



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจาก
ชานอ้อย และท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

A Study of Factors Affecting Properties of Polypropylene/Sugarcane Bagasse Fiber and
Recycled Carbon Nanotube Composite using Experimental Design

นามผู้วิจัย นายณฐดนันท์ มัทธูรศ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สัทสน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจากชานอ้อย
และท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

A Study of Factors Affecting Properties of Polypropylene/Sugarcane Bagasse Fiber and Recycled
Carbon Nanotube Composite using Experimental Design

โดย

นายณฤพดินทร์ มัทธูรศ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

นฤปดินทร์ มัทธูรศ 2553: การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ
พอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจากชานอ้อย และท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการ
ออกแบบการทดลอง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 113 หน้า

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจาก
ชานอ้อยและท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน
เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน วัสดุเชิงประกอบแต่ละอัตราส่วนถูกเตรียมและผสมด้วยการหลอมละลาย
และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial
Design) ถูกใช้เพื่อวางแผนการทดลองและพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของยัง ความแข็งแรงดึง
และความทนแรงกระแทก โดยปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ (ก) ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ
เส้นใยจากชานอ้อย: ร้อยละ 0, 15 และ 30 โดยน้ำหนัก (ข) ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของมาเลอิก
แอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน: ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และ (ค) ปริมาณร้อยละโดย
น้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่: ร้อยละ 0 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์
ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยทั้งสาม คือ ปริมาณของเส้นใยจากชานอ้อย ท่อนาโนคาร์บอน
และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน มีผลต่อคุณสมบัติทางกล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
นอกจากนี้ เมื่อศึกษาผลจากค่าที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง พบว่ามีค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น 2.96
เท่า และค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นร้อยละ 13.24 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Narubodin Mathurasa 2010: A Study of Factors Affecting Properties of Polypropylene/Sugarcane Bagasse Fiber and Recycled Carbon Nanotube Composite using Experimental Design. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 113 pages.

This research work is aimed to study the properties of Polypropylene composites mixed with sugarcane bagasse fiber and recycled carbon nanotubes in which maleic anhydride grafted Polypropylene (MAPP) is used as a compatibilizer. The composite materials were prepared by melt compounding and formed by injection molding. The Full Factorial design was used to plan the experiments and consider the influence of each factor on Young's modulus, tensile strength and impact strength. These conditions consist of three factors: (a) %wt content of sugarcane bagasse fiber: 0, 15 and 30 %wt, (b) %wt content of maleic anhydride grafted Polypropylene: 0, 5 and 10 %wt, (c) %wt content of recycled carbon nanotubes: 0 and 0.5 %wt, Analysis of Variance (ANOVA) indicated that all factors including the content of sugarcane bagasse fiber, carbon nanotubes, and MAPP significantly affected mechanical properties. In addition, according to the most suitable mixture in the experiments, it was found that Young's modulus was increased by 2.96 times and tensile strength was increased by 13.24 % compared to Polypropylene.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณ ดร. จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการ สอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาในการควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณสมปอง อินทอง หัวหน้าฝ่ายพอลิเมอร์ และ คุณวสันต์ ขอดคำ สถาบัน คำนวณและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ในความอนุเคราะห์เครื่องคิดเลขรูป พร้อม ทั้งบุคลากร ที่ให้ความรู้ทางด้านเทคนิค และพนักงานทุกคนในความช่วยเหลืออื่นๆ

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้ง กำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

นฤปดิษฐ์ มัทธูรศ

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น HOUNSFIELD H50KS	83
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น HOUNSFIELD H50KS	89
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก Impact Tester รุ่น GT-7045-I	95
ภาคผนวก ง ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของแต่ละการทดลอง	101
ภาคผนวก จ แสดงข้อมูลยืนยันผลการทดลอง	111
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก และราคาของอ้อย ข้าวโพด ปอ และฝ้าย	2
2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k (Analysis of Variance for 2^k)	36
3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^k (Analysis of Variance for 3^k)	38
4	ระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full Factorial)	46
5	ตารางออกแบบการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล	47
6	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่ามอดูลัสของยัง	51
7	เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ผลของค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด	57
8	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความแข็งแรงดึง	59
9	เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด	65
10	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความทนแรงกระแทก	67
11	เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรตอบสนอง	76
12	ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 30 %wt, B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt	76
13	ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt, B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt	76
14	ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt, B = 0 %wt และ C = 0 %wt	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการทดสอบวัดค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 1	84
ก2 ผลการทดสอบวัดค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 2	85
ก3 ผลการทดสอบวัดค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 3	86
ก4 ผลการทดสอบวัดค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 4	87
ก5 ผลการทดสอบวัดค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 5	88
ข1 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 1	90
ข2 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 2	91
ข3 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 3	92
ข4 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 4	93
ข5 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 5	94
ค1 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 1	96
ค2 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 2	97
ค3 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 3	98
ค4 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 4	99
ค5 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 5	100
จ1 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 30 %wt, B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt	112
จ2 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt, B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt	112
จ3 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt, B = 0 %wt และ C = 0 %wt	112

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของเซลล์โอส	7
2	โครงสร้างของเฮมิเซลล์โอส	8
3	โครงสร้างของลิกนิน	9
4	โครงสร้างของธาตุคาร์บอนแบบต่างๆ (1) เพชร (2) กราไฟต์ (3) ท่อนาโนคาร์บอน และ (4) ฟูลเลอร์รีน	11
5	โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	14
6	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ทั้งไปในการทดสอบความทนแรงดึงของพลาสติก	15
7	แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดูลัส	17
8	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	18
9	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก	20
10	สกรูแบบใช้เป็นลูกสูบอัดพลาสติก	22
11	การประกอบหัวฉีดเข้ากับปลายกระบอ	23
12	ระบบส่งกำลังขับเคลื่อน โดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนระบบใช้กระบอสูบไฮดรอลิกและการส่งกำลังหมุนใช้ไฮดรอลิกมอเตอร์	24
13	ลักษณะการกระทำของแรงอัดแม่พิมพ์ของชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ระบบปิดด้วยแรง (Actuated by force)	25
14	Heater ไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อนกระบอฉีดพลาสติก	26
15	อิทธิพลของอุณหภูมิที่ไม่มีผล	34
16	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผล	34
17	Design Schematic	37
18	เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS	43
19	เครื่อง Impact Tester รุ่น GT-7045-I	44
20	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง	54
22	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง	55
23	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง	56
24	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง	57
25	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง	60
26	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง	61
27	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง	62
28	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง	63
29	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของค่าความแข็งแรงดึง	65
31	Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก	68
32	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก	69
33	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก	70
34	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจาก ฐานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก	71
35	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจาก ฐานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลาย ชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก	72
36	กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการ ฉีดขึ้นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของค่าความ ทนแรงกระแทก	73
ภาพผนวกที่		
ง1	ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล ของการทดลอง 1	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง15	ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของการทดลอง 15	109
ง16	ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของการทดลอง 16	109
ง17	ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของการทดลอง 17	110
ง18	ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียลของการทดลอง 18	110

**การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจาก
ขานอ้อย และท่อนาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง**

**A Study of Factors Affecting Properties of Polypropylene/Sugarcane Bagasse
Fiber and Recycled Carbon Nanotube Composite using Experimental Design**

คำนำ

นับจากทศวรรษที่ผ่านมาที่มีการนำพลาสติกเข้ามามีใช้ในชีวิตประจำวัน พลาสติกแสดงบทบาทที่โดดเด่นในการใช้แทนวัสดุหลายชนิด เช่น ไม้ เหล็ก ในปัจจุบันจึงมีความต้องการใช้งานพลาสติกสูงทั่วโลกมีการแข่งขันในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้มากขึ้น

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมพลาสติกในระดับสูง มีส่วนแบ่งทางการตลาดถึงร้อยละ 4 อุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์พลาสติกอยู่ในอันดับ 1 ของเอเชีย อุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกอยู่ในอันดับ 8 ของโลก กำลังการผลิต 6.5 ล้านตัน ส่งออกร้อยละ 40 และบริโภคภายในประเทศร้อยละ 60

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของพลาสติกที่ปรากฏในปัจจุบัน คือ การย่อยสลายของพลาสติกในธรรมชาติเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากพลาสติกเป็นสารสังเคราะห์ ภายหลังการใช้งานวัสดุที่ทำด้วยพลาสติกจึงเป็นขยะที่สะสมพอกพูน เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม วิธีแก้ปัญหาวีธีหนึ่ง คือ การพัฒนาโดยการนำมวลชีวภาพซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติจากพืชและสัตว์มาผสม เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ จำพวก แป้ง เซลลูโลส ลิกนิน ไคติน และโปรตีนจำพวก เจลาติน ไหม ขนสัตว์ พอลิเมอร์จากธรรมชาติเหล่านี้ มีความแข็งแรงต่ำ ไม่ทนต่อความชื้น แต่เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย เป็นวัสดุย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและสามารถขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ได้ จัดเป็นทางเลือกเพื่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกลง

แนวโน้มการผลิตและการใช้พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้มีปริมาณและแนวโน้มการเติบโตสูงถึงร้อยละ 70–80 ต่อปี แต่ปริมาณที่ผลิตได้ยังมีน้อย โดยคิดเป็นร้อยละ 0.3–0.5 ของพลาสติกทั่วไป

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจเพื่อการค้าภายในและส่งออกหลายชนิด พืชที่มีองค์ประกอบของเส้นใยที่สำคัญ ได้แก่ ฝ้าย ปอ พืชที่ไม่ได้ปลูกเพื่อผลิตเอาเส้นใยโดยตรง แต่มีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) ที่สามารถนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ในทางการค้า ได้แก่ อ้อย ข้าวโพด ในปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อนำกากเหลือทิ้งไปทำเชื้อเพลิงชีวภาพ และมีการวิจัยที่จะสกัดสารเซลลูโลสในเส้นใยไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูก ปริมาณผลผลิตต่อปีสูง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก และราคาของอ้อย ข้าวโพด ปอ และฝ้าย

ชนิดผลผลิต	พื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ (ไร่)	ราคา (บาท/ตัน)	ผลผลิตต่อปี (พันตัน)
อ้อย (Sugarcane)	6,516,376	600	76,976.62
ข้าวโพด (Corn)	6,049,919	5,690	3,084.91
ปอ (Kenaf)	124,853	7,400	30.50
ฝ้าย (Cotton)	62,752	19,000	14.14

เนื่องจากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจะเกิดปัญหา คือ สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก จึงได้มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) มาช่วยให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำ ซึ่งได้จากผลิตภัณฑ์หรือเศษวัสดุที่ผิดรูปทรงไม่ได้ตามมาตรฐานในขั้นตอนการผลิต แล้วนำไปบด จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ โดยนำมาผสมกับมวลชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติ เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้พลาสติก ลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงคุณสมบัติ ลดปริมาณขยะ และสามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ โมดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และความทนแรงกระแทก ของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยจากชานอ้อย และท่อนานาโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (MAPP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหาระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมที่สุด

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของยัง ความแข็งแรงดึงและความทนแรงกระแทก และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยจากชานอ้อย ท่อนานโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเส้นใยจากชานอ้อย มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ท่อนานโนคาร์บอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ และพอลิโพรพิลีน มาทำการฉีดขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) ของสถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP)

การตรวจสอบเอกสาร

วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน แต่ละองค์ประกอบย่อยของวัสดุเชิงประกอบจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยม และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรง และค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ และเซรามิกส์ วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค (Particulate composites) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัว และขนาดต่างๆ กัน อาจเป็นผง เม็ด หรือผลึก
2. วัสดุเชิงประกอบแบบลามินาร์ (Laminar composites) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์ในลักษณะคล้ายแซนวิช อัดด้วยความดันสูง ซึ่งจะได้เป็นชั้นๆ
3. วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์วัสดุเชิงประกอบ

1. การยึดเกาะระหว่างวัสดุเชิงประกอบ และสารเสริมแรง
2. สมบัติของเมตริกซ์ และสารเสริมแรง
3. ปริมาณสารเสริมแรง
4. ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
5. กระบวนการผลิต
6. การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบ สามารถแบ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) การนำมาผสมลงในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น ส่วนเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) จะได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง และสามารถย่อยสลายได้

สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงมากที่สุด คือ ความเข้ากันได้ (Compatibilty) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ที่นำมาผสมกัน โดยเฉพาะการผลิตในทางการค้า ซึ่งมีพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความสามารถในการเข้ากันได้ แต่บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจาก พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลต่างกัน ความมีขั้วต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ทำการผสมกันไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับสาร โมเลกุลเล็ก ทำให้เกิดการแยกชั้นของพอลิเมอร์เกิดขึ้น นอกจากนี้พลังงานของพอลิเมอร์แต่ละชนิดยังเป็นปัจจัยทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้หรือไม่ด้วย เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่เมื่อนำมาผสมกันเป็นพอลิเมอร์ผสมแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเปราะ ไม่แข็งแรง ขาดง่าย เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ที่เป็นดิสเพอร์สเฟสกับเมทริกซ์เฟสมีค่าที่ต่ำ (Interfacial adhesion) และมีความเค้นสะสม (Stress concentration) เกิดขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความความสามารถความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารช่วยผสม(Compatibilizer) หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผลิต เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ในแต่ละองค์ประกอบ

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยได้จากการนำพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาทำการดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หรือ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ เช่น พันธะไฮโดรเจน ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน โดยหมู่คาร์บอกซิล ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับพอลิโพรพิลีนได้ ทำให้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมอย่างมาก และมีราคาไม่แพง

ชานอ้อย

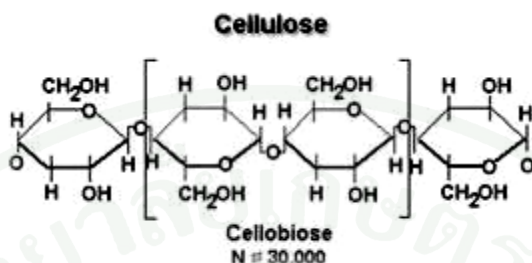
ประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยมากประเทศหนึ่ง ชานอ้อยจัดเป็นเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) จากพืชชนิดหนึ่ง ซึ่งหาได้ง่ายจากธรรมชาติมีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติม และสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลซึ่งจะใช้ชานอ้อยส่วนหนึ่งเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำของโรงงาน โดยปริมาณชานอ้อยที่เหลือจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผลิตน้ำตาลทรายขาวกับน้ำตาลทรายดิบ ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำตาลทรายขาวจะใช้ไอน้ำมากกว่าน้ำตาลทรายดิบ และขึ้นกับประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำของโรงงานน้ำตาลและราคาพลังงานอื่นๆ ที่ใช้ทดแทนกันได้ ชานอ้อยจะมีเส้นใยยาวประมาณ 0.8-2.8 มิลลิเมตร เฉลี่ย 1.6 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-34 ไมโครเมตร เฉลี่ย 20 ไมโครเมตร และมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ คือ เซลลูโลส ร้อยละ 26-39 ลิกนินร้อยละ 19-22 ส่วนที่ละลายได้ในน้ำร้อนร้อยละ 3-11 ส่วนที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และเบนซีนร้อยละ 3-11 และเถ้าร้อยละ 1-5 สำหรับผลผลิตเชื้อฟอกขาวที่ใช้ ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบจะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40-45

เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน แทนนิน เพนโตแซนกัน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น โครงสร้างเคมีของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติของเส้นใย กล่าวคือในโมเลกุลเซลลูโลสจะเกิดจากหน่วยโมเลกุลซ้ำ (repeat units) ยึดจับกันเป็นสายยาว หน่วยโมเลกุลซ้ำนั้นเรียกว่า เซลโลไบโอส (Cellobiose) เกิดจากบีต้า-กลูโคส 2 โมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ -C-O-C- ในโมเลกุลเซลลูโลสจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่มากมายจะทำหน้าที่ดึงดูดน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยาจับกับหมู่ธาตุอื่นๆ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีความเป็นระเบียบ (Crystalline) ค่อนข้างมากคือ 65-70% จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก และระหว่างสายโมเลกุลจะมีการยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เป็น

ระยะๆ ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีความเหนียวแข็งแรง อุณหภูมิการหลอมตัวสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัวและมีความสามารถในการละลายต่ำ



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Durand (2008)

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. การละลาย

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรด ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสบวมตัว ในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

2. ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

3. การดูดซับความชื้น

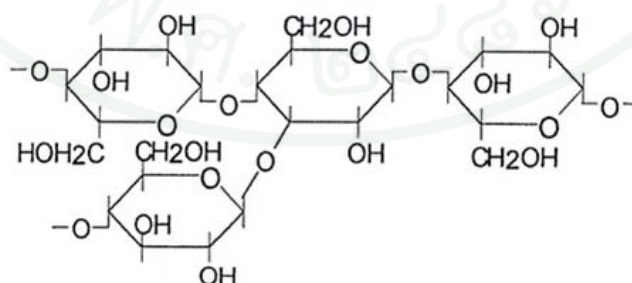
เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมันจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้ภาวะเปียกสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสจะเกิดการเรียงตัวใหม่ที่เกิดการใกล้ชิดกันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเปียกน้ำจึงเป็นผลให้ปริมาณของพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

4. ความหนาแน่น

เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา หรืออาจเปลี่ยนไป เนื่องจาก การปรับปรุงทางเคมี

เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก และกาแลก ทุโรนิก เฮมิเซลลูโลส พบในเนื้อเยื่อของพืช โดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกรบ ชังข้าวโพด เฮกโซแซน สูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$

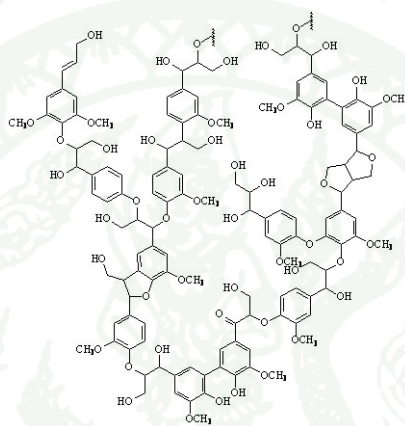


ภาพที่ 2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Durand (2008)

ลิกนิน

ลิกนิน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา



ภาพที่ 3 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: Durand (2008)

กระบวนการผลิตเส้นใยจากชานอ้อย

นำเอากากอ้อยมาทำการจัดขุข่อยออกที่เครื่องแยกขุข่อย (Depither) ขุข่อยจะถูกแยกออกไปประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่เป็นเส้นใยประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เรียกว่า ชานอ้อย จากนั้นนำเข้าเครื่องล้างชานอ้อย (Float washer) เพื่อล้างเอาสิ่งสกปรกหรือของหนักที่ไม่ต้องการออกจากชานอ้อย เช่น ทราย หิน เป็นต้น จากนั้นการแยกเส้นใย (Pulp Disintegration) เป็นการนำชานอ้อยมาต้มกับโซดาไฟ (NaOH) ซึ่งมีหน้าที่เป็นน้ำยาต้มย่อยเยื่อ โดยเยื่อที่ได้จากกระบวนการทางเคมีนี้มีปริมาณเซลลูโลสสูง มีลิกนินและสารอินทรีย์อื่นๆ ปนอยู่น้อยมาก มีความเหนียวสูง จากนั้นนำเยื่อมาทำความสะอาดและเข้าสู่กระบวนการเดินแผ่น (Sheet forming) และอบแห้ง (Drying) เวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 18 ชั่วโมง

ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน คือ วัสดุที่มีรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ปัจจุบันพบว่ามีคุณสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุเชิงประกอบ ทำอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มกำลังไฟและอายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างและสมบัติหลากหลายซึ่งขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2534 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) ด้วยสมบัติที่ยอดเยี่ยมทั้งใน ทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ มันมีความแข็งแรงที่วัดได้ค่ามากกว่าเหล็กกล้าถึงร้อยเท่า

รูปแบบโครงสร้าง

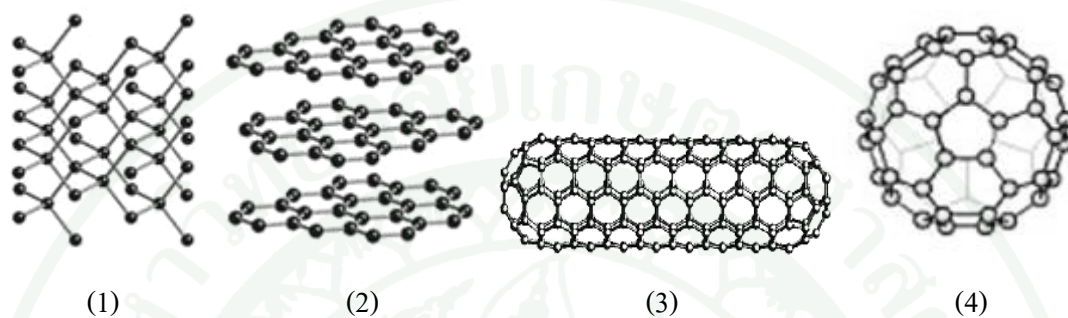
คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ในหลายๆ รูปแบบโครงสร้างซึ่งแบ่งออกได้ เป็นสี่ชนิดหลักๆ ดังนี้

1. แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) อย่างเดียวกับที่พบได้ในรูปของอัญมณีราคาแพง คือ เพชร ซึ่งมีความสวยงามและมีความแข็งที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย

2. แบบมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ หรือเป็นแผ่นสองมิติที่วาง ซ้อนทับและยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่า คือแรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) พบว่าเป็นโครงสร้างของแกรไฟต์ เช่น ไม้ดินสอที่เรารู้จักกันดี

3. แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ทำให้มันดูเหมือนเป็นเส้นยาวๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่ถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้

4. แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็กจนอาจถือว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติ เรียกว่า ฟูลเลอรีนส์ (Fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) ที่แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายๆ ลูกเต๋ากว้างหรือลูกบอลขนาดเล็ก



ภาพที่ 4 โครงสร้างของธาตุคาร์บอนแบบต่างๆ (1) เพชร (2) กราไฟต์ (3) ท่อนาโนคาร์บอน และ (4) ฟูลเลอรีน

ที่มา: Meyyappan (2005)

โครงสร้างและสมบัติ

ท่อนาโนคาร์บอนอาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า "ท่อนาโนผนังชั้นเดียว" (Single-walled nanotubes, SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า "ท่อนาโนผนังหลายชั้น" (Multiple-walled nanotubes, MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่สองนาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวไปจนถึงหลายร้อยไมโครเมตร และเป็นที่น่าสนใจว่าในกรณีท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.33-0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์

โครงสร้างของแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อนาโนนี้ประกอบ ขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยมคือ จะมีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม บางครั้งอาจเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่าโครงสร้างรังผึ้ง และบางทีมันก็สามารถจับกันเป็นรูปร่างวงแหวนห้าเหลี่ยมหรือเจ็ดเหลี่ยมได้ ซึ่งในกรณีอย่างนี้อาจถือว่าเป็นตำแหน่งที่มีตำหนิ (Defects) ของผนังท่อ ทำให้รูปทรงของท่อบิดโค้งงอ

เช่น ม้วนเป็นขดคล้ายลวดสปริง ม้วนเป็นขดแบบขนานม้วน โค้งม้วนปิดปลายท่อนาโน และม้วนเป็นก้อนกลมแบบคาร์บอนหกสิบ

สมบัติทั้งทางกลและอิเล็กทรอนิกส์ของท่อนาโนคาร์บอนนั้น จะสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (Helicity หรือ Chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ (Chiral angle) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสร้างให้มีสมบัติที่เป็นได้ทั้งโลหะ และสารกึ่งตัวนำ หรือแม้กระทั่งว่ามันอาจจะแสดงสมบัติ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีความเป็นไปได้ด้วยการเติมสารเจือ (Doping) บางอย่างเข้าไป

โครงสร้างท่อที่สังเคราะห์ได้จะถูกตรวจสอบขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ส่วนสมบัติทางกลหรือโมดูลัสของยัง (Young's modulus) วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ค่าที่วัดได้จะ อยู่ในช่วงของ 1×10^{12} นิวตันต่อตารางเมตร การตรวจสอบสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้ โดยการวัดความต้านทานระหว่างกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งพบว่าค่าความนำ ไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Quantized conductance) คือ จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบคล้าย โลหะและสารกึ่งตัวนำ

การนำมาใช้ประโยชน์

มีการวิจัยเพื่อนำเอาท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ทำโพรบวัด (Probing tip) ให้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนหรือซิลิคอนไนไตรด์ในแง่ของความมีเสถียรภาพ และความคงทน ที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงไปได้ ถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคน และรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด ซึ่งเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อน (Artefact) เมื่อวัดผิววัตถุที่มีความลาดชันสูง และมีขนาดใกล้เคียงกับปลายของโพรบวัด เช่น การวัด ภาพดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงเหมาะสำหรับทำ โพรบวัด เพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (Resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมีค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โกงงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วดึงคืนสู่สภาพเดิมได้ ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบ ที่มีสมบัติ

พิเศษคือจะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่นเป็นส่วนประกอบในรถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำเสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเส้นใยล่อวัสดุเซรามิก (Nanoceramic fibers) ได้

สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของท่อนาโนคาร์บอนนั้น ได้รับการยืนยันจากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดย นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มด้วยกัน เช่นกลุ่มนักวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเคลฟท์ ประเทศเนเธอร์แลนด์ และมหาวิทยาลัยเบิร์กลีย์ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้มีการสร้างห้องวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนาโนอิเล็กทรอนิกส์ หรือโมเลกุลาร์ อิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมา โดยเฉพาะ เพื่อทำการค้นคว้าและประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไอโอดสายไฟ ควอนตัม และตัวนำยิ่งยวดที่ทำจากท่อนาโนผนังเดี่ยว

นักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อยาฮาชิ ซาโตะ (Yahachi Saito) สามารถประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอ คอมพิวเตอร์ โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนแทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายอิเล็กตรอน ด้วยสมบัติที่เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัด พลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ

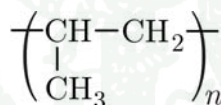
พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก คือ เป็นพลาสติกที่แข็งตัวโดยไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี แต่อาศัยสมบัติทางกายภาพ เมื่อทำพลาสติกประเภทนี้ให้ร้อนขึ้นแล้วเทลงในเบ้าหรือแบบก็จะเปลี่ยนรูปร่างไปตามแบบนั้น และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้ และเมื่อเป็นรูปแล้วเราสามารถที่จะหลอมและเปลี่ยนรูปเป็นอย่างอื่นได้อีก เพราะสมบัติทางเคมียังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

พอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกสูงถึงร้อยละ 70 ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก มีความแข็งและทนแรงดึงได้ดี มีความทนแรงกระแทกดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 15°C มีจุดหลอมเหลวประมาณ $165\text{--}175^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.90–0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนยังทำให้ทนต่อการซึมของไขมันและน้ำมันได้ดี ใสน้ำ

และออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายได้ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ทนต่อการกัด และเบสเป็นอย่างดี และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี แต่พอลิโพรพิลีนมีจุดอ่อน คือ เปราะแตกหักได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 0°C) และเสถียรภาพของพอลิโพรพิลีนต่อแสงอัลตราไวโอเลตและออกซิเจนต่ำกว่าพอลิเอทิลีนจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานกลางแจ้ง เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้เปราะแตกเร็ว สีสันจางได้ง่าย จึงต้องทำการผสมสารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) และสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเลต (UV stabilizer) เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน

โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนประกอบด้วยโซ่โมเลกุลยาวของธาตุอะตอมคาร์บอน มีหมู่เมทิลยื่นออกมาเป็นกิ่งก้านอยู่ด้านข้างของโมเลกุลทำให้มีความหลากหลายในรูปแบบต่างๆ ของการจัดเรียงตัวกลุ่มโมเลกุลดังกล่าว สายโซ่โมเลกุลของอะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันอยู่ในลักษณะสลับไปมา



ภาพที่ 5 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน

ที่มา: Ferdinand *et al.* (2003)

การใช้งานของพอลิโพรพิลีนแบ่งตามประเภทของการขึ้นรูป

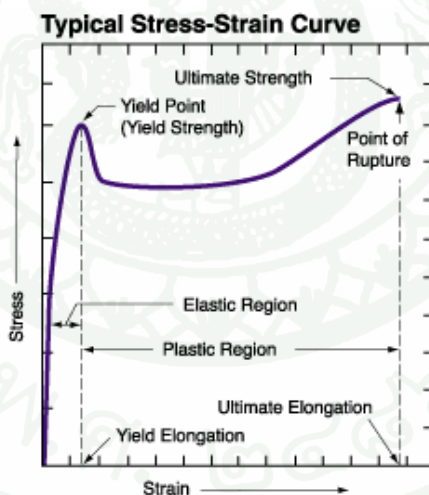
1. งานฉีด (Injection molding) ใช้ทำกล่องแบตเตอรี่ กันชนรถยนต์ ตั้งโต๊ะ กระจก ดันไม้ เครื่องใช้ทางการแพทย์ กระบอกฉีดยาที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ด้ามแปรงสีฟัน ฝาขวดพลาสติก
2. งานเป่า (Blow molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีความทนทานสูงเช่น ขวด ถัง หรือ ภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมี
3. งานเป่าถุง (Blown film) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิสูง เช่น ถุงร้อน ฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป

4. งานสิ่งทอ (Textile) ใช้ผลิตเส้นใยกระสอบ เชือกประมง เชือกฟาง

สมบัติเชิงกลของพลาสติก

1. สมบัติด้านแรงดึง

ความทนแรงดึงของวัสดุแสดงถึงความต้านทานต่อการยืด (Elongation) หรือการแตกหัก (Breaking) ของวัสดุนั้นเมื่อได้รับแรงดึง การวัดความทนแรงดึงของพลาสติกเป็นการวัดที่มีประโยชน์ที่สุดแบบหนึ่ง ตามมาตรฐาน ASTM D638 นั้น ใช้ชิ้นทดสอบแบบที่มีรูปคัมเบลล์ปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ และใช้แรงดึงที่ทราบค่า ดึงหัวจับทั้งสองให้เคลื่อนออกจากกันด้วยอัตราเร็วคงที่ พลาสติกที่ทดสอบจะยืดออกในแนวเดียว (Uniaxial) และขาดจากกันบริเวณส่วนกลางที่แคบของชิ้นงานภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ได้กราฟระหว่างแรงและการยืด (Load-elongation curve) ซึ่งนิยมแสดงออกในรูปความเครียดและความเค้น (Stress-Strain) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ทัวไปในการทดสอบความทนแรงดึงของพลาสติก

ที่มา: สุภโชค (2548)

เมื่อออกแรงดึง (F) ให้กับชิ้นทดสอบ สามารถคำนวณหาความเค้นดึง (Tensile stress) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตร หรือ ปาสคาล

F คือ แรงดึง ในหน่วยของแรง เช่น นิวตัน

A คือ พื้นที่หน้าตัด เช่น ตารางเมตร

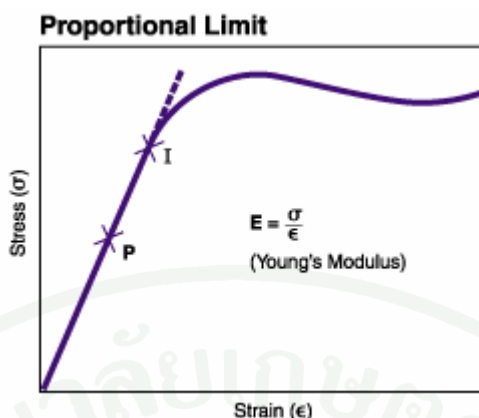
ค่าความเค้นดึงทำให้เกิดการยืดของชิ้นงานจาก L_0 เป็น L นั่นคือชิ้นงานมีความเครียดดึง (Tensile strain, ϵ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อออกแรงดึงต่อวัสดุ จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติก คือ เมื่อเอาแรงออก วัสดุสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (Reversible change) จนเมื่อดึงผ่านขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ไปแล้วจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีกเมื่อเอาแรงออก และหลังจากนี้จะเรียกว่า Strain harden คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งขาดออกจากกัน จะได้ค่าความเค้นดึงสุดท้าย ซึ่งเรียกว่า Ultimate tensile stress

2. มอดูลัส

มอดูลัส (Modulus) หรือมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) หรือมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus) เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเค้น ค่ามอดูลัสเป็นสิ่งที่วัดความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของพลาสติกซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ขณะรับแรง



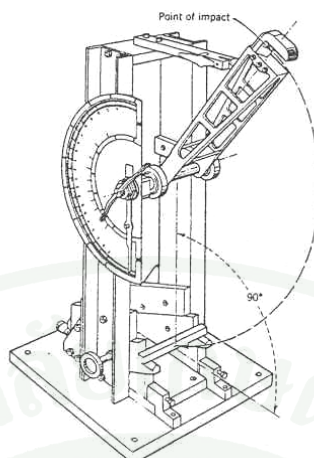
ภาพที่ 7 แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดูลัส

ที่มา: สุกโขภ (2548)

การหาค่ามอดูลัสจากกราฟความเค้น-ความเครียดดังแสดงไว้ในภาพที่ 7 โดยหาค่ามอดูลัสแบบยืดหยุ่น (E) ได้จากการวัดความชัน (Slope) ของเส้นสัมผัสเริ่มแรกซึ่งเป็นส่วนที่ชันที่สุดของเส้นโค้ง Yield stress เป็นความเค้นที่จุดคราก (Yield point) ซึ่งจุดครากเป็นจุดแรกบนเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่เกิดการเพิ่มความเครียดโดยที่ไม่มีการเพิ่มความเค้น เมื่อวัสดุถูกดึงถึงจุดครากแล้ว จะไม่สามารถคืนตัวได้อีกเมื่อเอาแรงกระทำออกไปพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงความเหนียว (Toughness) ของพลาสติก เป็นพลังงานทั้งหมดที่ทำให้พลาสติกเกิดการแตกหัก พลาสติกที่มีพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดมากเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ส่วนวัสดุที่เปราะจะมีพื้นที่ใต้เส้นโค้งน้อย

3. ความทนแรงกระแทก

ในการทดสอบความทนแรงกระแทกของพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่การทดสอบแรงกระแทกโดยใช้ค้อนแกว่ง (Pendulum impact testing) โดยใช้เครื่องมือดังแสดงไว้ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

ที่มา: สุกโข (2548)

วิธีการทดสอบแบบนี้ยังสามารถแบ่งตามความเหมาะสมของชิ้นงานและลักษณะของเครื่องมือที่ใช้เป็น

3.1 วิธีทดสอบ A (Izod type) วิธีนี้ชิ้นทดสอบจะถูกตรึงกับเครื่องในแนวตั้งฉากกับแท่นวางชิ้นงาน (cantilever beam) และถูกทำให้แตกโดยหัวกระแทก (Pendulum) โดยหันรอยบากออกมาทางด้านเดียวกับทิศทางของหัวกระแทก

3.2 วิธีทดสอบ B (Charpy type) วางชิ้นทดสอบในแนวนานกับแท่นวางชิ้นงาน แล้วใช้หัวกระแทก เหวี่ยงกระทบชิ้นงานให้แตกเพียงครั้งเดียวโดยรอยบากออกมาทางด้านเดียวกับทิศทางของหัวกระแทก

3.3 วิธีทดสอบ C คล้ายกับ วิธีทดสอบ A แต่การวางชิ้นทดสอบนั้นจะเห็นรอยบากตรงข้ามกับ วิธีทดสอบ A และพิจารณาค่า Toss correction ด้วย ค่าที่ได้จากวิธีเรียกว่า “Estimated net Izod impact strength” วิธีนี้ใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความทนแรงกระแทกจาก Izod test น้อยกว่า 27 J/m ถ้ามีค่ามากกว่า 27 J/m ค่าที่ได้จะไม่ต่างกับ วิธีทดสอบ A มากนัก

3.4 วิธีทดสอบ D เหมือนกับ วิธีทดสอบ A แต่เป็นการวัด Sensitivity ของรอยบากของชิ้นงาน นั่นคือวัดผลหรือควารัศมีของรอยบากที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกอย่างไร

ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบ สามารถแบ่งออกเป็น

1. C-complete break เป็นลักษณะของชิ้นทดสอบแตกออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่าอย่างชัดเจน
2. H-hinge break ชิ้นงานแตกอย่างไม่สมบูรณ์ คือ ส่วนหนึ่งอยู่ในลักษณะตั้ง และอีกส่วนหนึ่งอยู่ในแนวที่ไม่ใช่แนวนอน นั่นคือ มุมของชิ้นงานน้อยกว่า 90 องศา
3. P-partial break ชิ้นงานแตกอย่างไม่สมบูรณ์ โดยแตกอย่างน้อยร้อยละ 90 ของระยะระหว่างยอดของรอยบากกับด้านตรงข้ามของชิ้นงาน
4. NB-non break เป็นการแตกที่ไม่สมบูรณ์ที่สุด คือ รอยแตกน้อยกว่าร้อยละ 90 ของระยะระหว่างยอดของรอยบากกับอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน

ในปัจจุบันนิยมใช้การทดสอบ วิธีทดสอบ A และ วิธีทดสอบ B โดยจะกล่าวรายละเอียดดังนี้

1. Izod Test

วิธีนี้ใช้หาค่าความทนแรงกระแทกทั้งของโลหะ และของพอลิเมอร์ คือ ใช้หัวกระแทกที่รู้มวลแน่นอน เหวี่ยงกระทบกับชิ้นงานที่วางยึดอยู่กับแท่นวางชิ้นงานในแนวตั้ง โดยให้รอยบากหันไปในทิศทางที่หัวกระแทกตกกระทบ และอยู่เหนือที่ยึด วิธีนี้รอยบากก็มีความสำคัญ คือ ถ้ารอยบากยิ่งคมชัดเท่าไร ค่าความทนแรงกระแทกก็จะยิ่งลดลงเนื่องจากรอยบากจะทำให้ชิ้นงานนี้มีความเค้นมากขึ้น วิธีนี้จะมีข้อเสีย คือ พลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการเหวี่ยงหัวกระแทกที่สูญเสียไปนั้นไม่ได้ทำให้ชิ้นงานแตกเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลรวมของพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดรอยแตกครั้งแรก ซึ่งต้องใช้ในการทำให้ส่วนที่เหลือขาดด้วย และใช้ในการโยนชิ้นงานที่แตกแล้ว นอกจากนี้

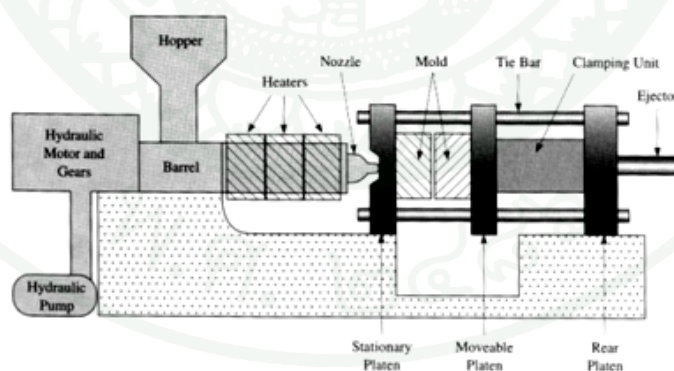
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดัน การสูญเสียพลังงานบางส่วนเนื่องจากแรงเสียดทาน และการสั่นของเครื่องมือ

2. Charpy Test

วิธีนี้มีหลักการทั่วไปเหมือนกับ Izod แตกต่างกันตรงลักษณะการวางชิ้นทดสอบ วิธีนี้ชิ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะที่ขนานกับแท่นวางชิ้นงาน ซึ่งเมื่อปล่อยหัวกระแทกจะกระทบชิ้นงานตรงกลางพอดี และตรงด้านหลังของรอยบาก ค่าความทนแรงกระแทกจะอ่านได้จากเครื่องทันที และมีหน่วยเป็นจูลส์

พื้นฐานการฉีดพลาสติก

การฉีดพลาสติก เป็นกระบวนการหลักในการผลิตชิ้นงานพลาสติกสำเร็จรูป เครื่องฉีดพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งมีการออกแบบให้เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานพลาสติกแต่ละชนิด ทั้งขนาดของชิ้นงานและในแง่ของต้นทุนการผลิต เช่น การใช้เครื่องฉีดพลาสติกขนาดใหญ่ที่ฉีดชิ้นงานได้หลายชิ้นในคราวเดียวกัน ซึ่งประหยัดต้นทุนมากกว่าการใช้เครื่องขนาดเล็กที่ฉีดได้ชิ้นเดียวต่อครั้งจำนวนหลายเครื่อง



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

ที่มา: บรรเลง (2548)

ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

1. ชุดหลอมและฉีดพลาสติก (Plasticating and Injection unit)

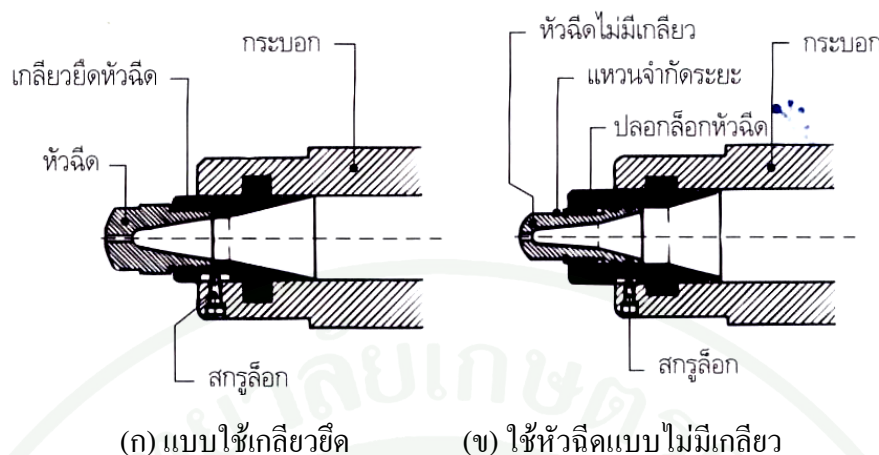
จังหวะการทำงานของชุดฉีดพลาสติกก็คือ โดยการพาพลาสติกจากกรวยเติมเข้าหลอมในกระบอกเคลื่อนที่เข้าฉีด ทำการอัดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ทำการอัดย่ำ หลังจากขึ้นงานในแม่พิมพ์เย็นจนปลดออกจากแม่พิมพ์ได้แล้ว ก็จะทำการหลอมเหลวพลาสติกใหม่เพื่อรอจังหวะฉีดต่อไป แล้วถอยชุดฉีดกลับ ซึ่งชุดหลอมและฉีดพลาสติก มีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

2. กรวยเติมพลาสติก (Feed hopper)

ทำหน้าที่ในการบรรจุผงหรือเม็ดพลาสติก เช่นเดียวกับกรวยเติมของเครื่องฉีดพลาสติก ภายในกรวยเติมก็จะมีโครงเหล็ก หรือมีใบกวน เพื่อทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้พลาสติกติดกันเป็นก้อน ทำให้การไหลของพลาสติกลงสู่ส่วนคอ (Throat) ของกรวยได้สะดวกขึ้น

3. สกรู (Screw)

ทำหน้าที่ในการดึงพลาสติกจากกรวยเติมลงในกระบอก โดยการหมุนเนื่องจากแรงขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า แล้วป้อนส่งพลาสติกไปข้างหน้า พร้อมกับทำให้เกิดการหลอมเหลวและเกิดการคลุกเคล้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ในช่วงฉีดพลาสติกหลอมเข้าแม่พิมพ์ สกรูจะทำหน้าที่เป็นลูกสูบ (Plunger) เคลื่อนที่ในแนวแกน เพื่ออัดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ โดยพลาสติกเหลวจะถูกสะสมในช่องว่างด้านหน้าสกรู (Injection chamber) ก่อนที่จะฉีดเข้าแม่พิมพ์ สกรูที่ใช้ในการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ แตกต่างจากสกรูที่ใช้ในการรีด กล่าวคือจะมีเกลียววนซ้าย เพื่อให้สามารถต่อโดยตรงกับมอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งโดยปกติจะหมุนทางขวา ส่วนสกรูที่ใช้ในการรีดจะมีเกลียววนขวา เนื่องจากการรีดใช้พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง จึงต้องการกำลังในการขับเคลื่อนมากกว่า จึงไม่สามารถต่อมอเตอร์เข้ากับสกรูโดยตรงได้ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยเพื่อช่วยในการทดกำลัง เช่น เฟืองบริเวณส่วนปลายของสกรูที่ใช้ในเครื่องฉีดพลาสติก จะมีวงแหวนที่เรียกว่า วงแหวนกันการไหลย้อนกลับ (Back-flow valve)



ภาพที่ 11 การประกอบหัวฉีดเข้ากับปลายกระบอก

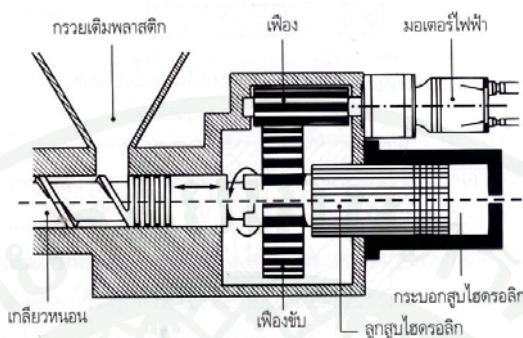
ที่มา: บรรณ (2548)

6. ระบบส่งกำลังขับเคลื่อน

สกรูจะมีการเคลื่อนที่สองลักษณะคือการหมุนพร้อมถอยหลังในจังหวะหลอมพลาสติก และการเคลื่อนที่ตามแนวนอน เดินหน้าสำหรับจังหวะฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์

การส่งกำลัง โดยปกติจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหรือไฮดรอลิกมอเตอร์ สำหรับการใช้น้ำมันส่งกำลังขับเคลื่อน ถ้าต้องการให้สามารถเปลี่ยนความเร็วได้ทุกขั้นตามต้องการแล้ว จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วควบคู่กับมอเตอร์ไฟฟ้าตรง หรือจะใช้ระบบความเร็วรอบแบบไม่มีขั้นทางกลก็ได้ ในภาพที่ 12 แสดงระบบส่งกำลังขับเคลื่อน โดยการเคลื่อนที่ตามแนวนอนของระบบใช้กระบอกสูบไฮดรอลิกและการส่งกำลังหมุนใช้ไฮดรอลิกมอเตอร์ สำหรับการเปลี่ยนความเร็วรอบ

ของสกรูได้ทุกความเร็วนั้นได้นิยมใช้ไฮดรอลิกมอเตอร์ เพราะสามารถจะปรับความเร็วรอบได้ง่าย โดยการปรับวาล์วควบคุม



ภาพที่ 12 ระบบส่งกำลังขับเคลื่อนสกรู โดยการเคลื่อนที่ตามแนวหนอนของระบบใช้กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก และการส่งกำลังหมุนใช้ไฮดรอลิกมอเตอร์

ที่มา: บรรณ (2548)

7. ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)

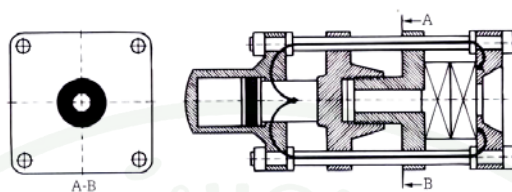
ในการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ มีหน่วยที่ทำหน้าที่ในการปิดและเปิดแม่พิมพ์ การปิดแม่พิมพ์จะต้องมีแรงปิด (Clamping force) เพื่อดึงแม่พิมพ์ให้แน่นพอที่จะไม่ให้พลาสติกไหลออกจากรอยแยกแม่พิมพ์ นอกจากนี้หน่วยนี้ยังทำหน้าที่ในการเปิดแม่พิมพ์ เพื่อถอดชิ้นงานพลาสติกออกจากแม่พิมพ์หลังจากสิ้นสุดการฉีด การปิดและเปิดแม่พิมพ์จะกระทำด้วยความเร็วและมีประสิทธิภาพ ส่วนประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปิดและเปิดแม่พิมพ์ ได้แก่ ระบบไฮดรอลิก ระบบควบคุม และระบบไฟฟ้า

ระบบไฮดรอลิกมีความสำคัญต่อเครื่องฉีดพลาสติกหลายประการ กล่าวคือ มีการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์หลายชนิด ที่จำเป็นต้องใช้แรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิก คือ

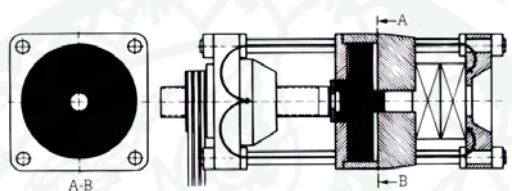
- 7.1 การหมุนของสกรูของเครื่องฉีดพลาสติก
- 7.2 การเคลื่อนที่ของสกรูในแนวราบขณะทำการฉีดพลาสติกหลอมเข้าแม่พิมพ์
- 7.3 การเคลื่อนที่ของชุดหลอมและฉีดพลาสติกเข้าหาเบ้า และถอยออกจากแม่พิมพ์

7.4 การเปิดและปิดแม่พิมพ์

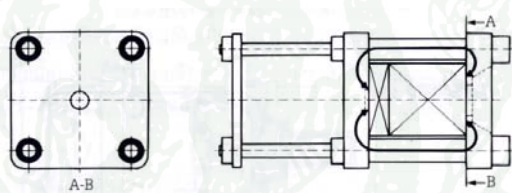
7.5 การกระทำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



(ก) ใช้ไฮดรอลิกส่งกำลังปิดแม่พิมพ์



(ข) ใช้มอเตอร์เคลื่อนที่เข้า-ออกและใช้ไฮดรอลิกอัดปิดแม่พิมพ์



(ค) ใช้ไฮดรอลิกเคลื่อนที่เข้า-ออกและใช้ไฮดรอลิกปิดแม่พิมพ์

ภาพที่ 13 ลักษณะการกระทำของแรงอัดปิดแม่พิมพ์ของชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ระบบปิดด้วยแรง
(Actuated by force)

ที่มา: บรรณ (2548)

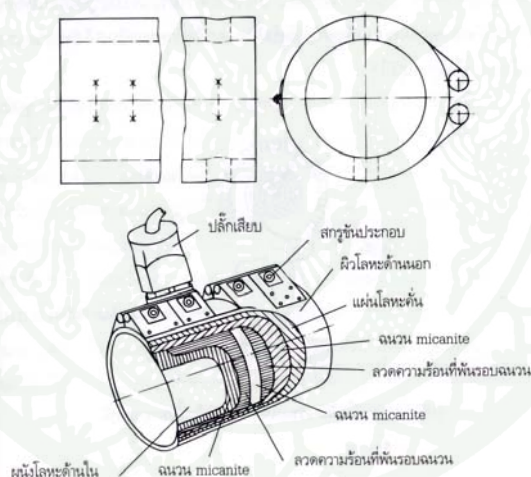
8. ระบบการให้ความร้อน

การให้ความร้อนในเครื่องฉีดพลาสติกนั้นจะใช้ไฟฟ้าเกือบทั้งหมด ส่วนการให้ความร้อนแบบอื่นๆ เช่น ใช้ Induction ใช้น้ำ ก๊าซร้อน หรือน้ำมันร้อน มีใช้น้อยมากทั้งนี้เพราะควบคุมอุณหภูมิได้ยาก

ความร้อนที่ออกจากหลอดความร้อนไฟฟ้า สามารถจะส่งผ่านไปยังวัสดุที่ต้องการทำให้ร้อนได้ทุกชนิด อย่างไรก็ตามก็ย่อมมีความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นบ้าง ในลักษณะของการพาของอากาศ และการแผ่รังสีความร้อนไปยังบรรยากาศ

เพื่อให้ได้อุณหภูมิคงที่ในช่วงที่ต้องการให้ความร้อนจะทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ Heater ไฟฟ้าและจะต้องหาขนาด Heater ให้เหมาะสมกับขนาดของเครื่องด้วย

Heater มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนกลมประกอบด้วยผิวด้านในด้วยฉนวน ถัดเข้าไปจะมี หลอดความร้อนที่พันอยู่รอบฉนวนและที่ผิวนอกจะหุ้มไว้ด้วยแผ่นโลหะที่มีสกรูสำหรับประกอบติดเอาไว้ดังภาพที่ 14 และจะต้องให้ผิวของกระบอกสะอาดปราศจากสิ่งอื่นมาคั่น ทั้งนี้เพื่อให้ความร้อน ถ่ายเทไปยังกระบอกได้ดีที่สุด



ภาพที่ 14 Heater ไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อนกระบอกฉีดพลาสติก

ที่มา: บรรณเลข (2548)

ขยะพลาสติก

ขยะพลาสติกเป็นขยะของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกในด้านต่างๆ มากมาย ทำให้มีปริมาณของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นแต่ละวันนั้นเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

และต่อผู้คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น พลาสติกที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้นั้น ส่วนใหญ่มาจากพลาสติก 6 ชนิดหลัก คือ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) และ โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)

ชนิดของขยะพลาสติก

1. เศษพลาสติกที่เหลือจากการตัดแต่งผลิตภัณฑ์ ขยะประเภทนี้จะไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
2. เศษพลาสติกที่เหลืออยู่ทางการค้า ซึ่งได้แก่ วัสดุกันกระแทก หรือวัสดุที่ใช้ในการบรรจุและห่อสินค้า เศษพลาสติกประเภทนี้หาได้ง่าย และมีความบริสุทธิ์สูง
3. เศษพลาสติกจากการใช้แล้วของผู้บริโภค ประกอบด้วยภาชนะพลาสติก ฟิล์มและเครื่องใช้ต่างๆ ขยะพลาสติกเหล่านี้มีพลาสติกหลายชนิดปะปนกันอยู่ ทำให้แยกออกจากกันลำบาก มีค่าใช้จ่ายสูงในการคัดแยกและเมื่อนำมาหลอมเหลวใหม่ ไม่สามารถนำมาใช้ในการบรรจุอาหารได้อีก เมื่อทำการรวบรวมและคัดแยกประเภทพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แล้ว จะนำไปผ่านกรรมวิธีการผลิตเป็นเม็ดพลาสติกประเภทรีไซเคิลอีกครั้งหนึ่ง

การจัดการกับพลาสติกหลังการใช้งาน

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทและเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากขึ้นทุกที กล่าวคือพลาสติกได้เข้ามาแทนที่วัสดุอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นแก้ว เซรามิกส์ ไม้ หรือกระดาษ เพราะคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรง คงทนไม่เกิดสนิม ในขณะที่มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย ประกอบกับราคาที่ไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำพลาสติกมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นปริมาณความต้องการในการใช้พลาสติกในแต่ละวันจึงได้เติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีขยะพลาสติกเกิดขึ้นในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมาภายหลังได้ ดังนั้นผู้บริโภคจึงต้องหันมาช่วยกันจัดการกับขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นเหล่านั้นให้เหมาะสมด้วยวิธีการเหล่านี้ ได้แก่

1. การนำไปผดมน

2. การกำจัด ด้วยวิธีสังเคราะห์พลาสติกที่สลายตัวได้เร็วขึ้นเมื่อถูกแสงแดดหรือสลายตัว ด้วยวิธีการทางชีวภาพ ตลอดจนการกำจัดด้วยการเผา

3. การแปรใช้ใหม่ หรือที่เรียกว่าการรีไซเคิล โดยการรีไซเคิลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

3.1 การรีไซเคิลเชิงอุตสาหกรรม คือ การนำเศษพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูป นำกลับมาหลอมใช้ใหม่

3.2 การรีไซเคิลหลังการใช้งาน คือ การรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ถูกทิ้งหลังจากการใช้งาน

การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง ปารเมศ (2545) ให้ความหมายไว้ว่า กระบวนการในการวางแผน การทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็น สิ่งจำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้น เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียง อย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสอง นี้มีความเกี่ยวข้องเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการ ออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้อย่างมาก

คำกำจัดความของคำศัพท์ที่ใช้ในหัวข้อนี้มีดังนี้

1. อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรอิสระ (ปัจจัยที่ทราบค่า สามารถกำหนด และเปลี่ยนแปลงได้) ที่มีต่อตัวแปรตาม (คุณลักษณะที่สามารถทราบได้หลังจากการทดลองในแต่ละครั้งหรือค่าที่ต้องการวัด)

2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สมบัติใดๆ ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณลักษณะในตัวผลิตภัณฑ์

3. ระดับของปัจจัย (Level of factor) หมายถึง สถานะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

4. ปัจจัยรบกวน (Noise factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยในการทดลองและไม่สามารถควบคุมได้

การออกแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input variables) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output response) ปัจจัยในกระบวนการใดๆ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต เช่น การตั้งอุณหภูมิตู้อบความร้อน
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นไม่ได้ในการผลิต

หลักการพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือเทคนิคการจัดหน่วยการทดลอง โดยให้แต่ละหน่วยการทดลอง มีโอกาสที่จะได้รับทริทเมนต์หนึ่งเท่ากัน โดยวัตถุประสงค์ของการทำแบบสุ่มมีดังนี้

1.1 เพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทดลองและเพื่อให้แน่ใจว่าทริทเมนต์ต่างๆ จะไม่มีการได้เปรียบและเสียเปรียบในเรื่องเกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันได้ว่าจะไม่มีการอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง

1.2 การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิตินั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนด ทั้งนี้การสุ่มจะเป็น

การช่วยกำจัดหรือเจือยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้เกิดขึ้นกับหน่วยการทดลองด้วยโอกาสเท่ากัน การทดลองแบบสุ่มทำได้ 3 วิธี

1.2.1 การทำสุ่มแบบสมบูรณ์ (Complete randomization)

1.2.2 การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization)

1.2.3 การสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในกลุ่ม (Complete randomization with blocks)

2. การทำซ้ำ (Replication) คือการที่ทรีทเมนต์หนึ่งทำการทดลองมากกว่าหนึ่งครั้ง โดยมีจุดประสงค์การทำซ้ำ คือ

2.1 การทำซ้ำสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ เพื่อนำค่าความผันแปรภายในกลุ่มนี้มาเป็นตัวทดสอบว่ามีทรีทเมนต์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติหรือไม่

2.2 เพิ่มความเที่ยงตรงของการทดลองโดยช่วยลดขนาดของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ย ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนซ้ำ (n) เป็นการช่วยลดค่า σ_y ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \dots\dots\dots(3)$$

2.3 การบล็อก (Blocking) คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1. หาตัวแปรอิสระในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองมากที่สุด
2. เพื่อกำหนดค่าตัวแปรอิสระในกระบวนการผลิตที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด
3. เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือการพิสูจน์ข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

4. การค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การนิยามปัญหา (Recognition and statement of problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการเรียนรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปยังวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัยและระดับปัจจัย (Choice of factors levels and ranges) เป็นหลักการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายระบุว่า ระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed effect) แบบสุ่ม (Random) หรือแบบผสม (Mixed effect) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

2.1 แบบกำหนด (Fixed effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.2 แบบสุ่ม (Random effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.3 แบบผสม (Mixed effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่ม

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of response variable)

ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลองในการทดลองหนึ่ง อาจมีการวัดตัวแปรตามมากกว่า 1 ค่าได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าที่สังเกตได้จากทริทเมนต์หนึ่งควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูลค่าสังเกตที่มีการแจกแจงที่ไม่

เป็นปกติให้เป็นปกติได้ ในการเลือกผู้ทำการวิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องถูกต้องและแม่นยำด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of experimental design) เมื่อกำหนด ทริทเมนต์ และตัวแปรตอบสนองแล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนซ้ำของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้องทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้การทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

5. ดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ในระหว่างดำเนินการทดลองผู้วิจัยต้องศึกษาและดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

ข้อควรระวังในขณะที่ทำการทดลองคือความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผลเท่าใดแน่นอน แต่เป็นยังเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผล

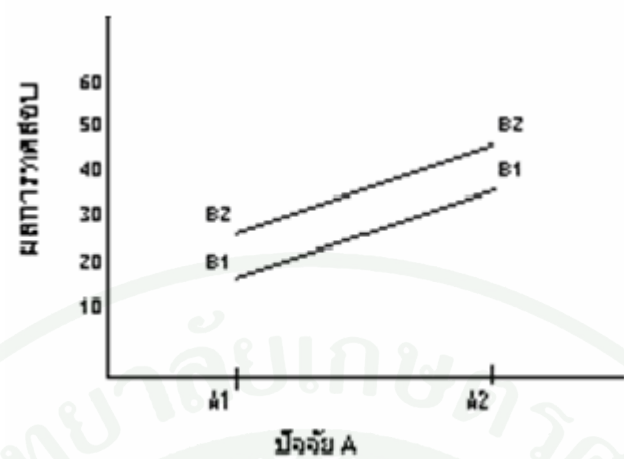
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ และการให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ในการทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่นในกรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับในการทดลอง 1 รอบการทำซ้ำ (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่

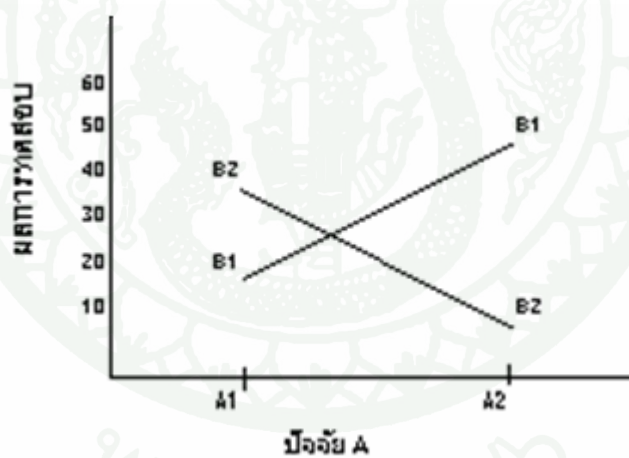
เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกันผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือ เวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือ การ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 รอบการทำซ้ำที่ปริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดเพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้น การออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงเนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ

และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของอันตรกิริยา (Interaction effect) ได้ด้วยอิทธิพลของอันตรกิริยา คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของอันตรกิริยาหรือปฏิสัมพันธ์ แสดงดังรูปซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยาแสดงดังภาพที่ 15 และเมื่อมีอิทธิพลของอันตรกิริยาแสดงดังภาพที่ 16 โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 15 อิทธิพลของอันตรกิริยาที่ไม่มีผล

ที่มา: ปารเมศ (2545)



ภาพที่ 16 อิทธิพลของอันตรกิริยาที่มีผล

ที่มา: ปารเมศ (2545)

รูปทั่วไปของการออกแบบ 2^k

การออกแบบที่มี k ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $k/2$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $k/3$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ..., และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลอง บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบไปด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ 2^5 จะหมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A, B, และ D อยู่ในระดับสูง และ C และ E อยู่ในระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัยสามารถเขียนให้อยู่ในลำดับมาตรฐานได้โดยการเพิ่มปัจจัยเข้าไปทีละตัว และให้ปัจจัยใหม่ que เพิ่มขึ้นมานี้รวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้านี้ ตัวอย่างเช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2^4 คือ (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd และ abcd ตามลำดับ

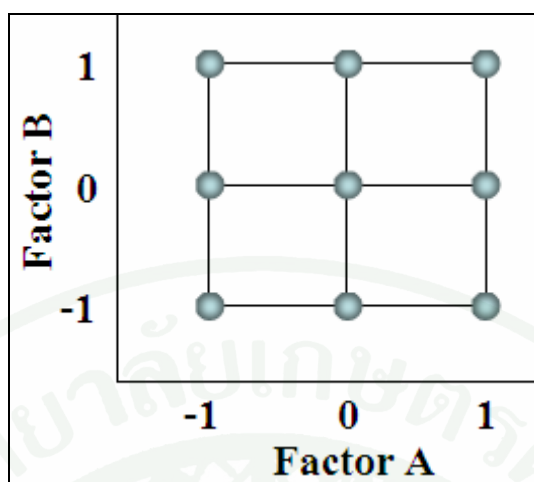
ในขั้นแรกเราจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาดังใดที่มีความสำคัญ ปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น เราควรเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สาม เราใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตารางที่ 2 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มีจำนวน n รอบการทำซ้ำ ในขั้นตอนที่สี่จะเป็นการขัดเกลารูปแบบจำลองซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลารูปแบบจำลองที่เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้เนื่องจากเราพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายเราจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟโดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k (Analysis of Variance for 2^k)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
K Main Effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
K	SS_K	1
Two-Factor Interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
JK	SS_{JK}	1
Three-Factor Interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
IJK	SS_{IJK}	1
K-Factor Interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SSE	$2^k(n-1)$
Total	SST	2^k-1

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มี k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง ตัวอย่างโครงสร้างของการออกแบบแฟคทอเรียล 3^2 ได้แสดงดังภาพที่ 17 เมื่อปัจจัยมีลักษณะเชิงปริมาณ เราจะแทนระดับ ต่ำ ปานกลาง และสูง ด้วย -1, 0 และ 1 ตามลำดับ



ภาพที่ 17 Design Schematic

ที่มา: ปาณิกา (2549)

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^k (Analysis of Variance for 3^k)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
K Main Effects		
A	SS_A	2
B	SS_B	2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
K	SS_K	2
Two-Factor Interactions		
AB	SS_{AB}	4
AC	SS_{AC}	4
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
JK	SS_{JK}	4
Three-Factor Interactions		
ABC	SS_{ABC}	8
ABD	SS_{ABD}	8
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
IJK	SS_{IJK}	8
K-Factor Interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	2^k
Error	SSE	$3^k(n-1)$
Total	SST	$n3^k-1$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชูชาติ และ เฉลิม (2546) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำจีไถ่ชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์โดยเริ่มทำการศึกษาสมบัติของจีไถ่ชานอ้อยทั้งทางเคมีและทางกายภาพก่อนจากนั้นจึงนำมาทดลองผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0 เปอร์เซ็นต์, 10 เปอร์เซ็นต์, 20 เปอร์เซ็นต์ และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เพื่อทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมจีไถ่ชานอ้อยและทำการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การไหลผ่านและกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมจีไถ่ชานอ้อยในอัตราส่วนข้างต้น โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำ 3 ค่า คือ 0.70, 0.75 และ 0.80 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์รวมกับจีไถ่ชานอ้อย ผลการทดสอบสมบัติจีไถ่ชานอ้อยทางเคมี และกายภาพพบว่าจีไถ่ชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานและผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของจีไถ่ชานอ้อยเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) พบว่าค่าความ ถ่วงจำเพาะของจีไถ่ชานอ้อยโดยมีค่าเท่ากับ 2.07 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความถ่วง จำเพาะของปูนซีเมนต์โดยมีค่าเท่ากับ 3.12 ซึ่งแสดงว่าปูนซีเมนต์มีอัตราส่วนช่องว่างภายในอนุภาคน้อยกว่าจีไถ่ชานอ้อย ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์จีไถ่ชานอ้อยพบว่าเมื่อปริมาณจีไถ่ชานอ้อยในอัตราส่วนผสมมากขึ้นค่าความชื้นเหลือปกติจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้จีไถ่ชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจีไถ่ชานอ้อยในส่วนผสมข้างต้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณจีไถ่ชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การไหลผ่านของมอร์ต้าผสมจีไถ่ชานอ้อยพบว่า เมื่อปริมาณจีไถ่ชานอ้อยในส่วนผสมมากขึ้นโดยที่ปริมาณน้ำที่ใช้พองที่ค่า เปอร์เซ็นต์การไหลผ่านจะมีค่าลดลงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย จีไถ่ชานอ้อยพบว่ามอร์ต้าที่แทนที่จีไถ่ชานอ้อยในส่วนผสมเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงกว่ากำลังรับแรงอัดที่มอร์ต้าปกติรับ ได้สำหรับมอร์ต้าที่แทนที่จีไถ่ชานอ้อยในส่วนผสมเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์โดยส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ค่อนข้างต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดที่มอร์ต้าปกติสามารถรับได้แต่มอร์ต้าที่แทนที่จีไถ่ชานอ้อยในส่วนผสมเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์นั้น จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดที่มอร์ต้าปกติรับ ได้อย่างเห็นได้ชัด

วิทยา (2547) ศึกษาการผลิตเชื้อแอลฟาเซลลูโลสจากชานอ้อยโดยใช้ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการแยกเซลลูโลสจากชานอ้อยคือที่อุณหภูมิ 218 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเซลลูโลสจากชานอ้อยอยู่ที่ 20.06

ณัฐา (2552) ได้ทดลองกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นโดยวิธีออกแบบการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิกระบอกฉีด ความเร็วฉีด และความเร็วสกรู

Bao and Tjong (2008) ทำการผสมพอลิโพรพิลีนกับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิ 220–230–220–190 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 235 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า วัสดุเชิงประกอบนาโนคาร์บอนมีลักษณะโครงสร้างแบบผลึก เมื่อมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มจะทำให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบจะมีสมบัติทางกลดี เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 0.3–0.5 โดยน้ำหนัก

Beckkermann and Pickering (2008) เป็นนักวิจัยที่ให้ความสนใจปัจจัยดังกล่าว ได้ทำการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบของพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยพืช โดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีก่อนจะนำไปผสมกับพอลิโพรพิลีน การปรับสภาพเส้นใยได้ทำการทดลองสองแบบคือ แบบแรกเป็นการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% และสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 2% แบบที่สอง เป็นการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% เพียงชนิดเดียว ภายหลังการปรับสภาพ เส้นใยที่ได้ถูกนำไปทำเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน โดยใช้พอลิโพรพิลีนที่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPP) 4% ผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทดลองแบบแรกเมื่อนำไปทำวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน วัสดุที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มมากขึ้น ตรงกันข้ามกับวัสดุเชิงประกอบที่ทำจากเส้นใยที่ผ่านการทดลองแบบที่สอง ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การทดลองแบบแรกช่วยลดปริมาณลิกนินในเส้นใยได้ 3.5% ในขณะที่ปริมาณลิกนินในเส้นใยที่ผ่านการทดลองแบบที่สองลดลงเพียง 2.1% การวิจัยเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการทดลองแบบแรกได้ผลการทดลองคือ ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 4% และปริมาณเส้นใย 40% จะได้วัสดุเชิงประกอบที่แข็งแรงมากที่สุด

Chen *et al.* (2007) ศึกษาวัสดุเชิงประกอบ ที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นกับพอลิคาร์บอเนต โดยปรับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1, 3, 5 และ 8 โดยน้ำหนักและใช้

อุณหภูมิเครื่องอัดรีดที่ 220–250–270–285–285 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การใช้ท่อนาโนคาร์บอน ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.5 ของพอลิคาร์บอเนต ทั้งยังพบว่าค่า Elastic modulus เพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอน ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมวัดได้ เมื่อมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 5

Qui *et al.* (2008) กล่าวถึงการพัฒนาวิธีการใหม่ในกระบวนการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงในพอลิโอฟีน โดยมีสารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารเริ่มต้น (Initiator) การทดลองได้ใช้เทคนิค Ball milling ภายในระยะเวลาที่กำหนด ผลการทดลอง เมื่อนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำด้วยเทคนิค ball milling มาเปรียบเทียบกับที่ทำด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้วิธีการหลอมเหลวก่อน แล้วจึงนำวัสดุที่หลอมตัวมาผสมกัน พบว่าการผลิตวิธีใหม่มีอัตราการรวมกันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับพอลิโอฟีนสูงกว่าการผลิตแบบดั้งเดิม ต่อมาจึงนำวิธีการนี้ไปใช้กับการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเอทิลีน พบว่าเป็นวิธีการที่ใช้ได้ดีเช่นเดียวกัน โดยมีข้อดีกว่าวิธีดั้งเดิมคือ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย กระบวนการวิธีใหม่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า จึงประหยัดพลังงาน ลดค่าใช้จ่าย อีกทั้งเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการปฏิบัติ

Tobias (2008) ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบของพอลิคาร์บอเนตผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ในอัตราร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความดันอัด (Holding pressure) ความเร็วฉีด (Injection velocity) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature) และอุณหภูมิที่ใช้หลอม (Barrel temperature) ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วฉีดและอุณหภูมิการหลอม มีผลต่อค่าแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบมากกว่า ค่าความย่นและอุณหภูมิแม่พิมพ์ นอกจากนี้ผลการศึกษาการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนพบว่า ความเร็วฉีดมีผลต่อการกระจายตัว

Zhang (2007) ศึกษาการทำวัสดุเชิงประกอบจากการผสมพอลิโพรพิลีนกับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และทำการปรับค่าความยาวท่อนาโนคาร์บอน เป็น 1-2 ไมโครเมตร และ 5-15 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาสมบัติการทนแรงกระแทก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดยาว ทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากกว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนขนาดสั้น

Zhao (2007) ศึกษาการทำวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างพอลิโพรพิลีนผสมกับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยตั้งอุณหภูมิตั้งแต่กรวยเติมเม็ดพลาสติกถึงหัวฉีด ดังนี้ 160–175–

190–200–200–195 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้เป็นแผ่นบางโดยใช้แม่พิมพ์ตรวจสอบการกระจายตัวของวัสดุผสมและทดสอบสมบัติทางกล พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีสมบัติที่ดีเมื่อมีท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 0.1–0.3 โดยน้ำหนัก



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด P640J จากบริษัท Thai Polyethylene (1993) Co., Ltd.
2. เส้นใยชานอ้อย จากบริษัท Environment Pulp and Paper Co., Ltd.
3. ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยึดขึ้นรูปมาแล้ว 1 ครั้ง (Recycled multi-walled carbon nanotubes)
4. มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (MAPP)
5. เครื่องฉีดยึดขึ้นรูปพลาสติก (บริษัท Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDCX)
6. เครื่องทดสอบสมบัติทางกล Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS



ภาพที่ 18 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS

7. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก Impact Tester รุ่น GT-7045-I



ภาพที่ 19 เครื่อง Impact Tester รุ่น GT-7045-I

8. ตู้อบไล่ความชื้น

9. เครื่องชั่งน้ำหนัก

10. เครื่องบดพลาสติก

วิธีการ

1. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสม

นำเส้นใยชานอ้อยและท่อนาโนคาร์บอนชนิดผงหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว มาบดด้วยเครื่องบดละเอียด จากนั้นนำเส้นใยชานอ้อยไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก ทำการวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่เกิน 0.2% จากนั้นนำเส้นใยชานอ้อย

มาผสมกับ MAPP ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว และพอลิโพรพิลีน ตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิหลอม 180 องศาเซลเซียส

2. การออกแบบการทดลอง

2.1 เลือกการออกแบบการทดลอง

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยควบคุมสามปัจจัย ซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ โดยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP มีการแบ่งระดับของค่าที่จะทำการทดลองไว้ 3 ระดับ ส่วนปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว จะแบ่งระดับของค่าที่จะทำการทดลองไว้ที่ 2 ระดับ เพื่อทดสอบถึงผลของปัจจัยที่มีต่อผลตอบแทนที่กำหนด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยนั้นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full factorial) มาใช้เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ โดยการทดลองจะกำหนดจำนวนซ้ำในการทดลอง 5 ครั้งต่อปัจจัยต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองทั้งหมด 90 ครั้ง และลำดับการทดลองทำแบบสุ่ม เพื่อหลีกเลี่ยงผลของตัวแปรแทรกซ้อนที่ไม่ทราบค่า ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไปหรือไม่สามารถควบคุมได้ในขณะทำการทดลอง

2.2 กำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าสมบัติทางกลที่ศึกษา คือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; MPa) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) และค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength; Kg-cm) โดยศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเม็ดพลาสติกในส่วนของการฉีดขึ้นรูป รวมถึงจากการระดมสมองของผู้ทำการวิจัย อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เชี่ยวชาญในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ทั้งที่ได้มีการทดลองฉีดขึ้นรูปในเบื้องต้นก่อนแล้วว่าชิ้นงานที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือลักษณะภายนอกชิ้นงานทดสอบที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าต้องไม่เกิดปัญหา เช่น การฉีดไม่เต็มชิ้นงาน ผิวชิ้นงานมีลาย การเกิดครีบ ชิ้นงานที่ได้ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นต้น โดยจะกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยดังนี้

ตารางที่ 4 ระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full Factorial)

ปัจจัยควบคุม	ระดับปัจจัย			หน่วย
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของเส้นใยจากชานอ้อย (A)	0	15	30	ร้อยละโดย น้ำหนัก
ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของ MAPP (B)	0	5	10	ร้อยละโดย น้ำหนัก
ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของท่อนานโนคาร์บอนชนิด ผนังหลายชั้นที่ผ่านการ ฉีดขึ้นรูปแล้ว (C)	0	-	0.5	ร้อยละโดย น้ำหนัก

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยใช้โปรแกรม Minitab 15.1.1 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางออกแบบการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล

ลำดับการทดลอง (Run Order)	ระดับปัจจัย			ค่าผลตอบสนอง (Y)
	A	B	C	
1	0	0	0	
2	0	0	0.5	
3	0	5	0	
4	0	5	0.5	
5	0	10	0	
6	0	10	0.5	
7	15	0	0	
8	15	0	0.5	
9	15	5	0	
10	15	5	0.5	
11	15	10	0	
12	15	10	0.5	
13	30	0	0	
14	30	0	0.5	
15	30	5	0	
16	30	5	0.5	
17	30	10	0	
18	30	10	0.5	

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

2.4.1 การทดสอบมอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกล Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM D638 type I (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) โดยทดสอบที่สภาวะดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	50 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการเคลื่อนที่	50 มิลลิเมตร/นาทีก
ระยะห่างการยึดจับ(Grip)	105 มิลลิเมตร

2.4.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (Impact strength)

ทดสอบโดยใช้เครื่อง GOTECH Pendulum Impact Tester ตามมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod) โดย ทดสอบที่สภาวะดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
น้ำหนักค้อนทดสอบ	1.357 กิโลกรัม
ระยะการเคลื่อนที่	150 องศา

2.5 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลตอบแทน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบอยู่ที่ $\alpha = 0.05$

2.6 ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้ผลของการวิเคราะห์มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และเพื่อเป็นการยืนยันว่าระดับปัจจัยที่ได้สามารถนำไปใช้ได้จริง

2.7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลและวิจารณ์

ผลการทดลองที่ได้จากแผนการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล โดยมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 18 สภาวะที่แตกต่างกันและมีวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมบัติทางกลของชิ้นงานที่นำไปทดสอบ โดยผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus; MPa) ดังตารางผนวก ก ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa) ดังตารางผนวก ข และค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength; Kg-cm) ดังตารางผนวก ค

การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง

โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ซึ่งจะกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบอยู่ที่ $\alpha = 0.05$ การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 15.1.1 มาช่วยในการวิเคราะห์

กำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่ i = 1,2,3

j = 1,2,3

k = 1,2

μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall mean)

A_i หมายถึง อิทธิพลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยที่ระดับ i

B_j หมายถึง อิทธิพลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP ที่ระดับ j

C_k หมายถึง อิทธิพลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว ที่ระดับ k

$(AB)_{ij}$ หมายถึง อันตรกิริยาของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย ระดับที่ i และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP ระดับที่ j

- $(AC)_{ik}$ หมายถึง อันตรกิริยาของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจาก
 ฐานอ้อย ระดับที่ i และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานคาร์บอน
 ชนิดหนึ่งหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้วระดับที่ k
- $(BC)_{jk}$ หมายถึง อันตรกิริยาของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP ระดับที่ j
 และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานคาร์บอนชนิดหนึ่งหลายชั้น
 ที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้ว ระดับที่ k
- $(ABC)_{ijk}$ หมายถึง อันตรกิริยาของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i อุณหภูมิ
 พลาสติกหลอม ระดับที่ j และปัจจัยความเร็วฉีดยีน ระดับที่ k
- ε_{ijklm} หมายถึง ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full Factorial) กรณี
 พิจารณาผลตอบสนอง คือค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus; MPa)

1. สมมติฐานการทดสอบ (Hypothesis Test) คือ

1.1 กรณีทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง

1.2 กรณีทดสอบสมมติฐานของอันตรกิริยา

H_0 : อันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง

H_1 : อันตรกิริยามีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง

2. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล

ตารางที่ 6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่ามอดูลัสของยัง

แหล่งความ ผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Main Effects					
A	2	2395207	1197604	2940.18	0.000
B	2	166437	83218	204.31	0.000
C	1	69685	69685	171.08	0.000
Interactions					
A*B	4	73468	18367	45.09	0.000
A*C	2	12641	6321	15.52	0.000
B*C	2	2066	1033	2.54	0.086
A*B*C	4	3235	809	1.99	0.106
Error	72	29327	407		
Total	89	2752066			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 6 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่

2.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)

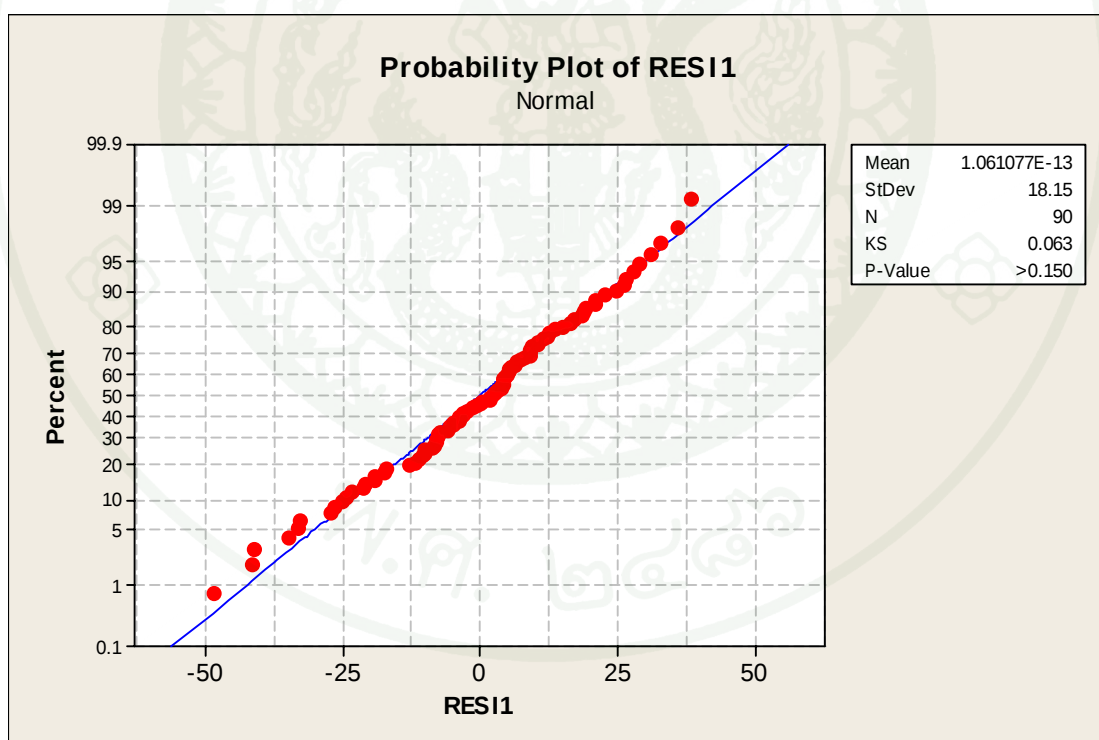
2.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว (AC)

3. ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual analysis) ซึ่งถ้าหากแบบจำลองถูกต้องความคลาดเคลื่อนจะต้องไม่มีรูปแบบ โดยมีการตรวจสอบสมบัติของค่าคลาดเคลื่อน 3 ดังนี้

3.1 การทดสอบการแจกแจงปกติ

ภายใต้สมมติฐาน (Assumption) ที่ว่า “เทอมของความผิดปกติ (Error term) ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)” ซึ่งสามารถตรวจสอบจากการพล็อตความคลาดเคลื่อนลงบนกราฟการแจกแจงแบบปกติ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่ามอดูลัสของยัง

จากการทดสอบของ Kolmogorov–Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

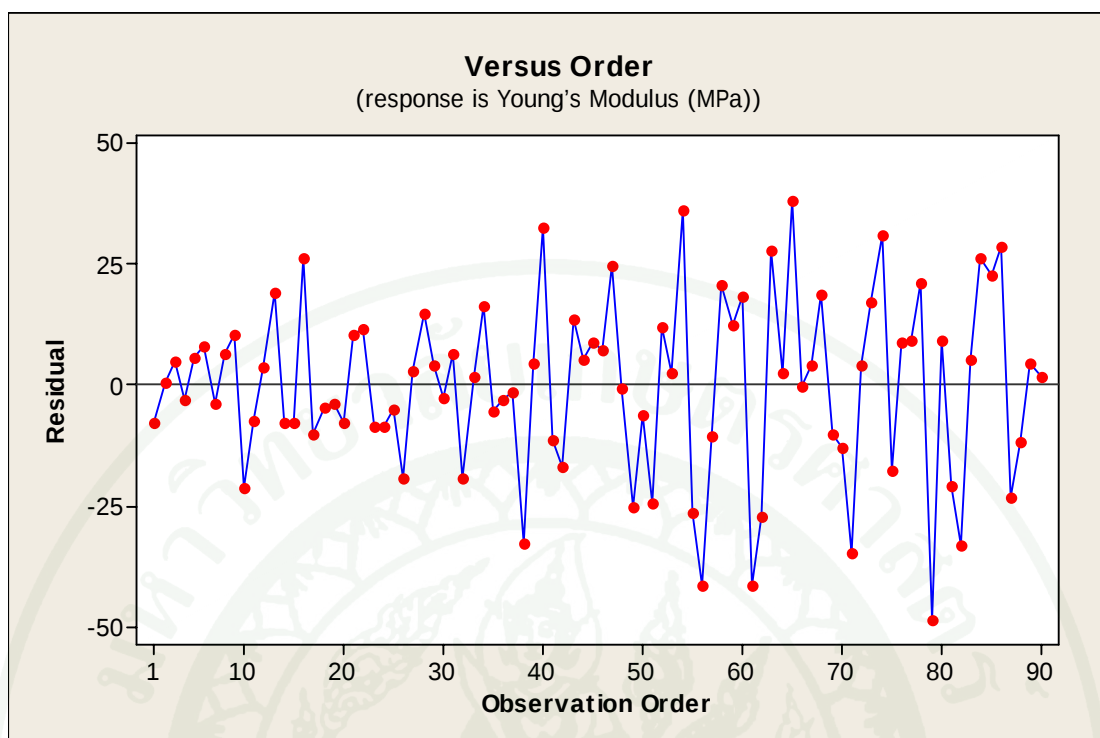
H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพข้างต้นพบว่าเทอมของความผิดปกติ น่าจะมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากลักษณะจุดที่ปรากฏในแผนภาพส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ในแนวเส้นตรง และเมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ได้จากภาพที่ 20 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.2 สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า “เทอมของความผิดปกติต้องไม่มีความสัมพันธ์กัน” กล่าวคือ ข้อมูลแต่ละตัวต้องเป็นอิสระต่อกันซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับ ลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) ดังภาพที่ 21

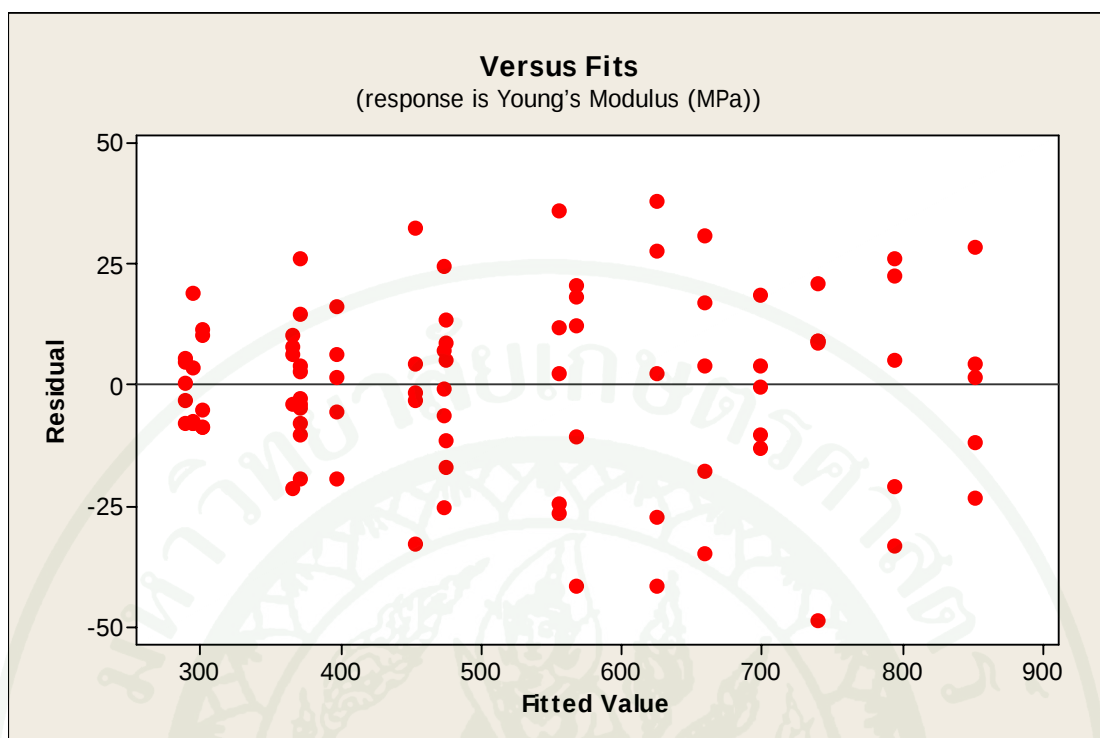


ภาพที่ 21 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียลของค่ามอดูลัสของยัง

จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

3.3 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า “ความผิดปกติต้องมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และต้องมีความแปรปรวนคงที่” ซึ่งถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้วส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าของผลตอบสนองพยากรณ์ (Predicted Response) ด้วย และลักษณะจุดที่ปรากฏในแผนภาพจะต้องมีลักษณะการกระจายเท่าๆ กันรอบค่าศูนย์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ (Fitted Value) ดังภาพที่ 22



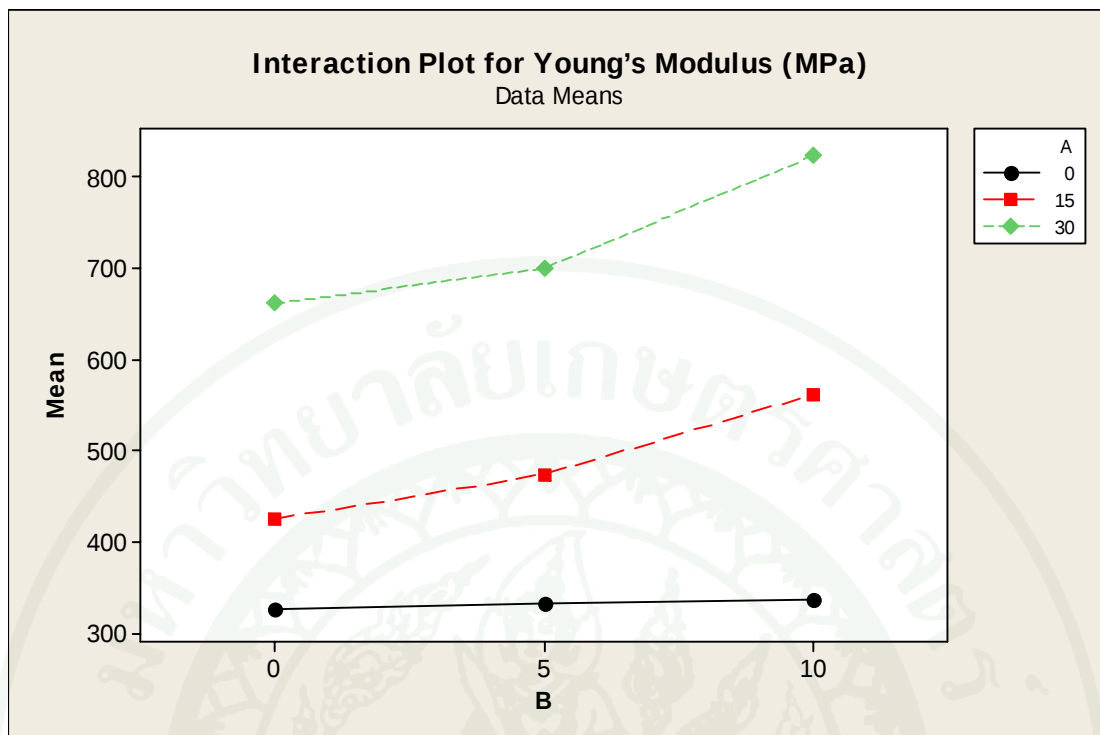
ภาพที่ 22 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง

จากภาพที่ 22 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

4. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ข้างต้น ดังตารางที่ 6 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่ามอดูลัสของยัง ได้ผลดังนี้

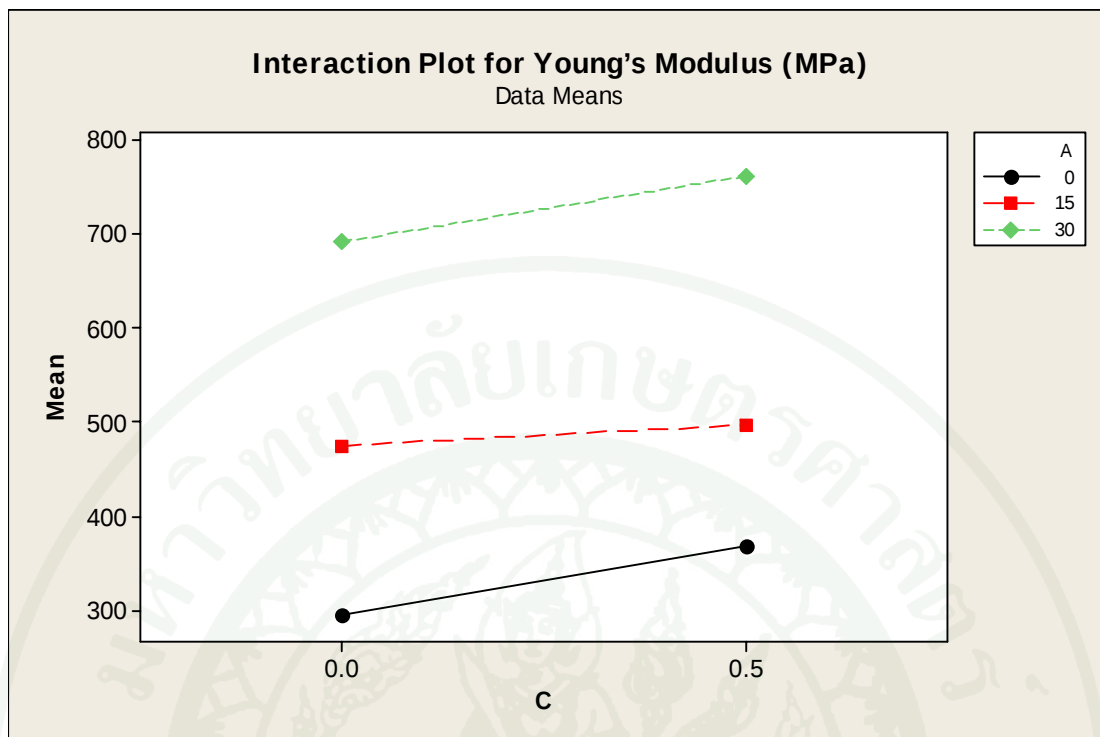
4.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)



ภาพที่ 23 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง

จากภาพที่ 23 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับสูง คือ ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย เท่ากับ 30 %wt และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP เท่ากับ 10 %wt จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น

4.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว (AC)



ภาพที่ 24 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่ามอดูลัสของยัง

จากภาพที่ 24 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองที่ระดับสูง คือ ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย เท่ากับ 30 %wt และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว เท่ากับ 0.5 %wt จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots สรุปได้ว่าที่ให้ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ผลของค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ผลของค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด

ตัวแปรตอบสนอง	ปริมาณเส้นใยชานอ้อย (A)	ปริมาณ MAPP (B)	ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (C)
มอดูลัสของยัง	30	10	0.5

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full Factorial)
กรณีพิจารณาผลตอบแทน คือ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa)

1. สมมติฐานการทดสอบ (Hypothesis Test) คือ

1.1 กรณีทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

1.2 กรณีทดสอบสมมติฐานของอันตรกิริยา

H_0 : อันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

H_1 : อันตรกิริยามีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

2. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล

ตารางที่ 8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความแข็งแรงดึง

แหล่งความ ผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Main Effects					
A	2	459.817	229.909	814.64	0.000
B	2	25.255	12.627	44.74	0.000
C	1	84.895	84.895	300.81	0.000
Interactions					
A*B	4	34.599	8.650	30.65	0.000
A*C	2	14.088	7.044	24.96	0.000
B*C	2	17.368	8.684	30.77	0.000
A*B*C	4	2.508	0.627	2.22	0.075
Error	72	20.320	0.282		
Total	89	658.850			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 8 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่

2.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)

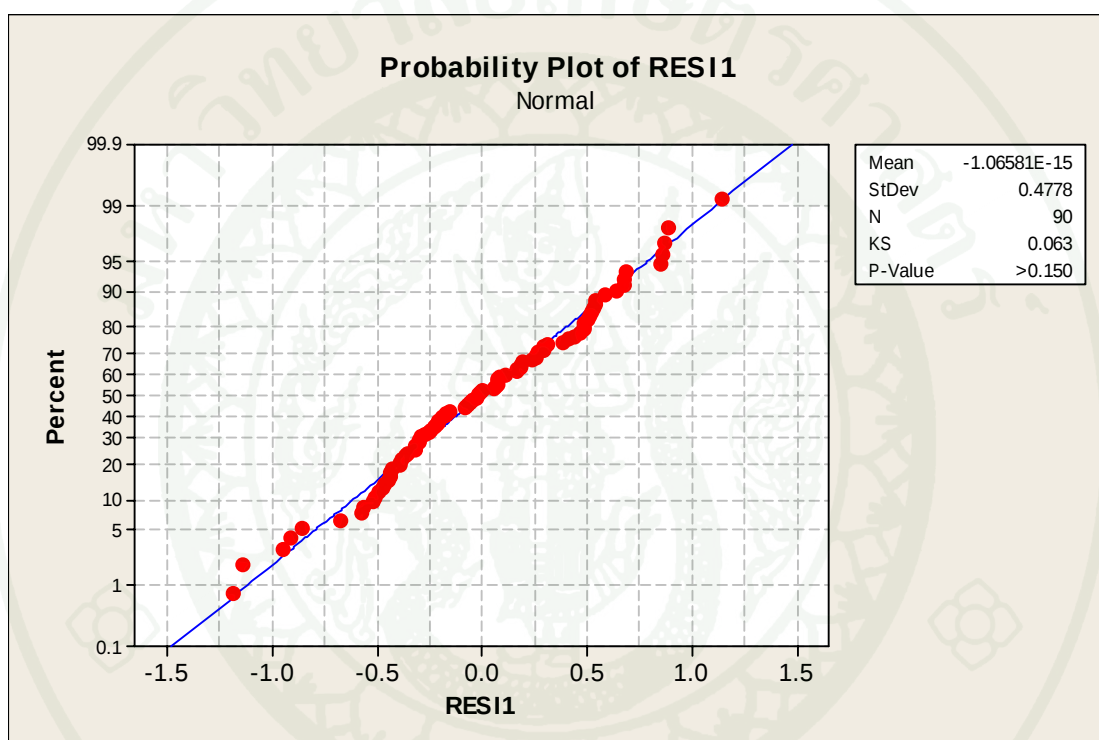
2.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว (AC)

2.3 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว (BC)

3. ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

3.1 การทดสอบการแจกแจงปกติ

สามารถตรวจสอบจากการพล็อตความคลาดเคลื่อนลงบนกราฟการแจกแจงแบบปกติดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่าความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบของ Kolmogorov–Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

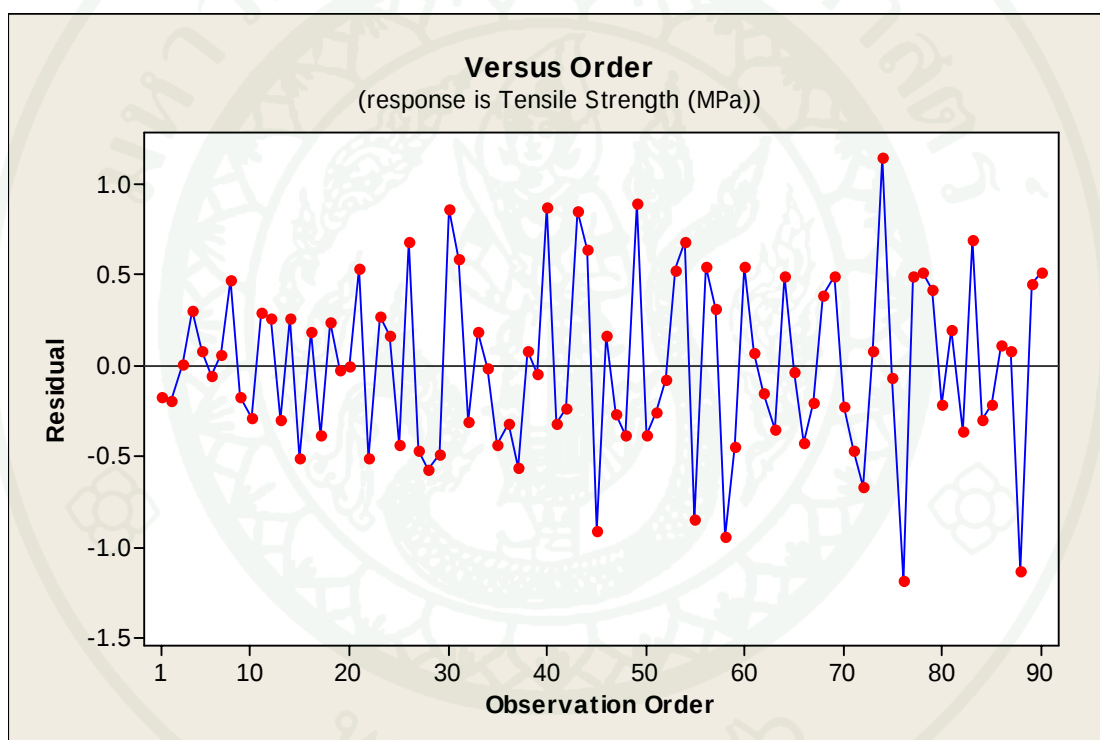
H_1 : ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพข้างต้นพบว่าเทอมของความผิดปกติ น่าจะมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากลักษณะจุดที่ปรากฏในแผนภาพส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ในแนวเส้นตรง และเมื่อพิจารณาค่า

P-Value ที่ได้จากภาพที่ 25 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.2 สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

สามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) ดังภาพที่ 26



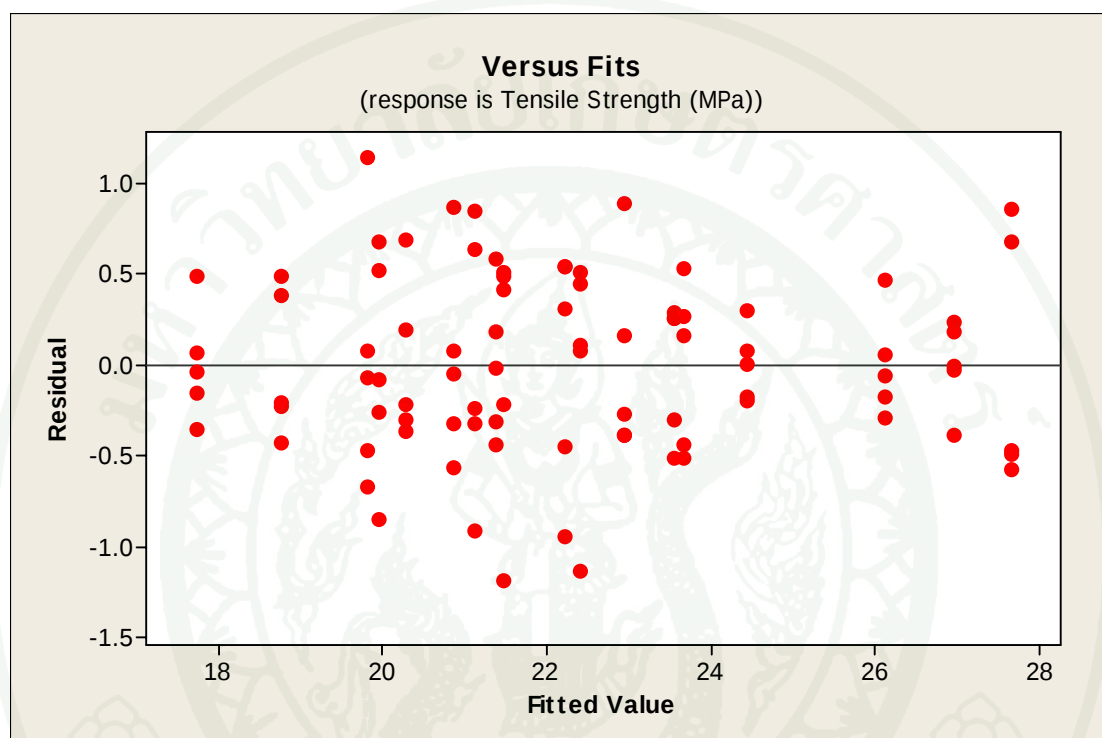
ภาพที่ 26 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.3 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

สามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ (Fitted Value)

ดั่งภาพที่ 27



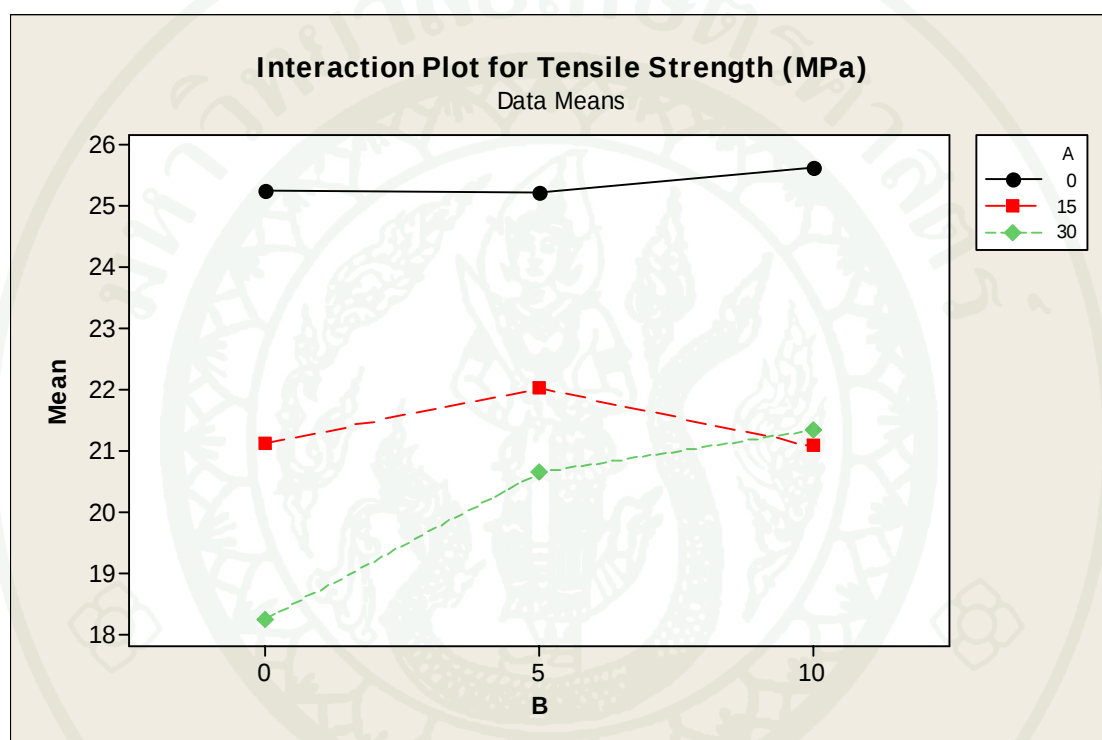
ภาพที่ 27 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 27 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ไ้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

4. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ข้างต้น ดังตารางที่ 8 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าความแข็งแรงดึง ได้ผลดังนี้

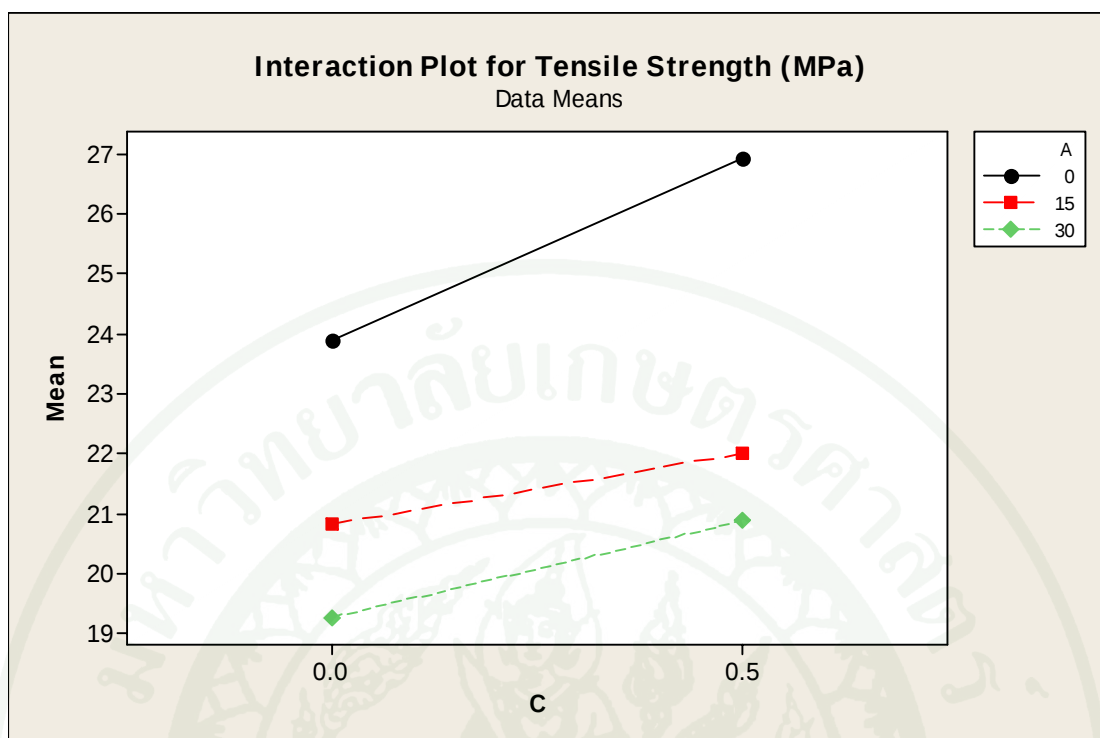
4.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)



ภาพที่ 28 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ของค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 28 พบว่าการกำหนดค่าของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยเท่ากับ 0 %wt (ระดับต่ำ) และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP เท่ากับ 10 %wt (ระดับสูง) จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

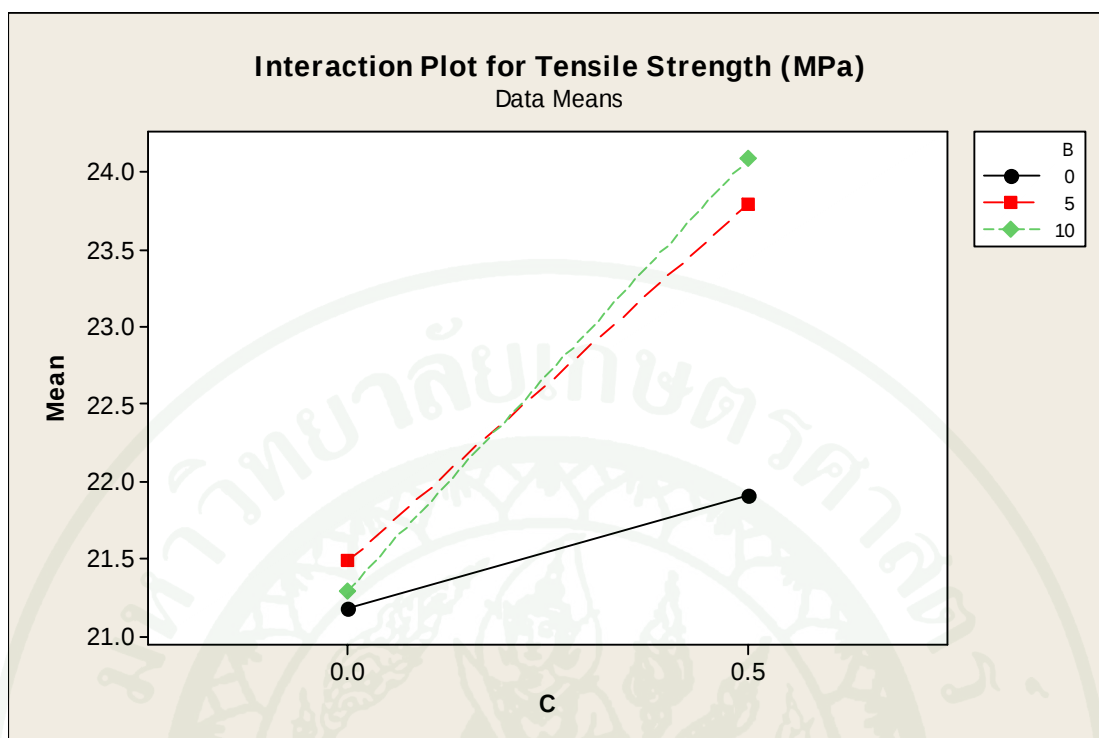
4.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว (AC)



ภาพที่ 29 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูป แล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียลของค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 29 พบว่าการกำหนดค่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย เท่ากับ 0 %wt (ระดับต่ำ) และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้วเท่ากับ 0.5%wt จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

4.3 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดย น้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว (BC)



ภาพที่ 30 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียลของค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 30 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับสูง คือ ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP เท่ากับ 10 %wt และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว เท่ากับ 0.5%wt จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots สรุปได้ว่า ปัจจัยที่ให้ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ผลของค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด

ตัวแปรตอบสนอง	ปริมาณเส้นใยชาน อ้อย (A)	ปริมาณ MAPP (B)	ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้น (C)
ความแข็งแรงดึง	0	10	0.5

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ($2^1 \cdot 3^2$ Full Factorial)
 กรณีพิจารณาผลตอบแทน คือ ค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength; Kg-cm)

1. สมมติฐานการทดสอบ (Hypothesis Test) คือ

1.1 กรณีทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก

1.2 กรณีทดสอบสมมติฐานของอันตรกิริยา

H_0 : อันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก

H_1 : อันตรกิริยามีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก

2. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล

ตารางที่ 10 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความทนแรงกระแทก

แหล่งความ ผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
Main Effects					
A	2	12.2397	6.1198	71.36	0.000
B	2	4.1826	2.0913	24.39	0.000
C	1	2.5604	2.5604	29.86	0.000
Interactions					
A*B	4	1.3316	0.3329	3.88	0.007
A*C	2	0.6482	0.3241	3.78	0.027
B*C	2	0.8980	0.4490	5.24	0.008
A*B*C	4	0.2413	0.0603	0.70	0.592
Error	72	6.1746	0.0858		
Total	89	28.2762			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 10 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ได้แก่

2.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)

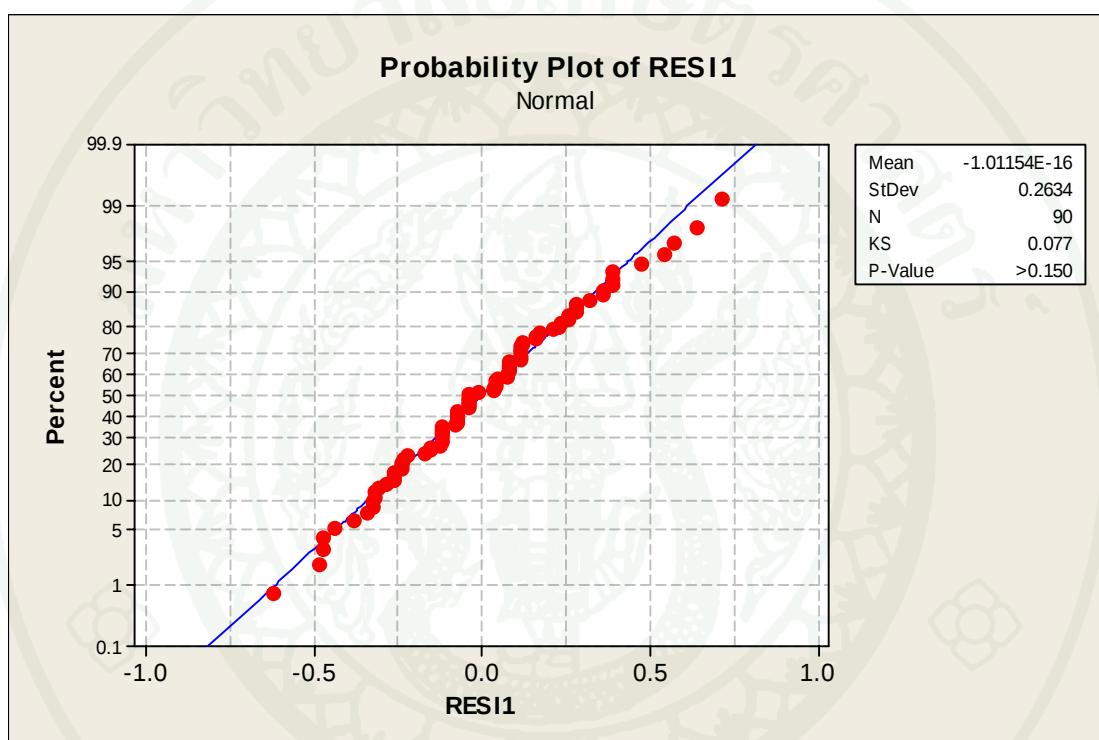
2.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว (AC)

2.3 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้ว (BC)

3. ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

3.1 การทดสอบการแจกแจงปกติ

สามารถตรวจสอบจากการพล็อตความคลาดเคลื่อนลงบนกราฟการแจกแจงแบบปกติ ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่าความทนแรงกระแทก

จากการทดสอบของ Kolmogorov – Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

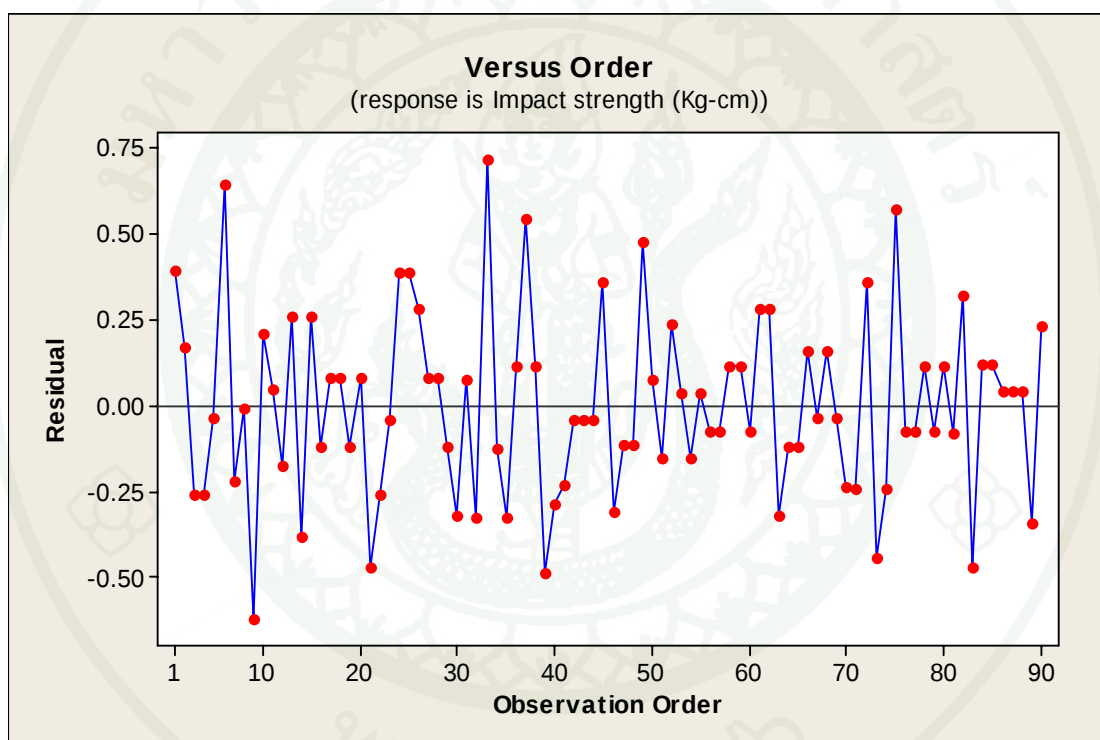
H_1 : ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพข้างต้นพบว่าเทอมของความผิดปกติ น่าจะมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากลักษณะจุดที่ปรากฏในแผนภาพส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ในแนวเส้นตรง และเมื่อพิจารณาค่า

P-Value ที่ได้จากภาพที่ 31 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.2 สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

สามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) ดังภาพที่ 32



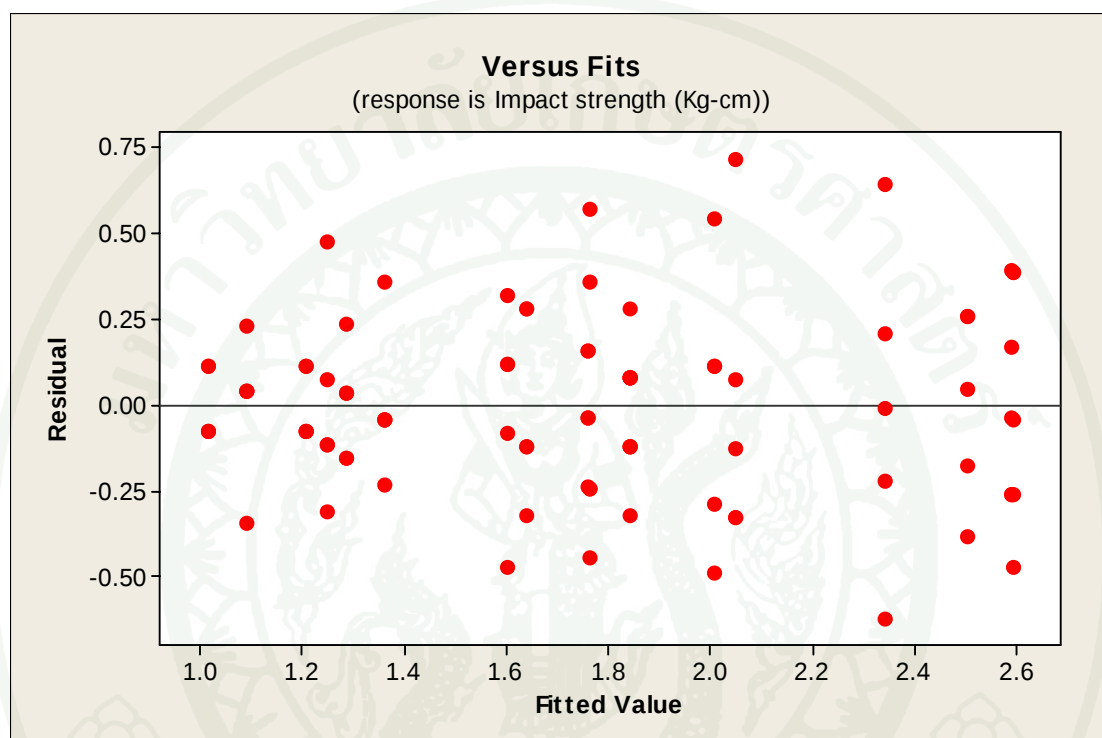
ภาพที่ 32 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่าความทนแรงกระแทก

จากภาพที่ 32 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.3 สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

สามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ (Fitted Value)

ดั่งภาพที่ 33



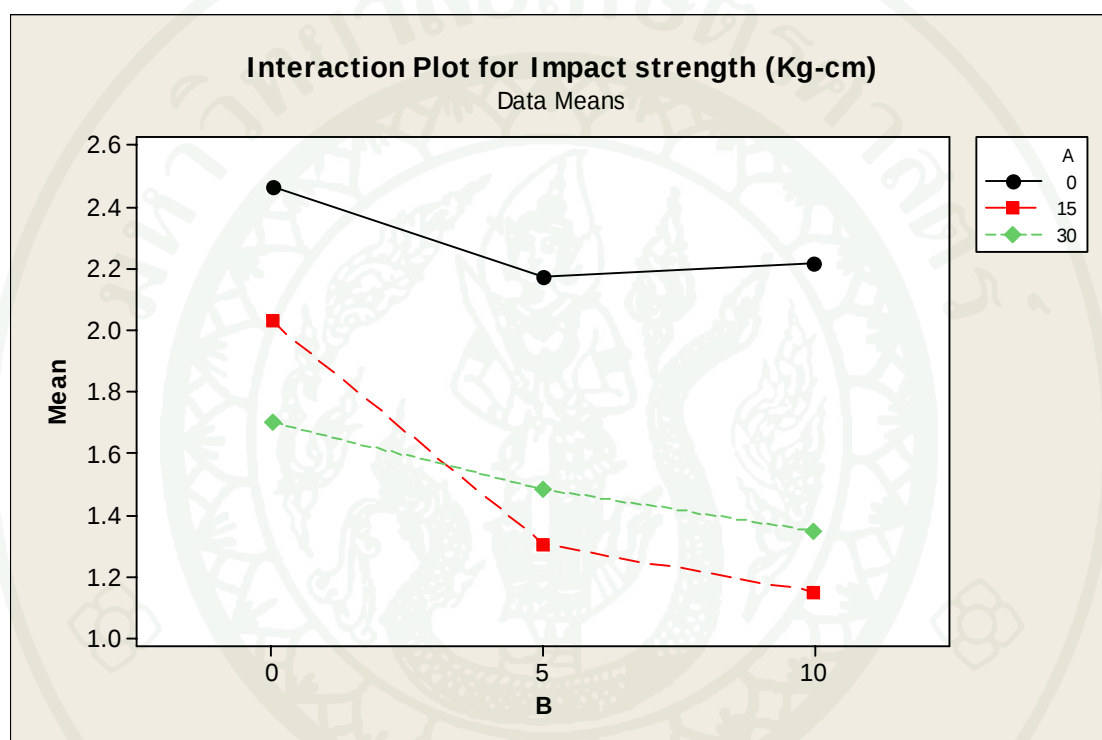
ภาพที่ 33 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก

จากภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

4. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลองแบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของค่าความทนแรงกระแทก โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล ข้างต้น ดังตารางที่ 10 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ทั้งหมดมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าความทนแรงกระแทก ได้ผลดังนี้

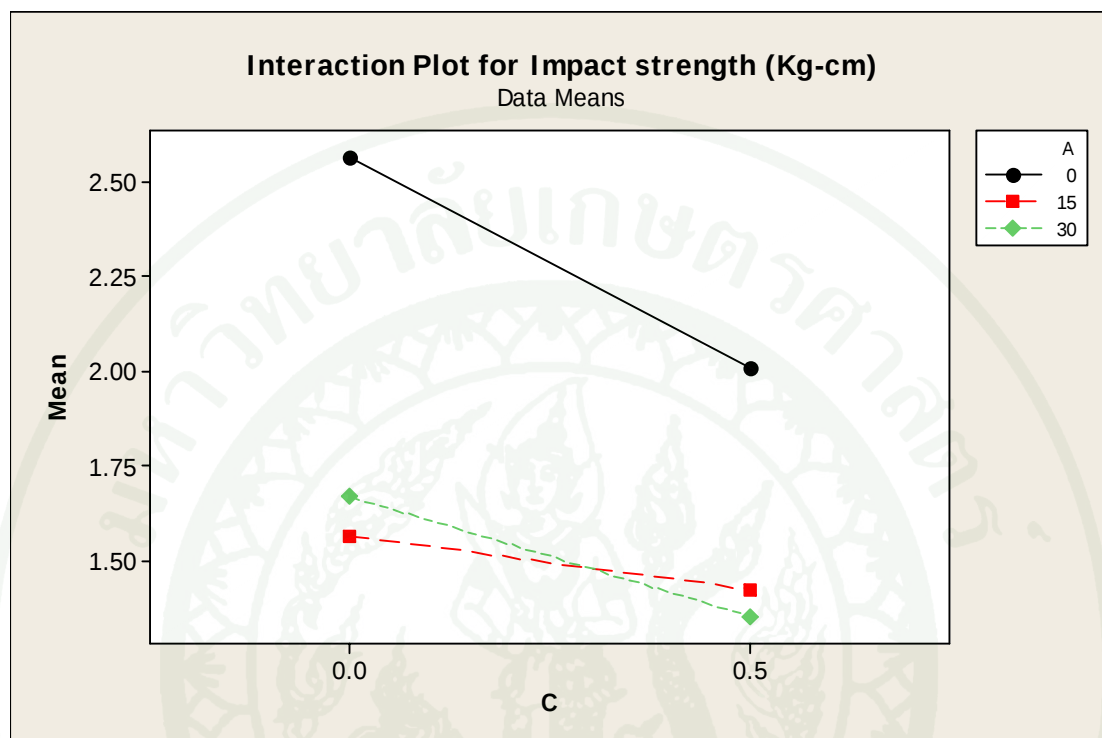
4.1 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)



ภาพที่ 34 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลของค่าความทนแรงกระแทก

จากภาพที่ 34 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับต่ำ คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยเท่ากับ 0 %wt และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP เท่ากับ 0 %wt จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

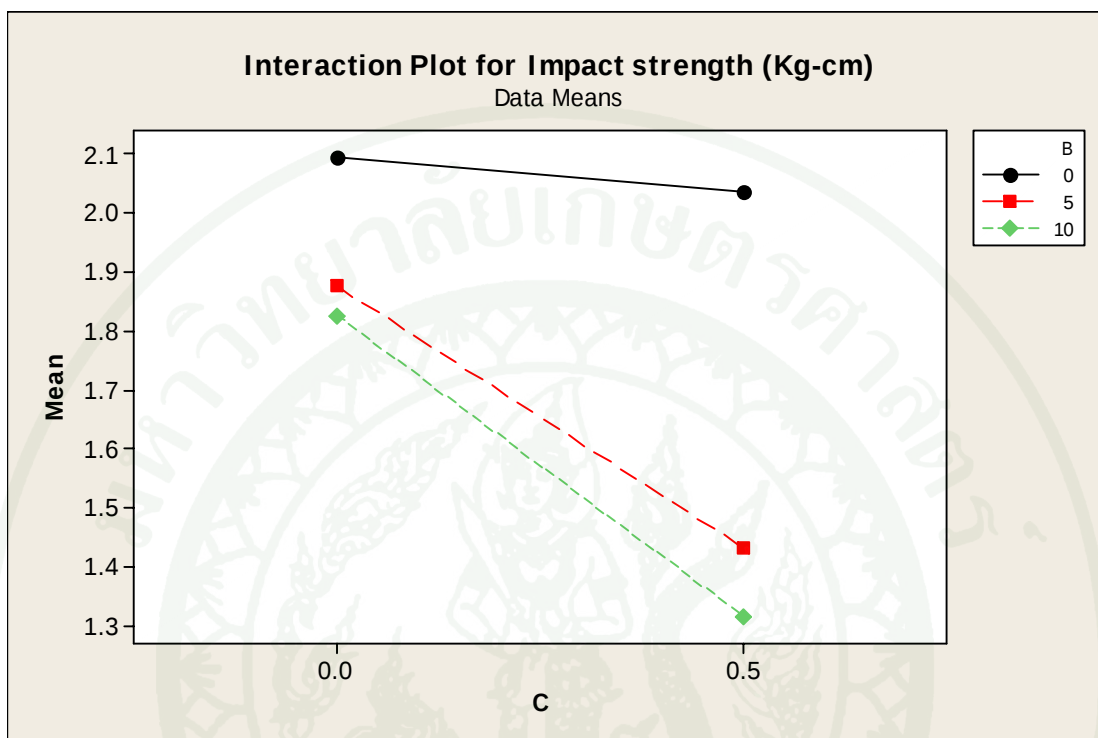
4.2 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว (AC)



ภาพที่ 35 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียลของค่าความทนแรงกระแทก

จากภาพที่ 35 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับต่ำ คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยเท่ากับ 0 %wt และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้วเท่ากับ 0 %wt จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

4.3 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว (BC)



ภาพที่ 36 กราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้ว สำหรับการทดลองแบบ แบบ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียลของค่าความทนแรงกระแทก

จากภาพที่ 36 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับต่ำ คือ ที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP เท่ากับ 0 %wt และ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยื่นรูปแล้วเท่ากับ 0 %wt จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทก โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเข้ามาช่วย ซึ่งปัจจัยที่นำมาศึกษา ได้แก่ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อย ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยาขึ้นรูปแล้ว จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 15.1.1 สามารถสรุปได้ดังนี้

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง

จากการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง โดยใช้แผนการ $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)
2. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยาขึ้นรูปแล้ว (AC)

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง โดยใช้แผนการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)

2. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้ว (AC)

3. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้ว (BC)

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก

จากการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก โดยใช้แผนการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียลพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทก คือ อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP (AB)

2. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยจากชานอ้อยและปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้ว (AC)

3. อันตรกิริยาระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ MAPP และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนานโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผ่านการฉีดยีนรูปแล้ว (BC)

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและค่าพารามิเตอร์

จากผลการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล และการพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots สามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 11 เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนอง	ปริมาณเส้นใยชาน อ้อย (A)	ปริมาณ MAPP (B)	ปริมาณท่อนานโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้น (C)
มอดูลัสของยัง	30	10	0.5
ความแข็งแรงดึง	0	10	0.5
ความทนแรงกระแทก	0	0	0

จากนั้นทำการทดลองที่เงื่อนไขดังกล่าวเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบ t หนึ่งตัวอย่าง (One sample t-test) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) เท่ากับ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 12, 13 และ 14

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 30 %wt,
B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย (%wt)	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความ เชื่อมั่นที่ 95%
มอดูลัสของยัง (MPa)	5	842.06	12.61	5.64	(826.40, 857.71)

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt,
B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย (%wt)	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความ เชื่อมั่นที่ 95%
ความแข็งแรงดึง (MPa)	5	28.06	0.17	0.08	(27.85, 28.28)

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt,
B = 0 %wt และ C = 0 %wt

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย (%wt)	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความ เชื่อมั่นที่ 95%
ความทนแรงกระแทก (kg-cm)	5	2.29	0.1466	0.0656	(2.1079, 2.4721)

นอกจากนี้ยังพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสของยังให้สูงขึ้นถึง 2.96 เท่าและค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นร้อยละ 13.24 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของเส้นใยจากชานอ้อย หรืออาจนำเส้นใยจากธรรมชาติชนิดอื่นๆ ที่มีมากในท้องถิ่นนั้นมาเป็นส่วนผสม และศึกษาถึงสภาวะการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบ เพื่อประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อม และลดปริมาณการใช้พลาสติกลง นอกจากนี้ อาจศึกษาถึงการใช้ พอลิเมอร์ชนิดอื่นนอกจาก พอลิโพรพิลีน มาเป็นส่วนผสม ซึ่งอาจทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติแตกต่างกัน สามารถนำไปใช้งานในแต่ละประเภทได้หลากหลายมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชูชาติ วงศ์จันทร์ และเฉลิม เพชรสุก. 2546. การศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมจีเถ้าขาน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐา ดวงดวงพัตรา. 2551. การศึกษาเพื่อกำหนดเงื่อนไขกระบวนการขึ้นรูปและคุณสมบัติที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บรรเลง ศรีนิล. 2548. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 17. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปรีชา เกียรติกระจาย และทรงกรด จารุสมบัติ. 2528. เคมีของเนื้อไม้. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. บุรณพากรูป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ปาณิกา เสนาะคนตรี. 2549. การพัฒนาประสิทธิภาพงานหล่อเครื่องประดับด้วยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง กรณีศึกษา: โรงงานเครื่องประดับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วิทยา ปั่นสุวรรณ, พิลาณี ไวถนอมสัจย์ และวิวัฒน์ อรรถพานุรักษ์. 2547. เฟอร์ฟุราลและแอลฟาเซลลูโลสจากขาน้อย. เอกสารโครงการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ.

วลัยภรณ์ อะนุ และสุจิตรา พงศ์รกุลพานิช. 2543. **พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างขยะพลาสติก พอลิโพรพิลีนและซีลีย.** รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุโกชก ดันพิชัย. 2548. **พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีนและขวดเตี๋ยแล้วที่บดด้วยเทคนิค พัลเวไรเซชัน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

American National Standard. 2003. **ASTM D638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** n.p.

_____. 2005. **ASTM D256-05 Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.** n.p.

Bao, S.P. and S.C. Tjong. 2007. Mechanical behaviors of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites: The effect of loading rate and temperature. **Materials Science & Engineering A** 233: 165-167.

Beckermann, G.W. and K.L. Pickering. 2008. Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: Fibre treatment and matrix modification. **Composites : Part A** 39: 979-988.

Chen, L., X.J. Pang and Z.L. Yu. 2007. Study on polycarbonate/multi-walled carbon nanotubes composite produced by melt processing. **Materials Science & Engineering A** 457: 287-291.

Durand, L.P. 2008. **Composite Materials Research Progress.** Nova Science Publishers, United Kingdom.

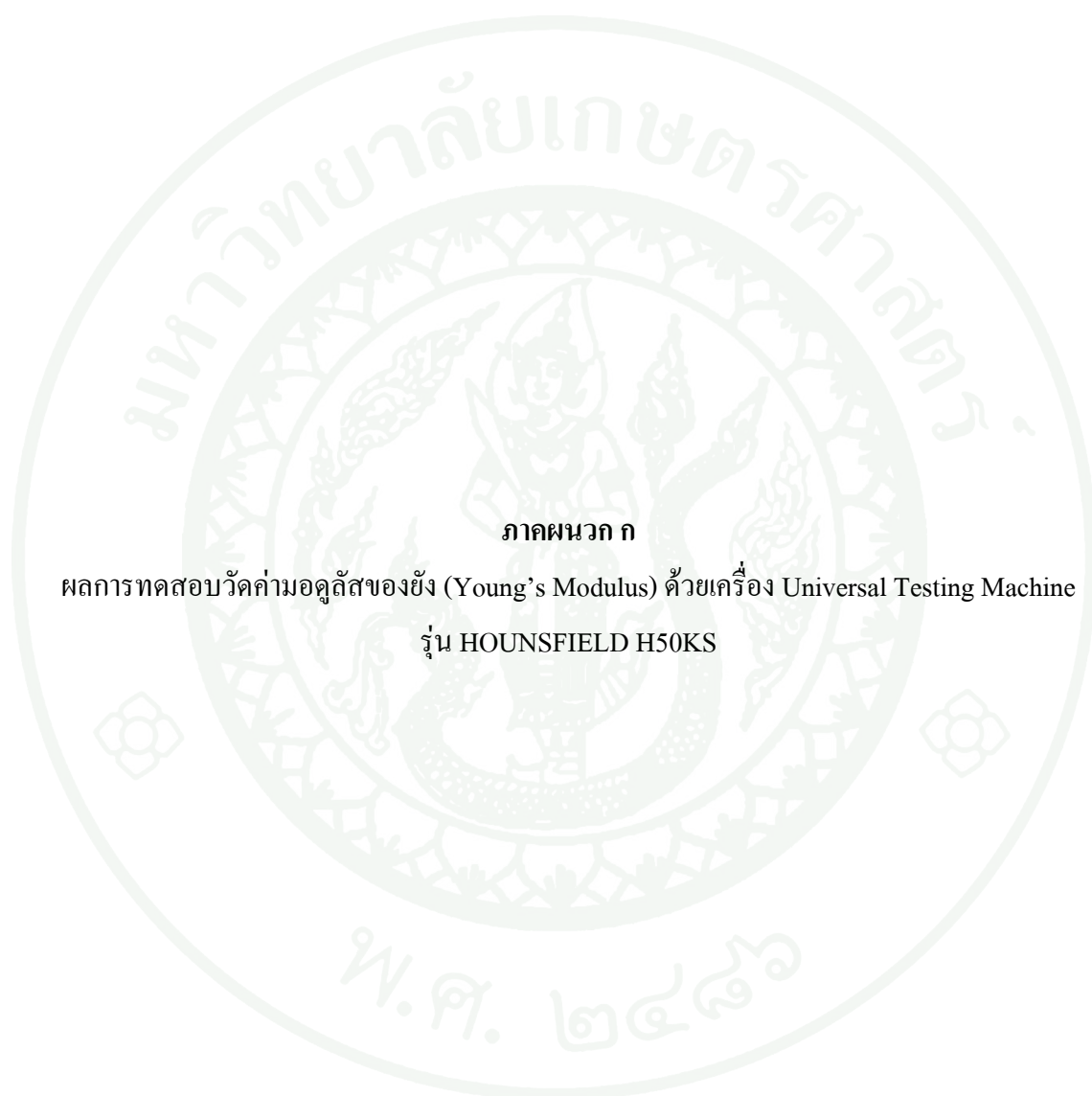
Ferdinand, R., C. Claude, K.O. Christipher and A.A. Lynden. 2003. **Principle of Polymer Systems.** 5th ed. Taylor&Francis Books, New York.

- Luz, S.M., A.R. Goncalves and Jr.A.P. Del'Arco. 2007. Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites. **Composite:Part A** 38: 1455-1461.
- _____, J.D. Tio, G.J.M. Rocha, A.R. Goncalves and Jr.A.P. Del'Arco. 2008. Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites. **Composite:Part A** 39: 1362-1369.
- Meyyappan, M. 2005. **Carbon Nanotubes Science and Applications**. CRC press, New York.
- Mohanty, S. and S.K. Nayak. 2007. Dynamic and steady state viscoelastic behavior and morphology of MAPP treated PP/sisal composites. **Material Science and Engineering A** 443: 202-208.
- Montgomery, D.C. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Mulinari D.R., H. J.C. Voorwald, M.O.H. Cioffi and M.C. Silva. 2008. **Reparation and Properties of HDPE/Sugarcane Bagasse Cellulose Composites Obtained from Thermokinetic mixer**. Carbohydrate Polymer.
- Qiu, W.L., T. Endo and T. Hirotsu. 2005. A novel technique for preparing of maleic anhydride grafted polyolefins. **European Polymer Journal** 41: 1979-1984.
- Sun, J.X., J.D. Tio, X.F. Sun, H. Zhao and R.C. Sun. 2004. Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. **Polymer Degradation and Stability** 84: 331-339
- Zhang, H. and Z. Zhang. 2007. Impact behaviour of polypropylene filled with multi-walled carbon nanotubes. **European Polymer Journal** 43: 3197-3207.

Zhao, P., K. Wang, H. Yang, Q. Zhang, R. Du and Q. Fu. 2007. Excellent tensile ductility in highly oriented injection-molded bars of polypropylene/carbon nanotubes composites. **Polymer** 48: 5688-5695.







ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine
รุ่น HOUNSFIELD H50KS

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 1

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			มอดูลัสของยัง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	280.16
2	0	0	0.5	372.58
3	0	5	0	286.28
4	0	5	0.5	396.72
5	0	10	0	310.90
6	0	10	0.5	351.60
7	15	0	0	402.55
8	15	0	0.5	449.35
9	15	5	0	462.95
10	15	5	0.5	479.87
11	15	10	0	530.62
12	15	10	0.5	525.79
13	30	0	0	582.62
14	30	0	0.5	698.20
15	30	5	0	624.38
16	30	5	0.5	747.63
17	30	10	0	773.46
18	30	10	0.5	880.49

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 2

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			มอดูลัสของยัง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	288.55
2	0	0	0.5	360.85
3	0	5	0	297.43
4	0	5	0.5	360.09
5	0	10	0	311.87
6	0	10	0.5	373.81
7	15	0	0	376.80
8	15	0	0.5	450.98
9	15	5	0	457.16
10	15	5	0.5	497.17
11	15	10	0	567.26
12	15	10	0.5	556.70
13	30	0	0	597.04
14	30	0	0.5	702.54
15	30	5	0	663.42
16	30	5	0.5	747.85
17	30	10	0	761.19
18	30	10	0.5	828.38

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 3

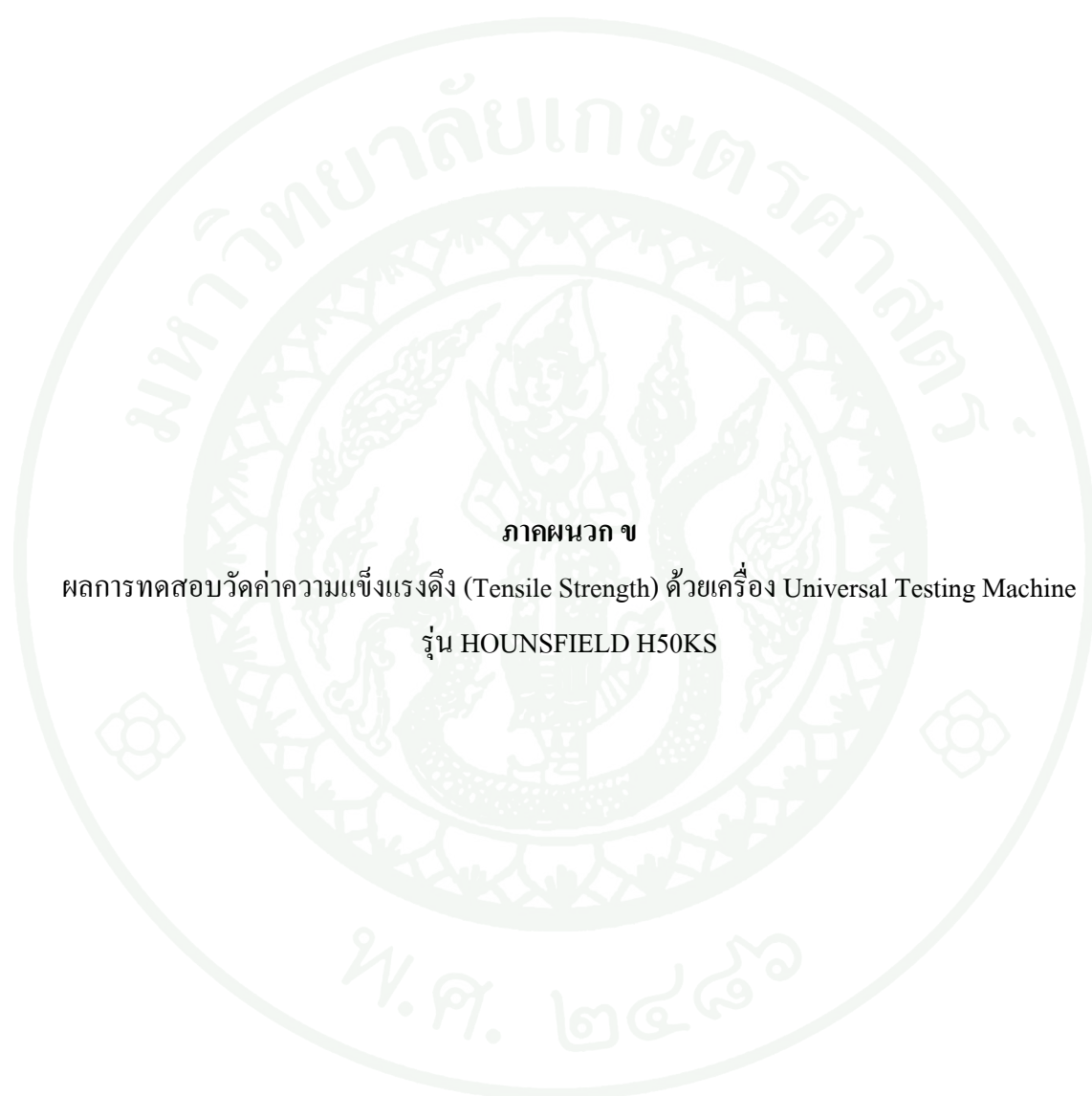
ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			มอดูลัสของยัง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	292.81
2	0	0	0.5	371.16
3	0	5	0	313.05
4	0	5	0.5	365.52
5	0	10	0	291.67
6	0	10	0.5	385.71
7	15	0	0	397.99
8	15	0	0.5	419.47
9	15	5	0	487.84
10	15	5	0.5	471.93
11	15	10	0	557.75
12	15	10	0.5	587.91
13	30	0	0	652.14
14	30	0	0.5	717.14
15	30	5	0	676.29
16	30	5	0.5	759.80
17	30	10	0	799.77
18	30	10	0.5	839.65

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 4

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			มอดูลัสของยัง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	285.10
2	0	0	0.5	374.91
3	0	5	0	285.82
4	0	5	0.5	366.59
5	0	10	0	291.90
6	0	10	0.5	374.80
7	15	0	0	412.62
8	15	0	0.5	456.83
9	15	5	0	479.54
10	15	5	0.5	447.31
11	15	10	0	591.19
12	15	10	0.5	579.74
13	30	0	0	626.77
14	30	0	0.5	688.13
15	30	5	0	690.30
16	30	5	0.5	690.06
17	30	10	0	820.69
18	30	10	0.5	855.95

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) รอบการทดลองที่ 5

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			มอดูลัสของยัง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	293.74
2	0	0	0.5	343.18
3	0	5	0	285.90
4	0	5	0.5	362.50
5	0	10	0	295.28
6	0	10	0.5	368.27
7	15	0	0	390.67
8	15	0	0.5	484.99
9	15	5	0	483.16
10	15	5	0.5	466.46
11	15	10	0	528.61
12	15	10	0.5	585.56
13	30	0	0	662.69
14	30	0	0.5	685.43
15	30	5	0	641.68
16	30	5	0.5	748.10
17	30	10	0	817.27
18	30	10	0.5	853.51



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

รุ่น HOUNSFIELD H50KS

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 1

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความแข็งแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	24.25
2	0	0	0.5	26.04
3	0	5	0	23.82
4	0	5	0.5	27.14
5	0	10	0	24.19
6	0	10	0.5	28.34
7	15	0	0	21.96
8	15	0	0.5	20.54
9	15	5	0	20.79
10	15	5	0.5	23.09
11	15	10	0	19.69
12	15	10	0.5	22.74
13	30	0	0	17.78
14	30	0	0.5	18.32
15	30	5	0	19.33
16	30	5	0.5	20.28
17	30	10	0	20.47
18	30	10	0.5	22.51

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 2

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความแข็งแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	24.23
2	0	0	0.5	26.16
3	0	5	0	23.79
4	0	5	0.5	26.57
5	0	10	0	23.14
6	0	10	0.5	27.19
7	15	0	0	21.06
8	15	0	0.5	20.30
9	15	5	0	20.87
10	15	5	0.5	22.66
11	15	10	0	19.86
12	15	10	0.5	22.51
13	30	0	0	17.56
14	30	0	0.5	18.54
15	30	5	0	19.13
16	30	5	0.5	21.95
17	30	10	0	19.91
18	30	10	0.5	22.47

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 3

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความแข็งแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	24.43
2	0	0	0.5	26.57
3	0	5	0	23.23
4	0	5	0.5	27.19
5	0	10	0	23.92
6	0	10	0.5	27.08
7	15	0	0	21.56
8	15	0	0.5	20.94
9	15	5	0	21.96
10	15	5	0.5	22.54
11	15	10	0	20.47
12	15	10	0.5	21.25
13	30	0	0	17.36
14	30	0	0.5	19.13
15	30	5	0	19.88
16	30	5	0.5	21.97
17	30	10	0	20.96
18	30	10	0.5	21.26

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 4

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความแข็งแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	24.72
2	0	0	0.5	25.93
3	0	5	0	23.79
4	0	5	0.5	26.93
5	0	10	0	23.82
6	0	10	0.5	27.17
7	15	0	0	21.36
8	15	0	0.5	20.81
9	15	5	0	21.75
10	15	5	0.5	23.82
11	15	10	0	20.62
12	15	10	0.5	21.75
13	30	0	0	18.20
14	30	0	0.5	19.23
15	30	5	0	20.94
16	30	5	0.5	21.88
17	30	10	0	19.97
18	30	10	0.5	22.84

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) รอบการทดลองที่ 5

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความแข็งแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
1	0	0	0	24.50
2	0	0	0.5	25.81
3	0	5	0	23.02
4	0	5	0.5	26.95
5	0	10	0	23.22
6	0	10	0.5	28.52
7	15	0	0	20.94
8	15	0	0.5	21.73
9	15	5	0	20.20
10	15	5	0.5	22.54
11	15	10	0	19.09
12	15	10	0.5	22.74
13	30	0	0	17.67
14	30	0	0.5	18.52
15	30	5	0	19.73
16	30	5	0.5	21.25
17	30	10	0	20.06
18	30	10	0.5	22.91

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ด้วยเครื่องทดสอบ

ความทนแรงกระแทก Impact Tester รุ่น GT-7045-I

พ.ศ. ๒๕๕๖

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 1

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
	A	B	C	
1	0	0	0	2.98
2	0	0	0.5	2.98
3	0	5	0	2.55
4	0	5	0.5	1.72
5	0	10	0	2.12
6	0	10	0.5	2.12
7	15	0	0	2.12
8	15	0	0.5	2.12
9	15	5	0	1.13
10	15	5	0.5	0.94
11	15	10	0	1.13
12	15	10	0.5	0.94
13	30	0	0	1.92
14	30	0	0.5	1.92
15	30	5	0	1.52
16	30	5	0.5	1.13
17	30	10	0	1.52
18	30	10	0.5	1.13

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 2

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
	A	B	C	
1	0	0	0	2.76
2	0	0	0.5	2.12
3	0	5	0	2.33
4	0	5	0.5	1.92
5	0	10	0	2.33
6	0	10	0.5	1.92
7	15	0	0	1.72
8	15	0	0.5	2.55
9	15	5	0	1.32
10	15	5	0.5	1.13
11	15	10	0	1.52
12	15	10	0.5	0.94
13	30	0	0	1.92
14	30	0	0.5	1.72
15	30	5	0	2.12
16	30	5	0.5	1.13
17	30	10	0	1.92
18	30	10	0.5	1.13

ตารางผนวกที่ ค3 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 3

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
	A	B	C	
1	0	0	0	2.33
2	0	0	0.5	2.33
3	0	5	0	2.76
4	0	5	0.5	1.92
5	0	10	0	2.55
6	0	10	0.5	1.92
7	15	0	0	2.76
8	15	0	0.5	2.12
9	15	5	0	1.32
10	15	5	0.5	1.13
11	15	10	0	1.32
12	15	10	0.5	1.13
13	30	0	0	1.32
14	30	0	0.5	1.92
15	30	5	0	1.32
16	30	5	0.5	1.32
17	30	10	0	1.13
18	30	10	0.5	1.13

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 4

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
	A	B	C	
1	0	0	0	2.33
2	0	0	0.5	1.72
3	0	5	0	2.12
4	0	5	0.5	1.72
5	0	10	0	2.98
6	0	10	0.5	1.72
7	15	0	0	1.92
8	15	0	0.5	1.52
9	15	5	0	1.32
10	15	5	0.5	1.72
11	15	10	0	1.13
12	15	10	0.5	1.13
13	30	0	0	1.52
14	30	0	0.5	1.72
15	30	5	0	1.52
16	30	5	0.5	1.13
17	30	10	0	1.72
18	30	10	0.5	0.75

ตารางผนวกที่ ค5 ผลการทดสอบวัดค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) รอบการทดลองที่ 5

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย			ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
	A	B	C	
1	0	0	0	2.55
2	0	0	0.5	2.55
3	0	5	0	2.76
4	0	5	0.5	1.92
5	0	10	0	2.98
6	0	10	0.5	1.52
7	15	0	0	1.72
8	15	0	0.5	1.72
9	15	5	0	1.72
10	15	5	0.5	1.32
11	15	10	0	1.32
12	15	10	0.5	0.94
13	30	0	0	1.52
14	30	0	0.5	1.52
15	30	5	0	2.33
16	30	5	0.5	1.32
17	30	10	0	1.72
18	30	10	0.5	1.32



ภาคผนวก ง

ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟคทอเรียล ของแต่ละการทดลอง



ภาพผนวกที่ ๑1 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 1



ภาพผนวกที่ ๑2 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 2



ภาพผนวกที่ 33 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 3



ภาพผนวกที่ 34 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 4



ภาพผนวกที่ 5 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1:3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 5



ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1:3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 6



ภาพผนวกที่ ๗ ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง ๗



ภาพผนวกที่ ๘ ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง ๘



ภาพผนวกที่ ๙ ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง ๙



ภาพผนวกที่ ๑๐ ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง ๑๐



ภาพผนวกที่ 11 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 11



ภาพผนวกที่ 12 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 12



ภาพผนวกที่ 13 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 13



ภาพผนวกที่ 14 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 14



ภาพผนวกที่ 15 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง 15



ภาพผนวกที่ 16 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟลททอเรียล
ของการทดลอง 16



ภาพผนวกที่ 17 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 17



ภาพผนวกที่ 18 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^1 \cdot 3^2$ แฟกทอเรียล
ของการทดลอง 18



ภาคผนวก จ
แสดงข้อมูลยืนยันผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ จ1 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 30 %wt,
B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt

ชิ้นงานที่	มอดูลัสของยัง (MPa)
1	832.63
2	827.98
3	839.42
4	854.91
5	855.35

ตารางผนวกที่ จ2 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt,
B = 10 %wt และ C = 0.5 %wt

ชิ้นงานที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)
1	28.06
2	27.87
3	28.28
4	27.92
5	28.19

ตารางผนวกที่ จ3 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด A = 0 %wt,
B = 0 %wt และ C = 0 %wt

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (kg-cm)
1	2.18
2	2.42
3	2.36
4	2.40
5	2.09

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายณณดินทร์ มัทธูรศ
 เกิดวันที่ 15 พฤศจิกายน 2526
 สถานที่เกิด จังหวัดสุรินทร์
 ประวัติการศึกษา วศ.บ. (การอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ตำแหน่งปัจจุบัน —
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน —
 ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ —
 ทักษะการศึกษาที่ได้รับ —