



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำหนดสภาวะกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมแป้งข้าว/แกลบข้าว/พอลิเอทิลีน โดยการออกแบบการทดลอง

Determination of Suitable Processing Conditions for Injection Molding and Properties of Biopolymer Blends: Rice Starch/Rice Chaff/Polyethylene by Design of Experiments

นามผู้วิจัย นางสาวศิริลักษณ์ พาน โกลสูง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำหนดสภาวะกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม
แป้งข้าว/แกลบข้าว/พอลิเอทิลีน โดยการออกแบบการทดลอง

Determination of Suitable Processing Conditions for Injection Molding and Properties of
Biopolymer Blends: Rice Starch/Rice Chaff/Polyethylene by Design of Experiments

โดย

นางสาวศิริลักษณ์ พานโลกสูง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2552

ศิริลักษณ์ พานโคกสูง 2552: การกำหนดสภาวะกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพ ผสมแป้งข้าว/เกลบข้าว/พอลิเอทิลีน โดยการออกแบบการทดลอง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 173 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ ได้แก่ แป้งข้าวและเกลบข้าว ซึ่งใช้สารเติมแต่งจากสูตรทางการค้า 5% กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) บริสุทธิ์ และที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับเข้าสู่กระบวนการฉีดใหม่อีกครั้ง โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพเป็นร้อยละ 0, 70, 75, 80, 85 และ 100 โดยน้ำหนัก และทดสอบคุณสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM พบว่า ในอัตราส่วนผสมเดียวกัน คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวดีกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจากเกลบข้าว เมื่อปริมาณวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัดโค้ง และความสามารถในการดูดซึมความชื้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง สำหรับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจาก LDPE ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับเข้าสู่กระบวนการฉีดใหม่ มีความแข็งแรงทางกลลดลงจากพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจาก LDPE บริสุทธิ์เล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) ไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่พลังงานความร้อน (ΔH) ลดลง เมื่อปริมาณวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้นและการบวมตัวในสารละลายเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับ LDPE บริสุทธิ์

จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ 2^2 โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง โดยเลือกอัตราส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ/ LDPE เป็นร้อยละ 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เกิดการแยกเฟสน้อยที่สุด สังเกตเห็นผิวและสีชิ้นงานทดสอบเป็นเนื้อเดียวกัน และชิ้นงานที่ได้สมบูรณ์เต็มแม่แบบ พบว่า ปัจจัยและค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าว/LDPE คือ ใช้ความเร็วในการฉีด 80% ความดันฉีดสูงสุด 40 บาร์ ความดันย้า 60 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง 15.62 เมกกะปาสคาล ส่วนพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างเกลบข้าว/LDPE ใช้ความเร็วในการฉีด 45% ความดันฉีดสูงสุด 85 บาร์ ความดันย้า 75 บาร์ และอุณหภูมิในการฉีด 175 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง 13.95 เมกกะปาสคาล

Siriluk Phankhoksoong 2009: Determination of Suitable Processing Conditions for Injection Molding and Properties of Biopolymer Blends: Rice Starch/Rice Chaff/Polyethylene by Design of Experiments. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering.
Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 173 pages.

This research work is a study of the injection molding process and properties of biopolymer blends between (a) biomaterials: rice starch and rice chaff, which were prepared with 5% additive (commercial formulation) and (b) virgin and regrind low density polyethylene (LDPE). Specimens were prepared with the amount of the biomaterials varied from 0, 70, 75, 80, 85 and 100% by weight and were mechanically tested following the ASTM standard. The results showed that the mechanical properties of the rice starch blend were greater than those of the rice chaff blend. In addition, as the content of the biomaterials increased, tensile strength, flexural strength and moisture absorption increased while the elongation at break decreased. In addition, the biopolymer blends prepared by the regrind LDPE had slightly lower mechanical properties than the biopolymer blends prepared by virgin LDPE. Moreover, melt temperature (T_m) and crystallization temperature (T_c) were not changed while the heat energy (ΔH) decreased when the content of the biomaterials increased. Swelling of the biopolymer blends in the chemical solutions was less than 10% when compared to virgin LDPE.

The 2⁵ Full Factorial experiment was used to design the experiment and Analysis of Variance (ANOVA) was used to analyze the tensile strength. The biopolymer blends between biomaterial/LDPE content of 70/30 by weight was the most suitable blend. The results showed that the 70/30 content of the specimen minimized phase separation with mostly homogeneous surface and color as well as complete specimen. In addition, the suitable processing conditions for the starch/LDPE blend with tensile strength of 15.62 MPa were 80% injection speed, 40 bar injection pressure, 60 bar holding pressure, and 175°C melt temperature. The suitable processing conditions for the chaff/LDPE blend with tensile strength of 13.95 MPa were 45% injection speed, 85 bar injection pressure, 75 bar holding pressure, 175°C melt temperature.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร. จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษาแนะนำ แนวทางการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์พิภพ ลลิตาภรณ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติม อันจะนำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท Global Electric Motorcars Asia จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แบ่งข้าวและแกลบข้าว

ขอขอบพระคุณ คุณสมปอง อินทอง หัวหน้าฝ่ายพอลิเมอร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ในความอนุเคราะห์เครื่องฉีดพลาสติกความรู้ พร้อมทั้งบุคลากร คุณวสันต์ ขอดคำ และคุณณภัทร ไม่นแก่น ตลอดจนนักศึกษาฝึกงานภาควิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความรู้ทางด้านเทคนิค และคุณสุทธิพร เกิดแก้ว ผู้ช่วยนักวิจัยความขึ้นเมล็ดพันธุ์พืช ในความช่วยเหลือส่วนของการวัดความขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้ผลที่ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมทั้งญาติผู้ใหญ่ที่เคารพ สำหรับแนวทางการดำรงตน ขอขอบคุณ ทุกความช่วยเหลือ ประสพการณ์ กำลังกายและกำลังใจที่มีให้เสมอมา ขอขอบคุณรุ่นพี่เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

ศิริลักษณ์ พานโคกสูง

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	85
สรุป	85
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	89
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก ผลกระทบของเงื่อนไขการฉีดต่อคุณภาพพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	93
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ Two-sample Test for LDPE vs LDPE (RE)	103
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	107
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ที่อัตราส่วนต่างๆ	123
ภาคผนวก จ แผนผังก้างปลาสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา คุณภาพชิ้นงานฉีดขึ้นรูปไม่สมบูรณ์	135
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการตั้งค่าตามเงื่อนไขกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่กำหนดหน้าต่าง บนโปรแกรมของเครื่องฉีด	137
ภาคผนวก ช ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง	139
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในกรณีของ RC /LDPE	142

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฅ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในกรณีของ RS /LDPE	150
ภาคผนวก ญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง	158
ภาคผนวก ฎ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด	163
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดัดโค้ง	168
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบของแคลบ	5
2 สมบัติของพอลิเอทิลีนประเภทต่างๆ	7
3 ประเภทของสารเติมแต่งสำหรับพอลิเมอร์	10
4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Two-Factor Fixed Effect Model	28
5 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (LDPE (RE)) และแป้งข้าว (RS)	36
6 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (LDPE (RE)) และ แกลบ ข้าว (RC)	37
7 อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	53
8 อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)	53
9 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในสารละลายเคมีต่างๆ	54
10 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RS/LDPE (RE) ในสารละลายเคมีต่างๆ	55
11 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC/LDPE ในสารละลายเคมีต่างๆ	55
12 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในสารละลายเคมีต่างๆ	56
13 ลักษณะปรากฏของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมหลังการทดสอบในสารละลายเคมีชนิดต่างๆ	57
14 ระดับของปัจจัยควบคุมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	63
15 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC/LDPE	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	การออกแบบเงื่อนไขการทดลองปัจจัย A, B และ C ของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE	74
17	วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS/LDPE	75
18	การออกแบบเงื่อนไขการทดลองปัจจัย A, B และ E ของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE	83
19	เงื่อนไขกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย	86
20	ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม	86
21	ตัวอย่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) พลาสติก	87

ตารางผนวกที่

ก1	ผลสังเกตการณ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปตามเงื่อนไขต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RC70/LDPE30	101
ก2	ผลสังเกตการณ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปตามเงื่อนไขต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RS70/LDPE30	102
ข1	ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงของ LDPE กับ LDPE (Re)	104
ค1	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)	108
ค2	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)	108
ค3	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ยืดดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)	109
ค4	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ยืดดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)	109
ค5	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค6	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)	110
ค7	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)	111
ค8	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)	111
ค9	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดซึมความชื้น สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)	112
ค10	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดซึมความชื้น (Moisture absorption) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)	112
ค11	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RC/LDPE	113
ค12	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RC/LDPE (Re)	114
ค13	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RS/LDPE	115
ค14	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RS/LDPE (RE)	116
ค15	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RC/LDPE	117
ค16	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอีน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RC/LDPE	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค17	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RC/LDPE	118
ค18	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RC/LDPE (RE)	118
ค19	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RC/LDPE (RE)	119
ค20	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RC/LDPE (RE)	119
ค21	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RS/LDPE	120
ค22	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RS/LDPE	120
ค23	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RS/LDPE	121
ค24	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RS/LDPE (RE)	121
ค25	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RS/LDPE (RE)	122
ค26	ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RS/LDPE (RE)	122
ฉ1	ข้อมูลการตั้งค่าตามเงื่อนไขกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่กำหนดหน้าต่างบนโปรแกรมของเครื่องฉีด	138
ช1	ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง (Run order 1-16)	140
ช2	ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง (Run order 17-32)	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ญ1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองความแข็งแรงค้ำของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	159
ฎ1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองเปอร์เซ็นต์การยึดค้ำ ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	164
ฎ1	ข้อมูลการออกแบบการทดลองความแข็งแรงค้ำโค้งของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม	169

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะโครงสร้างของ LDPE	6
2	หัวฉีดเคลื่อนที่ไปข้างหน้า	18
3	การเริ่มฉีดพลาสติก	19
4	การเตรียมพลาสติกเหลวเพื่อฉีด	20
5	ปิดแม่พิมพ์และกระทุ้งชิ้นงาน	20
6	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ	22
7	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล	25
8	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล	25
9	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน	29
10	ลำดับขั้นตอนในการทดลอง	35
11	เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (บริษัท Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC	38
12	เครื่อง Hounsfield Universal Testing Machine Model H50K-S	39
13	ชิ้นงานการทดสอบ	39
14	เครื่อง GOTECH Pendulum Impact tester (Model GT-7045-I)	40
15	เครื่อง Hounsfield Universal Testing Machine Model H50K-S	41
16	วิธีการเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC	43
17	เครื่องแคลอริเมตรีแบบส่องกราดคอนพันซ์ (Differential scanning calorimetry, DSC) บริษัทPerkin Elemer รุ่นmodel DSC7	44
18	การทดสอบความทนต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในสารละลาย	45
19	ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการดูดซึ่มความชื้น	46
20	ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	48
21	เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	49
22	ความแข็งแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re) กับ RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	52
24	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	58
25	เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของแป้งข้าว/พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ก) RS 100/LDPE 0 ข) RS 85/LDPE 15 ค) RS 80/LDPE 20 ง) RS 75/LDPE 25 จ) RS 70/LDPE 30	59
26	เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของกลีบข้าว/พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ก) RS 100/LDPE 0 ข) RS 85/LDPE 15 ค) RS 80/LDPE 20 ง) RS 75/LDPE 25 จ) RS 70/LDPE 30	60
27	กราฟ Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนความแข็งแรงดึง สำหรับกรณี RC/LDPE	69
28	กราฟของความผิดพลาดกับเวลาที่เก็บข้อมูลความแข็งแรงดึง สำหรับกรณี RC/LDPE	69
29	กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ถูกวัดความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE	70
30	กราฟ Interaction plot AB สำหรับกรณี RC /LDPE	71
31	กราฟ Interaction plot AC สำหรับกรณี RC /LDPE	71
32	กราฟ Interaction plot BC สำหรับกรณี RC /LDPE	72
33	กราฟค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงต่อปัจจัยหลักสำหรับกรณี RC /LDPE	73
34	กราฟ Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนความแข็งแรงดึง สำหรับกรณี RS /LDPE	78
35	กราฟของความผิดพลาดกับลำดับของค่าสังเกตความแข็งแรงดึง สำหรับกรณี RS/LDPE	78
36	กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ถูกวัดความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE	79
37	กราฟ Interaction plot AB สำหรับกรณี RS /LDPE	80
38	กราฟ Interaction plot AC สำหรับกรณี RS /LDPE	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	กราฟ Interaction plot AC สำหรับกรณี RS /LDPE	81
40	กราฟค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงตอปัจจัยหลัก สำหรับกรณี RS /LDPE	82
ภาพผนวกที่		
ก1	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 1	94
ก2	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 2	94
ก3	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 3	95
ก4	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 4	95
ก5	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 5	96
ก6	ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 6	96
ก7	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 1	97
ก8	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 2	97
ก9	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 3	98
ก10	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 4	98
ก11	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 5	99
ก12	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 6	99
ก13	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 7	100
ก14	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 8	100
ก15	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 9	100
ก16	ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/ LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 10	101
ข1	ผลการทดสอบความแปรปรวนแบบ F-Test ของ LDPE และ LDPE (RE)	104
ข2	กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของ LDPE และ LDPE (RE)	105
ข3	ผลการทดสอบผลต่างค่าเฉลี่ยของ LDPE และ LDPE (RE)กรณีความแปรปรวนเท่ากัน	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง14 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%	128
ง15 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	128
ง16 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)	129
ง17 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%	129
ง18 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย เมทานอล ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	129
ง19 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย เมทานอล ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)	130
ง20 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โทลูอิน ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%	130
ง21 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โทลูอิน ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	130
ง22 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โทลูอิน ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)	131
ง23 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน 91 ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%	131
ง24 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน 91 ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	131
ง25 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อ ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)	132
ง26 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำกลั่น ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%	132

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง27 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำกลั่น ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)	132
ง28 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำกลั่น ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE(RE)	133
ง29 การเปลี่ยนแปลงสีในสารละลาย NaOH ของการทดสอบชิ้นงาน RC/LDPE	133
ง30 การเปลี่ยนแปลงสีในสารละลาย NaOH ของการทดสอบชิ้นงาน RS/LDPE	134
จ1 แผนผังก้างปลาสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาคุณภาพชิ้นงานฉีดขึ้นรูป ไม่สมบูรณ์	136
ญ1 กราฟ Residual Plots for Tensile strength	161
ญ2 กราฟ Main Effects Plot for Tensile strength	161
ญ3 กราฟ Interaction Plot for Tensile strength	162
ฎ1 กราฟ Residual Plots for % Elongation at break	166
ฎ2 กราฟ Main Effects Plot for % Elongation at break	166
ฎ3 กราฟ Interaction Plot for % Elongation at break	167
ฏ1 กราฟ Residual Plots for flexural strength	171
ฏ2 กราฟ Main Effects Plot for flexural strength	171
ฏ3 กราฟ Interaction Plot for flexural strength	172

การกำหนดสภาวะกระบวนการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ ชีวภาพ ผสมแป้งข้าว/แกลบข้าว/พอลิเอทิลีน โดยการออกแบบการทดลอง

Determination of Suitable Processing Conditions of Injection Molding and Properties of Biopolymer Blends: Rice starch/Rice Chaff/Polyethylene by design of Experiments

คำนำ

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตหรือสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบทางปิโตรเคมี ได้แก่ น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ หรืออุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นด้านการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่น ประกอบกับมีน้ำหนักเบา ทนความชื้น และไม่เปราะ สามารถเติมแต่งสีกลิ่นสวยงามได้ตามต้องการ ส่งผลให้การใช้พลาสติกทั่วโลกมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประมาณ 200 ล้านตันต่อปี แต่ความสามารถในการนำขยะพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ยังอยู่ในระดับต่ำเพียงร้อยละ 30 ของปริมาณการบริโภคทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศไทยมีขยะพลาสติกตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั่วประเทศไม่ต่ำกว่า 2 ล้านตันต่อปี ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่มีความยากต่อการย่อยสลาย ใช้ระยะเวลายาวนานในการทำลายให้หมด สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตใหม่ๆ ที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม

พลาสติกยุคใหม่ คือ พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastics) ซึ่งผลิตหรือสังเคราะห์ได้จากพืช เช่น มันสำปะหลัง หรือข้าวโพด เป็นต้น โดยที่กลุ่มอุตสาหกรรมแนวหน้าทั่วโลกตื่นตัว และมีความพยายามที่จะพัฒนาพลาสติกชีวภาพนี้ ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานดี เทียบเท่ากับพลาสติกดั้งเดิมที่ผลิตมาจากปิโตรเคมี และให้คงคุณสมบัติที่ดีไว้ตลอดอายุการใช้งาน เพื่อที่จะช่วยส่งเสริมการลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี และย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมก่อนที่จะหมดอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การใช้พลาสติกย่อยสลายได้ในปัจจุบันถือว่ายังจำกัดอยู่ในวงแคบ ปัจจัยอย่างหนึ่งคือปัญหาทางการผลิตที่มีต้นทุนทางเทคโนโลยีสูงเมื่อเทียบกับการผลิตพลาสติกแบบดั้งเดิม โดยการเลือกใช้

พอลิเมอร์ที่แยกได้โดยตรง คือมีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เช่น แอลิเฟติก พอลิเอสเตอร์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ พอลิโอลิฟินที่ผ่านการเติมแต่งสารเคมี เป็นต้น ดังนั้นอีกหนทางหนึ่งที่มีผู้ให้ความสนใจอย่างมากคือ การเลือกใช้พอลิเมอร์ที่แยกได้โดยตรงจากพืชและสัตว์ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ จำพวก แป้ง เซลลูโลส ลิกนิน ไคติน และโปรตีนจำพวก เจลาติน ไหม และขนสัตว์ เป็นต้น พอลิเมอร์จากธรรมชาติเหล่านี้ มีความแข็งแรงต่ำ ไม่ทนต่อความชื้น แต่เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย เป็นวัสดุย่อยสลายง่ายและสามารถขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ได้ แต่เนื่องจากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปนั้นเกิดเป็นปัญหาในการทำ คือ ความสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก หรือเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสม จึงได้มีการช่วยผสม มาช่วยให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น

การพัฒนาและลดปริมาณขยะนั้น จึงได้นำการใช้ประโยชน์ซ้ำของพลาสติก ซึ่งได้จากผลิตภัณฑ์หรือเศษวัสดุที่แตก ผิดรูปทรงไม่ได้ตามมาตรฐานในขั้นตอนการผลิต แล้วนำไปบด จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ โดยใช้วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ยังคงคุณภาพเดิม แล้วนำมาผสมกับวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติ ลดปริมาณการใช้พลาสติก ลดต้นทุนการผลิตสินค้า ลดปริมาณขยะ และยังลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษได้อีกด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกล อันได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด การดูดซึมความชื้น คุณสมบัติทางความร้อนแคลอรีเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (DSC) หาอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการตกผลึก และการคายพลังงานในการตกผลึก ความคงทนต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับวัตถุดิบชีวภาพจากการเกษตร คือ แป้งข้าวและเกล็ดที่ได้จากข้าวเปลือก หาค่าอัตราส่วนผสมเหมาะสมที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกเฟส โดยการฉีดขึ้นรูป และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูป ทำการออกแบบการทดลองหาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมส่งผลต่อการปรับปรุงคุณทางกลของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ชีวภาพผสม วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าว แกลบข้าว และพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล และการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล และค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. แป้ง

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด มีโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยกลูโคส คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ($C_6H_{10}O_5$) มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นเป็นแบบพันธะไฮโดรเจนเม็ดแป้งจับตัวกันแบบร่างแห ทำให้ละลายในน้ำเย็นได้ยาก รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับแหล่งของพืชที่ให้แป้ง

คุณสมบัติของแป้ง

การที่แป้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากคุณสมบัติของแป้งในด้านความเหนียว การเกิดเป็นเจล การยืดยืด และการเกิดเป็นฟิล์ม นอกจากนี้แป้งยังมีราคาถูก สามารถควบคุมคุณภาพได้ และหาได้ง่าย สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ได้ โดยผ่านกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ เพื่อทำการผลิตแป้งที่มีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง

อย่างไรก็ดี การใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์พลาสติกยังมีข้อจำกัดจากโครงสร้างของแป้ง จะเห็นได้ว่าแป้งที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรงส่งผลให้แป้งไม่อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะมีปัญหาในการขึ้นรูป ประกอบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางกายภาพไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น เปราะ นอกจากนี้ยังมีความหนืดขณะร้อนสูง ทำให้มีอุปสรรคต่อการนำแป้งไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งให้มีความหนืดขณะร้อนลดลง นอกจากนี้ โครงสร้างของแป้งเองไม่ทนต่อสภาพกรด อุณหภูมิสูงและแรงเฉือนจากเครื่องมือ จึงต้องมีการศึกษาการให้ความร้อนในการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ

2. แกลบ

แกลบ คือเปลือกข้าวที่ได้จากการสีข้าวให้เป็นข้าวสารสำหรับการบริโภคของมนุษย์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สำคัญชนิดหนึ่งในการสีข้าวจะได้ปริมาณของแกลบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณข้าวเปลือก โดยในข้าวเปลือกมีแกลบประมาณร้อยละ 25.92-26.28 โดยน้ำหนัก ซึ่งแกลบส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยโรงสีข้าวและอุตสาหกรรมบางประเภท แต่ต่อมาได้มีการหันมาใช้กระแสไฟฟ้าแทน ทำให้แกลบเหลือใช้เป็นปริมาณมากที่ถูกทิ้งไว้โดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์และมีปัญหาในการกำจัด เป็นการสูญเสียที่ดินอันมีค่าไปอย่างเปล่าประโยชน์

2.1 องค์ประกอบของแกลบ

แกลบมีลักษณะเหนียว แข็งคล้ายไม้ มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ และมีปริมาณเถ้าสูง โดยทั่วไปแกลบจะมีขนาด 5-10 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร หนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแกลบ

คุณสมบัติ	ร้อยละ
ความชื้น	8.1-11.5
เถ้า	16.4-18.3
สารระเหย	61.1-64.4
กำมะถัน	0.1-0.2
เซลลูโลส	42.1-46.6
ลิกนิน	22.1-22.8
เพนโทแซน	13.9-18.3
แป้ง	7.6-7.9
เส้นใย	39.1-41.1
โปรตีน	1.8-1.9
ไขมัน	0.28-0.31

ที่มา: นิรชา (2547)

2.2 ประโยชน์ของแกลบ

ประโยชน์ของแกลบส่วนใหญ่จะนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น

2.2.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิง แกลบจะให้พลังงานความร้อนประมาณ 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้

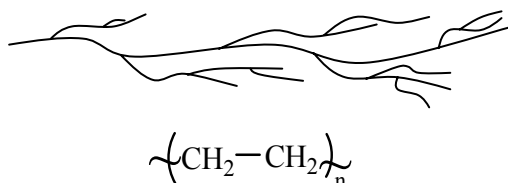
2.2.2 ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ จะทำให้อิฐที่ได้แข็งแรงและสามารถตัดเจาะรูหรือตอกตะปูได้ใช้ผสมกับดิน ทำให้ดินร่วนซุย ไม่แน่นทึบ และช่วยให้ดินอุ้มน้ำได้ดี

2.2.3 ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลายง่าย คลุมดินไม่ให้ความชุ่มชื้น และป้องกันการสูญเสียน้ำจากดินได้

2.3.4 ใช้เป็นสารตัวเติมและสารเติมแต่ง

3. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

ถูกค้นพบโดยบริษัท ไอซีไอ ประเทศอังกฤษ และถูกผลิตขึ้นในปี ค.ศ 1939 เป็นโพลีเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการความดันสูง (High Pressure Process) ประมาณ 150-350 MPa และอุณหภูมิ 80-300 °C เนื่องจากโครงสร้างมีกิ่งก้านสาขาแยกออกมามาก ทำให้โมเลกุลจัดตัวอย่างหลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ LDPE มีลักษณะค่อนข้างใส มีความเหนียว และมีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้ง หรือเทียนไขมีระดับการเป็นผลึกต่ำ



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของ LDPE

3.1 ลักษณะทั่วไปของ LDPE

โมเลกุลจะประกอบไปด้วยสายโซ่สั้น ที่มีอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม และ สาขาโซ่สั้น ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 4 อะตอม (หรือ butyl side group) ประมาณ 15 หมู่ต่อ จำนวนอะตอมคาร์บอนบนสายโซ่หลัก 1000 อะตอมซึ่งในจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เท่ากันนี้จะมี สาขาโซ่ยาว ประมาณ 3 ถึง 4 สายโซ่ เท่านั้น ส่วนของโมเลกุล LDPE จะมีส่วนที่ไม่เป็นสาขาโซ่ ซึ่งสามารถจัดเรียงตัวกันแน่น เกิดเป็นส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) แต่ผลของการมีหมูสาขาโซ่จำนวนมากทำให้โมเลกุล LDPE ไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้มากนักซึ่งส่งผลให้ LDPE มีคุณสมบัติดังนี้

- 3.1.1 มีองศาของการเกิดผลึก (Degree of crystalline) ต่ำ กล่าวคือประมาณ 50-70%
- 3.1.2 มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (110-115 °C)
- 3.1.3 มีความหนาแน่นต่ำ (โดยทั่วไป 0.91-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนประเภทต่างๆ

Properties	LDPE	LLDPE	HDPE
Density (g/cm ³)	0.92	0.94	0.96
Tensile strength (Mpa)	10	10	28
Elongation at break (%)	450	700	500
Hardness (Shor D)	45	55	65
Softening point Vicat (°C)	95	-	120

ที่มา: เจริญ (2547)

ลักษณะเฉพาะของ LDPE คือ ชิ้นงานที่ผลิตได้ค่อนข้างนิ่ม และมัน (waxy feel) ค่อนข้างจะทึบแสง ถ้าค่อยๆเผา จะไม่มีควัน ให้เปลวไฟสีเหลือง มีกลิ่นไขมัน มันจะหยดไปขนาด เล็กตก (drip fireballs) ทนต่อสารเคมีและน้ำดีเยี่ยมที่อุณหภูมิห้อง แต่จะไม่ทนต่อสารเคมีภายใต้สภาวะที่มีความเค้นสูง โดยเฉพาะ LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงกล่าวได้ว่า LDPE มีการทนทาน

ต่อการแตกหักเนื่องจากความเค้น [Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR)] ต่ำ จึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะในสถานะที่เป็นโฟม

3.2 การใช้งาน แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

3.2.1 Homopolymer ได้แก่ เม็ดพลาสติก LDPE ทั่วไปแบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

ก. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก เช่น ถุงน้ำแข็ง ถุงบรรจุอาหารแช่เย็น ถุงซ้อปปั๊ม ใช้ทำ วัสดุกันกระแทก ได้แก่ Air Bubble Sheet นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มยังใช้งานในการรัดสินค้าให้อยู่ในสภาพทรงตัวเช่นฟิล์มรัดกล่อง ฟิล์มรัดสินค้าบนไม้พาเลทเพื่อการขนส่งไปจนกระทั่งแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่หลายๆ ใช้ในด้านการเกษตรกรรม เช่น แผ่นฟิล์มรองพื้นบ่อน้ำเพื่อการเก็บกักน้ำ เรือนเพาะชำ (Green House)

ข. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำ ขวดต่าง ๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่มและเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

ค. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นูนเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่น ๆ

ง. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์ม บนผิวแผ่น อลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทหมีถึงสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการคุณสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ

จ. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลดแรงเสียดทาน เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยานตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

3.2.2 Copolymer มีคุณสมบัติพิเศษกว่า LDPE ชนิดธรรมดา คือ มีความอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ผลิตหนังเทียมแทน PVC ชนิดอ่อน พื้นรองเท้า และรองเท้ากีฬา

4. พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends)

พอลิเมอร์ผสม หมายถึง การนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่ต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป มาผสมกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างที่ขาดหายไปของพอลิเมอร์ ซึ่งไม่ได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นการผสมจะเป็นการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติพอลิเมอร์โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า คุณสมบัติการปรับปรุงเนื่องจากการผสม เช่น การทนต่อความร้อนและสารเคมี การทนทานต่อแรงกระแทกและแรงดึง รวมไปถึงเพื่อให้่ายในการผลิตขึ้นรูป ทั้งยังสามารถขยายประเภทของสินค้าให้หลากหลายอีกด้วย การผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันได้นั้น จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและพันธะเคมีในพอลิเมอร์ แต่สิ่งที่เป็นปัญหาในการทำพอลิเมอร์ผสมนั้น คือ ของผสมไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ จึงมีการทำงานวิจัยทางด้านเทอร์โมไดนามิกของพอลิเมอร์สนับสนุนเกี่ยวกับพฤติกรรมเหล่านี้ พบว่าสาเหตุใหญ่ๆมี 3 อย่าง ก็คือ

4.1 ตามกฎการผสม (Rule of mixtures) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล 2 ชนิดไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเช่นเดียวกับสายโซ่โมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งทำให้เกิดการแยกชั้นขึ้น

4.2 พลังงานที่ใช้ในการผสมสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ การดูดกลืนพลังงานความร้อนที่ต่างกันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด แต่ถึงอย่างไรก็ตาม มีบางคู่พอลิเมอร์ที่เข้ากันได้เช่นกัน ฉะนั้นถ้าเลือกสัดส่วนให้เหมาะสมก็สามารถใช้ประโยชน์ได้

4.3 ขนาดและการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งเป็นตัวกำหนดทำให้การผสมเข้ากันยากหรือง่าย มีอัตราการเกาะติดอย่างไร

ในอุตสาหกรรมการทำพอลิเมอร์ผสม มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ โดยไม่จำเป็นต้องไปสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมาใช้ และสะดวกเพราะมีวัตถุดิบให้เลือกมากมายหลายชนิด ในกรณีที่พอลิเมอร์สองชนิดไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเติมสารบางอย่างเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการเกาะติด โดยทั่วไปจะเรียกว่า สารเติมแต่ง (Additive) เข้ามาช่วยในกระบวนการทำพอลิเมอร์ผสม

5. สารเติมแต่งในพอลิเมอร์

สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ ได้แก่ สารที่เติมผสมลงในพอลิเมอร์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ สารเติมแต่งอาจเป็นได้ทั้งของแข็งและของเหลว สารเติมแต่งที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะเติมลงไปในพอลิเมอร์ ซึ่งอยู่ในสถานะของไหลโดยใช้ระบบทางช่วยในการผสม ปัญหาอันหนึ่งของสารเติมแต่งที่เป็นของแข็งก็คือพื้นผิวของอนุภาคจะหยาบถ้ากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ สารเติมแต่งที่เป็นของเหลวโดยทั่วไปจะมีขนาดโมเลกุลเล็กมากเมื่อเทียบกับสายโซ่พอลิเมอร์ จึงสามารถละลายเข้าไปในสายโซ่บางส่วน of พอลิเมอร์ได้ซึ่งก็เป็นกระบวนการที่ช้ามาก สารเติมแต่งบางชนิดทำให้เกิดก๊าซเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตจะทำให้เกิดรูพรุนได้

ตารางที่ 3 ประเภทของสารเติมแต่งสำหรับพอลิเมอร์

สารเติมแต่ง	หน้าที่
สารดัดแปรคุณสมบัติทางกล (Mechanical property modifiers)	
ฟิลเลอร์ (Fillers)	ลดต้นทุน เพิ่มความแข็งแรง
เส้นใยเสริมแรง (Reinforcing fibers)	เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งตึง
สารเพิ่มความทนแรงกระแทก (Impact modifiers)	เพิ่มความทนแรงกระแทก
สารก่อผลึก (Nucleating agent)	เพิ่มปริมาณผลึกขนาดเล็ก
พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)	เพิ่มความอ่อนตัวไม่เปราะ
สารดัดแปรคุณสมบัติทางเคมี (Chemical property modifiers)	
สารกันออกซิเดชัน (Antioxidants)	ป้องกันการสลายตัวจากการออกซิเดชัน
สารเพิ่มความเสถียรภาพทางแสงยูวี (UV stability)	ป้องกันการสลายตัวจากแสงยูวี
สารหน่วงไฟ (Flame retardants)	เพิ่มความทนไฟ
สารกันจุลินทรีย์ (Biocides)	ป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์และเห็ดรา

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สารเติมแต่ง	หน้าที่
สารดัดแปรคุณสมบัติที่พื้นผิว (Surface property modifiers)	
สารกันติด (Antiblocking agents)	ป้องกันไม่ให้แผ่นฟิล์มหรือชีทติดกัน
สารกันไฟฟ้าสถิต (Antistatic agents)	ลดหรือกำจัดการสะสมของประจุไฟฟ้าสถิตที่พื้นผิว
สารประสาน (Coupling agents)	เพิ่มแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย เสริมแรงหรือฟิลเลอร์
สารทำให้ลื่น (Release agents)	ลดสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่พื้นผิว
สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (Processing modifiers)	
สารฟู่ (Blowing agent)	ทำให้เกิดแก๊สเพื่อใช้ในการผลิตโฟม
สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents)	ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง
สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizers)	ป้องกันการสลายตัวจากความร้อน
พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)	ลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว
สารทำให้ลื่น (Release agents)	ป้องกันการติดกันกับเครื่องมือขึ้นรูป
สารหล่อลื่น (Lubricants)	ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับเครื่องจักรและแม่แบบขณะขึ้นรูป
สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (Aesthetic property modifiers)	
สารสี (Colorants)	ช่วยให้มีสีที่สดใสสวยงาม
สารให้กลิ่น (Odorants)	เพิ่มกลิ่นหอมหรือดับกลิ่นเหม็น
สารก่อผลึก (Nucleating agents)	ช่วยให้แสงผ่านพอลิเมอร์ได้มากขึ้น
สารกันจุลินทรีย์ (Biocides)	ป้องกันการเกิดกลิ่นและเชื้อรา

ที่มา: อรอุษา (2546)

ในการทำการผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกันจะมีปัญหาเรื่องการไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดังที่กล่าวมาแล้ว การใช้สารเข้ามาเติมแต่งเข้ามาช่วยในการผสมเข้าด้วยกัน กระบวนการนี้เรียกว่า สารช่วยผสม (Compatibilizer)

สารช่วยผสม เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อส่งเสริมให้พลาสติก 2 ชนิดที่ไม่สามารถผสมเข้ากันให้สามารถมีแรงยึดเกาะระหว่างกัน ซึ่งสารผสมจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั้วต่างกัน เมื่อมีการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างผิวหน้าจนทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเชื่อมเข้าด้วยกัน เมื่อมีการยึดเหนี่ยวกันแล้วจะทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่อง ดังนั้นทำให้พอลิเมอร์สามารถกระจายพลังงานผ่านเฟสได้อย่างทั่วถึง บางครั้งตัวสารช่วยผสมเองยังมียุทธศาสตร์เฉพาะตัว เช่น มีความยืดหยุ่นสามารถรับแรงกระแทก และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย

6. กระบวนการฉีดพลาสติก

การฉีดพลาสติกเข้าเบ้า (Injection mold) เป็นกระบวนการหลักในการผลิตชิ้นงานสำเร็จรูป เป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกที่สำคัญที่สุด ถ้านับเอาจากเครื่องแปรรูปพลาสติกทั้งหมด มูลค่าของชิ้นงานพลาสติกที่ผลิต และจำนวนชิ้นงานของพลาสติกทั้งหมดที่ผลิตจากเทคนิคนี้ กล่าวคือในบรรดาเครื่องแปรรูปพลาสติกทั้งหมด ประมาณ 60% เป็นเครื่องฉีดเข้าเบ้า โดยทั่วไปการแปรรูปพลาสติกโดยการฉีด ผลิตชิ้นงานที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 5 กรัม ถึง 90 กิโลกรัม

6.1 การคำนวณเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นในการฉีดพลาสติก

6.1.1 ขนาดของการฉีด (Shot capacity: cm^3 , cc, g, oz)

เป็นตัวเลขที่บอกถึงขนาดสูงสุดของการฉีด 1 ครั้ง ขนาดของการฉีดจะมี 2 ค่า คือ ค่าเลขจริง และค่าทฤษฎี

ก. ค่าเลขจริงแบ่งเป็น “น้ำหนักสูงสุดของผลิตภัณฑ์” และ “น้ำหนักที่ฉีดพลาสติกออกมาโดยไม่เข้าแม่พิมพ์” โดยทั่วไปจะใช้ค่าแรกเป็นค่าอ้างอิงแต่ในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ข. ค่าทางทฤษฎีเป็นตัวเลขที่คำนวณมาจากขนาดของเครื่องฉีดพลาสติก โดยทั่วไปจะแสดงค่าตัวเลขนี้เป็นหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

สูตรคำนวณ "Shot capacity" คือ

$$I_v = \frac{\pi D^2}{4} \times L \quad (1)$$

เมื่อ I_v = Shot capacity: cm^3

$\pi = 3.14$ (ค่าคงที่)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู: cm

L = ระยะถอยของสกรู (Screw Stroke: cm)

6.1.2 ความดันในการฉีด (Injection pressure: kg/cm^2)

เป็นค่าความดันสูงสุดของเครื่องฉีดพลาสติกที่กระทำต่อพลาสติกเหลวในกรณีที่เพิ่มค่าความดันของการฉีดโดยทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูลดลงจำเป็นต้องคำนึงถึงการลดลงของขนาดของการฉีด

สูตรคำนวณ "Injection pressure" คือ

$$I_p = \left[\frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{4P}{\pi D^2} \right] \quad (2)$$

เมื่อ I_p = ความดันของการฉีด: kg/cm^2

$\pi = 3.14$ (ค่าคงที่)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู: cm

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก Hydraulic: cm

P = ความดัน Hydraulic ของปั๊ม: kg/cm^2

6.1.3 อัตราของการฉีด (Injection rate: cm³/sec)

เป็นตัวเลขที่แสดงขนาดของการฉีด (ทางทฤษฎี) ต่อเวลา

สูตรคำนวณ “Injection rate” คือ

$$I_R = \left[\frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{4Q}{\pi d^2} \right] \quad (3)$$

เมื่อ I_R = ความดันของการฉีด: kg/cm²

π = 3.14 (ค่าคงที่)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู: cm

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก Hydraulic: cm

Q = ปริมาณน้ำมัน Hydraulic ที่เข้าสู่กระบอก Hydraulic: cm³/sec

6.1.4 ปริมาณการหลอมเหลว (Plasticizing capacity: kg/hr)

ค่าแสดงความสามารถของเครื่องฉีดพลาสติกในการหลอมเหลวต่อหนึ่งหน่วยเวลา วิธีการแสดงความสามารถของการหลอมเหลวพลาสติกแสดงได้ด้วยสูตรดังต่อไปนี้

สูตรคำนวณ “Plasticizing capacity” คือ

$$Rr = Pw / Pt \quad (4)$$

เมื่อ Rr = Recovery rate: g/sec

Pw = น้ำหนักเฉลี่ยของการฉีด 10 ครั้ง: g

Pt = เวลารอบเฉลี่ยของการฉีด 10 ครั้ง: sec

6.1.5 แรงดันในการฉีด (Injection force: ton)

แรงที่กระทำต่อพลาสติกเหลวขณะฉีดขึ้นรูปพลาสติก

สูตรคำนวณ “Injection force” คือ

$$F_i = \left[\frac{\pi d^2}{4} \cdot P \times 10^{-3} \right] \quad (5)$$

เมื่อ F_i = Injection force: kg/cm²

π = 3.14 (ค่าคงที่)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก Hydraulic: cm

P = ความดันของการฉีด: kg/cm²

6.1.6 ความเร็วในการฉีด (Injection speed: cm³/sec)

สูตรคำนวณ “Injection speed” คือ

$$V_I = \frac{I_R}{A} \quad (6)$$

เมื่อ V_I = Injection Speed: cm/sec

I_R = Injection Rate: cm³/sec

A = Project Area: cm²

6.1.7 ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed: RPM)

สูตรคำนวณ “Screw speed” คือ

$$n = \frac{60 \times \mu}{\pi \times D_s} \quad (7)$$

เมื่อ μ = Max. Peripheral screw speed: (m/s)

π = 3.14 (ค่าคงที่)

D_s = Screw diameter: m

6.1.8 แรงปิดล็อกแม่พิมพ์ (Clamping Force: kg/cm³, bar, ton)

สูตรคำนวณ “Clamping Force” คือ

$$\text{Clamping Force} = \text{Project Area} \times \text{Molding Cavity Pressure} \quad (8)$$

เมื่อ Molding Cavity Pressure มีค่าดังนี้

$$\text{Thermoplastics} = 300\text{-}350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Engineering Plastics} = 350\text{-}400 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Thermosetting} = 400\text{-}500 \text{ kg/cm}^2$$

6.1.9 ระยะชาร์จเม็ดพลาสติก (Charging stroke: mm)

สูตรคำนวณ “Charging stroke” คือ

$$\text{Charging stroke} = \frac{\text{Shot weight}}{\text{Shift weight}} \quad (9)$$

6.1.10 เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time: sec)

เวลาในการหล่อเย็นสามารถทำการคำนวณหาได้ 2 วิธี คือ

ก. วิธีที่ 1 ทางปฏิบัติ เป็นวิธีที่ใช้สูตรง่ายๆ เหมาะสำหรับผู้ควบคุมเครื่องฉีดพลาสติกโดยตรง

$$T = [(2 \times S) + 1] \times S \quad (10)$$

เมื่อ T = cooling time: sec

S = Well thickness: mm

ข. วิธีที่ 2 ทางทฤษฎี เป็นวิธีการใช้สูตรที่ได้คุณสมบัติทางความร้อนของพลาสติก ซึ่งจะมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

$$T = \frac{S^2}{\pi^2 \times a_{eff}} \times \ln \left[\frac{4}{\pi} \times \frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right] \quad (11)$$

เมื่อ T = cooling time: sec

S = Well thickness: mm

a_{eff} = Effective thermal diffusivity: mm^2/s

T_m = Melt temperature: $^{\circ}\text{C}$

T_e = Max. demoulding temperature: $^{\circ}\text{C}$

T_w = Mould temperature: $^{\circ}\text{C}$

6.2 การเตรียมความพร้อมของเครื่องฉีดและอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ดังนี้

6.2.1 การเตรียมความพร้อมของเป้าและชุดปิด-เปิดเป้า

ก. เปิดเป้าออก

ข. ไม่มีเศษชิ้นงานจากการฉีดครั้งก่อนหลงเหลือในเป้า

ค. ตั้งกระทุ้งชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งหดตัว

ง. ตั้งอุณหภูมิเป้าให้เหมาะกับชนิดพลาสติกที่ต้องการแปรรูป กล่าวคือ กรณีเทอร์โมพลาสติก อุณหภูมิของเป้าถูกควบคุมโดยน้ำหล่อเย็น แต่กรณีการฉีดเทอร์โมเซต ต้องตั้งความร้อนของเป้าตามอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ที่ทำการฉีด

6.2.2 การเตรียมความพร้อมในส่วนของชุดหลอมพลาสติกก่อนเริ่มการฉีด

ก. ให้ความร้อนแก่กระบอกฉีดและหัวฉีด โดยตั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมกับพลาสติกแต่ละชนิด

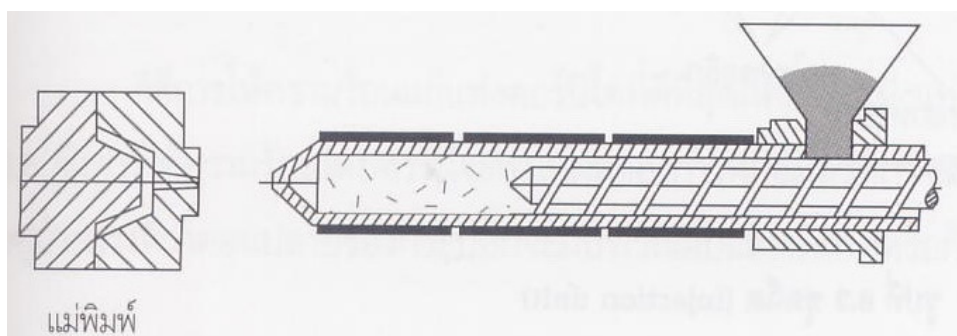
ข. ให้สกรูอยู่ในตำแหน่งถอยสุดตัว

ค. ปิดหัวฉีดเพื่อป้องกันพลาสติกหลอมรั่วออกมาข้างนอก โดยเฉพาะการฉีดพลาสติกที่มีค่าดัชนีการไหลสูง

6.3 การควบคุมการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

6.3.1 ปิดแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ทั้งสองด้านจะถูกเลื่อนมาชนปะกบกัน

6.3.2 ปิดแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง เมื่อแม่พิมพ์ปิดแล้วจึงทำการอัดด้วยแรงดันที่เพียงพอที่จะไม่ให้แม่พิมพ์ยับเขยื้อนเปิดออกมา เมื่อขณะทำการฉีดพลาสติก



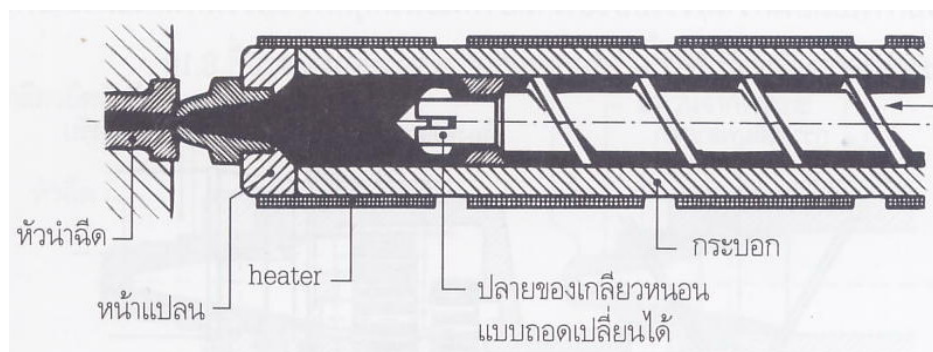
ภาพที่ 2 หัวฉีดเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

6.3.3 หัวฉีดเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (ชุดฉีดพลาสติกเคลื่อนตัวไปข้างหน้า)

ก. ชุดฉีดพลาสติกเคลื่อนตัวไปหารูฉีดของแม่พิมพ์

ข. Nozzle Head เคลื่อนไปข้างหน้าและสัมผัสกับรูฉีดของแม่พิมพ์

6.3.4 เริ่มฉีดพลาสติก เมื่อหัวฉีดไปสัมผัสกับรูฉีดของแม่พิมพ์ สกรูที่อยู่ภายในกระบอกหลอมละลายจะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าและอัดพลาสติกเหลวเข้าไปใน Cavity



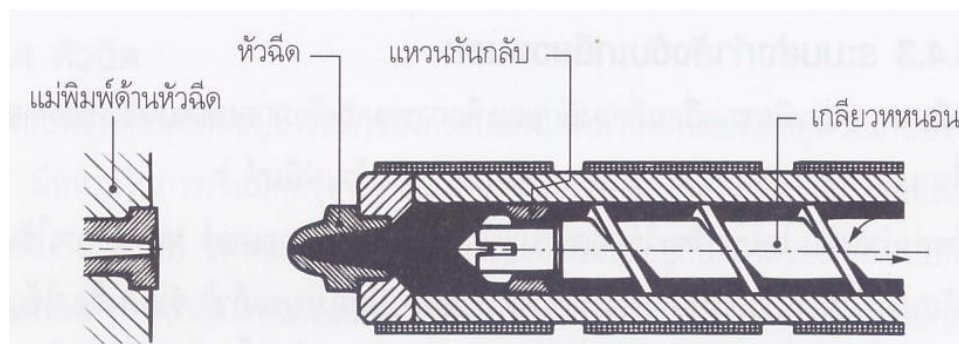
ภาพที่ 3 การเริ่มฉีดพลาสติก

6.3.5 สิ้นสุดการฉีด ประกอบด้วย 2 ขบวนการย่อย คือ

ก. ความดันต่ำ สกรูยังคงอัดพลาสติกเหลวไว้ให้เต็มใน Cavity หรือให้เต็มเข้าไปได้ ในบางส่วนของพลาสติกเหลวใน Cavity เกิดแข็งแล้วหดตัวเกิดช่องว่างขึ้น

ข. เวลาในการเย็นตัว พลาสติกเหลวที่ถูกอัดเข้าไปใน Cavity แล้วจะใช้เวลาในการเย็นตัวเพื่อกลายเป็นชิ้นงานพลาสติกแข็ง

6.3.6 การเตรียมพลาสติกเหลวเพื่อฉีด หลังจากหมดเวลาในการหล่อเย็นแล้ว สกรูจะหมุนและถอยกลับด้วยเพื่อให้เกิดช่องว่างบริเวณส่วนหัวของกระบอกฉีด แล้วทำให้พลาสติกที่ถูกบดและอัดดีแล้วไหลเข้ามาอยู่ในช่องว่างนี้ กลายเป็นพลาสติกที่หลอมละลายดีแล้ว และพร้อมที่จะฉีดใหม่ครั้งต่อไป



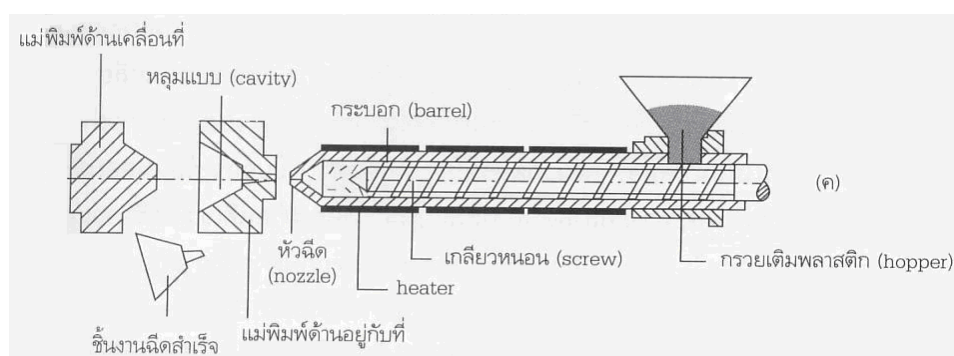
ภาพที่ 4 การเตรียมพลาสติกเหลวเพื่อฉีด

6.3.7 หัวฉีดเคลื่อนที่ถอยหลัง (ชุดฉีดพลาสติกเคลื่อนที่ถอยหลัง)

หัวฉีดจะถอยออกไปสัมผัสกับรูฉีดของแม่พิมพ์

6.3.8 เปิดแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ด้าน Core จะเคลื่อนที่ถอยออกทำให้แม่พิมพ์ทั้งสองด้านเปิดออกจากกัน

6.3.9 กระทั่งขึ้นงาน ระบบกระทั่งขึ้นงานจะทำงานโดยให้แกนกระทั่งเคลื่อนที่ไพล่พื้นผิวหน้าแม่พิมพ์เพื่อดันให้ชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 5 เปิดแม่พิมพ์และกระทั่งขึ้นงาน

6.3.10 เวลาในการพัก 1 ไซเคิล หลังจากจบกระบวนการ 1 ไซเคิลแล้วเครื่องฉีดพลาสติกจะหยุดพักชั่วคราว

6.3.11 เริ่มไซเคิลใหม่ หลังจากหยุดพักชั่วขณะเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มกระบวนการฉีดใหม่ต่อไป คือทำการปิดแม่พิมพ์ใหม่

6.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดพลาสติก

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ถูกนำมาใช้แทนผลิตภัณฑ์โลหะกันอย่างแพร่หลาย ในการผลิตชิ้นงานที่ทำด้วยพลาสติกจำนวนมากขึ้นจะอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า แม่พิมพ์ (Mold) ประกอบกับเครื่องจักรช่วยในการผลิต แม่พิมพ์ที่ผลิตใช้ผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีฉีดเรียกว่า แม่พิมพ์ฉีด (Injection mold) และแม่พิมพ์ที่ผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีอัดจะเรียก แม่พิมพ์อัด (Compression mold) เป็นต้นชนิดต่างๆ ของแม่พิมพ์ที่มีใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด ซึ่งมักจะเรียกชื่อตามกรรมวิธีในการผลิต

สำหรับเนื้อหานี้จะเป็นการแนะนำถึงความรู้เบื้องต้นที่ผู้ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดที่ควรจะต้องรู้ เพื่อจะใช้ประกอบในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้แก่ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องฉีดพลาสติก ชนิดต่างๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เครื่องมือและเครื่องจักรที่จะใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ฉีด ตลอดจนวิธีการปรับแต่งและการประกอบแม่พิมพ์ฉีด

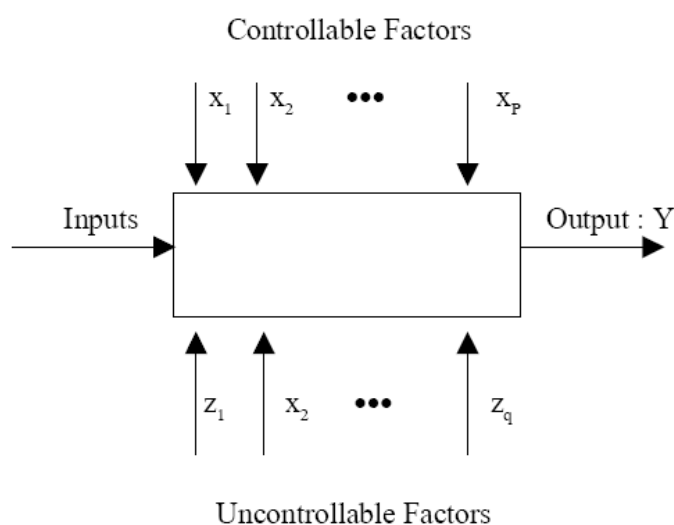
เนื่องจากการแนะนำเครื่องมือและเครื่องจักรเพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณา ออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเท่านั้น เนื้อหาต่างๆ จึงกล่าวไว้เพียงย่อๆ เฉพาะส่วนที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดเท่านั้น

7. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การทดลอง (Experiment) คือ การจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลอง โดยการทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้น คือ การทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นตัดสินใจ เป็นขั้นตอนการนำสิ่งที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่างๆ

7.1 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

Montgomery (1997) ได้กล่าวไว้ว่า วัตถุประสงค์ของการทดลองก็คือ เพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ



ภาพที่ 6 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ

จากภาพที่ 6 สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการ คือ การรวมกันของเครื่องจักร วิธีการคนและทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุตให้เป็นเอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า โดยที่ตัวแปรของกระบวนการบางตัว เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ $x_1, x_2, \dots, x_p$ ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆ $z_1, z_2, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นในการออกแบบทดลองจึงมีวัตถุประสงค์ดังนี้

หาตัวแปรที่มีผลต่อ Y มากที่สุด

หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ Y ที่ทำให้ได้ค่า Y ตามต้องการ

หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ Y ที่ทำให้ได้ค่า Y มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

หาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อ Y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ คือ มีค่าน้อยที่สุด $z_1, z_2, \dots, z_q$

ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

7.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

7.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก มีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

ประโยชน์ของการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการผลิตนั้น สามารถช่วยเพิ่มผลผลิต (Yield) และ ลดต้นทุน ลดความแปรปรวนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ตามค่าที่ต้องการลดเวลาในการพัฒนากระบวนการผลิต และเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ ส่วนประโยชน์ของการออกแบบการทดลองในการออกแบบเชิงวิศวกรรมนั้น ช่วยในการวิเคราะห์เลือกรูปแบบของผลิตภัณฑ์ เลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม เลือกพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทำงานได้ดีที่สุดและได้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ

7.2 หลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบการทดลอง

7.2.1 เรพลีเคชัน (Replication) เป็นการทดลองซ้ำๆ โดยมีคุณสมบัติ 2 ประการคือ

- ก. ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้
- ข. ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้ประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง ดังนั้น เรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองหาตัวประมาณที่ถูกต้องขึ้น

7.2.2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึงการทดลองที่ทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง นอกจากนี้

การใช้วิธีการแรนดอม (Random) ทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

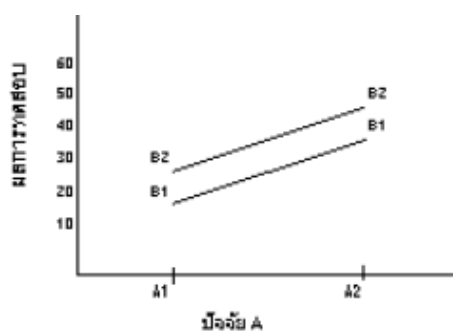
7.2.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่ง อาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมด

7.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

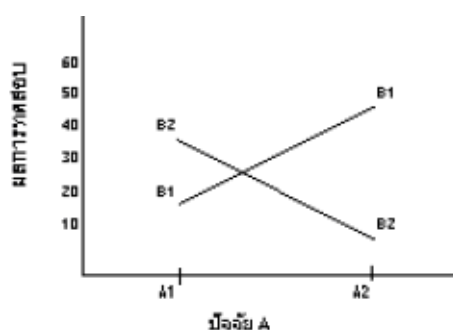
การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลหมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบินชัน (Treatment combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple factor experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ได้ด้วย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัยยิ่งกว่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้ สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลทำให้ เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 7 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 8 โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 7 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



ภาพที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลจะมีรูปแบบต่างๆ ไป คือ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อยๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc, \dots, n$ และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 เรพลิเคต ($n > 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำไปพิจารณาในแบบจำลอง

7.3.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของ

ปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k นั้นมีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้

7.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

ประไพศรี (2551) การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง (Response; y) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) สนใจศึกษาหรือปรับปรุงของผลิตภัณฑ์ (ผลลัพธ์; Output) จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

7.4.1 ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย (Factor) หรือ วิธีปฏิบัติ (Treatment) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่าความแตกต่างระหว่างกลุ่ม

7.4.2 ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากขาดความรู้ หรือความรู้เกี่ยวกับระบบยังไม่มากพอ ซึ่งในบางกรณีอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง (Noise Factors) ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or Residuals) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้ความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้นความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง

ความแตกต่างจากสาเหตุหลักทั้งสองส่วนนั้น สามารถแสดงได้ดังสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนอง ปัจจัย และความผิดพลาด ตามรูปแบบการทดลองได้ดังต่อไปนี้

$$Y_{ijk...} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (12)$$

โดยที่ μ = ค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)
 τ_i = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ระดับที่ i ; $i = 1, 2, \dots, a$
 β_j = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ระดับที่ j ; $j = 1, 2, \dots, b$
 $(\tau\beta)_{ij}$ = ปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา; Interaction) ระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i และปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j
 $\varepsilon_{ijk...}$ = ความผิดพลาด หรือส่วนที่ยังคงอธิบายไม่ได้จากการทดลอง
 (Error or Residuals)

ในการวิเคราะห์จะทำได้โดยการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็น ส่วนๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Squares) SS_T โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (13)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (14)$$

$$SS_B = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (15)$$

ผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมกันของปัจจัย 2 ตัว

$$SS_{AB} = SS_{subtotal} - SS_A - SS_B \quad (16)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (17)$$

ดังนั้นเมื่อเอาผลรวมกำลังสองของผลหลัก (Main effect) แต่ละตัวและอันตรกิริยา (Interaction) ไปหักออกจากผลรวมกำลังสองของทั้งหมด ก็จะได้ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการ

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotal} \quad (18)$$

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้ดังตารางที่ 4 โดยที่ ถ้า หาก $F_0 \leq F_{\alpha, v1, v2}$ แล้วถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผล สามารถยอมรับ H_0 ได้

7.5 การตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

7.5.1 กรณีทดสอบปัจจัยหลัก (Test of main factors)

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Y)

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าตอบสนอง (Y)

7.5.2 กรณีทดสอบปัจจัยร่วม (Test of interaction factors)

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Y)

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตอบสนอง (Y)

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Two-Factor Fixed Effect Model

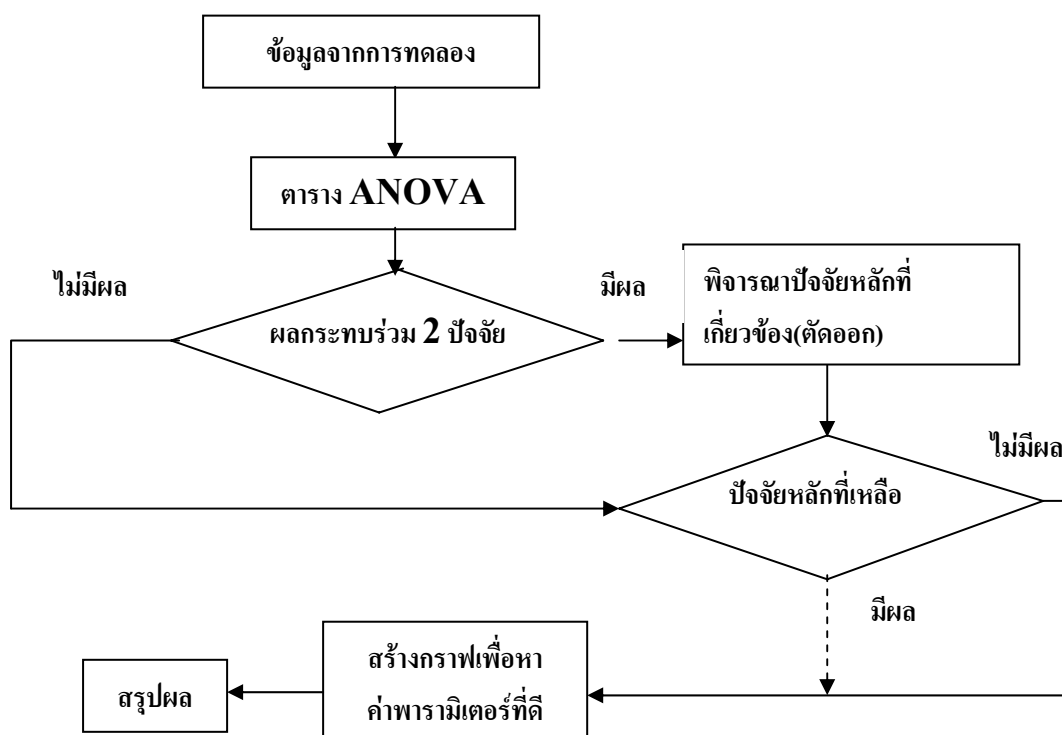
Source	Sum of squares (SS)	Degree of freedom (df)	Mean Squares (MS)	F0
A	SS_A	a-1	MS_A	MS_A/MS_E
B	SS_B	b-1	MS_B	MS_B/MS_E
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	MS_{AB}	MS_{AB}/MS_E
Error	SS_E	ab-(n-1)	MS_E	
Total	SS_T	abn-1		

ที่มา: ประไพศรี (2551)

7.6 ข้อควรระวังในการวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA)

7.6.1 ในการวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) กรณีการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k , 3^k หรือ อื่นๆ) นั้นจะทำการพิจารณาปัจจัยร่วมก่อนเสมอ ซึ่งในกรณีทำการวิเคราะห์มากกว่า 2 ปัจจัย (จะไม่พิจารณาผลกระทบตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป) และถ้าปัจจัยร่วมมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < \alpha$) จะไม่พิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับเทอมปัจจัยร่วม (ปัจจัยร่วม) นั้น

7.6.2 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial) จะทำการวิเคราะห์ด้วยตาราง ANOVA ได้ก็ต่อเมื่อมีการทำการทดลองซ้ำเท่านั้น



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ที่มา: ประไพศรี (2551)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชยันต์ (2548) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดไม่เต็มชิ้นงานซึ่งจะได้ค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ติดตั้งนอกอาคารเพื่อให้ได้สัดส่วนของเสียที่เหมาะสมที่สุดที่สุดด้วยการวิเคราะห์จากแผนการทดลองการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล ผลการทดลองพบว่า ความดันในการฉีดพลาสติก ความเร็วในการฉีดพลาสติก ความเร็วของสกรู ความเร็วในการหลอมพลาสติก และอุณหภูมิภายในกระบอกสูบส่วนกลาง และทำการวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการเกิดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน

นรสิษฐ์ (2547) เตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียว คัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 30% และไม่คัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งข้าวเหนียวเป็น 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบได้ และที่ปริมาณแป้ง 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีคุณสมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และความทนการดัดโค้งลดลง ในขณะที่การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และในแป้งที่ไม่คัดแปรให้ผลทางกลดีกว่า แต่การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปร

นริชา (2547) ศึกษาขนาดและปริมาณของเกลบมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิพลอสโตนคอมพาวด์ ขึ้นรูปด้วยการฉีด พบว่ามอดูลัสแรงดึง มอดูลัสโค้งงอ และความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงโค้งงอ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดครากมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเกลบเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดของเกลบทำให้วัสดุผสมที่มีการใช้เกลบขนาดเล็ก (≥ 200 เมช) มีมอดูลัสแรงดึง และมอดูลัสโค้งงอมากกว่าวัสดุผสมที่มีการใช้เกลบขนาดใหญ่ (20-35 เมช) ที่ปริมาณเกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนักให้คุณสมบัติทางกลโดยรวมที่ดีที่สุด นอกจากนี้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เกลบขนาดใหญ่และปริมาณเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติทางความร้อนของเกลบในพอลิพรอพิลีนอุณหภูมิการเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง

วีรเทพ (2550) ศึกษาปริมาณธาตุที่จะทำให้เกิดความบกพร่องของเหล็กดิบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลเหล็กหล่อที่ผลิตนี้มีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด โดยการออกแบบแฟลทอเรียล 2⁵ พบว่า ปริมาณคาร์บอนที่ 0.2%/kg ปริมาณแมงกานีส 0.6%/kg ปริมาณกำมะถัน 0.05%/kg และปริมาณซิลิกอน 0.5%/kg มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัส ไม่มีระดับนัยสำคัญ เมื่อนำผลมาใช้ในการกระบวนการทำงานจริงพบว่า ไม่พบความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนเหล็กดิบ และเมื่อนำเหล็กดิบไปผลิตเป็นเหล็กหล่อ พบว่า ความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กหล่อที่ได้จะมีค่าระหว่าง 52.43-55.08 kg/mm²

Chandra and Rustgi (1997) ดัดแปร โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แล้วผสมกับแป้งข้าวโพด โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์บนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในไซลีน ใช้ไดคลอไรด์เปอร์ออกไซด์เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ใช้ปริมาณของแป้งข้าวโพดดัดแปรและไม่ดัดแปรที่ต่างกัน (ระหว่าง 10 และ 60 เปอร์เซ็นต์) ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเพื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืดดึงลดลง เมื่อปริมาณแป้งที่ผสมเพิ่มขึ้น แล้วทดสอบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมทางชีวภาพ โดยใช้วิธีฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือน และผสมเชื้อราเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่า การฝังดินทำให้เกิดการย่อยสลายได้มากกว่าการใช้เชื้อราเพียงอย่างเดียว

Kaitkamjornwong *et al.* (1997) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่เติมแป้งโปรออกซิไดซ์คาร์โบไฮเดรต (prooxidized carbohydrate) โดยการวางไว้กลางแจ้งบนพื้นดินและฝังไว้ในดิน ผลการทดลองพบว่า แผ่นฟิล์มที่ไม่เติมแป้ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะตากไว้ในที่กลางแจ้งบนพื้นดินหรือฝังไว้ใต้ดิน แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งมีการสูญเสียคุณสมบัติเฉพาะเมื่อปริมาณของแป้งที่เติมลงไปแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น อัตราการย่อยสลายมีค่าสูงขึ้น และความแข็งแรงดึง (tensile strength) มีค่าลดลงมากหลังจากทิ้งตากไว้เป็นเวลา 6 เดือน จำนวนคาร์โบไฮเดรตที่ลดลงเชื่อว่าจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม

Mani and Bhattacharya (1997) ศึกษาแป้งข้าวโพดที่มีอัตราส่วนของปริมาณอะไมโลเพกตินต่ออะไมโลสที่แตกต่างกัน ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในส่วนผสมของแป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลส 0 25 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ นำไปฉีดขึ้นรูปที่ อุณหภูมิ

หกลมเหลว 155 ความดันย้อนกลับ 0.5 เมกะพาสคาล องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 155 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 100 รอบต่อนาที และความดันในการฉีด 8 เมกะพาสคาล พบว่าคุณสมบัติความแข็งแรงดึงและทนแรงคดโค้งมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเป่ามีเปอร์เซ็นต์อะไมโลส 70 เปอร์เซ็นต์ และสูงมากขึ้น เมื่อมีปริมาณอะไมโลสต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ผลการทดสอบการดูดซับความชื้น พบว่าเป่าที่มีปริมาณอะไมโลสน้อยสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าเป่าที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

Pedroso and Rosa (2005) ศึกษาอิทธิพลของแป้งข้าวโพดที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว มาผสมกับแป้งข้าวโพดในปริมาณ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ค่าดัชนีการไหล ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดลดลง ในขณะที่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าดัชนีการไหล ความแข็งแรงดึงนี้ส่งผลให้เห็นเด่นชัดเมื่อมีการเพิ่มแป้งข้าวโพดลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นแสดงให้เห็นถึงแรงกระทำระหว่างผิวหน้าของเฟสทั้งสองอย่างอ่อนๆ เมื่อมีการนำแป้งข้าวโพดมาผสมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์

Thakore *et al.* (2001) เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันฝรั่งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร และที่ดัดแปรด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับฟทาสิกแอนไฮไดรด์ ได้เป็นแป้งฟทาเลต โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถผสมเข้ากับแป้งฟทาเลตได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าด้วย และพบว่าปริมาณแป้งที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

งานวิจัยทำการศึกษาคูณสมบัติทางกล ความร้อนและการทนทานต่อสารเคมี ความสามารถเป็นเนื้อเดียวกันได้ ไม่มีการแยกเฟสของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในอัตราส่วนต่างๆ โดยนำไปฉีดขึ้นรูปและหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k ดังนั้นจะต้องจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์รวมไปถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆ ให้พร้อม เพื่อเป็นการลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะปฏิบัติงาน มีดังต่อไปนี้

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 แกลบข้าว (commercial grade จากบริษัท Biomass technology Co., Ltd)
- 1.2 แป้งข้าว (commercial grade จากบริษัท Biomass technology Co., Ltd)
- 1.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE: JJ4324 grade จากบริษัทTPI Co., Ltd)
- 1.4 เมทานอล
- 1.5 โทลูอิน
- 1.6 น้ำมันเบนซิน
- 1.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 1.8 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 1.9 น้ำกลั่น

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

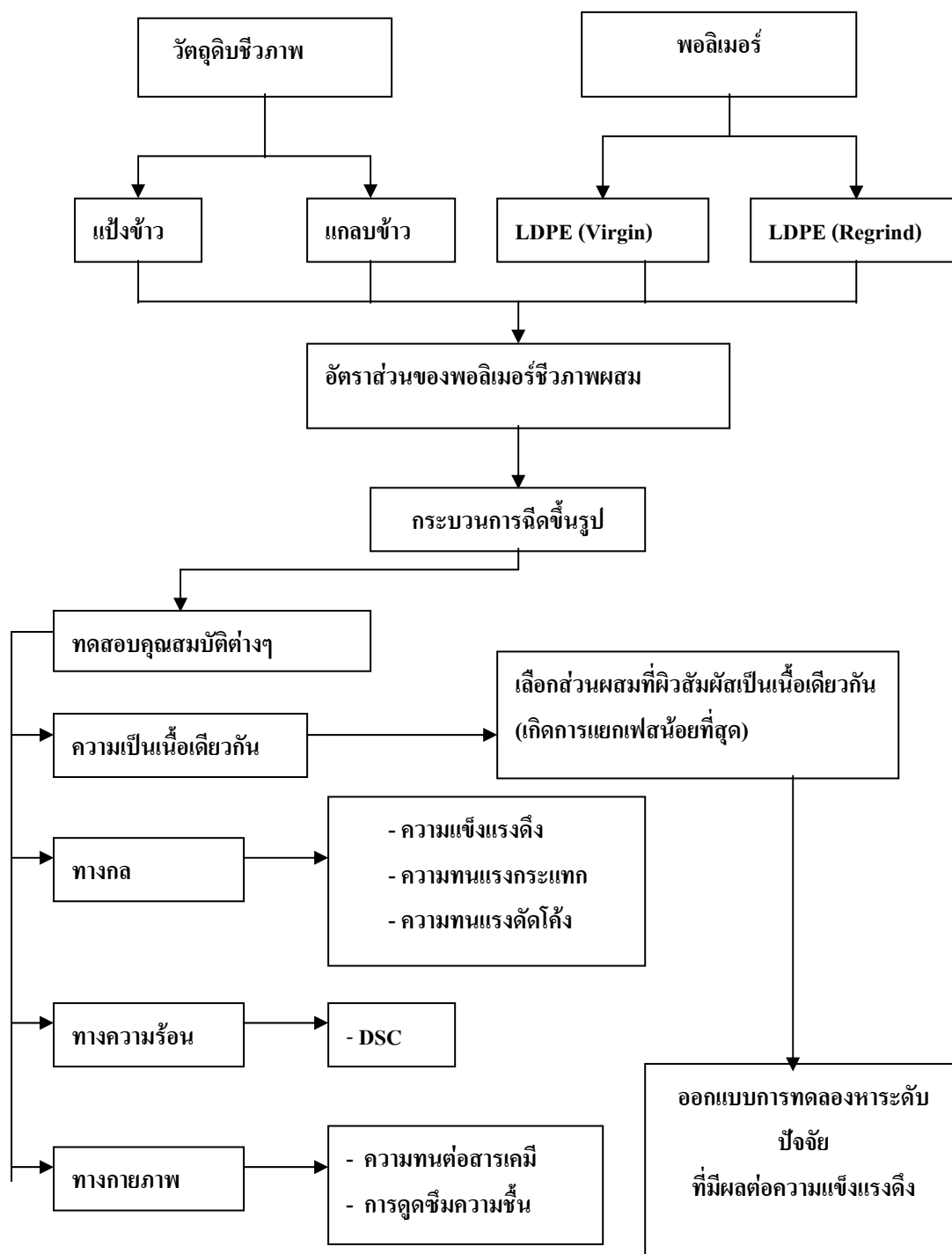
- 2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 2.2 ถาดอะลูมิเนียม
- 2.3 เทอร์โมมิเตอร์
- 2.4 เวอร์เนียร์
- 2.5 เซลลิวโลส
- 2.6 เตาอบ

- 2.7 เครื่องบากมุม
- 2.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 2.9 เครื่องบดพลาสติก
- 2.10 เครื่องเลื่อยไฟฟ้า
- 2.11 เครื่องวัดความชื้น
- 2.12 เครื่องพ่นสี

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (บริษัท Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC)
- 3.2 เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อม Hard Disk
- 3.3 เครื่อง Universal Testing Machine (บริษัท Hounsfield รุ่น model H50k-s)
- 3.4 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (บริษัท Gotech รุ่น GT-7045-I)
- 3.5 เครื่องวัดความชื้น (บริษัท Technical รุ่น model HR-200)
- 3.6 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน Differential scanning calorimeter, DSC (บริษัท Perkin Elemer รุ่น model DSC7)
- 3.7 โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ขั้นตอนในการทดลอง



ภาพที่ 10 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

วิธีการ

1. การเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับวัตถุดิบชีวภาพนั้นจะต้องทำการอบแห้งข้าวและ แกลบข้าว ซึ่งผ่านการเคียวแล้วด้วยสูตรทางการค้าของบริษัท นำเข้าสู่เครื่องผสมอัดรีดเป็นเม็ดแล้ว ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก วัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่เกิน 0.2 % จากนั้นก็นำมาผสมตามอัตราส่วนต่างๆกัน ดังตารางที่ 5 โดยใช้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพในปริมาณที่สูงตั้งแต่ร้อยละ 70-85 เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ซึ่งย่อยสลายได้ยากจึงใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไม่เกินร้อยละ 30 เปรียบเทียบกับร้อยละ 100

ตารางที่ 5 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (LDPE (RE)) และ แป้งข้าว (RS)

สูตร	LDPE(Virgin) (% โดยน้ำหนัก)	LDPE(Regrind) (% โดยน้ำหนัก)	แป้งข้าว (% โดยน้ำหนัก)
RS 0/LDPE 100	100		0
RS 70/LDPE 30	30		70
RS 75/LDPE 25	25		75
RS 80/LDPE 20	20		80
RS 85/LDPE 15	15		85
RS 100/LDPE 0	0		100
RS 0/LDPE(Re) 100		100	0
RS 70/LDPE(Re) 30		30	70
RS 75/LDPE(Re) 25		25	75
RS 80/LDPE(Re) 20		20	80
RS 85/LDPE(Re) 15		15	85

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (LDPE (RE)) และ แกลบข้าว (RC)

สูตร	LDPE(Virgin) (% โดยน้ำหนัก)	LDPE(Regrind) (% โดยน้ำหนัก)	แกลบข้าว (% โดยน้ำหนัก)
RC 0/LDPE 100	100		
RC 70/LDPE 30	30		70
RC 75/LDPE 25	25		75
RC 80/LDPE 20	20		80
RC 85/LDPE 15	15		85
RC 100/ LDPE 0	0	100	100
RS 0/LDPE(Re) 100		100	
RC 70/LDPE(Re) 30		30	70
RC 75/LDPE(Re) 25		25	75
RC 80/LDPE(Re) 20		20	80
RC 85/LDPE(Re) 15		15	85

2. การฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

การนำพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในอัตราส่วนต่างๆ มาผ่านเข้าสู่กระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้น เป็นการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปได้ การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันบนพื้นผิวสัมผัสที่ปรากฏ และในการขึ้นรูปนั้นจะใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก ของบริษัท Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC ขนาด 40 ตัน เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 22 มิลลิเมตร แม่พิมพ์เป็นรูปตัวดัมเบลล์ (Dumbbell-shaped) จากนั้นนำชิ้นงานจากการขึ้นรูปไปทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ในขั้นตอนต่อไป โดยการฉีดขึ้นรูปนั้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 นำพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้ มาทำการฉีดขึ้นรูป โดยปรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายของของผสมโดยเริ่มจาก 160° C แล้วเพิ่มทีละ 5° C จนกระทั่งของผสมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2.2 ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฉีด เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้เต็มชิ้นงานพอดี

2.3 นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกายภาพ

2.4 เปรียบเทียบ เลือกส่วนผสมที่ขึ้นรูปแล้วให้เนื้อสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการแยกเฟส น้อยที่สุด ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หาค่าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง



ภาพที่ 11 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก บริษัท Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC

3. การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

3.1 การทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

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



ภาพที่ 12 เครื่อง Hounsfield Universal Testing Machine Model H50K-S



ภาพที่ 13 ชิ้นงานทดสอบ

สภาวะในการทดสอบ

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	50 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการเคลื่อนที่	50 มม./นาที
ระยะห่างการยึดจับ(Grip)	105 มิลลิเมตร

3.2 การทดสอบคุณสมบัติความทนแรงกระแทก (Impact strength)

เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod) โดยใช้
เครื่อง GOTECH Pendulum Impact tester (Model GT-7045-I)



ภาพที่ 14 เครื่อง GOTECH Pendulum Impact tester (Model GT-7045-I)

สภาวะในการทดสอบ

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
น้ำหนักค้ำทดสอบ	1.357 กิโลกรัม
ระยะการเคลื่อนที่	150 องศา

3.3 การทดสอบคุณสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength)

เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D790 โดย Hounsfield Universal Testing Machine (Model H50K-S)



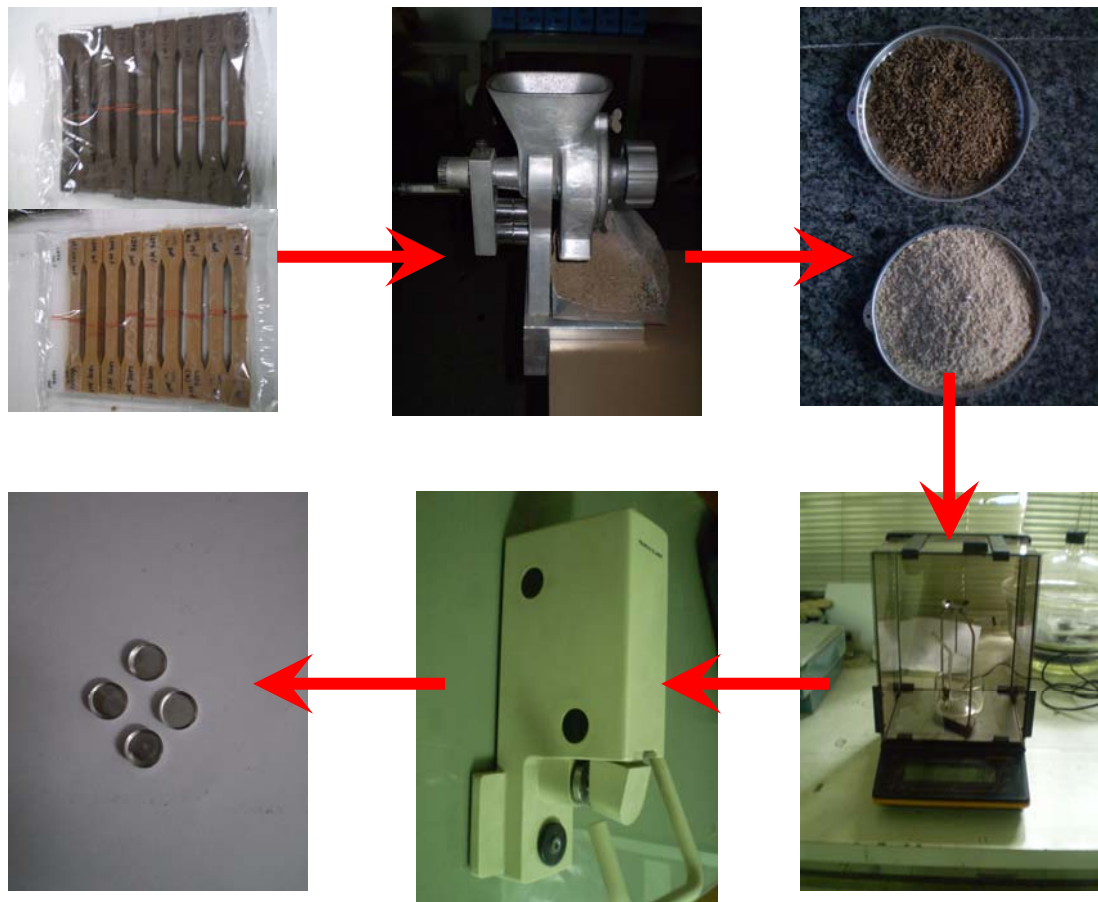
ภาพที่ 15 เครื่อง Hounsfield Universal Testing Machine Model H50K-S

สภาวะในการทดสอบ

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	1000 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการเคลื่อนที่	2 มม./นาท
ความยาวของชิ้นงาน	100 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างฐาน	80 มิลลิเมตร

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (Differential scanning calorimetry, DSC)

เป็นการวิเคราะห์ค่าความร้อนของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมโดยใช้เครื่อง DSC บริษัท Perkin Elemer รุ่นmodel DSC7 ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุในกระโถอะลูมิเนียมที่ปิดผนึกด้วยฝาไปใส่ในเตาของเครื่อง DSC ดำเนินการหลอมพอลิเมอร์ชีวภาพผสมเพื่อหาความร้อนและอุณหภูมิการหลอมเหลว โดยให้อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C คงตัวเป็นเวลา 2 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงตัว $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 200°C ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 200°C เป็นเวลา 1 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิกงตัว $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เพื่อหาความร้อนและอุณหภูมิการตกผลึก



ภาพที่ 16 วิธีการเตรียมชิ้นทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC



ภาพที่ 17 เครื่องแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (Differential scanning calorimetry, DSC)
บริษัทPerkin Elemer รุ่นmodel DSC7

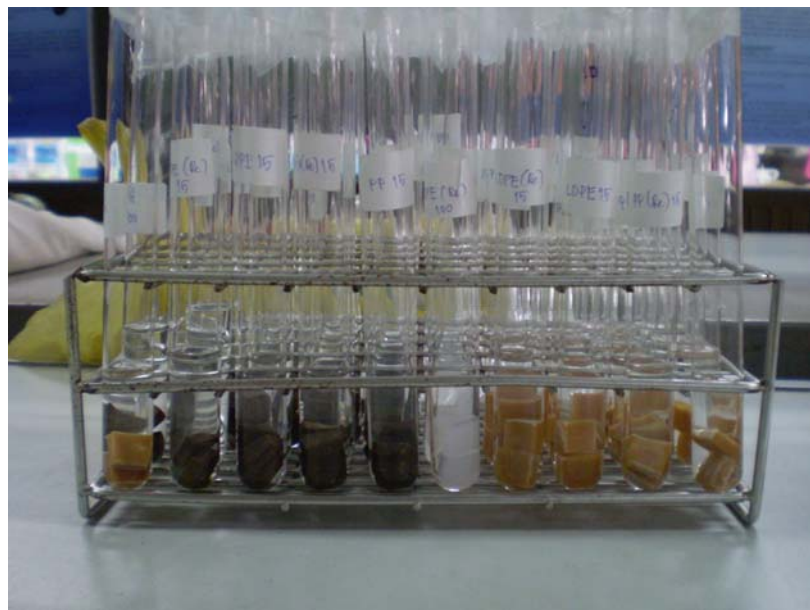
3.5 การทดสอบความทนต่อสารเคมี (Chemical Resistance)

เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบในสารละลายแต่ละหลอดทดลองปริมาณ 5 มิลลิลิตร ได้แก่ เมทานอล กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ โทลูอีน น้ำมันเบนซิน และน้ำกลั่น ใช้พาราฟิล์มปิดปากหลอดทดลองให้สนิท ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนแปลง จากนั้นใช้คีมคีบชิ้นทดสอบออกมาซักด้วยกระดาษทิชชูเบาๆ รีบทำการวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป หาเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นทดสอบ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = \left(\frac{D_2 - D_1}{D_1} \right) \times 100 \quad (19)$$

เมื่อ D_1 = ขนาดของชิ้นงานก่อนการทดสอบ

D_2 = ขนาดของชิ้นงานหลังการทดสอบ



ภาพที่ 18 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในสารละลาย

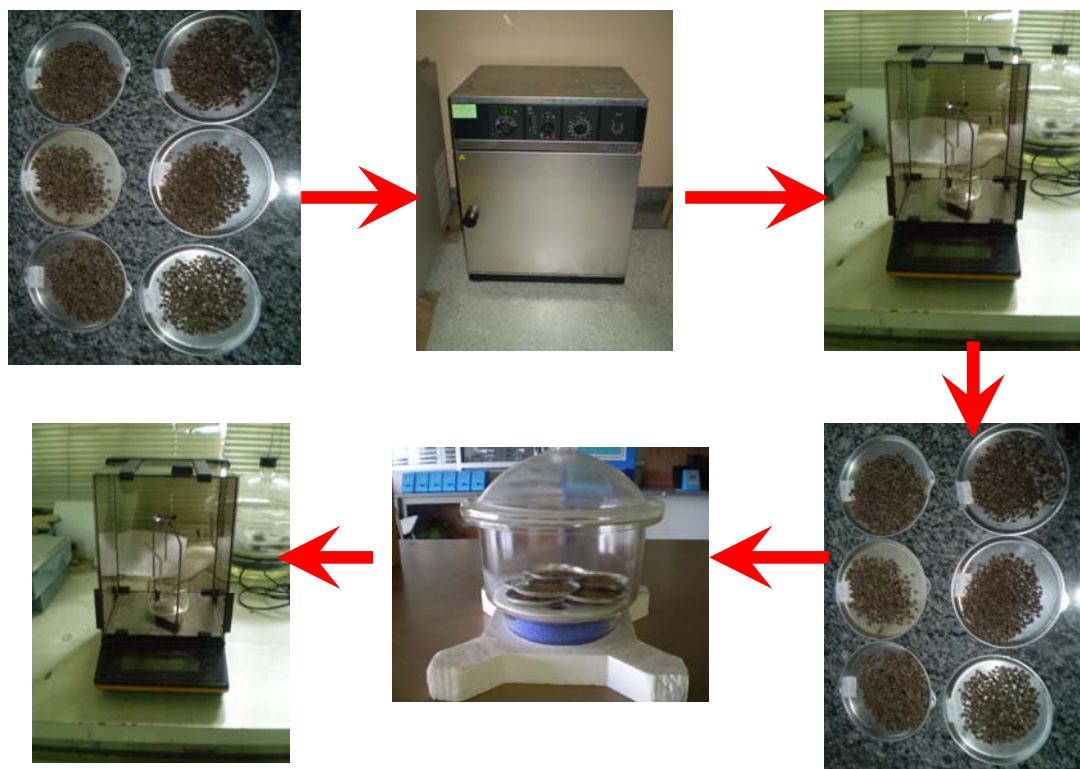
3.6 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมความชื้น (Moisture absorption)

เตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในแต่ละสูตร โดยการนำไปชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกข้อมูล จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานทดสอบมาชั่ง น้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาความสามารถในการดูดซึมความชื้น จากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad (20)$$

เมื่อ M_1 = น้ำหนักของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

M_2 = น้ำหนักของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่ตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมความชื้น

4. การวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง

ทำการศึกษาปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดพลาสติก และสร้างสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระต่างๆ และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยทำตามขั้นตอนดังนี้

4.1 กำหนดและทำความเข้าใจปัญหา ศึกษาการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสม เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล และการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีคุณภาพ ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ เช่น ไม่เกิดครีบ (flash) หรือฉีดไม่เต็มชิ้นงาน (shot mold)

4.2 คัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการฉีดพลาสติก

4.2.1 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน

4.2.2 คัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลมาทำการทดลอง

4.3 กำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง โดยทำการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่คาดว่าจะมีผล ด้วยการศึกษาความสามารถการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดค่าของแต่ละปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลในกระบวนการการฉีดพลาสติก

4.4 ออกแบบแผนการทดลองเพื่อทำการกรองปัจจัย (Screening) ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้

4.4.1 เลือกแผนการออกแบบ โดยนำหลักการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) แบบสองระดับ มาใช้ในการทดลอง

4.4.2 เลือกจำนวนตัวอย่างที่จะใช้ในการฉีดในแต่ละหน่วยการทดลอง

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากแผนการทดลอง

4.5.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบแต่ละปัจจัยว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่

4.5.2 ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย

ก. การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

ข. การทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual)

ค. การทดสอบของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน

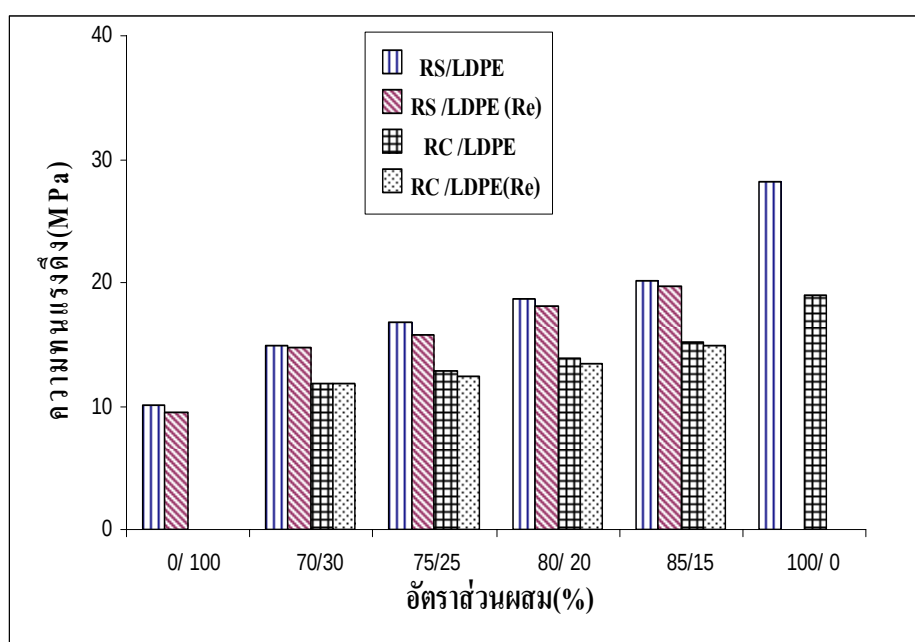
4.6 กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมและสร้างสมการตัวแบบ

ผลและวิจารณ์

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

1.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง แป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS/LDPE) แป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (RS/LDPE (Re)) แกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RC/LDPE) และแกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (RC/LDPE (Re)) สามารถแสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดถึง ้น จุดขาด (% elongation at break) ดังกราฟภาพที่ 20 และ 21 ตามลำดับ



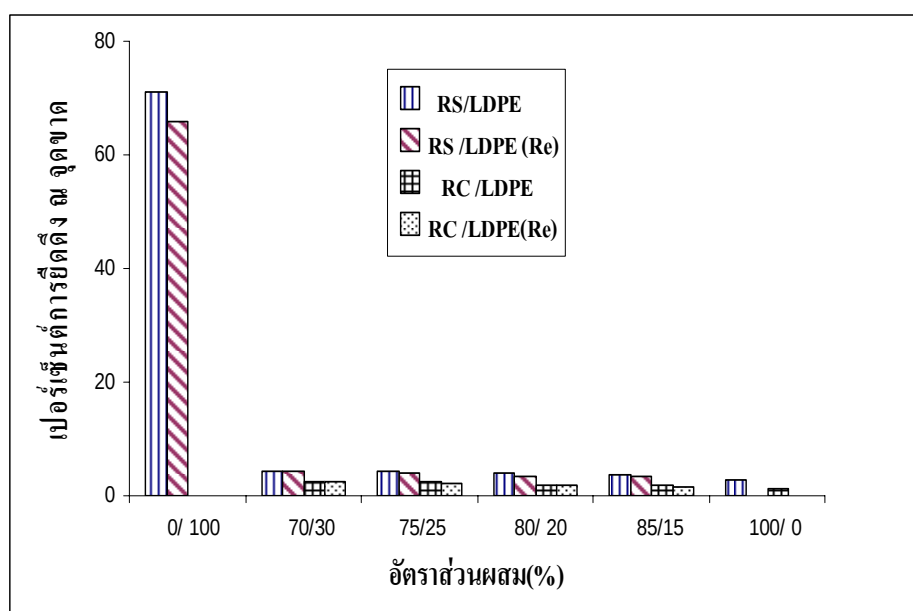
ภาพที่ 20 ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพดังภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพ

ผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมดังกล่าว มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE 100%) สันนิษฐานได้ว่า วัตถุดิบชีวภาพมีความเป็นผลึกมากกว่า และส่วนผสมที่มีปริมาณมากกว่าอาจทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ปริมาณผลึกในพอลิเมอร์ชีวภาพผสมมีมากกว่าในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเฉพาะส่วนผสมของแป้งข้าวนั่น ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าส่วนผสมที่เตรียมจากเกลบข้าว เนื่องจากโครงสร้างของแป้งข้าวมีการจัดเรียงตัวได้ดี

จากการตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (LDPE) และพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (LDPE (RE)) โดยการทดสอบผลทางสถิติในช่วงความเชื่อมั่น 95% พบว่า ให้ผลแตกต่างกันโดยพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (LDPE) มีค่าความแข็งแรงดึงที่สูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (LDPE (RE)) ประมาณ 5.2% ดังแสดงผลในภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง ดังแสดงในภาคผนวก ข พบว่า เมื่อปริมาณวัตถุดิบชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ที่ส่วนผสมของแป้งข้าว 85 % โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 20.02 MPa



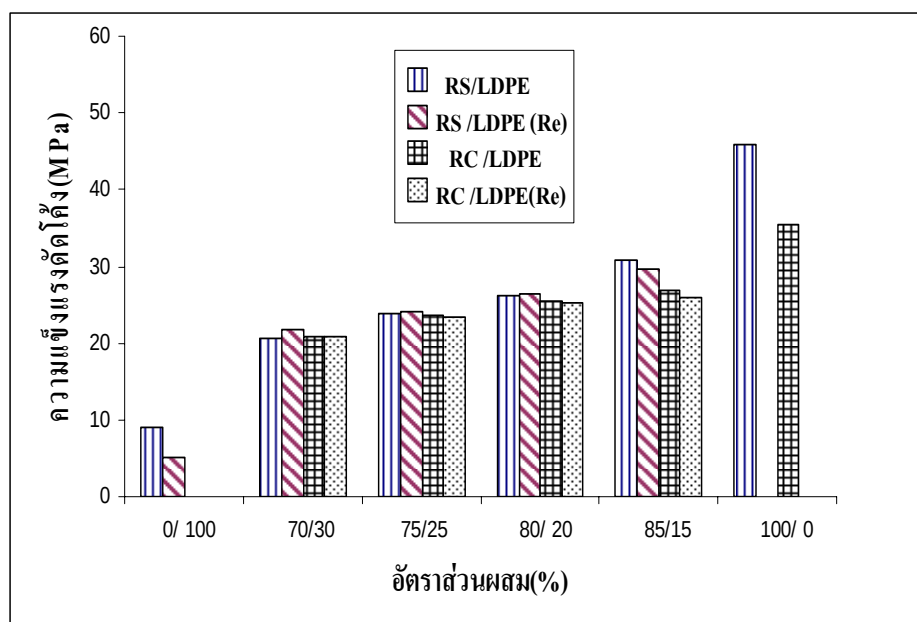
ภาพที่ 21 เปอร์เซนต์การยืดดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากภาพที่ 21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของวัตถุดิบชีวภาพมีปริมาณสูงขึ้น แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีความสามารถในการยืดตัวสูงอยู่แล้ว ส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการผสมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่นั้นได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วหนึ่งครั้ง จึงเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ทางโครงสร้างหรือคุณสมบัติบางประการ อาจส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดต่ำลงตามไปด้วย

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่า ที่ส่วนผสมของแป้งข้าว 85 % โดยน้ำหนัก ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด ต่ำสุดที่ 1.539 %

1.2 ความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural strength)

จากการทดลองความแข็งแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมดังแสดงในภาพที่ 22 เห็นได้ชัดว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะมีความแข็งแรงดัดโค้งค่อนข้างต่ำวัตถุดิบชีวภาพเนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์ชนิดที่มีความอ่อนตัวสูง ยืดหยุ่น และเมื่อเติมวัตถุดิบชีวภาพลงไปปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามีความแข็งแรงดัดโค้งสูงขึ้น ในส่วนผสมของแป้งข้าวนั้นพบว่าความแข็งแรงดัดโค้งมีค่าต่ำกว่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับส่วนผสมของแป้งข้าว เนื่องจากแป้งข้าวมีความเปราะกว่า และเมื่อเทียบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่นั้นให้ค่าความแข็งแรงดัดโค้งใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก7-ก8

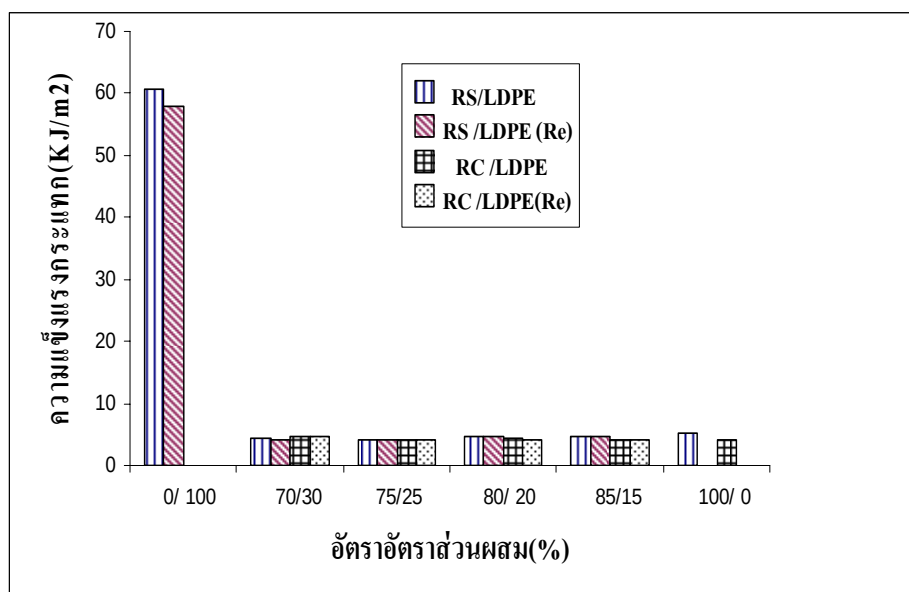


ภาพที่ 22 ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่า ที่ส่วนผสมของแอลบข้าว 85 % โดยน้ำหนัก กับ LDPE ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 26.70 MPa

1.3 ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถทนแรงกระแทกได้ประมาณ 60 กิโลจูลต่อตารางเมตร และเมื่อนำไปผสมกับวัตถุดิบชีวภาพที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น คือ ตั้งแต่ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป พบว่าความสามารถในการทนแรงกระแทกลดลงมาก อย่างเห็นได้ชัดและเมื่อเพิ่มปริมาณวัตถุดิบชีวภาพ ความสามารถในการทนแรงกระแทกที่ลดลงนั้น ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังตารางผนวกที่ ค5-ค6 ซึ่งได้ค่าไม่เกิน 5 กิโลจูลต่อตารางเมตร เนื่องจากทั้ง แป้งข้าวและแอลบข้าวมีความเปราะ เมื่อเติมลงไปทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความเปราะมากขึ้น ความอ่อนตัวหรือยืดหยุ่นจึงลดลง ทำให้รับแรงกระแทกได้น้อยลง



ภาพที่ 23 ความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

2. การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (Differential scanning calorimetry, DSC)

จากผลการตรวจสอบดังตารางที่ 7 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความร้อนของการตกผลึกลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งข้าวไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ความเป็นผลึกลดลง เป็นเหตุให้พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึกมีแนวโน้มลดลงด้วย สำหรับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้จากกลีบข้าว พบว่า การเพิ่มปริมาณกลีบข้าวไม่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการเกิดผลึก แต่ค่าความร้อนของการตกผลึก มีค่าแนวโน้มใกล้เคียงกันกับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้จากแป้งข้าว ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)

อัตราส่วนผสม	RS/LDPE			RS/LDPE(RE)		
	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
0/ 100	97.08	94.21	-1051.51	97.09	95.21	-1000.96
70/30	97.39	95.29	-263.53	97.58	95.24	-264.34
75/25	98.46	96.15	-222.2	97.58	95.33	-244.53
80/ 20	99.7	97.65	-198.03	97.87	95.95	-212.18
85/15	99.85	98.03	-192.6	99	96.56	-161.3
100/ 0	119.72	103.07	-126.6	119.72	103.07	-126.6

ตารางที่ 8 อุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และ พลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC/LDPE กับ RC/LDPE RE

อัตราส่วนผสม	RC/LDPE			RC/LDPE(RE)		
	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
0/ 100	97.08	94.21	-1051.51	97.09	95.21	-1000.96
70/30	96.52	94.45	-286.38	97.08	94.17	-285.18
75/25	97.22	94.62	-264.98	97.51	94.65	-274.97
80/ 20	97.39	94.48	-242.85	98.39	94.8	-237.94
85/15	97.43	94.96	-233.18	98.17	95.39	-212.59
100/ 0	113.72	96.39	-154.51	113.72	96.39	-154.51

3. การทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

3.1 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 9-12 พบว่า พอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านกระบวนการ

ขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง มีความทนทานต่อสารเคมีใกล้เคียงกัน ณ อุณหภูมิห้อง และพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจากแป้งข้าว จะมีการบวมตัวสูงกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจากกลบข้าว โดยมีระดับการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งมีข้ออยู่ในโครงสร้าง จากการที่แป้งข้าวมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างสูง ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอย่างหนาแน่นจึงเหลือหมู่ไฮดรอกซิลที่จะเกิดอันตรกิริยากับสารละลายน้อยลง จึงไม่เกิดการละลาย เพียงแต่บวมตัวเฉยๆ ซึ่งเกิดจากการแทรกซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในชิ้นงานเพียงบางส่วน

ในกรณีพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่ทดสอบในสารละลายที่มีความเป็นขี้ด่ำ ได้แก่ โทลูอิน น้ำมันเบนซิน จะเกิดการบวมตัวลดน้อยลง เมื่อปริมาณแป้งข้าว หรือกลบข้าวเพิ่มมากขึ้น และแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเลย เมื่อทดสอบในสารละลายเมทานอล

ตารางที่ 9 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวกับพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS/LDPE) ในสารละลายเคมีต่างๆ

อัตราส่วนผสม RS/LDPE	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมี					
	HCl	NaOH	โทลูอิน	เบนซิน 91	เมทานอล	น้ำกลั่น
0/100	0.25	0.10	11.78	3.24	0.23	0.000
70/30	0.78	3.72	6.83	2.52	0.58	2.16
75/25	1.87	11.70	6.52	2.34	0.45	3.22
80/20	3.85	17.12	5.36	2.30	0.47	3.71
85/15	6.87	18.51	5.20	2.10	0.44	4.84
100/0	10.97	57.80	3.59	1.82	0.17	16.563

ตารางที่ 10 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RS/LDPE (RE) ในสารละลายเคมีต่างๆ

อัตราส่วนผสมRS/LDPE(RE)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมี					
	HCl	NaOH	โทลูอิน	เบนซีน 91	เมทานอล	น้ำกลั่น
0/100	0.14	0.05	11.53	3.43	0.26	0.02
70/ 30	0.95	3.03	7.49	2.30	0.44	1.91
75/25	3.28	14.66	6.65	2.24	0.35	4.02
80/20	4.82	23.19	5.37	2.11	0.27	6.03
85/15	5.00	24.03	4.62	2.07	0.21	8.68
100/0	10.97	57.80	3.59	1.82	0.17	16.56

ตารางที่ 11 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC/LDPE ในสารละลายเคมีต่างๆ

อัตราส่วนผสมRC/LDPE	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมี					
	HCl	NaOH	โทลูอิน	เบนซีน 91	เมทานอล	น้ำกลั่น
0/100	0.26	0.1	11.78	3.24	0.24	0
70/ 30	0.46	2.34	6.57	2.68	0.48	0.8
75/25	0.52	3.86	5.63	2.53	0.44	1.13
80/20	0.54	5.87	5.64	2.48	0.42	0.92
85/15	0.57	7.33	5.34	2.36	0.49	0.75
100/0	1.28	12.8	3	1.56	0.4	1.51

ตารางที่ 12 การบวมตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างเกลบข้าวกับพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำผ่านการขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในสารละลายเคมีต่างๆ

อัตราส่วนผสม RC/LDPE(RE)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมี					
	HCl	NaOH	โทลูอีน	เบนซีน 91	เมทานอล	น้ำกลั่น
0/100	0.136	0.051	11.535	3.431	0.261	0.126
70/ 30	0.405	1.074	6.64	2.677	0.446	0.59
75/ 25	0.459	2.545	6.081	2.628	0.483	0.71
80/20	0.603	4.097	5.375	2.43	0.435	0.78
85/ 15	0.702	6.768	4.816	2.411	0.444	0.846
100/0	1.276	12.8	2.999	1.561	0.404	1.512

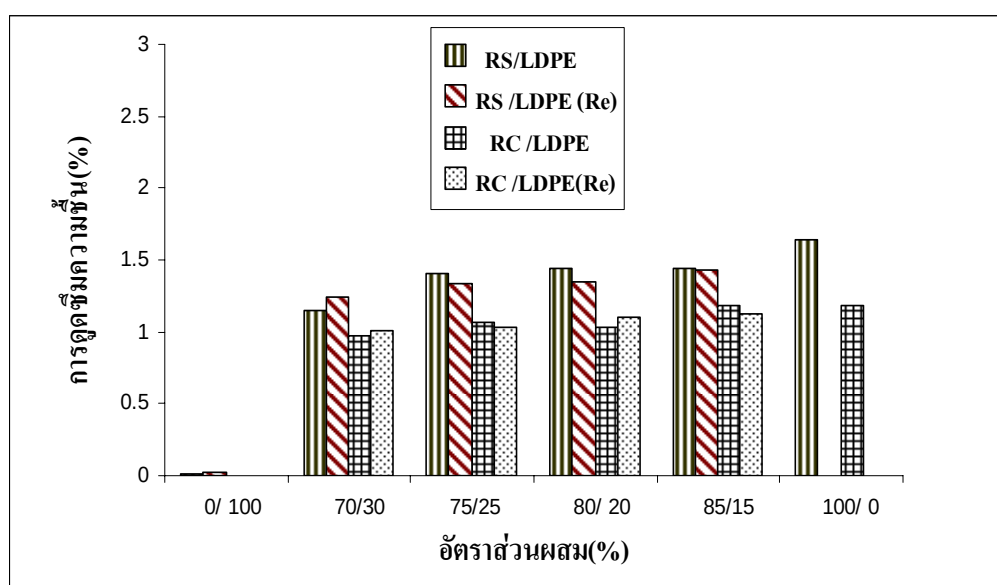
จากการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
บริสุทธิ์ พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในสารละลายเคมีชนิดใดเลย คือไม่มีการละลาย และไม่เกิด
การเปลี่ยนสี ส่วนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม พบว่าการผสม
ของเกลบข้าวมีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่าส่วนผสมของแป้งข้าว ซึ่งในส่วนผสมของเกลบ
ข้าวนั้นสามารถทนทานต่อสารละลายเมทานอล และน้ำกลั่นได้ดี เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
(น้อยกว่า 10% ของชิ้นงานก่อนทดสอบ) ในกรณีสารละลายกรด-เบส ผิวของชิ้นงานทดสอบเกิด
การกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเกลบข้าวเพิ่มมากขึ้น และในส่วนผสมของข้าวความทนทานต่อ
สารเคมีจะลดลงเมื่อปริมาณส่วนผสมของแป้งข้าวเพิ่มมากขึ้น เห็นได้ชัดในสารละลายโซเดียม
ไฮดรอกไซด์ซึ่ง (NaOH) เป็นเบส ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ลักษณะปรากฏของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมหลังการทดสอบในสารละลายเคมีชนิดต่างๆ

ชนิดของ สารละลาย	ลักษณะปรากฏของชิ้นงานหลังการทดสอบ		
เคมี	LDPE	RS/LDPE	RC/LDPE
HCl		- ชิ้นงานสีขาวขุ่นมีขนาดเพิ่มขึ้น	- ขนาดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
	ไม่เปลี่ยนแปลง	- สารละลายไม่เปลี่ยนสี สังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณ RS เพิ่มขึ้น	- ผิวเกิดการกัดกร่อนเป็นเม็ด ไม่เรียบ สังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณ RC เพิ่มขึ้น
			- สารละลายไม่เปลี่ยนสี
NaOH		- ชิ้นงานเกิดบวมตัว มีสีขาวขุ่น	- ขนาดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
	ไม่เปลี่ยนแปลง	- สารละลายเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่น สังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณ RS เพิ่มขึ้น	- ผิวเกิดการกัดกร่อนเป็นเม็ด ไม่เรียบ สังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณ RC เพิ่มขึ้น
			- สารละลายไม่เปลี่ยนสี
โทลูอิน	ไม่เปลี่ยนแปลง	- ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย	- ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
เบนซิน 91	ไม่เปลี่ยนแปลง	- ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย	- ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
		- สารละลายไม่เปลี่ยนสี	- สารละลายไม่เปลี่ยนสี
เมทานอล	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
น้ำกลั่น	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง

4. การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นต่ำมาก เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวตั้งแต่ 70 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นมีค่าสูงมากขึ้นกว่า 200 เท่าตัว ทั้งนี้เป็นผลมาจากในสายโซ่ของแป้งมีคุณสมบัติเป็นไฮดรอกซิล เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ ซึ่งไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะกับน้ำได้ ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ให้ค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางผนวกที่ ค9-ค10 เนื่องจากปริมาณส่วนผสมในแต่ละสูตรไม่ต่างกันมาก สำหรับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้จากเกลบข้าว แสดงผลของการดูดซึมความชื้นเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมได้จากแป้งข้าว แต่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นที่ต่ำกว่า

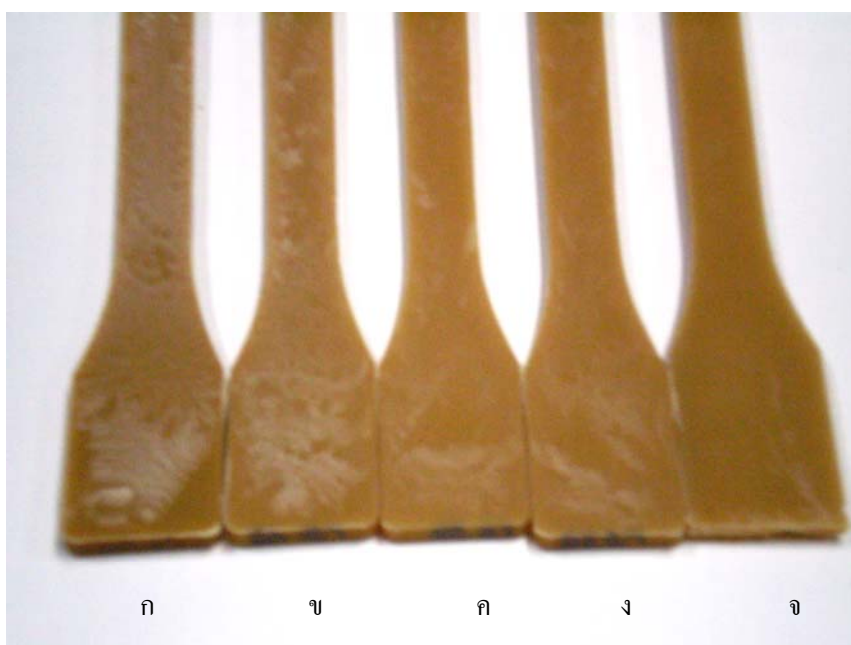


ภาพที่ 24 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่าง RS/LDPE, RS /LDPE (Re), RC/LDPE และ RC /LDPE (Re) ในอัตราส่วนผสมต่างๆ

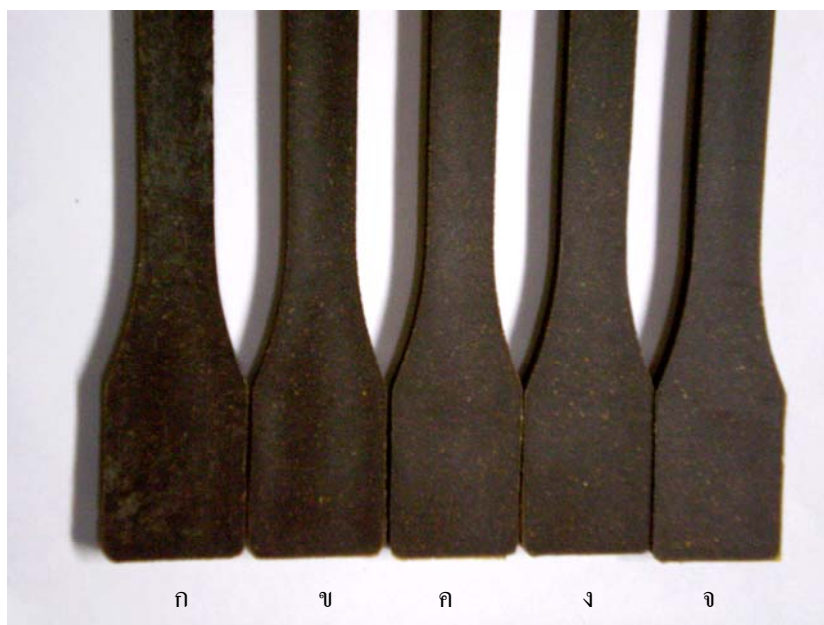
5. การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

การผสมกันระหว่างวัตถุดิบชีวภาพกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนี้ เป็นการลดการใช้พอลิเมอร์ซึ่งใช้เวลานานในการย่อยสลาย อีกทั้งยังเป็นการลดพลังงานและค่าใช้จ่ายหรือ

ต้นทุนการผลิต จึงใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพในปริมาณที่มาก โดยใช้สารช่วยผสมเป็นสารตัวเติมในวัตถุดิบชีวภาพ เมื่อนำมาผสมในอัตราส่วนของวัตถุดิบชีวภาพ/LDPE เป็น 70/30 80/20 75/25 และ 85/15 เมื่อนำไปฉีดขึ้นรูปส่วนผสมของแป้งข้าวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าในกรณีของการผสมกันตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของวัตถุดิบชีวภาพ จะสังเกตเห็นการกระจายตัว หรือแยกเฟส เกิดเป็นแป้งสีขาวลอยตัวอยู่บนผิวชิ้นงานมากขึ้น ดังภาพที่ 25 อาจเกิดจากการหลอมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้น้อยลง ในส่วนผสมของแป้งข้าว ดังภาพที่ 26 ให้ผลไปในทางเดียวกัน แต่ไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนนัก เนื่องจากสีของชิ้นงานเป็นสีทึบยากแก่การมองเห็น ดังนั้นส่วนผสมที่ 70/30 เป็นสัดส่วนที่เกิดการแยกเฟสน้อยที่สุด



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของแป้งข้าว/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ก) RS 100/LDPE 0 ข) RS 85/LDPE15 ค) RS 80/LDPE20 ง) RS 75/LDPE25 จ) RS 70/LDPE30



ภาพที่ 26 เปรียบเทียบการแยกเฟสบนผิวชิ้นงานทดสอบของแกลบข้าว / พอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ก) RC 100/LDPE 0
ข) RC 85/LDPE 15 ค) RC 80/LDPE 20 ง) RC 75/LDPE 25 จ) RC 70/LDPE 30

6. การออกแบบการทดลอง

6.1 กำหนดและทำความเข้าใจปัญหา

การศึกษาการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสม ทำขึ้นเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล และการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กล่าวคือมีลักษณะพื้นผิวชิ้นงานทดสอบเป็นเนื้อเดียวกันไม่เกิดการแยกเฟส ขึ้นรูปเต็มชิ้นงาน และต้องการให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีคุณภาพ ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ เช่น ไม่เกิดครีบ (flash) หรือฉีดไม่เต็มชิ้นงาน (shot mold) เป็นต้น และสามารถหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีด ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสม โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลนั้นจะต้องสอดคล้องกับขีดจำกัดที่มีอยู่ภายในกระบวนการผลิต

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุ พบว่าปัญหาของคุณภาพงานฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสมไม่สมบูรณ์ มีปัจจัยหลักๆ คือ สาเหตุจากคน วัตถุดิบ เครื่องจักรและวิธีการ ดังแสดงในภาพผนวก จ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

6.1.1 สาเหตุจากคน เนื่องจากบุคลากรขาดความชำนาญเพราะไม่มีประสบการณ์ในการทำงาน การใช้เครื่องจักรมีความยุ่งยาก และยังขาดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงเสนอนโยบายการเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องจักรและกระบวนการผลิต โดยจัดการฝึกอบรมให้แก่พนักงานอย่างต่อเนื่อง ให้สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ความพร้อมทางด้านสุขภาพร่างกายและจิตใจก็เป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของงานอีกด้วย

6.1.2 สาเหตุจากวัตถุดิบ ในส่วนของเม็ดพลาสติกจะต้องเป็นชนิดหรือเกรดเดียวกัน มีขนาดที่เหมาะสม สำหรับวัตถุดิบชีวภาพที่ใช้จะต้องเก็บในที่มืดชื้น กันความชื้น ฝุ่น และระยะเวลาในการเก็บไม่นานจนเกินไปทำให้วัตถุดิบเสื่อมสภาพได้

6.1.3 สาเหตุจากเครื่องจักร แบ่งเป็นสาเหตุหลักๆ คือเครื่องจักรสึกหรอ เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง อายุการใช้งานเป็นเวลานาน จึงทำให้ค่าที่ปรับตั้งไว้มีความคลาดเคลื่อน ขาดการบำรุงรักษาที่ดีพอ ขาดการตรวจวัดมาตรฐานหรือการตรวจสอบประจำวัน ส่วนสาเหตุอีกอย่างหนึ่งคือ การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม เช่น ขนาดของรูฉีด (spur) รูวิ่ง (runner) รูทางเข้า (gate) การปรับตั้งแม่พิมพ์ไม่สมดุล ทำให้แม่พิมพ์ไม่สมดุลทำให้เสื่อมสภาพเร็ว และขาดการบำรุงรักษาที่ดีทั้งก่อนใช้งานและหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน

6.1.4 สาเหตุจากวิธีการ เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ ผสมจึงยังไม่ทราบค่าที่เหมาะสม ไม่มีมาตรฐานในการปรับค่าที่แน่นอน ในช่วงแรกอาจจะใช้ความรู้สึกละประสบการณ์ของพนักงานเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุเกิดความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงาน โดยวิธีการจะเริ่มตั้งแต่ การอบวัตถุดิบ จะต้องอบที่อุณหภูมิ เวลา และระดับสูญญากาศของเครื่องอบที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ระดับความชื้นที่พอเหมาะ การหลอม (Plasticizing) ปรับตั้งค่าอุณหภูมิภายในของกระบอกฉีด เพื่อไม่ให้ชิ้นงานมีกลิ่นหรือรอยไหม้ ความเร็วรอบ ความดันด้านของสกรู ปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ จากนั้นเป็นกระบวนการฉีด (Injection) ทำการปรับตั้งค่าความดัน ความเร็ว ระยะเวลาในการฉีด แรงในการปิดแม่พิมพ์ การฉีดรักษาความดัน (Holding pressure) การหล่อเย็น (Cooling) และการดันปลดชิ้นงาน (Ejection)

จากการทดลองปรับเครื่องโดยอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านลักษณะงานที่ใกล้เคียงกันมาทดลองใช้ดู จากนั้นจะเปรียบเทียบผลการฉีดที่ได้กับความต้องการหรือข้อกำหนดของลูกค้า หาก

เกิดปัญหาใดๆ ขึ้นก็จะค่อยๆ ปรับเงื่อนไขการฉีดโดยอ้างอิงสาเหตุของปัญหาจากตัวแปรทั้ง 3 คือ เครื่องฉีด แม่พิมพ์ และเม็ดพลาสติกที่ใช้

6.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง

เนื่องจากเครื่องจักรทางแผนกพอลิเมอร์มีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ไม่มีระบบควบคุม อุณหภูมิแม่พิมพ์ ระบบหล่อเย็นมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง อายุการใช้งานที่ยาวนาน ในการทดลอง จึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยง่าย ค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนที่สูง จึงมีการตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องจักรให้คงที่ เพื่อความสะดวกในการทดลอง เช่น การตั้งค่าแม่พิมพ์ปิด-เปิด การเคลื่อนที่ของหัวฉีด การดันปลดชิ้นงาน จึงได้ตั้งค่าปัจจัยเครื่องจักรโดยจัดให้เป็นปัจจัยภายนอกไม่เกี่ยวกับปัจจัยควบคุมค่าพารามิเตอร์มีดังนี้

- 6.2.1 อุณหภูมิในเครื่องผสม 170 องศาเซลเซียส
- 6.2.2 ระยะเวลาในการฉีด (cycle time) โดยประมาณ 62 วินาที
- 6.2.3 ระยะเวลาในการหล่อเย็น (cooling time) 35 วินาที
- 6.2.4 แรงปิดแม่พิมพ์ (clamping force) 210 บาร์
- 6.2.5 ความดันต้านสกรู (back pressure) 2 บาร์

จากสาเหตุของปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าสาเหตุที่มีความสำคัญคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษา จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าที่อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความแข็งแรงทางกลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่จะส่งผลให้เกิดการแยกเฟส ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตเห็นเป็นคราบสีขาวกระจายตัวบนพื้นผิวชิ้นงาน ในขณะที่อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพที่ลดลง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างวัตถุดิบชีวภาพ/พอลิเมอร์ เป็น 70/30 พบว่าเกิดการแยกเฟสน้อยที่สุด สีของผิวชิ้นงานเรียบเนียนเป็นสีเดียวกัน ดังนั้นจึงได้ออกแบบการทดลอง ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA หาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่อัตราส่วน วัตถุดิบชีวภาพ/พอลิเมอร์ เป็น 70/30 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การผสมระหว่างแอลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RC /LDPE) และแป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS/LDPE) แสดงค่าต่างๆ ใน ตารางที่ 14 ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ดังแสดงในภาคผนวก ก คือ ความเร็วในการฉีด (Injection speed) ความดันฉีดสูงสุด (Max. injection pressure) การฉีดรักษา

ความดัน (Holding pressure) ความเร็วในการหมุนรอบของสกรู (Screw rotational speed) และ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)

6.3 กำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) ของปัจจัยควบคุม 5 ปัจจัย เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยจะกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+1) และระดับต่ำ (-1) ดังแสดงใน ตารางที่ 14 ดังนี้

ตารางที่ 14 ระดับของปัจจัยควบคุมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

ปัจจัยควบคุม	ตัวแปร	ระดับปัจจัย		ระดับปัจจัย	
		(RC/LDPE)		(RS/LDPE)	
		ต่ำ (-)	สูง (+)	ต่ำ (-)	สูง(+)
ความเร็วในการฉีด (%)	A	45	55	70	80
ความดันฉีดสูงสุด (Bar)	B	75	85	40	50
การฉีดรักษาความดัน (Bar)	C	60	75	60	75
ความเร็วในการหมุนรอบของสกรู (rpm)	D	88	129	84	123
อุณหภูมิในการหลอมเหลว (°C)	E	175	185	175	185

6.4 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง

เพื่อทดสอบถึงผลของปัจจัยที่มีผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดังเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยนั้นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 มาใช้เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากตาราง ANOVA กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบที่ $\alpha = 0.05$ โดยการทดลองจะกำหนดจำนวนซ้ำในการทดลอง 3 ครั้งต่อระดับปัจจัยต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในการทำการทดลอง และค่าใช้จ่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมีหน่วยทดลองทั้งหมดที่จะต้องเก็บรวบรวมข้อมูลเท่ากับ 96 หน่วยทดลอง ดังตารางภาคผนวก ข

6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณและใช้ข้อมูลจากตารางบันทึกผลการทดลองตารางภาคผนวก จ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้หลักการทางสถิติดังนี้

6.5.1 กำหนดรูปแบบจำลอง (Model)

$$\begin{aligned}
 y_{ijklm} = & \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \alpha_m + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\tau\alpha)_{im} + (\beta\gamma)_{jk} + \\
 & (\beta\delta)_{jl} + (\beta\alpha)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\alpha)_{km} + (\delta\alpha)_{lm} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\tau\beta\alpha)_{ijm} + \\
 & (\tau\gamma\delta)_{ikl} + (\tau\gamma\alpha)_{ikm} + (\tau\delta\alpha)_{ilm} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\beta\gamma\alpha)_{jkm} + (\beta\delta\alpha)_{jlm} + (\gamma\delta\alpha)_{klm} + \\
 & (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + (\tau\beta\gamma\alpha)_{ijkm} + (\tau\beta\gamma\delta\alpha)_{ijklm} + \varepsilon_{ijklm}
 \end{aligned}$$

โดยที่ i, j, k, l และ $m = 1, 2$

μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall Mean)

τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของทรีตเมนต์ของปัจจัย A (ความเร็วในการฉีด)

β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของทรีตเมนต์ของปัจจัย B (ความเร็วฉีดสูงสุด)

γ_k หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ k ของทรีตเมนต์ของปัจจัย C (การฉีดรักษาความดัน)

δ_l หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ l ของทรีตเมนต์ของปัจจัย D (ความเร็วในการหมุนรอบของสกรู)

α_m หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ m ของทรีตเมนต์ของปัจจัย E (อุณหภูมิการหลอมเหลว)

$(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j

$(\tau\gamma)_{ik}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ γ_k

$(\tau\delta)_{il}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ δ_l
 $(\tau\alpha)_{im}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ α_m
 $(\beta\gamma)_{jk}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ γ_k
 $(\beta\delta)_{jl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ δ_l
 $(\beta\alpha)_{jm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ α_m
 $(\gamma\delta)_{kl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง γ_k และ δ_l
 $(\gamma\alpha)_{km}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง γ_k และ α_m
 $(\delta\alpha)_{lm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง δ_l และ α_m
 $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j และ γ_k
 $(\tau\beta\delta)_{ijl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j และ δ_l
 $(\tau\beta\alpha)_{ijm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j และ α_m
 $(\tau\gamma\delta)_{ikl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , γ_k และ δ_l
 $(\tau\gamma\alpha)_{ikm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , γ_k และ α_m
 $(\tau\delta\alpha)_{ilm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , δ_l และ α_m
 $(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j , γ_k และ δ_l
 $(\beta\gamma\alpha)_{jkm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j , γ_k และ α_m
 $(\beta\delta\alpha)_{jlm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j , δ_l และ α_m
 $(\gamma\delta\alpha)_{klm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง γ_k , δ_l และ α_m
 $(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j , γ_k , δ_l และ α_m
 $(\tau\beta\gamma\alpha)_{ijkm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j , γ_k และ α_m
 $(\tau\beta\gamma\delta\alpha)_{ijklm}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i , β_j , γ_k , δ_l และ α_m
 ε_{ijklm} หมายถึง ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของหน่วยทดลอง 1 จากทรีตเมนต์ $i, j,$
 k, l และ m

6.5.2 วิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ที่มีมากกว่า 2 ปัจจัย จะนำมาพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย (two way interaction) ส่วนค่าที่เหลือไม่นำมาพิจารณา ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข และ ภาคผนวก ฉ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

ก. กรณีที่ 1 พอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างเกลบข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RC /LDPE)

ตารางที่ 15 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE

Source	df	SS	MS	F-value(F ₀)	p-value	Result
A	1	3.37200	3.37200	85.64	0.000	
B	1	0.38330	0.38330	9.73	0.003	
C	1	0.31901	0.31901	8.10	0.006	
D	1	0.02190	0.02190	0.56	0.459	
E	1	0.27136	0.27136	6.89	0.011	Significant
A*B	1	0.15958	0.15958	4.05	0.048	Significant
A*C	1	0.26104	0.26104	6.63	0.012	Significant
A*D	1	0.08016	0.08016	2.04	0.159	
A*E	1	0.00180	0.00180	0.05	0.831	
B*C	1	0.64354	0.64354	16.34	0.000	Significant
B*D	1	0.04100	0.04100	1.04	0.311	
B*E	1	0.11496	0.11496	2.92	0.092	
C*D	1	0.07216	0.07216	1.83	0.181	
C*E	1	0.13605	0.13605	3.46	0.068	
D*E	1	0.00001	0.00001	0.00	0.986	
A*B*C	1	1.28714	1.28714	32.69	0.000	
A*B*D	1	0.10587	0.10587	2.69	0.106	
A*C*D	1	0.39066	0.39066	9.92	0.002	
A*B*E	1	0.50605	0.50605	12.85	0.001	
A*C*E	1	0.00179	0.832	0.05	0.00179	
A*D*E	1	0.18183	0.18183	4.62	0.035	
B*C*D	1	0.00315	0.00315	0.08	0.778	
B*C*E	1	0.00123	0.00123	0.03	0.860	
B*D*E	1	0.65274	0.65274	16.58	0.000	

ตารางที่ 15 (ต่อ)

Source	df	SS	MS	F-value (F_0)	p-value	Result
C*D*E	1	1.07357	1.07357	27.27	0.000	
A*B*C*D	1	0.57196	0.57196	14.53	0.000	
A*B*C*E	1	0.09375	0.09375	2.38	0.128	
A*B*D*E	1	0.13380	0.13380	3.40	0.070	
A*C*D*E	1	0.05245	0.05245	1.33	0.253	
B*C*D*E	1	0.02781	0.02781	0.71	0.404	
A*B*C*D*E	1	0.00215	0.00215	0.05	0.816	
Error	64	2.52003	0.03938			
Total	95	13.48385				

1) การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

(1) การทดสอบปัจจัยหลัก (Test of main factors)

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

(2) การทดสอบปัจจัยร่วม (Test of interaction factors)

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 15 ตัวทดสอบทางสถิติ คือ $F_0 > F_{0.05, (1, 64)}$ คือ มากกว่า 4.08 หรือ P – Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ(α) 0.05 ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก(H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) สรุปได้ว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ที่ระดับนัยสำคัญ(Significant) 0.05ดังต่อไปนี้

- ปัจจัยร่วม A*B ความเร็วในการฉีดกับความดันฉีดสูงสุด
- ปัจจัยร่วม A*C ความเร็วในการฉีดกับการฉีดรักษาความดัน
- ปัจจัยร่วม B*C ปัจจัยร่วมของความดันสูงสุดในการกับการฉีดรักษา

ความดัน

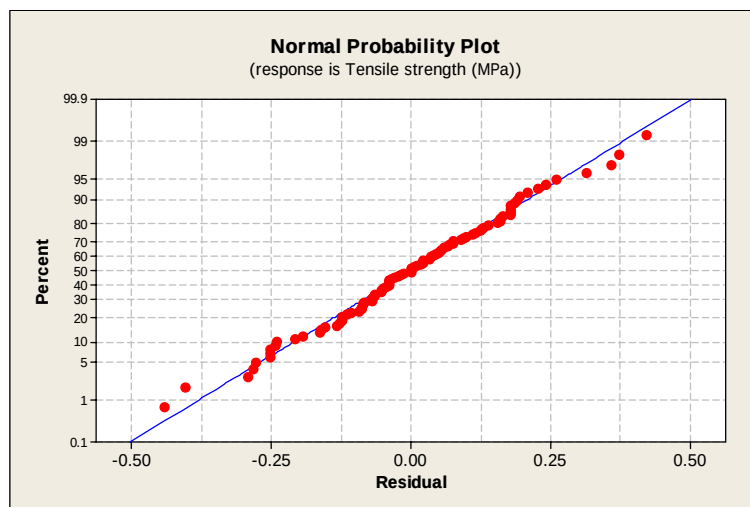
- ปัจจัยหลัก E อุณหภูมิในการหลอมเหลว

2) การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลและความถูกต้องในการวิเคราะห์ หมายความว่า รูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_y \sim N(0, \sigma^2)$ โดยอาศัยค่า Residual ในการวิเคราะห์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบ ดังนี้

(1) การตรวจสอบการกระจายว่าเป็น แบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

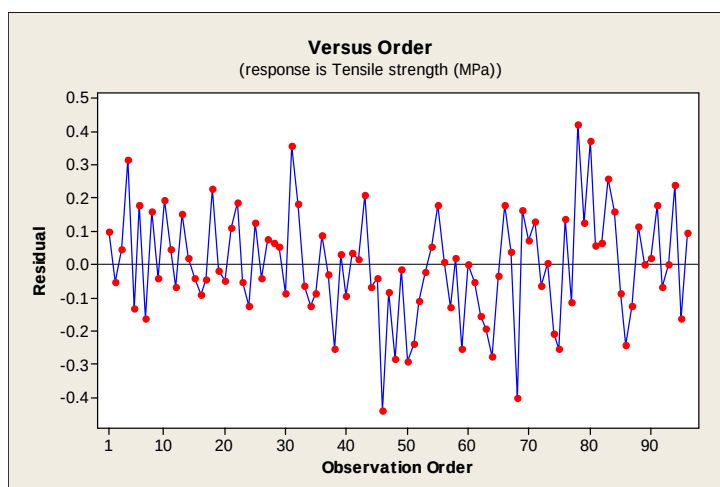
โดยใช้การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจากการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในภาพที่ 27 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวค่อนข้างเป็นไปตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลความคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบปกติ



ภาพที่ 27 กราฟ Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC/LDPE

(2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

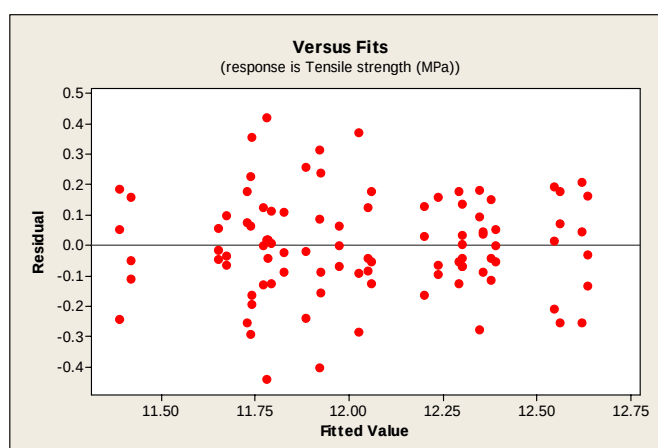
จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 28 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีลักษณะการกระจายไม่เกิดแนวโน้ม หรือมีรูปแบบ (pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล



ภาพที่ 28 กราฟของความผิดพลาดกับเวลาที่เก็บข้อมูลความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE

(3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

จากภาพที่ 29 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และ ค่า Fitted Value ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูล ที่ออกมาจากการกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยสุ่มรอบๆ เส้นกลางไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

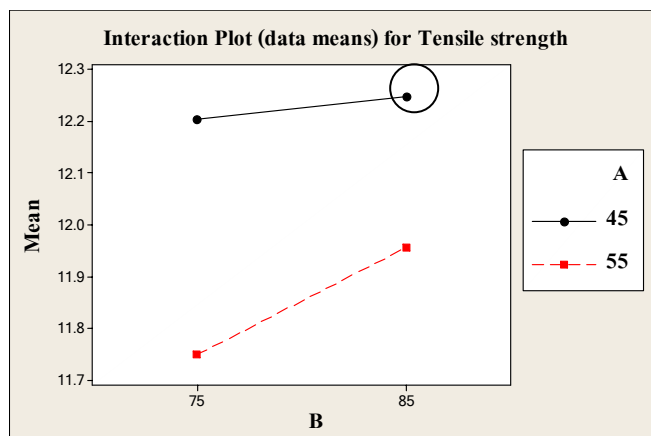


ภาพที่ 29 กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ถูกฟิตความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RC /LDPE

ผลการคำนวณ จากภาคผนวก ซ พบว่ามีค่าสังเกตที่ 31, 46, 68 และ 80 บ่งบอกว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลทำให้รูปแบบการทดลองไม่เหมาะสม เนื่องจากค่าสังเกตทั้ง 4 ค่ามีค่า standardized residual สูง แต่เนื่องจากไม่ทราบสาเหตุของความผิดปกตินี้จึงไม่สามารถตัดค่าสังเกตทั้ง 4 ค่าออกได้

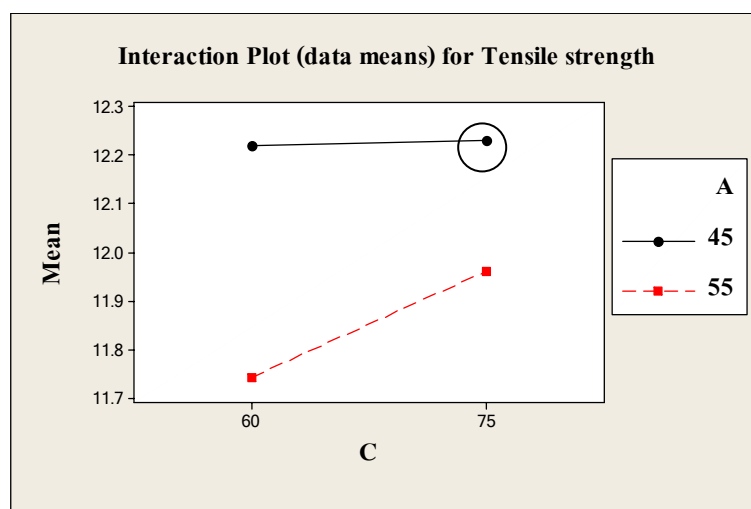
3) การวิเคราะห์กราฟค่าเฉลี่ยในปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากตารางที่ 15 พบว่า ปัจจัยหลัก A, B, C, และ E และผลกระทบปัจจัยร่วม AB, AC และ CB ที่มีนัยสำคัญ ต่อผลของค่าความแข็งแรงดึง พิจารณาปัจจัยร่วมก่อน จากภาพที่ 30-32 ดังนี้



ภาพที่ 30 กราฟ Interaction plot AB สำหรับกรณี RC /LDPE

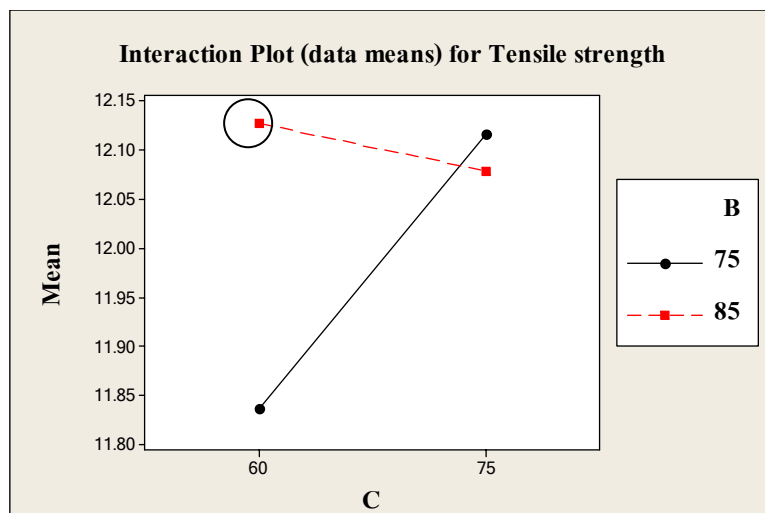
ปัจจัยร่วม AB คือ ปัจจัยร่วมของความเร็วในการฉีด (Injection speed) กับความดันฉีดสูงสุด (Max. Injection pressure) พบว่า ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงขึ้น เมื่อความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับต่ำ (45%) ซึ่งให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (85 Bar)



ภาพที่ 31 กราฟ Interaction plot AC สำหรับกรณี RC /LDPE

ปัจจัยร่วม AC คือ ปัจจัยร่วมของความเร็วในการฉีด (Injection speed) กับการฉีดรักษาความดัน (Holding pressure) พบว่า ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อ

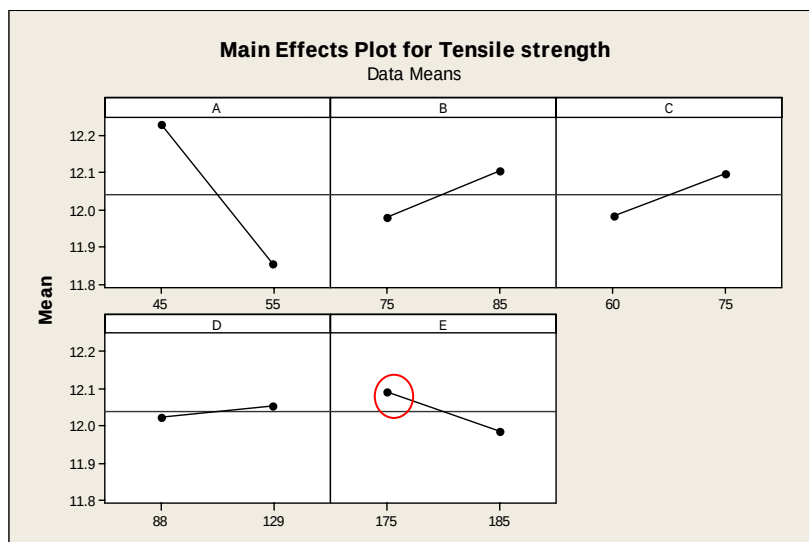
ความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับต่ำ (45%) ซึ่งในขณะการฉีดรักษาความดันที่ระดับสูง (75 Bar) ให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูง



ภาพที่ 32 กราฟ Interaction plot BC สำหรับกรณี RC /LDPE

ปัจจัยร่วม BC คือ ปัจจัยร่วมของความดันฉีดสูงสุด (Max. Injection pressure) กับการฉีดรักษาความดัน (Holding pressure) พบว่าเมื่อพิจารณา ความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (85 Bar) ส่งผลให้ผลตอบสนองต่อความแข็งแรงดึงสูงมีค่ามากเมื่อการฉีดรักษาความดันอยู่ที่ระดับต่ำ (60 Bar)

เมื่อพิจารณาผลการทบทวน พบว่า ปัจจัย A, B และ C มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC /LDPE จากนั้นทำการพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยหลัก โดยไม่นำปัจจัยร่วมมาพิจารณาอีก พบว่า ปัจจัย E คือ อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt temperature) มีนัยสำคัญเฉพาะผลหลักเท่านั้น ไม่มีผลของปัจจัยร่วม และให้ผลตอบสนองค่าทนแรงดึงสูงเมื่ออยู่ในระดับต่ำ (175°C) ดังแสดงใน ภาพที่ 33 ของปัจจัยหลัก



ภาพที่ 33 กราฟค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงต่อปัจจัยหลักสำหรับกรณี RC /LDPE

จากปัจจัยร่วม AC และ BC พบว่าให้ผลตอบแทนสูงที่ระดับต่างกันของปัจจัย C กล่าวคือในปัจจัยร่วม AC ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูง เมื่อการฉีดรักษาความดันที่ระดับสูง (75 Bar) ในขณะที่ปัจจัยร่วม BC ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูง เมื่อการฉีดรักษาความดันอยู่ที่ระดับต่ำ (60 Bar) ดังแสดงในภาพที่ 31 และภาพที่ 32 ตามลำดับ ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมของปัจจัยร่วมระหว่าง A, B และ C ส่วนปัจจัย D กำหนดที่ระดับต่ำ (88 rpm) เนื่องจากความเร็วรอบสกรูต่ำจะเกิดการเสียมของชิ้นงานที่ช้ากว่าความเร็วรอบสกรูสูง และปัจจัย E ให้ผลตอบแทนสูงที่ระดับต่ำจึงกำหนดที่ระดับต่ำ (175°C) โดยทำการเก็บข้อมูลการทดลองละ 10 ค่า ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การออกแบบเงื่อนไขการทดลองปัจจัย A, B และ C ของค่าความแข็งแรงดึง สำหรับ
กรณี RC /LDPE

Combination	Factor			Tensile strength					StDev	Mean
	A	B	C	(MPa)						
1	45	85	75	13.695	13.995	13.665	13.800	14.100	0.223	13.953
				13.770	14.130	14.070	13.935	14.370		
2	45	75	75	11.895	11.805	12.570	12.165	11.805	0.347	12.144
				12.135	12.735	11.700	12.270	12.360		
3	45	85	60	13.035	13.305	12.660	13.500	12.540	0.34	12.910
				13.230	12.570	12.660	12.705	12.900		
4	55	85	60	11.640	11.730	12.360	12.030	12.000	0.346	12.096
				12.195	12.270	12.030	12.840	11.865		

จากตารางที่ 16 พบว่าผลของการทดลองเงื่อนไขที่ 1 ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดดังนั้นจะเห็นได้ว่าจุดที่เหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปนี้ คือ

ปัจจัย A: ความเร็วในการฉีด ที่ระดับ ต่ำ (-) มีค่า 45 (%)
 ปัจจัย B: ความดันฉีดสูงสุด ที่ระดับ สูง (+) มีค่า 85 bar
 ปัจจัย C: การฉีดรักษาความดัน ที่ระดับ ต่ำ (+) มีค่า 75 bar
 ปัจจัย E: อุณหภูมิในการหลอมเหลว ที่ระดับ ต่ำ (-) มีค่า 175°C

จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณโปรแกรมสำเร็จรูป ดังภาคผนวก ข เพื่อหาสมการที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเขียนสมการถดถอยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \wedge \\ Y &= 12.04 + 0.187A - 0.064B - 0.058C + 0.053E \\ &\quad + 0.041 A*B + 0.052 A*C - 0.08187 B*C \end{aligned}$$

โดยที่ A: ค่าความเร็วในการฉีดอยู่ระหว่าง 45 % - 55 %
 B: ค่าความดันฉีดสูงสุดอยู่ระหว่าง 75 bar - 85 bar
 C: ค่าการฉีดรักษาความดันอยู่ระหว่าง 60 bar – 75 bar
 E: ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 175°C - 185°C

ข. กรณีที่ 2 พอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS /LDPE)

ตารางที่ 17 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS/LDPE

Source	df	SS	MS	F-value (F_0)	p-value	Result
A	1	0.0982	0.0982	0.56	0.459	
B	1	0.0398	0.0398	0.23	0.637	
C	1	4.8470	4.8470	27.43	0.000	
D	1	0.2549	0.2549	1.44	0.234	
E	1	1.5446	1.5446	8.74	0.004	
A*B	1	0.7792	0.7792	4.41	0.040	Significant
A*C	1	1.7955	1.7955	10.16	0.002	Significant
A*D	1	0.6210	0.6210	3.51	0.065	
A*E	1	0.3205	0.3205	1.81	0.183	
B*C	1	0.0012	0.0012	0.01	0.935	
B*D	1	0.1606	0.1606	0.91	0.344	
B*E	1	1.2515	1.2515	7.08	0.010	Significant
C*D	1	0.2401	0.2401	1.36	0.248	
C*E	1	0.0532	0.0532	0.30	0.585	
D*E	1	0.1110	0.1110	0.63	0.431	
A*B*C	1	5.3115	5.3115	30.06	0.000	
A*B*D	1	1.3379	1.3379	7.57	0.008	
A*C*D	1	0.9058	0.9058	5.13	0.027	
A*B*E	1	1.5675	1.5675	8.87	0.004	

ตารางที่ 17 (ต่อ)

Source	df	SS	MS	F-value	p-value	Result
A*C*E	1	0.1361	0.1361	0.383	0.77	
A*D*E	1	5.1167	5.1167	28.95	0.000	
B*C*D	1	1.9060	1.9060	10.79	0.002	
B*C*E	1	0.5318	0.5318	3.01	0.088	
B*D*E	1	0.0049	0.0049	0.03	0.869	
C*D*E	1	1.0023	1.0023	5.67	0.020	
A*B*C*D	1	0.5076	0.5076	2.87	0.095	
A*B*C*E	1	3.1404	3.1404	17.77	0.000	
A*B*D*E	1	0.1979	0.1979	1.12	0.294	
A*C*D*E	1	0.0137	0.0137	0.08	0.782	
B*C*D*E	1	0.5510	0.5510	3.12	0.082	
A*B*C*D*E	1	0.0307	0.0307	0.17	0.678	
Error	64	11.3095	0.1767			
Total	95	45.6895				

1) การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

(1) การทดสอบปัจจัยหลัก (Test of main factors)

 H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

 H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

(2) การทดสอบปัจจัยร่วม (Test of interaction factors)

 H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

 H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

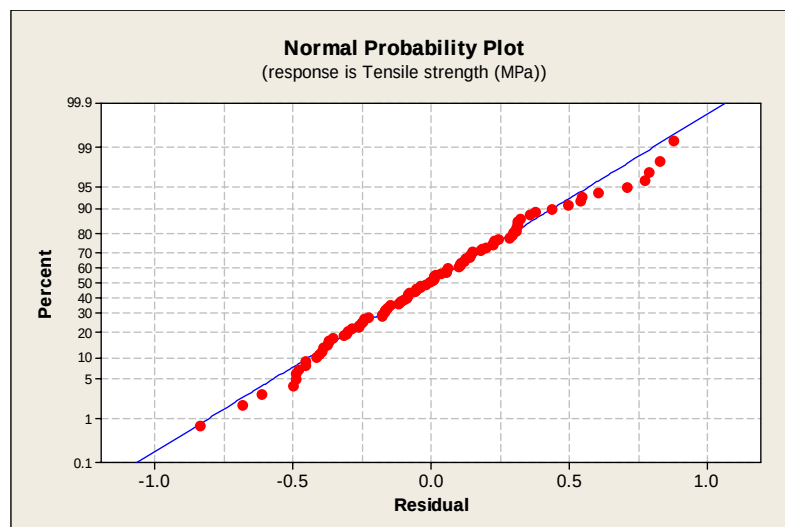
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 17 ตัวทดสอบทางสถิติ คือ $F_0 > F_{0.05, (1, 64)}$ คือ มากกว่า 4.08 และ P – Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) สรุปได้ว่าปัจจัยร่วมมีผลต่อความแข็งแรงดึง ที่ระดับนัยสำคัญ (Significant) 0.05 ดังต่อไปนี้

- ปัจจัยร่วม A*B ความเร็วในการฉีดกับความดันฉีดสูงสุด
- ปัจจัยร่วม A*C ความเร็วในการฉีดกับการฉีดรักษาความดัน
- ปัจจัยร่วม B* E ปัจจัยร่วมของความดันสูงสุดในการกับอุณหภูมิในการหลอมเหลว

2) การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

(1) การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

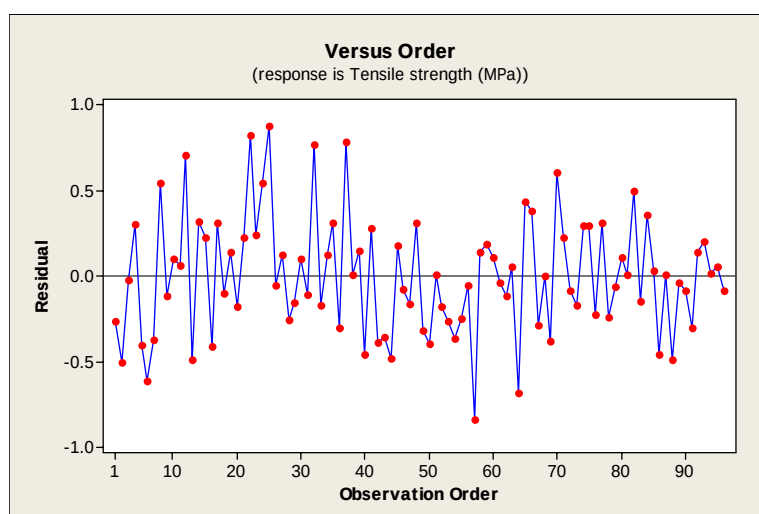
โดยใช้การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจากการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) จากการพล็อตความคลาดเคลื่อนลงบนกราฟการแจกแจงแบบปกติ ในภาพที่ 34 พบว่าข้อมูลมีลักษณะจุดที่ปรากฏในแผนภาพส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ในแนวเส้นตรง มีการกระจายส่วนใหญ่เป็นตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 34 กราฟ Normal Probability Plot ของความคลาดเคลื่อนความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE

(2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

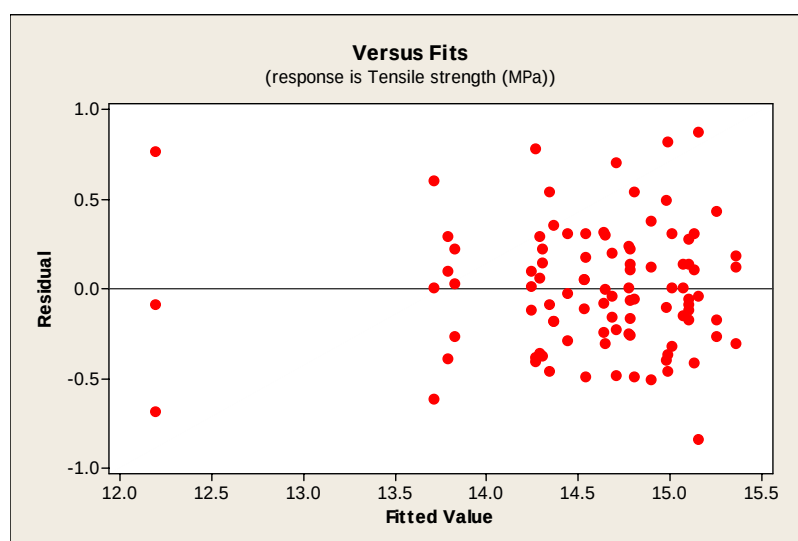
จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 35 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) มีลักษณะการกระจายไม่เกิดแนวโน้ม หรือมีรูปแบบ (pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับ ลำดับค่าสังเกต (Observation Order) ของการเก็บข้อมูล



ภาพที่ 35 กราฟของความผิดพลาดกับลำดับของค่าสังเกตความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE

(3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

จากภาพที่ 36 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และ ค่า Fitted Value ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูล ที่ออกมาจากการกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยสุ่มรอบๆ เส้นกลางไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



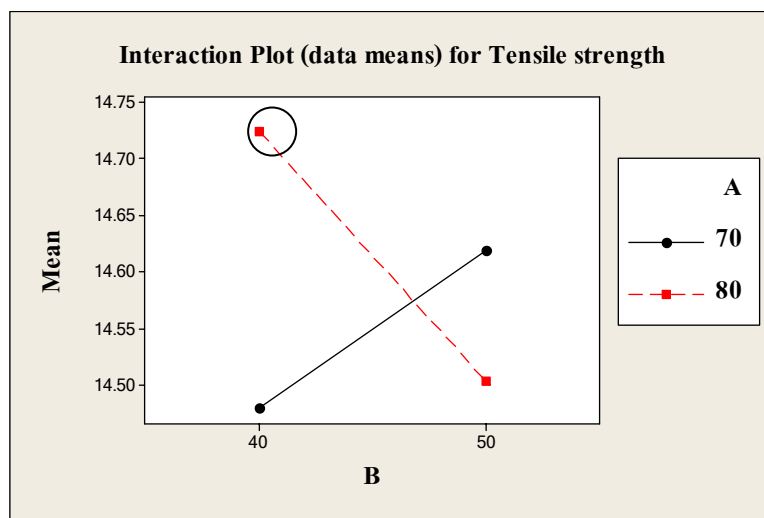
ภาพที่ 36 กราฟของความผิดพลาดกับค่าที่ถูกฟิตความแข็งแรงดึงสำหรับกรณี RS /LDPE

ผลการคำนวณ ภาคผนวก ฅ พบว่ามีค่าสังเกตที่ 12, 22, 25, 32, 37 และ 57 บ่งบอกว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลทำให้รูปแบบการทดลองไม่เหมาะสม เนื่องจากค่าสังเกตทั้ง 6 ค่ามีค่า standardized residual สูง แต่เนื่องจากไม่ทราบสาเหตุของความผิดปกตินี้ จึงไม่สามารถตัดค่าสังเกตทั้ง 4 ค่าออกได้

3) การวิเคราะห์กราฟค่าเฉลี่ยในปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

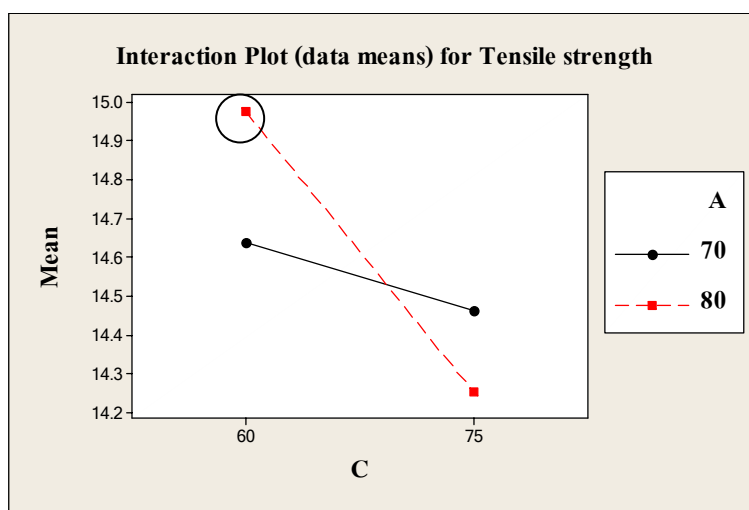
จากตารางที่ 17 พบว่า ปัจจัยร่วม AB, AC และ BE ที่มีนัยสำคัญ ต่อผลของค่าความแข็งแรงดึง ดังนี้

ปัจจัยร่วม AB คือ ปัจจัยร่วมของความเร็วในการฉีด (Injection speed) กับ ความดันฉีดสูงสุด (Max. Injection pressure) พบว่า ให้ผลตอบแทนต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อ ความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับสูง (80%) ผลตอบแทนต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความดันฉีดสูงสุด อยู่ในระดับต่ำ (40 Bar)

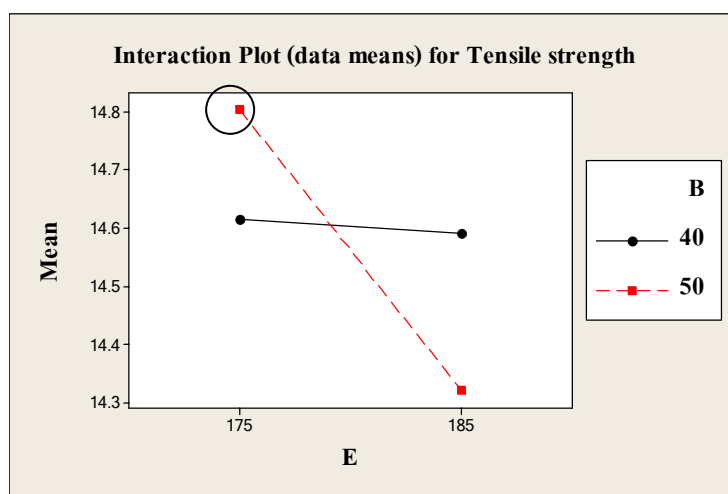


ภาพที่ 37 กราฟ Interaction plot AB สำหรับกรณี RS /LDPE

ปัจจัยร่วม AC คือ ปัจจัยร่วมของความเร็วในการฉีด (Injection speed) กับ การฉีดรักษาความดัน (Holding pressure) พบว่า ให้ผลตอบแทนต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อ ความเร็วในการฉีดอยู่ที่ระดับสูง (80%) และให้ผลตอบแทนต่อความแข็งแรงดึงสูงเมื่อการฉีด รักษาความดันอยู่ในระดับต่ำ (60 Bar)



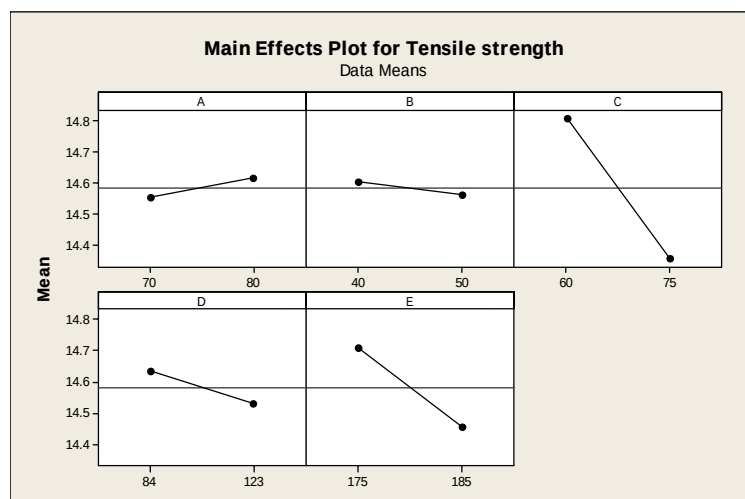
ภาพที่ 38 กราฟ Interaction plot AC สำหรับกรณี RS /LDPE



ภาพที่ 39 กราฟ Interaction plot BE สำหรับกรณี RS /LDPE

ปัจจัยร่วม BE คือ ปัจจัยร่วมของความดันฉีดสูงสุด (Max. Injection pressure) กับ อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt temperature) พบว่า ผลตอบสนองต่อความแข็งแรง มีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ระดับต่ำ (175°C) และความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (50 Bar)

เมื่อพิจารณาผลการทบทวน พบว่า ปัจจัย A, B, C และ E มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม RC /LDPE จากนั้นทำการพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยหลัก โดยไม่นำปัจจัยร่วมมาพิจารณาอีก พบว่าไม่ปัจจัยใดเพิ่มเติม ที่มีนัยสำคัญในปัจจัยหลัก



ภาพที่ 40 กราฟค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงต่อปัจจัยหลัก สำหรับกรณี RS /LDPE

จากปัจจัยร่วม AB และ BE พบว่าให้ผลตอบแทนสูงที่ระดับต่างกันของปัจจัย B กล่าวคือในปัจจัยร่วม AB ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูง เมื่อความดันฉีดสูงสุดอยู่ในระดับต่ำ (40 Bar) ในขณะที่ปัจจัยร่วม BE ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงเมื่อความดันฉีดสูงสุดที่ระดับสูง (50 Bar) ดังแสดงในภาพที่ 37 และภาพที่ 39 ตามลำดับ ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองเปรียบเทียบหาค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมของปัจจัยร่วมระหว่าง A, B และ E ส่วนปัจจัย C ให้ผลตอบแทนสูงที่ระดับต่ำจึงกำหนดที่ระดับต่ำ (60 Bar) และปัจจัย D กำหนดที่ระดับต่ำ (84 rpm) เนื่องจากความเร็วรอบสกรูต่ำจะเกิดการเสื่อของชิ้นงานที่ช้ากว่าความเร็วรอบสกรูสูง โดยทำการเก็บข้อมูลการทดลองละ 10 ค่า แสดงในตารางที่ 18 ดังนี้

ตารางที่ 18 การออกแบบเงื่อนไขการทดลองปัจจัย A, B และ E ของค่าความแข็งแรงดึง
สำหรับกรณี RS /LDPE

Combination	Factor			Tensile strength					StDev	Mean
	A	B	E	(MPa)						
1	80	40	185	14.940	15.072	15.696	15.936	16.560	0.647	15.128
				16.400	14.565	16.260	15.936	14.805		
2	80	40	175	14.670	14.265	16.060	15.040	14.895	0.719	15.617
				15.808	15.136	14.235	15.264	15.904		
3	70	50	175	14.895	15.264	16.000	15.200	15.392	0.493	15.406
				15.536	15.968	15.872	14.430	15.504		
4	80	50	175	14.970	15.040	15.008	15.600	14.865	0.297	15.219
				15.600	15.440	14.895	15.504	15.264		

จากตารางที่ 18 พบว่าผลของการทดลองเงื่อนไขที่ 2 ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงที่สุดดังนั้นจะเห็นได้ว่าจุดที่เหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปนี้ คือ

ปัจจัย A: ความเร็วในการฉีด ที่ระดับ สูง (+) มีค่า 80 (%)
 ปัจจัย B: ความดันฉีดสูงสุด ที่ระดับ ต่ำ (-) มีค่า 40 Bar
 ปัจจัย C: การฉีดรักษาความดัน ที่ระดับ ต่ำ (-) มีค่า 60 Bar
 ปัจจัย E: อุณหภูมิในการหลอมเหลว ที่ระดับ ต่ำ (-) มีค่า 175°C

ทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณโปรแกรมสำเร็จรูป ดังภาคผนวก ฅ เพื่อหาสมการที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเขียนสมการถดถอยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \wedge \\ Y &= 14.581 + 0.225 C + 0.127 E - 0.09 A*B \\ &\quad - 0.137 A*C - 0.11418 B*E \end{aligned}$$

โดยที่	A: ค่าความเร็วในการฉีดอยู่ระหว่าง	70 % - 80 %
	B: ค่าความดันฉีดสูงสุดอยู่ระหว่าง	40 bar - 50 bar
	C: ค่าการฉีดรักษาความดันอยู่ระหว่าง	60 bar – 75 bar
	E: ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ระหว่าง	175°C - 185°C

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยน้ำหนักนั้น จะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัดโค้ง ความสามารถในการดูดซึม ความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณวัตถุดิบชีวภาพเพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล (ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัดโค้ง) พบว่า ในส่วนผสมของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว นำมาบดใช้ใหม่มีคุณสมบัติทางกลต่ำกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์เล็กน้อย และในส่วนผสมเดียวกันของแป้งข้าวมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า ส่วนผสมของเกลบข้าว ส่วนผลของการทนแรงกระแทกให้ผลไม่ต่างกันนัก ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค7และ ตารางผนวกที่ ค8

คุณสมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิในการหลอมเหลว และอุณหภูมิในการตกผลึกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค11 - ตารางผนวกที่ ค14 ในขณะที่ปริมาณชีวภาพเพิ่มมากขึ้นค่าความร้อนในการตกผลึกมีแนวโน้มลดลง ส่วนในด้านความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมนั้น ไม่เกิดการกัดกร่อนชิ้นงาน มีเพียงการบวมตัวของชิ้นงานเท่านั้น (ไม่เกิน 10%) ยกเว้นในสารละลาย NaOH และในสารละลายเมทานอล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การสังเกตลักษณะผิวปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบชีวภาพ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ผิวสัมผัสที่หยาบที่สุด คือ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตเห็นการแยกเฟสเป็นคราบสีขาวบนผิวชิ้นงานน้อยที่สุด จึงทำการเลือกมาใช้งาน โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่ชิ้นงานเต็มและให้ผลทางกลที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ 2^5 โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง กรณีเกลบข้าวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น (RC/LDPE: 30/70) และ กรณี แป้งข้าวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น (RS/LDPE: 30/70) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติความแข็งแรงดึง คือ ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดสูงสุด การฉีดรักษาความดัน และอุณหภูมิพลาสดีกหลอม และให้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 19 เงื่อนไขในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

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

และทำการวิเคราะห์ผลของค่าความแข็งแรงดึงด้วยการทดสอบที (t-test) ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) เท่ากับ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
RC/LDPE	10	13.953	0.223	0.071	(13.7932, 14.1128)
RS/LDPE	10	15.617	0.719	0.227	(15.103, 16.131)

การนำไปใช้ประโยชน์

การศึกษาพอลิเมอร์ชีวภาพผสมนี้เป็นการนำเทคโนโลยีไปเพิ่มมูลค่าและยกระดับการใช้งานของเม็ดพลาสติกเข้าสู่อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปที่หลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนที่สามารถส่งตรงสู่ผู้บริโภค ชิ้นส่วนที่ถูกส่งต่อไปใช้หรือประกอบในอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ รองเท้า วัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพนั้น ในประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายหลักที่ใช้กับพลาสติกชีวภาพ (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551) ขึ้นอยู่กับชนิด รูปแบบผลิตภัณฑ์ และความต้องการในการใช้งานทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค ดังนั้นอาจนำกฎหมายที่เกี่ยวกับการจัดการบรรจุภัณฑ์พลาสติกไปประยุกต์ใช้ในพระราชกฤษฎีกาเดิมที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ได้แก่ พระราชบัญญัติมาตรฐานอุตสาหกรรม พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย เป็นต้น

ตัวอย่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) พลาสติกที่พอลิเมอร์ชีวภาพผสมชนิดนี้สามารถขึ้นรูปได้โดยสังเขป มีดังนี้

ตารางที่ 21 ตัวอย่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) พลาสติก

ประเภทผลิตภัณฑ์	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)
เครื่องเรือนนอกประสงค์: แก้วพลาสติก	มอก.1309-2538
ภาชนะพลาสติกสำหรับบรรจุน้ำบริโภค	มอก.998-2533
ภาชนะและเครื่องใช้พลาสติกสำหรับอาหาร	มอก.655-2529
ขวดพลาสติกสำหรับบรรจุยาเม็ดและแคปซูล	มอก.998-2527
ถังพลาสติกสำหรับบรรจุผักผลไม้	มอก.2373-2551
หลอดพลาสติกสำหรับดูดเครื่องดื่ม	มอก.776-2531

ข้อเสนอแนะ

1. ในการอบวัตถุดิบชีวภาพนั้นควร ตรวจเช็คเครื่องอบว่าเป็นระบบสุญญากาศหรือไม่ถ้าหากมีช่องทางให้อากาศสามารถเข้าไปได้ จะทำให้ใช้เวลานานในการอบให้ได้ เปอร์เซ็นต์ความชื้นตามต้องการ และอุณหภูมิของวัตถุดิบนั้นจะต้องไม่สูงมากจนทำให้วัตถุดิบเปลี่ยนสภาพหรือเกิดการแตกตัวของน้ำมันในวัตถุดิบ

2. ในส่วนผสมของพอลิเมอร์นั้นอาจจะเลือกพิจารณาพอลิเมอร์ชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ เช่น พอลิสไตรีน พอลิโพรพิลีน พอลิคาร์บอเนต เป็นต้น ซึ่งในชีวิตประจำวันพอลิเมอร์เหล่านี้มีปริมาณการใช้งานสูง เพื่อจะได้เป็นการลดมลพิษสิ่งแวดล้อม

3. การพัฒนาคุณสมบัติทางด้านต่างๆ อาจมีการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เข้ามาช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับชิ้นงาน ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เช่น การเติมแต่งสี แต่งกลิ่น การเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

4. ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ชีวภาพผสมในรูปแบบอื่นๆ เช่น อัดรีดขึ้นรูป ดึงขึ้นรูป เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน

5. ศึกษาสภาวะการใช้งาน การเก็บรักษา อายุการใช้งาน รวมไปถึงการย่อยสลายของชิ้นงานพอลิเมอร์ชีวภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เจริญ นาคะสรรค์. 2547. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. บริษัทโฟร์เพช, กรุงเทพฯ.
- ชยันต์ เลาสุทแสน. 2548. การออกแบบแผนการตลาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการฉีดพลาสติก กรณีศึกษา โรงงานฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชลธิชา นุ่มหอม. 2538. โพลีเมอร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นรศิษฐ์ จันทรวงศ์. 2547. การเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิรชา เข้มบุญยิ่ง. 2547. การนำเกลบมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีนคอมพาวด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การตลาด. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการตลาดทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ธนาวิดี ลีจากภัย. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2551. แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. การประชุมครั้งที่ 24 กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- อรอุยา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

- Chandra, R. and R. Rustgi. 1997. Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends. **Polymer Degradation and Stability** 56: 185-202.
- Dangtungee, R., S. S. Desai, S. Tantayanon and P. Supaphol. 2006. Melt rheology and extrudate swell of low-density polyethylene/ethylene–octene copolymer blends. **Polymer Testing** 25: 888-895.
- Ferdinand, R., C. Claude, K. Christipher, Ober and Lynden A. Acher. 2003. **Principles of Polymer Systems**. 5th ed. Taylor & Francis Books. Inc., New York.
- Kaitkamjornwong, S., T. Pabunrung, N. Wongwisetsirikul and P. Prasassarakich. 1997. Degradation of Cassava Starch-Polyethylene Blends. **Journal of Science Society** 23: 163-171.
- Mani, R. and M. Bhattacharya. 1998. Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blend effect of amylopectin to amylase in starch. **European Polymer Journal** 34: 1467-1478.
- Mani, R. and M. Bhattacharya. 2001. Properties of injection moulded blends of starch and modified biodegradable polyesters. **European Polymer Journal** 37: 515-526.
- Montgomery, D. C. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Osswald, T. A. and G. Menges. 1996. **Materials Science of Polymers for Engineers**. Hanser, New York.
- Predroso, A.G. and D.S. Rosa. 2005. Mechanical, thermal and morphological Characterization of recycled LDPE /Corn starch blends. **Carbohydrate Polymer** 59: 1-9.

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** 32: 999-1010.

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 37: 151-160.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลกระทบของเงื่อนไขการฉีดต่อคุณภาพ ชิ้นงานพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

แถบข้าวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RC+LDPE30%)

กรณีฉีดชิ้นงานไม่เต็ม Short shot



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 1

Injection speed	35 %
Max .Injection pressure	65 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 1



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 2

Injection speed	25 %
Max. Injection pressure	55 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก2 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 2

สาเหตุ

ความดันและความเร็วในการฉีดไม่เพียงพอ

กรณีฉีดชิ้นงานเต็ม



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 3

Injection speed	45 %
Max. Injection pressure	75 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก3 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ 3



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 4

Injection speed	55 %
Max. Injection pressure	85 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก4 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 4

หมายเหตุ

เกิดครีป ไม่สามารถปรับแก้ได้เนื่องจากแม่พิมพ์มีการใช้งานมาเป็นเวลานาน อาจเกิดการสึกหรอได้

กรณีเกิดครีป Flash



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 5

Injection speed	65 %
Max. Injection pressure	95 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก5 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 5



เงื่อนไขการฉีดที่ RC 6

Injection speed	75 %
Max. Injection pressure	105 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	129 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก6 ลักษณะของชิ้นงาน RC 70/ LDPE 30 จากการฉีดตามเงื่อนไขที่ RC 6

แป้งข้าวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (RS 70/LDPE 30)

กรณีฉีดชิ้นงานเต็ม



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 1

Injection speed	35 %
Max. Injection pressure	50 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	175 °C

ภาพผนวกที่ ก7 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 1



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 2

Injection speed	35 %
Max. Injection pressure	50 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 °C

ภาพผนวกที่ ก8 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 2



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 3

Injection speed	35 %
Max. Injection pressure	50 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	84 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก9 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 3

กรณีฉีดไม่เต็มชิ้นงาน



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 4

Injection speed	25 %
Max. Injection pressure	35 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก10 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ RS 4

กรณีเกิดครีป



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 5

Injection speed	75 %
Max. Injection pressure	85 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	175 ° C

ภาพผนวกที่ ก11 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 5



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 6

Injection speed	65 %
Max. Injection pressure	95 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	175 ° C

ภาพผนวกที่ ก12 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 6



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 7

Injection speed	65 %
Max. Injection pressure	85 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก13 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 7



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 8

Injection speed	65 %
Max. Injection pressure	40 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก14 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 8



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 9

Injection speed	75 %
Max. Injection pressure	35 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก15 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 9



เงื่อนไขการฉีดที่ RS 10

Injection speed	80 %
Max. Injection pressure	50 Bar
Holding pressure	75 Bar
Screw rotational speed	123 rpm
Melt temperature	185 ° C

ภาพผนวกที่ ก16 ลักษณะของชิ้นงาน RS 70/LDPE 30 ตามเงื่อนไขการฉีดที่ 10

ตารางผนวกที่ ก1 ผลสังเกตการณ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปตามเงื่อนไขต่างๆ ของพอลิเมอร์
ชีวภาพผสมระหว่าง RC70/ LDPE30

condition	Factors					Response
	Injection speed (%)	Max. injection (Bar)	Holding pressure (Bar)	Screw rotational speed (rpm)	Melt temperature (°C)	
1	35	65	75	129	185	Injection speed กับ pressure ลด ชิ้นงานไม่เต็ม
2	25	55	75	129	185	
3	45	75	75	129	185	
4	55	85	75	129	185	
5	65	85	75	123	175	Injection speed กับ pressure ลด เกิดครีบริบที่ขอบชิ้นงาน
6	65	40	75	123	175	

ตารางผนวกที่ ก2 ผลสังเกตการณ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปตามเงื่อนไขต่างๆ ของพอลิเมอร์
ชีวภาพผสมระหว่าง RS70/LDPE30

condition	Factors					Response
	Injection speed (%)	Max. injection pressure (Bar)	Holding pressure (Bar)	Screw rotational speed (rpm)	Melt temperature (°C)	
1	35	50	75	123	175	
2	35	50	75	123	185	ไม่เห็นความแตกต่าง
3	35	50	75	84	185	
3	35	50	75	84	185	
4	25	35	75	45	185	ขึ้นงานไม่เต็ม
5	75	85	75	123	175	ขึ้นงานเต็ม
6	65	95	75	123	175	-เกิดครีบมากขึ้นเมื่อ injection pressure เพิ่มขึ้น มีเฟสสีขาว เล็กน้อย
7	65	85	75	123	175	เฟสสีขาวหายไป เมื่อ
8	65	40	75	123	175	เพิ่มInjection speed และ
9	75	35	75	123	175	เกิดครีบน้อยลง เมื่อลด
10	80	50	75	123	175	injection pressure

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ Two-sample Test for LDPE vs LDPE(RE)

การตรวจสอบค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (LDPE) และพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง (LDPE (RE)) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% จากข้อมูลดังนี้

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลค่าความแข็งแรงดึงของ LDPE กับ LDPE (RE)

LDPE	LDPE(RE)
10.305	9.83
10.26	9.7
10.26	9.43
9.8	9.33
9.67	9.53

1. ทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองประชากร

$$H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2$$

$$H_1: \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$$

Test for Equal Variances: LDPE, LDPE(RE)

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

N	Lower	StDev	Upper
---	-------	-------	-------

LDPE	5	0.167890	0.299883	1.03746
------	---	----------	----------	---------

LDPE(RE)	5	0.113057	0.201941	0.69862
----------	---	----------	----------	---------

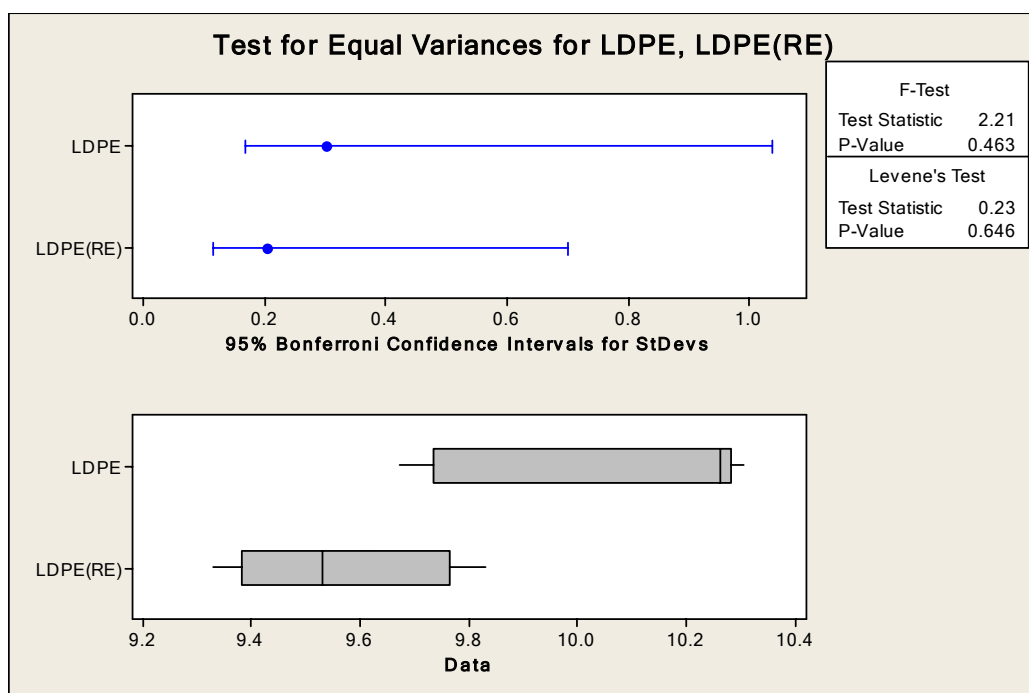
F-Test (normal distribution)

Test statistic = 2.21, p-value = 0.463

Levene's Test (any continuous distribution)

Test statistic = 0.23, p-value = 0.646

ภาพผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบความแปรปรวนแบบ F-Test ของ LDPE และ LDPE (RE)



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของ LDPE และ LDPE (RE)

จากผลการทดสอบความแปรปรวนพบว่า ค่า p-value ของการทดสอบแบบ F-Test (normal distribution) ได้ $p\text{-value} = 0.463 > 0.05$ และ การทดสอบแบบ Levene's Test (any continuous distribution) ได้ $p\text{-value} = 0.646 > 0.05$ ดังนั้นจึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของทั้งสองไม่แตกต่างกัน

2. ทดสอบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Two-Sample T-Test and CI: LDPE, LDPE(RE)

Two-sample T for LDPE vs LDPE(RE)

	N	Mean	StDev	SE Mean
LDPE	5	10.059	0.300	0.13
LDPE(RE)	5	9.564	0.202	0.090

Difference = μ (LDPE) - μ (LDPE(RE))

Estimate for difference: 0.495000

95% CI for difference: (0.122154, 0.867846)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 3.06 P-Value = 0.016 DF = 8

Both use Pooled StDev = 0.2556

ภาพผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบผลต่างค่าเฉลี่ยของ LDPE และ LDPE (RE) กรณีความแปรปรวนเท่ากัน

จากผลการทดสอบความแปรปรวน พบว่า ค่า $t = 3.0$ และ $P\text{-Value} = 0.016 < 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของทั้งสองข้อมูลแตกต่างกัน และที่ 95% ช่วงความเชื่อมั่นของผลต่างของค่าเฉลี่ยทั้งสองคือ (0.122154, 0.867846)

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง
(Tensile strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)

Blending	Tensile strength (MPa)							
	RC/LDPE				RC/LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	9.33	9.53	9.43	0.14	9.73	9.63	9.68	0.07
70/30	11.90	11.30	11.60	0.42	11.97	11.87	11.92	0.07
75/25	12.80	13.20	13.00	0.29	12.90	12.36	12.63	0.38
80/ 20	13.80	13.04	13.42	0.54	13.44	12.93	13.19	0.36
85/15	15.17	13.97	14.57	0.85	15.37	14.93	15.15	0.31
100/ 0	19.46	18.54	19.00	0.65				

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง
(tensile strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)

Blending	tensile strength (MPa)							
	RS/LDPE				RS /LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	9.33	9.53	9.43	0.14	9.73	9.63	9.68	0.07
70/30	14.47	15.37	14.92	0.64	15.54	14.87	15.20	0.47
75/25	16.54	16.96	16.75	0.30	15.47	16.00	15.74	0.37
80/ 20	18.54	18.70	18.62	0.11	17.94	18.26	18.10	0.23
85/15	20.70	19.46	20.08	0.88	20.18	19.74	19.74	0.31
100/ 0	27.69	28.740	28.22	0.74				

ตารางผนวกที่ ค3 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ยึดดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)

Blending	Elongation at break (%)							
	RC/LDPE				RC /LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	65.44	76.6	71.02	7.89	64.16	78.4	71.28	10.07
70/30	2.54	2.22	2.38	0.23	2.28	2.46	2.37	0.13
75/25	2.32	1.91	2.11	0.29	2.36	2.13	2.24	0.16
80/ 20	1.88	1.74	2.07	0.16	1.92	1.82	1.87	0.07
85/15	1.88	1.74	1.81	0.1	1.51	1.57	1.54	0.04
100/ 0	1.24	1.26	1.25	0.01				

ตารางผนวกที่ ค4 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ยึดดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)

Blending	Elongation at break (%)							
	RS/LDPE				RS/LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	65.44	76.60	71.02	7.89	64.16	78.40	71.28	10.07
70/30	4.58	4.31	4.45	0.19	3.77	4.30	4.03	0.37
75/25	4.40	4.04	4.22	0.26	3.63	4.15	3.89	0.37
80/ 20	3.70	4.26	3.98	0.39	3.37	3.49	3.43	0.09
85/15	3.73	3.78	3.75	0.03	3.72	3.47	3.59	0.18
100/ 0	2.79	2.86	2.83	0.05				

ตารางผนวกที่ ค5 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรง
ดัดโค้ง (Flexural strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)

Blending	Flexural strength (MPa)							
	RC/LDPE				RC /LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	5.00	5.18	5.09	0.13	5.20	4.94	5.07	0.18
70/30	20.30	20.83	20.57	0.37	20.76	22.01	21.38	0.88
75/25	23.59	22.58	23.09	0.50	24.27	23.40	23.84	0.62
80/ 20	25.44	24.93	25.19	0.36	25.86	25.32	25.59	0.38
85/15	26.97	26.43	26.70	0.27	27.45	25.89	26.67	1.10
100/ 0	44.04	47.76	45.90	2.63				

ตารางผนวกที่ ค6 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรง
ดัดโค้ง (Flexural strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)

Blending	Flexural strength (MPa)							
	RS/LDPE				RS/LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	5.00	5.18	5.09	0.13	5.20	4.94	5.07	0.18
70/30	19.97	21.15	20.56	0.84	21.82	21.70	21.76	0.08
75/25	24.15	23.61	23.88	0.38	24.21	24.09	24.15	0.08
80/ 20	26.37	26.06	26.21	0.22	25.94	27.01	26.48	0.76
85/15	31.17	30.39	30.78	0.55	29.55	29.91	29.73	0.26
100/ 0	44.04	47.76	45.90	2.63				

ตารางผนวกที่ ค7 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรง
กระแทก (Impact strength) สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)

Blending	Impact strength (N/m2)							
	RC/LDPE				RC /LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	57.53	58.45	57.99	0.651	60.26	61.16	60.71	0.636
70/30	4.76	4.76	4.76	0	4.76	4.76	4.76	0
75/25	4.18	4.18	4.18	0	4.18	4.18	4.18	0
80/ 20	4.18	4.76	4.47	0.41	4.18	4.18	4.18	0
85/15	4.18	4.18	4.18	0	4.18	4.18	4.18	0
100/ 0	4.18	3.895	4.037	0.202				

ตารางผนวกที่ ค8 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรง
กระแทก (Impact strength) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)

Blending	Impact strength (N/m2)							
	RS/LDPE				RS/LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	57.53	58.45	57.99	0.651	60.26	61.16	60.71	0.636
70/30	4.18	4.47	4.325	0.205	4.18	4.18	4.18	0
75/25	4.18	4.18	4.18	0	4.18	4.18	4.18	0
80/ 20	4.76	4.76	4.76	0	4.18	4.76	4.47	0.41
85/15	4.76	4.76	4.76	0	4.76	4.76	4.76	0
100/ 0	5.35	5.35	5.35	0				

ตารางผนวกที่ ค9 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดซึ่ม
ความชื้น สำหรับ RC/LDPE กับ RC/LDPE (Re)

Blending	Moisture absorption (%)							
	RC/LDPE				RC/LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00
70/30	0.97	0.98	0.97	0.01	1.06	1.04	1.05	0.01
75/25	1.06	1.08	1.07	0.01	1.04	1.02	1.03	0.01
80/ 20	1.03	1.04	1.04	0.01	1.07	1.13	1.10	0.04
85/15	1.18	1.20	1.19	0.01	1.12	1.12	1.12	0.00
100/ 0	1.18	1.20	1.19	0.02				

ตารางผนวกที่ ค10 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดซึ่ม
ความชื้น (Moisture absorption) สำหรับ RS/LDPE กับ RS /LDPE (Re)

Blending	Moisture absorption (%)							
	RS/LDPE				RS /LDPE (Re)			
	1	2	Mean	StDev	1	2	Mean	StDev
0/ 100	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00
70/30	1.14	1.17	1.15	0.02	1.25	1.24	1.24	0.01
75/25	1.39	1.42	1.40	0.02	1.33	1.34	1.34	0.01
80/ 20	1.43	1.44	1.44	0.01	1.34	1.35	1.35	0.01
85/15	1.44	1.44	1.44	0.01	1.43	1.44	1.43	0.01
100/ 0	1.65	1.63	1.64	0.02				

ตารางผนวกที่ ค11 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RC/LDPE

Blending	RC/LDPE											
	T _m (°C)		Mean	StDev	T _m (°C)		Mean	StDev	ΔH (J/g)		Mean	StDev
	1	2			1	2			1	2		
0/ 100	96.51	97.65	97.08	0.81	94.51	93.91	94.21	0.42	-1054.23	-1048.79	-1051.51	3.85
70/30	96.93	96.11	96.52	0.58	95.01	93.89	94.45	0.79	-288.43	-284.33	-286.38	2.90
75/25	97.69	96.75	97.22	0.66	95.25	93.99	94.62	0.89	-263.57	-266.39	-264.98	1.99
80/ 20	96.97	97.81	97.39	0.59	94.93	94.03	94.48	0.64	-246.18	-239.52	-242.85	4.71
85/15	96.68	98.18	97.43	1.06	95.17	94.75	94.96	0.30	-231.95	-234.41	-233.18	1.74
100/ 0	114.53	112.91	113.72	1.15	96.21	96.57	96.39	0.25	-150.48	-158.54	-154.51	5.70

ตารางผนวกที่ 12 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RC/LDPE (Re)

Blending	RC/LDPE (RE)											
	T _m (°C)		Mean	StDev	T _m (°C)		Mean	StDev	ΔH (J/g)		Mean	StDev
	1	2			1	2			1	2		
0/ 100	97.13	7.05	97.09	0.06	95.47	94.95	95.21	0.37	-1,005.67	- 996.25	- 1,000.96	6.66
70/30	96.57	97.59	97.08	0.72	95.04	93.30	94.17	1.23	- 283.50	- 286.86	- 285.18	2.38
75/25	97.71	97.31	97.51	0.28	94.69	94.61	94.65	0.06	- 275.12	- 274.82	- 274.97	0.21
80/ 20	97.87	98.91	98.39	0.74	95.20	94.40	94.80	0.57	- 235.64	- 240.24	- 237.94	3.25
85/15	98.26	98.08	98.17	0.13	95.31	95.47	95.39	0.11	- 213.09	- 212.09	- 212.59	0.71
100/ 0	114.53	112.91	113.72	1.15	96.21	96.57	96.39	0.25	- 150.48	- 158.54	- 154.51	5.70

ตารางผนวกที่ ค13 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RS/LDPE

Blending	RS/LDPE													
	T _m (°C)		Mean	StDev	T _m (°C)		Mean	StDev	ΔH (J/g)		Mean	StDev		
	1	2			1	2			1	2				
0/ 100	96.51	97.65	97.08	0.81	94.51	93.91	94.21	0.42	-1054.23	-1048.79	-1051.51	3.85		
70/30	97.23	97.55	97.39	0.23	95.14	95.44	95.29	0.21	-261.76	-265.30	-263.53	2.50		
75/25	97.36	99.56	98.46	1.56	95.89	96.41	96.15	0.37	-223.01	-221.39	-222.20	1.15		
80/ 20	99.49	99.91	99.70	0.30	96.93	98.37	97.65	1.02	-196.53	-199.53	-198.03	2.12		
85/15	99.73	99.97	99.85	0.17	97.92	98.14	98.03	0.16	-190.26	-194.94	-192.60	3.31		
100/ 0	118.56	120.88	119.72	1.64	102.04	104.10	103.07	1.46	-125.80	-127.40	-126.60	1.13		

ตารางผนวกที่ ค14 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) และพลังงานความร้อนในการตกผลึก (ΔH) สำหรับ RS/LDPE (RE)

Blending	RS/LDPE(RE)											
	T _m (°C)		Mean	StDev	T _m (°C)		Mean	StDev	ΔH (J/g)		Mean	StDev
	1	2			1	2			1	2		
0/ 100	97.13	97.05	97.09	0.06	95.47	94.95	95.21	0.37	-1005.67	-996.25	-1000.96	6.66
70/30	97.31	97.85	97.58	0.38	95.69	94.79	95.24	0.64	-261.29	-267.39	-264.34	4.31
75/25	97.12	98.04	97.58	0.65	95.71	94.95	95.33	0.54	-245.51	-243.55	-244.53	1.39
80/ 20	97.65	98.09	97.87	0.31	96.45	95.45	95.95	0.71	-210.96	-213.40	-212.18	1.73
85/15	98.74	99.26	99.00	0.37	96.12	97.00	96.56	0.62	-165.74	-156.86	-161.30	6.28
100/ 0	118.56	120.88	119.72	1.64	102.04	104.10	103.07	1.46	-125.80	-127.40	-126.60	1.13

ตารางผนวกที่ ค15 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RC/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมี ของ RC/LDPE							
	HCl		Mean	StDev	NaOH		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.30	0.20	0.25	0.07	0.07	0.13	0.10	0.04
70/ 30	0.53	0.39	0.46	0.10	2.15	2.53	2.34	0.27
75/25	0.67	0.37	0.52	0.21	3.45	4.27	3.86	0.58
80/20	0.62	0.46	0.54	0.11	5.91	5.83	5.87	0.06
85/15	0.54	0.60	0.57	0.04	8.01	6.65	7.33	0.96
100/0	1.35	1.21	1.28	0.10	13.40	12.20	12.80	0.85

ตารางผนวกที่ ค16 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซิน 91 สำหรับ RC/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RC/LDPE							
	โทลูอิน		Mean	StDev	เบนซิน 91		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	12.54	11.02	11.78	1.07	2.75	3.73	3.24	0.69
70/ 30	6.12	7.02	6.57	0.64	2.57	2.79	2.68	0.16
75/25	5.79	5.47	5.63	0.23	2.75	2.31	2.53	0.31
80/20	6.16	5.12	5.64	0.74	2.17	2.79	2.48	0.44
85/15	5.23	5.45	5.34	0.16	2.14	2.58	2.36	0.31
100/0	2.47	3.53	3.00	0.75	1.47	1.65	1.56	0.13

ตารางผนวกที่ ค17 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RC/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RC/LDPE							
	เมทานอล		Mean	StDev	น้ำกลั่น		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.18	0.28	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
70/ 30	0.51	0.45	0.48	0.04	0.87	0.73	0.80	0.10
75/25	0.46	0.42	0.44	0.03	0.96	1.30	1.13	0.24
80/20	0.40	0.44	0.42	0.03	0.87	0.97	0.92	0.07
85/15	0.50	0.48	0.49	0.01	0.83	0.67	0.75	0.11
100/0	0.37	0.43	0.40	0.04	1.68	1.34	1.51	0.24

ตารางผนวกที่ ค18 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RC/LDPE (RE)

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของRC/LDPE(RE)							
	HCl		Mean	StDev	NaOH		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.09	0.19	0.14	0.07	0.03	0.07	0.05	0.03
70/ 30	0.39	0.42	0.41	0.03	1.00	1.15	1.07	0.10
75/25	0.52	0.40	0.46	0.09	2.43	2.66	2.55	0.16
80/20	0.64	0.56	0.60	0.06	4.15	4.04	4.10	0.07
85/15	0.69	0.72	0.70	0.02	6.36	7.18	6.77	0.58
100/0	1.35	1.21	1.28	0.10	13.40	12.20	12.80	0.85

ตารางผนวกที่ ค19 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RC/LDPE (RE)

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RC/LDPE(RE)							
	โทลูอิน		Mean	StDev	เบนซีน 91		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	12.30	10.76	11.53	1.09	3.85	3.01	3.43	0.59
70/ 30	6.25	7.03	6.64	0.55	3.12	2.23	2.68	0.63
75/25	6.50	5.66	6.08	0.59	2.97	2.29	2.63	0.48
80/20	6.23	4.52	5.38	1.21	2.01	2.85	2.43	0.59
85/15	5.12	4.51	4.82	0.43	1.95	2.87	2.41	0.65
100/0	2.47	3.53	3.00	0.75	1.47	1.65	1.56	0.13

ตารางผนวกที่ ค20 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RC/LDPE (RE)

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RC/LDPE(RE)							
	เมทานอล		Mean	StDev	น้ำกลั่น		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.19	0.33	0.26	0.10	0.01	0.03	0.02	0.01
70/ 30	0.53	0.36	0.45	0.12	0.61	0.57	0.59	0.03
75/25	0.52	0.45	0.48	0.05	0.59	0.83	0.71	0.17
80/20	0.41	0.46	0.44	0.04	0.76	0.80	0.78	0.03
85/15	0.40	0.49	0.44	0.06	0.83	0.86	0.85	0.02
100/0	0.37	0.43	0.40	0.04	1.68	1.34	1.51	0.24

ตารางผนวกที่ ค21 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RS/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE							
	HCl		Mean	StDev	NaOH		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.30	0.20	0.25	0.07	0.07	0.13	0.10	0.04
70/ 30	0.58	0.98	0.78	0.28	3.54	3.90	3.72	0.25
75/25	1.59	2.15	1.87	0.40	12.32	11.08	11.70	0.88
80/20	3.46	4.24	3.85	0.55	17.10	17.14	17.12	0.03
85/15	7.12	6.62	6.87	0.35	18.87	18.15	18.51	0.51
100/0	10.32	11.62	10.97	0.92	56.74	58.86	57.80	1.50

ตารางผนวกที่ ค22 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซิน 91 สำหรับ RS/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE							
	โทลูอิน		Mean	StDev	เบนซิน 91		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	12.54	11.02	11.78	1.07	2.75	3.73	3.24	0.69
70/ 30	7.12	6.54	6.83	0.41	3.14	1.90	2.52	0.88
75/25	6.34	6.70	6.52	0.25	2.23	2.45	2.34	0.16
80/20	6.12	4.60	5.36	1.07	2.67	1.93	2.30	0.52
85/15	5.86	4.54	5.20	0.93	1.96	2.24	2.10	0.20
100/0	3.62	3.56	3.59	0.04	1.84	1.80	1.82	0.03

ตารางผนวกที่ ค23 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RS/LDPE

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE							
	เมทานอล		Mean	StDev	น้ำกลั่น		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.18	0.28	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
70/ 30	0.64	0.52	0.58	0.08	2.50	1.82	2.16	0.48
75/25	0.39	0.51	0.45	0.08	3.72	2.72	3.22	0.71
80/20	0.51	0.43	0.47	0.06	3.87	3.55	3.71	0.23
85/15	0.43	0.45	0.44	0.01	5.13	4.55	4.84	0.41
100/0	0.21	0.13	0.17	0.06	17.31	15.81	16.56	1.06

ตารางผนวกที่ ค24 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลาย HCl กับ NaOH สำหรับ RS/LDPE (RE)

อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE(RE)							
	HCl		Mean	StDev	NaOH		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.09	0.19	0.14	0.07	0.03	0.07	0.05	0.03
70/ 30	0.98	0.92	0.95	0.04	3.65	2.41	3.03	0.88
75/25	3.15	3.41	3.28	0.18	15.21	14.11	14.66	0.78
80/20	4.35	5.29	4.82	0.66	24.01	22.37	23.19	1.16
85/15	5.12	4.88	5.00	0.17	24.47	23.59	24.03	0.62
100/0	10.32	11.62	10.97	0.92	56.74	58.86	57.80	1.50

ตารางผนวกที่ ค25 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์
การบวมตัวในสารละลาย โทลูอิน กับ เบนซีน 91 สำหรับ RS/LDPE (RE)

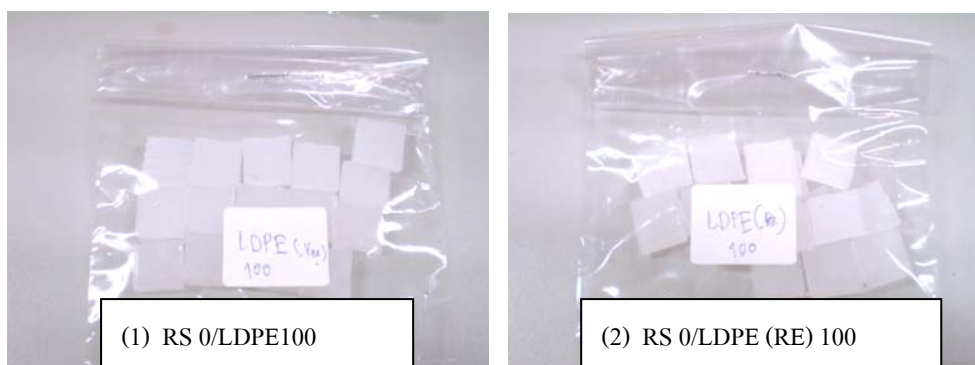
อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE(RE)							
	โทลูอิน		Mean	StDev	เบนซีน 91		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	12.30	10.76	11.53	1.09	3.85	3.01	3.43	0.59
70/ 30	7.01	7.97	7.49	0.68	1.97	2.63	2.30	0.47
75/25	7.10	6.20	6.65	0.64	2.73	1.75	2.24	0.69
80/20	5.65	5.09	5.37	0.40	1.98	2.24	2.11	0.18
85/15	5.16	4.08	4.62	0.76	1.95	2.19	2.07	0.17
100/0	3.62	3.56	3.59	0.04	1.84	1.80	1.82	0.03

ตารางผนวกที่ ค26 ข้อมูลการทดสอบ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์
การบวมตัวในสารละลาย เมทานอล กับ น้ำกลั่น สำหรับ RS/LDPE (RE)

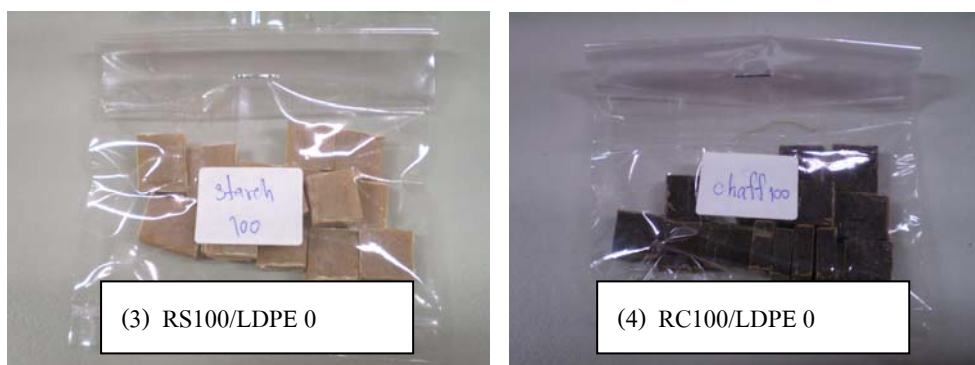
อัตราส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในสารละลายเคมีของ RS/LDPE(RE)							
	เมทานอล		Mean	StDev	น้ำกลั่น		Mean	StDev
	1	2			1	2		
0/100	0.19	0.33	0.26	0.10	0.01	0.03	0.02	0.01
70/ 30	0.56	0.32	0.44	0.17	2.14	1.68	1.91	0.33
75/25	0.41	0.29	0.35	0.08	3.56	4.48	4.02	0.65
80/20	0.29	0.25	0.27	0.03	5.87	6.19	6.03	0.23
85/15	0.25	0.17	0.21	0.06	8.24	9.12	8.68	0.62
100/0	0.21	0.13	0.17	0.06	17.31	15.81	16.56	1.06

ภาคผนวก ง

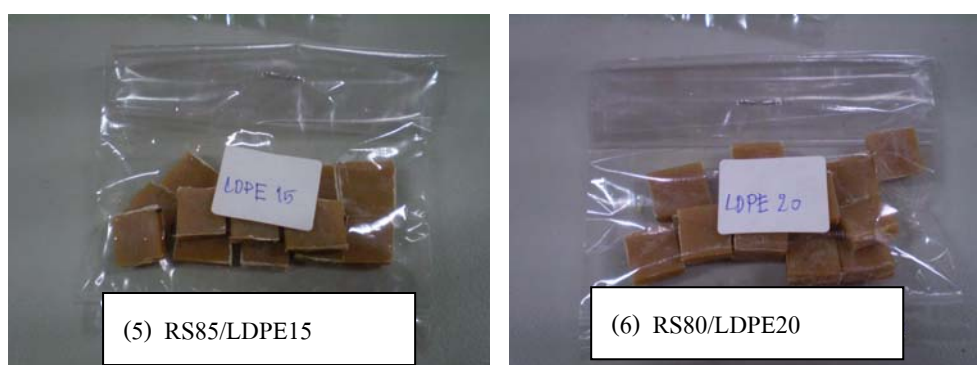
ผลการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ชีวภาพผสมที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพผนวกที่ ง1 ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (1) RS 0/LDPE 100
(2) RC 0/LDPE 100



ภาพผนวกที่ ง2 ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (3) RS100/LDPE 0
(4) RC100/LDPE 0



ภาพผนวกที่ ง3 ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (5) RS 85/LDPE 15
(6) RS 80/LDPE 20



(7) RS75/LDPE25



(8) RS70/LDPE30

ภาพผนวกที่ ๔ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (7) RS 75/LDPE 25
(8) RS 70/LDPE 30



(9) RS85/LDPE (RE) 15



(10) RS80/LDPE (RE) 20

ภาพผนวกที่ ๕ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (9) RS 85/LDPE (RE) 15
(10) RS 80/LDPE (RE) 20



(11) RS75/LDPE (RE) 25

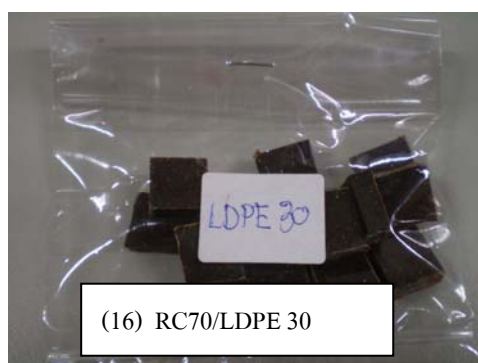


(12) RS70/LDPE (RE) 30

ภาพผนวกที่ ๖ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (11) RS 75/LDPE (RE) 25
(12) RS 70/LDPE (RE) 30



ภาพผนวกที่ ๗ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (13) RC85/LDPE 15
(14) RC80/LDPE 20



ภาพผนวกที่ ๘ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (15) RC75/LDPE 25
(16) RC70/LDPE 30



ภาพผนวกที่ ๙ ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (17) RC85/LDPE (RE) 15
(18) RC80/LDPE (RE) 20

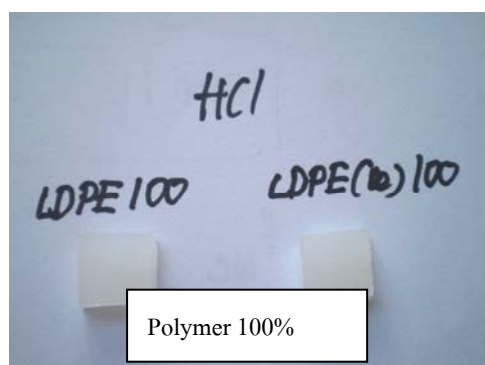


(19) RC75/LDPE (RE) 25

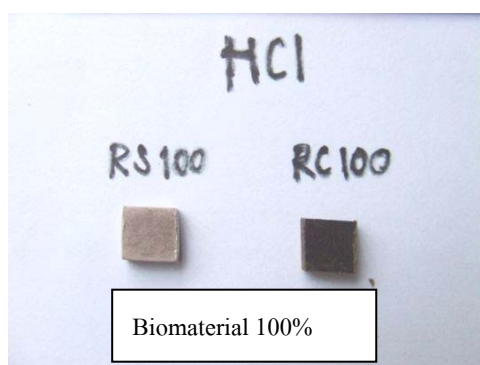


(20) RC70/LDPE (RE) 30

ภาพผนวกที่ 10 ชิ้นงานก่อนการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของ (19) RC75/LDPE (RE) 25
(20) RC70/LDPE (RE) 30

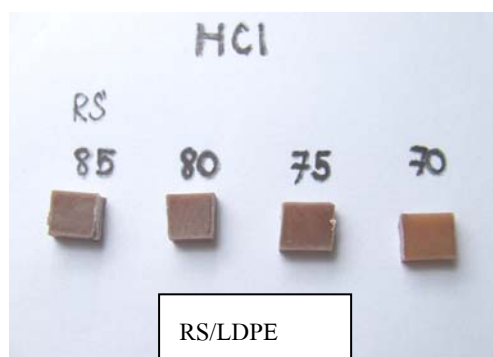


Polymer 100%

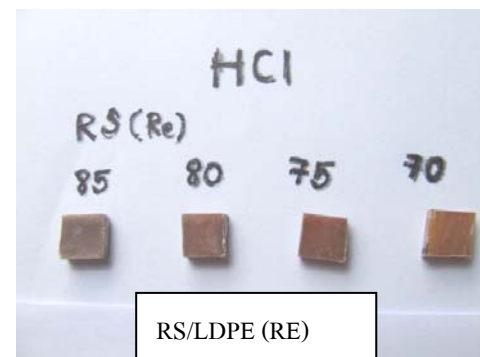


Biomaterial 100%

ภาพผนวกที่ 11 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย HCl ของ Polymer 100%
กับ Biomaterial 100%

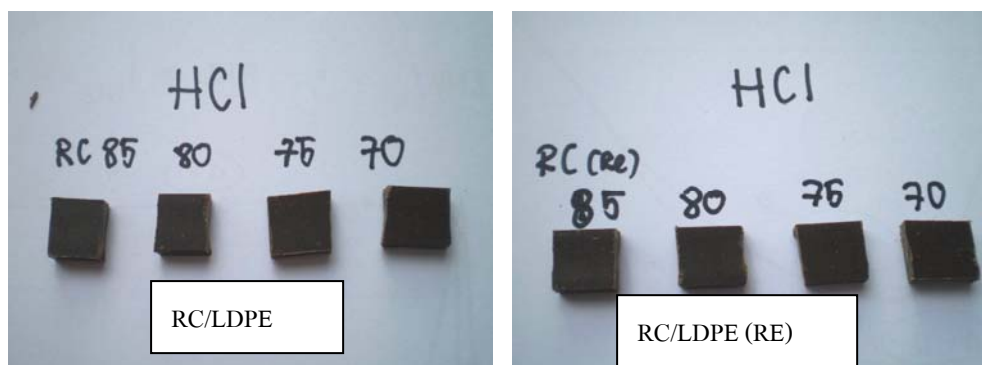


RS/LDPE

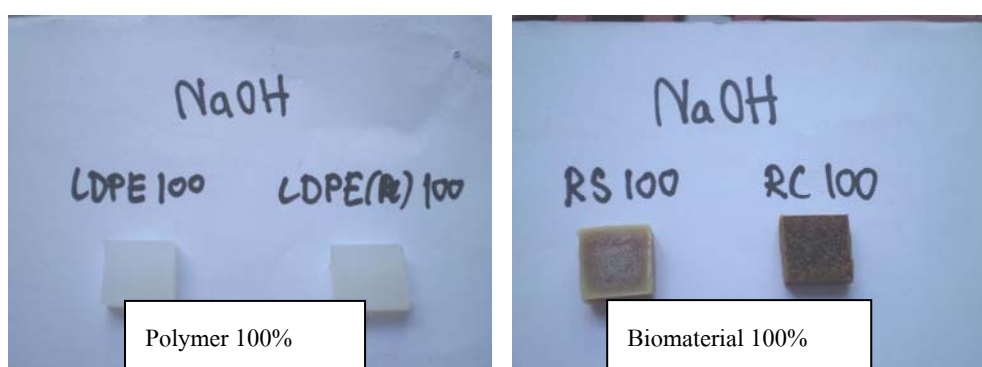


RS/LDPE (RE)

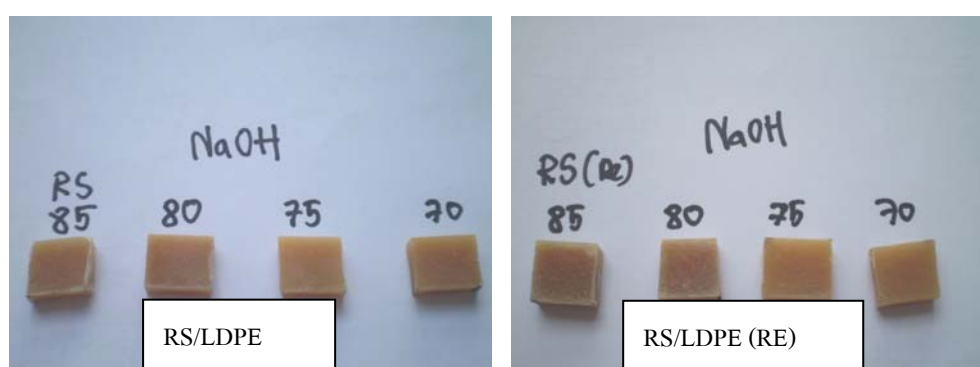
ภาพผนวกที่ 12 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย HCl ของ RS/LDPE
กับ RS/LDPE (RE)



ภาพผนวกที่ 13 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย HCl ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



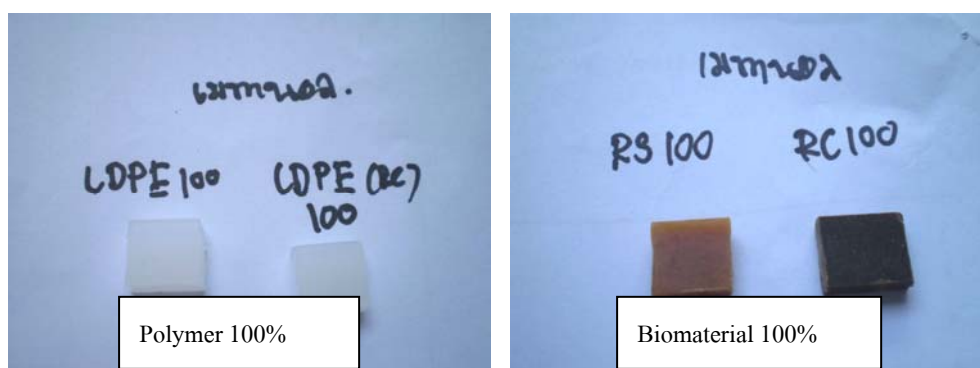
ภาพผนวกที่ 14 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%



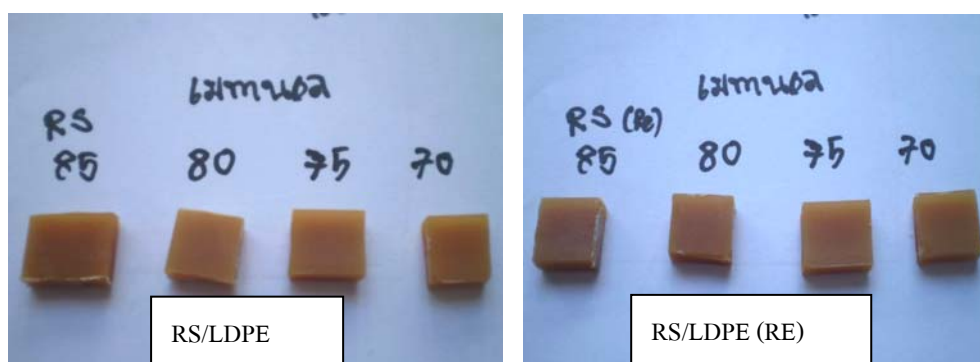
ภาพผนวกที่ 15 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)



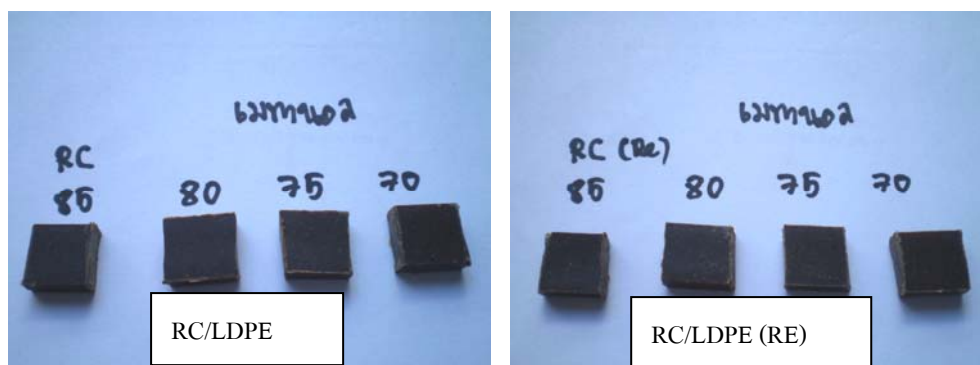
ภาพผนวกที่ 16 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



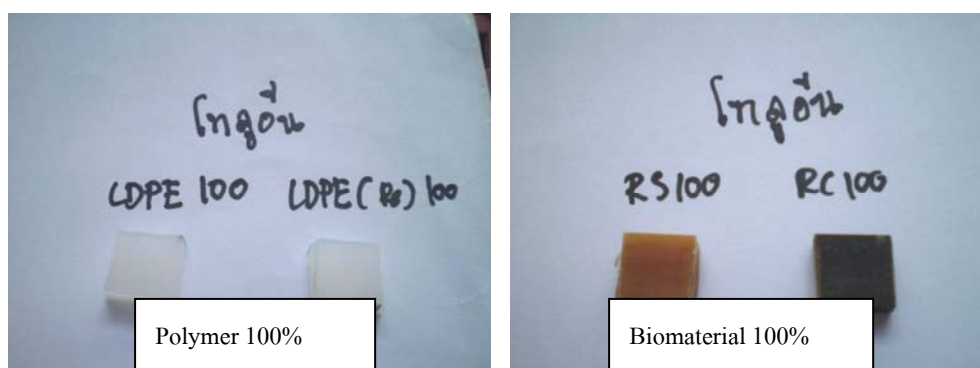
ภาพผนวกที่ 17 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย NaOH ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%



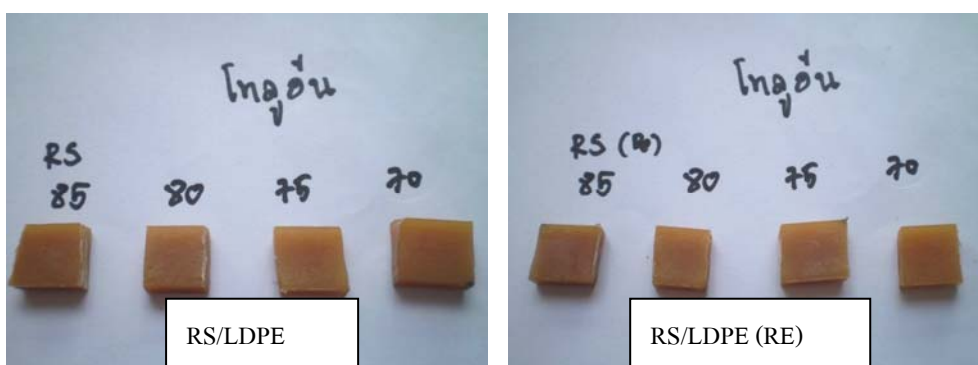
ภาพผนวกที่ 18 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย เมทานอล ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)



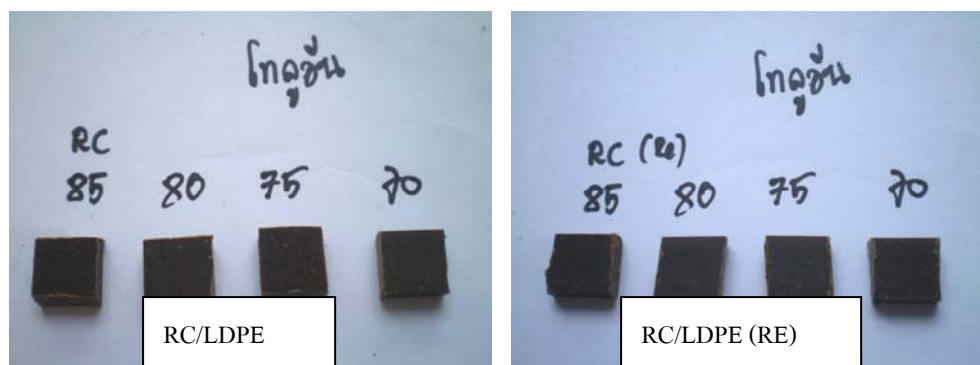
ภาพผนวกที่ 19 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย เมทานอล ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



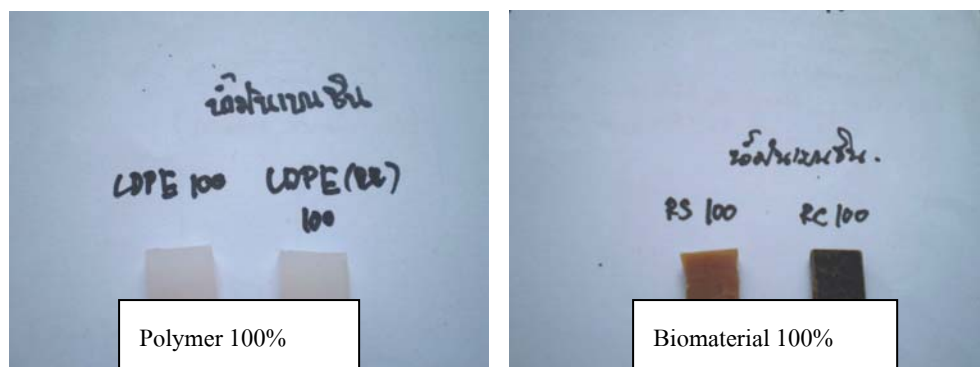
ภาพผนวกที่ 20 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โทลูอีน ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%



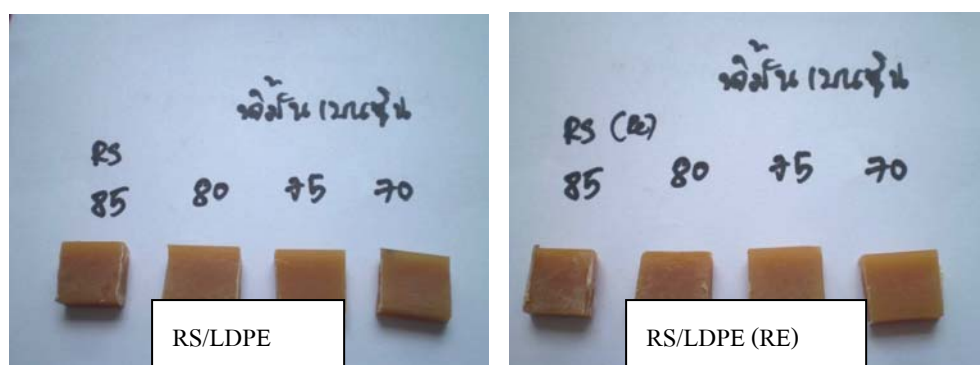
ภาพผนวกที่ 21 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โทลูอีน ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)



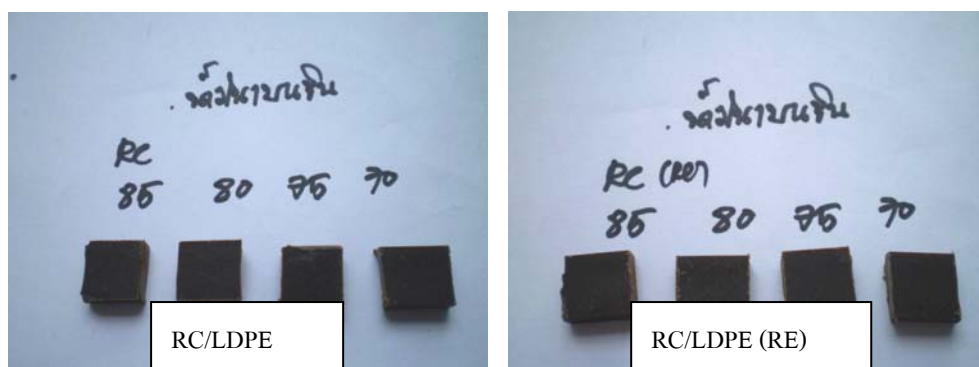
ภาพผนวกที่ ๒๒ ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อสารละลาย โกลูชัน ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



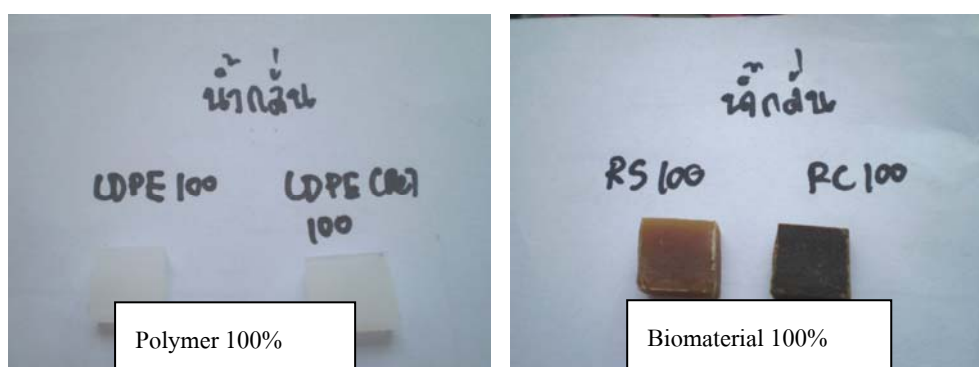
ภาพผนวกที่ ๒๓ ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน 91 ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%



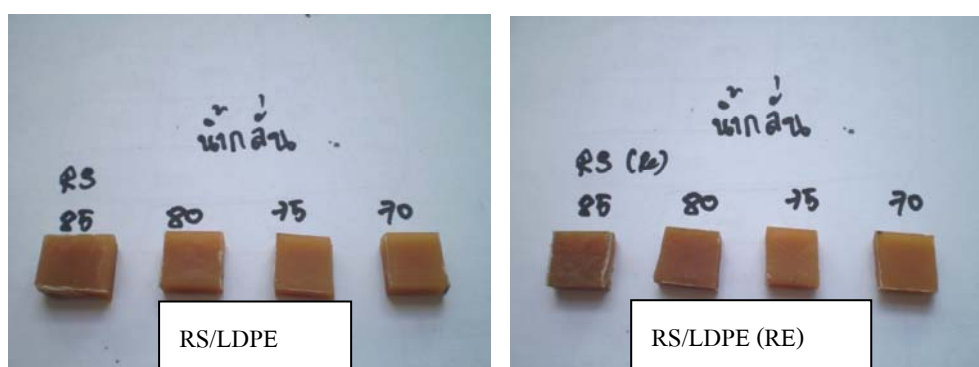
ภาพผนวกที่ ๒๔ ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำมันเบนซิน 91 ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)



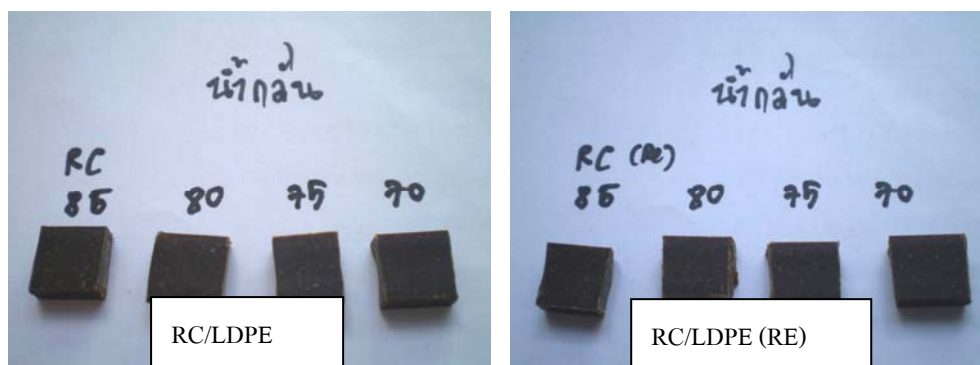
ภาพผนวกที่ 25 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อ ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



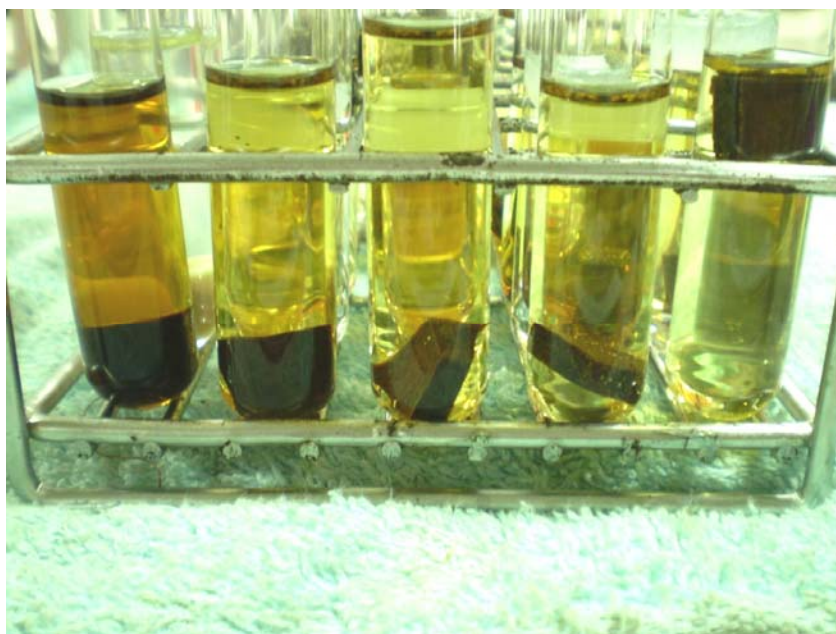
ภาพผนวกที่ 26 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อ น้ำกลั่น ของ Polymer 100% กับ Biomaterial 100%



ภาพผนวกที่ 27 ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำกลั่น ของ RS/LDPE กับ RS/LDPE (RE)



ภาพผนวกที่ ๒๘ ชิ้นงานหลังการทดสอบความทนทานต่อน้ำกลั่น ของ RC/LDPE กับ RC/LDPE (RE)



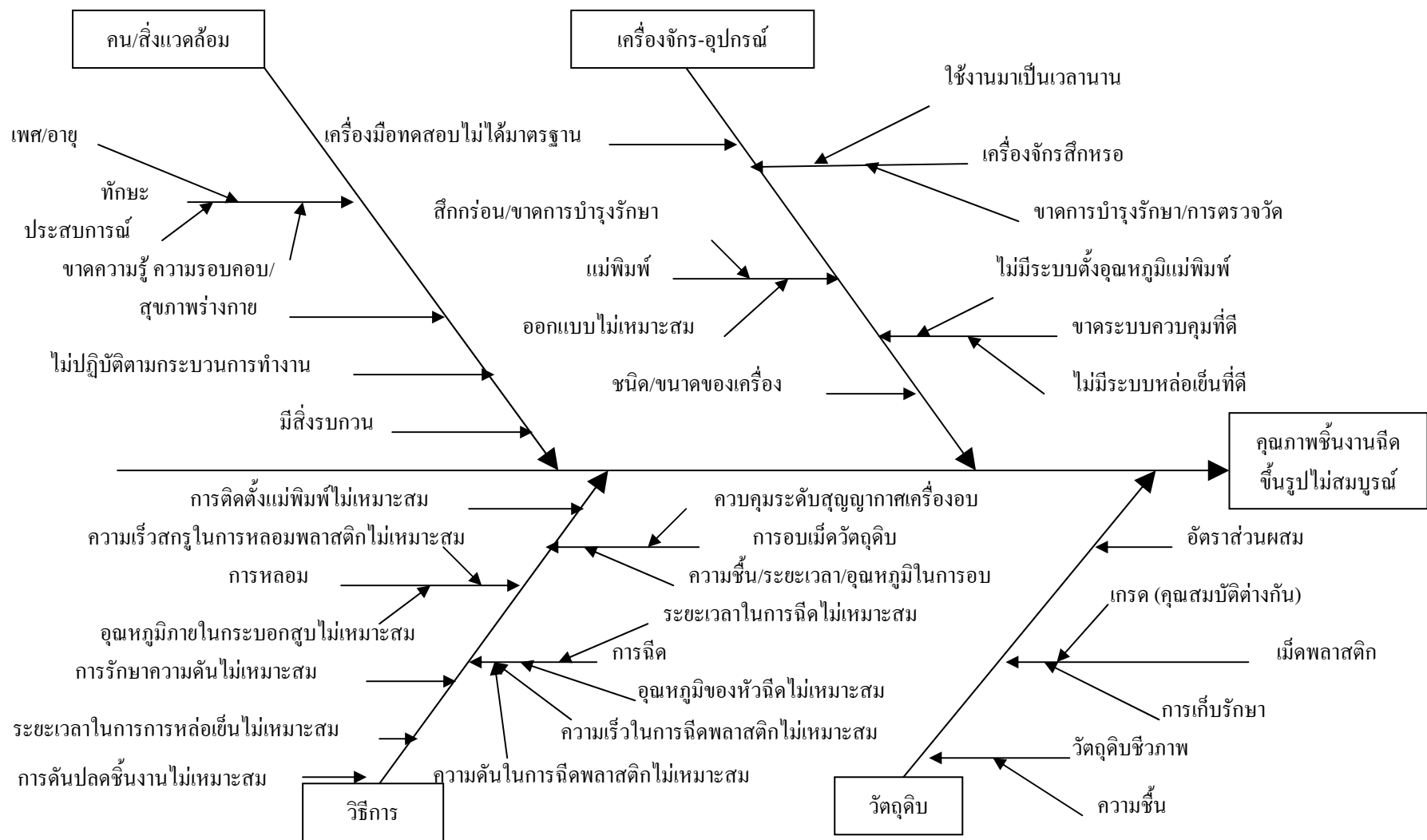
ภาพผนวกที่ ๒๙ การเปลี่ยนแปลงสีในสารละลาย NaOH ของการทดสอบชิ้นงาน RC/LDPE



ภาพผนวกที่ 30 การเปลี่ยนแปลงสีในสารละลาย NaOH ของการทดสอบชิ้นงาน RS/LDPE

ภาคผนวก จ

แผนผังก้างปลาสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาคุณภาพชิ้นงานฉีดขึ้นรูปไม่สมบูรณ์



ภาพผนวกที่ จ1 แผนผังก้างปลาสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาคุณภาพชิ้นงานผิดขึ้นรูปไม่สมบูรณ์

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการตั้งค่าตามเงื่อนไขกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่กำหนดหน้าต่างบนโปรแกรมของเครื่องฉีด

ตารางผนวกที่ ฉ1 ข้อมูลการตั้งค่าตามเงื่อนไขกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่กำหนดหน้าด้านบน
โปรแกรมของเครื่องฉีด

Code	Description	Unit	Tolerance	Value	Code	Description	Unit	Tolerance	Value
F01F	CLOSING				F006F	TEMPERATURE			
	1 Mould safety program	0/1		1		49 Zone 1(Nozzle)	'C	10	EE
	2 Mould open	mm.	20	220		50 Zone 1	'C	10	175
	3 Closing speed 1	%	20	30		51 Zone 2	'C	10	175
	4 Closing stroke 1	mm.	10	200		52 Zone 3(Hopper)	'C	10	170
	5 Closing speed	%	20	45	F06F	METERING DECOMPRESSION			
	6 Closing stroke 2	mm.	15	95		53 Metering delay	Sec.	1	0.1
	7 Closing speed 3	%	20	13		54 Screw speed	RPM	30	
	8 Mould safety stroke	mm.	2	85		55 Decompression stroke 1	Bar	5	0
	9 Mould safety speed	%	10	8		56 Back pressure 1	mm.	10	2
	10 Mould safety pressure	Bar	10	8		57 Back stroke 1	Bar	5	10
	11 Mould safety time	Sec.	2	2.5		58 Back pressure 2	mm.	10	2
	12 Zero-offset mould	mm.	1	0		59 Back stroke 2	Bar	5	15
	13 Mould close	mm.	20	77.7		60 Metering speed 1	%	5	DD
	14 Clamping high pressure	Bar	20	210		61 Metering stroke 1	mm.	10	30
F02F	NOZZLE FORWARD					62 Metering speed 2	%	10	DD
	14 Nozzle forward delay	Sec.	1	0.1		63 Metering stroke	mm.	5	76
	15 Nozzle back stroke	mm.	10	0		64 Decompression program	0/1		1
	16 Nozzle forward speed 1	%	10	25		65 Decompression stroke 2	mm.	10	78
	17 Nozzle forward pressure	Bar	10	120	F07F	NOZZLE BACK			
	18 Nozzle forward stroke	mm.	10	35		66 Nozzle back delay	Sec.	1	0.1
	19 Nozzle forward speed 2	%	10	25		67 Nozzle back speed	%	20	35
	20 Zero-offset nozzle	mm.	1	0		68 Nozzle back pressure	Bar	10	30
	21 Nozzle touching point	mm.	1	26.6		69 Nozzle back stroke	mm.	10	.
F03F	INJECTION				F08F	OPENING			
	21 Injection delay	Sec	1	0.1		70 Opening speed 1	%	10	12
	22 Max. injection pressure	Bar	10	BB		71 Opening pressure 1	Bar	5	40
	23 Decompression stroke	mm.	3	78		72 Opening stroke 1	mm.	20	128
	24 Metering stroke	mm.	5	76		73 Opening speed 2	%	10	30
	25 Injection speed 1	%	20	AA		74 Opening stroke 2	mm.	20	200
	26 Injection stroke 1	mm.	10	6		75 Opening speed 3	%	10	20
	27 Injection speed 2	%	20	.		76 Mould open time	Sec.	2	1
	28 Injection stroke 2	mm.	10	.	F09F	EJECTOR			
	29 Injection speed 3	%	20	.		77 Ejector V + P program	0/1		1
	30 Injection stroke 3	mm.	10	.		78 Ejector stroke	mm.	5	2
	31 Injection speed 4	%	20	.		79 Start ejector forward	mm.	3	300
	32 Injection stroke 4	mm.	10	.		80 Ejector forward speed 1	%	5	28
	33 Injection speed 5	%	20	.		81 Ejector fwd. stroke 1	mm.	10	55
F04F	SWITCHOVER TO FOLLOW UP PRESS.					82 Ejector forward pressure	Bar	10	68
	34 Follow-up pressure stroke-dep	0/1		0		83 Ejector forward speed 2	%	5	35
	35 Follow-up press stroke	mm.	3	6		84 Ejector fwd. stroke	mm.	10	98
	36 Follow-up pressure time-dep.	0/1		1		85 Ejector back delay	Sec.	1	0.09
	37 Follow-up press time	Sec.	2	15		86 Ejector back speed1	%	5	55
F05F	FOLLOW-UP PRESSURE					87 Ejector back stroke 1	mm.	10	55
	38 Follow-up pressure 1	Bar	20	C'C		88 speed 2 Ejector back	%	5	65
	39 Follow-up press. 1 time	Sec.	2	1		89 Ejector back pressure	%	10	55
	40 Follow-up pressure 2	Bar	20	C'C	F15F	91 Cushion	mm.	5	6.5
	41 Follow-up press. 2 time	Sec.	2	2	F001F	92 Operating mode	0-1-2-3		
	42 Follow-up pressure 3	Bar	20	35		1. Semi automatic progr.1			1
	43 Follow-up press. 3 time	Sec.	2	0.5		2. Semi automatic progr.2			
	44 Follow-up pressure 4	Bar	20	.		3. Fully automatic progr.			
	45 Follow-up press. 4 time	Sec.	2	.	F29F	93. Cycle time	Sec.	5	61.52
	46 Follow-up pressure 5	Bar	20	.	Remark				
	47 Follow-up press. 4 time	Sec.	2	.					
	48 Cooling time	Sec.	5	35					

ภาคผนวก ข

ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง
(Run order1-16)

Run Order	Factors					Response Value (Y: Tensile strength (MPa))							
						RC+LDPE30%				RS 70/LDPE 30			
	A	B	C	D	E	n=1	n=2	n=3	Average	n=1	n=2	n=3	Average
1	-	-	-	-	-	11.77	11.61	11.64	11.67	14.98	15.08	15.68	15.25
2	+	-	-	-	-	12.01	11.94	12.24	11.97	14.39	15.02	15.27	14.70
3	-	+	-	-	-	12.40	12.27	12.40	12.33	14.42	14.75	14.15	14.44
4	+	+	-	-	-	12.23	12.01	11.52	11.76	14.95	14.35	14.64	14.65
5	-	-	+	-	-	12.50	12.60	12.80	12.63	13.85	15.05	13.88	14.26
6	+	-	+	-	-	12.74	12.31	12.63	12.56	13.10	13.72	14.32	13.71
7	-	+	+	-	-	12.04	12.23	12.33	12.14	13.93	14.45	14.52	14.30
8	+	+	+	-	-	12.40	12.14	12.17	12.27	14.88	13.88	14.26	14.34
9	-	-	-	+	-	12.26	12.34	12.31	12.32	14.98	15.38	14.93	15.10
10	+	-	-	+	-	12.74	12.56	12.34	12.55	13.88	13.39	14.08	13.79
11	-	+	-	+	-	12.66	12.83	12.37	12.75	14.35	13.93	14.58	14.29
12	+	+	-	+	-	12.23	12.23	12.44	12.30	15.41	14.23	14.48	14.82
13	-	-	+	+	-	12.53	12.34	12.26	12.38	14.05	14.72	14.85	14.54
14	+	-	+	+	-	11.80	11.34	12.20	11.57	14.95	14.55	14.39	14.75
15	-	+	+	+	-	12.01	11.96	12.17	12.07	15.00	14.61	14.72	14.78
16	+	+	+	+		11.94	11.74	12.40	11.84	14.72	15.44	15.24	15.08

ตารางผนวกที่ ข2 ผลของค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จากเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง
(Run order 17-32)

Run Order	Factors					Response Value (Y: Tensile strength (MPa))							
	A	B	C	D	E	RC+LDPE30%				RS 70/LDPE 30			
						n=1	n=2	n=3	Average	n=1	n=2	n=3	Average
17	-	-	-	-	+	11.61	11.64	11.71	11.65	15.32	14.69	15.02	15.00
18	+	-	-	-	+	11.96	11.44	11.80	11.70	14.88	14.58	15.48	14.98
19	-	+	-	-	+	11.86	11.64	12.14	11.89	15.21	15.08	14.92	15.07
20	+	+	-	-	+	11.37	11.31	11.58	11.34	14.18	14.18	14.72	14.36
21	-	-	+	-	+	11.94	11.80	11.74	11.77	14.05	13.56	13.85	13.80
22	+	-	+	-	+	11.58	11.44	11.15	11.30	15.81	14.61	14.52	15.21
23	-	+	+	-	+	12.24	12.47	12.17	12.29	15.02	14.52	14.78	14.77
24	+	+	+	-	+	11.67	11.80	11.91	11.85	15.35	14.75	14.32	14.80
25	-	-	-	+	+	11.90	11.64	11.77	11.77	16.03	14.32	15.11	15.15
26	+	-	-	+	+	11.74	11.80	11.80	11.78	15.05	15.24	15.02	15.14
27	-	+	-	+	+	11.80	11.47	11.91	11.69	15.48	15.54	15.05	15.36
28	+	+	-	+	+	12.04	11.97	11.91	12.01	14.52	14.89	14.92	14.78
29	-	-	+	+	+	12.44	12.34	12.39	12.36	14.52	14.64	14.88	14.68
30	+	-	+	+	+	11.84	11.77	12.17	11.93	14.35	14.12	14.26	14.19
31	-	+	+	+	+	12.10	11.55	11.58	11.82	14.42	14.58	14.58	14.53
32	+	+	+	+	+	12.53	12.07	12.44	12.35	12.96	11.50	12.10	12.19

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในกรณีของ RC /LDPE

Multilevel Factorial Design

Factors: 5 Replicates: 3
 Base runs: 32 Total runs: 96
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 2, 2, 2, 2, 2

General Linear Model: Tensile strength versus A, B, C, D, E

Factor	Type	Levels	Values
Injection speed	:A	fixed	2 45, 55
Max. Injection pressure	:B	fixed	2 75, 85
Holding pressure	:C	fixed	2 60, 75
Screw rotational speed	:D	fixed	2 88, 129
Melt temperature	:E	fixed	2 175, 185

Analysis of Variance for Tensile strength, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	3.37200	3.37200	3.37200	85.64	0.000
B	1	0.38330	0.38330	0.38330	9.73	0.003
C	1	0.31901	0.31901	0.31901	8.10	0.006
D	1	0.02190	0.02190	0.02190	0.56	0.459
E	1	0.27136	0.27136	0.27136	6.89	0.011
A*B	1	0.15958	0.15958	0.15958	4.05	0.048
A*C	1	0.26104	0.26104	0.26104	6.63	0.012
A*D	1	0.08016	0.08016	0.08016	2.04	0.159
A*E	1	0.00180	0.00180	0.00180	0.05	0.831
B*C	1	0.64354	0.64354	0.64354	16.34	0.000
B*D	1	0.04100	0.04100	0.04100	1.04	0.311
B*E	1	0.11496	0.11496	0.11496	2.92	0.092
C*D	1	0.07216	0.07216	0.07216	1.83	0.181
C*E	1	0.13605	0.13605	0.13605	3.46	0.068
D*E	1	0.00001	0.00001	0.00001	0.00	0.986
A*B*C	1	1.28714	1.28714	1.28714	32.69	0.000
A*B*D	1	0.10587	0.10587	0.10587	2.69	0.106
A*C*D	1	0.39066	0.39066	0.39066	9.92	0.002
A*B*E	1	0.50605	0.50605	0.50605	12.85	0.001
A*C*E	1	0.00179	0.00179	0.00179	0.05	0.832
A*D*E	1	0.18183	0.18183	0.18183	4.62	0.035
B*C*D	1	0.00315	0.00315	0.00315	0.08	0.778
B*C*E	1	0.00123	0.00123	0.00123	0.03	0.860
B*D*E	1	0.65274	0.65274	0.65274	16.58	0.000
C*D*E	1	1.07357	1.07357	1.07357	27.27	0.000
A*B*C*D	1	0.57196	0.57196	0.57196	14.53	0.000
A*B*C*E	1	0.09375	0.09375	0.09375	2.38	0.128
A*B*D*E	1	0.13380	0.13380	0.13380	3.40	0.070
A*C*D*E	1	0.05245	0.05245	0.05245	1.33	0.253
B*C*D*E	1	0.02781	0.02781	0.02781	0.71	0.404
A*B*C*D*E	1	0.00215	0.00215	0.00215	0.05	0.816
Error	64	2.52003	2.52003	0.03938		
Total	95	13.48385				

S = 0.198432 R-Sq = 81.31% R-Sq(adj) = 72.26%

Unusual Observations for Tensile strength

Obs	Tensile strength	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
31	12.0980	11.7410	0.1146	0.3570	2.20 R
46	11.3390	11.7807	0.1146	-0.4417	-2.73 R
68	11.5160	11.9197	0.1146	-0.4037	-2.49 R
78	12.2020	11.7807	0.1146	0.4213	2.60 R
80	12.3960	12.0240	0.1146	0.3720	2.30 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Least Squares Means for Tensile strength

A	Mean	SE Mean
45	12.23	0.02864
55	11.85	0.02864
B		
75	11.98	0.02864
85	12.10	0.02864
C		
60	11.98	0.02864
75	12.10	0.02864
D		
88	12.02	0.02864
129	12.05	0.02864
E		
175	12.09	0.02864
185	11.99	0.02864
A*B		
45 75	12.20	0.04050
45 85	12.25	0.04050
55 75	11.75	0.04050
55 85	11.96	0.04050
A*C		
45 60	12.22	0.04050
45 75	12.23	0.04050
55 60	11.74	0.04050
55 75	11.96	0.04050
A*D		
45 88	12.24	0.04050
45 129	12.21	0.04050
55 88	11.81	0.04050
55 129	11.90	0.04050
A*E		
45 175	12.28	0.04050
45 185	12.18	0.04050
55 175	11.91	0.04050
55 185	11.79	0.04050
B*C		
75 60	11.84	0.04050
75 75	12.12	0.04050
85 60	12.13	0.04050
85 75	12.08	0.04050
B*D		
75 88	11.94	0.04050
75 129	12.01	0.04050
85 88	12.11	0.04050
85 129	12.10	0.04050

Least Squares Means for Tensile strength

B*E			
75	175	12.06	0.04050
75	185	11.89	0.04050
85	175	12.12	0.04050
85	185	12.08	0.04050
C*D			
60	88	11.94	0.04050
60	129	12.02	0.04050
75	88	12.11	0.04050
75	129	12.09	0.04050
C*E			
60	175	12.00	0.04050
60	185	11.97	0.04050
75	175	12.19	0.04050
75	185	12.01	0.04050
D*E			
88	175	12.08	0.04050
88	185	11.97	0.04050
129	175	12.11	0.04050
129	185	12.00	0.04050
A*B*C			
45	75	60	12.00 0.05728
45	75	75	12.41 0.05728
45	85	60	12.44 0.05728
45	85	75	12.06 0.05728
55	75	60	11.67 0.05728
55	75	75	11.82 0.05728
55	85	60	11.81 0.05728
55	85	75	12.10 0.05728
A*B*D			
45	75	88	12.23 0.05728
45	75	129	12.18 0.05728
45	85	88	12.25 0.05728
45	85	129	12.25 0.05728
55	75	88	11.65 0.05728
55	75	129	11.85 0.05728
55	85	88	11.97 0.05728
55	85	129	11.95 0.05728
A*C*D			
45	60	88	12.14 0.05728
45	60	129	12.30 0.05728
45	75	88	12.34 0.05728
45	75	129	12.13 0.05728
55	60	88	11.73 0.05728
55	60	129	11.75 0.05728
55	75	88	11.88 0.05728
55	75	129	12.04 0.05728
A*B*E			
45	75	175	12.22 0.05728
45	75	185	12.19 0.05728
45	85	175	12.34 0.05728
45	85	185	12.16 0.05728
55	75	175	11.91 0.05728
55	75	185	11.58 0.05728
55	85	175	11.91 0.05728
55	85	185	12.01 0.05728

Least Squares Means for Tensile strength

A*C*E

45 60 175	12.24	0.05728
45 60 185	12.21	0.05728
45 75 175	12.31	0.05728
45 75 185	12.15	0.05728
55 60 175	11.76	0.05728
55 60 185	11.73	0.05728
55 75 175	12.06	0.05728
55 75 185	11.86	0.05728

A*D*E

45 88 175	12.25	0.05728
45 88 185	12.24	0.05728
45 129 175	12.31	0.05728
45 129 185	12.12	0.05728
55 88 175	11.91	0.05728
55 88 185	11.71	0.05728
55 129 175	11.91	0.05728
55 129 185	11.88	0.05728

B*C*D

75 60 88	11.78	0.05728
75 60 129	11.89	0.05728
75 75 88	12.10	0.05728
75 75 129	12.13	0.05728
85 60 88	12.10	0.05728
85 60 129	12.15	0.05728
85 75 88	12.12	0.05728
85 75 129	12.04	0.05728

B*C*E

75 60 175	11.89	0.05728
75 60 185	11.78	0.05728
75 75 175	12.24	0.05728
75 75 185	11.99	0.05728
85 60 175	12.10	0.05728
85 60 185	12.15	0.05728
85 75 175	12.14	0.05728
85 75 185	12.02	0.05728

B*D*E

75 88 175	11.95	0.05728
75 88 185	11.94	0.05728
75 129 175	12.18	0.05728
75 129 185	11.84	0.05728
85 88 175	12.21	0.05728
85 88 185	12.01	0.05728
85 129 175	12.03	0.05728
85 129 185	12.16	0.05728

C*D*E

60 88 175	11.85	0.05728
60 88 185	12.03	0.05728
60 129 175	12.15	0.05728
60 129 185	11.90	0.05728
75 88 175	12.31	0.05728
75 88 185	11.91	0.05728
75 129 175	12.07	0.05728
75 129 185	12.10	0.05728

Least Squares Means for Tensile strength

A*B*C*D

45 75 60 88	11.87	0.08101
45 75 60 129	12.14	0.08101
45 75 75 88	12.60	0.08101
45 75 75 129	12.22	0.08101
45 85 60 88	12.42	0.08101
45 85 60 129	12.46	0.08101
45 85 75 88	12.08	0.08101
45 85 75 129	12.04	0.08101
55 75 60 88	11.69	0.08101
55 75 60 129	11.65	0.08101
55 75 75 88	11.61	0.08101
55 75 75 129	12.04	0.08101
55 85 60 88	11.78	0.08101
55 85 60 129	11.85	0.08101
55 85 75 88	12.16	0.08101
55 85 75 129	12.04	0.08101

A*B*C*E

45 75 60 175	12.01	0.08101
45 75 60 185	11.99	0.08101
45 75 75 175	12.42	0.08101
45 75 75 185	12.40	0.08101
45 85 60 175	12.46	0.08101
45 85 60 185	12.42	0.08101
45 85 75 175	12.21	0.08101
45 85 75 185	11.90	0.08101
55 75 60 175	11.77	0.08101
55 75 60 185	11.58	0.08101
55 75 75 175	12.06	0.08101
55 75 75 185	11.59	0.08101
55 85 60 175	11.75	0.08101
55 85 60 185	11.88	0.08101
55 85 75 175	12.06	0.08101
55 85 75 185	12.14	0.08101

A*B*D*E

45 75 88 175	12.15	0.08101
45 75 88 185	12.31	0.08101
45 75 129 175	12.28	0.08101
45 75 129 185	12.08	0.08101
45 85 88 175	12.34	0.08101
45 85 88 185	12.16	0.08101
45 85 129 175	12.33	0.08101
45 85 129 185	12.16	0.08101
55 75 88 175	11.74	0.08101
55 75 88 185	11.56	0.08101
55 75 129 175	12.09	0.08101
55 75 129 185	11.60	0.08101
55 85 88 175	12.08	0.08101
55 85 88 185	11.85	0.08101
55 85 129 175	11.73	0.08101
55 85 129 185	12.16	0.08101

A*C*D*E

45 60 88 175	11.99	0.08101
45 60 88 185	12.30	0.08101
45 60 129 175	12.49	0.08101
45 60 129 185	12.11	0.08101
45 75 88 175	12.51	0.08101
45 75 88 185	12.17	0.08101
45 75 129 175	12.12	0.08101
45 75 129 185	12.13	0.08101
55 60 88 175	11.71	0.08101
55 60 88 185	11.76	0.08101

Least Squares Means for Tensile strength

A*C*D*E

55 60 129 175	11.80	0.08101
55 60 129 185	11.70	0.08101
55 75 88 175	12.11	0.08101
55 75 88 185	11.66	0.08101
55 75 129 175	12.02	0.08101
55 75 129 185	12.07	0.08101

B*C*D*E

75 60 88 175	11.66	0.08101
75 60 88 185	11.90	0.08101
75 60 129 175	12.12	0.08101
75 60 129 185	11.67	0.08101
75 75 88 175	12.23	0.08101
75 75 88 185	11.97	0.08101
75 75 129 175	12.25	0.08101
75 75 129 185	12.01	0.08101
85 60 88 175	12.04	0.08101
85 60 88 185	12.16	0.08101
85 60 129 175	12.17	0.08101
85 60 129 185	12.14	0.08101
85 75 88 175	12.38	0.08101
85 75 88 185	11.85	0.08101
85 75 129 175	11.89	0.08101
85 75 129 185	12.19	0.08101

A*B*C*D*E

45 75 60 88 175	11.67	0.11456
45 75 60 88 185	12.06	0.11456
45 75 60 129 175	12.36	0.11456
45 75 60 129 185	11.92	0.11456
45 75 75 88 175	12.63	0.11456
45 75 75 88 185	12.56	0.11456
45 75 75 129 175	12.20	0.11456
45 75 75 129 185	12.24	0.11456
45 85 60 88 175	12.30	0.11456
45 85 60 88 185	12.54	0.11456
45 85 60 129 175	12.62	0.11456
45 85 60 129 185	12.30	0.11456
45 85 75 88 175	12.38	0.11456
45 85 75 88 185	11.78	0.11456
45 85 75 129 175	12.05	0.11456
45 85 75 129 185	12.02	0.11456
55 75 60 88 175	11.65	0.11456
55 75 60 88 185	11.74	0.11456
55 75 60 129 175	11.88	0.11456
55 75 60 129 185	11.42	0.11456
55 75 75 88 175	11.83	0.11456
55 75 75 88 185	11.39	0.11456
55 75 75 129 175	12.29	0.11456
55 75 75 129 185	11.79	0.11456
55 85 60 88 175	11.77	0.11456
55 85 60 88 185	11.78	0.11456
55 85 60 129 175	11.73	0.11456
55 85 60 129 185	11.97	0.11456
55 85 75 88 175	12.39	0.11456
55 85 75 88 185	11.92	0.11456
55 85 75 129 175	11.74	0.11456
55 85 75 129 185	12.35	0.11456

Term	Coef	SE	Coef	T	P
Constant	12.0397	0.0203	594.48	0.000	
A					
45	0.18742	0.02025	9.25	0.000	
B					
75	-0.06319	0.02025	-3.12	0.003	
C					
60	-0.05765	0.02025	-2.85	0.006	
D					
88	-0.01510	0.02025	-0.75	0.459	
E					
175	0.05317	0.02025	2.63	0.011	
A*B					
45 75	0.04077	0.02025	2.01	0.048	
A*C					
45 60	0.05215	0.02025	2.57	0.012	
A*D					
45 88	0.02890	0.02025	1.43	0.159	
A*E					
45 175	-0.00433	0.02025	-0.21	0.831	
B*C					
75 60	-0.08187	0.02025	-4.04	0.000	
B*D					
75 88	-0.02067	0.02025	-1.02	0.311	
B*E					
75 175	0.03460	0.02025	1.71	0.092	
C*D					
60 88	-0.02742	0.02025	-1.35	0.181	
C*E					
60 175	-0.03765	0.02025	-1.86	0.068	
D*E					
88 175	-0.00035	0.02025	-0.02	0.986	
A*B*C					
45 75 60	-0.11579	0.02025	-5.72	0.000	
A*B*D					
45 75 88	0.03321	0.02025	1.64	0.106	
A*C*D					
45 60 88	-0.06379	0.02025	-3.15	0.002	
A*B*E					
45 75 175	-0.07260	0.02025	-3.58	0.001	
A*C*E					
45 60 175	0.00431	0.02025	0.21	0.832	
A*D*E					
45 88 175	-0.04352	0.02025	-2.15	0.035	
B*C*D					
75 60 88	0.00573	0.02025	0.28	0.778	
B*C*E					
75 60 175	0.00358	0.02025	0.18	0.860	
B*D*E					
75 88 175	-0.08246	0.02025	-4.07	0.000	
C*D*E					
60 88 175	-0.10575	0.02025	-5.22	0.000	
A*B*C*D					
45 75 60 88	-0.07719	0.02025	-3.81	0.000	
A*B*C*E					
45 75 60 175	0.03125	0.02025	1.54	0.128	
A*B*D*E					
45 75 88 175	0.03733	0.02025	1.84	0.070	
A*C*D*E					
45 60 88 175	-0.02338	0.02025	-1.15	0.253	
B*C*D*E					
75 60 88 175	0.01702	0.02025	0.84	0.404	
A*B*C*D*E					
45 75 60 88 175	-0.00473	0.02025	-0.23	0.816	

ภาคผนวก ฅ

ผลการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปในกรณีของ RS /LDPE

Multilevel Factorial Design

Factors: 5 Replicates: 3
 Base runs: 32 Total runs: 96
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 2, 2, 2, 2, 2

General Linear Model: Tensile strength versus A, B, C, D, E

Injection speed	:A	fixed	2	70, 80
Max. injection pressure	:B	fixed	2	40, 50
Holding pressure	:C	fixed	2	60, 75
Screw rotational speed	:D	fixed	2	84, 123
Melt temperature	:E	fixed	2	175, 185

Analysis of Variance for Tensile strength, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	0.0982	0.0982	0.0982	0.56	0.459
B	1	0.0398	0.0398	0.0398	0.23	0.637
C	1	4.8470	4.8470	4.8470	27.43	0.000
D	1	0.2549	0.2549	0.2549	1.44	0.234
E	1	1.5446	1.5446	1.5446	8.74	0.004
A*B	1	0.7792	0.7792	0.7792	4.41	0.040
A*C	1	1.7955	1.7955	1.7955	10.16	0.002
A*D	1	0.6210	0.6210	0.6210	3.51	0.065
A*E	1	0.3205	0.3205	0.3205	1.81	0.183
B*C	1	0.0012	0.0012	0.0012	0.01	0.935
B*D	1	0.1606	0.1606	0.1606	0.91	0.344
B*E	1	1.2515	1.2515	1.2515	7.08	0.010
C*D	1	0.2401	0.2401	0.2401	1.36	0.248
C*E	1	0.0532	0.0532	0.0532	0.30	0.585
D*E	1	0.1110	0.1110	0.1110	0.63	0.431
A*B*C	1	5.3115	5.3115	5.3115	30.06	0.000
A*B*D	1	1.3379	1.3379	1.3379	7.57	0.008
A*C*D	1	0.9058	0.9058	0.9058	5.13	0.027
A*B*E	1	1.5675	1.5675	1.5675	8.87	0.004
A*C*E	1	0.1361	0.1361	0.1361	0.77	0.383
A*D*E	1	5.1167	5.1167	5.1167	28.95	0.000
B*C*D	1	1.9060	1.9060	1.9060	10.79	0.002
B*C*E	1	0.5318	0.5318	0.5318	3.01	0.088
B*D*E	1	0.0049	0.0049	0.0049	0.03	0.869
C*D*E	1	1.0023	1.0023	1.0023	5.67	0.020
A*B*C*D	1	0.5076	0.5076	0.5076	2.87	0.095
A*B*C*E	1	3.1404	3.1404	3.1404	17.77	0.000
A*B*D*E	1	0.1979	0.1979	0.1979	1.12	0.294
A*C*D*E	1	0.0137	0.0137	0.0137	0.08	0.782
B*C*D*E	1	0.5510	0.5510	0.5510	3.12	0.082
A*B*C*D*E	1	0.0307	0.0307	0.0307	0.17	0.678
Error	64	11.3095	11.3095	0.1767		
Total	95	45.6895				

S = 0.420369 R-Sq = 75.25% R-Sq(adj) = 63.26%

Unusual Observations for Tensile strength

Obs	Tensile strength	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
12	15.4130	14.7060	0.2427	0.7070	2.06 R
22	15.8100	14.9823	0.2427	0.8277	2.41 R
25	16.0320	15.1527	0.2427	0.8793	2.56 R
32	12.9610	12.1873	0.2427	0.7737	2.25 R
37	15.0480	14.2620	0.2427	0.7860	2.29 R
57	14.3150	15.1527	0.2427	-0.8377	-2.44 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Least Squares Means for Tensile strength

A	Mean	SE Mean
70	14.55	0.06068
80	14.61	0.06068
B		
40	14.60	0.06068
50	14.56	0.06068
C		
60	14.81	0.06068
75	14.36	0.06068
D		
84	14.63	0.06068
123	14.53	0.06068
E		
175	14.71	0.06068
185	14.45	0.06068
A*B		
70 40	14.48	0.08581
70 50	14.62	0.08581
80 40	14.72	0.08581
80 50	14.50	0.08581
A*C		
70 60	14.64	0.08581
70 75	14.46	0.08581
80 60	14.98	0.08581
80 75	14.25	0.08581
A*D		
70 84	14.52	0.08581
70 123	14.58	0.08581
80 84	14.75	0.08581
80 123	14.48	0.08581
A*E		
70 175	14.62	0.08581
70 185	14.48	0.08581
80 175	14.80	0.08581
80 185	14.43	0.08581
B*C		
40 60	14.83	0.08581
40 75	14.37	0.08581
50 60	14.78	0.08581
50 75	14.34	0.08581
B*D		
40 84	14.61	0.08581
40 123	14.59	0.08581
50 84	14.65	0.08581
50 123	14.47	0.08581

Least Squares Means for Tensile strength

B*E		
40 175	14.61	0.08581
40 185	14.59	0.08581
50 175	14.80	0.08581
50 185	14.32	0.08581
C*D		
60 84	14.91	0.08581
60 123	14.70	0.08581
75 84	14.36	0.08581
75 123	14.36	0.08581
C*E		
60 175	14.96	0.08581
60 185	14.66	0.08581
75 175	14.46	0.08581
75 185	14.25	0.08581
D*E		
84 175	14.73	0.08581
84 185	14.54	0.08581
123 175	14.69	0.08581
123 185	14.37	0.08581
A*B*C		
70 40 60	14.81	0.12135
70 40 75	14.15	0.12135
70 50 60	14.47	0.12135
70 50 75	14.77	0.12135
80 40 60	14.85	0.12135
80 40 75	14.59	0.12135
80 50 60	15.10	0.12135
80 50 75	13.91	0.12135
A*B*D		
70 40 84	14.53	0.12135
70 40 123	14.43	0.12135
70 50 84	14.51	0.12135
70 50 123	14.73	0.12135
80 40 84	14.70	0.12135
80 40 123	14.75	0.12135
80 50 84	14.79	0.12135
80 50 123	14.21	0.12135
A*C*D		
70 60 84	14.76	0.12135
70 60 123	14.52	0.12135
70 75 84	14.29	0.12135
70 75 123	14.64	0.12135
80 60 84	15.06	0.12135
80 60 123	14.89	0.12135
80 75 84	14.43	0.12135
80 75 123	14.07	0.12135
A*B*E		
70 40 175	14.56	0.12135
70 40 185	14.40	0.12135
70 50 175	14.67	0.12135
70 50 185	14.56	0.12135
80 40 175	14.67	0.12135
80 40 185	14.78	0.12135
80 50 175	14.93	0.12135
80 50 185	14.08	0.12135
A*C*E		
70 60 175	14.77	0.12135
70 60 185	14.51	0.12135
70 75 175	14.47	0.12135
70 75 185	14.45	0.12135
80 60 175	15.15	0.12135

Least Squares Means for Tensile strength

A*C*E			
80	60	185	14.80 0.12135
80	75	175	14.45 0.12135
80	75	185	14.05 0.12135
A*D*E			
70	84	175	14.79 0.12135
70	84	185	14.25 0.12135
70	123	175	14.45 0.12135
70	123	185	14.71 0.12135
80	84	175	14.67 0.12135
80	84	185	14.83 0.12135
80	123	175	14.93 0.12135
80	123	185	14.03 0.12135
B*C*D			
40	60	84	15.03 0.12135
40	60	123	14.63 0.12135
40	75	84	14.19 0.12135
40	75	123	14.55 0.12135
50	60	84	14.78 0.12135
50	60	123	14.78 0.12135
50	75	84	14.52 0.12135
50	75	123	14.16 0.12135
B*C*E			
40	60	175	14.94 0.12135
40	60	185	14.72 0.12135
40	75	175	14.29 0.12135
40	75	185	14.46 0.12135
50	60	175	14.97 0.12135
50	60	185	14.59 0.12135
50	75	175	14.63 0.12135
50	75	185	14.05 0.12135
B*D*E			
40	84	175	14.58 0.12135
40	84	185	14.64 0.12135
40	123	175	14.65 0.12135
40	123	185	14.54 0.12135
50	84	175	14.87 0.12135
50	84	185	14.44 0.12135
50	123	175	14.74 0.12135
50	123	185	14.20 0.12135
C*D*E			
60	84	175	15.13 0.12135
60	84	185	14.69 0.12135
60	123	175	14.79 0.12135
60	123	185	14.62 0.12135
75	84	175	14.33 0.12135
75	84	185	14.39 0.12135
75	123	175	14.60 0.12135
75	123	185	14.12 0.12135
A*B*C*D			
70	40	60	84 15.07 0.17162
70	40	60	123 14.54 0.17162
70	40	75	84 13.99 0.17162
70	40	75	123 14.32 0.17162
70	50	60	84 14.44 0.17162
70	50	60	123 14.50 0.17162
70	50	75	84 14.59 0.17162
70	50	75	123 14.96 0.17162
80	40	60	84 14.99 0.17162
80	40	60	123 14.71 0.17162
80	40	75	84 14.40 0.17162
80	40	75	123 14.79 0.17162

Least Squares Means for Tensile strength

A*B*C*D

80 50 60 84	15.13	0.17162
80 50 60 123	15.07	0.17162
80 50 75 84	14.46	0.17162
80 50 75 123	13.36	0.17162

A*B*C*E

70 40 60 175	14.84	0.17162
70 40 60 185	14.77	0.17162
70 40 75 175	14.28	0.17162
70 40 75 185	14.03	0.17162
70 50 60 175	14.69	0.17162
70 50 60 185	14.25	0.17162
70 50 75 175	14.66	0.17162
70 50 75 185	14.88	0.17162
80 40 60 175	15.04	0.17162
80 40 60 185	14.67	0.17162
80 40 75 175	14.30	0.17162
80 40 75 185	14.89	0.17162
80 50 60 175	15.25	0.17162
80 50 60 185	14.94	0.17162
80 50 75 175	14.61	0.17162
80 50 75 185	13.21	0.17162

A*B*D*E

70 40 84 175	14.76	0.17162
70 40 84 185	14.30	0.17162
70 40 123 175	14.37	0.17162
70 40 123 185	14.49	0.17162
70 50 84 175	14.82	0.17162
70 50 84 185	14.21	0.17162
70 50 123 175	14.53	0.17162
70 50 123 185	14.92	0.17162
80 40 84 175	14.41	0.17162
80 40 84 185	14.98	0.17162
80 40 123 175	14.92	0.17162
80 40 123 185	14.58	0.17162
80 50 84 175	14.92	0.17162
80 50 84 185	14.67	0.17162
80 50 123 175	14.94	0.17162
80 50 123 185	13.48	0.17162

A*C*D*E

70 60 84 175	15.17	0.17162
70 60 84 185	14.34	0.17162
70 60 123 175	14.36	0.17162
70 60 123 185	14.68	0.17162
70 75 84 175	14.40	0.17162
70 75 84 185	14.17	0.17162
70 75 123 175	14.54	0.17162
70 75 123 185	14.74	0.17162
80 60 84 175	15.08	0.17162
80 60 84 185	15.04	0.17162
80 60 123 175	15.21	0.17162
80 60 123 185	14.57	0.17162
80 75 84 175	14.25	0.17162
80 75 84 185	14.61	0.17162
80 75 123 175	14.65	0.17162
80 75 123 185	13.50	0.17162

B*C*D*E

40 60 84 175	15.13	0.17162
40 60 84 185	14.94	0.17162
40 60 123 175	14.75	0.17162
40 60 123 185	14.50	0.17162
40 75 84 175	14.04	0.17162

Least Squares Means for Tensile strength

B*C*D*E

40 75 84 185	14.35	0.17162
40 75 123 175	14.54	0.17162
40 75 123 185	14.57	0.17162
50 60 84 175	15.13	0.17162
50 60 84 185	14.44	0.17162
50 60 123 175	14.82	0.17162
50 60 123 185	14.74	0.17162
50 75 84 175	14.61	0.17162
50 75 84 185	14.44	0.17162
50 75 123 175	14.65	0.17162
50 75 123 185	13.66	0.17162

A*B*C*D*E

70 40 60 84 175	15.25	0.24270
70 40 60 84 185	14.89	0.24270
70 40 60 123 175	14.44	0.24270
70 40 60 123 185	14.65	0.24270
70 40 75 84 175	14.26	0.24270
70 40 75 84 185	13.71	0.24270
70 40 75 123 175	14.30	0.24270
70 40 75 123 185	14.34	0.24270
70 50 60 84 175	15.10	0.24270
70 50 60 84 185	13.79	0.24270
70 50 60 123 175	14.29	0.24270
70 50 60 123 185	14.71	0.24270
70 50 75 84 175	14.54	0.24270
70 50 75 84 185	14.63	0.24270
70 50 75 123 175	14.78	0.24270
70 50 75 123 185	15.13	0.24270
80 40 60 84 175	15.01	0.24270
80 40 60 84 185	14.98	0.24270
80 40 60 123 175	15.07	0.24270
80 40 60 123 185	14.36	0.24270
80 40 75 84 175	13.82	0.24270
80 40 75 84 185	14.98	0.24270
80 40 75 123 175	14.77	0.24270
80 40 75 123 185	14.80	0.24270
80 50 60 84 175	15.15	0.24270
80 50 60 84 185	15.10	0.24270
80 50 60 123 175	15.35	0.24270
80 50 60 123 185	14.78	0.24270
80 50 75 84 175	14.68	0.24270
80 50 75 84 185	14.24	0.24270
80 50 75 123 175	14.53	0.24270
80 50 75 123 185	12.19	0.24270

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	14.5818	0.0429	339.87	0.000
A				
70	-0.03199	0.04290	-0.75	0.459
B				
40	0.02036	0.04290	0.47	0.637
C				
60	0.22470	0.04290	5.24	0.000
D				
84	0.05153	0.04290	1.20	0.234
E				
175	0.12684	0.04290	2.96	0.004
A*B				
70 40	-0.09009	0.04290	-2.10	0.040

Term	Coef	SE Coef	T	P
A*C				
70 60	-0.13676	0.04290	-3.19	0.002
A*D				
70 84	-0.08043	0.04290	-1.87	0.065
A*E				
70 175	-0.05778	0.04290	-1.35	0.183
B*C				
40 60	0.00351	0.04290	0.08	0.935
B*D				
40 84	-0.04091	0.04290	-0.95	0.344
B*E				
40 175	-0.11418	0.04290	-2.66	0.010
C*D				
60 84	0.05001	0.04290	1.17	0.248
C*E				
60 175	0.02353	0.04290	0.55	0.585
D*E				
84 175	-0.03401	0.04290	-0.79	0.431
A*B*C				
70 40 60	0.23522	0.04290	5.48	0.000
A*B*D				
70 40 84	0.11805	0.04290	2.75	0.008
A*C*D				
70 60 84	0.09714	0.04290	2.26	0.027
A*B*E				
70 40 175	0.12778	0.04290	2.98	0.004
A*C*E				
70 60 175	0.03766	0.04290	0.88	0.383
A*D*E				
70 84 175	0.23086	0.04290	5.38	0.000
B*C*D				
40 60 84	0.14091	0.04290	3.28	0.002
B*C*E				
40 60 175	0.07443	0.04290	1.73	0.088
B*D*E				
40 84 175	-0.00711	0.04290	-0.17	0.869
C*D*E				
60 84 175	0.10218	0.04290	2.38	0.020
A*B*C*D				
70 40 60 84	-0.07272	0.04290	-1.69	0.095
A*B*C*E				
70 40 60 175	-0.18086	0.04290	-4.22	0.000
A*B*D*E				
70 40 84 175	-0.04541	0.04290	-1.06	0.294
A*C*D*E				
70 60 84 175	-0.01195	0.04290	-0.28	0.782
B*C*D*E				
40 60 84 175	-0.07576	0.04290	-1.77	0.082
A*B*C*D*E				
70 40 60 84 175	-0.01789	0.04290	-0.42	0.678

ภาคผนวก ญ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง

ตารางผนวกที่ ๑๑ ข้อมูลการออกแบบการทดลองความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

% content	polymer type			
	LDPE		LDPE(RE)	
	bio material type		bio material type	
	rice starch	rice chaff	rice starch	rice chaff
70	14.465	11.895	15.536	11.970
	15.372	11.295	14.865	11.865
75	16.540	12.795	15.472	12.900
	16.960	13.200	16.000	12.360
80	18.540	13.800	17.940	13.440
	18.700	13.035	18.260	12.933
85	20.700	15.168	20.175	15.367
	19.460	13.967	19.740	14.933

Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 2
 Base runs: 16 Total runs: 32
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 4, 2, 2

Factor	Type	Levels	Values
% content	fixed	4	70, 75, 80, 85
polymer type	fixed	2	LDPE, LDPE (RE)
bio material type	fixed	2	rice starch, rice chaff

Analysis of Variance for Tensile strength, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
% content	3	72.254	72.254	24.085	111.98	0.000
polymer type	1	0.143	0.143	0.143	0.66	0.427
bio material type	1	143.660	143.660	143.660	667.93	0.000
% content*polymer type	3	1.382	1.382	0.461	2.14	0.135
% content*bio material type	3	6.101	6.101	2.034	9.45	0.001
polymer type*bio material type	1	0.353	0.353	0.353	1.64	0.218
% content*polymer type* bio material type	3	0.147	0.147	0.049	0.23	0.876
Error	16	3.441	3.441	0.215		
Total	31	227.480				

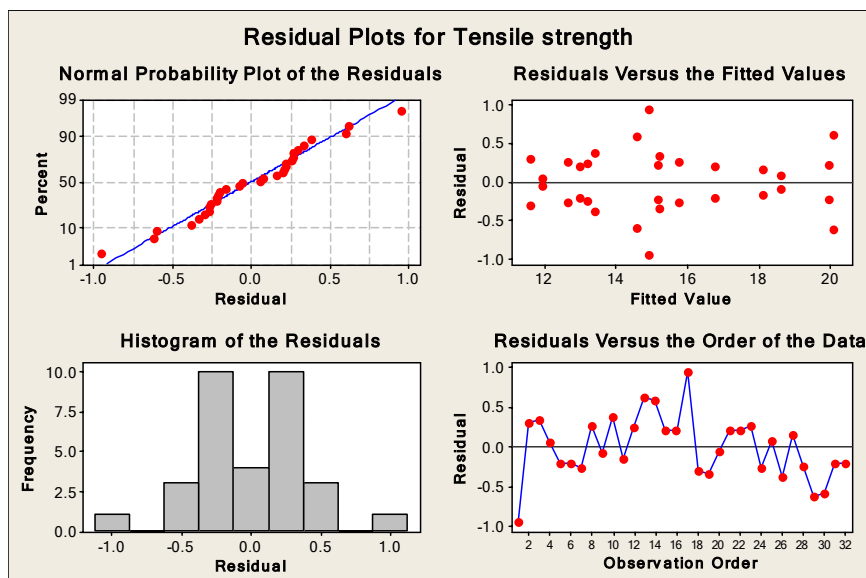
S = 0.463768 R-Sq = 98.49% R-Sq(adj) = 97.07%

Least Squares Means for Tensile strength

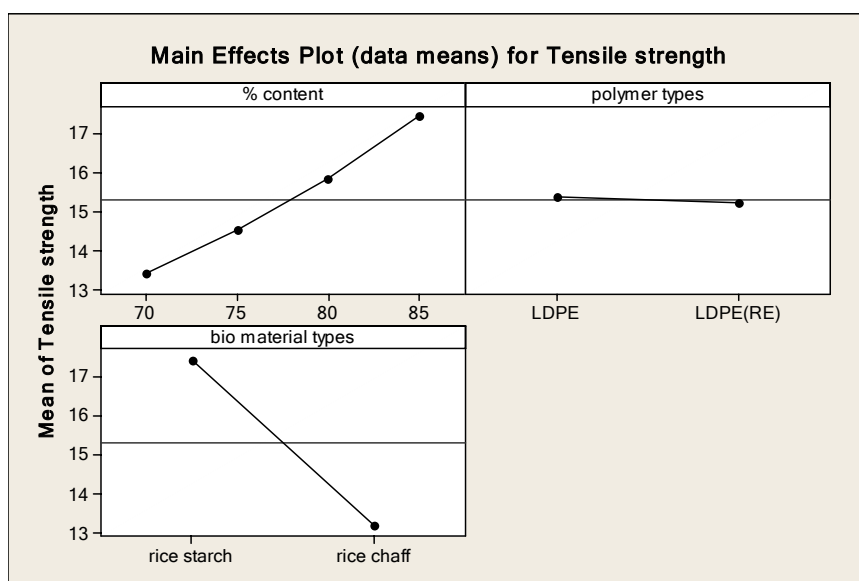
% content			Mean	SE Mean
70			13.41	0.1640
75			14.53	0.1640
80			15.83	0.1640
85			17.44	0.1640
polymer type				
LDPE			15.37	0.1159
LDPE (RE)			15.23	0.1159
bio material				
rice starch			17.42	0.1159
rice chaff			13.18	0.1159
% content*polymer type				
70	LDPE		13.26	0.2319
70	LDPE (RE)		13.56	0.2319
75	LDPE		14.87	0.2319
75	LDPE (RE)		14.18	0.2319
80	LDPE		16.02	0.2319
80	LDPE (RE)		15.64	0.2319
85	LDPE		17.32	0.2319
85	LDPE (RE)		17.55	0.2319
% content*bio material				
70	rice starch		15.06	0.2319
70	rice chaff		11.76	0.2319
75	rice starch		16.24	0.2319
75	rice chaff		12.81	0.2319
80	rice starch		18.36	0.2319
80	rice chaff		13.30	0.2319
85	rice starch		20.02	0.2319
85	rice chaff		14.86	0.2319
polymer type*bio material				
LDPE	rice starch		17.59	0.1640
LDPE	rice chaff		13.14	0.1640
LDPE (RE)	rice starch		17.25	0.1640
LDPE (RE)	rice chaff		13.22	0.1640
% content*polymer type*bio material				
70	LDPE	rice starch	14.92	0.3279
70	LDPE	rice chaff	11.60	0.3279
70	LDPE (RE)	rice starch	15.20	0.3279
70	LDPE (RE)	rice chaff	11.92	0.3279
75	LDPE	rice starch	16.75	0.3279
75	LDPE	rice chaff	13.00	0.3279
75	LDPE (RE)	rice starch	15.74	0.3279
75	LDPE (RE)	rice chaff	12.63	0.3279

Least Squares Means for Tensile strength**% content*polymer type*bio material**

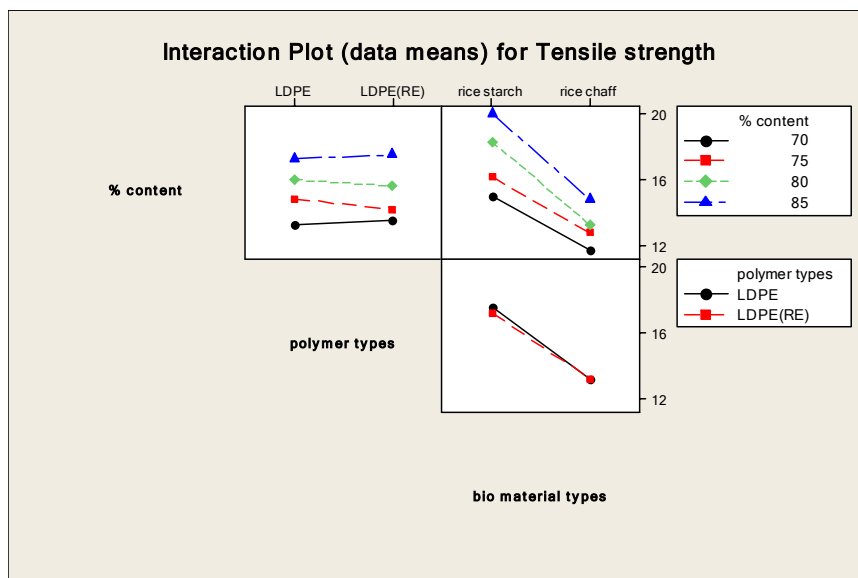
80	LDPE	rice starch	18.62	0.3279
80	LDPE	rice chaff	13.42	0.3279
80	LDPE (RE)	rice starch	18.10	0.3279
80	LDPE (RE)	rice chaff	13.19	0.3279
85	LDPE	rice starch	20.08	0.3279
85	LDPE	rice chaff	14.57	0.3279
85	LDPE (RE)	rice starch	19.96	0.3279
85	LDPE (RE)	rice chaff	15.15	0.3279



ภาพผนวกที่ ๑-๑ กราฟ Residual Plots for Tensile strength



ภาพผนวกที่ ๑-๒ กราฟ Main Effects Plot for Tensile strength



ภาพผนวกที่ ๓ กราฟ Interaction Plot for Tensile strength

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง พบว่า ปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบร่วมกันคือ เปอร์เซ็นต์การผสมโดยน้ำหนัก กับ ชนิดของวัตถุดิบชีวภาพมีผลอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่พิจารณาผลกระทบจากปัจจัยหลัก ดังนั้นในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม จะทำการกำหนดโดยใช้กราฟ Interaction plot พบว่าเมื่อปริมาณวัตถุดิบชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น และ เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด จะกำหนด ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การผสม (% content) ที่ระดับของ 85 %wt

ชนิดของวัตถุดิบชีวภาพ(bio material type) ที่ระดับของ แป้งข้าว

ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง จากผลของ Least Squares Means for Tensile strength คือ 20.02 MPa

ภาคผนวก ๓

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การยึดดึง ณ จุดขาด

ตารางผนวกที่ ๑1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์
ชีวภาพผสม

% content	polymer type			
	LDPE		LDPE(RE)	
	bio material type		bio material type	
	rice starch	rice chaff	rice starch	rice chaff
70	4.584	2.536	3.768	2.275
	4.312	2.216	4.296	2.457
75	4.400	2.318	3.625	2.356
	4.040	1.906	4.152	2.132
80	3.700	1.956	3.365	1.918
	4.256	2.176	3.490	1.816
85	3.728	1.876	3.720	1.512
	3.776	1.740	3.468	1.566

Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 2
Base runs: 16 Total runs: 32
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 4, 2, 2

Factor	Type	Levels	Values
% content	fixed	4	70, 75, 80, 85
polymer type	fixed	2	LDPE, LDPE (RE)
bio material type	fixed	2	rice starch, rice chaff

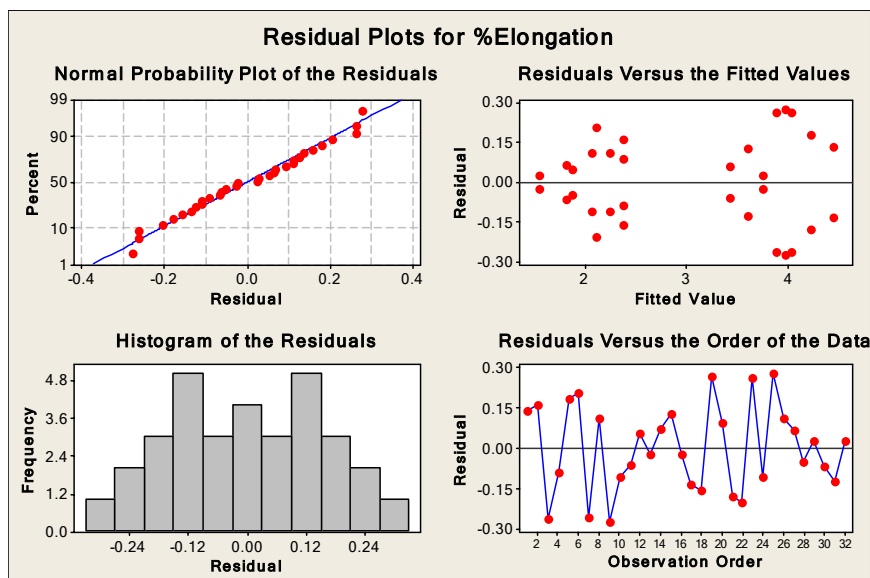
Analysis of Variance for %Elongation, using Adjusted SS for Tests

P Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
% content	3	1.9175	1.9175	0.6392	12.89
polymer type	1	0.4059	0.4059	0.4059	8.19
bio material type	1	27.9827	27.9827	27.9827	564.48
% content*polymer type	3	0.0768	0.0768	0.0256	0.52
% content*bio material type	3	0.0694	0.0694	0.0231	0.47
polymer type*bio material type	1	0.1540	0.1540	0.1540	3.11
% content*polymer type* bio material type	3	0.1038	0.1038	0.0346	0.70
Error	16	0.7932	0.7932	0.0496	
Total	31	31.5032			

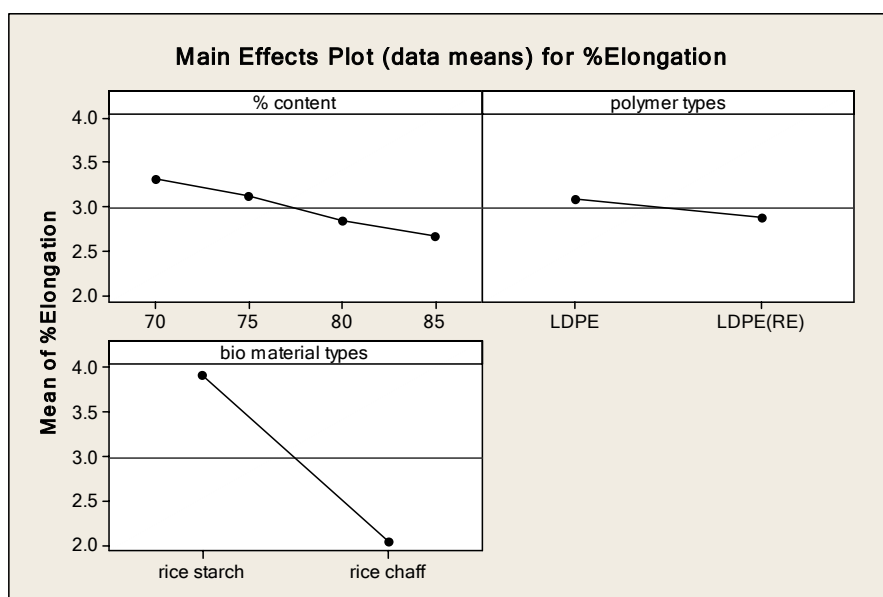
S = 0.222649 R-Sq = 97.48% R-Sq(adj) = 95.12%

Least Squares Means for %Elongation

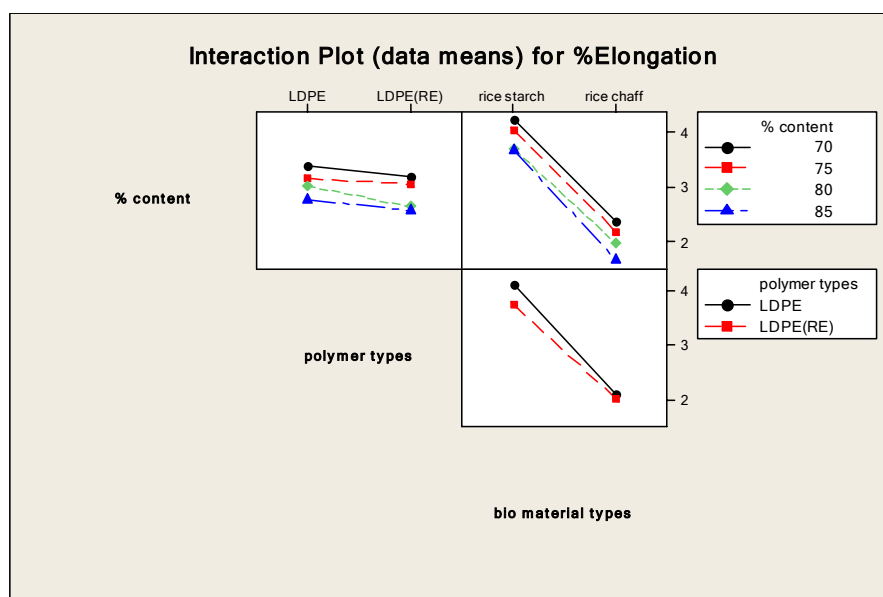
% content			Mean	SE Mean
70			3.306	0.07872
75			3.116	0.07872
80			2.835	0.07872
85			2.673	0.07872
polymer type				
LDPE			3.095	0.05566
LDPE (RE)			2.870	0.05566
bio material				
rice starch			3.918	0.05566
rice chaff			2.047	0.05566
% content*polymer type				
70	LDPE		3.412	0.11132
70	LDPE (RE)		3.199	0.11132
75	LDPE		3.166	0.11132
75	LDPE (RE)		3.066	0.11132
80	LDPE		3.022	0.11132
80	LDPE (RE)		2.647	0.11132
85	LDPE		2.780	0.11132
85	LDPE (RE)		2.567	0.11132
% content*bio material				
70	rice starch		4.240	0.11132
70	rice chaff		2.371	0.11132
75	rice starch		4.054	0.11132
75	rice chaff		2.178	0.11132
80	rice starch		3.703	0.11132
80	rice chaff		1.967	0.11132
85	rice starch		3.673	0.11132
85	rice chaff		1.673	0.11132
polymer type*bio material				
LDPE	rice starch		4.100	0.07872
LDPE	rice chaff		2.091	0.07872
LDPE (RE)	rice starch		3.736	0.07872
LDPE (RE)	rice chaff		2.004	0.07872
% content*polymer type*bio material				
70	LDPE	rice starch	4.448	0.15744
70	LDPE	rice chaff	2.376	0.15744
70	LDPE (RE)	rice starch	4.032	0.15744
70	LDPE (RE)	rice chaff	2.366	0.15744
75	LDPE	rice starch	4.220	0.15744
75	LDPE	rice chaff	2.112	0.15744
75	LDPE (RE)	rice starch	3.889	0.15744
75	LDPE (RE)	rice chaff	2.244	0.15744
80	LDPE	rice starch	3.978	0.15744
80	LDPE	rice chaff	2.066	0.15744
80	LDPE (RE)	rice starch	3.428	0.15744
80	LDPE (RE)	rice chaff	1.867	0.15744
85	LDPE	rice starch	3.752	0.15744
85	LDPE	rice chaff	1.808	0.15744
85	LDPE (RE)	rice starch	3.594	0.15744
85	LDPE (RE)	rice chaff	1.539	0.15744



ภาพผนวกที่ ๑๑-
 ๑๑- กราฟ Residual Plots for % Elongation at break



ภาพผนวกที่ ๑๑-
 ๑๑- กราฟ Main Effects Plot for % Elongation at break



ภาพผนวกที่ 3 กราฟ Interaction Plot for % Elongation at break

จากผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด พบว่า ปัจจัยหลักทั้งสามตัว คือ เปอร์เซ็นต์การผสมโดยน้ำหนัก กับ ชนิดของพอลิเมอร์ และ ชนิดของวัสดุชีวภาพ มีนัยสำคัญที่ระดับ 1% ต่อเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด โดยที่ปัจจัยร่วมระหว่างชนิดของพอลิเมอร์กับชนิดของวัสดุชีวภาพจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 10% ดังนั้นในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด ต่ำสุด จะทำการกำหนดค่าปัจจัยร่วมโดยพิจารณาจาก กราฟ Interaction plot และกำหนดเปอร์เซ็นต์การผสม โดยใช้กราฟ Main effect plot ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การผสม (% content)	ที่ระดับของ 85%wt
ชนิดของพอลิเมอร์ (polymer type)	ที่ระดับของ LDPE(RE)
ชนิดของวัสดุชีวภาพ (bio material type)	ที่ระดับของ แกลบข้าว

ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด จากผลของ Least Squares Means for Tensile strength คือ 1.539 %

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดัดโค้ง

ตารางผนวกที่ ๑1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองความแข็งแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ชีวภาพผสม

% content	polymer type			
	LDPE		LDPE(RE)	
	bio material type		bio material type	
	rice starch	rice chaff	rice starch	rice chaff
70	19.968	20.304	21.816	20.760
	21.150	20.832	21.696	22.008
75	24.150	23.592	24.210	24.270
	23.610	22.584	24.090	23.400
80	26.370	25.440	25.940	25.860
	26.058	24.930	27.010	25.320
85	31.170	26.970	29.550	27.450
	30.390	26.430	29.910	25.890

Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 2
 Base runs: 16 Total runs: 32
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 4, 2, 2

Factor	Type	Levels	Values
% content	fixed	4	70, 75, 80, 85
polymer type	fixed	2	LDPE, LDPE(RE)
bio material type	fixed	2	rice starch, rice chaff

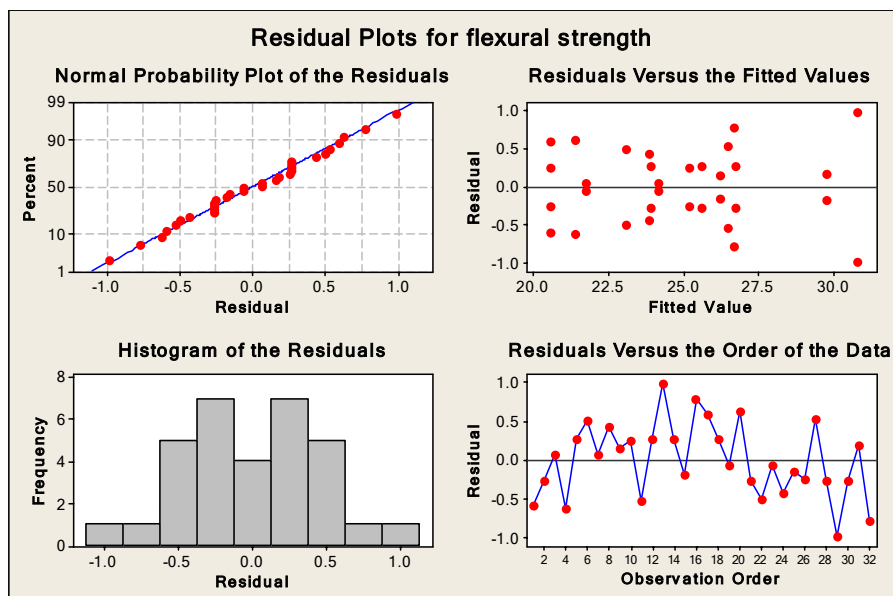
Analysis of Variance for flexural strength, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
% content	3	237.351	237.351	79.117	239.21	0.000
polymer type	1	0.855	0.855	0.855	2.59	0.127
bio material type	1	13.844	13.844	13.844	41.86	0.000
% content*polymer type	3	2.493	2.493	0.831	2.51	0.095
% content*bio material type	3	14.156	14.156	4.719	14.27	0.000
polymer type*bio material type	1	0.198	0.198	0.198	0.60	0.450
% content*polymer type* bio material type	3	0.518	0.518	0.173	0.52	0.673
Error	16	5.292	5.292	0.331		
Total	31	274.708				

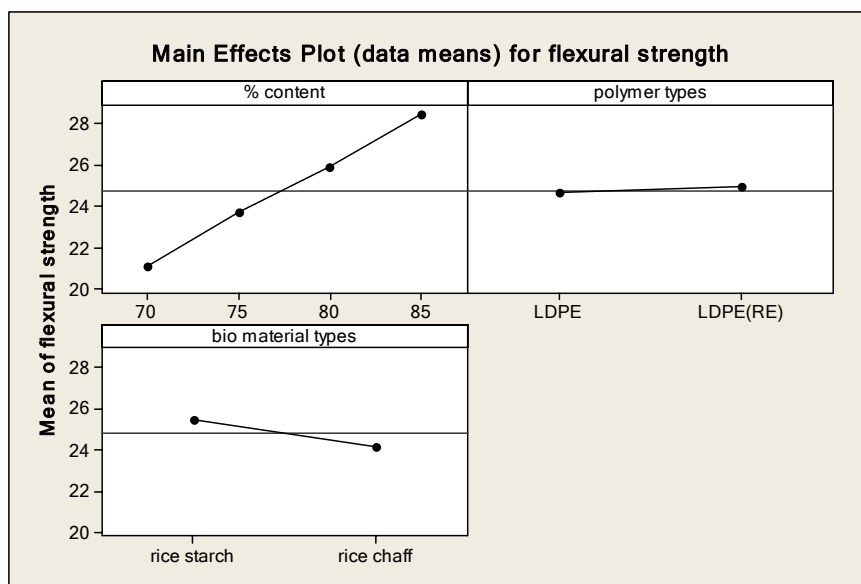
S = 0.575107 R-Sq = 98.07% R-Sq(adj) = 96.27%

Least Squares Means for flexural strength

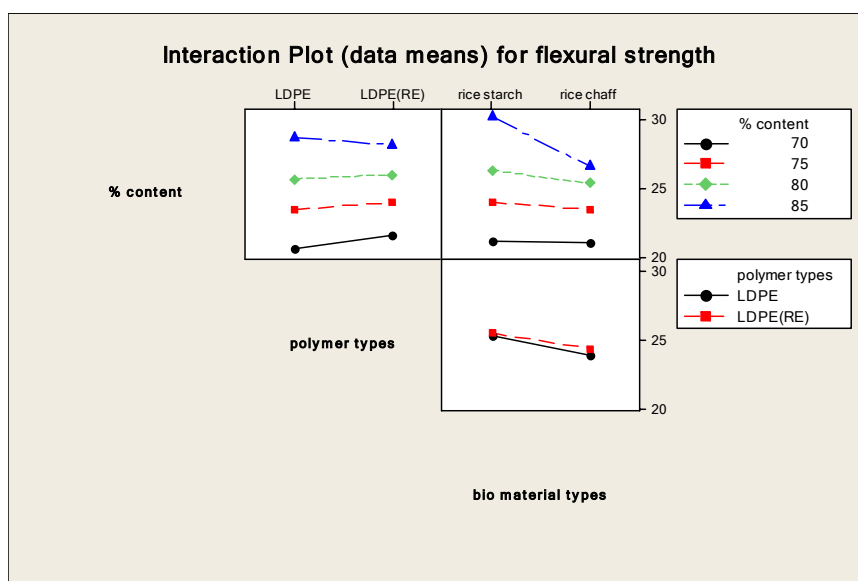
% content		Mean	SE Mean	
70		21.07	0.2033	
75		23.74	0.2033	
80		25.87	0.2033	
85		28.47	0.2033	
polymer type				
LDPE		24.62	0.1438	
LDPE (RE)		24.95	0.1438	
bio material				
rice starch		25.44	0.1438	
rice chaff		24.13	0.1438	
% content*polymer type				
70	LDPE	20.56	0.2876	
70	LDPE (RE)	21.57	0.2876	
75	LDPE	23.48	0.2876	
75	LDPE (RE)	23.99	0.2876	
80	LDPE	25.70	0.2876	
80	LDPE (RE)	26.03	0.2876	
85	LDPE	28.74	0.2876	
85	LDPE (RE)	28.20	0.2876	
% content*bio material				
70	rice starch	21.16	0.2876	
70	rice chaff	20.98	0.2876	
75	rice starch	24.02	0.2876	
75	rice chaff	23.46	0.2876	
80	rice starch	26.34	0.2876	
80	rice chaff	25.39	0.2876	
85	rice starch	30.26	0.2876	
85	rice chaff	26.69	0.2876	
polymer type*bio material				
LDPE	rice starch	25.36	0.2033	
LDPE	rice chaff	23.89	0.2033	
LDPE (RE)	rice starch	25.53	0.2033	
LDPE (RE)	rice chaff	24.37	0.2033	
% content*polymer type*bio material				
70	LDPE	rice starch	20.56	0.4067
70	LDPE	rice chaff	20.57	0.4067
70	LDPE (RE)	rice starch	21.76	0.4067
70	LDPE (RE)	rice chaff	21.38	0.4067
75	LDPE	rice starch	23.88	0.4067
75	LDPE	rice chaff	23.09	0.4067
75	LDPE (RE)	rice starch	24.15	0.4067
75	LDPE (RE)	rice chaff	23.84	0.4067
% content*polymer type*bio material				
80	LDPE	rice starch	26.21	0.4067
80	LDPE	rice chaff	25.19	0.4067
80	LDPE (RE)	rice starch	26.48	0.4067
80	LDPE (RE)	rice chaff	25.59	0.4067
85	LDPE	rice starch	26.70	0.4067
85	LDPE	rice chaff	26.70	0.4067
85	LDPE (RE)	rice starch	29.73	0.4067
85	LDPE (RE)	rice chaff	26.67	0.4067



ภาพผนวกที่ ๑-๑ กราฟ Residual Plots for flexural strength



ภาพผนวกที่ ๑-๒ กราฟ Main Effects Plot for flexural strength



ภาพผนวกที่ ๓ กราฟ Interaction Plot for flexural strength

ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความแข็งแรงดัดโค้ง พบว่าปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบร่วมกันคือ เปอร์เซ็นต์การผสมกับชนิดของวัสดุชีวภาพ และที่ปัจจัยร่วมระหว่างเปอร์เซ็นต์การผสมกับชนิดของพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 10% ดังนั้นในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดัดโค้งสูงสุด จะทำการกำหนดโดยใช้กราฟ Interaction plot พบว่าเมื่อปริมาณวัสดุชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นให้ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง สูงขึ้น และเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง จะกำหนด ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การผสม (% content)	ที่ระดับของ 85 %wt
ชนิดของพอลิเมอร์ (polymer type)	ที่ระดับของ LDPE
ชนิดของวัสดุชีวภาพ (bio material type)	ที่ระดับของ แป้งข้าว

ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดัดโค้ง จากผลของ Least Squares Means for flexural strength คือ 26.70 MPa

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวศิริลักษณ์ พาน โกลสูง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 18 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาอาจารย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ 2549 - พ.ศ 2550