การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผสมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง

Identifying the Optimal Factors in Mixing of Composite Material between Polypropylene with Nano Rubber by using Design of Experiment (DOE) Technique.

ฤทธิชัย สังฆทิพย์[1] ระพี กาญจนะ[1] ศรีไร จารุภิญโญ[1] และนที ศรีสวัสดิ์[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบ General Factorial ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ปริมาณยางอนุภาคนาโนโดยน้ำหนักที่ 1 , 3 , 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบในการผสมที่ 40,60 และ80 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการผสมที่ 180 และ 200 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยต่างๆโดยใช้วิธีวิเคราะห์ผล ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV จากผลการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนคือที่ปริมาณยางอนุภาคนาโน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมที่ 40 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการผสม 180 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : การทดลองเชิงแฟคทอเรียล, กระบวนการผสมวัสดุเชิงประกอบ, ยางอนุภาคนาโน

Abstract

The objective of this research was the identifying the optimal factors in mixing of composite material between polypropylene with nano rubber using design of experiment (DOE) technique. We used the general factorial design which consists of three main factors: (1) Nano Rubber by weight at 1, 3, 5, and 7% (2) Speed of mixing at 40, 60 and 80 rpm (3) Temperature at 180° C and 200° C. In the study of the factors analyzed by ANOVA analysis, we used the statistical confidence level at 95 percent of specimens tested with the standard ASTM D 638 Type IV. The results showed that the most appropriate factors are the rubber particles of 1% by weight, speed of mixing at 40 rpm and the temperature of a 180°C.

Keywords : Factorial design, Composite material mixing, Nano rubber

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[1]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่อำนวยความสะดวกให้แก่มวลมนุษย์ ทั้งในเรื่องรูปแบบของผลิตภัณฑ์ การตอบสนองด้านการใช้งาน ความคงทนถาวร ตลอดจนราคาที่เหมาะสม เกือบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกทั้งนั้น ถึงแม้ว่าจะมีจุดเด่นและให้ความพึงพอใจแก่มวลมนุษย์ได้เท่าไรก็ตาม แต่ปัญหาด้านสมบัติของพลาสติก ชนิดต่างๆที่ยังเป็นประเด็นปัญหาที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันแล้วว่าต้องหาวิธีการแก้ไขอย่างเร่งด่วน พลาสติกบางชนิดมีความแข็งสูงแต่ว่าเปราะทำให้ต้องทำศึกษาเพื่อปรับปรุงความเหนียวให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะการปรับปรุงพอลิพรอพิลีน เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีปริมาณการใช้มากจึงมีการปรับปรุงความเหนียวของพลาสติกชนิดดังกล่าว โดยมากจะเป็นการเติมยาง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการเติมยางอนุภาคนาโน ยางดังกล่าวผลิตจากน้ำยางที่ถูกทำการสังเคราะห์ให้มีขนาดเล็กมาก จากนั้นจะถูกทำให้เกิดการ Irradiation crosslink จนได้ยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 100–200 นาโนเมตร ซึ่งขนาดดังกล่าวจะช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยางมีสมบัติที่จะช่วยเพิ่มความเหนียวทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวมากขึ้น

ปัจจุบันได้มีการพยายามนำวัสดุต่างๆ ทั้งโลหะ อโลหะ ไม้ ยาง ฯลฯ มาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆให้กับพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น สมบัติทางกล และสมบัติทางด้านความร้อนเป็นต้น ซึ่งเรียกว่าพอลิเมอร์ผสม โดยมีงานวิจัยต่างๆที่นำวัสดุมาผสมกับพอลิเมอร์ เช่น ผสม UFPR และ SBS ในพอลิพรอพิลีนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและต้านทานความร้อน [1], ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ในเส้นใยเสริมแรงพอลิโพลิเฟนิลีนซัลไฟด์ (PPS) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสียดทาน [4], ผสมผงทองแดงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) และพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า [5], ผสมผงสังกะสีในพอลิเอทธิลีนเพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านความร้อน [6], ผสมเปลือกหอยแครงในพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพื่อเพิ่มความแข็งและเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก [3], ผสมอลูมิเนียมฟอยล์กับพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพื่อความแข็ง [2], ผสม M_0S_2, Al_2O_3, CuS และธาตุอื่นๆ ในพอลิเอทธิลีนซัลไฟล์เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสียดทานและการสึกหรอ [9] การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลีเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสุญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง [8] เป็นต้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำยางอนุภาคนาโน (Elastomeric nano particle (ENP)) มาเติมลงในพอลิพรอพิลีน เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียว โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตถังใส่น้ำที่ทำจากพอลิพรอพิลีนที่มีขนาดบางมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณการใช้พลาสติกลง

2. การทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบ General Factorial Design (การทดลองแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย) ซึ่งได้แบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตัวแปรอิสระประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ปริมาณยางอนุภาคนาโนที่ผสมมี 4 ระดับคือ 1 , 3 ,5 , และ 7%โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมมี 3 ระดับคือ 40 , 60 และ80 rpm และอุณหภูมิในการผสมมี 2 ระดับคือ 180 °C และ 200 °C ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรตามในงานวิจัยนี้คือค่าการต้านทานต่อแรงดึงและค่าการต้านทานแรงกระแทก ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโน โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการทดลองรวมทั้งสิ้น 48 การทดลอง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องในการทดลอง เพื่อไม่ให้เกิดตัวแปรแทรกซ้อน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลองมากยิ่งขึ้น

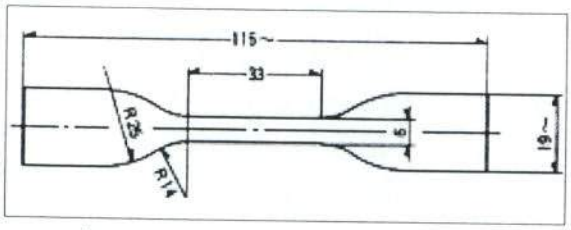
[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

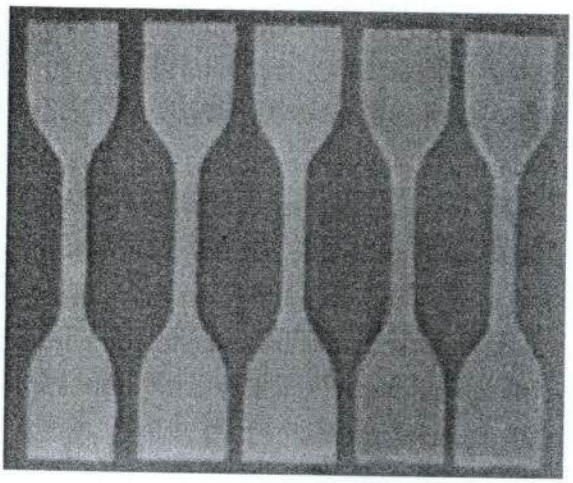
ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)
ปริมาณยางอนุภาคนาโน	1 %
	3 %
	5 %
	7 %
ความเร็วรอบในการผสม	40 rpm
	60 rpm
	80 rpm
อุณหภูมิในการผสม	180 °C
	200 °C

2.2 ชิ้นงานในการทดสอบ

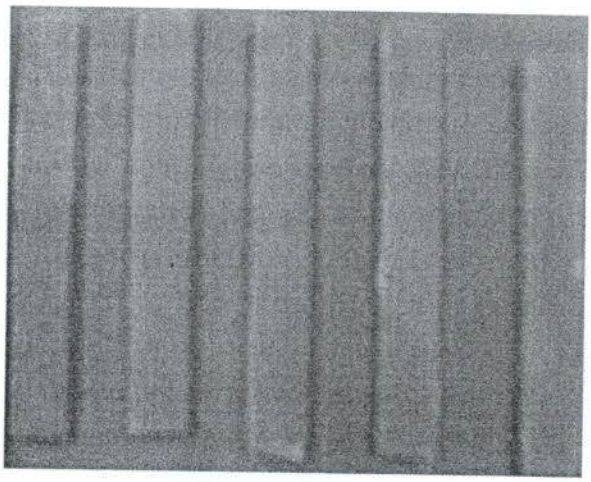
จากรูปภาพที่ 1 ขนาดของชิ้นงานในการทดสอบวัสดุในการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV



รูปที่ 1 Dumbbell ตาม ASTM D 638 Type IV

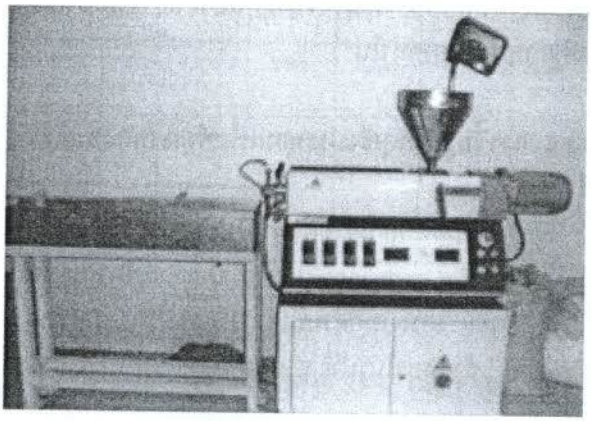


รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ



รูปที่ 4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวนอนเดี่ยว (Lab Tech Engineering)

3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 การผสมพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโน

การผสมพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนโดยเริ่มจากการนำยางอนุภาคนาโนมาผสมกับเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนเกรด H255JA ในสัดส่วนพลาสติกพอลิพรอพิลีนต่อยางอนุภาคนาโนที่ 100:0 99:1 97:3 95:5และ 93:7 หลังจากนั้นผสมให้เป็นวัสดุคอมปาวด์ (compound) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวนอนเดี่ยว (Single screw

extruder) ที่ความเร็วรอบในการผสมคือ 40 , 60 และ80 rpm และอุณหภูมิในการผสมคือ 180 °C และ 200 °C ตามลำดับ ทำการตัดเป็นเม็ดพลาสติก และนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป (Lab Tech Engineering)อุณหภูมิในการขึ้นรูป 190 °C ที่ความดัน 125 Kg/cm^3 ให้ความร้อนก่อนอัดขึ้นรูป (preheating) 5 นาที เวลาในการอัดขึ้นรูป (pressing) 6 นาที และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (rapid cooling) โดยแท่นหล่อเย็นเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นรอให้ชิ้นงานเย็นตัวในอุณหภูมิห้องได้ชิ้นงานตามมาตรฐาน แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (บริษัท Monsanto รุ่น T2000) แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรม Mini tab เพื่อศึกษาหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโน

3.1.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเพื่อทำการทดสอบแรงดึง

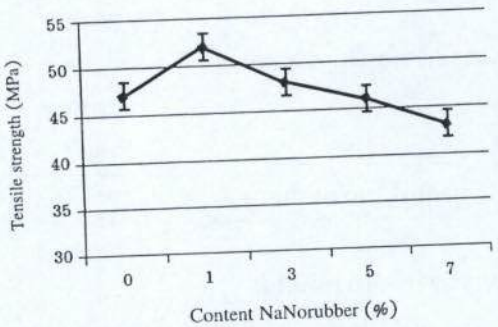
นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผสมได้ไปขึ้นรูปโดยวิธี เครื่องอัดขึ้นรูป (Hot pressing) โดยใช้ Dumbbell และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3

4. ผลการทดลอง

จากการทดลองหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโน ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ ปริมาณยางอนุภาคนาโนที่ 1, 3, 5, และ 7 %โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมที่ 40, 60 และ 80 rpm และอุณหภูมิในการผสม 180 °C และ 200 °C ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง

จากการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูป Dumbbell ตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV ความเร็วรอบในการผสมที่ 40 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการผสม 180 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 มาทดสอบแรงดึงจากชิ้นงานทั้งหมดพบว่า

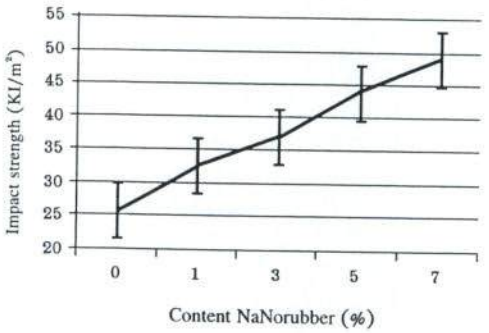


รูปที่ 5 ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการต้านทานแรงดึงกับปริมาณของยางอนุภาคนาโนในวัสดุผสม พบว่าในตอนต้นที่ปริมาณการผสมยาง 1% ค่าการต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากรูป จะเห็นได้ว่าที่พอลิพรอพิลีนเพียงอย่างเดียว (สัดส่วนของยาง 0%) ค่าการต้านทานแรงดึงของพอลิพรอพิลีนคือ 47 MPa เมื่อเติมยางลงไป 1% พบว่า ค่าการต้านทานแรงดึงมีค่าเท่ากับ 52 MPa ที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจากในสัดส่วนนี้ยางทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเหนียว เมื่อได้รับแรงกระทำอนุภาคยางจะทำหน้าจะช่วยหยุดยั้งการเกิดการเสียรูปเมื่อพอลิเมอร์เกิด micro crack เพราะถูกแรงกระทำพิจารณาที่ปริมาณยางมากขึ้นเป็น 3, 5, และ 7% ค่าการต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม แนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจากปริมาณยางมากขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ยืดหยุ่น (Ductile) มากขึ้นส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง

4.2 ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

จากการนำชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบในการผสมที่ 40 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการผสม 180 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3 มาทำการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก จากชิ้นงานทั้งหมดพบว่า



รูปที่ 6 ค่าการต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)

จากรูปที่ 6 พบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกเมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนเพียงอย่างเดียว (สัดส่วนของยาง 0%) ที่มีค่าการต้านทานแรงกระแทกเท่ากับ 25.72 KJ/m^2 ขณะที่พอลิเมอร์ผสม ที่เติมยางอนุภาคนาโนลงไปมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆและมากที่สุดที่ 7% มีค่าการต้านทานแรงกระแทกเท่ากับ 48.87 KJ/m^2 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ยางชนิดนี้มีขนาดเล็กมาก กล่าวคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5–1 ไมโครเมตร ทำให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอได้ดีเมื่อผสมกับพอลิพรอพิลีน

4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ผล ANOVA โดยการอ่านค่า P-Value ที่ได้ จากตาราง ANOVA ว่าค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมปัจจัยใดที่มีค่าน้อยกว่าค่า α = 0.05 แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดึงและค่าการต้านทานแรงกระแทก หรือหากค่ามากกว่า α = 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดึงและค่าการต้านทานแรงกระแทก เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดึงและค่าการต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่

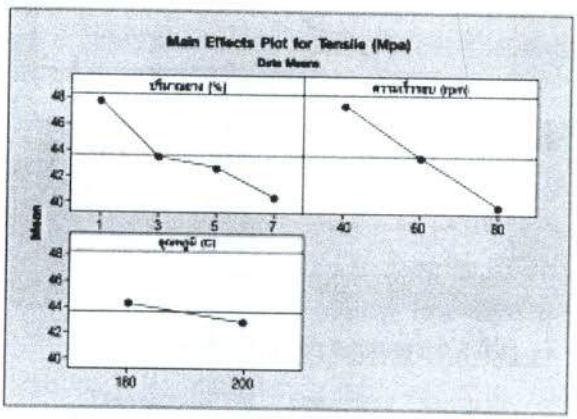
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ ANOVA ของค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	351.071	351.071	117.024	12622.76	0.000
B	2	484.533	484.533	242.267	26132.13	0.000
C	1	16.33	16.33	16.333	1761.80	0.000
A*B	6	6.588	6.588	1.098	118.44	0.000
A*C	3	4.283	4.283	1.428	153.98	0.000
B*C	2	2.332	2.332	1.166	125.77	0.000
A*B*C	6	2.582	2.582	0.430	46.42	0.000
Error	24	0.222	0.22	0.009		
Total	47	867.945				

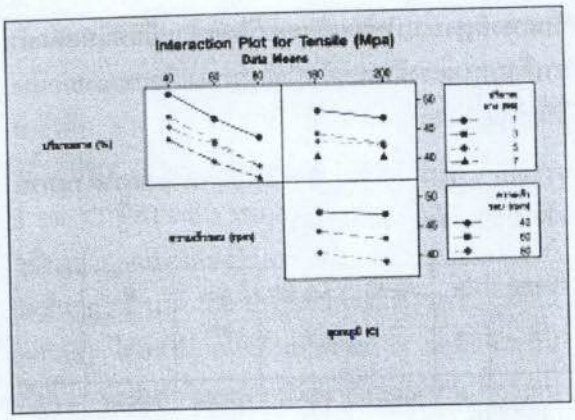
A : ปริมาณยางอนุภาคนาโน B : ความเร็วรอบในการผสม

C : อุณหภูมิในการผสม

S = 0.0962852 R-Sq = 99.97% R-Sq (adj) = 99.95%



รูปที่ 7 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก



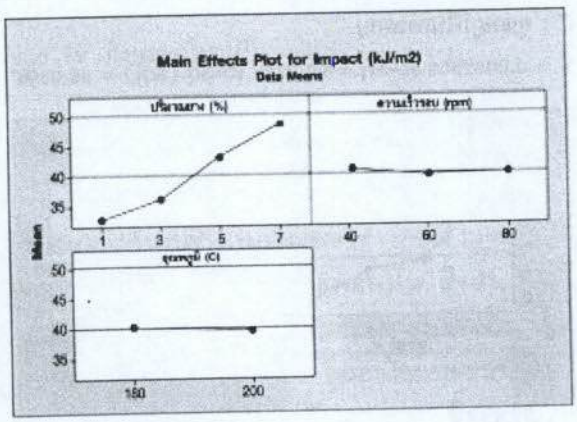
รูปที่ 8 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม

จากผลการทดลองการทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก ทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณยางอนุภาคนาโน ความเร็วรอบในการผสมและอุณหภูมิในการผสมจากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ค่าการทดสอบของการต้านทานแรงดึง พบว่าปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนคือที่ปริมาณยางอนุภาคนาโน 1% โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมที่ 40 rpm และอุณหภูมิในการผสม 180 °C

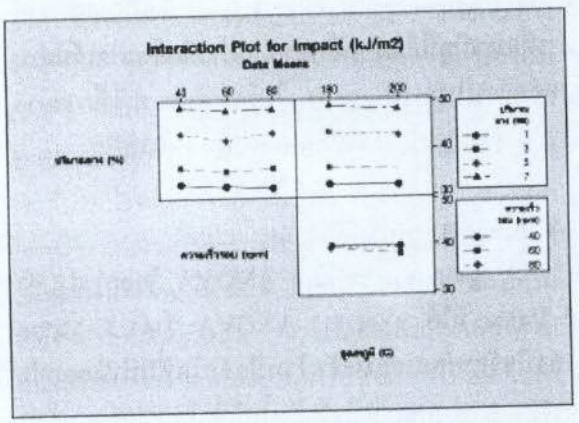
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ ANOVA ของค่าการต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	1586.961	1586.961	528.987	9109.01	0.000
B	2	61.965	61.965	30.983	533.51	0.000
C	1	2.906	2.906	2.906	50.04	0.000
A*B	6	0.355	0.355	0.355	6.11	0.001
A*C	3	0.146	0.146	0.146	2.52	0.082
B*C	2	0.211	0.211	0.211	3.64	0.042
A*B*C	6	0.170	0.170	0.170	2.93	0.028
Error	24	0.058	0.058	0.058		
Total	47	1657.236				

A : ปริมาณยางอนุภาคนาโน B : ความเร็วรอบในการผสม
C : อุณหภูมิในการผสม
S = 0.240983 R-Sq = 99.92% R-Sq (adj) = 99.84%



รูปที่ 9 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก



รูปที่ 10 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม

จากผลการทดลองการทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก ทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณยางอนุภาคนาโน ความเร็วรอบในการผสมและอุณหภูมิในการผสมจากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 พบว่าค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก พบว่าปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนคือที่ปริมาณยางอนุภาคนาโน 7% โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมที่ 40 rpm และอุณหภูมิในการผสม 180 °C

5. สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยและการทดลองการศึกษาหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองจากผลการทดลองที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้คือ 1.ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางอนุภาคนาโนคือที่ปริมาณยางอนุภาคนาโน 1% โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบในการผสมที่ 40 rpm และอุณหภูมิในการผสม 180 °C เนื่องจากลดต้นทุนของยางอนุภาคนาโนที่นำมาผสมกับพอลิพรอพิลีน 2.จากงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ระพี กาญจนะ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ ผศ.ศรีไร จารุภิญโญ คณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน เพื่อนห้อง M53IE ทุกๆคน ที่ให้ความอนุเคราะห์ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆตลอดจนพระคุณบิดามารดาที่ให้กำลังใจในทุกๆ เรื่องเสมอมา อีกทั้งทุกๆ กำลังใจที่ไม่ได้กล่าวถึง

เอกสารอ้างอิง

[1] Yiqun Liu, Xiaohong Zhang, **Toughening of polypropylene by combined rubber system of ultrafine full-vulcanized powdered rubber and SBS**, Plastic Processing Center, SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry, 2004

[2] สมนึก สังข์หนู, เจษฎา วงษ์อ่อน, 2551. **การศึกษาเส้นใยผสมระหว่างพอลิเอทธิลีนกับอลูมิเนียมฟอยล์นำกลับมาใช้ใหม่**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[3] สุภาพรณ์ ทุ่มสอน, 2544. **ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง กระบวนการผลิต และสมบัติของพอลิเอทธิลีนที่ผสมกับเปลือกหอยแครง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาเทคโนโลยีวัสดุ, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[4] M.H. Cho, S. Bahadur , 2004 "**Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites**" Research Department of Mechanical Engineering, Iowa State University,USA.

[5] A.S. Luyt, J.A. Molefi and H. Krump, 2005 "**Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites**" Research Department of Chemistry, University of the Free State, South Africa.

[6] RUSU Mihai, SOFIAN Nicoleta and RUSU Daniela 2000 **"Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites"** Research of Technical University, Faculty of Industrial Chemistry, Romania.

[7] ฉนนัช พระพุทธคุณ, 2552. **การศึกษาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง,** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[8] จักรพันธ์ ตันศรีวงษ์, 2553. **การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลีเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสุญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง,** วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[9] M.H. Choa, S. Bahadura *and* A.K. Pogosianb, 2005 **"Friction and wear studies using Taguchi method on polyphenylene" sulfide filled with a complex mixture of MoS_2, Al_2O_3,and other compounds"** Research Department of Mechanical Engineering, Iowa State University USA.