสมตัวเติมกับโพลีเมอร์ให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดี
ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ผสมให้ตัวเติมที่รวมตัวเป็นกลุ่มอยู่แตกตัว
และกระจายตัวได้ดีในเฟสของโพลีเมอร์ รวมทั้งทำให้อากาศที่แทรกอยู่ระหว่างตัวเติม
ออกไปจากวัสดุประกอบให้มากที่สุด

การให้แรงดิ่งกับวัสดุประกอบของโพลิเมอร์ผสมตัวเติม ที่มีค่ามอดุลัสแตกต่างกันจะเกิดปรากฏการณ์ที่ต่างกันไป คือ กรณีที่โพลิเมอร์มีค่ามอดุลัสต่ำกว่าตัวเติม เมื่อให้แรงดิ่งปรากฏว่าจะเกิดการแยก ๓ ผิวสัมผัส ระหว่างเฟสของตัวเติมกับโพลิเมอร์ ในทิศทางของแรงดิ่งและเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) แต่ถ้าในกรณีที่โพลิเมอร์มีค่ามอดุลัสสูงกว่าตัวเติมแล้ว เมื่อให้แรงดิ่งจะเกิดการราน ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตั้งฉากกับทิศทางแรงดิ่ง รูปที่ 2.7 (ข)



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะปรากฏในวัสดุประกอบเมื่อให้แรงดิ่ง

- (ก) เมื่อโพลิเมอร์มีค่ามอดุลัสต่ำกว่าตัวเติม จะเกิดการแยก ๓ ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของตัวเติมกับโพลิเมอร์ในทิศทางของแรงดิ่ง
- (ข) เมื่อโพลิเมอร์มีค่ามอดุลัสสูงกว่าตัวเติม จะเกิดการรานในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตั้งฉากกับทิศทางแรงดิ่ง

2.3.2 อิทธิพลของตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ที่มีต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงกระแทกของโพลีเมอร์

ตัวเติมชนิดแข็งที่ผสมในโพลีเมอร์ที่แข็ง (rigid polymer) มักจะทำให้ความต้านทานแรงกระแทกของโพลีเมอร์ลดลง ซึ่งความต้านทานแรงกระแทกนี้จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ 2 ประการ คือ การแยกตัว ณ ผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่แตกต่างกัน และการราน แต่ถ้าหากผสมโพลีเมอร์ที่แข็งกับตัวเติมประเภทอีลาสโตเมอร์ เช่น ยาง และเกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสแล้ว จะทำให้วัสดุประกอบที่ได้มีความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น

2.3.3 อิทธิพลของตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งและการขัดสี (wear) ของโพลีเมอร์

เนื่องจากตัวเติมชนิดแข็ง มีความแข็งสูงกว่าโพลีเมอร์มาก เมื่อนำมาผสมเป็นวัสดุประกอบจึงได้วัสดุประกอบที่มีความแข็งสูงกว่าโพลีเมอร์ สมบัติที่สอดคล้องกับความแข็งของวัสดุประกอบ อีกประการหนึ่งคือ การขัดสี ซึ่งสมบัติด้านการขัดสีนี้มีความสำคัญมากในการนำไปใช้งานลักษณะต่าง ๆ เช่น ทำยางบุพื้น ผลิตเป็นยางล้อรถยนต์ เป็นต้น ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขัดสี คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient of friction) และลักษณะของอนุภาคตัวเติม เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งอนุภาคมีลักษณะผิวขรุขระ จะมีอัตราการสึกหรอสูงกว่าโพลีเมอร์ชนิดเดียวกันผสมกับอนุภาคที่มีลักษณะกลม การผสมตัวเติมที่มีลักษณะอนุภาคขรุขระร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กับโพลีเมอร์ จะได้วัสดุประกอบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าโพลีเมอร์ผสมตัวเติมชนิดมีอนุภาคกลมประมาณ 2 เท่า เป็นต้น

2.4 ตัวเติม

2.4.1 ชนิดตัวเติม

ตัวเติม หมายถึงสารที่ผสมในพลาสติก แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. ตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา (inert filler) หรือสารเพิ่มเนื้อ (extender) ใช้สำหรับลดต้นทุนการผลิต สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติก ที่ผสมตัวเติมชนิดนี้มีหลายประการ (18) เช่น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มอดูลัสการยึดตัว ความต้านทานการกดหัก (compressive strength) ความต้านทานแรงบิดโค้ง (flexural strength) เพิ่มขึ้น ลดการหดตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิบิดตัว (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น ลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น

ข. ตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) เป็นตัวเติมชนิดที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกผสมให้ดีขึ้นได้ สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติก เมื่อผสมตัวเติมชนิดเสริมแรง มีหลายประการ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกดหัก และมอดูลัสการยึดตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัวเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว เป็นต้น

ตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมีหลายชนิด ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต แก้ว ไมกา ดินขาว เยื่อไม้ เป็นต้น ตารางที่ 2.5-2.6 แสดงประเภทของตัวเติมชนิดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ประเภทของตัวเติมชนิดสารอนินทรีย์

<i>Silicates</i>	<i>Sulfates</i>
clay	barium sulfate
talc	barytes
mica	blanc fixe
asbestos	calcium sulfate
feldspar	<i>Hydroxides</i>
bentonite clay	calcium hydroxide (lime)
wollastonite	magnesium hydroxide
fuller's earth	<i>Carbon</i>
pumice	carbon black
pyrophyllite	furneo
rottenstone	lampblack
slate flour	acetylene
vermiculite	channel
calcium silicate (precipitated)	thermal
magnesium silicate (precipitated)	graphite
<i>Oxides</i>	fibers
aluminum oxide	<i>Metals</i>
hydrated alumina	powders
antimony trioxide	copper
magnesium oxide	aluminum
titanium dioxide	bronze
zinc oxide	lead
silica	zinc
quartz	steel
diatomaceous earth	fibers
tripoli	whiskers
pyrogenic	wire
hydrogel and aerogel	<i>Miscellaneous</i>
<i>Carbonates</i>	barium ferrite
calcium carbonate	magnetite (ferrous-ferrie oxide)
precipitated	molybdenum disulfide
ground limestone (whiting, chalk)	glass
ground marble	fibers
barium carbonate (precipitated)	flakes
magnesium carbonate (precipitated)	ground

ตารางที่ 2.6 ประเภทตัวเติมชนิดสารอินทรีย์

<i>Lignin materials</i>	<i>Cellulosic materials</i>
ground bark (Douglas fir)	wood flour
processed lignin	shell flours
<i>Protein materials</i>	fibers
keratin (ground feathers)	alpha cellulose
soybean meal	cotton flock
<i>Synthetic fibers</i>	sisal
nylon	jute
acrylic	rayon
fluorocarbon polymers	
polyesters	

2.4.2 สมบัติของตัวเติม

การนำตัวเติมไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติก ต้องพิจารณาสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น

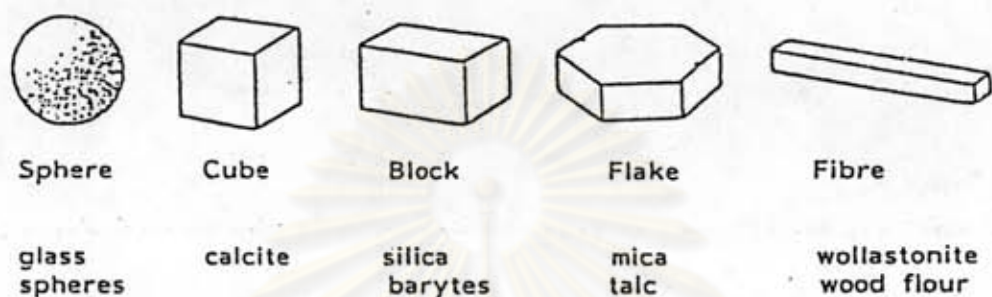
- ลักษณะอนุภาค (particle shape) ตัวเติมมีลักษณะอนุภาคหลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยจะมีค่าสัดส่วน ความยาว/ความหนาของอนุภาค (aspect ratio) แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุประกอบมาก

- การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) การกระจายขนาดอนุภาค มีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยใช้ตะแกรงร่อน ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยวิธีการตกตะกอน ตัวอย่างกราฟการกระจายขนาดอนุภาคของดินขาว แสดงในรูปที่ 2.9

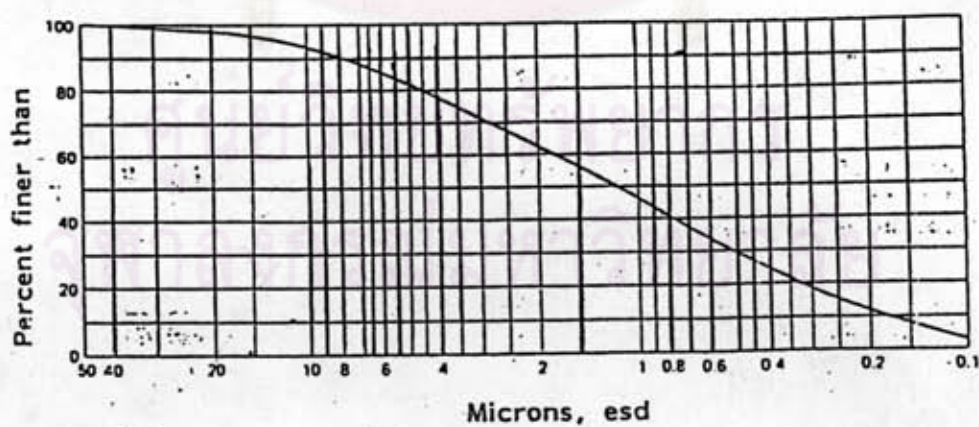
- พื้นที่ผิว (surface area) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง 2 เฟส คือ ตัวเติมและโพลิเมอร์ จะเกิดขึ้นที่ผิว ดังนั้น ถ้าหากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติทางกลของวัสดุประกอบสูงขึ้นด้วย วัดพื้นที่ผิวได้โดยใช้หลักการการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตามวิธีการของ บรุนเนอร์-เอ็มเมท-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller : BET)

- การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) เป็นความสามารถในการจัดเรียงของอนุภาคในวัสดุประกอบ โดยจะพิจารณาในรูปของสัดส่วนการรวมตัว (packing fraction) ซึ่งเป็นปริมาตรทั้งหมดที่ตัวเติมใช้ในการจัดเรียงตัวในเฟสของโพลิเมอร์ เมื่อปริมาณตัวเติมที่ใช้สูงที่สุด ดังนั้น ตัวเติมที่มีค่าสัดส่วนการรวมตัวสูง แสดงว่ามีโพลิเมอร์แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวเติมมาก การสัมผัสกันของอนุภาคต่ำ ซึ่งทำให้วัสดุประกอบมีสมบัติทางกลดี

- ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นสมบัติที่สำคัญในการทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์ และมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุประกอบที่ทำการขึ้นรูป



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวเติม 5 แบบ



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของดินขาว

2.5 ทัลค์

2.5.1 สมบัติของทัลค์

ทัลค์เป็นสารประเภทแมกนีเซียมซิลิเกต (hydrated magnesium silicate) มีสูตร $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มีรูปร่าง 4 แบบ คือ เส้นใย (fibrous) แบบชั้น (lamellar) รูปเข็ม (needle-shaped) และ modular steatitic แต่ที่ใช้ในทางการค้าเป็นแบบชั้น ส่วนประกอบทางเคมี และสมบัติทางฟิสิกส์ของทัลค์ แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติทางฟิสิกส์ของทัลค์

สมบัติ	ทัลค์
ร้อยละของส่วนประกอบทางเคมี	
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	40.0 - 62.0
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	0.2 - 11.0
เฟอร์รัสไทรออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.1 - 1.5
เฟอร์ริกออกไซด์ (FeO)	0.1 - 6.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.3 - 1.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	30.0 - 33.0
ร้อยละของน้ำ	16.0 - 17.0
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.6 - 9.9
การดูดซับน้ำมัน (oil absorption) (กรัม/100 กรัมทัลค์)	28.0 - 51
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.9

ส่วนประกอบพื้นฐานของทลค์ คือ ออกไซด์ (oxide) และ ไฮดรอกไซด์ (hydroxide) ของแมกนีเซียม ซึ่งอยู่ระหว่างซิลิโคนออกไซด์ (silicon oxide) ทลค์มีลักษณะลื่นเนื่องจากโครงสร้างแบบชั้นที่เป็นระนาบ และมีความแข็งต่ำ อาจมีสารเจือปนหลายชนิด เช่น โดโลไมต์ ($MgCa(CO_3)_2$) แคลไซต์ ($CaCO_3$) เหล็กออกไซด์ คาร์บอน คิวทซ์ และแมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น

2.5.2 การใช้งานทลค์ในเทอร์โมพลาสติก

ทลค์ช่วยเพิ่มสมบัติของเทอร์โมพลาสติกได้หลายประการ เช่น เพิ่มความแข็งตึง และมอดุลัสการบิดโค้ง เพิ่มความต้านทานการบิดโค้ง ลดความล้า (creep tendency) แม้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปรับปรุงค่าความต้านทานการบิดงอเนื่องจากอุณหภูมิ เพิ่มความคงรูปร่าง ปรับปรุงการหดตัว (shrinkage) และการม้วนตัว และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion) ต่ำลง ปรับปรุงการนำความร้อน และเพิ่มความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน เป็นต้น

ข้อเสียของทลค์เมื่อผสมในเทอร์โมพลาสติก คือ ลดความต้านทานแรงดึง และการยึดตัวเมื่อขาด ลดความต้านทานแรงกระแทก และ เพิ่มความแข็งเปราะ ลดค่าดัชนีการไหลของวัสดุประกอบที่ได้ มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงและการหดตัวของชิ้นงานในทุกทิศทาง ลดความแข็งแรงที่รอยต่อ ทำให้ความต้านทานความร้อนในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดต่ำลง ทำให้สีของสารผสมที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสีของทลค์แต่ละชนิด ทลค์บางชนิดไม่เหมาะสมที่จะใช้ผลิตภาชนะบรรจุอาหาร เป็นต้น และทลค์บริสุทธิ์มีราคาแพงมาก

2.5.3 ทลค์ สำหรับใช้ผสมในโพลีโพรพิลีน

ทลค์ที่ผสมลงในโพลีโพรพิลีนนั้น จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเติม และวัสดุเสริมแรง เนื่องจากทลค์มีโครงสร้างแบบชั้น จึงทำให้วัสดุประกอบมีสมบัติที่ดีขึ้นหลายประการ เช่น ความแข็งตึงเพิ่มขึ้น ทนความร้อนได้ดีขึ้นด้วย ขึ้นรูปได้ง่าย การหดตัวต่ำ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมรถยนต์ นิยมผสมทลค์กับโพลีโพรพิลีนเพื่อผลิตเป็น

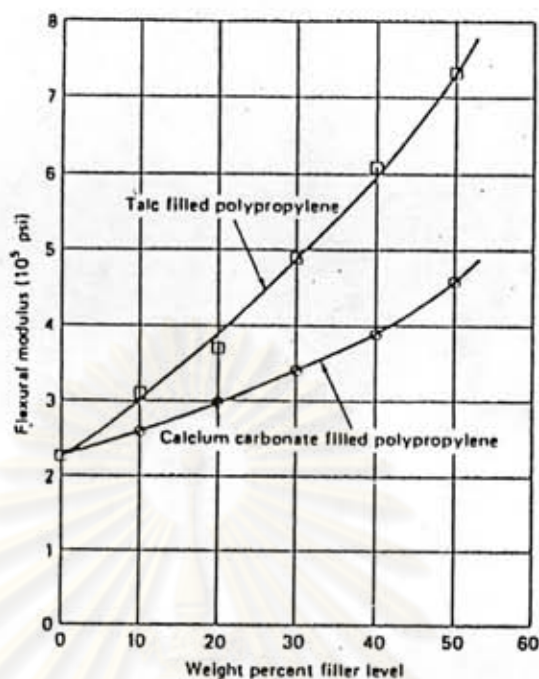
ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ใบบัดหม่อนน้ำ ผงหน้าปัด เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรม
อื่น ๆ ก็มีการใช้งานทั่วไป เช่น ยางกันรั่วขอบประตูตู้เย็น โครงสร้างภายนอกของ
เครื่องทำความร้อนภายในบ้าน ใบบัดกวนของเครื่องซักผ้า เป็นต้น ตารางที่ 2.8
แสดงสมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนผสมทัลค์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก (19)
รูปที่ 2.10-2.11 เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณทัลค์และแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อ
มอดูลัสการบิดโค้งและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ตามลำดับ ของโพลีโพรพิลีน ณ
อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.12-2.13 เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อ
มอดูลัสการบิดโค้งและความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของโพลีโพรพิลีนผสมทัลค์ร้อยละ
40 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับโพลีโพรพิลีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 40 โดย
น้ำหนัก ตามลำดับ



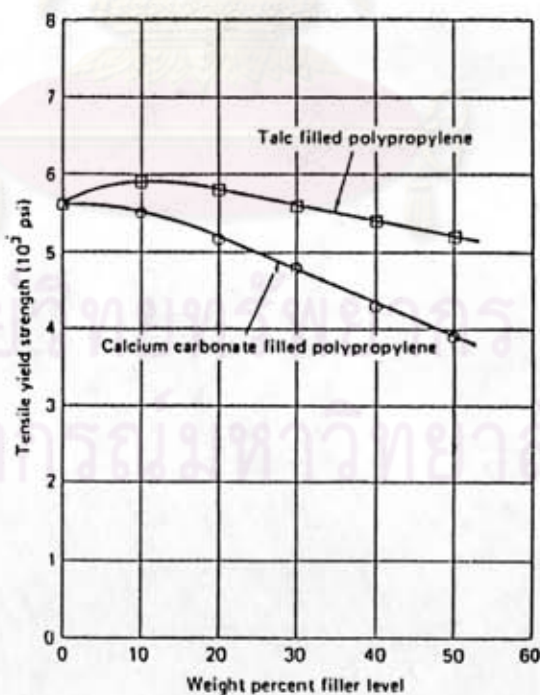
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติทางกลของโพลีโพรพิลีนผสมทัลค์ ปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก (ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส)

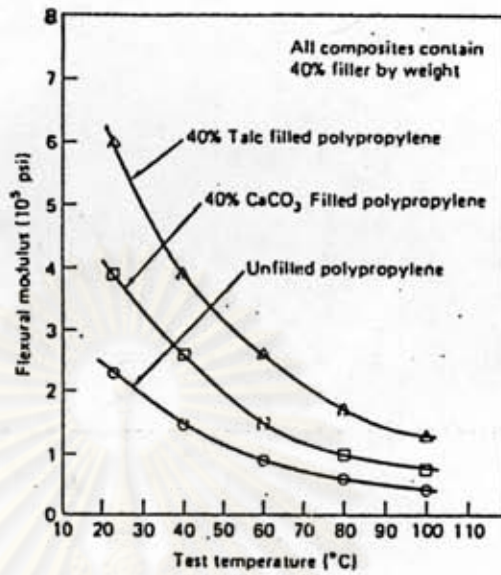
สมบัติ	วิธีการทดสอบ	โพลีโพรพิลีน	ปริมาณทัลค์ที่ผสมในโพลีโพรพิลีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
			20	40
มอดุลัสการบิดโค้ง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	ASTM D-790	230,000	390,000	600,000
ความต้านทานแรงดึง ๗ จุดคราก (ปอนด์/ตารางนิ้ว)	ASTM D-638	5,600	5,800	5,400
ร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด	ASTM D-638	8.5	4.1	3.1
ความต้านทานแรงกระแทก แบบไอซอด (ฟุต-ปอนด์/ตารางนิ้ว)	ASTM D-256A	0.58	0.47	0.42
อุณหภูมิการบิดตัว (องศาเซลเซียส)	ASTM D-648	62	72	88



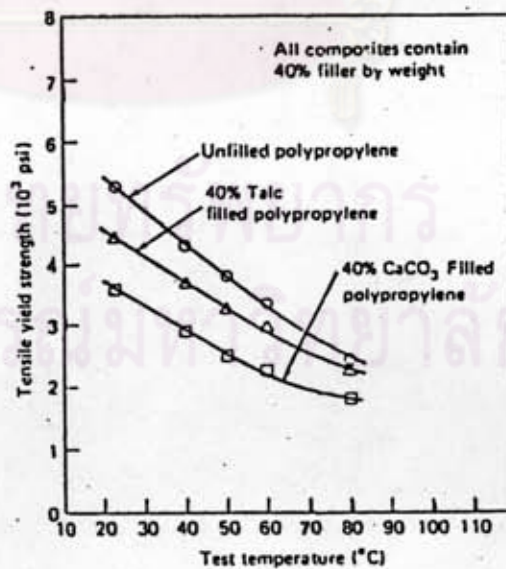
รูปที่ 2.10 แสดงอิทธิพลของตัวเติม ทัลค์และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อมอดูลัสการบิดโค้งของโพลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.11 แสดงอิทธิพลของตัวเติมทัลค์และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก ของโพลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.12 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีต่อมอดูลัสการบิดโค้งของโพลิโพรพิลีนผสมทัลค์และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานแรงดึง ณ จุดครากของโพลิโพรพิลีนผสมทัลค์และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

2.6 ไมกา

ไมกาเป็นแร่ประเภทอลูมิเนียมซิลิเกต ส่วนมากจะตกผลึกอยู่ในรูปโมโนคลินิก (monoclinic) แล้วแตกตัวเป็นเกล็ด (flake) แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ มัสโคไวท์ (muscovite) ฟลักโทโกไฟท์ (phlogopite) ไบโอไทต์ (biotite) และลิวปีโดไลต์ (lepidolite) แต่ที่ใช้ในทางการค้ามากคือ มัสโคไวท์ มีสูตรทางเคมีคือ $K_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$ และ ฟลักโทโกไฟท์ (phlogopite) สูตรเคมี $K_2(MgFe^{+2})_6(Al_2Si_6O_{20})(OH_2F)_4$

2.6.1 สมบัติของไมกา

ส่วนประกอบทางเคมีของไมกาที่ใช้ในทางการค้า แสดงในตารางที่ 2.9 อาจมีสารเจือปน เช่น แบริยม โครเมียม แมกนีเซียม ติตาเนียม และ แวนาเดียม เป็นต้น ปะปนอยู่ในไมกาบ้างเล็กน้อย ไมกาส่วนมากมักมีน้ำประกอบอยู่ร้อยละ 2.5-4.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะแยกตัวออกจากโครงสร้างของไมกาที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส

ไมกามีความแข็งอยู่ในช่วง 2.5-4.0 ตามสเกลมอร์ (Mohr scale) ความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.75-3.2 มีสมบัติทางไฟฟ้าดี ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและสารเคมี นำความร้อนต่ำ และทนอุณหภูมิได้สูง ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางกลของมัสโคไวท์และฟลักโทโกไฟท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติทางเคมีของมวลโคไวท์ และพัทโลโกไฟท์

ร้อยละส่วนประกอบทางเคมี	มวลโคไวท์	พัทโลโกไฟท์
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	47.90	40.74
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	33.13	15.76
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.69	20.56
เฟอร์ริกออกไซด์ (FeO)	-	7.83
เฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.04	1.21
ไดโปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	9.80	9.96
ไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.80	0.46
แบเรียมออกไซด์ (BaO)	-	0.45
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.50	< 0.01
ทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.65	0.42
โครเมียมไตรออกไซด์ (Cr_2O_3)	-	0.14
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.01	0.07
ฟลูออรีน (F)	-	2.16
ฟอสฟอรัส (P)	0.03	-
ซัลเฟอร์ (S)	0.01	-
น้ำผลึก ($\text{H}_2\text{O} + \text{combined}$)	4.30	1.01
น้ำ	0.01	0.10

ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ และสมบัติทางกลของมัสโคไวท์ และ
ฟักโลโกไฟท์

Property	Natural Muscovite	Natural Phlogopite
Density, g/cc	2.76-3.2	2.74-2.95
Hardness, Mohs	3-4	2.5-3.0
Transparency	Ruby [varies]	Amber-Brown [varies]
Shape	Roughly hexagonal or irregular flakes	Roughly hexagonal or irregular flakes
Cleavage	Basal, eminent	Basal, eminent
Crystal structure	Monoclinic	Monoclinic
Optical axial angle, 2V, degrees	38-47	30-10
Refractive index	1.552-1.611	1.54-1.69
pH	6.5-8.5	7.0-8.0
Melting point, °C	Decomposes	Decomposes-(>1300) ¹
Water of constitution, %	4.5	3.2-[1.01] ¹
Maximum temperature with little or no decomposition, °C	500-530	850-1000
Tensile modulus, GN/m ² [psi]	172 [25 x 10 ⁶]	172 [25 x 10 ⁶]
Tensile strength, MN/m ² [psi]	255-296 [37 x 10 ³ -43 x 10 ³] ^a 3100 [450 x 10 ³] ^b 690-900 [100 x 10 ³ -130 x 10 ³] ^c	255-296 [37 x 10 ³ -43 x 10 ³] ^a 690-900 [100 x 10 ³ -130 x 10 ³] ^c
Thermal conductivity [1 to cleavage], cal/cm ² /sec/cm/°C	16 x 10 ⁻⁴	16 x 10 ⁻⁴
Linear coefficient of thermal expansion per °C [1 to cleavage]		
20°C to 100°C	15 x 10 ⁻⁶ -25 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁶ -1 x 10 ⁻³
100° to 300°C	16 x 10 ⁻⁶ -25 x 10 ⁻⁶	2 x 10 ⁻⁵ -2 x 10 ⁻³
Linear coefficient of thermal expansion per °C [1 to cleavage]		
0° to 200°C	8 x 10 ⁻⁶ -9 x 10 ⁻⁶	13 x 10 ⁻⁶ -14.5 x 10 ⁻⁶
Specific heat [25°C]	0.206-0.209	0.206-0.209
Radiation resistance: Max. use temp. with 5 x 10 ¹⁴ thermal neutrons/cm ² , °C	500	550
Specific resistivity ohm cm [25°C]	10 ¹² -10 ¹⁶	10 ¹⁰ -10 ¹³
Dielectric strength, V/mil [1.3 mils thick]	6,000-3,000	4,200-2,100
Dielectric constant, ε [1 MC]	6.5-9.0	5.0-6.0
Dissipation factor, tan δ [25°C]		
60 cycles	0.0008-0.0009	-
1 MC	0.0002	0.004-0.070
Loss factor, ε tan δ [1 MC]	0.0013	0.020-0.042
Chemical resistance	Very good ^d	Good ^e
Water solubles	Trace	Trace
Coefficient of static friction	0.2-0.4	0.2-0.4

¹ Suzorite variety [Marietta Resources International Ltd.].

^a Measured on sheets [edges stressed, ⁴⁰].

^b Measured on sheets [edges unstressed, ²⁰].

^c Calculated value for the effective strength of high aspect ratio flakes in plastics.

^d Attacked by HF and molten alkalis.

^e Attacked by HF, H₂SO₄, H₃PO₄ and molten alkalis.

2.6.2 การใช้งานไมกาในเทอร์โมพลาสติก

สมบัติของพลาสติกผสมไมกา จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ความกว้าง/ความหนา ของอนุภาคไมกา ดังนั้นวิธีการขึ้นรูปที่แตกต่างกันจะทำให้ไมกาเกิดการแตกและค่าอัตราส่วน ความกว้าง/ความหนา เปลี่ยนแปลงไป เช่น วิธีการขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding) วิธีการขึ้นรูปแบบอัด (compression molding) และวิธีการขึ้นรูปแบบรีด (extrusion molding) เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ไมกาสามารถผสมกับพลาสติกได้หลายชนิด เช่น อะครีโลไนไตรล บิวตาไดอิน สไตรีน (ABS) โพลีโพรพิลีน โพลีสไตรีน (polystyrene :PS) ไนลอน (nylon) โพลีเอสเตอร์ (polyester) เป็นต้น นอกจากนี้ไมกายังสามารถผสมกับตัวเติมชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติ เช่น ทัลค์ เบนโทไนท์ (bentonite) เม็ดแก้ว (glass bead) ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ไมกาช่วยปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกได้หลายประการ เช่น เพิ่มความแข็ง เพิ่มความทนทานสารเคมีและการกัดกร่อน ลดการหดตัว ลดการซึมผ่านของอากาศและไอน้ำ ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ลดการติดไฟ เพิ่มอุณหภูมิการบิดตัว เป็นต้น การตกแต่งผิวของไมกาด้วยสารอะมิโน ซิลาน (amino silanes) ช่วยให้การยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับไมกาดีขึ้น ทำให้สมบัติทางกลของพลาสติกผสมไมกาดีขึ้น สามารถใช้ประโยชน์เป็นชั้นส่วนของเฟอร์นิเจอร์ภายในรถยนต์ นิยมผสมไมกาในโพลีโพรพิลีน เนื่องจากมีราคาถูก สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 2.11 แสดงอิทธิพลของวิธีการขึ้นรูป ที่มีต่อสมบัติของพลาสติกผสม ไมกา

Composite	Volume Fraction Mica	COMPRESSION MOLDING				INJECTION MOLDING				EXTRUSION FOLLOWED BY INJECTION MOLDING			
		FLEXURAL MODULUS		FLEXURAL STRENGTH		FLEXURAL MODULUS		FLEXURAL STRENGTH					
		(GN/m ²)	(10 ⁴ psi)	(MN/m ²)	(10 ³ psi)	(GN/m ²)	(10 ⁴ psi)	(MN/m ²)	(10 ³ psi)	(GN/m ²)	(10 ⁴ psi)	(MN/m ²)	(10 ³ psi)
ABS/mica	0.50	41.6	(6.03)	154	(22.3)	36.9	(5.35)	105	(15.2)	32.5	(4.71)	99.9	(14.4)
Poly (styrene)/mica	0.50	41.3	(5.99)	123	(17.8)	36.9	(5.35)	114	(16.5)	25.4	(3.68)	67.7	(9.82)
Poly (propylene)/mica	0.50	37.9	(5.50)	172	(24.9)	26.9	(3.90)	86.1	(12.5)	-	-	-	-

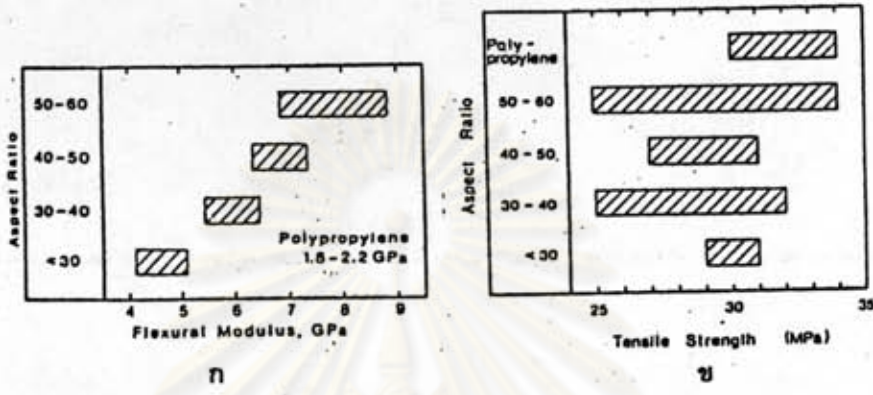
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 งานวิจัยที่ผ่านมา

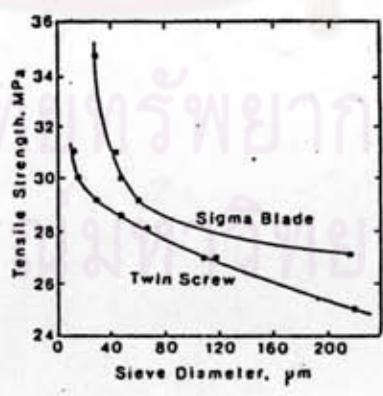
งานวิจัยที่ผ่านมา ของการศึกษาด้านอิทธิพลของตัวเติม และวัสดุเสริมแรงชนิดต่าง ๆ ในพลาสติก มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ

ปี พ.ศ. 2527 ซี.บูซิจิน อาร์.แลททิน จี.เอ็ม.มาร์ทีเนซ จี.โทมัส และอาร์.ที.วูดแฮมส์ (C.Busigin, R.Lahtinen, G.M.Martinez, G. Thomas and R.T.Woodhams) ทำการศึกษาถึงสมบัติของ โพลีโพรพิลีนที่ผสมด้วยไมกา ชนิดทึบโลโก้ไฟท์ จากประเทศฟินแลนด์ (20) โดยพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาค และลักษณะของไมกา ทำการขึ้นรูปตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย โพลีโพรพิลีนไมกา สารเติมแต่ง สารยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของไมกาและพลาสติกด้วยเครื่องผสม ตัดเป็นเม็ดแล้วทำการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูป ปรากฏว่า เมื่อไมกาที่ใช้มีอัตราส่วน ความกว้าง/ความหนา เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสการบิดโค้ง และความต้านทานแรงดึง จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในขณะที่ความต้านทานแรงดึงของพลาสติกผสมไมกา จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของไมกาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เทอร์โมพลาสติกผสมไมกาสามารถบดและนำกลับมาขึ้นรูปใช้ใหม่ได้ โดยที่โพลีโพรพิลีนผสมไมกาที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 40 ไมครอน จะมีความมอดูลัสลดลงเมื่อทำการขึ้นรูปใหม่ (recycle) หลายครั้ง แต่โพลีโพรพิลีนผสมไมกาที่มีขนาดเล็กกว่า 40 ไมครอน สามารถทำการขึ้นรูปใหม่ได้หลายครั้ง โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 แสดงอิทธิพลของขนาดความกว้าง/ความหนา ของอนุภาคไมกา ที่มีต่อสมบัติของ โพลีโพรพิลีน
 (ก) มอดูลัสการบิดโค้ง
 (ข) ความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 2.15 แสดงอิทธิพลของขนาดอนุภาคของไมกา ที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของ โพลีโพรพิลีน

ตารางที่ 2.12 อิทธิพลของการขึ้นรูปใหม่ของโพลิโพรพิลีนผสมไมกา

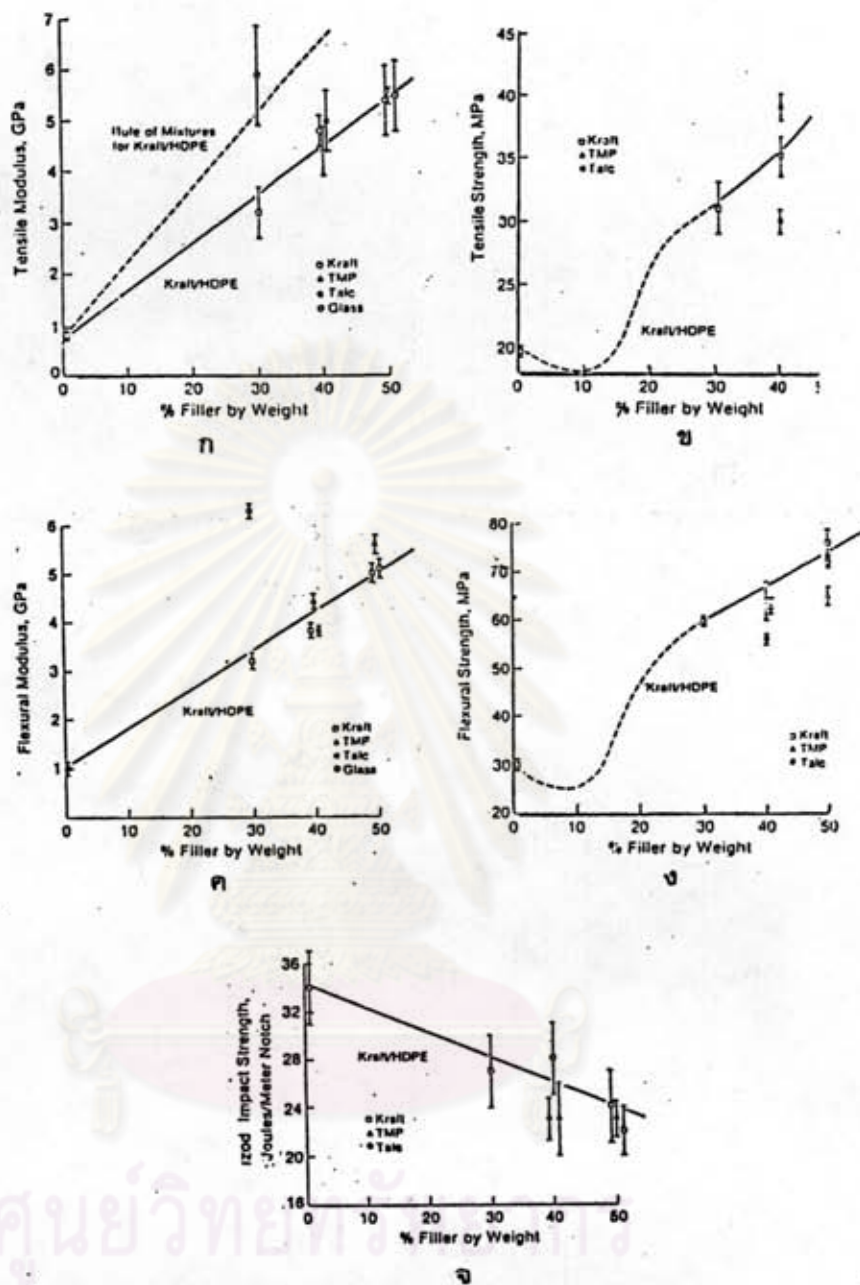
สมบัติ	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	จำนวนครั้งการขึ้นรูปใหม่		
		0	3	6
มอดุลัสความต้านทานแรงดึง (จิกะพาสคัล)	30	7.6	7.2	6.8
	225	7.9	4.8	4.8
ความต้านทานแรงดึง (เมกะพาสคัล)	30	32	32	26
	225	25	29	27
มอดุลัสการบิดโค้ง (จิกะพาสคัล)	30	7.2	6.7	6.6
	225	7.5	5.5	4.5
ความต้านทานการบิดโค้ง (เมกะพาสคัล)	30	63	63	79
	225	54	59	68

ปี พ.ศ. 2527 อาร์.ที.วูดแฮมส์ จี.โทมัส และ ดี.เค.รอดเจอร์ส (RT.Woodhams, G.Thomas, and D.K.Rodgers) ทดลองทำการผสมเยื่อกระดาษ (kraft pulp) ในโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และ ไอโซแทกติกโพลิโพรพิลีน โดยผสมสารช่วยการกระจายตัว (21) และผสมให้มีปริมาณเยื่อกระดาษในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปโดยการฉีด เปรียบเทียบสมบัติกับพลาสติกชนิดเดียวกัน ที่ผสมด้วยเยื่อที่ผ่านการตกแต่งให้ทนอุณหภูมิและทนแรงได้สูง (thermomechanical pulp :TMP) ทัลค์ และเส้นใยแก้ว ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ปรากฏว่าสมบัติของพลาสติกผสมเยื่อกระดาษ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับสมบัติของพลาสติกผสม TMP ทัลค์ และเส้นใยแก้ว (รูปที่ 2.16-2.17) โดยที่ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความต้านทานการบิดโค้ง ของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด จะเป็นเส้นตรง แต่ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากระหว่างการขึ้นรูปอาจมีแก๊สเกิดขึ้นทำให้เกิดช่องว่างภายในตัวอย่าง สมบัติจึงลดลง สำหรับความต้านทานแรงกระทำของพลาสติกผสมเยื่อไม้จะลดลง เมื่อปริมาณตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเยื่อไม้จะขัดขวางการยืดหยุ่นของพลาสติก และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยและโพลีเมอร์ ทำให้ตัวอย่างเปราะและแตกง่ายขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้มักพบเสมอในวัสดุประกอบของพลาสติกผสมเส้นใยสั้น ข้อดีของพลาสติกผสมเยื่อไม้ คือ เยื่อไม้ไม่เป็นวัสดุขูดถู จึงสามารถผสมในโพลีโอลิฟินได้ในปริมาณสูง โดยไม่ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปเกิดการสึกหรอ นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเติมชนิดอื่น

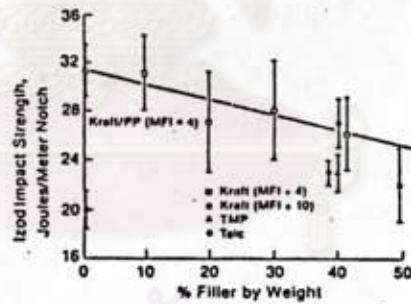
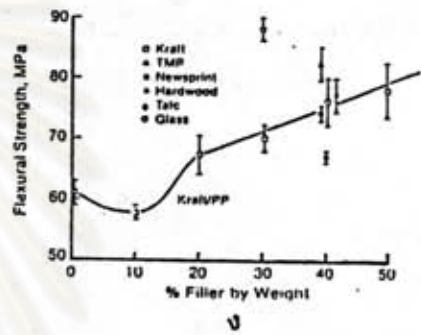
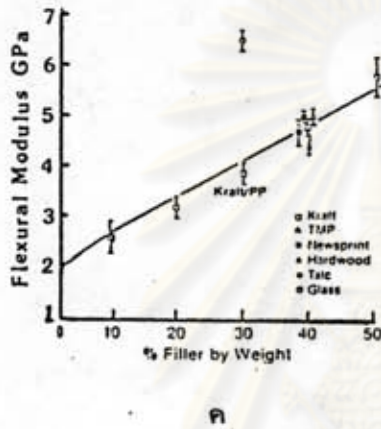
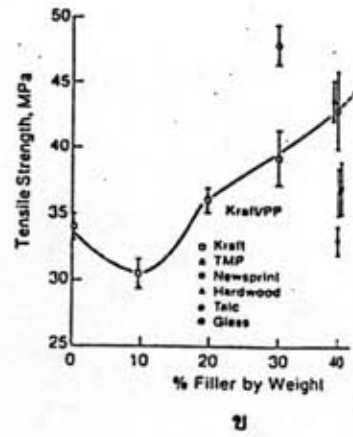
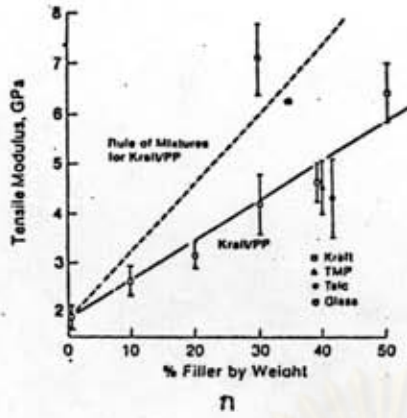
ปี พ.ศ. 2530 ที.วู.คาน (T.Vu.Khanh) พบว่าการผสมไมกา และแก้วในโพลีโพรพิลีน (22) จะสามารถลดการแตกอย่างต่อเนื่องได้ เนื่องจากเมื่อเกิดการแตก ณ ผิวสัมผัสระหว่างตัวเติม และ เรซิน เรซินสามารถเกิดการยึดหยุ่นได้เล็กน้อย ทำให้รอยแตกหยุดลง โดยที่สมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค การจัดเรียงตัว และการตกแตงผิวของตัวเติม

ปี พ.ศ. 2528 เคิร์ต อีเซ จอห์น เคอร์รี่ และ จอห์น ฟาร์เรล (Kurt Eise, John Curry, and John Farrel) ศึกษาการขึ้นรูปพลาสติกผสมวัสดุเสริมแรง โดยใช้เครื่องผสมแบบสกรูหลายตัว (23) จากการศึกษาพบว่าการผสมพลาสติกกับวัสดุเสริมแรงนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ผสมที่มีลักษณะพิเศษคือระบบการลำเลียงพลาสติกและลำเลียงวัสดุเสริมแรงที่สอดคล้องกัน สามารถทำให้พลาสติกผสมกับวัสดุเสริมแรงเป็นเนื้อเดียวกันได้ และทำให้วัสดุเสริมแรงกระจายตัวได้ดี ซึ่งอุปกรณ์นี้ต้องสามารถควบคุมแรงเฉือน (shear intensity) อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ทำการผสมในกระบอกสกรูได้อย่างดีเลิศ เพื่อรักษาสมบัติของพลาสติกผสมวัสดุเสริมแรงไว้ตามต้องการ รูปที่ 2.18 แสดงรูปแบบกระบวนการผลิตพลาสติกผสมวัสดุเสริมแรง



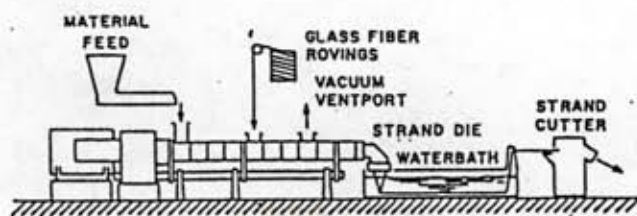
รูปที่ 2.16 แสดงอิทธิพลของปริมาณเยื่อกระดาษ ที่มีต่อสมบัติของ โพลีเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง

- (ก) มอดุลัสความต้านทานแรงดึง
- (ข) ความต้านทานแรงดึง
- (ค) มอดุลัสความต้านทานการบิดโค้ง
- (ง) ความต้านทานการบิดโค้ง
- (จ) ความต้านทานแรงกระแทก

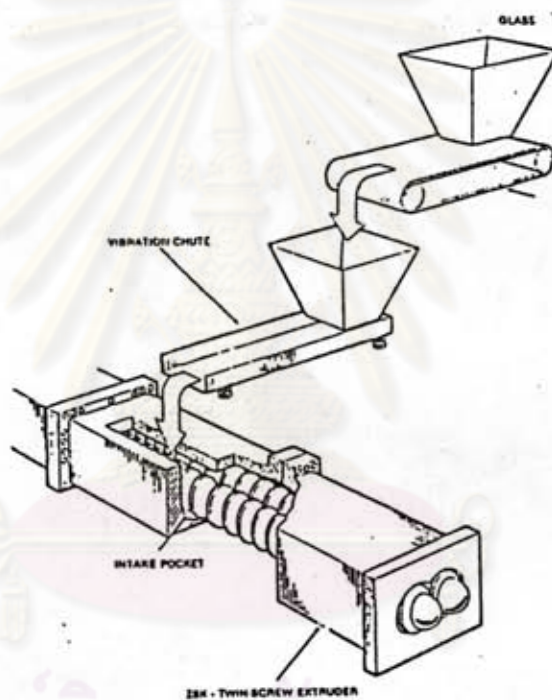


รูปที่ 2.17 แสดงอิทธิพลของปริมาณเยื่อกระดาษที่มีต่อสมบัติของ โพลีโพรพิลีน

- (ก) มอดุลัสความต้านทานแรงดึง
- (ข) ความต้านทานแรงดึง
- (ค) มอดุลัสความต้านทานการบิดโค้ง
- (ง) ความต้านทานการบิดโค้ง
- (จ) ความต้านทานแรงกระแทก



ก



ข

รูปที่ 2.18 แสดงรูปแบบกระบวนการผลิตพลาสติกผสมวัสดุเสริมแรง
 (ก) กระบวนการผลิตพลาสติกผสมเส้นใยแก้วชนิดทอเป็นผืน
 (ข) ระบบการผสมตัวเติม

จากการศึกษาพบว่า เครื่องรีดพลาสติกแบบสกรูคู่เหมาะสมสำหรับงานประเภทนี้ มาก สมบัติของโพลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมต่าง ๆ แสดงใน ตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบสมบัติของโพลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการแตกต่างกัน

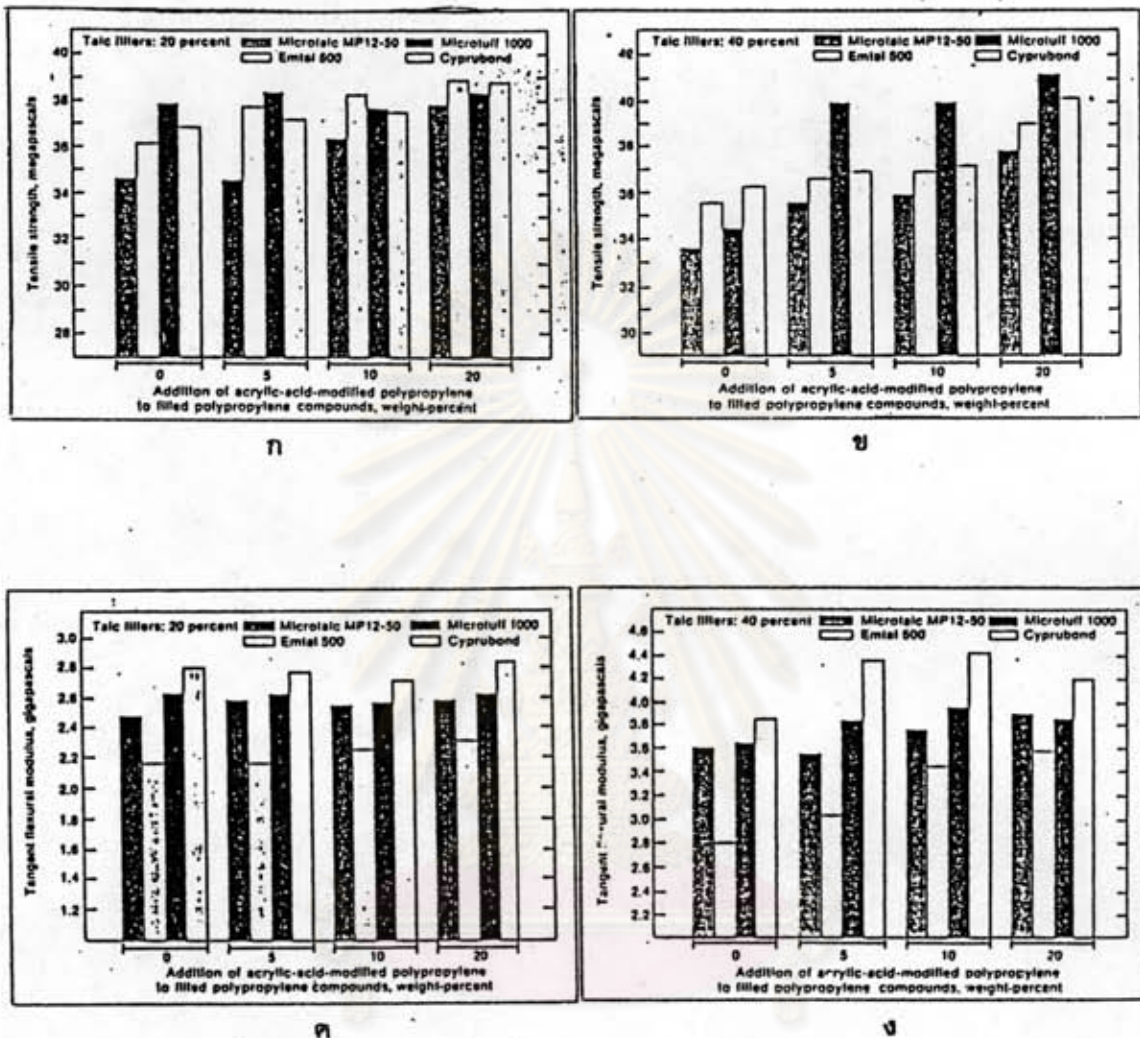
	Compounding Technique					
	Single-Screw Extruder	Continuous Mixer	Twin-Screw Compounder 1	Twin-Screw Compounder 2	Twin-Screw Compounder 3	Twin-Screw Compounder 4
Wt. % glass fiber	25	25	25	23	25	25
Type of fibers	W* Chopped glass	W* Chopped glass	Roving	Roving	Roving	W* Chopped glass
Tensile strength psi	6100	4700	4900	5800	8000	8000
Flex. modulus M psi	580	460	600	550	550	550
Izod impact ft. lb/in. notched	1.45	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3
Heat defl. temp. C 264 psi *F	264	153	203	184	268	266
% of fibers smaller than .5 mm	—	—	—	—	29	—
Remarks		Glass was fed into the feed section *	Screw with very strong sections after addition of glass	Moderate screw after addition of glass	Mild screw after addition of glass (No. 14)	

ปี พ.ศ. 2529 บริษัท ยูนิคาร์ไบด์ จำกัด (Union Carbide Co., Ltd.) ค้นพบว่าการตกแต่งผิวของไมกา ด้วยสารช่วยการยึดเกาะระหว่างเฟส ประเภทซิลิคอนอินทรีย์ (organosilicon) แล้วนำไปผสมกับโพลิโพรพิลีนและทำการขึ้นรูปนั้น ปรากฏว่าไมกาที่ตกแต่งผิว ช่วยเสริมความแข็งแรงให้พลาสติกได้ (24) โดยสมบัติทางกลของพลาสติกผสมไมกา จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของไมกาที่ผสม เมื่อมีปริมาณสารช่วยยึดเกาะระหว่างเฟสผสมอยู่สูงกว่าร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และจากสมบัติความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการบิดโค้ง ปรากฏว่าสมบัติดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยการยึดเกาะระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนถึงร้อยละ 1.4 - 1.6 โดยน้ำหนัก แสดงว่า การตกแต่งผิวไมกาด้วยสารช่วยการยึดเกาะระหว่างเฟสประเภทซิลิคอนอินทรีย์ ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้ไมกามีพันธะที่อ่อนไหวในการยึดเกาะกับพลาสติกได้สูงที่สุด

ปี พ.ศ. 2530 แอสโอก เอ็ม. อะเดอ และสตีเฟน อาร์.ฟลายน์ (Askhok M., Adur and Stephen R.Flynn) ทดลองขึ้นรูปโพลิโพรพิลีนผสมทัลค์ และโพลิโพรพิลีนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดอะคริลิกร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (acrylic acid modified polypropylene) เข้าด้วยกันทั้งสามชนิด (25) ซึ่งกรดอะคริลิกนี้ จะเป็นสารช่วยให้การยึดเกาะระหว่างตัวเติมและโพลิเมอร์ดีขึ้น และส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง มอดูลัสการบิดโค้ง และอุณหภูมิการบิดตัว ดีขึ้น เมื่อปริมาณโพลิโพรพิลีนผสมอะคริลิกเพิ่มขึ้น สมบัติของพลาสติกผสมตัวเติมแสดงในรูปที่ 2.19 โดยทัลค์ที่ศึกษามี 4 ชนิด คือ

- ไมโครทัลค์ เอ็มพี 12-50 (Microtalc MP 12-50) คือทัลค์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 ไมครอน
- เอ็มทัล 500 (emtal 500) คือทัลค์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 9.0 ไมครอน
- ไมโครทัฟ 1000 (Microtuff 1000) คือทัลค์ชนิดไมโครทัลค์ ที่ผ่านการตกแต่งผิวสำหรับใช้เป็นตัวเติม
- ไซปอบอนด์ (Cyprubond) คือทัลค์ที่ผ่านการตกแต่งผิวด้วยสารอะมิโน-ซิลเลน (amino-silane) อนุภาคมีขนาดระหว่าง 1.5-1.8 ไมครอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 แสดงอิทธิพลของปริมาณโพลีโพรพิลีน ที่ปรับปรุงด้วยกรดอะคริลิก ที่มีต่อสมบัติของ โพลีโพรพิลีนผสมทัลค์

- (ก) ความต้านทานแรงดึง เมื่อผสมทัลค์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
- (ข) ความต้านทานแรงดึง เมื่อผสมทัลค์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
- (ค) มอดูลัสความต้านทานการบิด โค้ง เมื่อผสมทัลค์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
- (ง) มอดูลัสความต้านทานการบิด โค้ง เมื่อผสมทัลค์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก