



การวิเคราะห์สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนสำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนเทอร์โมพลาสติกของเครื่องใช้ไฟฟ้า

PROPORTION ANALYSIS OF POLYPROPYLENE SCRAP FOR INJECTION MOLDING OF THERMOPLASTIC PARTS OF ELECTRICAL APPLIANCES

จิตรา รุกิจการพานิช^{1*} และ สิมัชร จันทร์ฉาย²

^{1*}รองศาสตราจารย์, ²นิสิตปริญญาโท

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-mail: jittra.r@chula.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกมักมีเศษพอลิโพรพิลีนเหลืออยู่ซึ่งถือว่าเป็นของเสีย อุตสาหกรรมพลาสติกต่างให้ความสนใจที่จะนำรีไซเคิลเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ที่ยังคงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเทอร์โมพลาสติกของเครื่องใช้ไฟฟ้า ตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระที่สนใจได้แก่ สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนต่อพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และจำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว สำหรับตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนองนั้น ได้แก่ คุณสมบัติทางกลของเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้เทอร์โมพลาสติกที่ยอมรับได้ต้องผ่านคุณสมบัติทางกลได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอดสูงกว่า 126 จูลต่อเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงกว่า 23.4 เมกะปาสกาล และค่าความยืดที่จุดครากสูงกว่า 6.30 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่า 1) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 1 รอบ นำมาใช้เป็นส่วนผสมได้ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 2) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 2 รอบ นำมาใช้เป็นส่วนผสมได้ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 3) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 3 รอบ นำมาใช้เป็นส่วนผสมได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: เศษพอลิโพรพิลีน; เทอร์โมพลาสติกรีไซเคิล; การฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ABSTRACT

Polypropylene scrap, which is considered to be waste, frequently remains behind in the injection molding process of thermoplastic parts. Various plastic industries are interested in recycling to reduce environmental problems. The objective of this research was to analyze the proportion of polypropylene scrap that had undergone the injection molding process and pure polypropylene that still had suitable properties for injection molding into thermoplastic parts of electrical appliances. The independent variables of interest were ratio of polypropylene scrap fraction to pure polypropylene and the number of rounds of polypropylene scrap that had undergone the injection molding process. For the response variables, they were mechanical properties of thermoplastic. The acceptable recycled thermoplastic must meet mechanical criteria including the izod impact strength was greater than 126 Joule

Jittra Rukijkanpanich^{1*} and Simathorn Chanchai²

^{1*}Associate Professor, ²Master's Student

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

per meter (J/m), the tensile strength at yield point was greater than 23.4 megapascal (MPa) and the elongation at yield point was greater than 6.30 percent (%). The results of the study found that 1) polypropylene scrap that had undergone the injection molding process after 1 round could be used up to 50 percent by weight, 2) polypropylene scrap that had undergone the injection molding process after 2 rounds could be used up to 30 percent by weight, and 3) polypropylene scrap that had undergone the injection molding process after 3 rounds could be used up to 10 percent by weight.

KEYWORDS: polypropylene scrap; recycled thermoplastic; plastic injection molding

1. บทนำ

ในปัจจุบัน หลายประเทศทั่วโลก กำลังตื่นตัวต่อวิกฤตปัญหาขยะพลาสติก เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี [1] ผู้ประกอบการธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติกได้มีความพยายามที่จะลดการเกิดเศษพลาสติกจากกระบวนการขึ้นรูปโดยนำเศษพลาสติกดังกล่าวมาผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์เพื่อนำมาฉีดขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์หรือที่เรียกว่า พลาสติกกรีไซเคิล ซึ่งนอกจากสามารถลดปริมาณขยะพลาสติกลงได้แล้ว ยังลดค่าใช้จ่ายในการซื้อพลาสติกบริสุทธิ์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอีกด้วย [2, 3]

จากการสำรวจวรรณกรรมพบงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงสัดส่วนของการนำเศษพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วหลายรอบมาผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ที่มีคุณภาพ ส่วนใหญ่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนำเศษพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วมาผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์ โดยไม่ได้กล่าวถึงจำนวนรอบที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วของเศษพลาสติก [4, 5, 6]

ในขณะที่เกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่นำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของพลาสติกประกอบด้วย ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและค่าความยืดที่จุดคราก แต่ละผลิตภัณฑ์จะมีค่าเกณฑ์คุณสมบัติที่ยอมรับได้แตกต่างกัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลนั้น ไม่เพียงคำนึงถึงปริมาณเศษพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วกับพลาสติกบริสุทธิ์เท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงปัจจัยจำนวนรอบของเศษพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วด้วย ยังมีจำนวนรอบของการผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้วหลายรอบยังมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเศษพลาสติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์หาสัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วจำนวน 1, 2 และ 3 รอบ กับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ที่สัดส่วน 10:90, 30:70, 50:50 และ 70:30 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีขอบเขตที่พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์เกรด 2300 NC สำหรับนำไปใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้เกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ของการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า กำหนดไว้ที่ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอดสูงกว่า 126 จูลต่อเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงกว่า 23.4 เมกะปาสคาล และค่าความยืดที่จุดครากสูงกว่า 6.30 เปรอร์เซ็นต์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ ของใช้ภายในบ้าน เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูป [7] อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาหมุนเวียนหรือรีไซเคิลเพื่อรักษาสีสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิโพรพิลีนเกรด 2300 NC ที่มีคุณลักษณะ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีนเกรด 2300 NC [8]

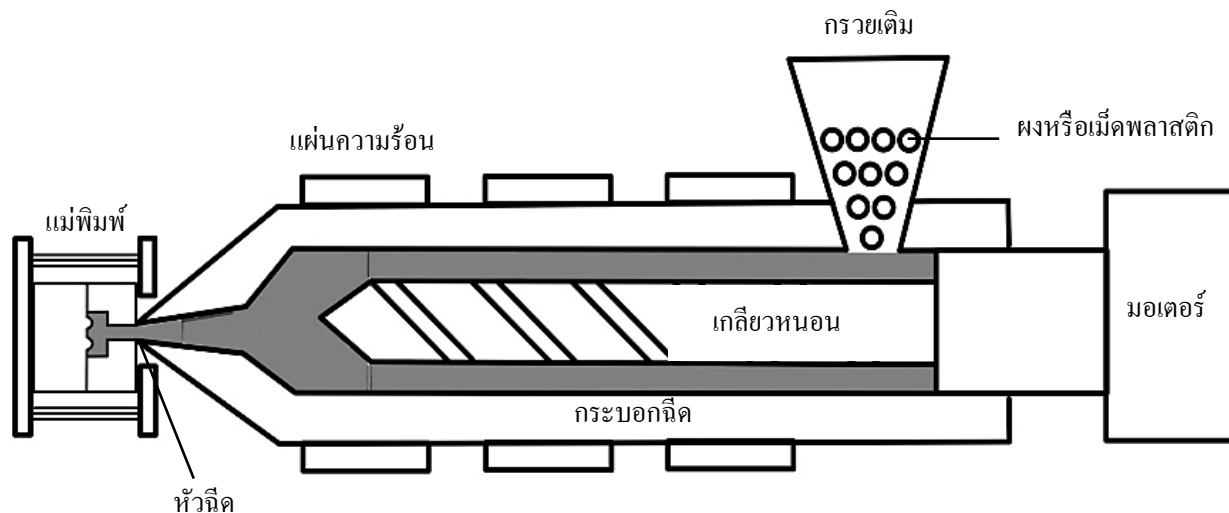
หัวข้อ	รายละเอียด
ลักษณะเด่น	• ด้านทานแรงกระแทกได้ดี • มีความแข็งแรงสูง (good stiffness) • ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดี (good processability)
อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก (processing temperature)	190 ถึง 240 องศาเซลเซียส
การหดตัวในแม่พิมพ์ (mold shrinkage)	0.8 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์
แนวทางในการเก็บรักษา	• จัดเก็บในที่แห้งและให้พ้นจากแสงแดด • จัดเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิด เพื่อป้องกันการปนเปื้อน

จากงานวิจัยของ Huang and Peng (2021) ได้นำพอลิโพรพิลีนเกรด 6331 ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปจำนวน 1 ถึง 5 รอบ โดยศึกษาถึงการส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ที่ใช้เครื่องฉีดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก รุ่น CLF-60TX ที่มีแรงปิดล็อกแม่พิมพ์ 60 ตัน ผลการวิจัยพบว่า เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงของเศษพอลิโพรพิลีนเกรด 6331 ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว ไม่ควรใช้เกิน 3 รอบ [7] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meglio et al. (2023) ที่ได้กล่าวไว้ว่า พลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ไม่ควรใช้เกิน 3 รอบเช่นกัน [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วจำนวน 1, 2 และ 3 รอบ

2.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก

เครื่องฉีดขึ้นรูปนี้ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ประหยัดเวลา และสามารถฉีดพลาสติกได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic) ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในรูปแบบของผง (powder) หรือเม็ด (pellet) [3, 10] โดยขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปเริ่มจากการนำผงหรือเม็ดพลาสติกใส่ลงไปในกรวยเติมพลาสติก (hopper) แล้วมอเตอร์ขับเคลื่อน (drive motor) ทำให้เกลียวหนอน (injection screw) หมุนรอบตัวเองเพื่อนำผงหรือเม็ดพลาสติกเข้ามาในกระบอกฉีด (barrel) และคลุกเคล้าพลาสติกให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นแผ่นความร้อน (heater) จะหลอมเหลวผงหรือเม็ดพลาสติก เมื่อได้ปริมาณพลาสติกที่หลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันเพียงพอแล้ว เกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกนด้วยความเร็วสูง เพื่อฉีดดันพลาสติกเหลวผ่านหัวฉีด (nozzle) ให้ไหลเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ (mold) ที่จะต้องผ่านรูหัวฉีด (sprue) วิ่งไปตามทาง (runner) จนกระทั่งเจอทางเข้า (gate) ไปยังเบ้าซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของชิ้นงานที่ได้ทำการออกแบบไว้ (cavity) จนพลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มช่องว่างในแม่พิมพ์ แล้วรอจนแม่พิมพ์ทำการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์เพื่อให้เย็นตัวลง

และอยู่ในสถานะของแข็ง เสร็จแล้วจึงสามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ได้ [10] โดยชิ้นส่วนในเครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก แสดงดังรูปที่ 1



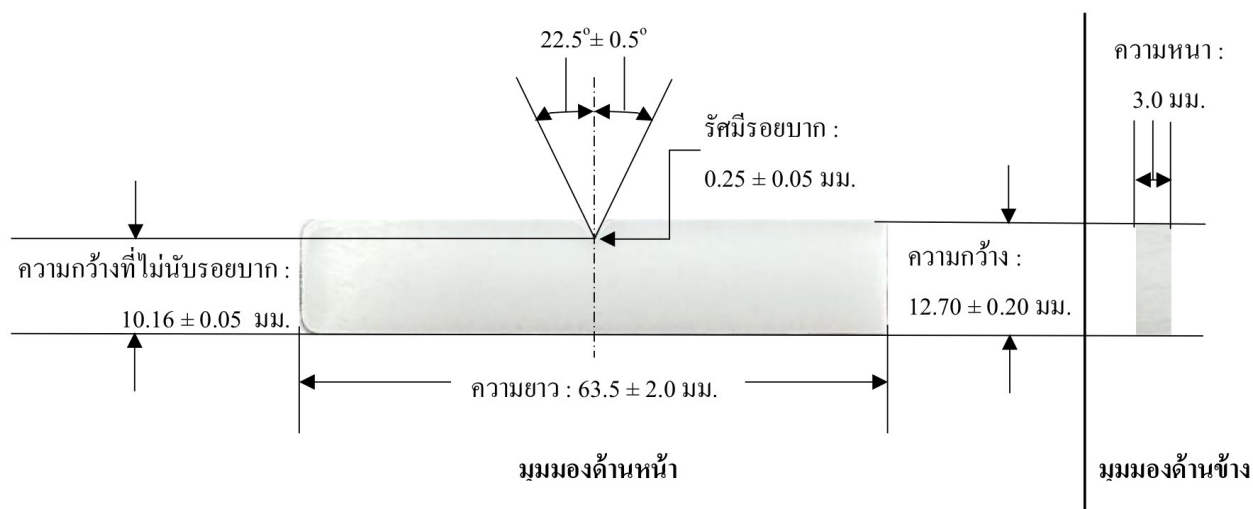
รูปที่ 1 ชิ้นส่วนในเครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก [10]

2.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกล

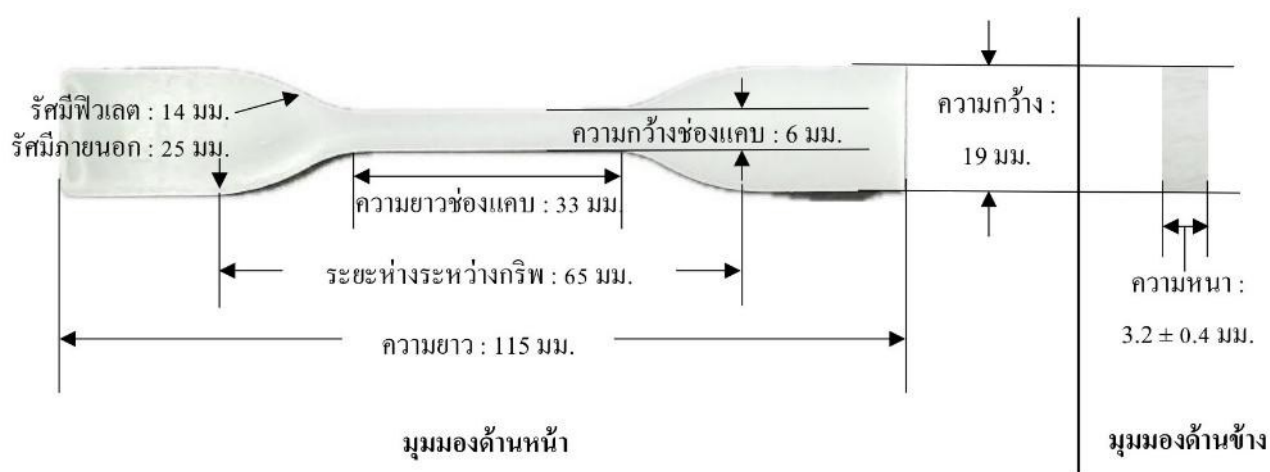
มาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับในทั่วโลก รวมถึงยังมีการทบทวน ปรับปรุง แก้ไขเพิ่มเติมอยู่ตลอดเวลา ทำให้มาตรฐานนี้มีความทันสมัยอยู่เสมอ [11] ในงานวิจัยนี้จะใช้ ASTM D256 (Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics) และ ASTM D638 (Standard test method for tensile properties of plastics) แบบที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 และแสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของมาตรฐาน ASTM D256 และ ASTM D638 [12, 13]

หัวข้อ	ASTM D256	ASTM D638	
งานทดสอบ	ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (izod impact strength)	ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (tensile strength at yield point)	ความยืดที่จุดคราก (elongation at yield point)
หน่วย	จูลต่อเมตร (Joule per meter : J/m)	เมกะปาสคาล (megapascal : MPa)	เปอร์เซ็นต์ (percent : %)
จำนวนชิ้นงานในแต่ละสถานะการทดลอง	5 ชิ้น		
รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน	ชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากรูปตัววีอยู่ตรงกลาง (แสดงดังรูปที่ 2 ก))	ชิ้นงานเป็นรูปคัมเบล แบบที่ 4 (type IV) (แสดงดังรูปที่ 2 ข))	
อัตราเร็วในการทดสอบ	—	50 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)	



ก) มาตรฐาน ASTM D256



ข) มาตรฐาน ASTM D638 แบบที่ 4

รูปที่ 2 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานในมุมมองด้านหน้าและด้านข้าง

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

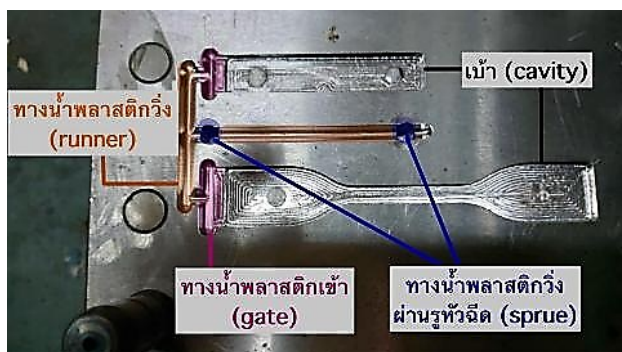
ทำการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรต่าง ๆ ของการทดลอง

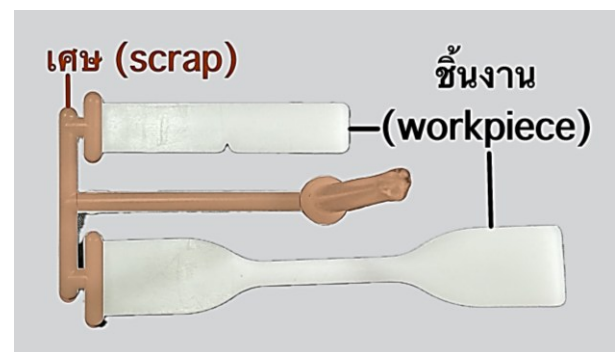
ตัวแปร		ระดับ
ตัวแปรต้น หรือ ตัวแปรอิสระ	1. จำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว (รอบ)	1 รอบ
		2 รอบ
		3 รอบ
	2. สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	10:90 30:70 50:50 70:30
ตัวแปรตาม หรือ ตัวแปร ตอบสนอง	1. ASTM D256	ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (จูลต่อเมตร)
	2. ASTM D638	ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (เมกะปาสกาล)
		ความยืดที่จุดคราก (เปอร์เซ็นต์)
ตัวแปรควบคุม	1. ใช้พลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก คือ พอลิโพรพิลีนเกรด 2300 NC 2. อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก มีค่าคงที่อยู่ระหว่าง 190 ถึง 240 องศาเซลเซียส [8] 3. ควบคุมให้ความชื้นของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วมีค่าเท่ากับกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ 4. เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว จะเข้าเครื่องบดเศษพลาสติก เพื่อบดให้เศษพอลิโพรพิลีน ละเอียดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.67 มิลลิเมตร	

3.1 วัสดุและเครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก

นำเม็ดพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์เกรด 2300 NC ใส่ลงไปในกรวยเติมพลาสติก ของเครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก รุ่น PS40E5ASE ที่แผ่นความร้อนมีกำลัง 3.8 กิโลวัตต์ และมีแรงปิดล็อกแม่พิมพ์ (clamping force) 40 ตัน ซึ่งรูปร่างแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์ เมื่อฉีดขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 3



ก) รูปร่างแม่พิมพ์



ข) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์ (เมื่อฉีดขึ้นรูปมาแล้ว)

รูปที่ 3 แม่พิมพ์

จากรูปที่ 3 (ข) จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์เมื่อฉีดขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแล้วจะประกอบไปด้วยชิ้นงาน (workpiece) และเศษ (scrap) ซึ่งเกิดจากพลาสติกหลอมเหลวและแข็งตัวแล้วจากการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ ได้แก่ ทางน้ำพลาสติกที่วิ่งผ่านรูหัวฉีด ทางน้ำพลาสติกวิ่งและทางน้ำพลาสติกก่อนที่จะเข้าสู่เบ้าของชิ้นงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะเกิด และในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเศษพอลิโพรพิลีนเหล่านี้ไปทำการทดลองแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ตาม ASTM D256 และ ASTM D638

3.2 เครื่องบดเศษพลาสติก

นำเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วเข้าเครื่องบดเศษพลาสติกเพื่อบดให้ได้เศษพลาสติกละเอียดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากต้องการให้เศษพลาสติกนั้น สามารถเข้าสู่ของกรวยเติมพลาสติกได้เพื่อให้เกลียวหนอนคลุกเคล้าเม็ดพลาสติกให้เป็นเนื้อเดียวกันได้เร็วที่สุดและให้แผ่นความร้อนหลอมเหลวเม็ดพลาสติกได้เร็วที่สุด แสดงดังรูปที่ 4



ก) เครื่องบดที่ใช้ในโรงงานเคมีศึกษา



ข) เม็ดของเศษพอลิโพรพิลีนที่ถูกบดมาแล้ว
(ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.67 มม.)

รูปที่ 4 เครื่องบดเศษพลาสติก

3.3 การผสมกันระหว่างเม็ดของเศษพลาสติกที่ถูกบดมาแล้วกับพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดเดียวกันในสัดส่วนต่าง ๆ

นำเม็ดของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว จำนวน 1, 2 และ 3 รอบ ซึ่งถูกบด โดยเครื่องบดเศษพลาสติกมาแล้ว มาผสมกับพอลิโพรพิลีน บริสุทธิ์เกรด 2300 NC ในสัดส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 10:90, 30:70, 50:50 และ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีการทดลองทั้งสิ้น 24 สภาวะการทดลอง

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานในห้องปฏิบัติการทดสอบ

นำชิ้นงานในแต่ละสภาวะการทดลองจำนวน 5 ชิ้น ไปทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ตามมาตรฐาน ASTM D256 ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและความยืดที่จุดคราก ตามมาตรฐาน ASTM D638 ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบที่ได้รับการรับรองความสามารถการทดสอบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 เนื่องจากสามารถมั่นใจได้ว่าห้องปฏิบัติการทดสอบนี้สามารถทดสอบชิ้นงานให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D256 และ มาตรฐาน ASTM D638 ได้ โดยค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน 5 ชิ้นในแต่ละสภาวะการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4

4. ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการวิจัย

จากค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่แสดงดังตารางที่ 4 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความปกติของข้อมูลพบว่าไม่มีความผิดปกติของข้อมูล หลังจากนั้นทำการทดสอบสมมติฐานหลัก (H_0) ที่ว่าปัจจัยจำนวนรอบและสัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนไม่มีผลต่อความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความยืดที่จุดคราก ผลการวิเคราะห์พบว่า จำนวนรอบ สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีน และอันตรกิริยา (interaction) นั้น มีผลต่อความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความยืดที่จุดคราก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

จากตารางที่ 4 เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ของเทอร์โมพลาสติกที่นำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้า อันได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอดสูงกว่า 126 จูลต่อเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงกว่า 23.4 เมกะปาสคาล และค่าความยืดที่จุดครากสูงกว่า 6.30 เปอร์เซนต์นั้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าการใช้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 1 รอบ ไม่ควรใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่มากกว่า 50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด จะมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อใช้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 ในทำนองเดียวกันไม่ควรใช้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 2 รอบ ที่มากกว่า 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เพราะทั้งความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและความยืดที่จุดคราก จะมีค่าลดลง ซึ่งความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก จะมีการตอบสนองที่ไวที่สุดต่อการเพิ่มสัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 สำหรับสัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 3 รอบ ไม่ควรใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่มากกว่า 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด จะมีค่าลดลง เมื่อใช้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 5, 6 และ 7 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วมากขึ้น รวมทั้งใช้เศษพอลิโพรพิลีนมากขึ้นยิ่งส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของเทอร์โมพลาสติกกรีซเทคมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่จะนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนพลาสติกของเครื่องใช้ไฟฟ้า คุณสมบัติทางกลได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และค่าความยืดที่จุดครากที่ลดน้อยลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเศษพลาสติกผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วย่อมผ่านกระบวนการที่มีความร้อนสูง ดังนั้นโมเลกุลของเศษพลาสติกนั้นหลอมเหลวและเชื่อมต่อและจับตัวกันเองได้ แต่เมื่อนำเศษพลาสติกมาผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดเดียวกัน เศษพลาสติกนี้จะผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันกับพลาสติกบริสุทธิ์ที่ยากมากขึ้น จนเกิดความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ จึงทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนหรือรอยต่อระหว่างโมเลกุลมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งแสดงรูปสัณฐานวิทยาของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เมื่อใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วที่มีจำนวนรอบมากขึ้น 1 รอบ และ 3 รอบ ตามลำดับ รวมถึงเมื่อใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วที่มีสัดส่วนมากขึ้น 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และ 70 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ชิ้นงานจะมีช่องว่างหรือรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงลดน้อยลง จึงทำให้คุณสมบัติทางกลมีค่าที่ลดน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ [4, 5, 9, 14, 15, 16, 17, 18]

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

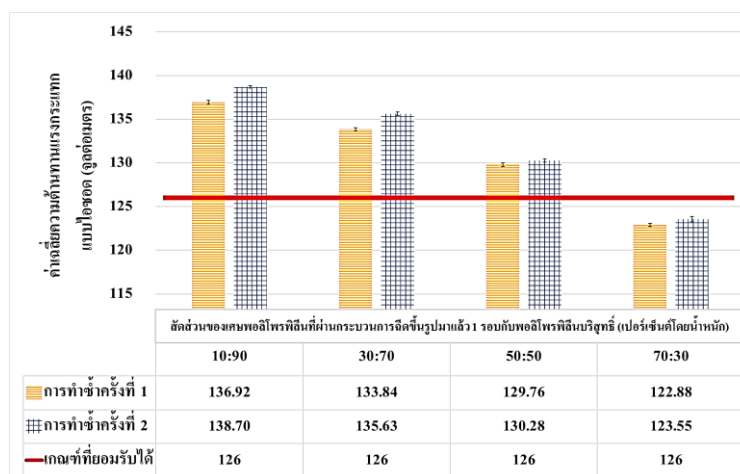
จำนวนรอบของเศษ พอลิโพรพิลีนที่ผ่าน กระบวนการฉีดขึ้นรูป มาแล้ว (รอบ)	สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีน ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป มาแล้วกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยความ ต้านทานแรงกระแทก แบบ ไอซอด (จูลต่อเมตร)	ค่าเฉลี่ยความ ต้านทานแรงดึง ที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ยความยืด ที่จุดคราก (เปอร์เซ็นต์)
1	10:90	136.92	25.0	6.76
		138.70	25.5	6.78
	30:70	133.84	24.5	6.64
		135.63	24.6	6.69
	50:50	129.76	23.6	6.39
		130.28	23.9	6.41
	70:30	122.88	23.5	6.32
		123.55	23.5	6.36
2	10:90	134.06	24.7	6.64
		136.01	24.9	6.71
	30:70	130.16	23.7	6.68
		131.44	23.9	6.58
	50:50	123.48	22.1	6.27
		124.92	22.3	6.29
	70:30	109.68	21.9	6.07
		111.44	22.1	6.11
3	10:90	129.84	23.5	6.49
		130.35	23.9	6.52
	30:70	122.04	23.4	6.36
		125.72	23.5	6.39
	50:50	115.52	21.1	6.13
		116.82	21.4	6.15
	70:30	103.08	19.5	5.98
		105.42	20.3	6.03

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล โดยเรียงจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดไปยังผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด อีกทั้งยังยอมรับได้ต่อการนำไปผลิตขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า

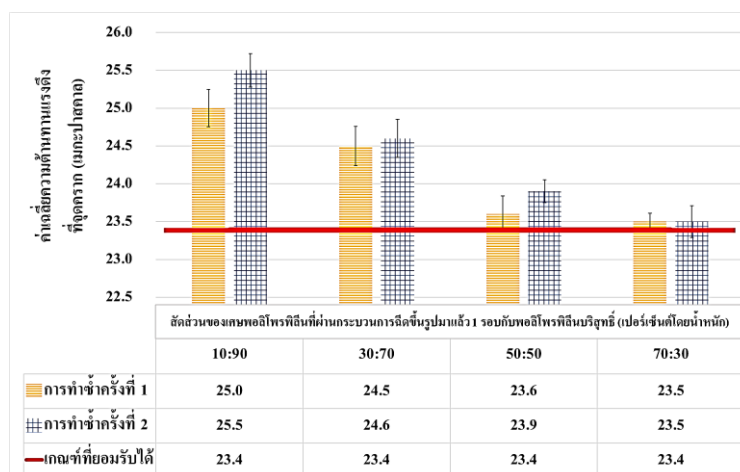
จำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว (รอบ)	สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงกระแทกแบบ ไอซอด (จูลต่อเมตร)	ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ยความยืดที่จุดคราก (เปอร์เซ็นต์)
1	10:90	136.92	25.0	6.76
		138.70	25.5	6.78
	30:70	133.84	24.5	6.64
		135.63	24.6	6.69
	50:50	129.76	23.6	6.39
		130.28	23.9	6.41
2	10:90	134.06	24.7	6.64
		136.01	24.9	6.71
	30:70	130.16	23.7	6.68
		131.44	23.9	6.58
3	10:90	129.84	23.5	6.49
		130.35	23.9	6.52
เกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ต่อการนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น โครงของพัดลมพกพา		≥ 126	≥ 23.4	≥ 6.30

ตารางที่ 6 จำนวนรอบและสัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วที่ยอมรับได้ต่อการนำไปผลิตขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า

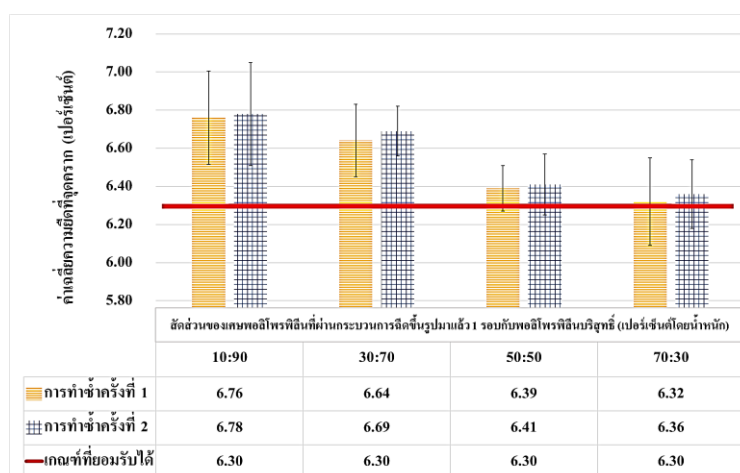
จำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว (รอบ)	สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
1	10	30	50*
2	10	30*	
3	10*		



ก) ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด

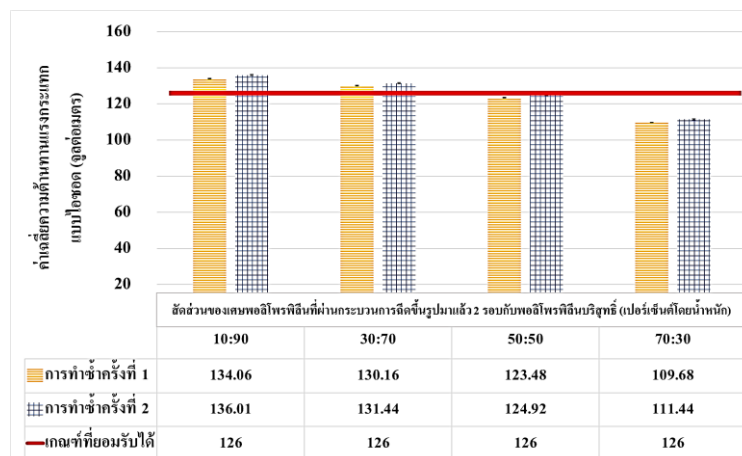


ข) ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก

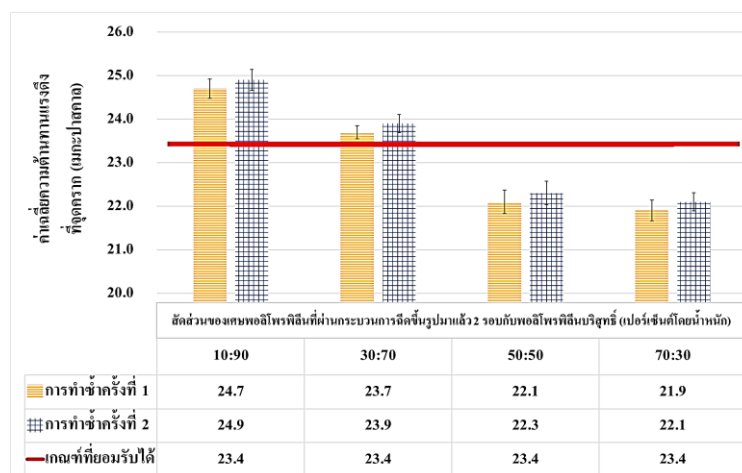


ค) ความยึดที่จุดคราก

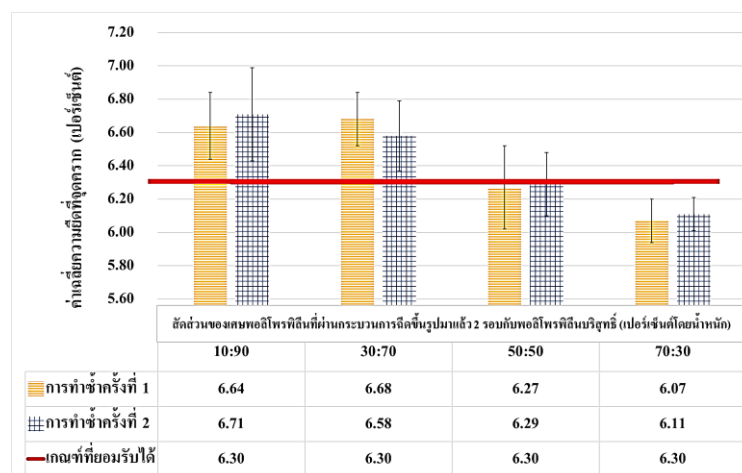
รูปที่ 5 เกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ของเทอร์โมพลาสติกที่นำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อใช้สัดส่วนของเศษพอลิโพรฟิเลินที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 1 รอบกับพอลิโพรฟิเลินบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



ก) ความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด

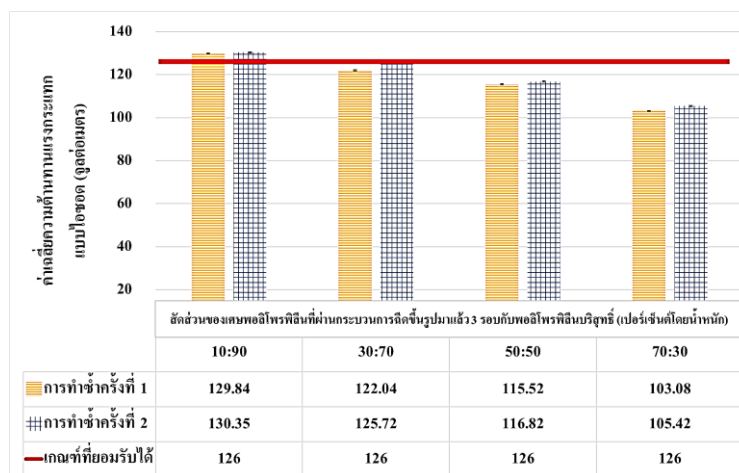


ข) ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก

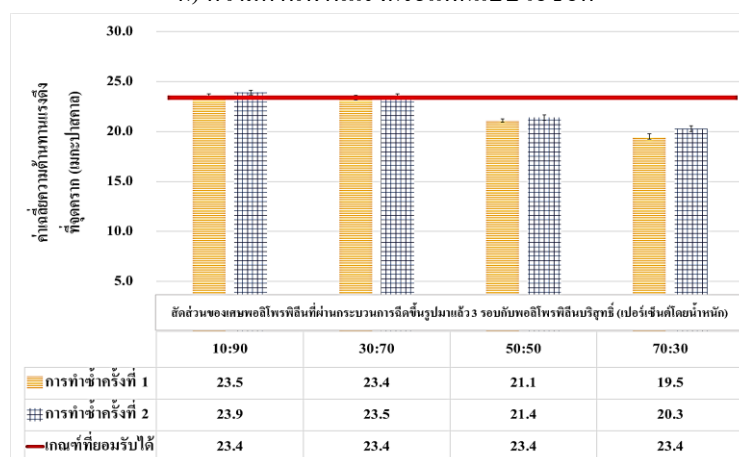


ค) ความยืดที่จุดคราก

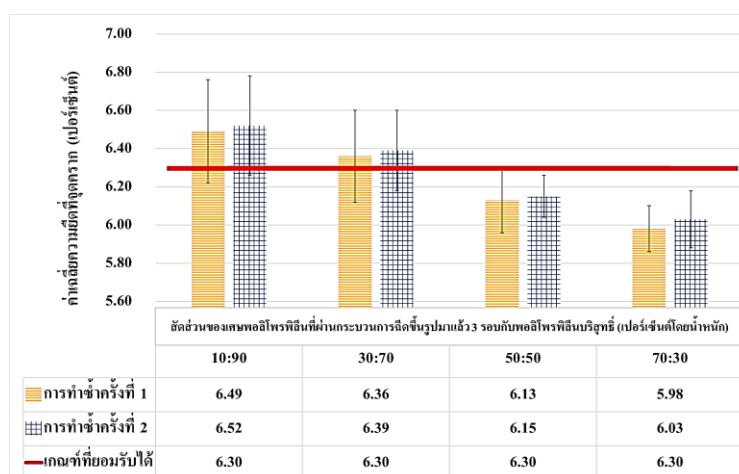
รูปที่ 6 เหน้ที่คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ของเทอร์โมพลาสติกที่นำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อใช้สัดส่วนของ เศษพอลิพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 2 รอบกับพอลิพรพิลีนบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



ก) ความต้านทานแรงกระแทกแบบ ไอชอด

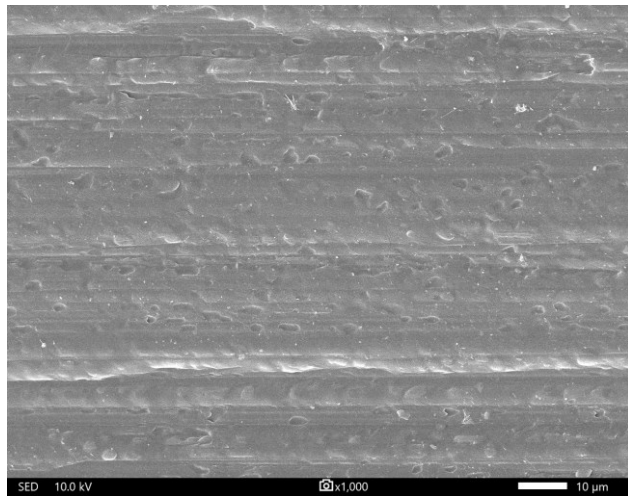


ข) ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก

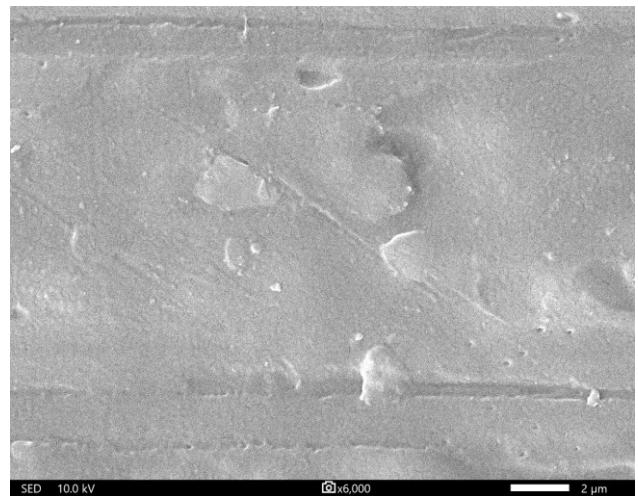


ค) ความยืดที่จุดคราก

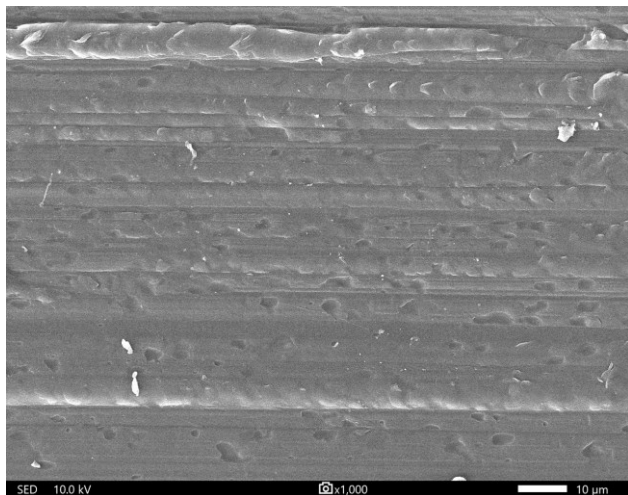
รูปที่ 7 เหน้คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ของเทอร์โมพลาสติกที่นำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อใช้สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 3 รอบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



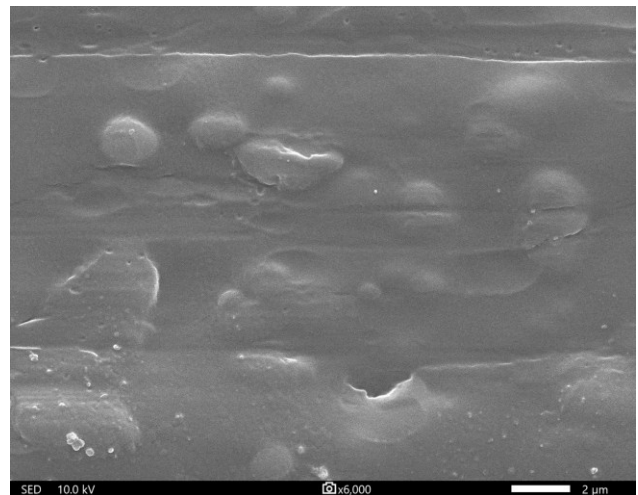
ก) สัณฐานที่ 10 เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า



ข) สัณฐานที่ 10 เมื่อใช้กำลังขยาย 6000 เท่า

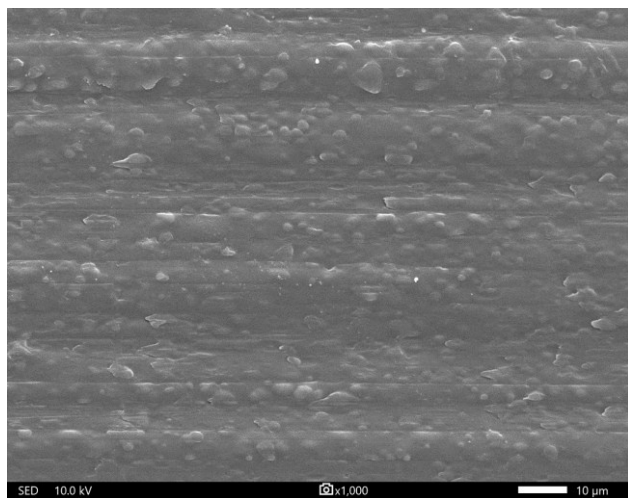


ค) สัณฐานที่ 70 เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

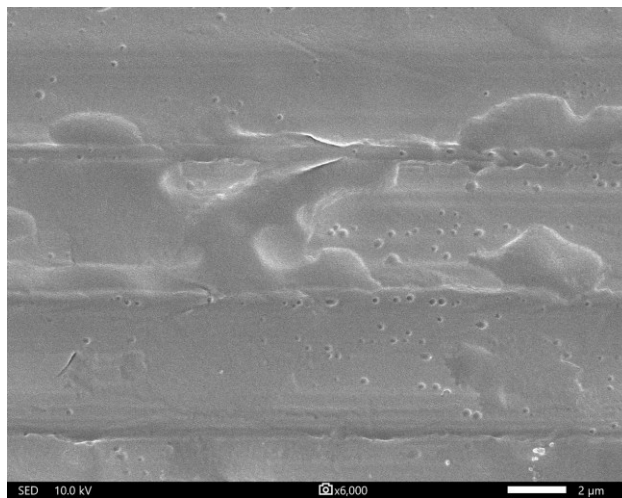


ง) สัณฐานที่ 70 เมื่อใช้กำลังขยาย 6000 เท่า

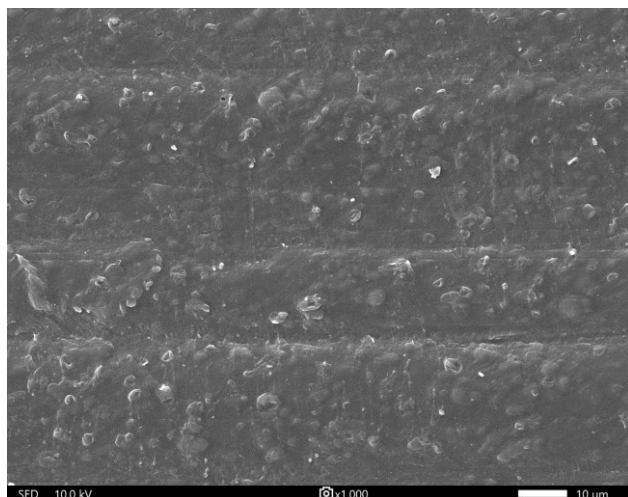
รูปที่ 8 สัณฐานวิทยาของชิ้นงาน เมื่อมีสัณฐานเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 1 รอบ
(ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)



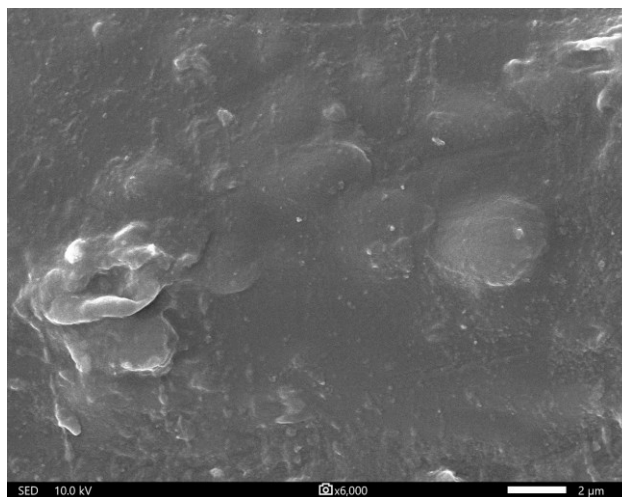
ก) สัดส่วนที่ 10 เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า



ข) สัดส่วนที่ 10 เมื่อใช้กำลังขยาย 6000 เท่า



ค) สัดส่วนที่ 70 เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า



ง) สัดส่วนที่ 70 เมื่อใช้กำลังขยาย 6000 เท่า

รูปที่ 9 สัณฐานวิทยาของชิ้นงาน เมื่อมีสัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป 3 รอบ
(ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การนำเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว จากการแข็งตัวของพลาสติกที่หลอมเหลวในแม่พิมพ์ ตรงทางน้ำ พลาสติกที่วิ่งผ่านรูหัวฉีด ทางน้ำพลาสติกวิ่งและทางน้ำพลาสติกก่อนที่จะเข้าสู่เบ้าของชิ้นงาน กลับมาใช้ใหม่โดยการนำไปผสม กับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ชนิดเดียวกัน เพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนพลาสติกรีไซเคิลนั้น เป็นการลดของเสียต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความต้องการของคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (จุดต่อเมตร) ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล) และค่าความยืดที่จุดคราก (เปอร์เซ็นต์) ด้วย พลาสติกรีไซเคิลที่มีคุณภาพดีมักนำไปใช้ สำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น โครงของพัดลมพกพา งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่มุ่งเน้น 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 ได้แก่ สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ซึ่งมีสัดส่วนที่ 10:90, 30:70, 50:50 และ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปัจจัยที่ 2 เป็นจำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว ได้แก่

1, 2 และ 3 รอบ จากตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้จำนวนรอบของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วมากขึ้นทุกๆ 1 รอบ จะส่งผลให้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ต่อการนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ลดลง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยืนยันได้ว่าไม่ควรใช้เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วเกิน 3 รอบ ทั้งนี้สัดส่วนที่ยอมรับได้ต่อการนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า มีดังนี้

- 1) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 1 รอบ สามารถใช้สัดส่วนที่ 10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 2) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 2 รอบ สามารถใช้สัดส่วนที่ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3) เศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว 3 รอบ สามารถใช้สัดส่วนที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เท่านั้น

จากตารางที่ 6 แสดงจำนวนรอบและสัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้วที่ยอมรับได้ต่อการนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ในการเลือกสัดส่วนที่จะนำไปใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าในแต่ละรอบนั้น ควรใช้สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่มากที่สุด เนื่องจากเป็นการใช้เศษพลาสติกให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปริมาณขยะพลาสติกมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซื้อพลาสติกบริสุทธิ์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอีกด้วย ดังนั้นควรใช้สัดส่วนของเศษพอลิโพรพิลีนรอบที่ 1 ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนรอบที่ 2 ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนรอบที่ 3 ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 6 สัดส่วนเศษพอลิโพรพิลีนที่ควรเลือกใช้ขึ้นเครื่องหมายดอกจัน 1 ตัว (*) ในแต่ละแถวของจำนวนรอบเศษพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาแล้ว

ข้อเสนอแนะสำหรับเทอร์โมพลาสติกรีไซเคิลที่มีคุณภาพและมีค่าคุณสมบัติทางกลที่ต่ำ สามารถนำไปฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ จำพวกขันน้ำ ถังใส่กระดาษชำระ ที่ต้องการค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอดสูงกว่า 112 จูลต่อเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงกว่า 20.8 เมกะปาสกาล และค่าความยืดที่จุดครากสูงกว่า 5.60 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณละม่อม ฤกษ์ดี คุณปณิศา ฤกษ์ดี และคุณนรินทร์ จันทร์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อโรงงานกรณีศึกษาในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก พร้อมทั้งให้คำแนะนำแก่ผู้เขียน เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุริย์พร นิพัทธวิทยา. *ขยะกำพร้าว้า ขยะพลาสติก*. กรุงเทพมหานคร: คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2565.
เข้าถึงได้จาก <https://ir.swu.ac.th/jspui/handle/123456789/24788> [ค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2566].
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. *พลาสติกรีไซเคิล*. เข้าถึงได้จาก <https://www.mtec.or.th/bioplastic/recycled-plastic/> [ค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2566].
- [3] Goodship, V. Plastic Recycling. *Science Progress*, 2007, 90 (4), pp. 245-268. DOI: <https://doi.org/10.3184/003685007X228748>
- [4] Tesfaw, S., Bogale, T. M. and Fatoba, O. Evaluation of tensile and flexural strength properties of virgin and recycled high-density polyethylene (HDPE) for pipe fitting application. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62, pp. 3103-3113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.385>
- [5] Latko-Duralek, P., Dydek, K. and Boczkowska, Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, 27, pp. 2600-2606. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6>
- [6] Tai, H.-S. and Yeh, J.-L. Evaluation and verification of the virgin–recycled mixing ratio of polypropylene plastic. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2018, 41(1), pp. 69-75. DOI: <https://doi.org/10.1080/02533839.2017.1419074>
- [7] Huang, P.-W. and Peng, H.-S. Number of Times Recycled and Its Effect on the Recyclability, Fluidity and Tensile Properties of Polypropylene Injection Molded Parts. *sustainability*, 2021, 13 (19). DOI: <https://doi.org/10.3390/su131911085>
- [8] IRPC Public Company Limited. *Polypropylene Impact Copolymer (ICPP) 2300NC: Technical Data Sheet*, 2022.
Available from: https://polimaxx.irpc.co.th/wp-content/uploads/2022/09/pp_2300NC_20221010.pdf [Accessed 20 July 2023].
- [9] Meglio, E., Davino, A. and Formisano, A. Experimental Tests on Lightweight Cement Mortar and Concrete with Recycled Plastic Wastes. *buildings*, 2023, 13 (15). DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13051181>
- [10] วิโรจน์ เศรษฐวิญญธรรม. *งานฉีดพลาสติก*. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2560.
- [11] จารุณี วิวัชรโกเศศ. เอกสารมาตรฐาน ASTM. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 2541, 46 (147), หน้า 23-25.
เข้าถึงได้จาก http://siweb1.dss.go.th/dss_doc/dss_doc/show_discription_doc.asp?ID=1461 [ค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2566].
- [12] ASTM International. ASTM D256: 2010. *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. United States, 2010.
- [13] ASTM International. ASTM D638: 2014. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. United States, 2014.
- [14] Kadac, K. and Nowaczyk, J. Wpływ procesu recyklingu na właściwości poli (tereftalanu etyleny). *Przetwórstwo Tworzyw*, 2015, 21(4), pp. 392-332. Available from: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-b77a5b46-c988-44e2-bb05-a7c84b55dbc3/tab/summary> [Accessed 18 October 2023].
- [15] บุญมาศ วอขวา. *การแปรรูปเศษเมลามีนเป็นวัตถุดิบรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เมลามีน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2559.
- [16] Siwadamrongpong, S., Mahai, M. and Wonglane, K. Study on properties of recycled materials from waste melamine.
In: *South East Asian Technical University Consortium (SEATUC)*, KMUTT Bangkok Thailand, 6-7 March 2012.
- [17] Siwadamrongpong, S., Wonglane, K. and Mahai, M. Influence of forming temperature and waste melamine content on flexural strength of recycled material from waste melamine. In: *South East Asian Technical University Consortium (SEATUC)*, Institut Teknologi Bandung Indonesia, 4-6 March 2013
- [18] Arostegui, A., Sarrionandia, M., Aurrekoetxea, J. and Urrutibeascoa, I. Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile–butadiene–styrene copolymer. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(11), pp. 2768-2774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.03.019>