

การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสม แป้งข้าว/แกลบข้าว/พอลิเอทิลีน

Determination of Suitable Processing Conditions for Injection Molding of Biopolymer Blends: Rice Starch/Rice Chaff/ Polyethylene

ศิริลักษณ์ พานโคกสูง^{1*} และ จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 47000

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 042 725033, โทรสาร: 042 725034

E-mail: siriluk.ph@gmail.com, fengchar@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ ได้แก่ แป้งข้าว (Rice starch; RS) และแกลบข้าว (Rice chaff; RC) ซึ่งใช้สารเติมแต่งจากสูตรทางการค้า 5% กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อัตราส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ:LDPE เท่ากับร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนผสมดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นผิวเกิดการแยกเฟสน้อยที่สุด ได้ชิ้นงานสมบูรณ์ เต็มแม่แบบ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ 2⁵ และใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของ RS:LDPE คือ ใช้ความเร็วในการฉีด 80% ความดันฉีดสูงสุด 40 บาร์ ความดันย้ำ 60 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียส ได้ค่าความแข็งแรงดึง 15.62 เมกกะปาสคาล กรณี RC:LDPE ความเร็วในการฉีด 45% ความดันฉีดสูงสุด 85 บาร์ ความดันย้ำ 75 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียส ได้ค่าความแข็งแรงดึง 13.95 เมกกะปาสคาล จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการหมุนรอบของสกรูไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมทั้งสองสูตร

คำหลัก: การฉีดขึ้นรูป, พอลิเมอร์ชีวภาพผสม, ความแข็งแรงดึง, การทดลองเชิงแฟคทอเรียล

Abstract

This research presents the study of injection molding of biopolymer blends between biomaterials, rice starch (RS) and rice chaff (RC), prepared with 5% of commercial formula additive and Low density polyethylene (LDPE). The percentage ratio between biomaterials and LDPE used in this study is 70:30 by weight. At this ratio, the specimen surfaces show the minimum phase separation, mostly homogeneous surface, and specimens are molded completely. This research investigated the effects of parameter values and the optimal values of effecting parameters for injection molding. The 2⁵ Full factorial

experiments were used to design the experimental setup and Analysis of Variance (ANOVA) was used to analyze the tensile strength on ASTM standards. The results showed that the effecting parameters and suitable processing conditions of the RS/LDPE blend at the tensile strength of 15.62 MPa were 80% of injection speed, 40 bars of injection pressure, 60 bars of holding pressure, and 175 °C of melting temperature. The suitable processing conditions of the RC/LDPE blend at the tensile strength of 13.95 MPa were 45% of injection speed, 85 bars of injection pressure, 75 bars of holding pressure, 175 °C of melting temperature. The screw rotational speeds do not affect on tensile strengths of both biopolymers.

Keywords: injection molding, biopolymer blends, tensile strength, factorial experiment design

1. บทนำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene ; LDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย เนื่องจากสามารถขึ้นรูปง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมี แต่เมื่อเสื่อมคุณภาพก็กลับกลายเป็นขยะที่ต้องใช้ระยะเวลาอันเป็นสิบปีในการย่อยสลาย ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตใหม่ๆ ที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ได้มีการใช้พลาสติกย่อยสลาย แต่ปัจจุบันถือว่ายังจำกัดอยู่ในวงแคบ ปัจจัยอย่างหนึ่งคือปัญหาทางการผลิตที่มีต้นทุนทางเทคโนโลยีสูงเมื่อเทียบกับการผลิตพลาสติกแบบดั้งเดิม ดังนั้นอีกหนทางหนึ่งที่มีผู้ให้ความสนใจอย่างมากคือ พลาสติกชีวภาพ เป็นการเลือกใช้พอลิเมอร์ที่แยกได้โดยตรงจากพืชและสัตว์ [1]แต่เนื่องจากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปนั้นเกิดเป็นปัญหา คือความสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก หรือเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสม จึงได้มีสารช่วยผสม มาช่วยให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น [2]

สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพนั้น ในประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายหลักที่ใช้กับพลาสติกชีวภาพ ขึ้นอยู่กับชนิด รูปแบบผลิตภัณฑ์ และความต้องการในการใช้งานทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค [3]

ในการผสมตามอัตราส่วนต่างๆกัน เมื่อปริมาณแบ่งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ และที่ปริมาณแบ่ง 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณแบ่งขาวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีคุณสมบัติความ

แข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น [5]

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการฉีดขึ้นรูปของวัตถุดิบทางชีวภาพผสมกับพอลิเมอร์ได้แก่การผสมระหว่างแอลบขาวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RC/LDPE) และแบ่งขาวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS/LDPE) เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยวิธีออกแบบการทดลอง ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัย ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่อัตราส่วน วัตถุดิบชีวภาพต่อพอลิเมอร์ เป็น 70/30 เป็นการเพิ่มมูลค่าเทคโนโลยีปลายน้ำและยกระดับการใช้งานของเม็ดพลาสติกเข้าสู่อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปที่หลากหลาย

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับวัตถุดิบชีวภาพนั้น จะต้องทำการอบแบ่งขาว และแอลบขาว ซึ่งผ่านการเติมสารเติมแต่งด้วยสูตรทางการค้า 5% แล้วนำเข้าสู่อุปกรณ์ผสมอัตโนมัติ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส วัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่เกิน 0.2 % นำมาผสมตามอัตราส่วนต่างๆกัน โดยใช้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพในปริมาณที่สูง ตั้งแต่ร้อยละ 70-85 โดยน้ำหนัก เพื่อลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ซึ่งย่อยสลายได้ยาก จึงใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

2.2 การฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

การนำพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในอัตราส่วนต่างๆ มาผ่านเข้าสู่กระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้น เป็นการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปได้ การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันบนพื้นผิวสัมผัสที่ปรากฏ และในการขึ้นรูปนั้น จะใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก ของบริษัท Battlefield Austria รุ่น BA 250/50 CDC ขนาด 40 ตัน เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 22 มิลลิเมตร แม่พิมพ์เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell-shaped)

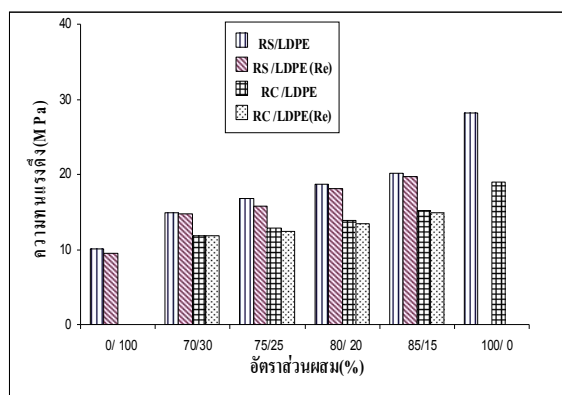
2.3 การทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปและทำการทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D638 type I (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) โดยเครื่อง Hounsfield Universal Testing Machine (Model H50K-S)

2.4 เปรียบเทียบอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป สามารถแสดงถึงผลของความแข็งแรงดึงและลักษณะผิวสัมผัสที่ปรากฏ ส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

2.4.1 เปรียบเทียบโดยความแข็งแรงดึงเฉลี่ย



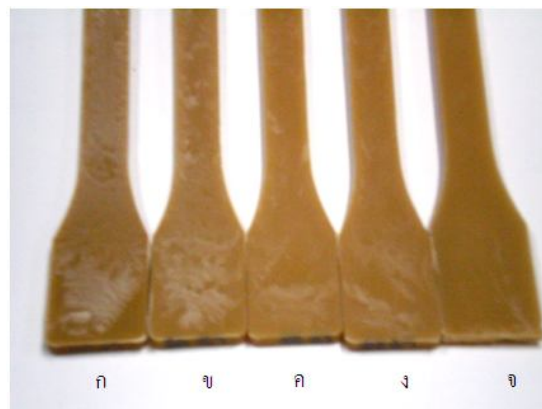
รูปที่ 1 ความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของRS/LDPE แป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

(RS/LDPE (Re)) แกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(RC/LDPE) และแกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (RC/LDPE (Re)) แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมดังกล่าว มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE 100%) และในส่วนผสมของแป้งข้าวจะมีความแข็งแรงดึงสูงกว่าส่วนผสมของแกลบข้าว

2.4.2 เปรียบเทียบโดยความเป็นเนื้อเดียวกันของผิวชิ้นงาน

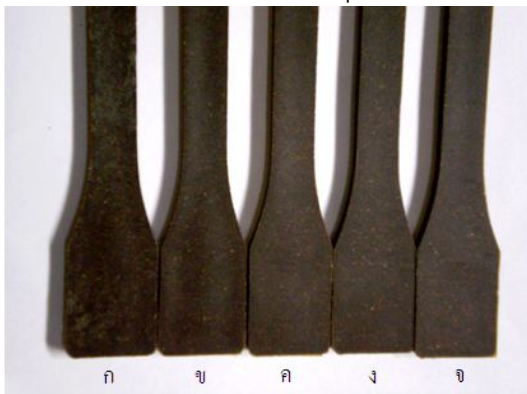
การผสมกันระหว่างวัตถุดิบชีวภาพกับLDPE ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าในกรณีของการผสมกันตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของวัตถุดิบชีวภาพ จะสังเกตเห็นการกระจายตัว หรือแยกเฟสเกิดเป็นแป้งสีขาวลอยตัวอยู่บนผิวชิ้นงานมากขึ้น อาจเกิดจากการหลอมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับ LDPE ได้น้อยลง



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของแป้งข้าว/LDPE ในอัตราส่วนผสมต่างๆ
ก) 100/ 0 ข) 85/15 ค) 80/20 ง) 75/25
จ) 70/30

ในส่วนผสมของแกลบข้าว ดังรูปที่ 3 ให้ผลไปในทางเดียวกันกับส่วนผสมของแป้งข้าว แต่ไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนนัก เนื่องจากสีของชิ้นงาน

เป็นสีที่บยากแก่การมองเห็น ดังนั้นส่วนผสมที่ 70/30 เป็นสีที่ส่วนที่เกิดการแยกเฟสน้อยที่สุด



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของเหล็กชุบสังกะสี/LDPE ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ก) 100/ 0 ข) 85/15 ค) 80/20 ง) 75/25 จ) 70/30

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 เลือกแผนการออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป 2^5 ของปัจจัยควบคุม 5 ปัจจัย เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน [15] จากตาราง ANOVA กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ $\alpha = 0.05$ โดยที่ระดับของแต่ละปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+1) และระดับต่ำ (-1) ซึ่งผลการทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้การวิเคราะห์ปัจจัยควบคุมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของ RS/LDPE และ RC/LDPE ดังแสดงในตารางที่ 1-2 โดยกำหนดจำนวนซ้ำในการทดลอง 3 ครั้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมีหน่วยของเงื่อนไขการทดลองทั้งหมดที่จะต้องเก็บรวบรวมข้อมูลเท่ากับ 96 หน่วย ดังแสดงในตารางที่ 3 ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab 14 ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

ตารางที่ 1 ระดับของปัจจัยควบคุมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของ RS/LDPE

ปัจจัยควบคุม	ตัวแปร	ระดับปัจจัย	
		ต่ำ (-)	สูง (+)
ความเร็วในการฉีด (%)	A	45	55
ความดันฉีดสูงสุด (Bar)	B	75	85
ความดันย้ำ (Bar)	C	60	75
ความเร็วในการหมุนรอบของสกรู (rpm)	D	88	129
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	E	175	185

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยควบคุมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของ RC/LDPE

ปัจจัยควบคุม	ตัวแปร	ระดับปัจจัย	
		ต่ำ (-)	สูง (+)
ความเร็วในการฉีด (%)	A	70	80
ความดันฉีดสูงสุด (Bar)	B	40	50
ความดันย้ำ (Bar)	C	60	75
ความเร็วในการหมุนรอบของสกรู (rpm)	D	84	123
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	E	175	185

ตารางที่ 3 ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง

Run Order	Factors					Response Value	
	A	B	C	D	E	RS /LDPE	RC/LDPE
1	-	-	-	-	-	15.25	11.67
2	+	-	-	-	-	14.7	11.97
3	-	+	-	-	-	14.44	12.33
4	+	+	-	-	-	14.65	11.76
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
32	+	+	+	+	+	12.19	12.35

3.2 กำหนดรูปแบบจำลอง (Model)

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklm} = & \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m \\
 & + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (AD)_{il} + (AE)_{im} + (BC)_{jk} \\
 & + (BD)_{jl} + (BE)_{jm} + (CD)_{kl} + (CE)_{km} + (DE)_{lm} \\
 & + (ABC)_{ijk} + (ABD)_{ijl} + (ABE)_{ijm} + (ACD)_{ikl} \\
 & + (ACE)_{ikm} + (ADE)_{ilm} + (BCD)_{jkl} + (BCE)_{jkm} \\
 & + (BDE)_{jlm} + (CDE)_{klm} + (ABCD)_{ijkl} + (ABCE)_{ijkm} \\
 & + (ABCDE)_{ijklm} + \varepsilon_{ijklm}
 \end{aligned} \quad (1)$$

โดยที่ i, j, k, l และ m = ระดับที่ -1, +1

μ = ค่าความแข็งแรงดึง

μ = ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall Mean)

A_i = ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A

B_j = ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B

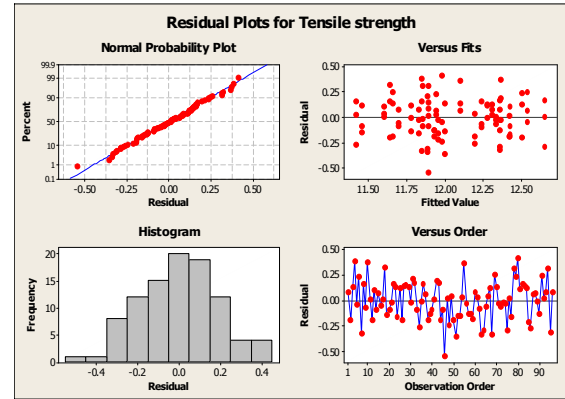
C_k = ผลที่เกิดจากระดับที่ k ของปัจจัย C

D_l = ผลที่เกิดจากระดับที่ l ของปัจจัย D

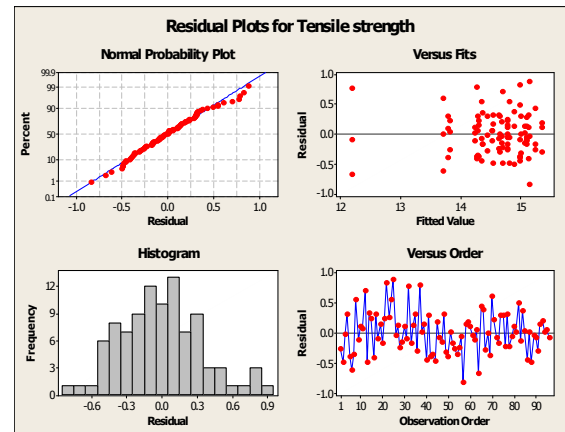
E_m = ผลที่เกิดจากระดับที่ m ของปัจจัย E

3.3 ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลและความถูกต้อง เพื่อการตรวจสอบรูปแบบของความผิดพลาดว่าเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ โดยอาศัยค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในการวิเคราะห์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ตรวจสอบโดยการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนค่าความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าข้อมูลทั้งสองมีการกระจายตัวค่อนข้างเป็นไปตามแนวเส้นตรง การกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ มีลักษณะการกระจายไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับการลำดับของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4 กราฟแสดงการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของ RS /LDPE



รูปที่ 5 กราฟแสดงการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของ RS /LDPE

3.3 วิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ที่มีมากกว่า 2 ปัจจัย จะนำมาพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย (two way interaction) ส่วนค่าที่เหลือไม่นำมาพิจารณา [6] จากนั้น ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ โดยมีการตั้งสมมติฐาน (Hypothesis Test) ในการทดสอบดังนี้

(1) กรณีทดสอบปัจจัยหลัก (Test of main factors)

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่า Y

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่า Y

(2) กรณีทดสอบปัจจัยร่วม (Test of interaction factors)

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่า Y

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่า Y

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA แสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ในกรณีที่ตัวทดสอบทางสถิติ P – Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) จึงจะสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อความแข็งแรงดึง (Y) ที่ระดับนัยสำคัญ (Significant) 0.05

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE

Source	SS	MS	p - value	Result
A	0.0982	0.0982	0.459	
B	0.0398	0.0398	0.637	
C	4.847	4.847	0	
D	0.2549	0.2549	0.234	
E	1.5446	1.5446	0.004	
A*B	0.7792	0.7792	0.04	Significant
A*C	1.7955	1.7955	0.002	Significant
A*D	0.621	0.621	0.065	
A*E	0.3205	0.3205	0.183	
B*C	0.0012	0.0012	0.935	
B*D	0.1606	0.1606	0.344	
B*E	1.2515	1.2515	0.01	Significant
C*D	0.2401	0.2401	0.248	
C*E	0.0532	0.0532	0.585	
D*E	0.111	0.111	0.431	

S = 0.420369 R-Sq = 75.25%

R-Sq(adj) = 63.26%

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE

Source	SS	MS	p- value	Result
A	3.3720	3.3720	0	
B	0.3833	0.3833	0.003	
C	0.3190	0.3190	0.006	
D	0.0219	0.0219	0.459	
E	0.2714	0.2714	0.011	Significant
A*B	0.1596	0.1596	0.048	Significant
A*C	0.2610	0.2610	0.012	Significant
A*D	0.0802	0.0802	0.159	
A*E	0.0018	0.0018	0.831	
B*C	0.6435	0.6435	0	Significant
B*D	0.0410	0.0410	0.311	
B*E	0.1150	0.1150	0.092	
C*D	0.0722	0.0722	0.181	
C*E	0.1361	0.1361	0.068	
D*E	0.0000	0.0000	0.986	

S = 0.198432 R-Sq = 81.31%

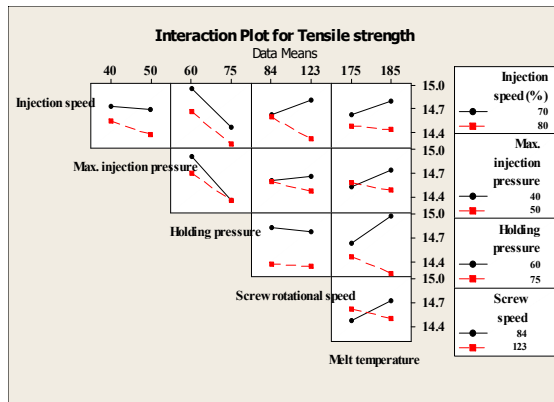
R-Sq(adj) = 72.26%

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 4 ทำการพิจารณาปัจจัยร่วมก่อนซึ่ง ตัวทดสอบทางสถิติ P – Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (Significant) α น้อยกว่า หรือเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าปัจจัยร่วมมีผลต่อความแข็งแรงดึง คือ ปัจจัยร่วม A*B กับ A*C และ B* E ซึ่งผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึง แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าปัจจัยร่วม A*B ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับสูง (80%) ที่ความดันฉีดสูงสุดอยู่ในระดับต่ำ (40 Bar) ในปัจจัยร่วม A*C ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับสูง (80%) ความดันต่ำอยู่ในระดับต่ำ (60 Bar) และปัจจัยร่วม B* E พบว่า ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ระดับต่ำ (175°C) และความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (50 Bar) จากนั้นทำการพิจารณา

ผลกระทบจากปัจจัยหลัก โดยไม่นำปัจจัยร่วมมาพิจารณาอีก พบว่าไม่มีปัจจัยใดเพิ่มเติมที่มีนัยสำคัญในปัจจัยหลัก

สมการที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป RS /LDPE ที่เหมาะสมซึ่งสามารถเขียนสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = 14.581 + 0.225C + 0.127E - 0.09 A*B - 0.137A*C - 0.114B*E$$



รูปที่ 6 กราฟ Interaction plot ค่าความแข็งแรงดึง
สำหรับกรณี RS /LDPE

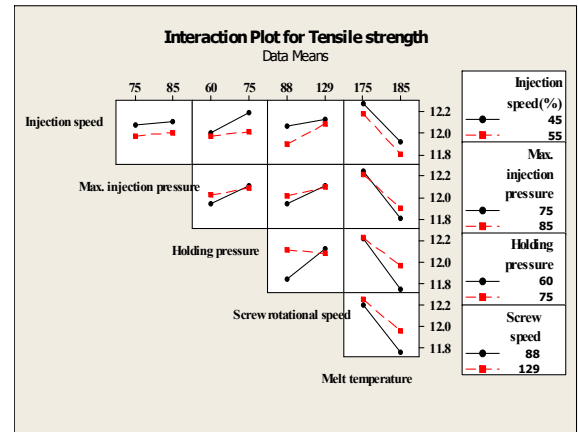
สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 5 ทำการพิจารณาปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ได้แก่ ปัจจัยร่วม A*B กับ A*C และ B*C แสดงผลดังรูปที่ 7 พบว่าปัจจัยร่วม A*B ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงขึ้น เมื่อความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับต่ำ (45%) ความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (85 Bar) ปัจจัยร่วม A*C ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับต่ำ (45%) ในขณะที่ความดันที่ระดับสูง (75 Bar)

ปัจจัยร่วม B*C พบว่า ความดันฉีดสูงสุดอยู่ที่ระดับสูง (85 Bar) ส่งผลให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงมีค่ามากเมื่อความดันอยู่ที่ระดับต่ำ (60 Bar) จากนั้นพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยหลัก โดยไม่นำปัจจัยร่วมมาพิจารณาอีก พบว่า ปัจจัย E คือ อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt temperature) มีนัยสำคัญเฉพาะผลหลักเท่านั้นไม่มีผลของปัจจัยร่วม และให้ผล

ตอบสนองค่าทนแรงดึงสูงเมื่ออยู่ในระดับต่ำ (175°C) จากนั้นวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่เหลือ คือ ปัจจัยหลัก E

สมการที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป RC/LDPE ที่เหมาะสมซึ่งสามารถเขียนสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = 12.04 + 0.187A - 0.064B - 0.058C + 0.053E + 0.041A*B + 0.052A*C - 0.081B*C$$



รูปที่ 7 กราฟ Interaction plot ค่าความแข็งแรงดึง
สำหรับกรณี RS /LDPE

4. ผลการทดลอง

ผลจากการสังเกตลักษณะผิวปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วนผสมของวัสดุดิบชีวภาพ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ผิวสัมผัสที่สุดคือ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตเห็นการแยกเฟสเป็นคราบสีขาวบนผิวชิ้นงานน้อยที่สุด จึงเลือกมาใช้งาน โดยทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปสองระดับ 2⁵ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง ซึ่งกรณีแบ่งข้าว RS/LDPE มีความแข็งแรงดึงสูงกว่า แกลบข้าว RC/LDPE และทั้งสองกรณีได้ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง คือ ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดสูงสุด ความดันอัดและอุณหภูมิพลาสติกหลอม และให้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 6 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของแต่ละปัจจัย

Parameter	blending	
	RC/LDPE	RS/LDPE
Injection speed (%)	45	80
Max. injection pressure (Bar)	85	40
Holding pressure (Bar)	75	60
Melt temperature (°C)	175	175

การวิเคราะห์ผลของค่าความแข็งแรงดึงด้วยการทดสอบที่ (t-test) จำนวน 10 ตัวอย่าง ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) เท่ากับ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม

Variable	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
RC/LDPE	13.953	0.223	0.071	(13.793, 14.112)
RS/LDPE	15.617	0.719	0.227	(15.103, 16.131)

5. สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่แตกต่างกันสองชนิด โดยเปรียบเทียบที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปที่ วัสดุดิบชีวภาพ 70% ผสมกับ LDPE 30% ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ได้แก่ ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดสูงสุด ความดันย้ำ และอุณหภูมิในการหลอมเหลว ในกรณีส่วนผสมที่ได้จากแป้งข้าวมีความแข็งแรงดึงสูงกว่าส่วนผสมที่ได้จากกลบข้าว อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ชีวภาพผสมทั้งสองก็ยังมีข้อดีคือ ราคาถูก และหาได้ง่าย เหมาะกับการผลิตที่ละมากๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท Global Electric Motorcars Asia จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งข้าวและกลบข้าว และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (Rdip) ในความอนุเคราะห์เครื่องฉีดพลาสติก รวมทั้งภาควิชาวัสดุวิศวกรรมในส่วนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาดี ลีจากภัย. (2549). พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- [2] อรุษา สรวารี. (2546). สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [3] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. (2551). แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. การประชุมครั้งที่ 24 กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- [4] ชยันต์ เลาสุทแสน. (2548). การออกแบบแผนการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการฉีดพลาสติก กรณีศึกษา โรงงานฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] นรศิษฐ์ จันทกุล. (2547). การเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- [7] Chandra, R. and R. Rustgi. (1997). Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 56, pp.185-202.
- [8] Kaitkamjornwong, S., T. Pabunrung, N. Wongwisetsirikul and P. Prasassarakich. (1997).

Degradation of Cassava Starch-Polyethylene Blends, *Journal of Science Society*, Vol. 23, pp. 163-171.

[9] Mani, R. and M. Bhattacharya. (2001).

Properties of injection moulded blends of starch and modified biodegradable polyesters. *European Polymer Journal*, Vol.37, pp. 515-526.

[10] Thakore, I.M., S.Desia, B. D.Sarawade and

S.Davi. (2001). Study on biodegradability, morphology and thermo mechanical properties of LDPE/ modified starch blend. *European Polymer Journal*, Vol. 37, pp. 151-160.

[11] Ramkumar, D., U.R. Vaidya, M.Bhattacharya, M. Hakkarainen, A.C.Albertsson and S. Karlsson.

(1996). Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blend-I.Effect of processing parameters on physical properties. *European Polymer Journal* Vol. 32, pp. 999-1010.

[12] Predroso, A.G. and D.S. Rosa. (2005).

Mechanical, thermal and morphological Characterization of recycled LDPE /Corn starch blends. *Carbohydrate Polymer*, Vol. 59, pp. 1-9.

[13] Ferdinand, R., C. Claude, K. Christipher, Ober and Lynden A. Acher. (2003). Principles of Polymer Systems. 5th ed.Taylor & Francis Books. Inc., New York.

[14] Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. Inc., New York.