



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

Determination of Appropriate Processing Conditions for Injection Molding and Properties of Polypropylene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites Using Experimental Design

นามผู้วิจัย นางสาวณัฏฐา ดวงพัตรา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน
ผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

Determination of Appropriate Processing Conditions for Injection Molding and Properties of
Polypropylene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites Using Experimental Design

โดย

นางสาวณัฏฐา ดวงพัตรา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2552

ณัฐฐา ดวงพัตรา 2552: การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น โดยวิธีการออกแบบการทดลอง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 134 หน้า

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ผสมอนุภาคนาโน วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนถูกนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวได้จากการเตรียมส่วนผสมแบบหลอมละลาย (melt compounding) และขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูป การออกแบบการทดลองแบบเต็มขั้น 2^k (2^k Full Factorial design) ถูกนำมาใช้ในการวางแผนการทดลองและหาอิทธิพลของเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อคุณสมบัติทางกลและการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุเชิงประกอบผสมอนุภาคนาโน เงื่อนไขเหล่านี้ประกอบด้วย 5 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ (ก) ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น: ร้อยละ 0.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก (ข) อุณหภูมิกระบอกฉีด: 190 และ 220 องศาเซลเซียส (ค) ความเร็วฉีด: 25 และ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที (ง) ความเร็วรอบสกรู: 75 และ 227 รอบต่อนาที และ (จ) ความดันย้ำ: 45 และ 65 บาร์ ในขณะที่ความดันฉีดและเวลาเย็นตัวตั้งไว้ที่ 75 บาร์ และ 50 วินาที ตามลำดับ สำหรับทุกเงื่อนไขการฉีด

ชิ้นงานทดสอบถูกนำมาวัดค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) โดยใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัล (Universal Testing Machine) นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุเชิงประกอบผสมอนุภาคนาโน จากผลการทดสอบพบว่า วัสดุเชิงประกอบผสมพอลิโพรพิลีนและท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมีค่ามอดูลัสของยัง เท่ากับ 1,732 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 34 เมกะปาสคาล ในขณะที่พอลิโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 1,450 เมกะปาสคาล และ 28 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นในวัสดุเชิงประกอบพบว่า ค่ามอดูลัสของยังและความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้น จากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้นพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิกระบอกฉีด ความเร็วฉีด และความเร็วยรอบสกรู นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังแสดงให้เห็นถึง การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอในชิ้นงานทดสอบ

Nattha Duangphattra 2009: Determination of Appropriate Processing Conditions for Injection Molding and Properties of Polypropylene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites Using Experimental Design. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 134 pages.

This research work studies the effects of processing conditions on mechanical properties of polymer nanocomposites. Polypropylene (PP) nanocomposites reinforced with 0.5 and 2.5 %wt multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) were prepared via melt compounding and formed by injection molding. The 2^k Full Factorial design was used to plan the experiments and determine the influences of the processing conditions on mechanical properties and carbon nanotube dispersion in the nanocomposite. These conditions consist of five factors: (a) %wt content of MWCNTs: 0.5 and 2.5 %wt, (b) barrel temperature: 190 and 220 °C, (c) injection velocity: 25 and 45 mm/sec, (d) screw rotational speed: 75 and 227 rpm and (e) holding pressure: 45 and 65 bar while injection pressure and cooling time were set at 75 bar and 50 sec, respectively, for all conditions.

Young's modulus and tensile strength of the samples were examined by using a Universal Testing Machine (UTM). In addition, Scanning Electron Microscopy (SEM) was applied to study the dispersion of carbon nanotubes in the nanocomposite. The results showed that PP/MWCNT nanocomposites had Young's modulus of 1,732 MPa and tensile strength of 34 MPa while original PP had 1,450 MPa and 28 MPa, respectively. Therefore, the mechanical properties were improved significantly with the content of MWCNTs. Full Factorial experiments investigate that significant factors are %wt, barrel temperature, injection velocity, and screw rotational speed. Moreover, SEM showed that MWCNTs dispersed well in the test specimen.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา กรรมการที่ปรึกษา ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการทำงานวิจัย แนวทางการแก้ไขปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ศันสนีย์ สุภาภา ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมอันจะนำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณสมปอง อินทอง หัวหน้าฝ่ายพอลิเมอร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) และคุณวสันต์ ขอบคำ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงพนักงานสถาบันทุกท่าน ที่ได้ให้การช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา รวมทั้งญาติผู้ใหญ่ที่เคารพ ที่ให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้เสมอมา พร้อมทั้งขอบคุณพี่ชาย และเพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในหลายๆ ด้าน และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าจนมีความรู้ถึงปัจจุบัน

ณัฏฐา ดวงพัตรา

มกราคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	76
สรุป	76
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก รายละเอียดทั่วไปของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC	83
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบวัดค่าคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น HOUSFIELD H50KS	104
ภาคผนวก ค เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด	108
ภาคผนวก ง สถิติทดสอบและการตรวจเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน หลายตัวแปร	126
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบจำแนกสองทาง	35
2	คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนจากบริษัทผู้ผลิต	44
3	ระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแฟคทอเรียลเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย	46
4	ตารางออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย	47
5	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่ามอดูลัสของยัง	54
6	ค่าสังเกตไม่ปกติ (Unusual Observations) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย ของค่ามอดูลัสของยัง	55
7	Response Surface Regression สำหรับค่ามอดูลัสของยัง	56
8	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความแข็งแรงดึง	58
9	ค่าสังเกตไม่ปกติ (Unusual Observations) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย ของค่าความแข็งแรงดึง	59
10	Response Surface Regression สำหรับค่าความแข็งแรงดึง	61
11	ค่าของ Cross-Product ของอิทธิพลแต่ละปัจจัย	63
12	เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย	72
13	ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม	76
14	เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ต่างกัน	77
ตารางผนวกที่		
ก1	คุณสมบัติของชุดฉีดของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA250/50 CDC	84
ก2	คุณสมบัติของชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA250/50 CDC	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล	105
จ1 สรุปสถิติทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบจำแนกทางเดียว	128

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของธาตุคาร์บอนแบบต่างๆ (ก) เพชร (ข) กราไฟต์ (ค) ฟลูเลอร์รีน และ (ง) ท่อนาโนคาร์บอน	7
2 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น	8
3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว และลักษณะการม้วนแผ่นกราฟไฟต์เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว	9
4 สูตรโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	11
5 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก	15
6 จังหวะที่ 1 ปิดแม่พิมพ์	17
7 จังหวะที่ 2 ชุดฉีดเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์	18
8 จังหวะที่ 3 และ 4 ฉีดอัดรักษาความดัน	18
9 จังหวะที่ 5 และ 6 เป็นการหล่อเย็นชิ้นงานที่ฉีดเสร็จ และในขณะเดียวกันทำการป้อนพลาสติกเข้าเกลียวหนอนก่อนทำการหลอมใหม่	19
10 จังหวะที่ 7 ชุดฉีดถอยกลับ	19
11 จังหวะที่ 8 และ 9 แม่พิมพ์เปิดแล้วปลดชิ้นงานออก	20
12 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ (ก) แรงดึง (Tension) (ข) แรงกด(Compression) และ (ค) แรงเฉือน (Shear)	21
13 วิธีการทดสอบแรงดึง	23
14 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	23
15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบที่ไม่มีจุดคราก	25
16 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ของ (ก) วัสดุเปราะ และ (ข) วัสดุพลาสติก	26
17 Modulus of Toughness ของ (ก) วัสดุเหนียว และ (ข) วัสดุเปราะ	27
18 ปฏิกิริยา และพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต	28
19 (ก) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ (ข) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
20 (ก) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ (ข) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์	32
21 ชิ้นงานทดสอบรูปคัมเบลตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638	43
22 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน กรณีค่ามอดูลัสของยัง	65
23 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน กรณีค่าความแข็งแรงดึง	65
24 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต กรณีค่ามอดูลัสของยัง	66
25 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต กรณีค่าความแข็งแรงดึง	66
26 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล กรณีค่ามอดูลัสของยัง	67
27 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล กรณีค่าความแข็งแรงดึง	67
28 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก และ อุณหภูมิพลาสติกไหลม ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง	68
29 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก และ อุณหภูมิพลาสติกไหลม ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง	69
30 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหลม และ ความเร็วฉีด ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง	70
31 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหลม และ ความเร็วฉีด ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง	70
32 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหลม และ ความเร็วรอบสกรู ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง	71
33 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหลม และ ความเร็วรอบสกรู ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง	72
34 ภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายเท่ากับ 8000 เท่า ของวัสดุเชิงประกอบท่อนาโนคาร์บอนผสมพอลิโพรพิลีน	73
35 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุผสมที่กำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่าโดยที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุผสมที่กำลังขยาย เท่ากับ 1000 เท่า โดยที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก	75
 ภาพผนวกที่	
ก1 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น BA 250/50 CDC	85
ก2 ส่วนประกอบต่างๆ ของปุ่มกดควบคุมการทำงาน	86
ก3 ส่วนประกอบต่างๆ ของคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน	87
ก4 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F00-1	88
ก5 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F00-6	89
ก6 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F01	90
ก7 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F02	92
ก8 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F03	93
ก9 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F04	95
ก10 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F05	96
ก11 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F06	97
ก12 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F07	98
ก13 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F08	99
ก14 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F09	100
ก15 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F09 ในส่วนของระบบเป่าลม	102
ก16 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F14	102
ค1 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 1 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	109
ค2 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 2 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค3 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 3 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	110
ค4 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 4 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	110
ค5 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 5 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	111
ค6 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 6 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	111
ค7 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 7 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	112
ค8 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 8 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	112
ค9 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 9 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	113
ค10 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 10 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	113
ค11 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 11 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	114
ค12 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 12 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	114
ค13 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 13 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	115
ค14 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 14 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	115
ค15 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 15 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค16 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 16 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	116
ค17 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 17 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	117
ค18 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 18 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	117
ค19 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 19 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	118
ค20 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 20 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	118
ค21 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 21 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	119
ค22 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 22 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	119
ค23 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 23 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	120
ค24 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 24 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	120
ค25 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 25 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	121
ค26 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 26 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	121
ค27 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 27 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	122
ค28 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 28 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	122

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค29 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 29 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	123
ค30 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 30 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	123
ค31 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 31 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	124
ค32 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 32 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง	124
ค33 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองเพื่อ ยืนยันผลโดยมีการทำซ้ำ 5 ค่า	125

การกำหนดสถานะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ
พอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นโดยวิธีการออกแบบการทดลอง

**Determination of Appropriate Processing Conditions for Injection Molding and
Properties of Polypropylene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites
Using Experimental Design**

คำนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ วิศวกรรมมากยิ่งขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนเมตรจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมระบบที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล หรือการผสมวัสดุระดับนาโนเมตรซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบันคือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs)

การศึกษาวิจัยที่จะใช้ท่อนาโนคาร์บอน นำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เกิดขึ้นอย่างมากมาย เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วนความแข็งแรงเทียบกับน้ำหนักสูง และยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดี จึงสามารถนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล มีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ที่ได้มีน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพทางกลสูง มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ของ NASA ประสบความสำเร็จในการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมผสมลงในพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ ซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่นำไฟฟ้าและมีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักมากกว่าเหล็กได้

จากคุณสมบัติของวัสดุที่กล่าวข้างต้น จึงนำท่อนาโนคาร์บอนมาผสมรวมกับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้งานหลากหลายประเภท มีมวลโมเลกุลเบา มีคุณสมบัติทางกลดี เหนียว ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี ใสน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ โดยมีจุดประสงค์ของการผสมวัสดุเชิงประกอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ที่เปลี่ยนไปคือ คุณสมบัติทางกล และสัณฐานวิทยา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งอาจนำไปลดต้นทุนการผลิตได้

การออกแบบการทดลองและโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยการนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ และหาข้อสรุปว่าปัจจัยป้อนเข้า (Input Variable) ใดที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ให้ออกมา (Output Response) ซึ่งโดยส่วนใหญ่ลักษณะของกระบวนการเริ่มจากการรวมกันของปัจจัยป้อนเข้า (Input) ประกอบด้วย เครื่องจักร คน วิธีการ วัตถุดิบ และทรัพยากรอื่นๆผ่านเข้าไปยังกระบวนการและปัจจัยป้อนเข้าเหล่านั้นจะเปลี่ยนรูปออกมาเป็นผลลัพธ์ (Output) นอกจากนี้ยังสามารถเรียนรู้ผลกระทบต่างๆที่เกิดจากปัจจัยแต่ละประเภทได้ ซึ่งจะทำได้จะทำให้สามารถศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโดยการลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตและช่วยลดต้นทุนการผลิตโดยได้วัสดุเชิงประกอบที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ โดยมีอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอน และเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบที่ต่างกัน

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำท่อนาโนคาร์บอนและพอลิโพรพิลีน มาทำการฉีดขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบผสมอนุภาคนาโนเป็นชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบล ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) ของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) โดยมีการแปรเปลี่ยนค่าของปริมาณส่วนผสม และเงื่อนไขในการฉีดขึ้นรูป เพื่อหาค่าที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีผลของคุณสมบัติทางกลที่ดียิ่งขึ้น

การออกแบบการทดลองแบบเต็มขั้นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเริ่มจากการคัดเลือกปัจจัย เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มาจากสาเหตุที่ต่างกัน ทำการควบคุมปัจจัยที่มีสาเหตุหลักมาจากคน สาเหตุหลักจากเครื่องจักร และสาเหตุหลักจากวัตถุดิบไว้ โดยศึกษาเฉพาะสาเหตุหลักที่มาจากวิธีการ ซึ่งในที่นี้คือปัจจัยที่เกิดจากเงื่อนไขในการฉีดขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบผสมท่อนาโนคาร์บอน และเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านราคาของวัตถุดิบ จึงมีความจำเป็นต้องกรองปัจจัยที่เกิดจากวิธีการออกอีกชั้น โดยใช้การศึกษาและค้นคว้าจากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สามารถคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกล ได้เป็น 5 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ คือปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาผสม อุณหภูมิพลาสติกหลอม ความเร็วฉีด ความเร็วรอบสกรู และแรงดันอัด จากนั้นทำการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบผสมท่อนาโนคาร์บอนตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อศึกษาผลของค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร เพื่อศึกษาหาปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหาระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสมอนุภาคนาโน เพื่อแสดงถึงว่าปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนมีผลทำให้ค่าคุณสมบัติทางกลเปลี่ยนไปอีกด้วย

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหรียญ (2542) ได้นำการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาใช้ทดลองเปรียบเทียบส่วนผสมของสารแพคคาร์บูไรซิ่ง ที่ใช้ในการชุบเพื่ออบเพิ่มคุณสมบัติเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากสารแพคคาร์บูไรซิ่งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องนำเข้า จึงทำการทดลองผสมเองโดยทดลองผสมขึ้น 6 สูตรแล้วนำไปใช้ชุบเหล็กในสถานะที่ใช้งานจริง พบว่าส่วนผสมที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดและมีคุณภาพใกล้เคียงกับสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะประกอบไปด้วย ถ่านไม้ 70% ถ่านโค้ก 18% แบเรียมคาร์บอเนต 5% โซเดียมคาร์บอเนต 3% แคลเซียมคาร์บอเนต 2% และน้ำเหล็องน้ำตาล 2%

ชยันต์ (2548) ได้ทำการศึกษาหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตขึ้นส่วนฝาครอบส่วนระบายอากาศที่ผลิตจากกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อแก้ปัญหาชิ้นงานที่ฉีดไม่เต็มชิ้นงาน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง พบว่ามีปัจจัยหลักที่มีผลต่อการฉีดไม่เต็มชิ้นงานคือ ความดันฉีด พลาสติก ความเร็วฉีดพลาสติก ความเร็วรอบสกรู ความเร็วหลอมพลาสติก และอุณหภูมิภายในกระบอกฉีดส่วนกลาง

Rubin (1972) ได้ระบุในการพูดถึงปัญหาต่างๆในการฉีดพลาสติกที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ทำการฉีดพลาสติก และได้มีการระบุถึงสาเหตุของการเกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงานนั้นเกิดจากปัจจัยความดันในการฉีดพลาสติก อุณหภูมิในการหลอมพลาสติก และความเร็วของสกรู

Berins (1991) ได้กล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการฉีดพลาสติก และได้มีการอธิบายถึงเรื่องการฉีดไม่เต็มชิ้นงานในหัวข้อเรื่องทำอะไรไม่ให้เกิดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน โดยระบุถึงการพิจารณาในด้านต่างๆที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ซึ่งด้านที่ทำการพิจารณาคือ เครื่องจักร แม่พิมพ์ อุณหภูมิ และวัตถุดิบ โดยสามารถแยกพิจารณาสาเหตุจากทั้ง 4 ด้านได้ดังนี้ ระยะเวลาในการใช้ของเครื่องจักร การบำรุงรักษาเครื่องจักร ความดันในการฉีดพลาสติก เวลาในการฉีดพลาสติก ความเร็วในการฉีดพลาสติก อุณหภูมิภายในกระบอกฉีด (บริเวณส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง) อุณหภูมิของหัวฉีด (Nozzle temperature) อุณหภูมิในการหลอมพลาสติก และส่วนผสมของเม็ดพลาสติกที่ใช้

Hammel (2004) กล่าวว่า ท่อนาโนคาร์บอน และเส้นใยนาโนคาร์บอน ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านวัสดุศาสตร์ และจะถูกนำไปใช้ทางการค้ามากขึ้น ซึ่งทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องลดต้นทุนทางการผลิตในส่วนของวัตถุดิบ ในที่นี้คือเส้นใยนาโนคาร์บอน ซึ่งเขาได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนในต้นทุนที่ต่ำลงได้ โดยการลดอุณหภูมิ และอัตราการไหลในขณะทำการสังเคราะห์ ซึ่งส่งผลให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึงร้อยละ 70 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงการกระจายตัวของเส้นใยนาโนคาร์บอนในพอลิโพรพิลีนซึ่งสามารถนำไปผสมแล้วให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลงเป็น 10^4 โอห์มเซนติเมตร

Jeanvons (2004) ซึ่งเป็นตัวแทนของบริษัท Polybridge Training ได้กล่าวในการสัมมนาเรื่องการอบรมกระบวนการการฉีดพลาสติกว่า จากการที่บริษัทได้เป็นที่ปรึกษาและทำการแก้ไขปรับปรุงในโรงงานอุตสาหกรรมการฉีดพลาสติกเป็นจำนวนมาก ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดพลาสติกที่ผลิตภัณฑ์เกิดปัญหาจากการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลคือ ความเร็วในการฉีดพลาสติก ความดันในการฉีดพลาสติก และความเร็วในการหลอมพลาสติก

Zhang (2007) ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในการผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นกับพอลิโพรพิลีน โดยเปลี่ยนความยาวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นขนาด 1-2 ไมโครเมตร และ 5-15 ไมโครเมตรเพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระแทก ผลการทดสอบพบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดยาวกว่ามีผลทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สั้นกว่า การเพิ่มของความต้านทานการกระแทกถูกนำมาพิจารณาในการทดลองด้วยเนื่องจากจะช่วยให้การพิจารณาเกี่ยวกับความสามารถในการรับน้ำหนัก

Chen *et al.* (2007) ทำการผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่ปริมาณร้อยละ 1, 3, 5 และ 8 โดยน้ำหนัก กับพอลิคาร์บอเนต โดยใช้เครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ 220-250-270-285-285 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่า ที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึง เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 4.5 ของพอลิคาร์บอเนต และมีค่า elastic modulus เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของท่อนาโนคาร์บอน และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 5

Singjai (2007) ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ไนเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 18 ชั่วโมง ศึกษาท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ท่อที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20-50 นาโนเมตร

Zhao (2007) ทำการฉีดพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นให้เป็นแผ่นบางที่อุณหภูมิตั้งแต่กรวยเติมเม็ดพลาสติกจนถึงหัวฉีดเป็น 160-175-190-200-200-195 องศาเซลเซียสตามลำดับ ด้วยแม่พิมพ์ชนิดพิเศษ แล้วนำไปดูการกระจายตัวของวัสดุผสม ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล พบว่ามีค่าดีขึ้นเมื่อเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ ร้อยละ 0.1-0.3 โดยน้ำหนัก

Bao and Tjong (2008) เตรียมพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปริมาณร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 220-230-220-190 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกโดยอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 235 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปศึกษาผลของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อน และโครงสร้างของวัสดุนาโนเชิงประกอบ พบว่า มีโครงสร้างเป็นแบบผลึก ค่าอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น และมีค่าคุณสมบัติทางกลมีผลที่ดีขึ้นเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนัก

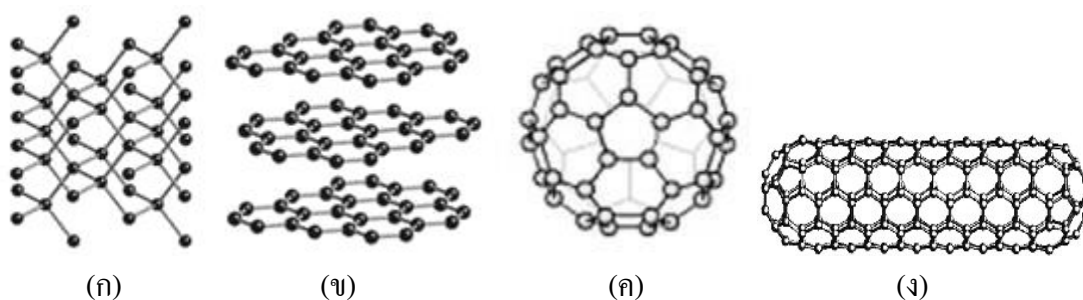
Tobias (2008) ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในพอลิคาร์บอนผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยมีปัจจัยในการศึกษา 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับคือ ความดันย้ำ (Holding pressure), ความเร็วฉีด (Injection velocity), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) และอุณหภูมิหลอด (Barrel temperature) พบว่า ค่าแรงกระแทกที่สูงที่สุดขึ้นกับความเร็วฉีดที่มีผลสอดคล้องกับอุณหภูมิหลอด ในขณะที่ ค่าความดันย้ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอิทธิพลน้อยมาก และผลจากการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์พบว่าความเร็วฉีดมีผลต่อการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

หลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

1.1 การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน

ธาตุที่มีความสำคัญและมีคุณประโยชน์อย่างมหาศาลต่อมนุษย์ชาติหนึ่ง คือ ธาตุคาร์บอนนอกจากจะเป็นองค์ประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดแล้ว คาร์บอนยังเป็นที่รู้จักในแง่ของการถูกนำมาใช้ประโยชน์ ในด้านที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากมาย โดยเป็นที่ทราบกันดีถึงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของธาตุคาร์บอน ที่ได้ชื่อว่าเป็นธาตุที่แข็งแกร่งที่สุดในโลก (โครงสร้างแบบเพชร) คาร์บอนจึงถูกนำมาใช้ผลิต หรือผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงและทนทานสูง นอกจากนี้ ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอน เช่นสภาพนำไฟฟ้าที่ดี (โครงสร้างแบบกราฟต์) ทำให้คาร์บอนถูกเลือกให้เป็นองค์ประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มากมาย



ภาพที่ 1 โครงสร้างของธาตุคาร์บอนแบบต่างๆ (ก) เพชร (ข) กราไฟต์ (ค) ฟูลเลอรีน และ (ง) ท่อนาโนคาร์บอน

ที่มา: Meyyappan (2005)

ท่อนาโนคาร์บอนถูกค้นพบในปี ค.ศ.1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ประเทศญี่ปุ่นที่ชื่อ Sumio Iijima ผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยเขาสนใจในงานวิจัยของ Kratschmer – Huffman ซึ่งทำการสังเคราะห์ฟูลเลอรีน ซึ่งเป็นโครงสร้างคาร์บอนลักษณะทรงกลม ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม Iijima ได้ทำการสังเคราะห์ฟูลเลอรีน ด้วยวิธีปล่อย

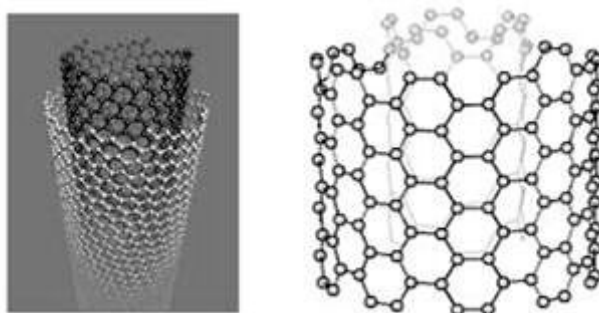
กระแสไฟฟ้าชนิดกระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากแท่งกราไฟต์ หรือเรียกว่า วิธีดีซี-อาร์กดิสชาร์จ (DC arc-discharge) เขาสังเกตเห็นก้อนเขม่าสีดำบริเวณผิวหน้าแท่งกราไฟต์ขั้วแคโทด และนำก้อนเขม่านั้นมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าเป็นอัญรูป (Form) แบบใหม่ของคาร์บอนโดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง

หลังจากนั้น Iijima ได้นำเสนอสิ่งที่ค้นพบในวารสารทางวิทยาศาสตร์ Nature และต่อมาก็เป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก โดยท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบมีผนังซ้อนกันเป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 23 นาโนเมตร

1.2 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น เกิดจากการซ้อนกันหลายๆชั้นของผนังท่อโดยแต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของ MWCNTs นั้นมีขนาดตั้งแต่ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร

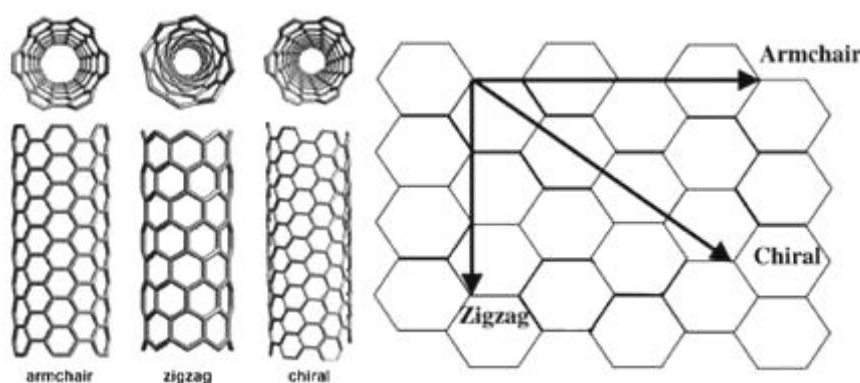


ภาพที่ 2 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น

ที่มา: Harris (1999)

1.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกว้าง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราไฟต์ชั้นเดียวให้เป็นท่อทรงกระบอก โครงสร้างของ SWCNTs สามารถแบ่ง

ออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ อาร์มแชร์ (Armchair), ซิกแซก (Zigzag) และ ไครอล (Chiral) แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว และลักษณะการม้วนแผ่นกราฟไฟต์เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว

ที่มา: Harris (1999)

1.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อที่เกิดจากชั้นของแผ่นกราฟไฟต์ชั้นเดียวม้วนเข้าหากันเป็นโพรงรูปทรงกระบอก เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว แต่ท่อดังกล่าวถ้าเกิดจากชั้นของแผ่นกราฟไฟต์หลายชั้นม้วนเข้าหากัน เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น

ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่ไม่มีตำหนิ อะตอมคาร์บอนจะยึดกันแบบวงปิดหกเหลี่ยม ระยะระหว่างผนังท่อถึงผนังท่ออีกชั้นจะอยู่ในช่วงเดียวกับระยะระหว่างชั้นของแกรไฟต์ ประมาณ 3.4 อังสตรอม ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นจะมีความยาวเท่ากับแบบผนังชั้นเดียว แต่ท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า โดยอาจมีจำนวนชั้นของท่อกันมากถึง 30 ชั้น ทำให้คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าไม่ดี และคุณสมบัติหลายอย่างของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นจะใกล้เคียงกับกราฟไฟต์

1.4 คุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน

คุณสมบัติทั้งทางกลและไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนนั้น จะสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม ที่ทำมุมไครอลเทียบกับแกนของท่อ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้มีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งโลหะ และสารกึ่งตัวนำ หรือแม้กระทั่งว่าอาจจะแสดงคุณสมบัติ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีความเป็นไปได้ด้วยการเติมสารเจือปนอย่างเข้าไป

โครงสร้างท่อที่สังเคราะห์ได้จะถูกตรวจสอบขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ส่วนคุณสมบัติทางกลหรือโมดูลัสของยังวัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ค่าที่วัดได้จะอยู่ในช่วงของ 1×10^{12} นิวตันต่อตารางเมตร และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าอยู่ในช่วง 2×10^{12} นิวตันต่อตารางเมตร

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอน คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก ประมาณ 1-3 โวลต์ ที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร แต่สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดีนัม (Molybdenum) ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 โวลต์

1.5 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจมากมายของท่อนาโนคาร์บอน จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน ถึงแม้ปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการผลิตที่จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณภาพดีเท่านั้น อีกทั้งค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง แต่ในไม่ช้าท่อนาโนคาร์บอนจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่สำคัญในสาขานาโนเทคโนโลยีอย่างแน่นอน

จากคุณสมบัติทางกลพบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength to weight ratio) สูงมากจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุเดิม นอกจากนี้จากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน สามารถเป็นได้ทั้งตัวนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับทิศทางการม้วนเป็นท่อของแผ่นกราฟไฟต์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

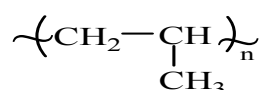
เช่น ใช้เป็นทรานซิสเตอร์ (Transistor) โดยการนำท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวมาต่อเข้ากับขั้วโลหะ 2 ขั้ว เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไปที่ขั้วโลหะ ท่อนาโนคาร์บอนจะเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้า จากตัวนำไฟฟ้าไปเป็นฉนวน หรือจากฉนวนไปเป็นตัวนำไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถนำมาใช้เป็นตัวตกผลึกโปรตีน (Protein crystallization) โดยใช้ผิวด้านข้างของท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวรองรับการเกาะของผลึกโปรตีนชนิด สเตรปตาวิดอิน (Streptavidin) โดยจะก่อตัวเป็นเกลียวไปตามผิวด้านข้างของท่อจากบนลงล่างในทิศตามเข็มนาฬิกา ในทางการแพทย์การใช้ประโยชน์จากท่อนาโนคาร์บอน คือ ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็กนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ นั่นคือสามารถใช้เป็นโพรบ (Probe) ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตต์ขนาดเล็กมาก (Ultrasmall pipette) สำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล เข้าสู่เซลล์ เป้าหมายได้ นับเป็นศักยภาพของท่อนาโนคาร์บอน ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (Targeted drug delivery)

ท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถนำไปใช้ทำโพรบวัด (Probing tip) ให้กับ AFM ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีค่ามอดูลัสของยังสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนหรือซิลิคอนไนไตรต์ในแง่ของควมมีเสถียรภาพและความคงทน ที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงไปได้ถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคน (Cone angle) และรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด ซึ่งเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเมื่อวัดผิววัตถุที่มีความลาดชันสูง และมีขนาดใกล้เคียงกับปลายของโพรบวัด เช่น การวัดภาพดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัด เพื่อเพิ่มกำลังการแยกให้กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP)

2.1 สูตรโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน

ที่มา: Ferdinand *et al.* (2003)

2.2 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์ จะคล้ายกับการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้จะได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบเชิงเส้น ปราศจากกิ่งก้านสาขาแบบแยกจากลำตัว เนื่องจากโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมีหมู่เมทิล (CH_3) ต่อกับอะตอมของคาร์บอนตรงพันธะคู่ ดังนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจึงอาจเกิดผลิตภัณฑ์ได้ 3 แบบ ดังนี้

- แบบไอโซแทกติก (Isotactic)
- แบบซินดิโอแทกติก (Syndiotactic)
- แบบอะแทกติก (Atactic)

การผลิตพอลิโพรพิลีน ให้มีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติก เป็นสิ่งที่ผู้ผลิตต้องการ เพราะจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็งตึง และความทนความร้อน เป็นต้น

เกรดทางการค้าของพอลิโพรพิลีนส่วนใหญ่เป็นไอโซแทกติก การมีหมู่เมทิลอิสระตลอดแนวของโมเลกุล ทำให้พอลิโพรพิลีนไม่ค่อยเสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งในการผสม มักจะใช้สารเสถียรมากกว่ากรณีที่เป็นพอลิเอทิลีน ถ้าใช้โพรพิลีน 100% ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนจะได้พอลิโพรพิลีนที่เป็นโคพอลิเมอร์ แต่พอลิเมอร์ตัวนี้ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ซึ่งจะแตกง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก เพื่อเพิ่มความเหนียวของพอลิโพรพิลีนที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จึงมักเตรียมพอลิเมอร์โดยใช้โพรพิลีนทำปฏิกิริยากับโพลีเอทิลีนประมาณ 5-15 % เรียกพอลิโพรพิลีนกลุ่มนี้ว่าเป็นพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) กับพอลิโพรพิลีนพบว่าพอลิโพรพิลีนแข็งแรงกว่าเล็กน้อย แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักเบากว่า พอลิโพรพิลีนจะมีความว่องไวต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงมากกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง นิยมแปรรูปพอลิโพรพิลีนแบบการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ ซึ่งทำได้

โมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน ทำให้มีความแข็งแรงมากในทิศทางที่ดึง และมีความใสสูง

2.3 คุณสมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน

2.3.1 คุณสมบัติทางกล

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด ปราศจากสาขาโซ่ มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมตัว 185°C พอลิเมอร์ชนิดนี้ถือได้ว่าเป็นพลาสติกที่เบาที่สุด มีความหนาแน่น 0.905 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงนี้เอง เป็นเหตุให้พอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติทางกลที่ดีมาก คือ เหนียว แข็งแกร่ง และมีความแข็งแรงดึงสูง จุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีนทำให้พอลิโพรพิลีนเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

การละลาย ได้ของพอลิโพรพิลีนคล้ายคลึงกับของพอลิเอทิลีน กล่าวคือ ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายได้ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C ทนต่อการกรด และเบสเป็นอย่างดี และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

2.3.3 คุณสมบัติทางความร้อน

พอลิโพรพิลีนมีปฏิกิริยาต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดส์น้อยกว่าพอลิเอทิลีน เพราะโซ่ของพอลิเอทิลีนมีไฮโดรเจนอะตอมเกิดพันธะกับคาร์บอนองศา 3 ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีน ไปใช้งานต้องมีการเติมตัวแอนติออกซิแดนต์และตัวอัลตราไวโอเลตสแตบิไลเซอร์ พอลิโพรพิลีน มีความหนาแน่น 0.90 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 185°C หมู่มะทิลทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน แต่ยังคงมีความแข็งแรงสูง จุดอ่อนของพอลิโพรพิลีนคือ จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 0°C) และเสถียรภาพของพอลิโพรพิลีนต่อแสงอัลตราไวโอเลต และออกซิเจนต่ำกว่าพอลิเอทิลีน จึงไม่เหมาะกับการใช้งานกลางแจ้ง เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้เปราะ แตกร้าว สีซีดจางได้ง่าย ดังนั้น ก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องใส่สารแอนติออกซิแดนต์ สารเพิ่มความเสถียรภาพ

UV (UV stabilizer) อื่นๆ จุดเด่นของพอลิโพรพิลีนคือมีคุณสมบัติทางกลดีมาก เช่น มีความทนทานแรงดึงสูง จุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีน เหมาะกับงานอุณหภูมิสูง ทนอุณหภูมิน้ำเดือดได้ ใช้ทำถุงน้ำร้อน นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนยังทนน้ำมันและไขมันได้ดี ส่วนไอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน และยังใสกว่าพอลิเอทิลีน

2.4 การนำไปใช้งาน

พอลิโพรพิลีนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์แบบเส้น มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะคุณสมบัติการบวมตัว การละลาย และคุณสมบัติทางไฟฟ้า พอลิโพรพิลีนจัดเป็นพลาสติกที่มีความเบามากที่สุด มีคุณสมบัติทางกลที่ดีมาก จึงนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนี้

งานฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ใช้ทำกล่องแบตเตอรี่ ถังน้ำมันรถยนต์ กันชนรถยนต์ ถังใส่ขวด กระถางต้นไม้ ของเด็กเล่น ค้ำเบรจสีพื้น ฝาจุกลพลาสติก เฟอรันิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ เช่นกระบอกฉีดยาใช้ครั้งเดียวทิ้ง

งานเป่าแบบ (Blow molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ HDPE เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานสูง

งานสิ่งทอ (Textile) ซึ่งต้องการความแข็งแรงสูง แต่ยืดน้อย รับแรงมาก ๆ ได้ เช่น ใช้ทำเส้นใยกระสอบสาน เชือกฟาง แห อวน ผ้าใบปกป้องพืชสวน

งานเป่า (Blow film) งานเป่าถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ ทำให้ได้ฟิล์มใส เนื่องจากเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมาก เกิดผลึกน้อย แต่ความแข็งแรงจะเสียไปบ้าง ใช้ทำพลาสติกหุ้มของบุหรี ซองใส่เสื้อยืด ถุงร้อน ถุงเย็น งานเป่าถูกระบายความร้อนด้วยอากาศ จะค่อนข้างทึบแสง ขุ่นเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลมีโอกาจัดเรียงตัวได้มากกว่า ในระหว่างที่อุณหภูมิผ่าน T_m และ T_g จึงมีความแข็งแรง และมีความทนแรงดึงสูง

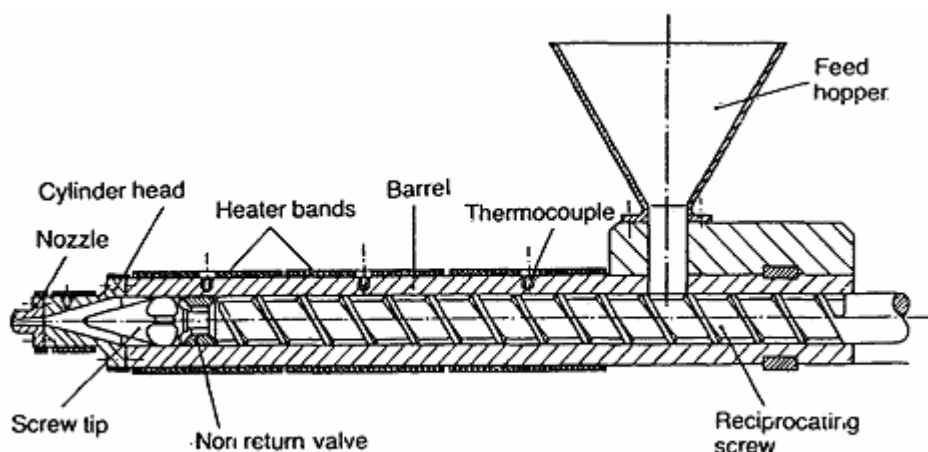
3. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine)

3.1 พื้นฐานการฉีดพลาสติก

การฉีดพลาสติก เป็นกระบวนการหลักในการผลิตชิ้นงานพลาสติกสำเร็จรูป เครื่องฉีดพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งมีการออกแบบให้เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานพลาสติกแต่ละชนิด การผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ใช้เครื่องฉีดขนาดใหญ่ แต่การฉีดชิ้นงานพลาสติกขนาดเล็กมักใช้เครื่องฉีดขนาดเล็ก มักจะใช้เครื่องฉีดพลาสติกขนาดใหญ่ที่ฉีดชิ้นงานได้หลายชิ้นในคราวเดียวกัน ซึ่งประหยัดต้นทุนมากกว่าการใช้เครื่องขนาดเล็กที่ฉีดได้ชิ้นเดียวต่อครั้งจำนวนหลายเครื่อง

3.2 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

ส่วนประกอบภายในเครื่องฉีดพลาสติกมีความสำคัญต่อกระบวนการฉีดเป็นอย่างมาก ซึ่งอุปกรณ์ภายในดังกล่าวมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันตามหน้าที่การทำงานดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก

ที่มา: วิโรจน์ (2540)

3.2.1 กรวยป้อนเม็ดพลาสติก (Feed Hopper) คือ ส่วนที่ป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่ Heating Cylinder การป้อนเม็ดพลาสติกนั้นจะสามารถตั้งระยะการป้อน ตามปริมาตรหรือขนาดของชิ้นงาน

3.2.2 เกลียวหนอน (Reciprocating Screw) คือ สกรูในเครื่องฉีดพลาสติกที่ทำหน้าที่หมุนพาเม็ดพลาสติกจาก Hopper วิ่งไปตามกระบอกฉีดจนถึงหัวฉีด ในขณะที่หมุนพาพลาสติกไปนั้นพลาสติกจะได้รับความร้อนจาก Heater และขณะเดียวกันก็จะได้รับความร้อนจากการเสียดสีเนื่องจากแรงบิดของสกรูด้วย

3.2.3 ตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) คือ ตัววัดอุณหภูมิของกระบอกฉีดเครื่องฉีดพลาสติก

3.2.4 กระบอกฉีด (Barrel) คือ ส่วนที่เป็นกระบอกฉีด

3.2.5 แถบให้ความร้อน (Heater Bands) คือ ส่วนที่อยู่ภายในกระบอกฉีดที่สามารถปรับอุณหภูมิให้ความร้อนในแต่ละช่วงภายในกระบอกฉีดได้ ทั้งนี้เพราะพลาสติก แต่ละชนิดจะให้ความร้อนที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง

3.2.6 วาล์วกันกลับ (Non Return Valve) คือ วาล์วปิดเปิดที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกเหลวในจังหวะการฉีดและรักษาความดัน เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานสัมพันธ์กับ Screw Tip

3.2.7 ยอดหัวสกรู (Screw Tip) คือ สกรูที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกเหลวในจังหวะการฉีดและรักษาความดัน

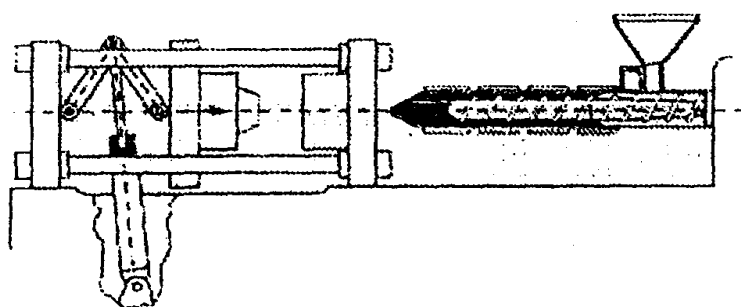
3.2.8 ส่วนหัวกระบอกฉีด (Cylinder Head) คือ ส่วนที่เป็นกระบอกให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติก ปลายกระบอกฉีดจะมีหัวฉีดประกอบอยู่และภายในกระบอกจะประกอบด้วยสกรูส่ง

3.2.9 หัวฉีด (Nozzle) คือ หัวฉีดซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ที่ปลายของกระบอกฉีด มีหน้าที่ในการเชื่อมต่อชุดฉีดกับแม่พิมพ์ในการส่งพลาสติกจากส่วนหัวกระบอกฉีดหลอมพลาสติกผ่านหัวฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์

3.3 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

ลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 9 ขั้นตอน ดังนี้

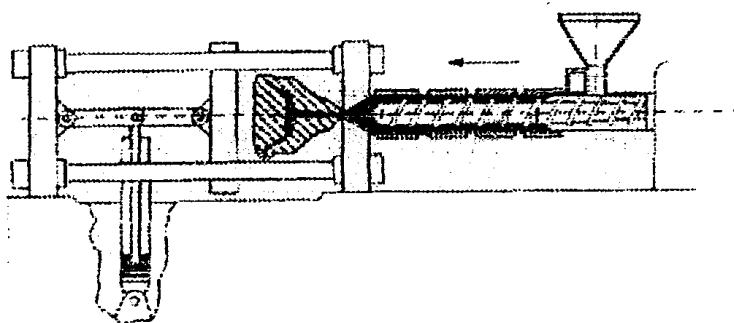
3.3.1 จังหวะปิดแม่พิมพ์ เป็นจังหวะที่แม่พิมพ์เคลื่อนที่ปิดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ พร้อมกับล็อกไม่ให้แม่พิมพ์แยกขณะฉีด



ภาพที่ 6 จังหวะที่ 1 ปิดแม่พิมพ์

ที่มา: วิโรจน์ (2540)

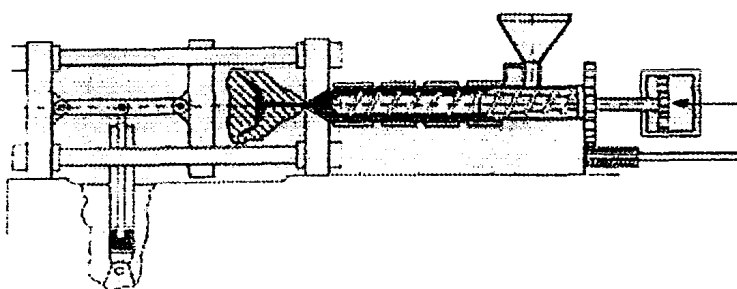
3.3.2 จังหวะชุดฉีดเคลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์ เป็นจังหวะเดียวกับที่แม่พิมพ์ปิด ชุดฉีดจะเคลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์ด้านที่อยู่ใกล้กับทางเข้า (Spure) แล้วค้างไว้ด้วยแรงค้ำหนึ่ง



ภาพที่ 7 จังหวะที่ 2 ชุดฉีดเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์
ที่มา: วิโรจน์ (2540)

3.3.3 จังหวะฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ หรือจังหวะเติมพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์เกลียว
หนอนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกนเพื่อดันน้ำพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์

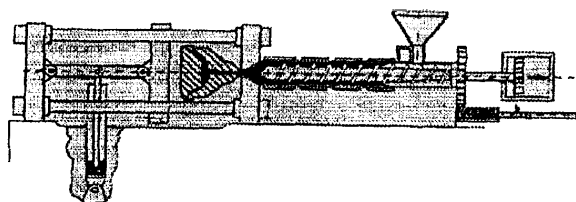
3.3.4 จังหวะฉีดรักษาความดัน (Holding) และชดเชยการหดตัว



ภาพที่ 8 จังหวะที่ 3 และ 4 ฉีดรักษาความดัน
ที่มา: วิโรจน์ (2540)

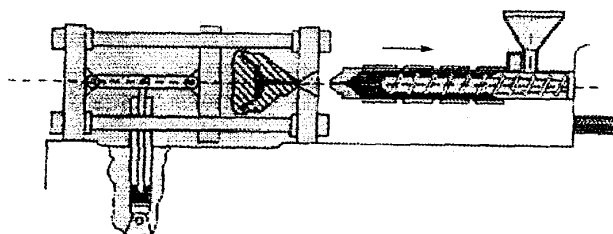
3.3.5 ช่วงการหล่อเย็นชิ้นงาน เป็นการทำงานเพื่อรอให้พลาสติกเหลวแข็งตัว

3.3.6 ป้อนพลาสติกเข้าเกลียวหนอนก่อนทำการหลอมใหม่ เป็นจังหวะที่เกลียวหนอนหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเดิมเข้ากระบอกฉีดเพื่อหลอมเหลว เกลียวหนอนจะถอยกลับและพร้อมที่จะทำการฉีดในจังหวะต่อไป โดยที่หัวฉีดยังคงติดอยู่กับแม่พิมพ์โดยไม่ถอยกลับ



ภาพที่ 9 จังหวะที่ 5 และ 6 เป็นการหล่อเย็นชิ้นงานที่ฉีดเสร็จ และในขณะเดียวกันทำการป้อนพลาสติกเข้าเกลียวหนอนก่อนทำการหลอมใหม่
ที่มา: วิโรจน์ (2540)

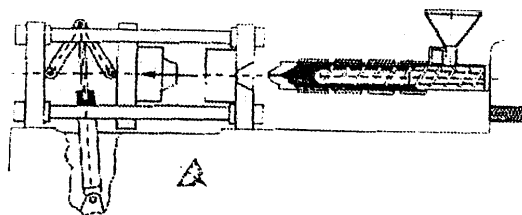
3.3.7 ชุดฉีดถอยกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิหัวฉีดต่ำเกินไป และมีให้พลาสติกที่แข็งตัวติดที่หัวฉีด ทำให้การฉีดครั้งต่อไปง่ายขึ้น



ภาพที่ 10 จังหวะที่ 7 ชุดฉีดถอยกลับ
ที่มา: วิโรจน์ (2540)

3.3.8 แม่พิมพ์เคลื่อนที่เปิดออกถึงระยะสูงสุด

3.3.9 ทำการปลดชิ้นงาน (Ejection) ตัวอีเจกเตอร์ (Ejector) จะกระทุ้งให้ชิ้นงานหลุดจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 11 จักรหะที่ 8 และ 9 แม่พิมพ์เปิดแล้วปลดชิ้นงานออก
ที่มา: วิโรจน์ (2540)

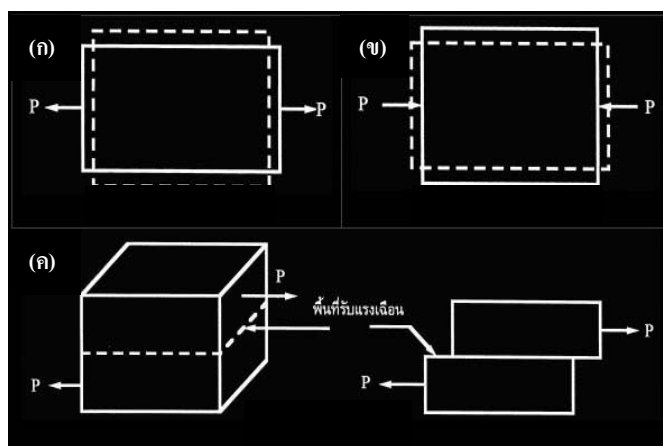
4. คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ

4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็งแรง, ความแข็ง, ความสามารถในการยืดตัว, ความยืดหยุ่น, ความเหนียว เป็นต้น ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติทางกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติทางกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

4.1.1 ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายในโดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ



ภาพที่ 12 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ (ก) แรงดึง (Tension) (ข) แรงกด (Compression) และ (ค) แรงเฉือน (Shear)

ที่มา: มณฑล (2531)

ก. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 12(ก)

ข. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพที่ 12(ข)

ค. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพที่ 12(ค) มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

4.1.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

ก. การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

ข. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนสภาพที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอีลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม

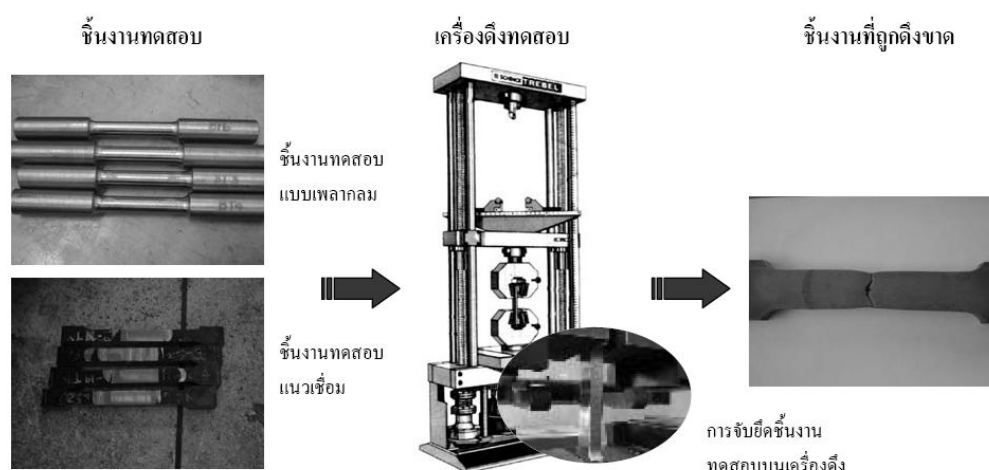
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้จะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังภาพที่ 14 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

4.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

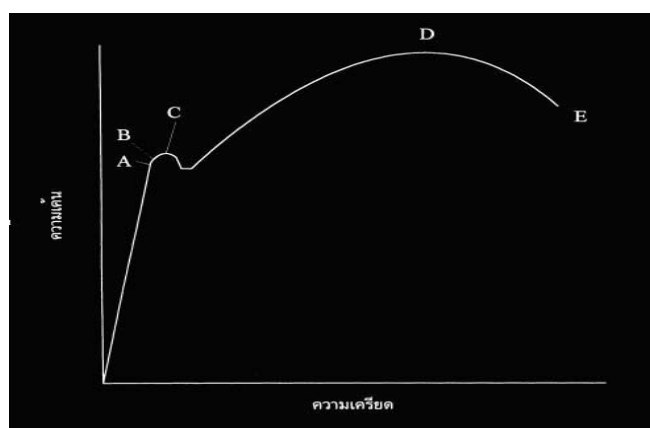
วิธีการทดสอบนั้น จะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 14 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆของการทดสอบ เช่น มาตรฐาน

ของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก.(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



ภาพที่ 13 วิธีการทดสอบแรงดึง

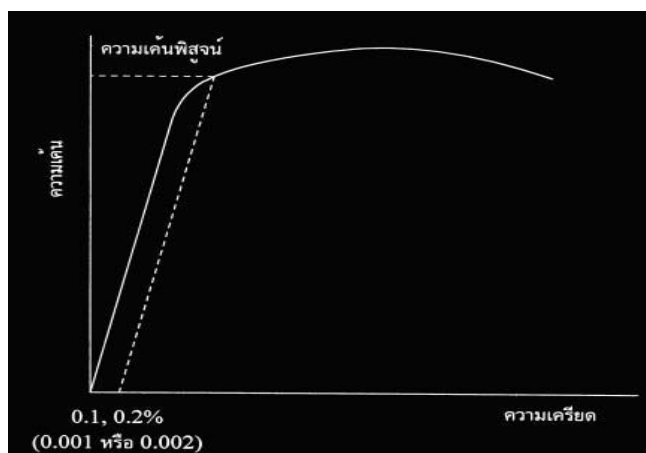
ที่มา: มณฑล (2531)



ภาพที่ 14 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

ที่มา: มณฑล (2531)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่คงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่ก็จะมีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังภาพที่ 15 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในภาพที่ 15

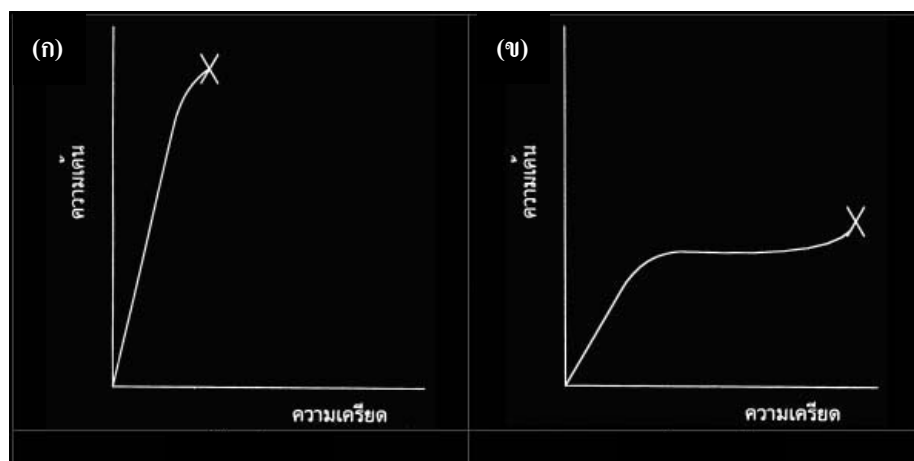


ภาพที่ 15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบที่ไม่มีจุดคราก

ที่มา: มณฑล (2531)

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มากมาย ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังภาพที่ 16(ก) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังภาพที่ 16(ข)



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ของ (ก) วัสดุโลหะ และ (ข) วัสดุพลาสติก
ที่มา: มณฑล (2531)

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

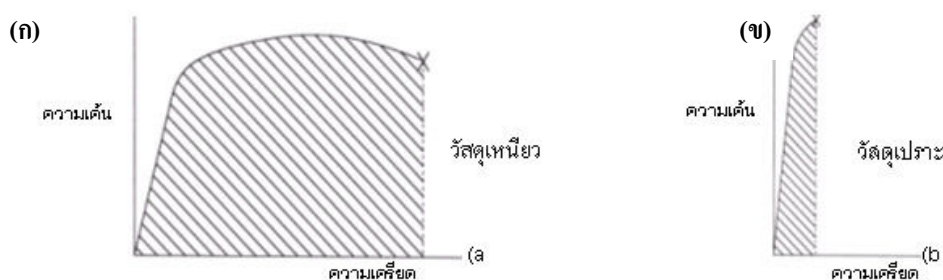
ก. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นร้อยละการยืดตัว (Percentage Elongation : %El) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติมักใช้ค่าร้อยละการยืดตัวมากกว่าเพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%El สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึง เป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

ข. โมดูลัสของยัง (Young's Modulus or Modulus of Elasticity) ภายใต้พิภพสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นออสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ โมดูลัสของยัง มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm^2 หรือ MPa ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือน เรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูงวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างออสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างออสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

4.2.2 ความแกร่งหรือความเหนียว (Toughness)

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภท วิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว(Toughness) ของวัสดุ เพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหาย และความปลอดภัยในขณะใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสีกของรถดัมพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน หรือเหล็กสำหรับงานต่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น

ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปมักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายวัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย



ภาพที่ 17 ความเหนียว (Toughness) ของ (ก) วัสดุเหนียว และ (ข) วัสดุเปราะ
ที่มา: มณฑล (2531)

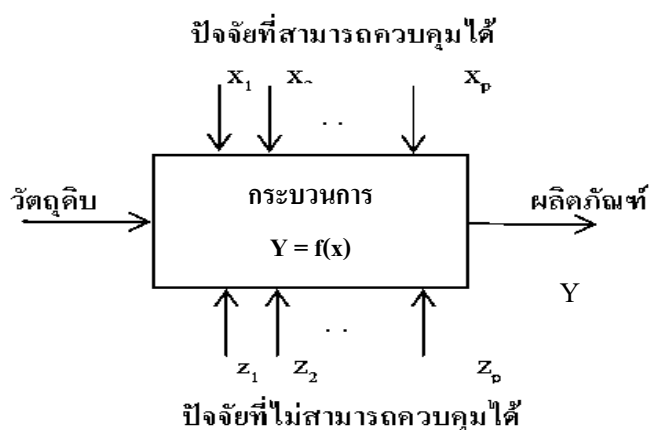
5. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่า ปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญ (หรือความสนใจ) ในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response)

ปัจจัย (Factor) ในการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น

ก. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

ข. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอ ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก หรือไม่มีความสามารถควบคุมเพราะเกิดจากสภาพแวดล้อมในการผลิต ฯลฯ



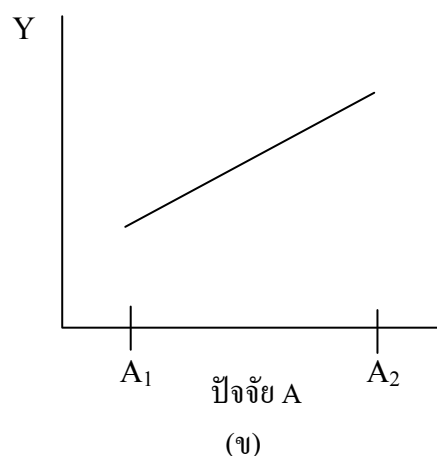
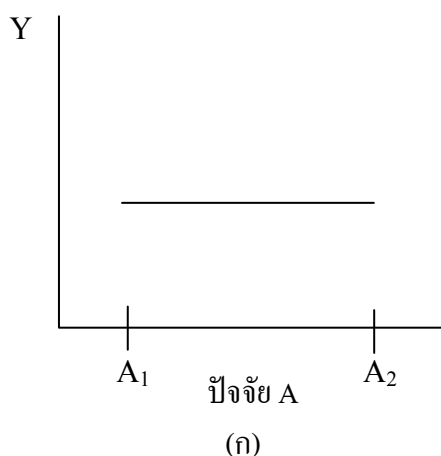
ภาพที่ 18 ปัจจัย และพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต

ที่มา: ปารเมศ (2545)

จากภาพที่ 18 กระบวนการคือการนำเอาทรัพยากรทั้งหลายที่เป็นปัจจัยของการผลิตได้แก่ คน เครื่องจักร วัตถุดิบและวิธีการ มาเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งตัวแปรในกระบวนการผลิต บางชนิดเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ แต่บางตัวก็เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักๆของการออกแบบการทดลองจึงมีดังต่อไปนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์มากที่สุด
2. หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
3. หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาวิธีการปรับตั้งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่า ปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ หรือไม่มีผลนั้นต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ แล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ Y หมายถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุ และ A หมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งจะสรุปผลจากภาพที่ 19 ได้ดังนี้คือ ภาพที่ 19 (ก) แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์นั่นคือ เมื่อขนาดของปัจจัย A เปลี่ยนแปลงไป ไม่ทำให้ตัวแปรตาม Y มีค่าเปลี่ยนไป ในขณะที่ภาพที่ 19 (ข) แสดงอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์นั่นคือ เมื่อขนาดของปัจจัย A เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ตัวแปรตาม Y มีค่าเปลี่ยนไป



ภาพที่ 19 (ก) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ (ข) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ที่มา: ปารเมศ (2545)

5.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

5.1.1 เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

5.1.2 เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

5.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

5.2.1 การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือ ทำให้ผู้ทดลอง สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้วการทำการทดลองซ้ำ จะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

5.2.2 การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีลำดับของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายอย่างอิสระ การทำการทดลองแบบสุ่ม จะทำให้ลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

5.2.3 การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่ง อาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุ ที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

5.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

Montgomery (1991) กล่าวว่า การใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้

5.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา โดยการศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ เพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองได้อย่างชัดเจน

5.3.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง โดยตรวจสอบว่าปัจจัยใดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของผลการทดลอง

5.3.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการทดลองอยู่

5.3.4 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง ในการเลือกวิธีการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีมากมายหลายรูปแบบล้วนแต่มีรูปแบบเฉพาะ และมีความเหมาะสมกับการทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่าง จำนวนการทดลองซ้ำและการบล็อกด้วย

5.3.5 ทำการทดลอง ติดตามดูการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้ จะทำให้การทดลองนี้ใช้ไม่ได้

5.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือการนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

5.3.7 สรุปผลการทดลองและทำข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ตั้งกระบวนการคราวต่อไป

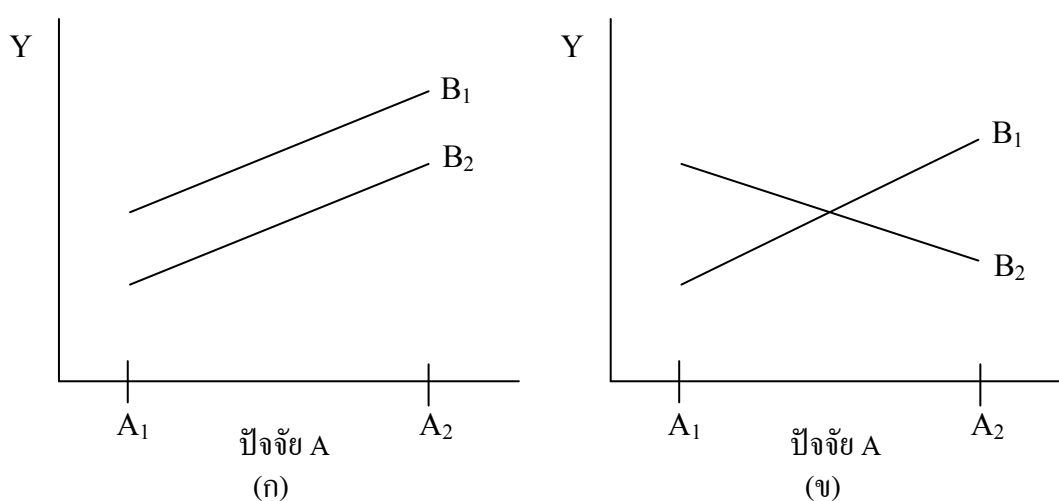
6 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองเพื่อต้องการทดสอบอิทธิพลของสิ่งที่ศึกษาตั้งแต่ 2 สิ่งขึ้นไป จะเรียกสิ่งทดลองว่า ปัจจัย (Factor) ซึ่งแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกได้หลายระดับ (Level) กรณี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A และ B ซึ่งมี 2 ระดับทั้งคู่จะเรียกว่าการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 2×2 หรือ 2^2 แฟคทอเรียล ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B

ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้ อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือ ปฏิสัมพันธ์ แสดงดังภาพ ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 20 (ก) และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 20 (ข)

การทดลองแบบแฟกทอเรียลสามารถวางแผนได้หลายแบบ เช่น การทดลองแบบ แฟกทอเรียลในการวางแผนทดลองกลุ่มสมบูรณ์ (Factorial experiment in CRD) การทดลองแบบ แฟกทอเรียลในการวางแผนทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Factorial experiment in RBD) และการทดลองแบบแฟกทอเรียลในการวางแผนทดลองแบบลาตินสแควร์ (Factorial experiment in LS



ภาพที่ 20 (ก) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ (ข) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ที่มา: ปารเมศ (2545)

7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (Multivariate Analysis of Variance)

เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (MANOVA) เป็นเทคนิคที่ขยายต่อจากเทคนิค ANOVA และยังคงมีวัตถุประสงค์เหมือนกัน คือการหาสาเหตุ หรือการหาความสัมพันธ์ ส่วนที่แตกต่างจาก ANOVA ก็คือ MANOVA จะมีตัวแปรตามเชิงปริมาณมากกว่า 1 ตัว โดยตัวแปรตามดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน ถ้าผู้ศึกษาใช้เทคนิค ANOVA สำหรับตัวแปรตามแต่ละตัว หรือที่เรียกว่าเป็นการวิเคราะห์ ANOVA หลายๆครั้ง จะไม่ถูกต้อง เพราะไม่มีการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมของตัวแปรตาม

7.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนก 2 ทาง (2-WAY MANOVA)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามเชิงปริมาณตั้งแต่ p ตัวขึ้นไป ($p \geq 2$) กับตัวแปรอิสระ 2 ปัจจัย (A,B) โดยปัจจัย A มี a ระดับ ส่วนปัจจัย B มี b ระดับ

สมการแสดงความสัมพันธ์ของ 2-WAY MANOVA คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$, $j = 1, 2, \dots, b$ และ $k = 1, 2, \dots, n$

โดยที่	y_{ijk}	คือ ค่าสังเกตที่ k ของปัจจัย A ระดับที่ i และปัจจัย B ระดับที่ j
	μ	คือ ค่าเฉลี่ยรวม
	τ_i	คือ อิทธิพลหลักของปัจจัย A (Main effect A) ในระดับที่ i
	β_j	คือ อิทธิพลหลักของปัจจัย B (Main effect B) ในระดับที่ j
	γ_{ik}	คือ อิทธิพลร่วม (Interaction) ของปัจจัย A ระดับที่ i และ B ระดับที่ j
	ε_{ijk}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าสังเกตที่ k ของปัจจัย A ระดับที่ i และปัจจัย B ระดับที่ j โดย ε_{ijk} มีการแจกแจงแบบปกติ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่า 0 และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

โดยที่ ε_{ijk} เป็นอิสระกันและมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร ($\varepsilon_{ijk} \sim N_p(0, \sigma^2)$)

จากสมการที่ (1) แยกส่วนเวกเตอร์ข้อมูล y_{ijk} เป็น

$$y_{ijk} = \bar{y} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}) + (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}) + (y_{ijk} - \bar{y}_{ij}) \quad (2)$$

โดยที่ $\bar{y}$ = เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยรวมมีขนาด $p \times 1$

$\bar{y}_{i.}$ = เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของระดับที่ i ของปัจจัย A

$\bar{y}_{.j}$ = เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของระดับที่ j ของปัจจัย B

$\bar{y}_{ij}$ = เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของระดับที่ i ของปัจจัย A และระดับที่ j ของปัจจัย B

จากสมการ (2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกำลังสองของผลบวก ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y})(y_{ijk} - \bar{y})' &= \sum_{i=1}^a bn(\bar{y}_{i.} - \bar{y})(\bar{y}_{i.} - \bar{y})' + \sum_{j=1}^b an(\bar{y}_{.j} - \bar{y})(\bar{y}_{.j} - \bar{y})' \\ &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b n(\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y})(\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y})' \\ &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})(y_{ijk} - \bar{y}_{ij})' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{องศาอิสระ : } abn - 1 = (a - 1) + (b - 1) + (a - 1)(b - 1) + ab(n - 1) \quad (4)$$

ซึ่งสามารถแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบจำแนกสองทาง

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (DF)
ปัจจัย A	$SS_A = \sum_{i=1}^a bn(\bar{y}_{i.} - \bar{y})(\bar{y}_{i.} - \bar{y})'$	a-1
ปัจจัย B	$SS_B = \sum_{j=1}^b an(\bar{y}_{.j} - \bar{y})(\bar{y}_{.j} - \bar{y})'$	b-1
ปัจจัย A และ B (AB)	$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b n(\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y})(\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y})'$	(a-1)(b-1)
ความคลาดเคลื่อน	$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})(y_{ijk} - \bar{y}_{ij})'$	ab(n-1)
ผลรวม	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y})(y_{ijk} - \bar{y})'$	abn-1

ที่มา: กัลยา (2551)

การทดสอบสมมติฐานของ 2-WAY MANOVA จะเริ่มต้นด้วยการทดสอบผลกระทบร่วมของปัจจัย A และ B ก่อนแล้วจึงทดสอบผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย

7.1.1 การทดสอบผลกระทบร่วม (Interaction effect)

$$H_0: \gamma_{11} = \gamma_{12} = \dots = \gamma_{ab} = 0$$

$$H_1: \text{มี } \gamma_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า ; } i \neq j, i = 1, 2, \dots, a \text{ และ } j = 1, 2, \dots, b$$

$$\text{ใช้สถิติทดสอบ Wilks' } \lambda = \Lambda^* = \frac{|SSE|}{|SSAB + SSE|}$$

โดยสามารถแปลงสถิติทดสอบ Λ^* เป็นสถิติไคสแควร์และสถิติ F ดังนี้

- ใช้สถิติทดสอบไคสแควร์

กรณีที่ขนาดตัวอย่างใหญ่ สถิติทดสอบจะเป็น

$$\chi^2_{\Lambda^*} = - \left[ab(n-1) - \frac{(p+1) - (a-1)(b-1)}{2} \right] \ln \Lambda^* \quad (5)$$

โดยที่ $\chi^2_{\Lambda^*}$ มีการแจกแจงโดยประมาณแบบไคสแควร์ที่องศาอิสระ $p(a-1)(b-1)$

การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $\chi^2_{\Lambda^*} > \chi^2_{p(a-1)(b-1)}$ ที่ระดับนัยสำคัญ α

- สถิติทดสอบ F

ถ้า $a = 2$, $b = 2$ หรือ $(a-1)(b-1) = 1$ สามารถใช้สถิติทดสอบ F

$$F = \left(\frac{1 - \Lambda^*}{\Lambda^*} \right) \frac{(ab(n-1) - p + 1)/2}{(|(a-1)(b-1) - p| + 1)/2} \quad (6)$$

โดย F มีการแจกแจงแบบ F ที่องศาอิสระ DF_1 และ DF_2 โดยที่

$$DF_1 = |(a-1)(b-1) - p| + 1 \text{ และ } DF_2 = ab(n-1) - p + 1$$

การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha; DF_1, DF_2}$ โดยหาค่า $F_{\alpha; DF_1, DF_2}$ จากตารางความน่าจะเป็นแบบเอฟ

7.1.2 การทดสอบผลกระทบหลัก (Interaction effect)

ก. ปัจจัย A

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{มีเวกเตอร์ } \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 เวกเตอร์ ; } i = 1, 2, \dots, a$$

$$\text{สถิติ } \Lambda_A^* = \frac{|SSE|}{|SSA + SSE|}$$

โดยสามารถแปลงสถิติทดสอบ Λ^* เป็นสถิติไคสแควร์และสถิติ F ดังนี้

- ใช้สถิติทดสอบไคสแควร์

$$\chi_A^2 = - \left[ab(n-1) - \frac{(p+1)-(a-1)}{2} \right] \ln \Lambda^*$$

การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $\chi_A^2 > \chi_{p(a-1)}^2$ โดย $\chi_{p(a-1)}^2$ ได้จากตารางความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์ ที่องศาอิสระ $p(a-1)$ ที่ระดับนัยสำคัญ α

- ใช้สถิติทดสอบ F เมื่อ $a = b = 2$

$$F_A = \left(\frac{1 - \Lambda_A^*}{\Lambda_A^*} \right) \frac{(ab(n-1) - p + 1)/2}{(|(a-1) - p| + 1)/2} \quad (7)$$

การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_A > F_{\alpha; DF1, DF2}$ โดยที่ F_A มีการแจกแจงแบบ F และ $F_{\alpha; DF1, DF2}$ ที่องศาอิสระ $DF1 = |(a-1) - p| + 1$ และ $DF2 = ab(n-1) - p + 1$

ข. ปัจจัย B

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_a = 0$$

$$H_1: \text{มีเวกเตอร์ } \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 เวกเตอร์ ; } j = 1, 2, \dots, a$$

$$\text{สถิติ } \Lambda_B^* = \frac{|SSE|}{|SSA + SSE|}$$

โดยสามารถแปลงสถิติทดสอบ Λ^* เป็นสถิติไคสแควร์และสถิติ F ดังนี้

- ใช้สถิติทดสอบไคสแควร์

$$\chi_B^2 = - \left[ab(n-1) - \frac{(p+1)-(b-1)}{2} \right] \ln \Lambda^*$$

การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $\chi_B^2 > \chi_{p(b-1)}^2$ โดย $\chi_{p(b-1)}^2$ ได้จากตารางไคสแควร์ ที่องศาอิสระ $p(b-1)$ ที่ระดับนัยสำคัญ α

- ใช้สถิติทดสอบ F เมื่อ $a = b = 2$

$$F_B = \left(\frac{1 - \Lambda_B^*}{\Lambda_B^*} \right) \frac{(ab(n-1) - p + 1)/2}{(|(b-1) - p| + 1)/2} \quad (8)$$

โดยที่ F_B มีการแจกแจงแบบ F ที่องศาอิสระ $DF1 = |(b-1) - p| + 1$ และ $DF2 = ab(n-1) - p + 1$
 การสรุปผล: จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_B > F_{\alpha; DF1, DF2}$ ที่ระดับนัยสำคัญ α

7.2 เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรหลายตัวแปร

เงื่อนไขหรือข้อสมมติของ MANOVA จะคล้ายกับของ ANOVA แต่ขยายในด้านที่มีตัวแปรตามหลายตัว โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- 1) มีการสุ่มตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน
- 2) เวกเตอร์ของตัวแปรตาม p ตัว ของแต่ละกลุ่มต้องมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร
- 3) เมตริกซ์ค่าความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_k$

7.3 สถิติทดสอบ

สถิติทดสอบ $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ มีหลายค่าขึ้นกับค่าไอเก้นของเมตริกซ์ สถิติทดสอบที่นิยมใช้กันทั่วไปใน MANOVA มี 4 ตัว คือ Wilks' λ , Roy's Largest Root, Pillai's Trace และ Hotelling's trace (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ)

7.4 การพิจารณาจากอำนาจทดสอบ

Olson (1974;1976;1979) ได้ศึกษาเปรียบเทียบอำนาจการทดสอบของสถิติทั้ง 4 ค่า โดยสรุปได้ดังนี้ สำหรับขนาดกลุ่มตัวอย่างน้อยๆ สถิติทั้ง 4 จะมีความแตกต่างกันน้อย ในเทอมของอำนาจการทดสอบ ถ้าขนาดของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันในตัวแปรตามตัวเดียว สถิติ Roy จะเสริมอำนาจการทดสอบที่มากกว่า (เพราะอาจจะใช้เฉพาะตัวแปรแรก) ตามด้วย Hotelling, Wilk's และ Pillai อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันในตัวแปรตามมากกว่า 1 ตัวแปร ลำดับของอำนาจการทดสอบจะกลับกันคือ Pillai มีอำนาจการทดสอบมากที่สุด Wilk's, Hotelling และ Roy มีอำนาจน้อยสุด ประเด็นสุดท้ายเกี่ยวข้องกับอำนาจการทดสอบของขนาดกลุ่มตัวอย่าง และจำนวนของตัวแปรตาม Steven แนะนำว่า ถ้าตัวแปรตามน้อยๆ (น้อยกว่า 10 ตัวแปร) กลุ่มตัวอย่างควรมีขนาดใหญ่

ในเทอมของความแกร่ง (Robustness) สถิติทดสอบทั้ง 4 ตัว จะเกี่ยวข้องกับความแกร่งในการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นของการแจกแจงปกติหลายตัวแปร ในการศึกษาของ Olson (1976) สรุปว่า เมื่อขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากัน Pillai-Bartlett จะแข็งแกร่งมากในการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น การตรวจสอบข้อตกลงของเมตริกความแปรปรวนร่วมที่เป็นเอกพันธ์จะได้ Box's test ถ้าการทดสอบนั้นไม่นัยสำคัญ ข้อตกลงเบื้องต้นของการแจกแจงปกติหลายตัวแปรจะเป็นจริง

7.5 การวัดความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์หลายตัวแปร

ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร จะมีการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ในที่นี้จะกล่าวถึงการวัดระดับความสัมพันธ์ของเทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ และการวิเคราะห์ความถดถอย ดังนี้คือ

7.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม

ใน MANOVA สถิติทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของความแปรปรวนอย่างเป็นระบบและความแปรปรวนคลาดเคลื่อนสำหรับตัวแปรตามหลายตัวแปร การเปรียบเทียบนี้จะทำได้โดยการใช้อัตราส่วนของเมตริกที่แสดงความแปรปรวนอย่างเป็นระบบของตัวแปรตามทั้งหมดกับเมตริกที่แสดงความแปรปรวนคลาดเคลื่อนของตัวแปรทั้งหมด

เมตริกที่แสดงความแปรปรวนอย่างเป็นระบบเรียกว่า model sum of squares และ cross-products matrix (CP_M) ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงผลของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม ในขณะที่เมตริกที่แสดงความแปรปรวนคลาดเคลื่อนเรียกว่า error sum of squares และ cross-products matrix (CP_E) เป็นตัวบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามที่ได้รับอิทธิพลจากความคลาดเคลื่อนในโมเดล สุดท้ายเมตริกแสดงผลรวมของความแปรปรวนในตัวแปรตามแต่ละตัวเรียกว่า total error of squares และ cross-products matrix (CP_T) ซึ่งใช้เป็นตัววัดปริมาณความสัมพันธ์ทั้งหมดของตัวแปรตาม

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม จากค่า Cross-product ดังนี้

$$CP_M = \sum n (\bar{x}_{group(Tensile)} - \bar{x}_{grand(Tensile)}) (\bar{x}_{group(Modulus)} - \bar{x}_{grand(Modulus)}) \quad (9)$$

$$CP_E = \sum (x_{i(Tensile)} - \bar{x}_{group(Tensile)}) (x_{i(Modulus)} - \bar{x}_{group(Modulus)}) \quad (10)$$

$$CP_T = \sum (x_{i(Tensile)} - \bar{x}_{grand(Tensile)}) (x_{i(Modulus)} - \bar{x}_{grand(Modulus)}) \quad (11)$$

โดยที่ $\bar{x}_{grand}$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของตัวแปรตามนั้น

$\bar{x}_{group}$ คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม

n คือ จำนวนคะแนนภายในกลุ่ม

7.5.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

ปารเมศ (2545) กล่าวว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวแปรขึ้นไป ในการวิเคราะห์การถดถอยจะเรียกตัวแปรที่สนใจจะวิเคราะห์ว่าตัวแปรตาม (Dependent Variable) ส่วนตัวแปรที่แทนปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าของตัวแปรตามมีการเปลี่ยนแปลงเรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent Variable) โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด แล้วสร้างรูปแบบการถดถอยเพื่อแทนลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสร้างสมการถดถอย (Regression Equation) จากรูปแบบที่กำหนดนั้นโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) สมการ

ถดถอยที่สร้างขึ้นจะเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่นั้น จะพิจารณาได้ทั้งจากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐานค่าสถิติที่ใช้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination: R^2) ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (Adjusted Coefficient of Determination: R^2_{adj}) ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Squares) เป็นต้น ซึ่งจะเขียนรูปแบบการถดถอยเชิงพหุเมื่อมีตัวแปรอิสระ k ตัวได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

ซึ่งสมการรูปแบบนี้เรียกว่า แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรอิสระ k ตัว (Multiple Linear Regression Model with k Repressor Variables) พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย (x_j) พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือทั้งหมด $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว

7.5.3 สัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination, R^2)

สัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปรอิสระในรูปแบบสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้เท่ากับ $R^2 \cdot 100\%$ โดยที่เหลืออีก $(1 - R^2) \cdot 100\%$ นั้นมาจากสาเหตุอื่น

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T}$$

เนื่องจากข้อเสียของสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) คือเมื่อตัวแปรอิสระเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การแก้ไขทำได้โดยใช้ค่า Adjusted R^2 แทนดังนี้

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MS_E}{MS_T} = 1 - \left[\frac{SS_E / (n - p)}{SS_T / (n - 1)} \right]$$

ซึ่งถ้าค่า R^2_{adj} มีค่ามากกว่า 64% (> 0.64) แสดงว่ารูปแบบสมการเหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนเกรด 1100 NK (จาก IRPC) LOT NO. 08030434
2. ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-50 นาโนเมตร
3. ถังผสมประเภทป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางกล Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS
7. เครื่องมือทดสอบสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

วิธีการ

นำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น(ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก) ผสมกับพอลิโพรพิลีนโดยวิธีการเข้าผสมในถังผสมประเภทป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต จากนั้นนำวัสดุผสมไปเข้าเครื่องฉีดพลาสติก ที่อุณหภูมิ 190 และ 220 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนสกรู 75 และ 227 รอบต่อนาที (rpm) ใช้เวลาในการหลอม 3 นาที เมื่อเครื่องผสมมีแรงในการหมุนเข้าใกล้ค่าคงที่ (ประมาณ 5 นาที) จึงทำการฉีดพอลิเมอร์ผสมที่ ความดัน 45 และ 65 บาร์ และความเร็วฉีด 25 และ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่ควบคุมความดันฉีด ความดันด้านการถอยหลังของสกรู อุณหภูมิหัวฉีด และ เวลาเย็นตัวเป็น 75 บาร์ 5 บาร์ 185 องศาเซลเซียส และ 50 วินาทีตามลำดับตลอดการทดลอง เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ดังแสดงในภาพที่ 20 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆดังนี้

- ศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

- ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อดูการกระจายตัว ของท่อนาโนคาร์บอนผสมพอลิโพรพิลีน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- ศึกษาผลของส่วนผสม และปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีต่อคุณสมบัติโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร



ภาพที่ 21 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638

การออกแบบการทดลอง

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา

ศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อให้ผลของชิ้นงานที่ไม่เกิดตำหนิและให้ค่าคุณสมบัติทางกลสูงที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ส่งผลต่อตัวแปรตามเชิงปริมาณ 2 ค่า คือค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง เนื่องจากต้องการพิจารณาถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นหลังจากทำการผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ซึ่งคือค่าความแข็งแรงดึงนี้เป็นค่าที่บอกถึงค่าแรงต่อพื้นที่สูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน หรือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง โดยสามารถใช้ค่านี้เป็นค่าเปรียบเทียบคุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุ ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุ นั่นคือถ้าค่านี้สูง แสดงว่าวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้าค่านี้มีค่าต่ำ แสดงว่าวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นได้มากก่อนที่จะเสียรูป ซึ่งค่ามอดูลัสของยังนี้มีประโยชน์ในงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ

2. คัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลง

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุที่มีผลต่อคุณสมบัติที่ศึกษา พบว่ามีปัจจัยคือ สาเหตุหลักจากคน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ซึ่งทำการควบคุมแต่ละสาเหตุหลักได้ดังนี้

2.1 สาเหตุหลักจากคน

ผู้ปฏิบัติงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานนี้ถูกควบคุมให้เป็นบุคคลเดิมในทุกการทดลอง เป็นผู้ที่มีความทักษะและประสบการณ์ในการทำงาน และมีสุขภาพสมบูรณ์ขณะทำการทดลอง

2.2 สาเหตุจากเครื่องจักร

เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC ของ บริษัท Battenfeld ประเทศผู้ผลิตคือ Austria ใช้ระบบควบคุมการปิดเปิดของแม่พิมพ์ และควบคุมการทำงานด้วย control unit รุ่น UNILOG 4000 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น ดังแสดงในภาคผนวก ก โดยมีการควบคุมเครื่องฉีดพลาสติกให้เป็นเครื่องเดียวกันตลอดการทดลอง

2.3 สาเหตุจากวัตถุดิบ

ชนิดของเม็ดพลาสติกเป็นประเภทพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) ผลิตจากบริษัท IRPC เม็ดสีขาว เกรด 1100 NK LOT NO. 08030434 ดังแสดงคุณสมบัติตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนจากบริษัทผู้ผลิต

	คุณสมบัติ	มาตรฐานทดสอบ	หน่วย	ผลลัพธ์
1	MELT FLOW INDEX(230/2.16)	ASTM D1238	g/10 min	10.3
2	CHARPY NOTCHED IMPACT AT 23 C	DIN 53453	mJ/mm ²	3.1
3	FLEXURAL MODULUS (1% SACANT)	ASTM D638	MPa	1451

ในขณะที่ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-50 นาโนเมตร ซึ่งผลิตจากหน่วยวิจัยวัสดุนาโน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถูกเขย่าผสมในถุงผสมประเภทป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต เพื่อป้องกันการเกาะของผงท่อนาโนคาร์บอนบริเวณถุงผสม จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

2.4 สาเหตุจากวิธีการ

การตั้งค่าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดพลาสติกมีการพิจารณาจากค่าดังนี้ ความดัน ความเร็ว ระยะเวลา ระยะทาง และอุณหภูมิ ซึ่งมีปัจจัยดังต่อไปนี้ ความดันในการฉีดพลาสติก (Injection Pressure) ความดันด้านการถอยหลังของสกรู (Back Pressure) ความเร็วในการฉีดพลาสติก (Injection Speed) ความเร็วของสกรู (Screw Rotation Speed) ความเร็วในการหลอมพลาสติก (Plasticizing Speed) ระยะเวลาในการฉีดพลาสติก (Injection Time) ระยะเพื่อ (Cushion) อุณหภูมิของหัวฉีด (Nozzle Temperature) อุณหภูมิภายในกระบอกฉีด (Barrel Temperature)

จากสาเหตุของปัญหาที่กล่าวมาในเบื้องต้น พบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไป คือ ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิพลาสติกหลอม ความเร็วในการฉีดพลาสติก ความเร็วรอบของสกรู และความดันในการฉีดพลาสติก ในขณะที่ปัจจัยอื่นที่ไม่ได้นำมาทำการพิจารณาถูกควบคุมให้เป็นค่าเดียวตลอดทุกการทดลองจากนั้นใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาว่าปัจจัยใดที่มีผลกระทบต่อการผลิตไม่เต็มชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบนาโน

3. กำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง

ทำการกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลองจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพิจารณาตามเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเม็ดพลาสติกในส่วนของปัจจัยเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูป จากนั้นทดลองฉีดขึ้นรูปเพื่อปรับค่าที่สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะปรากฏ (Appearance) อยู่ในเกณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับได้ นั่นคือชิ้นงานทดสอบต้องไม่เกิดปัญหาชิ้นงานฉีดขึ้นรูปที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น การฉีดไม่เต็มชิ้นงาน (Short Mold) หรือ การเกิดครีบ (Flash) เป็นต้น โดยที่ระดับของแต่ละปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติของยัง และค่าความแข็งแรงดึง คือ ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน (%wt content of MWCNTs) อุณหภูมิพลาสติก

หลอม (Barrel temperature) ความเร็วในการฉีดพลาสติก (Injection velocity) ความเร็วรอบของสกรู (Screw rotational speed) และความดันย่ำ (Holding pressure) โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-) และ ระดับสูง (+) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย

ปัจจัยควบคุม	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
		ต่ำ (-)	สูง(+)
A: ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก	%wt	0.5	2.5
B: อุณหภูมิพลาสติกหลอม	°C	190	220
C: ความเร็วฉีด	mm/sec	25	45
D: ความเร็วรอบสกรู	rpm	75	227
E: ความดันย่ำ	bar	45	65

4. เลือ่วิธีการออกแบบการทดลอง

การทดลองนี้ใช้การทดลองแบบการทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งกำหนดจำนวนครั้งในการทำซ้ำการทดลอง 2 ครั้ง เพื่อให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ที่ระดับของปัจจัยต่างๆ หรือลดความผิดพลาดของข้อมูลจากการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยนำหลักการของการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย (2^5 Full Factorial Designs) มาใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย

การทดลองที่	ระดับปัจจัย					ค่าผลตอบสนอง (2 การทำซ้ำ)
	A	B	C	D	E	
1	-	-	-	-	-	
2	+	-	-	-	-	
3	-	+	-	-	-	
4	+	+	-	-	-	
5	-	-	+	-	-	
6	+	-	+	-	-	
7	-	+	+	-	-	
8	+	+	+	-	-	
9	-	-	-	+	-	
10	+	-	-	+	-	
11	-	+	-	+	-	
12	+	+	-	+	-	
13	-	-	+	+	-	
14	+	-	+	+	-	
15	-	+	+	+	-	
16	+	+	+	+	-	
17	-	-	-	-	+	
18	+	-	-	-	+	
19	-	+	-	-	+	
20	+	+	-	-	+	
21	-	-	+	-	+	
22	+	-	+	-	+	
23	-	+	+	-	+	
24	+	+	+	-	+	
25	-	-	-	+	+	
26	+	-	-	+	+	

ตารางที่ 4 (ต่อ)

การทดลองที่	ระดับปัจจัย					ค่าผลตอบสนอง (2 การทำซ้ำ)
	A	B	C	D	E	
1	-	-	-	-	-	
27	-	+	-	+	+	
28	+	+	-	+	+	
29	-	-	+	+	+	
30	+	-	+	+	+	
31	-	+	+	+	+	
32	+	+	+	+	+	

5. ทำการทดลอง

ติดตามดูการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้ จะทำให้การทดลองนี้ใช้ไม่ได้

6. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ

ใช้วิธีการเชิงสถิติวิศวกรรมในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และข้อสรุปจากการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามหลักการของฟิชเชอร์ (Fisher) เพื่อทดสอบแต่ละปัจจัยว่ามีผลตอบสนองหรือไม่ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบอยู่ที่ $\alpha = 0.05$ และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้ผลของการวิเคราะห์มีความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ด้วยกราฟของตัวแปรตอบสนอง (Response Plot)

7. สรุปผลการทดลองและทำข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กำหนดสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคราวต่อไป

ผลและวิจารณ์

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการทดลองเบื้องต้น

ผลการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นนี้ได้จากการทำการทดลองตามสภาวะและเก็บข้อมูลตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก ข และภาคผนวก ค โดยมีจำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งหมด 32 สภาวะที่แตกต่างกันและมีวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกับค่ามอดูลัสของยังและความแข็งแรงดึง ของชิ้นงานที่นำไปทดสอบ ใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อวางแผนการทดลอง โดยมีตัวแปรตอบสนองคือ ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงดึง

1. ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการวัดค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS โดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย ดังแสดงในภาคผนวก ข

2. การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย โดยกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

กำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

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

โดยที่	i	=	1, 2
	j	=	1, 2
	k	=	1, 2
	l	=	1, 2
	m	=	1, 2
μ	หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall Mean)		
A_i	หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ที่ระดับ i		
B_j	หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกหลอม ที่ระดับ j		
C_k	หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยความเร็วฉีด ที่ระดับ k		
D_l	หมายถึง อิทธิพลของความเร็วรอบสกรู ที่ระดับ l		
E_m	หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยความดันย้า ที่ระดับ m		
$(AB)_{ij}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i และปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกหลอม ระดับที่ j		
$(AC)_{ik}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i และปัจจัยความเร็วฉีด ระดับที่ k		
$(AD)_{il}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i และปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l		
$(AE)_{im}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก ระดับที่ i และปัจจัยความดันย้า ระดับที่ m		
$(BC)_{jk}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกหลอม ระดับที่ j และปัจจัยความเร็วฉีด ระดับที่ k		
$(BD)_{jl}$	หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกหลอม ระดับที่ j และปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l		

- $(ABCD)_{ijkl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i ปัจจัย
อุณหภูมิพลาสติกไหล ระดับที่ j ปัจจัยความเร็วฉีด ระดับที่ k และ
ปัจจัยความรอบสกรู ระดับที่ l
- $(ABCE)_{ijkm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i ปัจจัย
อุณหภูมิพลาสติกไหล ระดับที่ j ปัจจัยความเร็วฉีด ระดับที่ k และ
ปัจจัยความดันย่ำ ระดับที่ m
- $(ABDE)_{ijlm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i ปัจจัย
อุณหภูมิพลาสติกไหล ระดับที่ j ปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l
และปัจจัยความดันย่ำ ระดับที่ m
- $(ACDE)_{iklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i ปัจจัย
ความเร็วฉีด ระดับที่ k ปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l และปัจจัย
ความดันย่ำ ระดับที่ m
- $(BCDE)_{jklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหล ระดับที่ j ปัจจัย
ความเร็วฉีด ระดับที่ k ปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l และปัจจัย
ความดันย่ำ ระดับที่ m
- $(ABCDE)_{ijklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัยปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ระดับที่ i
อุณหภูมิพลาสติกไหล ระดับที่ j ปัจจัยความเร็วฉีด ระดับที่ k
ปัจจัยความเร็วรอบสกรู ระดับที่ l และปัจจัยความดันย่ำ ระดับที่ m
- ε_{ijklm} หมายถึง ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

2.1 โดยมีสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

ก. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยหลักที่ x ;

$x = 1, 2, \dots, 5$

H_1 : มีอย่างน้อย 1 ตัวที่แตกต่างกัน

ข. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยร่วมที่ x และ y ;

$x, y = 1, 2, \dots, 5$

H_1 : มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

2.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ
ที่ 5 ปัจจัย จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MinitabR.15 ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบอยู่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ผลทางสถิติแสดงในตารางที่ 5 ในกรณีของค่าเฉลี่ยของยัง และในตารางที่ 8 ในกรณีของค่าความแข็งแรงดึง

2.2.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีค่ามอดูลัสของยัง

ตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่ามอดูลัสของยัง

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า p -value	$\alpha = 0.05$
(A)	1	181796	181796	190.56	0.000	
(B)	1	268	268	0.28	0.600	
(C)	1	75556	75556	79.20	0.000	
(D)	1	763	763	0.80	0.378	
(E)	1	878	878	0.92	0.345	
(A)(B)	1	24846	24846	26.04	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(A)(C)	1	3798	3798	3.98	0.055	
(A)(D)	1	9049	9049	9.49	0.004	$p\text{-value} < \alpha$
(A)(E)	1	252	252	0.26	0.611	
(B)(C)	1	265096	265096	277.88	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(B)(D)	1	20556	20556	21.55	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(B)(E)	1	842	842	0.96	0.302	
(C)(D)	1	7035	7035	7.37	0.011	$p\text{-value} < \alpha$
(C)(E)	1	108	108	0.11	0.739	
(D)(E)	1	4	4	0.00	0.952	
(A)(B)(C)	1	3675	3675	3.85	0.058	
(A)(B)(D)	1	3953	3953	4.14	0.050	
(A)(B)(E)	1	17856	17856	18.72	0.000	
(A)(C)(D)	1	22164	22164	23.23	0.000	
(A)(C)(E)	1	805	805	0.84	0.365	
(A)(D)(E)	1	147	147	0.15	0.697	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า p -value	$\alpha = 0.05$
(B)(C)(D)	1	1	1	0.00	0.971	
(B)(C)(E)	1	1691	1691	1.77	0.192	
(B)(D)(E)	1	22613	22613	23.70	0.000	
(C)(D)(E)	1	670	670	0.70	0.408	
(A)(B)(C)(D)	1	17391	17391	18.23	0.000	
(A)(B)(C)(E)	1	24610	24610	25.80	0.000	
(A)(B)(D)(E)	1	3408	3408	3.57	0.068	
(A)(C)(D)(E)	1	1199	1199	1.26	0.271	
(B)(C)(D)(E)	1	7	7	0.01	0.933	
(A)(B)(C)(D)(E)	1	1925	1925	2.02	0.165	
Error	32	30527	954			
Total	63	753487				

ตารางที่ 6 ค่าสังเกตไม่ปกติ (Unusual Observations) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย ของค่ามอดูลัสของยัง

ค่าสังเกตที่	ค่ามอดูลัสของยัง	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)
2	1489.00	1433.00	56.00
34	1377.00	1433.00	-56.00

จากตารางที่ 6 ทำการตรวจสอบค่าที่ผิดปกติ (Outlier) โดยการแปลงให้อยู่ในรูปค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residual) ดังสมการที่ 12

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MSE}} \quad (12)$$

โดยทดสอบแบบสองทางที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01 มีค่าวิกฤตของ Z คือ $Z_{0.005} = 2.576$ ได้ผลดังนี้

$$d_2 = \frac{e_2}{\sqrt{MSE}} = \frac{56}{\sqrt{954}} = 1.81$$

$$d_{34} = \frac{e_{34}}{\sqrt{MSE}} = -\frac{56}{\sqrt{954}} = -1.81$$

จะเห็นว่าค่า d_2 และ d_{34} มีค่าตกอยู่ในช่วง ± 2.576 สามารถสรุปได้ว่าค่าสังเกตทั้ง 2 ค่าไม่เป็นค่าผิดปกติ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยดังนี้

- ก. ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม (A*B)
- ข. ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักและความเร็วรอบสกรู (A*D)
- ค. ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วฉีด (B*C)
- ง. ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วรอบสกรู (B*D)
- จ. ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วฉีดและความเร็วรอบสกรู (C*D)

ตารางที่ 7 Response Surface Regression สำหรับค่ามอดูลัสของยัง

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า p-value
Constant	1635.30	423.56	0.000
A	-53.297	-13.80	0.000
B	2.047	0.53	0.600
C	-34.359	-8.90	0.000
D	3.453	0.89	0.378

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า p-value
E	-3.703	-0.96	0.345
(A)(B)	19.703	5.10	0.000
(A)(C)	-7.703	-2.00	0.055
(A)(D)	-11.891	-3.08	0.004
(A)(E)	-1.984	-0.51	0.611
(B)(C)	-64.359	-16.67	0.000
(B)(D)	-17.922	-4.64	0.000
(B)(E)	-31.016	-0.87	0.302
(C)(D)	10.484	2.72	0.011
(C)(E)	-1.297	-0.34	0.739
(D)(E)	-0.234	-0.06	0.952
$S = 30.8866$ $R-Sq = 95.95\%$ $R-Sq(adj) = 92.02\%$			

จากตารางที่ 6 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (A), ความเร็วฉีด (C), ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม ($A*B$), ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักและความเร็วรอบสกรู ($A*D$), อุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วฉีด ($B*C$), อุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วรอบสกรู ($B*D$) และความเร็วฉีดและความเร็วรอบสกรู ($C*D$) ได้สมการถดถอยดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่ามอดูลัสของยัง} = & 1635.30 - 53.297A - 34.359C + 19.703(A*B) - 11.891(A*D) - 64.359(B*C) \\ & - 17.922(B*D) + 10.484(C*D) \end{aligned}$$

โดยมีค่า R^2 (adj) = 92.02% หมายความว่าในความผันแปรของค่ามอดูลัสของยังทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 92.02%

2.2.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีค่าความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของค่าความแข็งแรงดึง

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า p -value	$\alpha = 0.05$
(A)	1	129.92	129.92	572.97	0.000	
(B)	1	2.1252	2.1252	9.37	0.004	
(C)	1	42.2906	42.2906	186.50	0.000	
(D)	1	2.9810	2.9810	13.15	0.001	
(E)	1	0.2154	0.2154	0.95	0.337	
(A)(B)	1	6.2344	6.2344	27.49	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(A)(C)	1	0.2940	0.2940	1.30	0.263	
(A)(D)	1	0.6152	0.6152	2.71	0.109	
(A)(E)	1	0.6602	0.6602	2.91	0.098	
(B)(C)	1	56.4612	56.4612	248.99	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(B)(D)	1	6.4231	6.4231	28.33	0.000	$p\text{-value} < \alpha$
(B)(E)	1	0.2756	0.2756	1.22	0.278	
(C)(D)	1	1.2203	1.2203	5.38	0.027	$p\text{-value} < \alpha$
(C)(E)	1	0.1026	0.1026	0.45	0.506	
(D)(E)	1	0.4225	0.4225	1.86	0.182	
(A)(B)(C)	1	3.6457	3.6457	16.08	0.000	
(A)(B)(D)	1	1.3478	1.3478	5.94	0.021	
(A)(B)(E)	1	1.0667	1.0667	4.70	0.038	
(A)(C)(D)	1	0.0172	0.0172	0.08	0.785	
(A)(C)(E)	1	0.0791	0.0791	0.35	0.559	
(A)(D)(E)	1	1.1256	1.1256	4.96	0.033	

ตารางที่ 8 (ต่อ)

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี (d.f.)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า p -value	$\alpha = 0.05$
(B)(C)(D)	1	0.0900	0.0900	0.40	0.533	
(B)(C)(E)	1	1.5469	1.5469	6.82	0.014	
(B)(D)(E)	1	0.9598	0.9598	4.23	0.048	
(C)(D)(E)	1	0.2789	0.2789	1.23	0.276	
(A)(B)(C)(D)	1	0.2940	0.2940	1.30	0.263	
(A)(B)(C)(E)	1	0.3732	0.3732	1.65	0.209	
(A)(B)(D)(E)	1	0.3025	0.3025	1.33	0.257	
(A)(C)(D)(E)	1	0.5010	0.5010	2.21	0.147	
(B)(C)(D)(E)	1	0.3042	0.3042	1.34	0.255	
(A)(B)(C)(D)(E)	1	0.3945	0.3945	1.74	0.197	
Error	32	7.2562	0.2268			
Total	63	269.8291				

ตารางที่ 9 ค่าสังเกตไม่ปกติ (Unusual Observations) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย ของค่าความแข็งแรงดึง

ค่าสังเกตที่	ค่าความแข็งแรงดึง	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)
7	34.1250	33.4500	0.6750
12	31.1250	30.2969	0.8281
39	32.7750	33.4500	-0.6750
44	29.4688	30.2969	-0.8281

จากตารางที่ 9 ทำการตรวจสอบค่าที่ผิดปกติ (Outlier) โดยการแปลงให้อยู่ในรูปค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residual) ดังสมการที่ 12

โดยทดสอบแบบสองทางที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01 มีค่าวิกฤตของ Z คือ $Z_{0.005} = 2.576$ ได้ผลดังนี้

$$d_7 = \frac{e_7}{\sqrt{MSE}} = \frac{0.6750}{\sqrt{0.2268}} = 1.42$$

$$d_{12} = \frac{e_{12}}{\sqrt{MSE}} = \frac{0.8281}{\sqrt{0.2268}} = 1.74$$

$$d_{39} = \frac{e_{39}}{\sqrt{MSE}} = -\frac{0.6750}{\sqrt{0.2268}} = -1.42$$

$$d_{44} = \frac{e_{44}}{\sqrt{MSE}} = -\frac{0.8281}{\sqrt{0.2268}} = -1.74$$

จะเห็นว่าค่า d_7 , d_{12} , d_{39} และ d_{44} มีค่าตกอยู่ในช่วง ± 2.576 สามารถสรุปได้ว่าค่าสังเกตทั้ง 4 ค่า ไม่เป็นค่าผิดปกติ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยดังนี้

- ก. ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม (A*B)
- ข. ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วฉีด (B*C)
- ค. ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วรอบสกรู (B*D)
- ง. ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วฉีดและความเร็วรอบสกรู (C*D)

ตารางที่ 10 Response Surface Regression สำหรับค่าความแข็งแรงดึง

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณของ β_i	ค่า t	ค่า p-value
Constant	32.7520	550.23	0.000
A	-1.42480	-23.94	0.000
B	-0.18223	-3.06	0.004
C	-0.81289	-13.66	0.000
D	0.21582	3.63	0.001
E	0.05801	0.97	0.337
(A)(B)	0.31211	5.24	0.000
(A)(C)	-0.06777	-1.14	0.263
(A)(D)	-0.09805	1.65	0.109
(A)(E)	-0.10156	-1.71	0.098
(B)(C)	-0.93926	-15.78	0.000
(B)(D)	-0.31680	-5.32	0.000
(B)(E)	-0.06562	-1.10	0.278
(C)(D)	0.13809	2.32	0.027
(C)(E)	0.04004	0.67	0.506
(D)(E)	-0.08125	-1.36	0.182
$S = 0.476191$ $R-Sq = 97.31\%$ $R-Sq(adj) = 94.71\%$			

จากตารางที่ 10 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (A), อุณหภูมิหลอม (B), ความเร็วฉีด (C), ความเร็วรอบสกรู (D), ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม (A*B), อุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วฉีด (B*C), อุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วรอบสกรู (B*D) และความเร็วฉีดและความเร็วรอบสกรู (C*D) ได้ผลการถดถอยดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความแข็งแรงดึง} = & 32.7520 - 1.4248A - 0.18223B - 0.81289C + 0.21582D + 0.31211(A*B) \\ & - 0.93926(B*C) - 0.31680(B*D) + 0.13809(C*D) \end{aligned}$$

โดยมีค่า R^2 (adj) = 94.71% หมายความว่าในความผันแปรของค่าความแข็งแรงดึงทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 94.71%

2.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (Multivariate Analysis of Variance: MANOVA) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าสถิติทดสอบทั้ง 4 ตัวให้ผลค่า p-value เท่ากันทุกการทดสอบปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพล และมีผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ค่า Cross-Product ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตาม และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามทั้งสองค่า ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าของ p-value และค่า Cross-Product ของอิทธิพลแต่ละปัจจัย จากการวิเคราะห์
ความแปรปรวนหลายตัวแปร

แหล่งความแปรผัน	p-value	Cross Product (CP)
(A)	0.000	4860
(B)	0.087	-23.87
(C)	0.000	1788
(D)	0.034	47.70
(E)	0.678	-13.75
(A)(B)	0.000	393.6
(A)(C)	0.414	33.41
(A)(D)	0.124	74.61
(A)(E)	0.448	12.90
(B)(C)	0.000	3869
(B)(D)	0.000	363.4
(B)(E)	0.159	54.7
(C)(D)	0.097	92.66
(C)(E)	0.870	-3.323
(D)(E)	0.608	1.219
Error		91
Total		0.08683

จากตารางที่ 11 พบว่าปัจจัยที่มีค่า Cross-Product ของโมเดล (CP_M) อยู่ในระดับสูงคือ ปัจจัยรวมปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม ($A*B$), อุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วฉีด ($B*C$) และอุณหภูมิพลาสติกหลอมและความเร็วรอบสกรู ($B*D$) ซึ่งแสดงถึงผลของแต่ละปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงที่สอดคล้องกัน

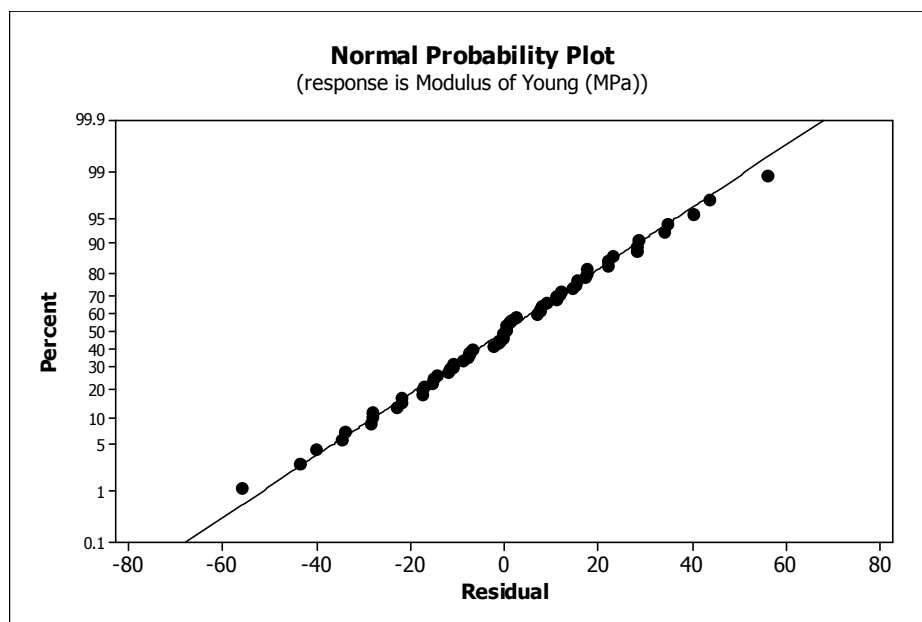
นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ค่า Cross-Product Total (CP_T) ทำให้ทราบว่า ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามทั้งสองตัว ซึ่งในที่นี้คือค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าความสัมพันธ์ของสองตัวแปรตาม เท่ากับ 0.08683

2.4 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

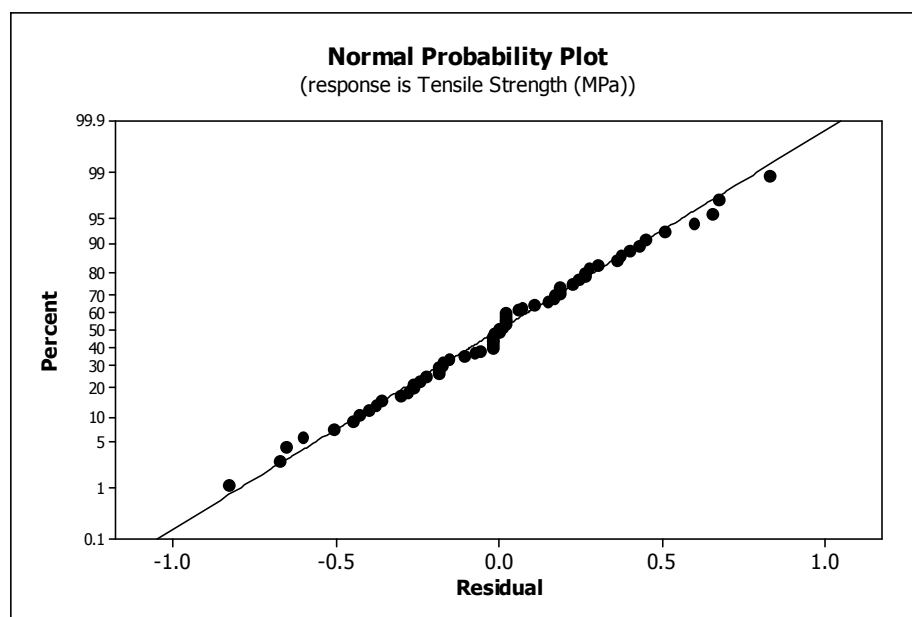
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลและความถูกต้องในการวิเคราะห์ ซึ่งหมายความว่ารูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ijklm} \sim NID(0, \sigma^2)$ โดยอาศัยค่า Residual ในการวิเคราะห์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 3 ข้อ ดังนี้

2.4.1 การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

ใช้การทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ดังภาพที่ 22 ในกรณีของค่ามอดูลัสของยัง และภาพที่ 23 ในกรณีของค่าความแข็งแรงดึง พบว่าข้อมูลทั้งสองค่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ทำให้สามารถสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้



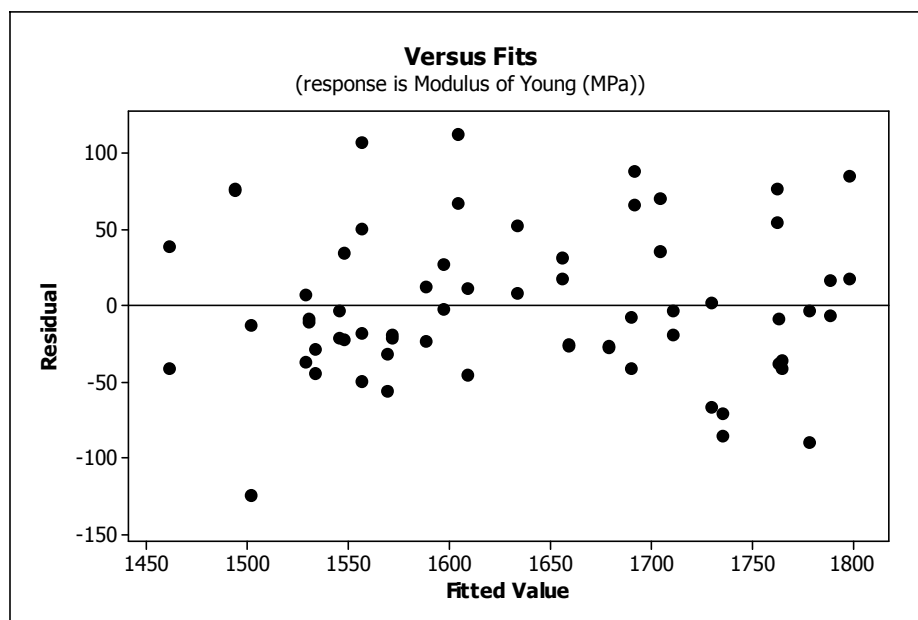
ภาพที่ 22 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน กรณีค่ามอดูลัสของยัง



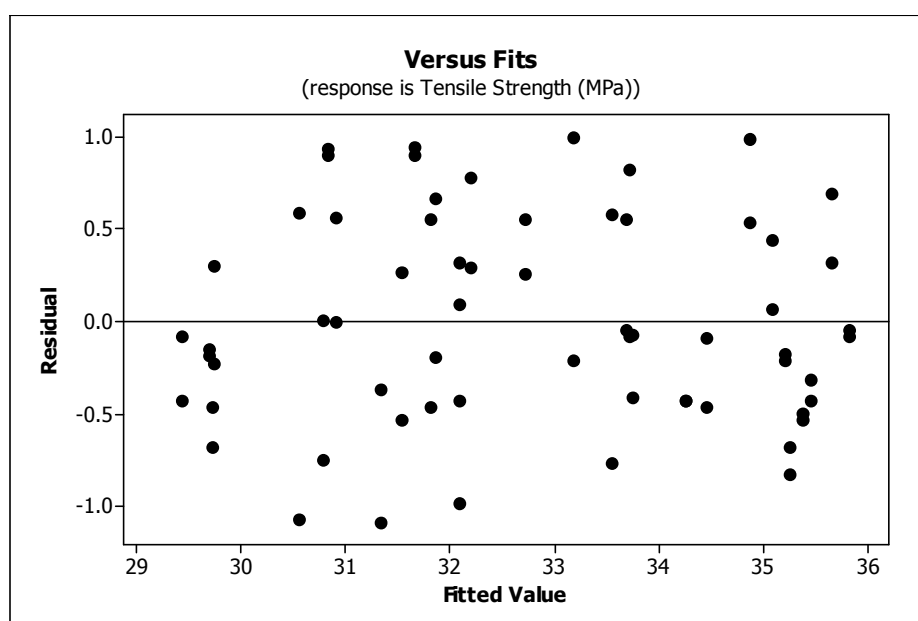
ภาพที่ 23 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน กรณีค่าความแข็งแรงดึง

2.4.2 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายดังภาพที่ 24 ในกรณีของค่ามอดูลัสของยัง และภาพที่ 25 ในกรณีของค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และค่า Fitted Value

ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

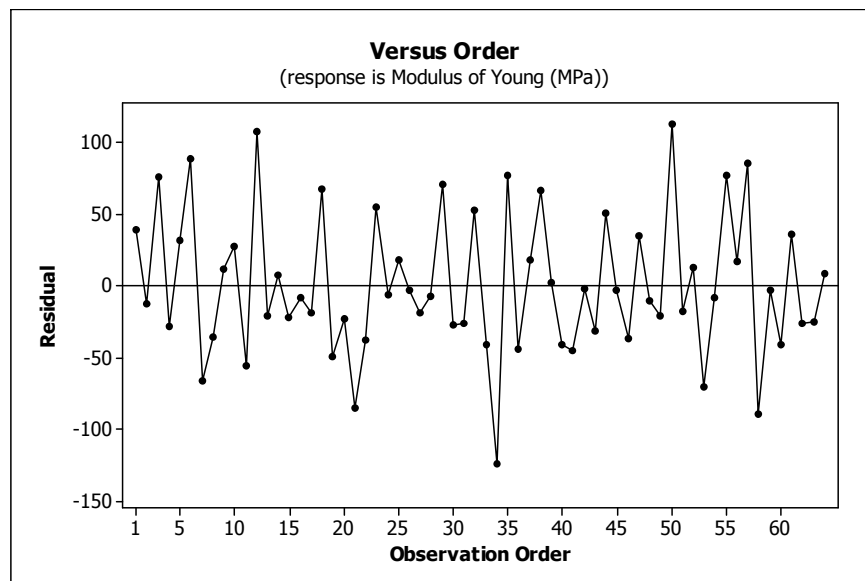


ภาพที่ 24 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต กรณีค่ามอดูลัสของยัง

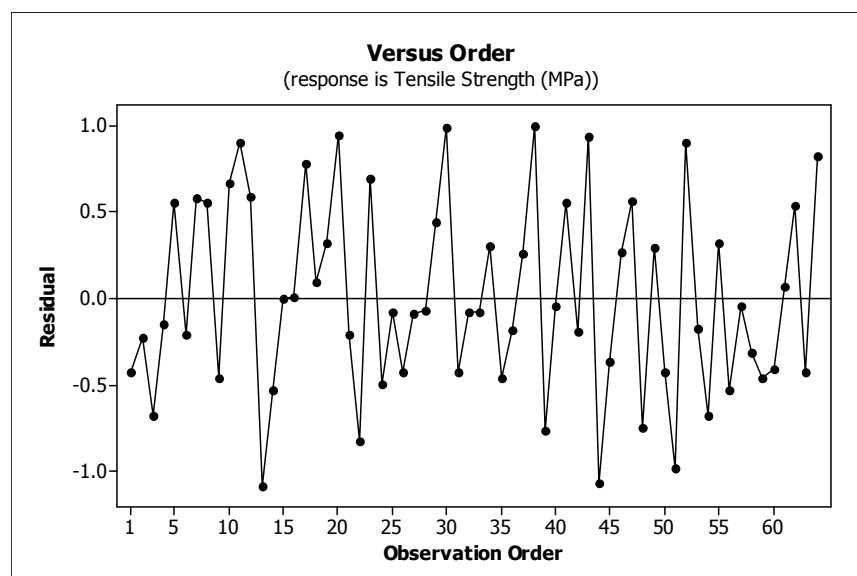


ภาพที่ 25 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต กรณีค่าความแข็งแรงดึง

2.4.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence) ดังภาพที่ 26 ในกรณีของค่ามอดูลัสของยัง และภาพที่ 27 ในกรณีของค่าความแข็งแรงดึง จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ของผลการทดสอบมีการกระจายตัวอย่างอิสระสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงได้ว่าลักษณะข้อมูลมีความอิสระ



ภาพที่ 26 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล กรณีค่ามอดูลัสของยัง

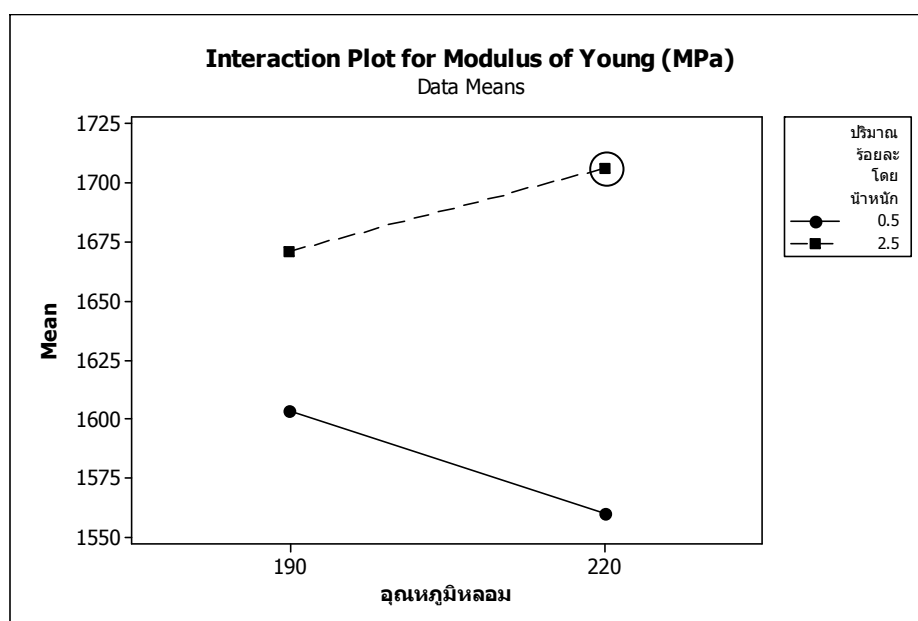


ภาพที่ 27 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล กรณีค่าความแข็งแรงดึง

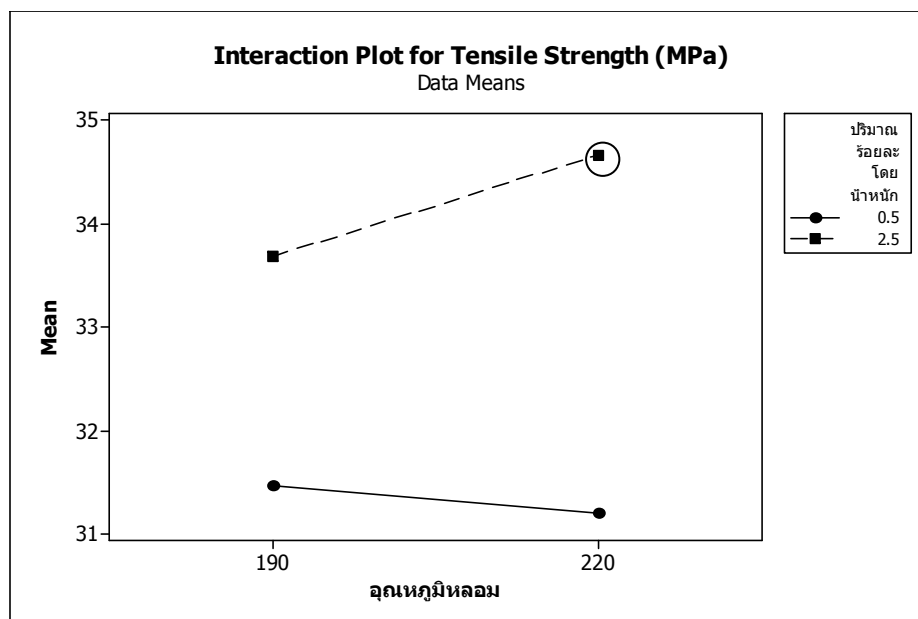
2.5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มขั้น 2 ระดับ ที่ 5 ปัจจัย โดยพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย Factorial Plots

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองข้างต้น เมื่อนำปัจจัยร่วมที่สัมพันธ์กัน และมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงทั้งหมด มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของปัจจัยแต่ละระดับและค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงได้ผลดังนี้

ก. ปัจจัยร่วมระหว่างปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักและอุณหภูมิพลาสติกหลอม (A*B)



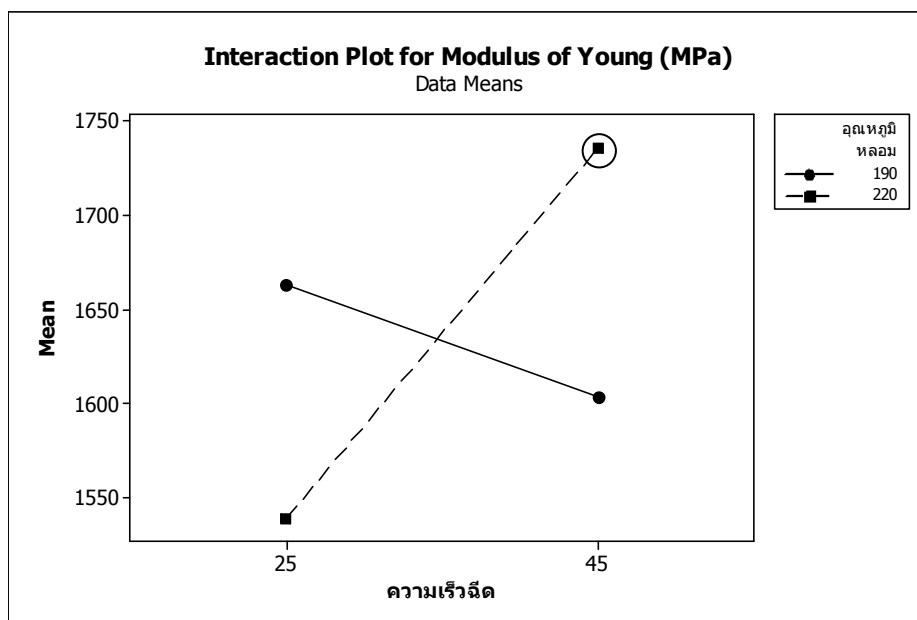
ภาพที่ 28 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก และ อุณหภูมิพลาสติกหลอมที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง



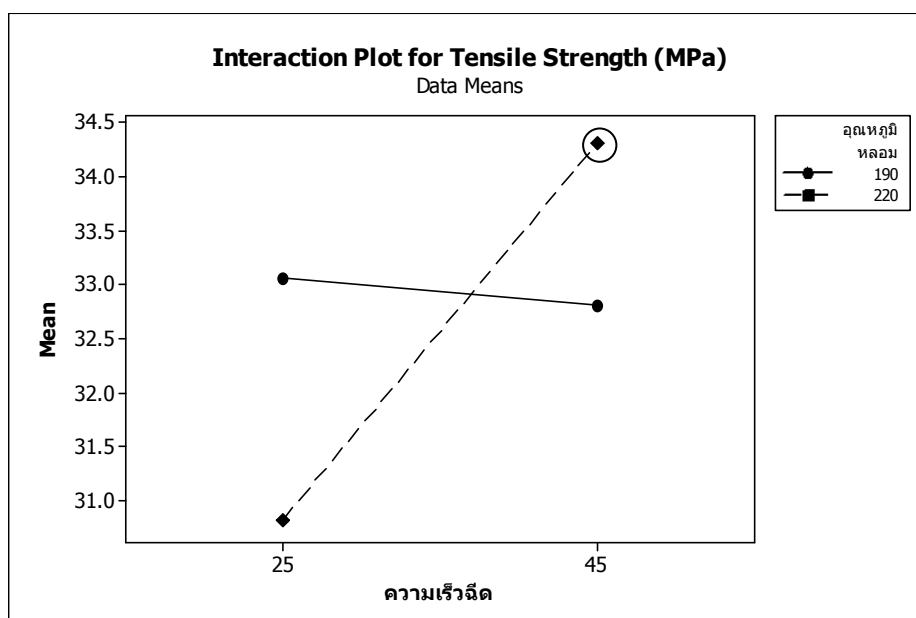
ภาพที่ 29 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก และ อุณหภูมิพลาสติกหลอมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 28 และ ภาพที่ 29 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับสูงคือปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก = 2.5 %wt และ อุณหภูมิพลาสติกหลอม = 220 °C จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

ข. ปฏิกิริยาร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกไหลและความเร็วฉีด (B*C)



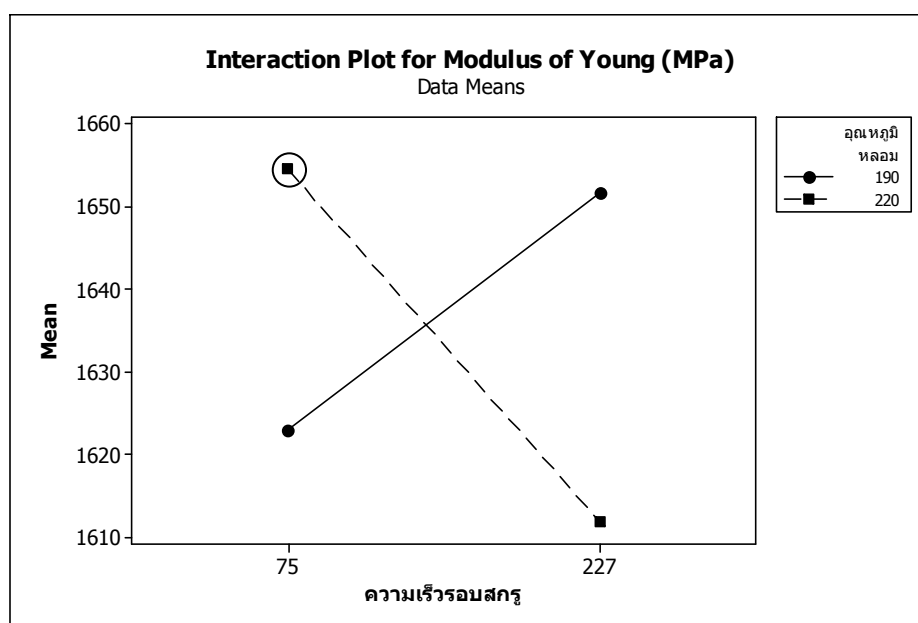
ภาพที่ 30 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหล และ ความเร็วฉีด ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง



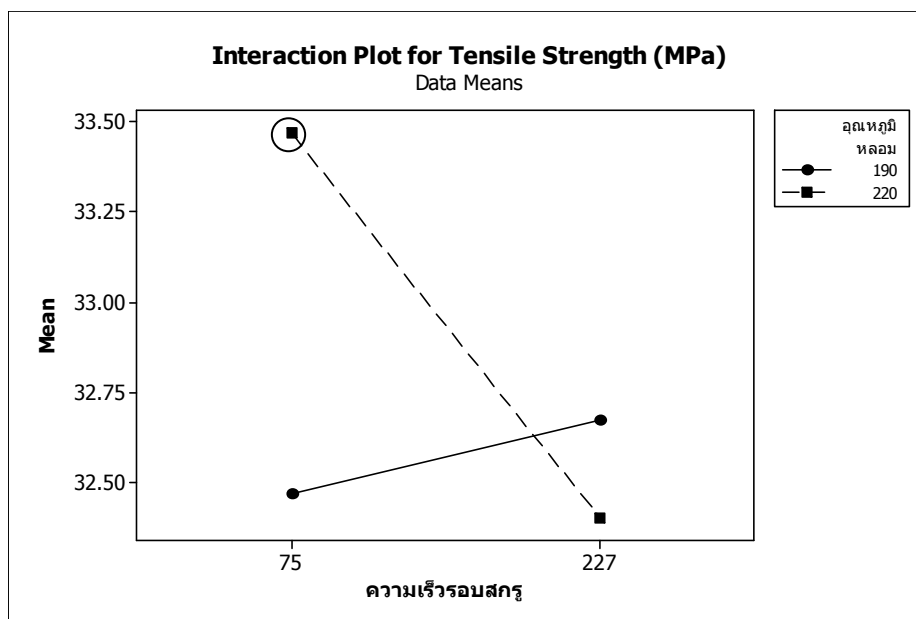
ภาพที่ 31 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหล และ ความเร็วฉีด ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 30 และ ภาพที่ 31 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับสูงคือ อุณหภูมิพลาสติกไหล = 220 °C และความเร็วฉีด = 45 mm/sec จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

ค. ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิพลาสติกไหลและความเร็วรอบสกรู (B*D)



ภาพที่ 32 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกไหล และ ความเร็วรอบสกรู ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของยัง



ภาพที่ 33 กราฟอิทธิพลร่วมของปัจจัยอุณหภูมิพลาสติกหลอม และ ความเร็วรอบสกรู ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากภาพที่ 32 และ ภาพที่ 33 พบว่าการกำหนดค่าของทั้งสองปัจจัยที่ระดับสูงคือ อุณหภูมิพลาสติกหลอม = 220 °C และความเร็วรอบสกรู = 75 rpm จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

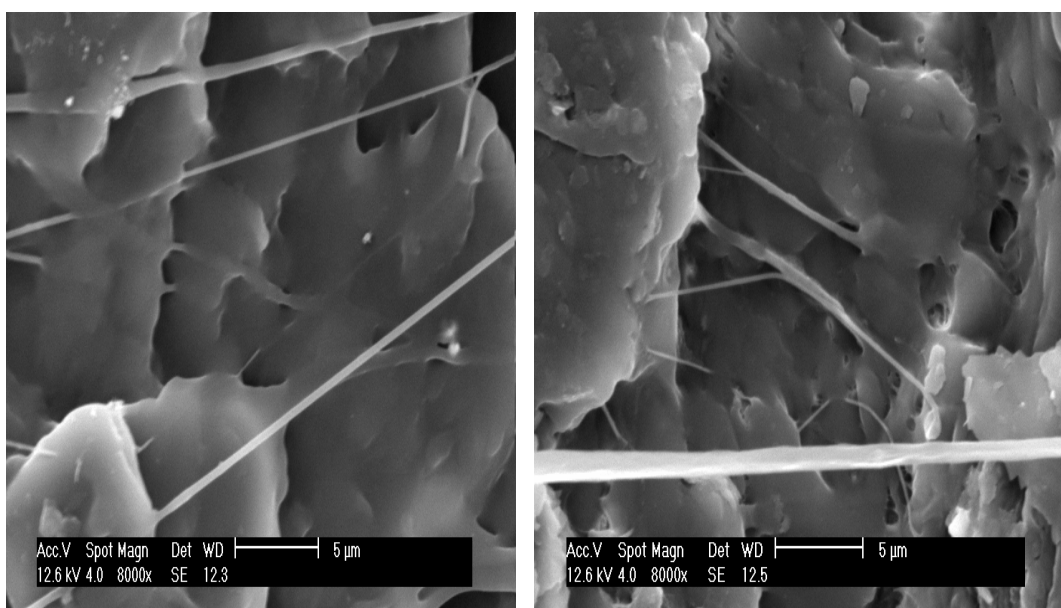
จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ปัจจัยที่ให้ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ผลของค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก	อุณหภูมิพลาสติกหลอม (°C)	ความเร็วฉีด (mm/sec)	ความเร็วรอบสกรู (rpm)	ความดันอัด (bar)
2.5 (+)	220 (+)	45 (+)	75 (-)	45 (-)/65 (+)

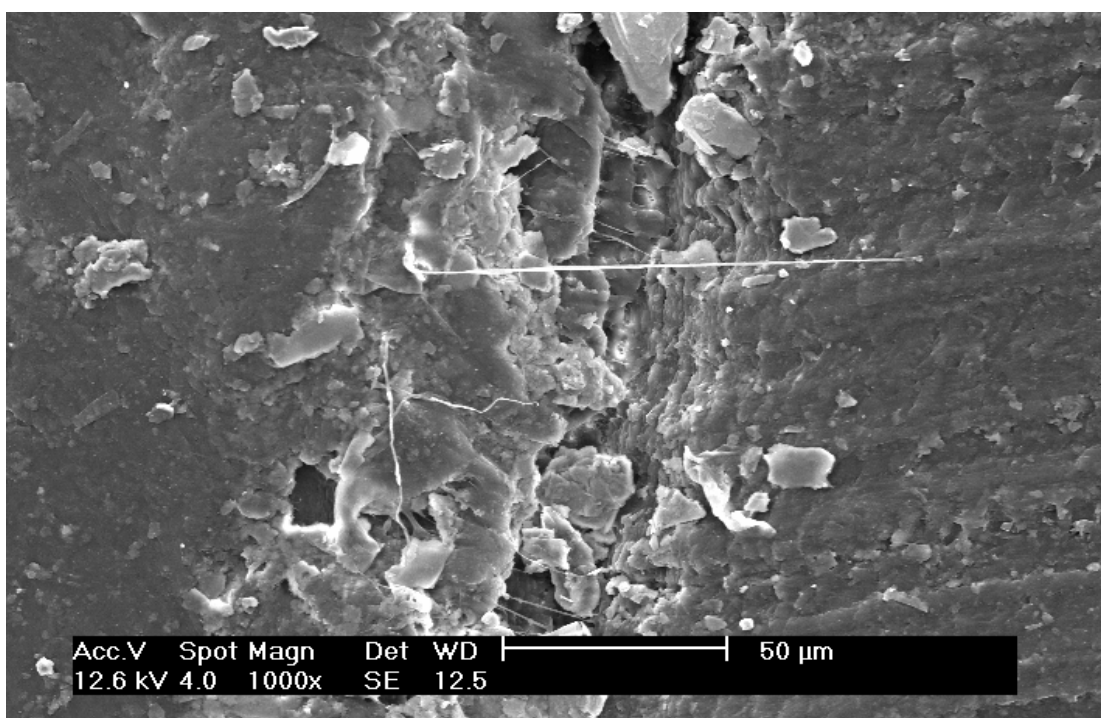
3. การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบท่อนาโนคาร์บอนผสมพอลิโพรพิลีน โดยได้ทำการตัดขวางชิ้นงานแล้วจึงนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากนั้นทำการวัดค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนของภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายเท่ากับ 8000 เท่า โดยทำการวัดที่ตำแหน่งที่ต่างกัน 5 ครั้ง พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 32.5, 44.6, 44.8, 25.6 และ 25.9 นาโนเมตร ตามลำดับ สอดคล้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาใช้ในการนำมาผสมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20-50 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 34

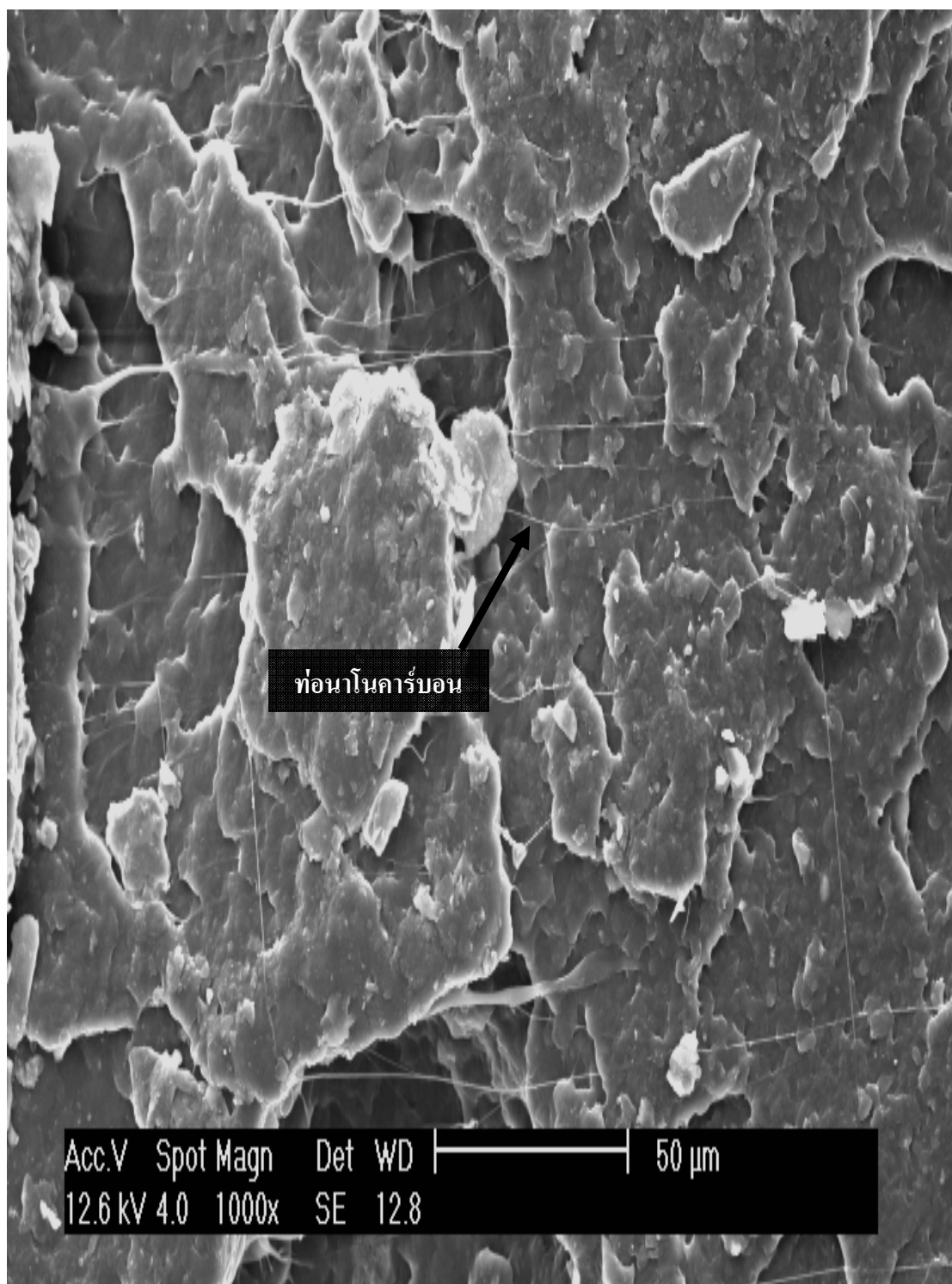


ภาพที่ 34 ภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายเท่ากับ 8000 เท่าของวัสดุเชิงประกอบท่อนาโนคาร์บอนผสมพอลิโพรพิลีน

ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบท่อนาโนคาร์บอนผสมพอลิโพรพิลีน ที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 0.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก โดยใช้กำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่า พบว่าในชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 36 มีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อของชิ้นงาน ที่ดีกว่าชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 35 หมายถึงว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ใส่ผสมลงไปนั้น มีการกระจายตัวเข้าไปในเนื้อของพอลิโพรพิลีนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งการที่ท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของพอลิโพรพิลีนนั้น ส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลดีขึ้น โดยสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติข้างต้นแสดงให้เห็นถึงว่าการกระจายตัวที่ดีมีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่ดียิ่งขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง แทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุพอลิโพรพิลีน โดยทำหน้าที่เป็นเสมือนสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลซึ่งคือค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง ที่สูงมากขึ้น



ภาพที่ 35 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุผสมที่กำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่าโดยที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุผสมที่กำลังขยายเท่ากับ 1000 เท่าโดยที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษางานวิจัยนี้ ในเบื้องต้นพบว่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลค่าคุณสมบัติทางกล คือ ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมเข้าไป อุณหภูมิพลาสติกหลอม ความเร็วฉีด ความเร็วรอบสกรู และความดันอัด หลังจากทราบปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลในเบื้องต้นแล้วจึงได้ทำการทดลองฉีดขึ้นรูป เพื่อปรับค่าที่สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่ไม่เกิดปัญหาชิ้นงานฉีดขึ้นรูปที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าเงื่อนไขการฉีดตามแผนออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้ นำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าคุณสมบัติทางกลคือ ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง จากนั้นนำข้อมูลจากค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมเข้าไป อุณหภูมิพลาสติกหลอม ความเร็วรอบสกรู และความเร็วในการฉีด มีผลอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ โดยมีค่าที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปดังตารางที่ 9 คือที่ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 2.5 อุณหภูมิพลาสติกหลอมเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีดเท่ากับ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 75 รอบต่อนาที และความดันอัดเท่ากับ 65 บาร์ จากนั้นทำการทดลองที่เงื่อนไขดังกล่าวเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบที (t-test) หนึ่งตัวอย่าง ที่ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) เท่ากับ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%
ค่ามอดูลัสของยัง	5	1732.2	58.7	26.3	(1659.3, 1805.1)
ค่าความแข็งแรงดึง	5	33.98	1.571	0.703	(32.031, 35.933)

สำหรับการนำเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (MANOVA) มาใช้นั้นสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามทั้งสองตัว มีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน

นอกจากนี้ ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล แสดงให้เห็นว่าปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น มีผลทำให้ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง มีคุณสมบัติดีขึ้น เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง ที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้ผลของค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.37 และ 41.58 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความแข็งแรงดึงเทียบกับน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ให้ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงดึงเทียบกับน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.14 และที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงดึงเทียบกับน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 39.24 ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยัง ค่าความแข็งแรงดึง และอัตราส่วนความแข็งแรงดึงเทียบกับน้ำหนักที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ต่างกัน

	PP/	PP/MWCNT	
	0 %wt MWCNT	0.5 %wt MWCNT	2.5 %wt MWCNT
น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ (กรัม)	8.32	8.03 (-3.49%)	8.13 (-2.28%)
ค่ามอดูลัสของยัง (MPa)	1,451	1,624 (+11.92%)	1,732 (+19.37%)
ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	24.0	32.21 (+34.20%)	33.98 (+41.58%)
อัตราส่วนความแข็งแรงดึง เทียบกับน้ำหนัก (MPa/g)	2.88	4.01 (+39.24%)	4.18 (+45.14%)

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผสมเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผสมเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าในวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผสมเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก แสดงถึงว่าการกระจายตัวที่ดีส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ จึงทำให้ไม่ได้ทดลองหาผลของปัจจัยอื่นนอกเหนือจากงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของแต่ละปัจจัยตามที่ได้อ้างอิงไว้ในส่วนการตรวจเอกสาร ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไป ควรทำการศึกษาหาผลของปัจจัยอื่นนอกเหนือจากในงานวิจัยนี้เช่น เปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ หรือการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของท่อนานโนคาร์บอน รวมถึงเพิ่มระดับในการศึกษาของแต่ละปัจจัยเพิ่มเติม

นอกจากนี้จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของผู้วิจัย พบว่าคุณสมบัติอีกประเภทที่มีความน่าสนใจในการศึกษาขั้นต่อไปคือ คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนผสมท่อนานโนคาร์บอน เนื่องจากท่อนานโนคาร์บอนมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่สูง และเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุพอลิเมอร์ จะทำให้วัสดุนั้นมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น ซึ่งหากสามารถทำการวิจัยพลาสติกที่นำไฟฟ้าได้นั้น จะส่งผลให้มีคุณค่าทางการตลาดที่สูงขึ้น และยังมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในทางวิศวกรรมได้มากขึ้นอีกด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กัลยา วานิชย์บัญชา. 2551. การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร. ครั้งที่ 3. บริษัท ชรรรมสาร จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ชยันต์ เลาสู่ทแสน. 2548. การออกแบบแผนการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการฉีดพลาสติก กรณีศึกษา โรงงานฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปารเมศ ชุติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มณฑล ฉายอรุณ. 2531. ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ. ครั้งที่ 1. ยูไนเต็ทบุ๊คส์, กรุงเทพฯ.
- ฝ่ายโพลิเมอร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม. 2543. การแก้ไขปัญหาชิ้นงานฉีดพลาสติกที่มองเห็นด้วยตาเปล่า. Industrial Technology Review 76: 84-87.
- วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. 2540. งานฉีดพลาสติก. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.
- เหรียญ พลต่าง. 2542. การทดลองเปรียบเทียบส่วนผสมของสารแพ็คคาร์บูไรซิ่งในกระบวนการชุบผิวแข็งโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- 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**
- Berins, M.L. 1991. **Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry**. 5th ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

- 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.
- D.C. Montgomery. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ferdinand, R., C. Claude, K.O. Christipher and A.A. Lynden. 2003. **Principle of Polymer Systems**. 5th ed. Taylor&Francis Books. New York.
- Hammel, E., X. Tang, M. Trampert, T. Schmitt, K. Mauthner, A. Eder and P. Potschke. 2004. Carbon nanofibers for composite applications. **Carbon** (42): 1153-1158.
- Harris, P.J.F. 1999. **Carbon Nanotubes and Related Structures**. Cambridge University Press, New York.
- Jeanvons, D. 2004. **Training Course Injection Moulding Technology**. Polybridge Training LTD, UK.
- Meyyappan, M. 2005. **Carbon Nanotubes Science and Applications**. CRC press. New York.
- Milo, S.P.S. and K.W.S. Jan. **Carbon Nanotube/Nanofibre Polymer Composites**(n.d.). n.p.
- Moncy, J., T. James and D. Derrick. (n.d.). **Polymer/ Carbon Nanotube Nanocomposite Fibers: Process-Morphology-property Relationships**. 19
- Olson, C.L. 1976. On Choosing a Test Statistic in Multivariate Analysis of Variance. **Psychological Bulletin** (83): 579-586.

- Rodney, S.R. and C.L. Donald. 1995. **Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotubes**. Carbon (33): 925-930.
- Sandler, J., G. Broza, M. Nolte, K. Schulte, Y.-M. Lam and M.S.P. Shaffer. 2003. Crystallization of Carbon Nanotube and Nanofiber Polypropylene Composites. **Journal of Macromolecular Science** (B42): 479-488.
- Satish, K., D. Harit, S. Mohan, O.P. Jung and A.S. David. 2002. **Fibers from polypropylene /nano carbon fiber composites**. Polymer (43):1701-1703.
- Seo, M.K. and S.J. Park. 2004. Electrical resistivity and rheological behaviour of carbon nanotubes-filled polypropylene composites. **Chemical Physics Letters** (395): 44-48.
- Singjai, P., S. Changsarn and S. Thongtem. 2007. Electrical resistivity of bulk multi-walled carbon nanotubes synthesized by an infusion chemical vapor deposition method. **Materials Science & Engineering A** (443): 42-46.
- Villmow, T., S. Pegel, P. Potschke and U. Wagenknecht. 2008. Influence of injection molding parameters on the electrical resistivity of polycarbonate filled with multi-walled carbon nanotubes. **Composites Science and Technology** (68): 777-789.
- 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

ภาคผนวก ก

รายละเอียดทั่วไปของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC

1. รายละเอียดทั่วไปของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC

เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC เป็นเครื่องฉีดพลาสติกของบริษัท Battenfeld Austria ใช้ระบบ ควบคุมการปิดเปิดของแม่พิมพ์ และควบคุมการทำงานด้วย control unit รุ่น UNILOG 4000 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

1.1 ระบบ injection

ตารางผนวกที่ ก1 คุณสมบัติของชุดฉีดของเครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA250/50 CDC

คุณสมบัติ	ค่า		
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูฉีด (Screw diameter), mm	18	22	25
2. ความดันฉีดจำเพาะ (Specific injection pressure), bar	2224	1488	1153
3. น้ำหนักของชิ้นงานที่สามารถฉีดได้ (Max shot weight), g			
- polystyrene	20.4	30.4	39.3
- polyethylene	15.9	23.7	30.6
4. อัตราส่วนของเกลียวหนอน (L/D ratio of screw)	19.6	16	14.1
5. ระยะหัวฉีด (Nozzle path), mm		150	
6. แรงดันในหัวฉีด (Nozzle pressure force), kN		88	
7. ความจุความร้อนของกระบอกฉีด (Cylinder heating capacity), kW		3.16	

1.2 ระบบ mold clamping

ตารางผนวกที่ ก2 คุณสมบัติของชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ของเครื่องฉีดพลาสติกกรุ่น BA250/50 CDC

คุณสมบัติ	ค่า
1. แรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์ (Clamping force), kN	400
2. ระยะห่างระหว่างเพลาหน้าเลื่อน (Distance between tie bar), mm	270
3. ขนาดของแผ่นยึดแม่พิมพ์ (Size of mold plate), mm	440×440
4. ความสูงต่ำสุดของแม่พิมพ์ (Min. mold height), mm	125
5. ระยะในการเปิดแม่พิมพ์ (Opening stroke), mm	325
6. แรงของชุดปลดชิ้นงาน (Ejector force), kN	17.6
7. ระยะเลื่อนของชุดปลดชิ้นงาน (Ejector stroke), mm	100



ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องฉีดพลาสติกกรุ่น BA 250/50 CDC

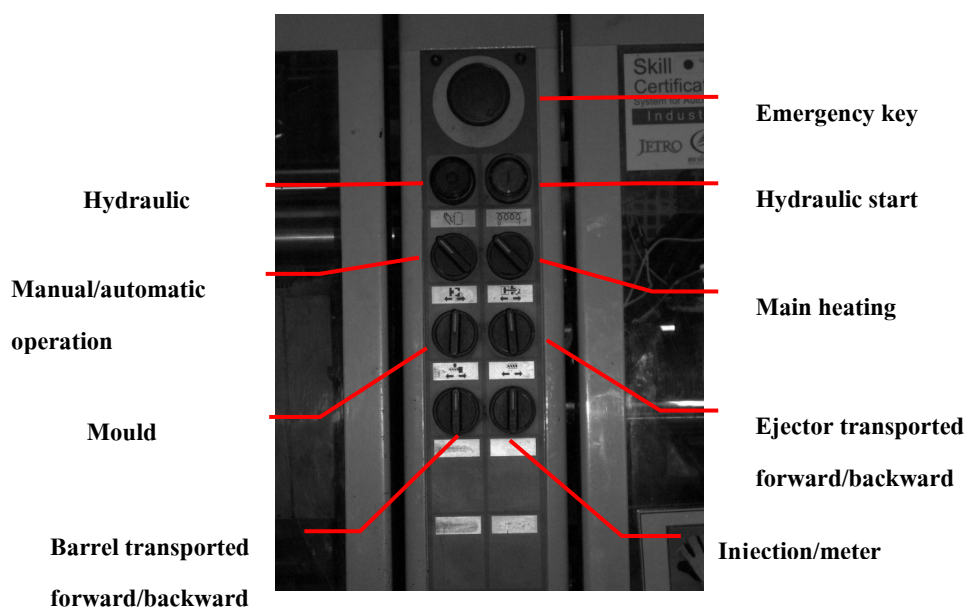
ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT)

2. การควบคุมเครื่องฉีดพลาสติกเบื้องต้น

เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น BA 250/50 CDC ควบคุมการทำงานด้วย control unit รุ่น UNILog 4000 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญต่อการควบคุมเครื่องฉีดดังนี้

2.1 ปุ่มกดควบคุมการทำงาน (Manual operating button) ประกอบด้วย

- ปุ่มหยุดฉุกเฉิน (Emergency key)
- ปุ่มเปิด/ปิดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic start/stop key)
- สวิตช์เปิดปิดฮีตเตอร์ (Main heating switch on/off)
- ปุ่มกดควบคุมการทำงานต่างๆ ในการฉีดพลาสติก เช่น เลื่อนแม่พิมพ์ เลื่อนหัวฉีด เป็นต้น

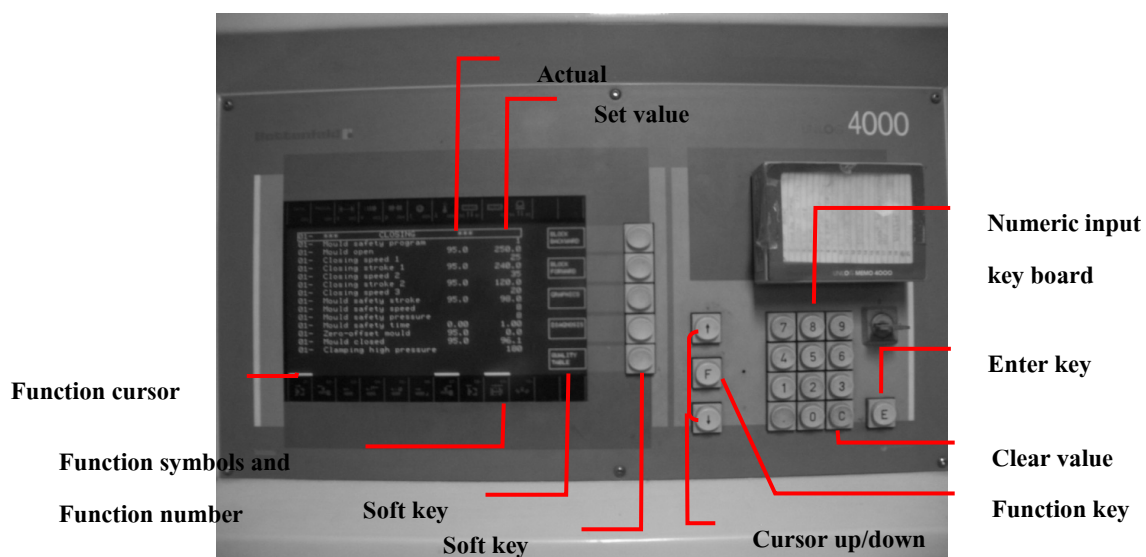


ภาพผนวกที่ ก2 ส่วนประกอบต่างๆ ของปุ่มกดควบคุมการทำงาน

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP)

2.2 คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน (Control monitor and control panel)

มีไว้สำหรับตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับเครื่องฉีด



ภาพผนวกที่ ก3 ส่วนประกอบต่างๆ ของคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน
ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP)

2.2.1 F00-1 PROGRAMS



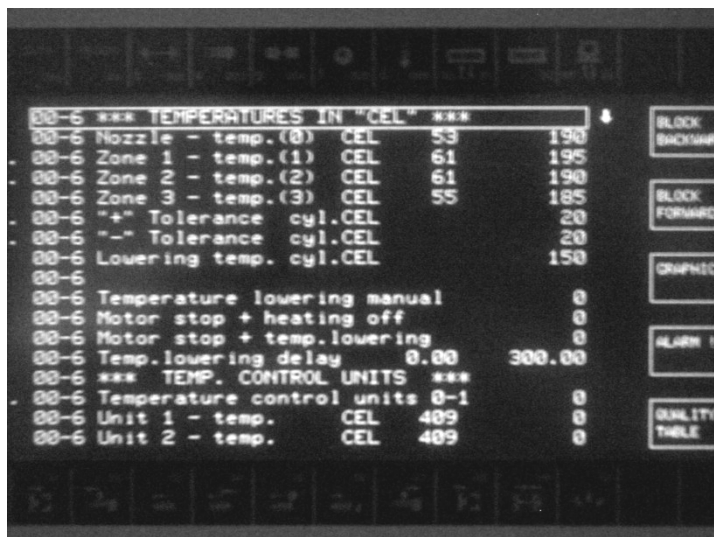
ภาพผนวกที่ ก4 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F00-1

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPIT)

ก. Operating mode 0-1-2-3 ใช้ควบคุมระบบการทำงานอัตโนมัติของเครื่องฉีดพลาสติก โดยสามารถตั้งได้ 4 แบบดังนี้

- 0 หมายถึงปิดระบบการทำงานอัตโนมัติ
- 1 หมายถึงระบบกึ่งอัตโนมัติ 1 คือการกำหนดให้เครื่องฉีดพลาสติกโดยอัตโนมัติจนครบหนึ่งซ็อต แต่จะไม่ฉีดซ็อตที่สองต่อ จนกว่าจะสั่งเริ่มการฉีดซ็อตต่อไป (ด้วยการเลื่อน mold)
- 2 หมายถึงระบบกึ่งอัตโนมัติ 2 จะเหมือนกับ 1 แต่ต่างกันตรงที่ว่าเครื่องจะไม่เลื่อน ejector pin เข้ามาเก็บ ซึ่งมีประโยชน์คือชิ้นงานอาจจะคาอยู่ที่ปลาย ejector pin ทำให้สามารถหยิบชิ้นงานมาตรวจสอบได้ง่ายขึ้น
- 3 หมายถึงระบบอัตโนมัติ คือการกำหนดให้เครื่องดำเนินกระบวนการฉีดพลาสติกต่อเนื่องไปเรื่อยๆ โดยไม่หยุดจนกว่าจะสั่งหยุดหรือเกิดปัญหาขึ้น

2.2.2 F00-6 TEMPERATURE



00-6 *** TEMPERATURES IN "CEL" ***			
00-6	Nozzle - temp.(0)	CEL	53 190
00-6	Zone 1 - temp.(1)	CEL	61 195
00-6	Zone 2 - temp.(2)	CEL	61 190
00-6	Zone 3 - temp.(3)	CEL	55 185
00-6	"+" Tolerance cyl.CEL		20
00-6	"-" Tolerance cyl.CEL		20
00-6	Lowering temp. cyl.CEL		150
00-6	Temperature lowering manual		0
00-6	Motor stop + heating off		0
00-6	Motor stop + temp.lowering		0
00-6	Temp.lowering delay	0.00	300.00
00-6	*** TEMP. CONTROL UNITS ***		
00-6	Temperature control units 0-1		0
00-6	Unit 1 - temp.	CEL	409 0
00-6	Unit 2 - temp.	CEL	409 0

ภาพผนวกที่ ก5 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F00-6

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT)

ก. Nozzle – temp. (0) CEL ควบคุมอุณหภูมิที่หัวฉีด (Nozzle)

ข. Nozzle – temp. (1) CEL ควบคุมอุณหภูมิในช่วงวัดปริมาตร (Metering zone)

ค. Nozzle – temp. (2) CEL ควบคุมอุณหภูมิในช่วงอัด (Compression zone)

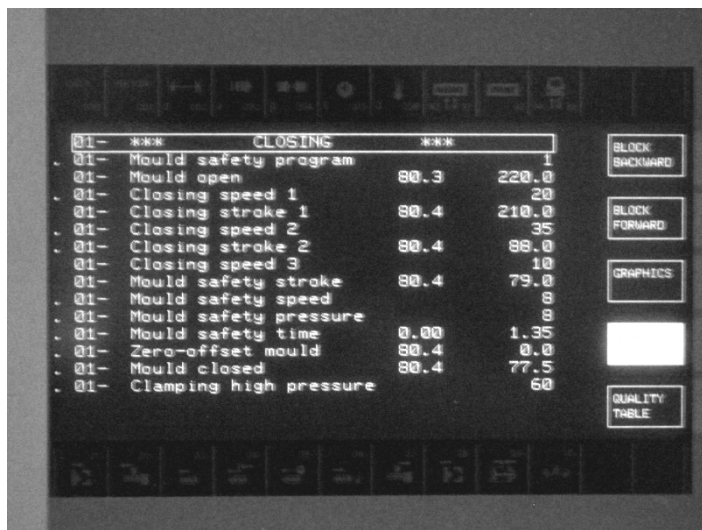
ง. Nozzle – temp. (3) CEL ควบคุมอุณหภูมิในช่วงป้อน (Feed zone)

จ. “+” Tolerance cyl.CEL ควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่อนุญาต โดยหากอุณหภูมิจริง (actual value) ในส่วนใดๆ ของเครื่องฉีด มีค่ามากกว่าผลบวกของค่านี้กับค่าที่ตั้งไว้ (Set value) ในส่วนนั้นๆ เครื่องฉีดจะหยุดทำงาน

ฉ. “-” Tolerance cyl.CEL ควบคุมอุณหภูมิต่ำสุดที่อนุญาต โดยหากอุณหภูมิจริง (actual value) ในส่วนใดๆ ของเครื่องฉีด มีค่าต่ำกว่าผลลบของค่าที่ตั้งไว้ (Set value) ในส่วนนั้นๆ กับค่านี้ เครื่องฉีดจะหยุดทำงาน

ช. Oil – hydr. (4) CEL อุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิก ต้องมากกว่า 40 องศาขึ้นไปเครื่องจึงจะเริ่มทำงานได้

2.2.3 F01 CLOSING



ภาพผนวกที่ ก6 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F01

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT)

ก. Mould safety program เปิดปิดระบบป้องกันแม่พิมพ์ โดย 0 คือปิด และ 1 คือเปิด หากเปิดโปรแกรมแล้วแม่พิมพ์เคลื่อนจากตำแหน่ง Mould safety stroke ที่กำหนดไว้ไปยังตำแหน่ง mould closed ไม่ทันภายในเวลาที่กำหนด (Mould safety time) แม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการตั้งค่า Stroke หรือ Speed ไม่เหมาะสม หรือมีวัตถุติดคาอยู่ในแม่พิมพ์

ข. Mould open ควบคุมระยะเปิดแม่พิมพ์ ซึ่งจำเป็นต้องตั้งให้เหมาะสม หากมากเกินไปก็จะเสียเวลาในการฉีดขึ้นงานหนึ่งชิ้นมากกว่าที่ควร หากน้อยเกินไปก็อาจทำให้ชิ้นงานติดค้างอยู่ในแม่พิมพ์เพราะระยะเปิดไม่เพียงพอ โดยปกติแล้วสามารถคำนวณระยะคร่าวๆ ได้โดยนำความหนาของชิ้นงาน (ในแนวแม่พิมพ์เลื่อนเข้าออก) คูณสองบวกด้วยความยาวของกรวยนำฉีด (sprue)

ค. Closing speed 1 ควบคุมความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ระหว่างตำแหน่ง Mould open ไปถึงตำแหน่ง Closing stroke 1

ง. Closing stroke 1 ระยะปิดแม่พิมพ์ระยะที่ 1

จ. Closing speed 2 ควบคุมความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ระหว่างตำแหน่ง Closing stroke 1 ไปถึงตำแหน่ง Closing stroke 2

ฉ. Closing stroke 2 ระยะปิดแม่พิมพ์ระยะที่ 2 โดยปกติแล้วจะตั้งค่าให้ระยะนี้เป็นตำแหน่งที่สลักนำเลื่อน (Guide pin) เริ่มสอดเข้าไปในรูปลอกนำเลื่อน (Guide bush)

ช. Closing speed 3 ควบคุมความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ระหว่างตำแหน่ง Closing stroke 2 ไปถึงตำแหน่ง Mould safety stroke

ซ. Mould safety stroke ระยะป้องกันแม่พิมพ์

ณ. Mould safety speed ควบคุมความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ระหว่างตำแหน่ง Mould safety stroke ไปถึงตำแหน่ง Mould closed

ญ. Mould safety pressure แรงดันในการป้องกันแม่พิมพ์

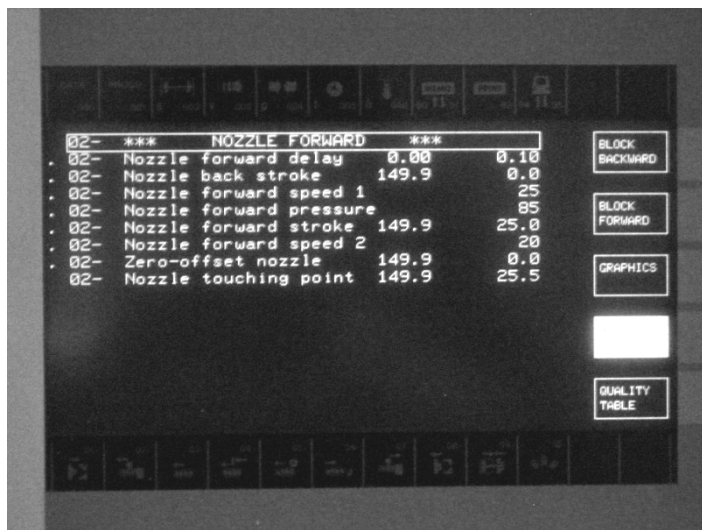
ฎ. Mould safety time ตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการป้องกันแม่พิมพ์ ระหว่างที่แม่พิมพ์เลื่อนจากตำแหน่ง Mould safety stroke ไปถึงตำแหน่ง Mould closed หากตั้งโปรแกรมป้องกันแม่พิมพ์ไว้และแม่พิมพ์เลื่อนจากตำแหน่ง Mould safety stroke ไปถึงตำแหน่ง Mould closed ไม่ทันภายในเวลาที่ตั้งไว้ แม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อป้องกันความเสียหาย

ฏ. Zero-offset mould กำหนดจุดอ้างอิงสัมพัทธ์ (Relative reference) โดยเทียบกับจุดอ้างอิงปกติหรือจุดอ้างอิงสมบูรณ์ (Absolute reference) เพื่อความสะดวกในการทำงาน แต่โดยปกติแล้วไม่จำเป็นต้องใช้

ฐ. Mould closed ระยะแม่พิมพ์ปิด การตั้งค่านี้อาจต้องเลื่อนแม่พิมพ์มาปิดให้สนิทก่อนแล้วจึงค่อยตั้งค่าโดยนำค่าจริงที่อ่านได้มาบวกหนึ่ง หากไม่ตั้งค่านี้นี้ให้เสร็จเรียบร้อยก่อนจะไม่สามารถปิดแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูงได้ (High pressure)

ฑ. Clamping high pressure แรงดันสูงสุดที่ใช้ในการปิดแม่พิมพ์ โดยทั่วไปการตั้งค่านี้นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแม่พิมพ์ โดยหากเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กก็จะใช้แรงดันน้อยกว่าแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามหากตั้งค่านี้น้อยเกินไปอาจเกิดครีบ (Flash) ในชิ้นงานได้เนื่องจากแรงดันของน้ำพลาสติกสามารถเอาชนะแรงดันในการปิดแม่พิมพ์

2.2.4 F02 NOZZLE FORWARD



ภาพผนวกที่ ก7 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F02

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPAT)

ก. Nozzle forward delay ระยะเวลาที่หัวฉีดค้างไว้ หลังจากแม่พิมพ์ปิด หัวฉีดจะยังไม่เคลื่อนที่ไปจนกว่าจะครบกำหนดเวลาที่ได้ตั้งไว้แล้วจึงค่อยเคลื่อนไปข้างหน้าเพื่อทำการฉีด

ข. Nozzle back stroke ระยะถอยหลังสุดของหัวฉีด

ค. Nozzle forward speed 1 ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าของหัวฉีดระหว่างตำแหน่ง Nozzle back stroke จนถึงตำแหน่ง Nozzle forward stroke

ง. Nozzle forward pressure ความดันในการเคลื่อนหัวฉีดเข้า

จ. Nozzle forward stroke ระยะเคลื่อนเข้าของหัวฉีดระยะที่ 1

ฉ. Nozzle forward speed 2 ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าของหัวฉีดระหว่างตำแหน่ง nozzle forward stroke จนถึงตำแหน่ง Nozzle touching point

ช. Zero-offset nozzle กำหนดจุดอ้างอิงสัมพัทธ์ (Relative reference) โดยเทียบกับจุดอ้างอิงปกติหรือจุดอ้างอิงสมบูรณ์ (Absolute reference) เพื่อความสะดวกในการทำงาน แต่โดยปกติแล้วไม่จำเป็นต้องใช้

ซ. Nozzle touching point ระยะที่หัวฉีดติดกับแม่พิมพ์ การตั้งค่านี้นี้ต้องเลื่อนหัวฉีดมาสัมผัสกับแม่พิมพ์ให้สนิทก่อนแล้วจึงค่อยตั้งค่าโดยนำค่าจริงที่อ่านได้มาบวกหนึ่ง หากไม่ตั้งค่านี้นี้ให้เสร็จเรียบร้อยก่อนจะไม่สามารถฉีดพลาสติกได้ (เครื่องฉีดจะค้าง)

2.2.5 F03 INJECTION



ภาพผนวกที่ ก8 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F03

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDipt)

ก. Injection delay ระยะเวลาที่หน่วงไว้ก่อนการฉีด หลังจากหัวฉีดเลื่อนมาสนิทกับแม่พิมพ์แล้วจะยังไม่ทำการฉีดจนกว่าจะครบกำหนดเวลาที่ได้ตั้งไว้

ข. Max. injection pressure แรงดันสูงสุดที่ใช้ในการฉีด ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความหนืดของพลาสติก ซึ่งหากพลาสติกมีความหนืดมากก็อาจต้องใช้แรงดันมากขึ้นในการเอาชนะความหนืดนั้น อย่างไรก็ตามความหนืดของพลาสติกเป็นคุณสมบัติที่แปรผกผันต่ออุณหภูมิ (อุณหภูมิมากความหนืดน้อย) อีกปัจจัยหนึ่งคือลักษณะของหลุมแบบ (Cavity) และทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) หากพลาสติกสามารถไหลเข้าไปเต็มเต็มในแม่พิมพ์ได้ยากก็อาจต้องใช้แรงดันมากขึ้นเพื่อช่วยในการไหลของน้ำพลาสติก อย่างไรก็ตามหากแรงดันมากเกินไปจะทำให้เกิดคิริบ (flash) ในชิ้นงาน แต่หากแรงดันน้อยเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานไม่เต็ม (short shot)

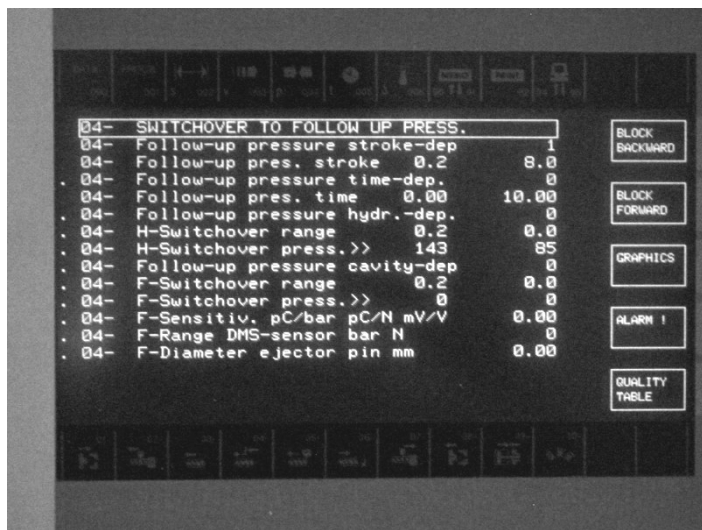
ค. Decompression stroke 2 ระยะทางที่สกรูดึงกลับ

ง. Metering stroke ปริมาณพลาสติกที่จะฉีดในครั้งนั้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการฉีดพลาสติก เพราะหากปริมาณพลาสติกที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ไม่เพียงพออาจทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานไม่เต็ม (Short shot) ได้ นอกจากนี้ค่าจริง (Actual value) ที่อ่านได้จากพารามิเตอร์นี้มีความสำคัญมาก ซึ่งต้องสังเกตมากเป็นพิเศษเพราะสามารถบอกได้ถึงสถานะการฉีดในขณะนั้นๆ โดยหากในจังหวะสุดท้ายของการฉีดค่าที่อ่านได้นี้มีค่าศูนย์ถึงติดลบแสดงว่าปริมาณพลาสติกไม่เพียงพออาจทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานไม่เต็มได้ แต่หากค่าที่อ่านได้นี้มีมากเกินไปแสดงว่าฉีดน้ำพลาสติกไม่เข้าแม่พิมพ์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการตั้งค่าไม่เหมาะสม (เช่น ปริมาณพลาสติกเยอะเกินไป หรืออุณหภูมิและความดันไม่เพียงพอทำให้น้ำพลาสติกไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ยาก) และอาจทำให้เกิดปัญหาตามมาได้ โดยปกติแล้วค่าที่อ่านได้จากจังหวะสุดท้ายของการฉีดนี้ควรมีเหลือเล็กน้อยโดยไม่ลดจนถึงศูนย์หรือมากเกินไปเพื่อเป็นระยะกันกระแทก (Cushion)

- จ. Injection speed 1 ความเร็วในการฉีดระยะที่ 1
- ฉ. Injection stroke 1 ระยะในการฉีดระยะที่ 1
- ช. Injection speed 2 ความเร็วในการฉีดระยะที่ 2
- ซ. Injection stroke 2 ระยะในการฉีดระยะที่ 2
- ฅ. Injection speed 3 ความเร็วในการฉีดระยะที่ 3
- ญ. Injection stroke 3 ระยะในการฉีดระยะที่ 3
- ฎ. Injection speed 4 ความเร็วในการฉีดระยะที่ 4
- ฏ. Injection stroke 4 ระยะในการฉีดระยะที่ 4
- ฐ. Injection speed 5 ความเร็วในการฉีดระยะที่ 5

โดยทั่วไปแล้วการกำหนดระยะและความเร็วในการฉีดว่าจะมีกี่ระยะและมีความเร็วแต่ละระยะมากน้อยแค่ไหนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน, ทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) และกรวยน้ำฉีด (Sprue) และมักจะกำหนดให้มีความเร็วช่วงแรกช้า ช่วงกลางเร็ว และช่วงสุดท้ายช้า

2.2.6 F04 SWITCHOVER TO FOLLOW UP PRESS.



ภาพผนวกที่ ก9 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F04

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT)

ก. Follow-up pressure stroke-dep เป็นตัวกำหนดให้ใช้แรงดันย่ำ (Follow up pressure) แบบกำหนดด้วย stroke โดย 0 คือไม่ใช้ และ 1 คือใช้แรงดันย่ำแบบกำหนดด้วย Stroke

ข. Follow-up pres. stroke ควบคุมตำแหน่งของ Stroke ที่จะใส่ความดันย่ำเข้าไป โดยจะดูจากค่าจริง (Actual value) ของ Metering stroke หากมีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ในพารามิเตอร์นี้ให้เริ่มต้นใส่ความดันย่ำเข้าไป ซึ่งหากเครื่องฉีดน้ำพลาสติกเข้าไปได้ไม่ถึงค่า Stroke ที่ตั้งไว้นี้ เครื่องฉีดจะหยุดทำงาน

ค. Follow-up pressure time-dep เป็นตัวกำหนดให้ใช้แรงดันย่ำ (Follow up pressure) แบบกำหนดด้วยเวลา โดย 0 คือไม่ใช้ และ 1 คือใช้แรงดันย่ำแบบกำหนดด้วยเวลา

ง. Follow-up pressure time ควบคุมเวลาที่จะใส่ความดันย่ำเข้าไป โดยจะเริ่มนับตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการ หากถึงเวลาที่ตั้งไว้ก็จะใส่ความดันย่ำเข้าไปทันที โดยไม่สนใจว่าเครื่องจะฉีดน้ำพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ได้ตามความต้องการหรือไม่

สามารถเลือกใช้ฟังก์ชัน Follow-up pressure stroke-dep หรือ Follow-up pressure time-dep ได้ทีละอย่างเท่านั้น โดยหากใส่ค่า 1 ไปที่ตัวใดตัวหนึ่ง อีกตัวหนึ่งจะกลายเป็น 0 ทันที

2.2.7 F05 FOLLOW-UP PRESSURE



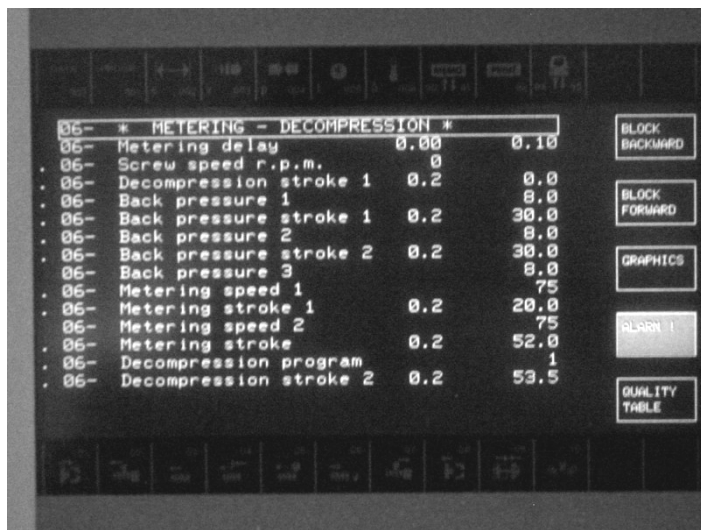
ภาพผนวกที่ ก10 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F05

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPIT)

- ก. Follow-up pressure 1 แรงดันย้าในช่วงเวลาที่ 1
- ข. Follow-up press. 1 time ระยะเวลาที่ใช้แรงดันย้าช่วงที่ 1
- ค. Follow-up pressure 2 แรงดันย้าในช่วงเวลาที่ 2
- ง. Follow-up press. 2 time ระยะเวลาที่ใช้แรงดันย้าช่วงที่ 2
- จ. Follow-up pressure 3 แรงดันย้าในช่วงเวลาที่ 3
- ฉ. Follow-up press. 3 time ระยะเวลาที่ใช้แรงดันย้าช่วงที่ 3
- ช. Follow-up pressure 4 แรงดันย้าในช่วงเวลาที่ 4
- ซ. Follow-up press. 4 time ระยะเวลาที่ใช้แรงดันย้าช่วงที่ 4
- ณ. Follow-up pressure 5 แรงดันย้าในช่วงเวลาที่ 5
- ญ. Follow-up press. 5 time ระยะเวลาที่ใช้แรงดันย้าช่วงที่ 5

ฎ. Cooling time ระยะเวลาในการหล่อเย็น หลังจากอัดความดันย้าเสร็จแล้ว แม่พิมพ์จะยังไม่เปิดโดยทันที โดยจะเริ่มนับตั้งแต่ Follow-up pressure ช่วงสุดท้าย หลังจากหมดช่วง cooling time แล้วแม่พิมพ์จึงจะเริ่มเปิดออก จะสังเกตได้ว่าเวลาหล่อเย็นจะเริ่มนับพร้อมกับการถอยกลับของสกรู

2.2.8 F06 METERING - DECOMPRESSION



ภาพผนวกที่ ก11 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F06

ที่มา: สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPIT)

ก. Metering delay เวลาหน่วงในการถอยกลับของสกรู โดยจะเริ่มนับหลังจากหมดช่วงความดันย่ำ (Follow-up pressure) ช่วงสุดท้ายแล้ว สกรูจะยังไม่ถอยกลับทันทีจนกว่าจะหมดช่วงเวลาที่ได้อ้างไว้ แล้วจึงเริ่มถอยกลับ จะสังเกตได้ว่าเวลาหน่วงในการถอยกลับของสกรูจะเริ่มนับพร้อมกับเวลาหล่อเย็น (Cooling time)

ข. Screw speed r.p.m. ความเร็วในการหมุนของสกรู

ค. Decompression stroke 1 ระยะที่สกรูถอยกลับระยะที่ 1 ซึ่งจะเริ่มทำงานทันทีเมื่อหมดช่วง Metering delay ในกรณีที่ใส่ค่าเป็น 0 เครื่องนี้จะใช้ค่าจริง (Actual value) ของ Metering stroke เป็น Decompression stroke 1

ง. Back pressure 1 ควบคุมแรงดันด้านการถอยกลับของสกรูระยะที่ 1

จ. Back pressure stroke 1 ระยะด้านการถอยกลับของสกรูระยะที่ 1

ฉ. Back pressure 2 ควบคุมแรงดันด้านการถอยกลับของสกรูระยะที่ 2

ช. Back pressure stroke 2 ระยะด้านการถอยกลับของสกรูระยะที่ 2

ซ. Back pressure 3 ควบคุมแรงดันด้านการถอยกลับของสกรูระยะที่ 3

ณ. Metering speed 1 ควบคุมความเร็วในการถอยกลับของสกรูตั้งแต่ Decompression stroke 1 จนถึง Metering stroke 1

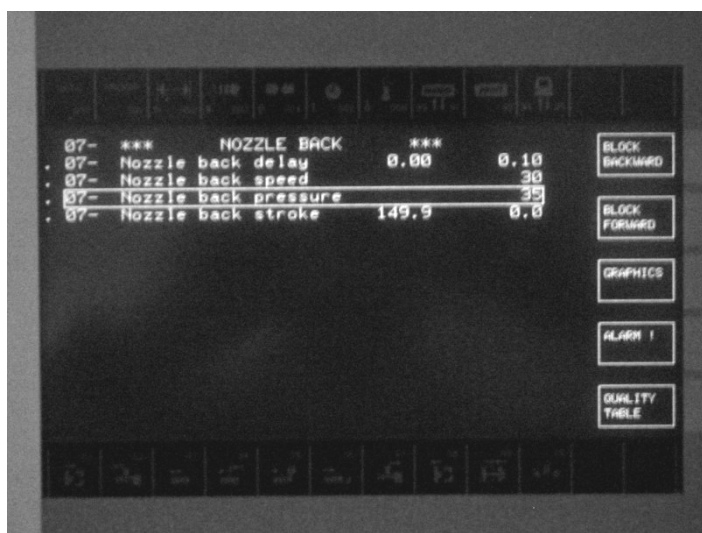
ญ. Metering stroke 1 ระยะสกรูถอยเพื่อป้อนพลาสติกระยะที่ 1

ฎ. Metering speed 2 ควบคุมความเร็วในการถอยกลับของสกรูตั้งแต่ Metering stroke 1 จนถึง Metering stroke

ฏ. Metering stroke ระยะสกรูถอยเพื่อป้อนพลาสติกสูงสุด ซึ่งระยะนี้จะแสดงถึงปริมาณของพลาสติกที่ถูกเติมเข้าไปในท่อนิดที่แท้จริง โดยค่านี้จะเป็นค่าเดียวกับฟังก์ชัน F03

ฐ. Decompression stroke 2 ระยะที่สกรูถอยกลับสูงสุด โดยค่านี้จะเป็นค่าเดียวกับ F03

2.2.9 F07 NOZZLE BACK



ภาพผนวกที่ ก12 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F07

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDipt)

ก. Nozzle back delay ระยะหน่วงก่อนถอยหัวฉีดกลับ โดยจะเริ่มนับเมื่อหมดความดันซ้ำ (Follow-up pressure) ระยะสุดท้าย โดยหัวฉีดจะยังคงค้างอยู่กับแม่พิมพ์จนกว่าเวลาที่ตั้งไว้จะหมดจึงค่อยเลื่อนถอยหลังจากออกจากแม่พิมพ์

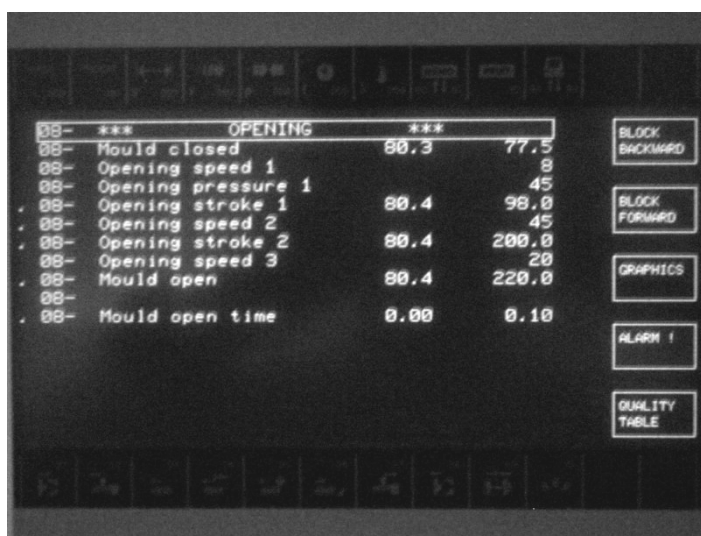
ข. Nozzle back speed ความเร็วในการถอยกลับของหัวฉีด

ค. Nozzle back pressure แรงดันในการถอยกลับของหัวฉีด

ง. Nozzle back stroke ระยะในการถอยกลับของหัวฉีด โดยค่านี้จะเป็นค่าเดียวกับ F02 ในกรณีที่ไม่ต้องการให้หัวฉีดถอยกลับให้ตั้งค่าเป็น 0 โดยปกติแล้วจะให้หัวฉีดถอย

กลับก็ต่อเมื่อต้องการให้หัวฉีดแยกออกจากกรู๊น็ด (Sprue bush) ของแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดซึ่งร้อนให้แก่แม่พิมพ์ที่เย็นกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาพลาสติกในหัวฉีดแข็งตัว (Cold slug) ทำให้ฉีดไม่ได้ ส่วนอีกกรณีที่ไม่พบบ่อยนักคือใช้การถอยกลับของหัวฉีดร่วมกับแหวนกั้นกลับ (Non-return ring)

2.2.10 F08 OPENING



*** OPENING ***		
08-	Mould closed	80.3 77.5
08-	Opening speed 1	8
08-	Opening pressure 1	45
08-	Opening stroke 1	80.4 98.0
08-	Opening speed 2	45
08-	Opening stroke 2	80.4 200.0
08-	Opening speed 3	20
08-	Mould open	80.4 220.0
08-	Mould open time	0.00 0.10

ภาพผนวกที่ ก13 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F08

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT)

- ก. Mould closed ระยะแม่พิมพ์ปิด โดยจะเป็นระยะเดียวกับ F01
- ข. Opening speed 1 ควบคุมความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ตั้งแต่ระยะ Mould closed จนถึง Opening stroke 1
 - ค. Opening pressure 1 ควบคุมแรงดันในการเปิดแม่พิมพ์
 - ง. Opening stroke 1 ระยะเปิดแม่พิมพ์ระยะที่ 1
 - จ. Opening speed 2 ควบคุมความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ตั้งแต่ระยะ Opening stroke 1 จนถึง Opening stroke 2
 - ฉ. Opening stroke 2 ระยะเปิดแม่พิมพ์ระยะที่ 2
 - ช. Opening speed 3 ควบคุมความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ตั้งแต่ระยะ Opening stroke 2 จนถึง Mould open

ซ. Mould open ระยะแม่พิมพ์เปิด โดยจะเป็นระยะเดียวกับ F01

ณ. Mould open time ระยะเวลาในการเปิดแม่พิมพ์ค้างไว้ ก่อนจะเริ่มต้นฉีดข้อต่อไป โดยจะเริ่มนับตั้งแต่ Mould open จนหมดเวลา จึงค่อยเริ่มต้นฉีดข้อต่อไป

2.2.11 F09 EJECTOR

F09- *** EJECTOR ***			
F09-	Ejector v+p program		1
F09-	Ejector strokes	0	3
F09-	Start ejector forward	65.6	200.0
F09-	Ejector forward speed 1		35
F09-	Ejector fwd stroke 1	2.8	45.0
F09-	Ejector forward pressure		45
F09-	Ejector forward speed 2		35
F09-	Ejector fwd stroke	2.9	52.0
F09-	Ejector back delay	0.00	0.00
F09-	Ejector shuttle stroke	2.8	45.0
F09-	Ejector back speed 1		45
F09-	Ejector back stroke 1	2.8	25.0
F09-	Ejector back speed 2		35
F09-	Ejector back pressure		35
F09-	Zero-offset ejector	2.8	0.0
F09-	Ejector back	2.8	15.0

ภาพผนวกที่ ก14 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F09

ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPIT)

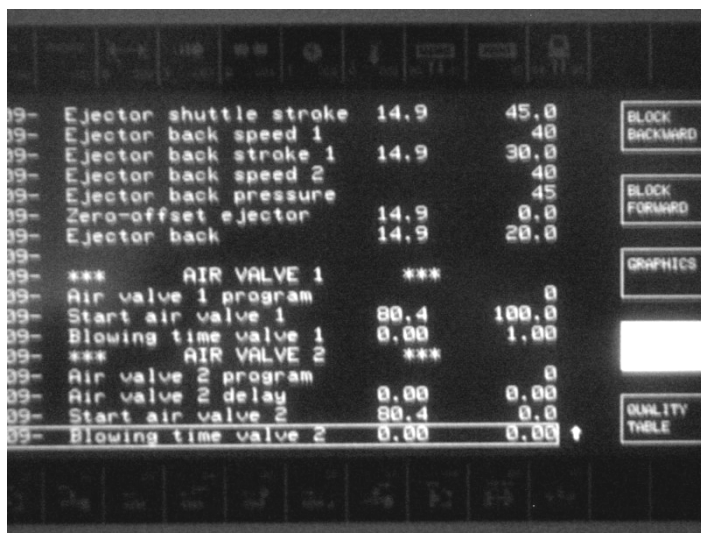
ก. Ejector v+p program ใช้ควบคุมระบบการปลดชิ้นงาน โดยหากใส่ 0 หรือไม่ใช่โปรแกรม เครื่องจะปลดชิ้นงานเมื่อแม่พิมพ์เลื่อนมาถึงตำแหน่ง Start ejector forward แต่หากใส่ 1 หรือใช้โปรแกรม เครื่องจะทำการปลดชิ้นงานต่อเมื่อแม่พิมพ์เลื่อนมาถึงตำแหน่ง Mould open เท่านั้น

ข. Ejector strokes จำนวนในการดันแท่งดันชิ้นงาน (Ejector pin) เข้าออกเพื่อปลดชิ้นงาน ในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะที่เอาออกยาก อาจใส่ Ejector stroke ตั้งแต่สองครั้งขึ้นไป เพื่อให้ปลดชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

ค. Start ejector forward ระยะของแม่พิมพ์ที่ Ejector เริ่มทำงาน เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกจนถึงระยะที่ตั้งไว้ Ejector จะเริ่มทำงานในกรณีที่ปิด Ejector v+p program (ใส่ค่า 0)

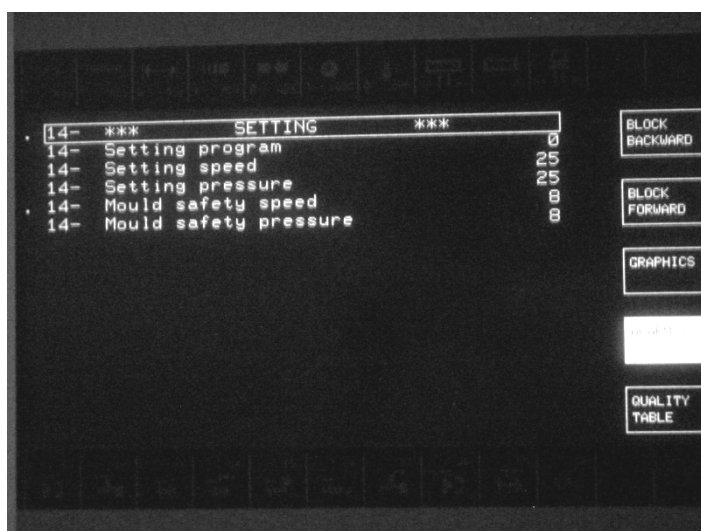
ง. Ejector forward speed 1 ความเร็วของแท่งดันชิ้นงาน (Ejector pin) ตั้งแต่แท่งดันชิ้นงานเริ่มต้นทำงานจนถึง Ejector forward stroke 1

- จ. Ejector forward stroke 1 ระยะยี้ดของแท่งดันขึ้นงานระยะที่ 1
- ฉ. Ejector forward pressure แรงดันยี้ดของแท่งดันขึ้นงาน
- ช. Ejector forward speed 2 ระยะยี้ดของแท่งดันขึ้นงานระยะที่ 2
- ซ. Ejector fwd stroke ระยะยี้ดของแท่งดันขึ้นงานระยะสุดท้าย คือระยะที่แท่งดันขึ้นงานยี้ดออกมามากที่สุด ซึ่งหากตั้งค่านี้น้อยเกินไปขึ้นงานก็อาจจะไม่หล่น แต่ถ้าตั้งมากเกินไปก็จะเสียเวลาในการฉีดขึ้นงาน โดยปกติแล้วจะให้แท่งดันขึ้นงานยี้ดออกมาจนสุดเท่ากับความหนาของขึ้นงาน
- ณ. Ejector back delay เวลาหน่วงก่อนที่แท่งดันขึ้นงานจะถอยกลับไป จะเริ่มนับตั้งแต่ Ejector fwd stroke เมื่อแท่งดันขึ้นงานยี้ดออกมาจนสุดแล้วจะยังไม่หดกลับทันทีจนกว่าจะครบเวลาที่ตั้งไว้ จึงค่อยหดกลับ
- ญ. Ejector back speed 1 ความเร็วในการถอยกลับของแท่งดันขึ้นงาน ตั้งแต่ Ejector fwd stroke จนถึง Ejector back stroke 1
- ฎ. Ejector back stroke 1 ระยะถอยกลับของแท่งดันขึ้นงานระยะที่ 1
- ฏ. Ejector back speed 2 ความเร็วในการถอยกลับของแท่งดันขึ้นงาน ตั้งแต่ Ejector back stroke 1 จนถึง Ejector back
- ฐ. Ejector back pressure แรงดันถอยกลับของแท่งดันขึ้นงาน
- ท. Zero-offset ejector กำหนดจุดอ้างอิงสัมพัทธ์ (Relative reference) โดยเทียบกับจุดอ้างอิงปกติหรือจุดอ้างอิงสมบูรณ์ (Absolute reference) เพื่อความสะดวกในการทำงาน แต่โดยปกติแล้วไม่จำเป็นต้องใช้
- ฒ. Ejector back ระยะถอยกลับจนสุดของแท่งดันขึ้นงาน
- ณ. Air valve program ควบคุมระบบเป่าลมเพื่อช่วยดันขึ้นงานหรือทางวิ่งออกจากแม่พิมพ์ โดยหากใส่ 0 หมายถึงปิดระบบเป่าลม หากใส่ 1 หมายถึงเปิดระบบเป่าลม
- ด. Start air valve ระยะเริ่มต้นเป่าลม เมื่อแม่พิมพ์เลื่อนมาถึงระยะที่ตั้งไว้จะเริ่มเป่าลม
- ค. Blowing time valve ระยะเวลาที่เป่าลม



ภาพผนวกที่ ก15 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F09 ในส่วนของระบบเป่าลม
ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDipt)

2.2.12 F14 SETTING



ภาพผนวกที่ ก16 หน้าจอที่ใช้สำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ F14
ที่มา: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDipt)

ก. Setting program ควบคุมการปิดโดยใช้แรงดันสูงของแม่พิมพ์ โดย

- 0 หมายถึง high pressure clamping
- 1 หมายถึง low pressure clamping

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบวัดค่าคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น HOUNSFIELD
H50KS

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

การ ทดลอง ที่	ปริมาณ ร้อยละโดย น้ำหนัก (%wt)	อุณหภูมิ พลาสติก หลอม (°C)	ความเร็ว ฉีด (mm/sec)	ความเร็ว รอบสกรู (rpm)	ความ ดันย้า (bar)	ความ แข็งแรงดึง (MPa)	มอดูลัส ของยัง (MPa)
1	0.5%	190	25	75	45	29	1500
2	0.5%	190	25	75	65	29.5	1489
3	0.5%	190	25	227	45	29.0313	1569
4	0.5%	190	25	227	65	29.5313	1504
5	0.5%	190	45	75	45	33.2625	1687
6	0.5%	190	45	75	65	32.9625	1779
7	0.5%	190	45	227	45	34.125	1663
8	0.5%	190	45	227	65	34.2375	1728
9	0.5%	220	25	75	45	31.35	1620
10	0.5%	220	25	75	65	32.5125	1624
11	0.5%	220	25	227	45	31.725	1513
12	0.5%	220	25	227	65	31.125	1663
13	0.5%	220	45	75	45	30.25	1524
14	0.5%	220	45	75	65	31	1536
15	0.5%	220	45	227	45	30.9063	1526
16	0.5%	220	45	227	65	30.7813	1522
17	2.5%	190	25	75	45	32.9625	1752
18	2.5%	190	25	75	65	32.175	1671
19	2.5%	190	25	227	45	32.4	1507
20	2.5%	190	25	227	65	32.5875	1565
21	2.5%	190	45	75	45	34.9875	1650
22	2.5%	190	45	75	65	34.425	1725

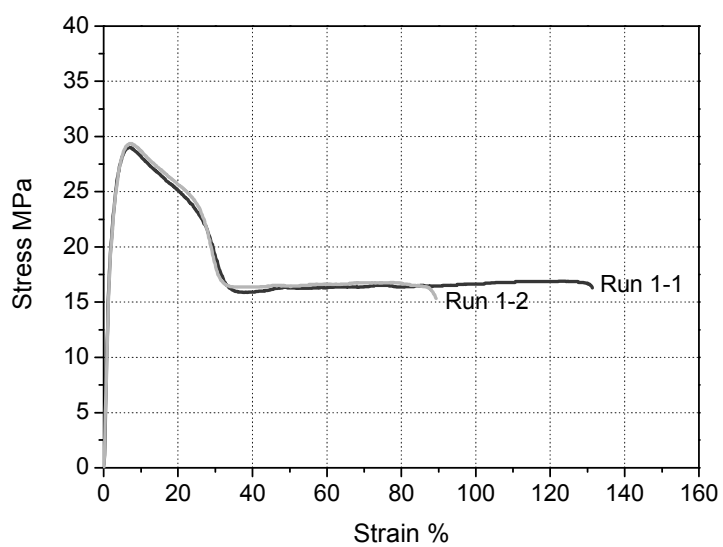
ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การ ทดลอง ที่	ปริมาณ ร้อยละโดย น้ำหนัก (%wt)	อุณหภูมิ พลาสติก หลอม (°C)	ความเร็ว ฉีด (mm/sec)	ความเร็ว รอบสกรู (rpm)	ความ ดันย่ำ (bar)	ความ แข็งแรงดึง (MPa)	มอดูลัส ของยัง (MPa)
23	2.5%	190	45	227	45	36.3375	1816
24	2.5%	190	45	227	65	34.875	1782
25	2.5%	220	25	75	45	35.7375	1815
26	2.5%	220	25	75	65	35.025	1775
27	2.5%	220	25	227	45	34.35	1691
28	2.5%	220	25	227	65	33.675	1683
29	2.5%	220	45	75	45	35.5125	1774
30	2.5%	220	45	75	65	35.85	1652
31	2.5%	220	45	227	45	33.825	1632
32	2.5%	220	45	227	65	33.6375	1685
33	0.5%	190	25	75	45	29.3438	1420
34	0.5%	190	25	75	65	30.0313	1377
35	0.5%	190	25	227	45	29.25	1570
36	0.5%	190	25	227	65	29.5	1489
37	0.5%	190	45	75	45	32.9625	1673
38	0.5%	190	45	75	65	34.1625	1757
39	0.5%	190	45	227	45	32.775	1732
40	0.5%	190	45	227	65	33.6375	1723
41	0.5%	220	25	75	45	32.3625	1563
42	0.5%	220	25	75	65	31.65	1594
43	0.5%	220	25	227	45	31.7625	1537
44	0.5%	220	25	227	65	29.4688	1607

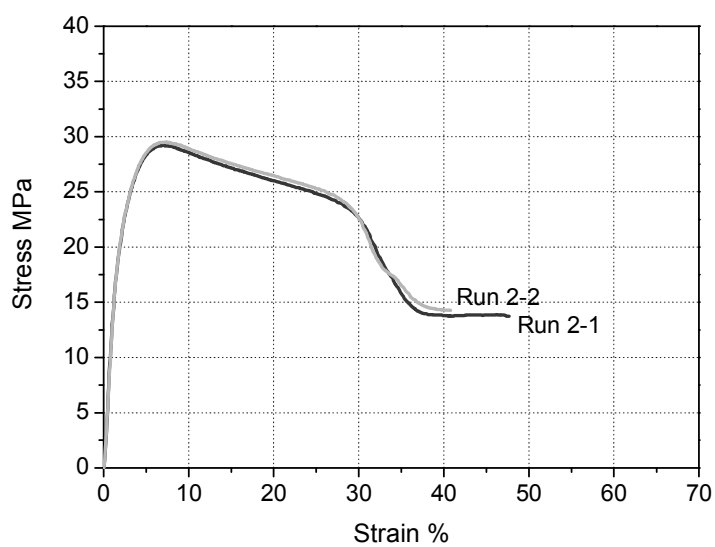
ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การ ทดลอง ที่	ปริมาณ ร้อยละโดย น้ำหนัก (%wt)	อุณหภูมิ พลาสติก หลอม (°C)	ความเร็ว ฉีด (mm/sec)	ความเร็ว รอบสกรู (rpm)	ความ ดันย้า (bar)	ความ แข็งแรงดึง (MPa)	มอดูลัส ของยัง (MPa)
45	0.5%	220	45	75	45	30.9688	1542
46	0.5%	220	45	75	65	31.8	1492
47	0.5%	220	45	227	45	31.4625	1582
48	0.5%	220	45	227	65	30.0313	1519
49	2.5%	190	25	75	45	32.475	1550
50	2.5%	190	25	75	65	31.65	1717
51	2.5%	190	25	227	45	31.0938	1538
52	2.5%	190	25	227	65	32.55	1600
53	2.5%	190	45	75	45	35.025	1665
54	2.5%	190	45	75	65	34.575	1754
55	2.5%	190	45	227	45	35.9625	1838
56	2.5%	190	45	227	65	34.8375	1805
57	2.5%	220	25	75	45	35.775	1883
58	2.5%	220	25	75	65	35.1375	1688
59	2.5%	220	25	227	45	33.975	1707
60	2.5%	220	25	227	65	33.3375	1649
61	2.5%	220	45	75	45	35.1375	1739
62	2.5%	220	45	75	65	35.4	1653
63	2.5%	220	45	227	45	33.825	1633
64	2.5%	220	45	227	65	34.5375	1641

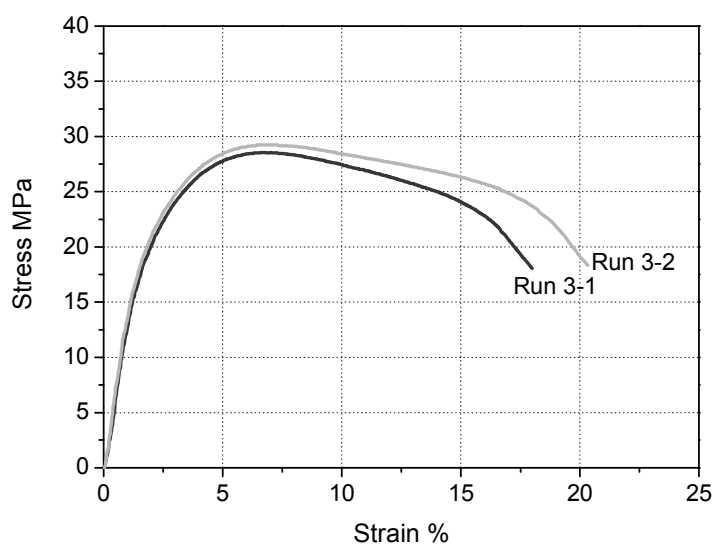
ภาคผนวก ค
เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด



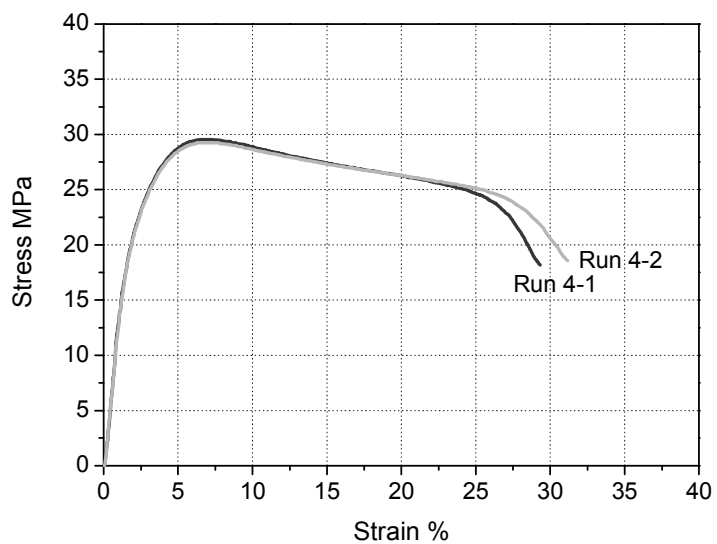
ภาพผนวกที่ ค1 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 1
โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



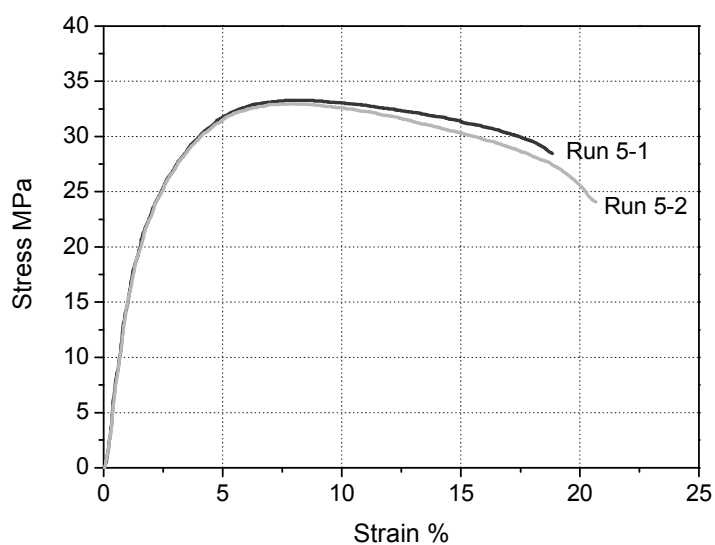
ภาพผนวกที่ ค2 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 2
โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



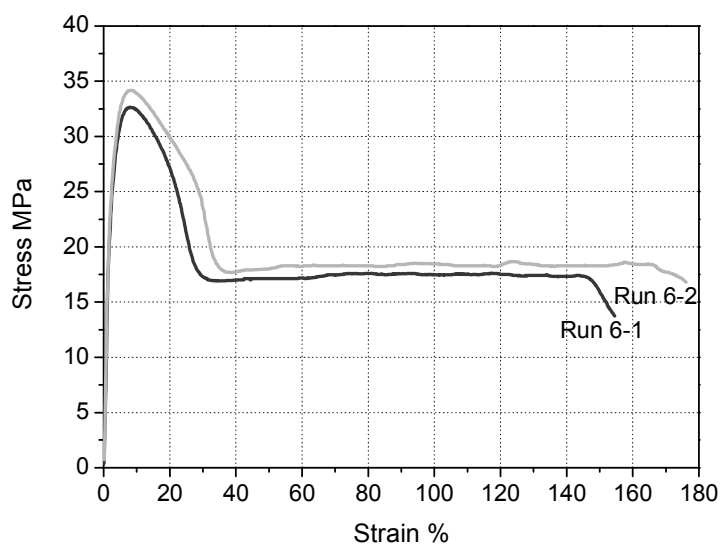
ภาพผนวกที่ ค3 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 3 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



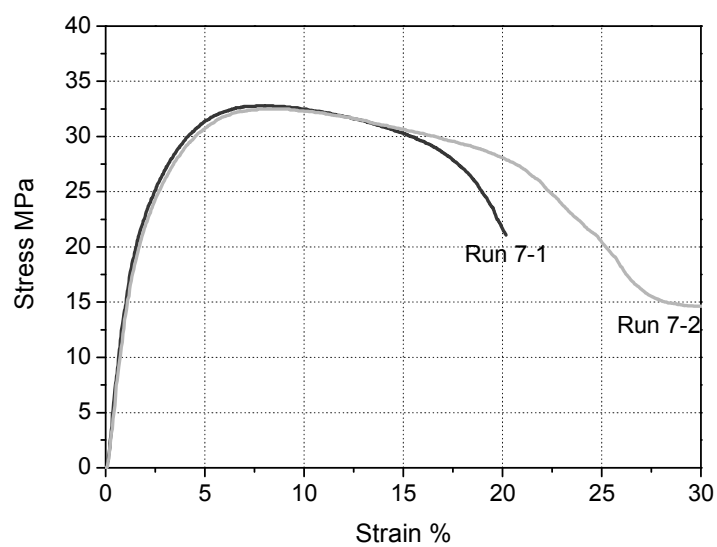
ภาพผนวกที่ ค4 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 4 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



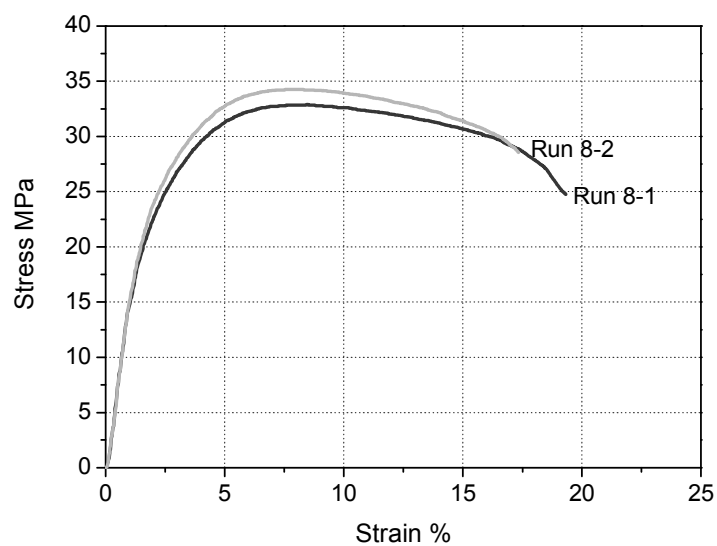
ภาพผนวกที่ ค5 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 5 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



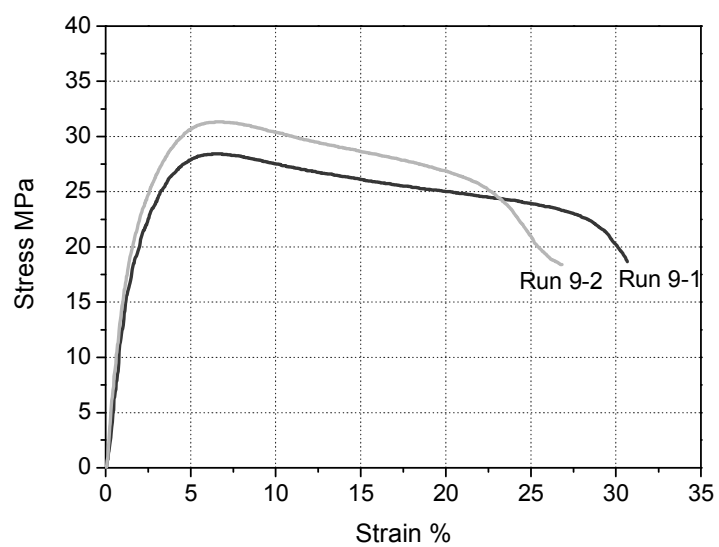
ภาพผนวกที่ ค6 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 6 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



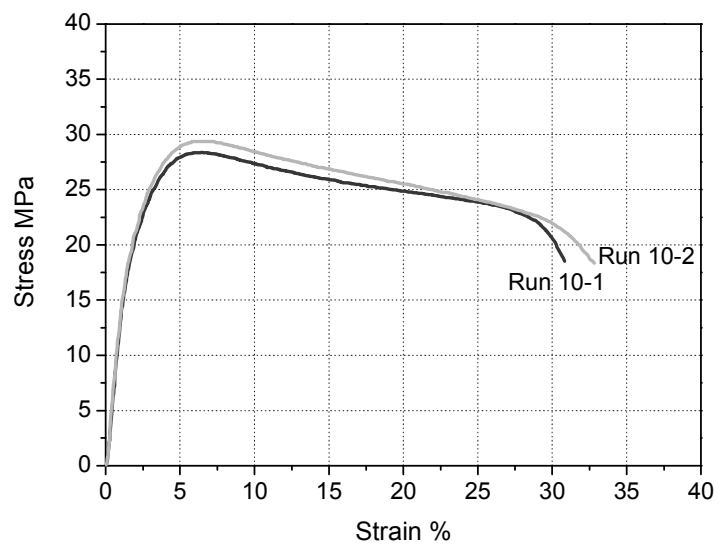
ภาพผนวกที่ ค7 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 7 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



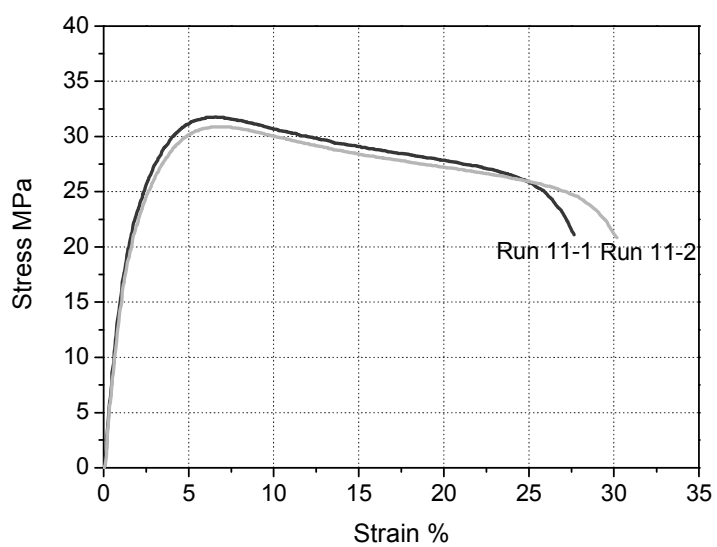
ภาพผนวกที่ ค8 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 8 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



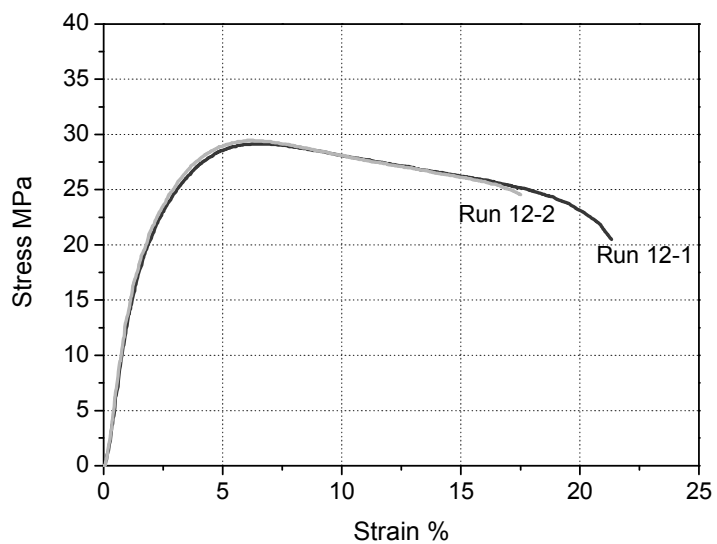
ภาพผนวกที่ ค9 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 9 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



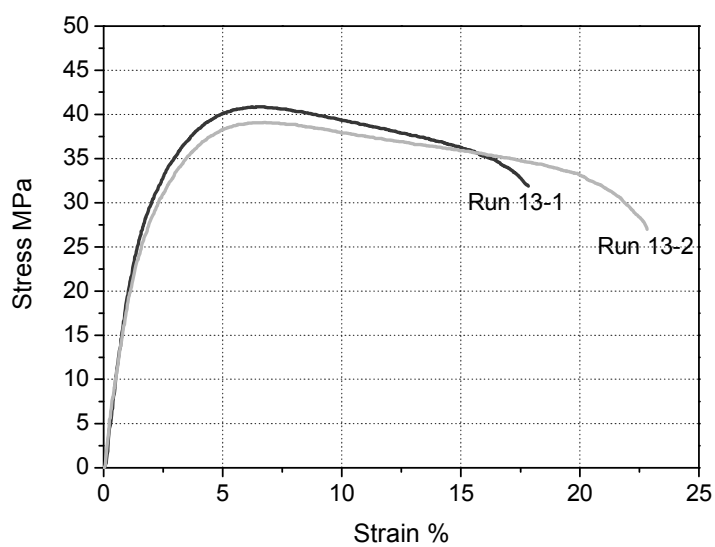
ภาพผนวกที่ ค10 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 10 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



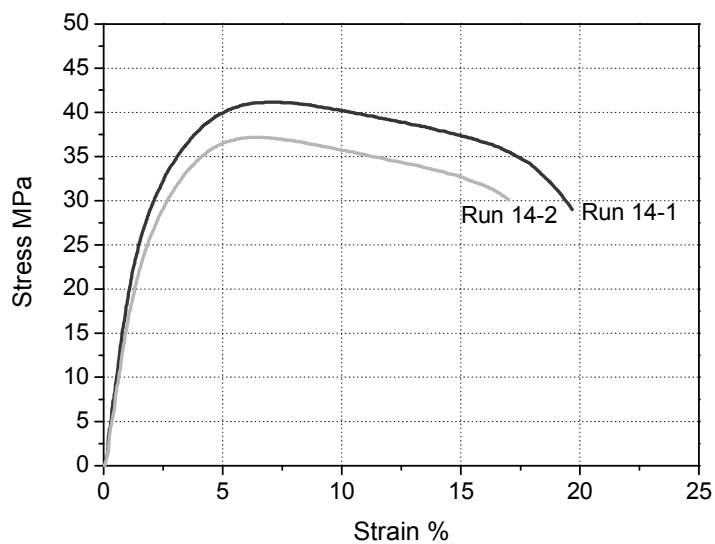
ภาพผนวกที่ ค11 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 11 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



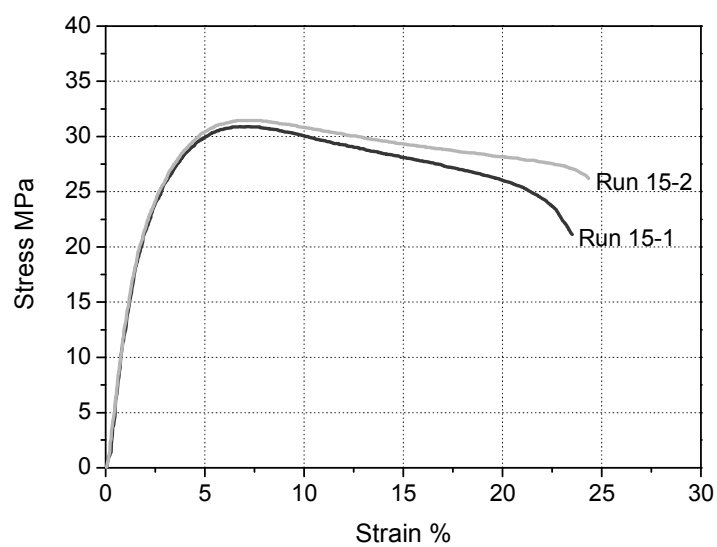
ภาพผนวกที่ ค12 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 12 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



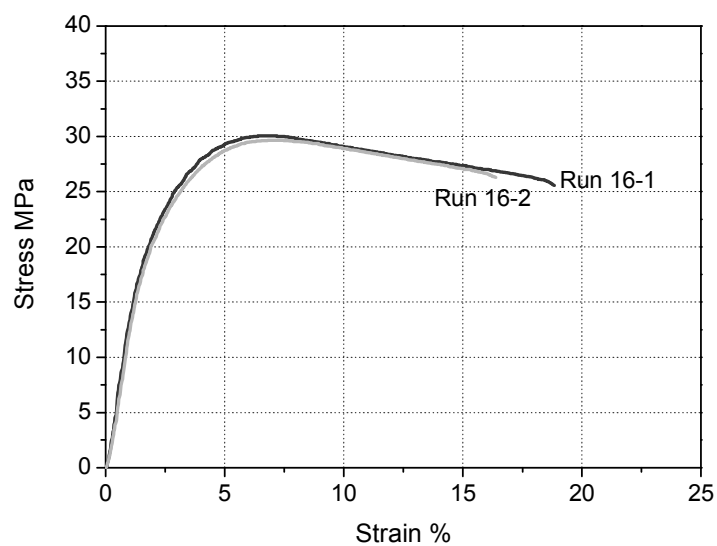
ภาพผนวกที่ ค13 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 13 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



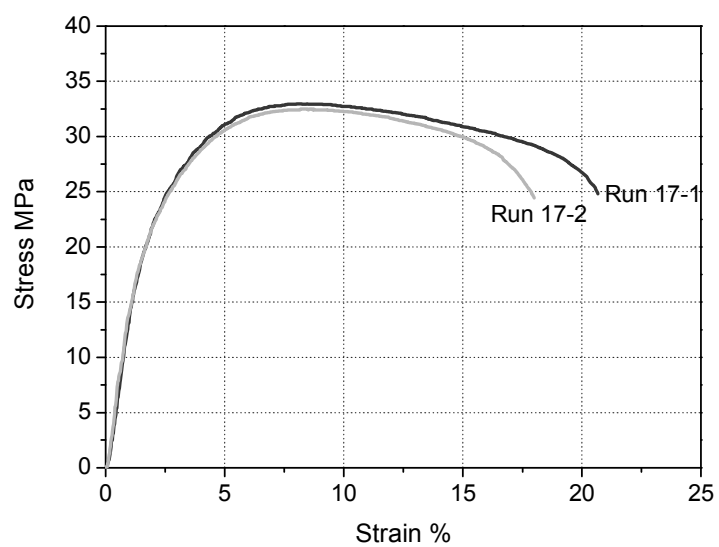
ภาพผนวกที่ ค14 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 14 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



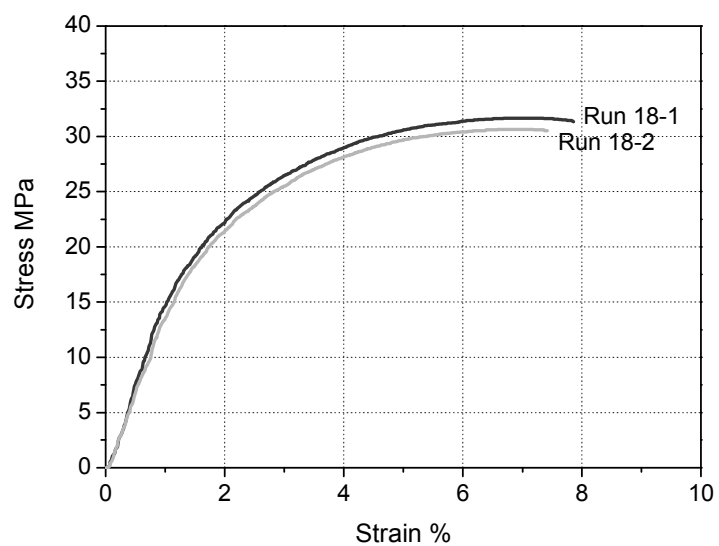
ภาพผนวกที่ ค15 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 15 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



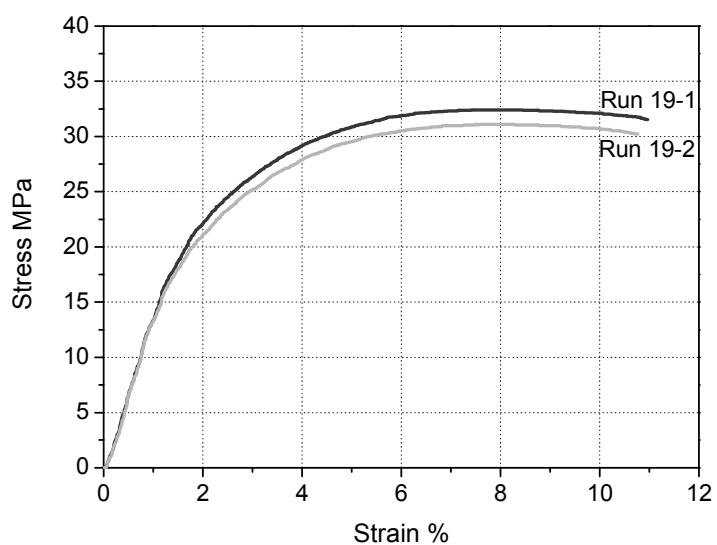
ภาพผนวกที่ ค16 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 16 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



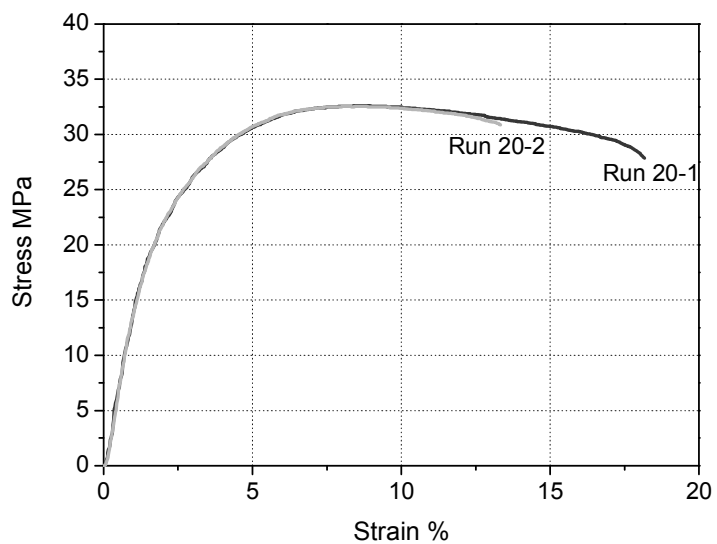
ภาพผนวกที่ ค17 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 17 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



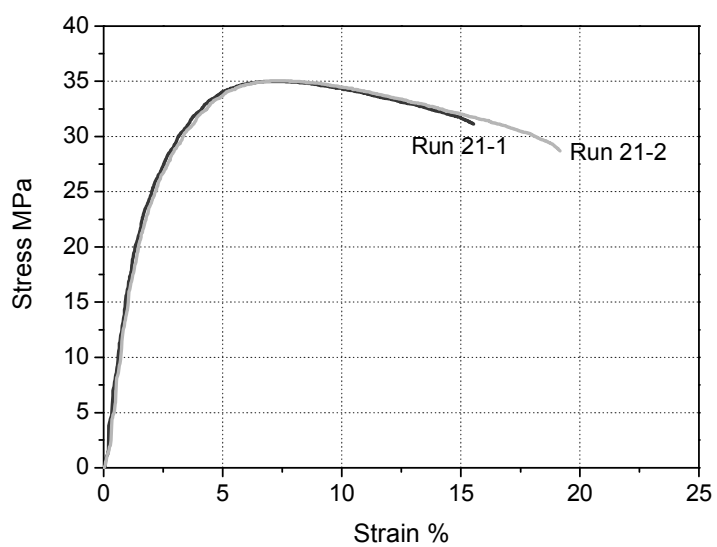
ภาพผนวกที่ ค18 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 18 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



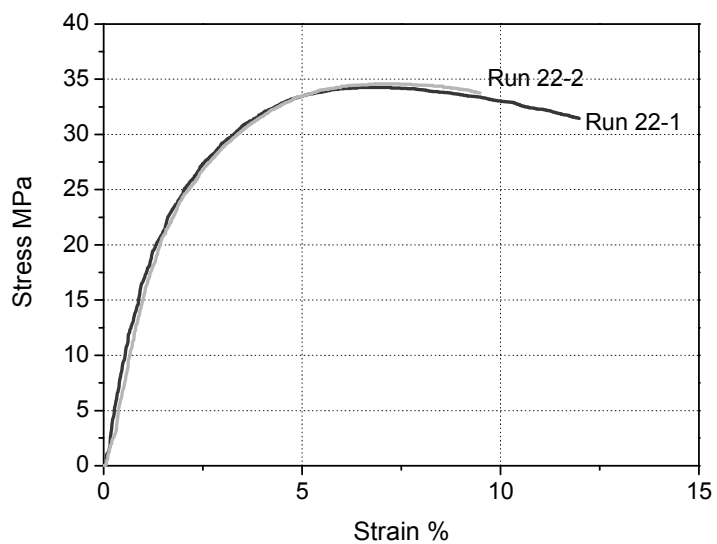
ภาพผนวกที่ ค19 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 19 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



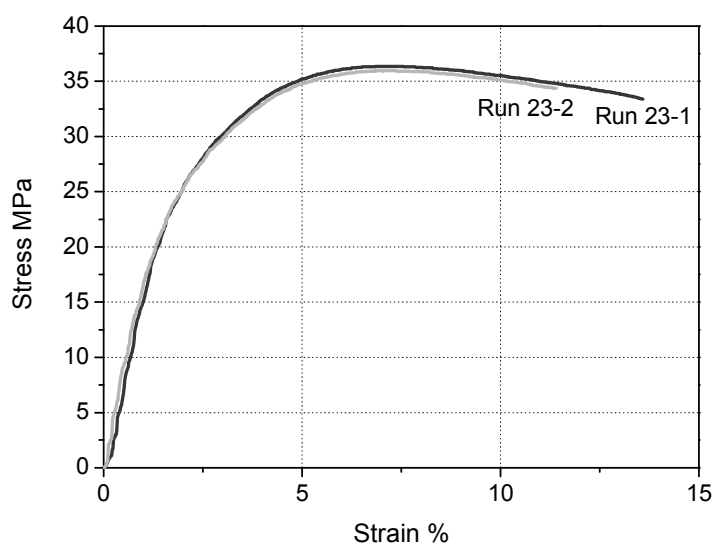
ภาพผนวกที่ ค20 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 20 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



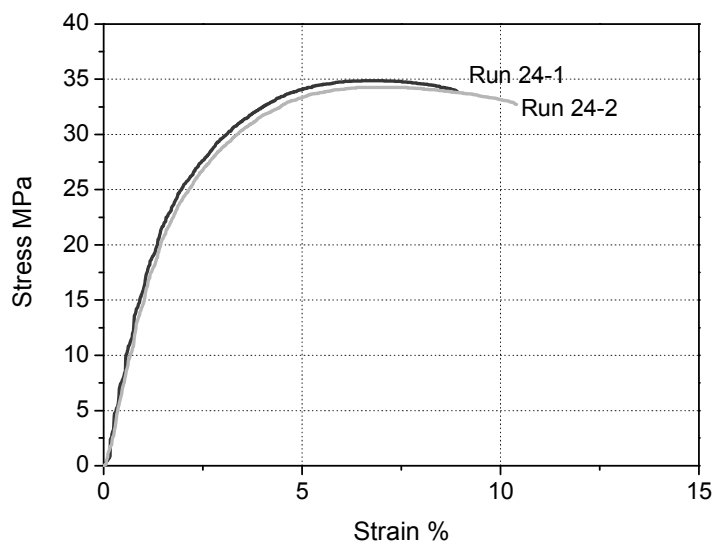
ภาพผนวกที่ ค21 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 21 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



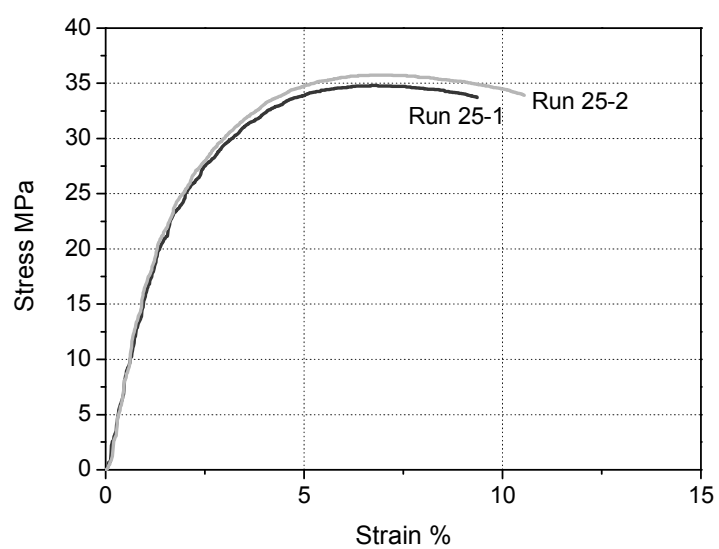
ภาพผนวกที่ ค22 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 22 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



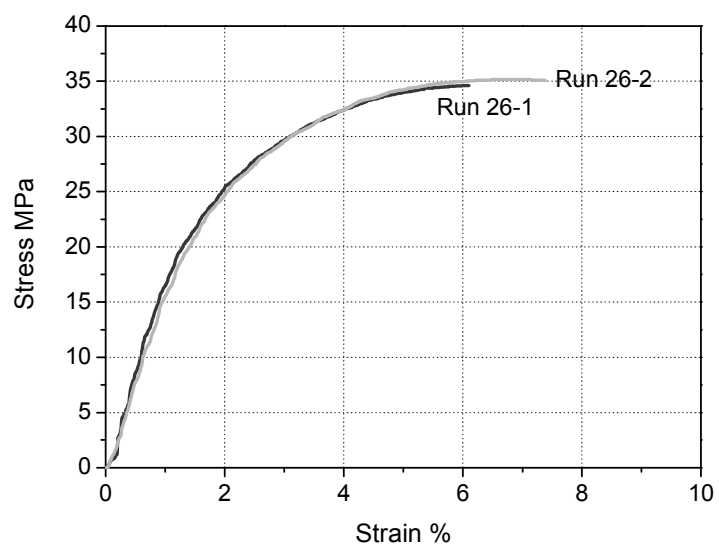
ภาพผนวกที่ ค23 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 23 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



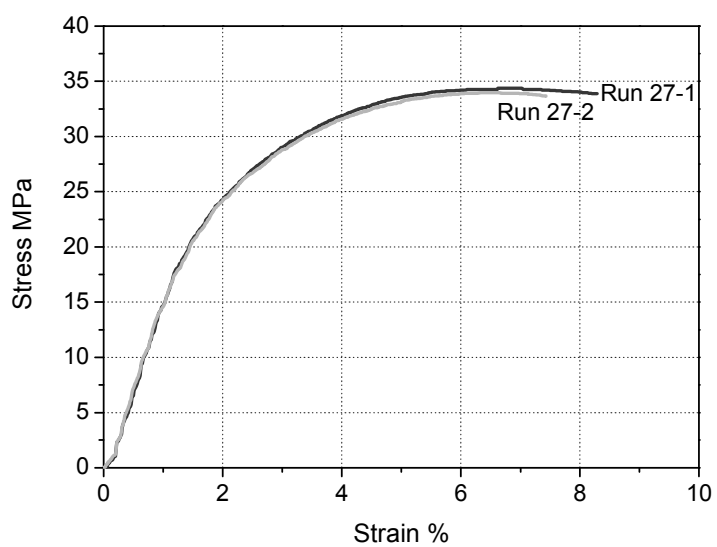
ภาพผนวกที่ ค24 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 24 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



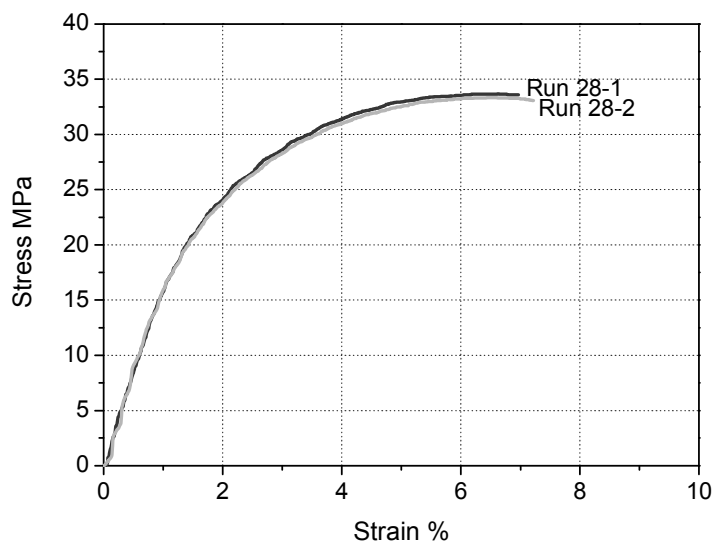
ภาพผนวกที่ ค25 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 25 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



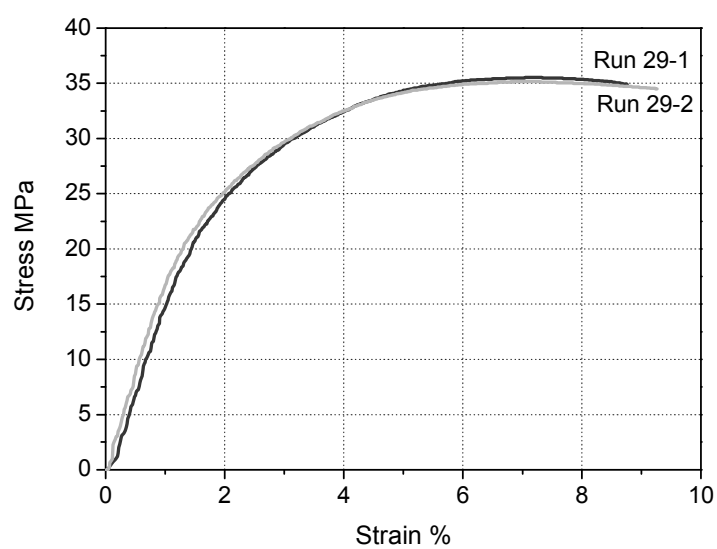
ภาพผนวกที่ ค26 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 26 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



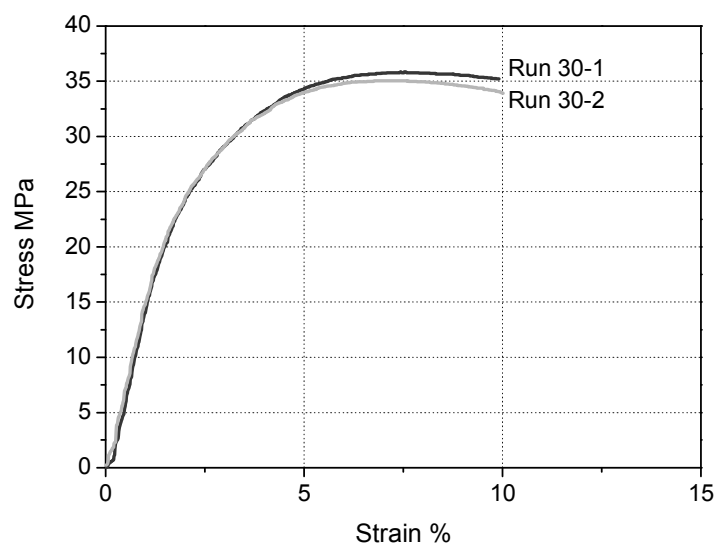
ภาพผนวกที่ ค27 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 27 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



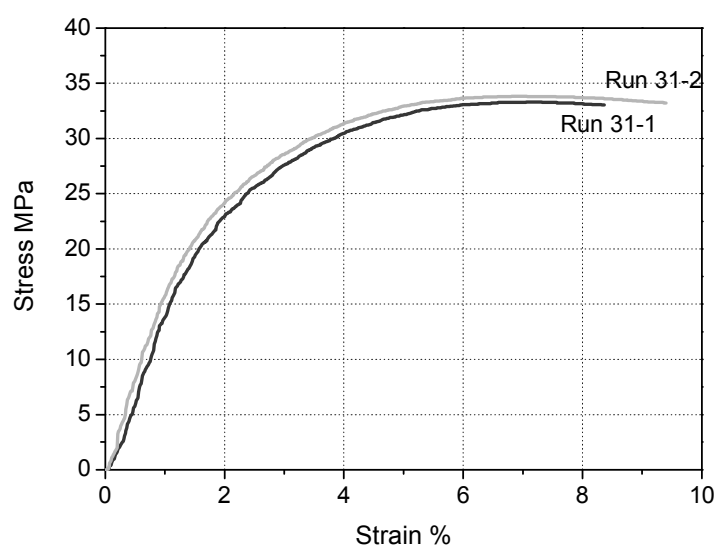
ภาพผนวกที่ ค28 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 28 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



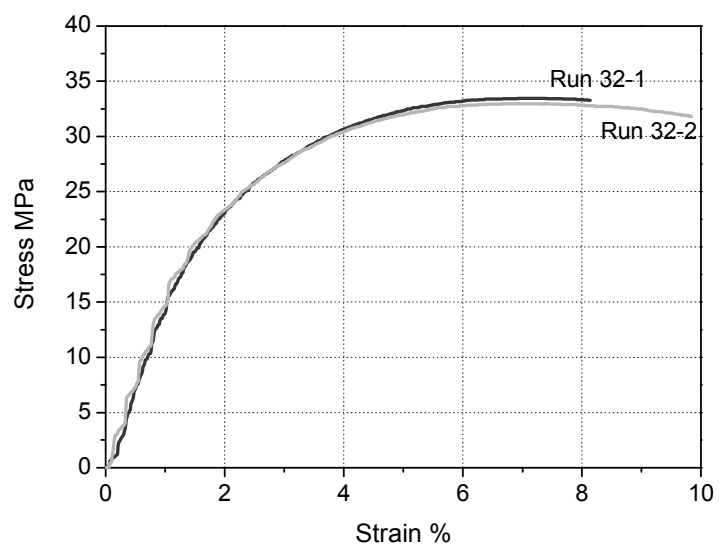
ภาพผนวกที่ ค29 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 29 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



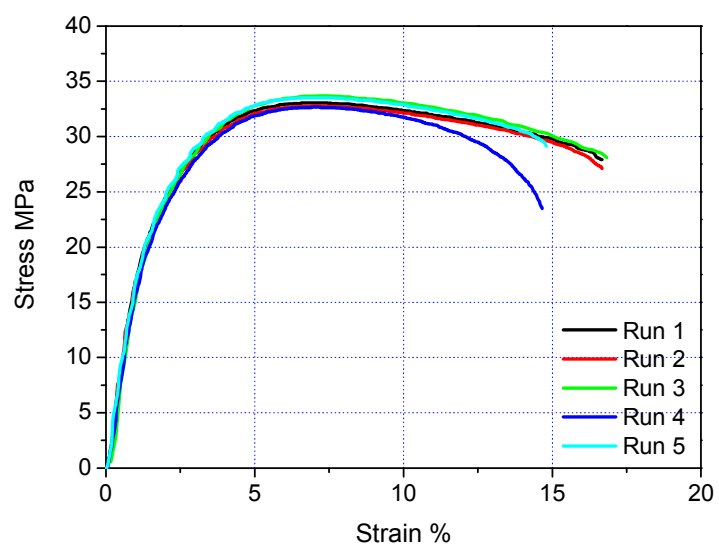
ภาพผนวกที่ ค30 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 30 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



ภาพผนวกที่ ค31 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 31 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



ภาพผนวกที่ ค32 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองที่ 32 โดยมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง



ภาพผนวกที่ ค33 เส้นโค้ง ความเค้น (Stress (MPa)) - ความเครียด (Strain (%)) ของการทดลองเพื่อ
ยืนยันผลโดยมีการทำซ้ำ 5 ค่า

ภาคผนวก ง

สถิติทดสอบและการตรวจเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร

1. สถิติทดสอบ

สถิติทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค MANOVA นั้นจะพิจารณา จากค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ $W^{-1}B(|W^{-1}B|)$ โดยที่ค่าดีเทอร์มิแนนต์ใช้วัดความแตกต่างของเมตริกซ์ หรือค่าดีเทอร์มิแนนต์สามารถวัดค่าความแปรปรวนหรือความแปรผันได้นั่นเอง การคำนวณหาค่าดีเทอร์มิแนนต์สามารถคำนวณได้จากค่าไอเกน โดยที่ค่าดีเทอร์มิแนนต์เป็นผลคูณของค่าไอเกน โดยที่ค่าไอเกนแต่ละค่าเป็นส่วนหนึ่งของความแปรผันของเมตริกซ์นั่นเอง

สถิติทดสอบ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ มีหลายค่าซึ่งขึ้นกับค่าไอเกนของเมตริกซ์ $W^{-1}B$ สถิติทดสอบที่นิยมใช้กันทั่วไปใน MANOVA มี 4 ตัวคือ

1.1 สถิติทดสอบ Wilks' λ

$$\text{Wilks}'\lambda = \lambda = \frac{|W|}{|B + W|} \quad (ง1)$$

โดยที่ $|W|$ หมายถึงดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ W

จะพบว่าสถิติทดสอบ Wilks' λ ในสมการที่ (ง1) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าดีเทอร์มิแนนต์ของความผันแปรภายในกลุ่มกับความผันแปรทั้งหมด ดังนั้นถ้าความผันแปรภายในกลุ่มต่ำจะทำให้ค่า λ ต่ำด้วย ซึ่งหมายถึงความผันแปรระหว่างกลุ่มมาก จึงปฏิเสธ H_0 ถ้า λ มีค่าต่ำ

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $\lambda \leq \lambda_{\alpha,p,DFB,DFW}$

โดยที่ DFB(องศาอิสระระหว่างกลุ่ม) = $k-1$ และ DFW(องศาอิสระของภายในกลุ่ม) = $n-k$ นอกจากนั้น สถิติทดสอบ Wilks' λ ยังสามารถเขียนในรูปของค่าไอเกนหรือค่าไอเกน (Eigenvalue) $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ ของ $W^{-1}B$ โดยที่

$$\lambda = \prod_{i=1}^s \left(\frac{1}{1 + \lambda_i} \right) \quad (ง2)$$

โดยที่ s เป็นจำนวนค่าไอเกนที่ไม่เป็นศูนย์ของเมทริกซ์ $W^{-1}B$ แบบ $s = \min \{p, k-1\}$ จากสูตรของสถิติ Wilks' λ ในสมการที่ (ง1) และ (ง2) จะพบว่า $0 \leq \lambda \leq 1$ นอกจากนั้นยังสามารถแปลงสถิติทดสอบ Wilks' λ เป็นสถิติทดสอบ F และไคสแควร์

นอกจากจะใช้สถิติทดสอบ Wilks' λ ในการทดสอบ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ แล้วยังสามารถใช้สถิติทดสอบ F โดยการแปลงจากสถิติทดสอบ Wilks' λ ดังแสดงในตารางผนวกที่ จ1

ตารางผนวกที่ จ1 สรุปสถิติทดสอบการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบจำแนกทางเดียว

จำนวนตัวแปร p	จำนวนกลุ่ม k	สถิติทดสอบ F	องศาอิสระของ F
$p \geq 1$	$k = 2$	$\left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) \left(\frac{\sum_{n=1}^k n_i - p - 1}{p} \right)$	$p, \sum_{i=1}^k n_i - p - 1$
$p \geq 1$	$k = 3$	$\left(\frac{1-\sqrt{\lambda}}{\lambda} \right) \left(\frac{\sum_{n=1}^k n_i - p - 2}{p} \right)$	$2p, 2 \left(\sum_{i=1}^k n_i - p - 2 \right)$
$p = 1$	$k \geq 2$	$\left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) \left(\frac{\sum_{n=1}^k n_i - k}{k-1} \right)$	$k-1, \left(\sum_{i=1}^k n_i - k \right)$
$p = 2$	$k \geq 2$	$\left(\frac{1-\sqrt{\lambda}}{\lambda} \right) \left(\frac{\sum_{n=1}^k n_i - k - 1}{k-1} \right)$	$k-1, \left(\sum_{i=1}^k n_i - k \right)$

ที่มา: กัลยา (2551)

สำหรับค่าอื่นๆ ของ p และ k นอกเหนือจากตารางผนวกที่ จ1 สถิติทดสอบของ F คือ

$$F = \left(\frac{1 - \lambda^{1/t}}{\lambda^{1/t}} \right) \left(\frac{DF2}{DF1} \right) \quad (33)$$

โดยที่ F มีการแจกแจงแบบ F ที่องศาอิสระ $DF1$ และ $DF2$ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} DF1 &= p(k-1) \text{ และ } DF2 = mt - \frac{1}{2}(p+k) \\ m &= k(n+1) + (k-1) - \frac{1}{2}(p+k) \\ t &= \sqrt{\frac{p^2(k-1)^2 - 4}{p^2 + (k-1)^2 - 5}} \end{aligned}$$

กรณีที่ $p(k-1) = 2$ จะทำให้ $t = 1$

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ ถ้า $F > F_{\alpha; DF1, DF2}$

Barlett (1938) ได้พิสูจน์ว่าเมื่อขนาดตัวอย่าง $\sum_{i=1}^k n_i = n$ มีขนาดใหญ่และถ้าสมมติฐาน H_0 เป็นจริง จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \chi^* &= - \left(n - 1 - \frac{(p+k)}{2} \right) \ln \lambda \\ &= - \left(n - 1 - \frac{(p+k)}{2} \right) \ln \left(\frac{|W|}{|B+W|} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

χ^* จะมีการแจกแจงโดยประมาณแบบไคสแควร์ที่องศาอิสระ $p(k-1)$

การสรุปผลการทดสอบ เมื่อขนาดตัวอย่าง $\sum_{i=1}^k n_i = n$ มีขนาดใหญ่ จะปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ α ถ้า $\chi^* = \chi^2_{p(k-1)}$ โดยค่า $\chi^2_{p(k-1)}$ ได้จากตารางความน่าจะเป็นแบบไคสแควร์

หมายเหตุ การใช้ Wilks' λ ในการทดสอบ 1-WAY MANOVA นั้นถ้าผลการทดสอบสรุปว่า ปฏิเสธ H_0 ผู้ศึกษาอาจจะทำการทดสอบความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยตัวแปรตามที่ละตัว นั่นคือ $H_0: \mu_{1i} = \mu_{2i} = \dots = \mu_{ki} ; i = 1, 2, \dots, p$ โดยใช้เทคนิค 1-WAY ANOVA ด้วยสถิติทดสอบ $F = MSB/MSW$ กรณีที่มีตัวแปรตาม p ตัวจะต้องทดสอบด้วย 1-WAY ANOVA โดยใช้สถิติทดสอบ F จำนวน p ตัว

การสรุปผลการทดสอบของ MANOVA และ ANOVA เมื่อใช้สถิติทดสอบ Wilks' λ อาจจะไม่สอดคล้องกันก็ได้ ซึ่งผลการทดสอบอาจเป็นดังนี้

1. เมื่อวิเคราะห์ด้วย MANOVA สรุปได้ว่า ปฏิเสธสมมติฐาน $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA ต่อ โดยทดสอบตัวแปรตามที่ละตัวพบว่าไม่สามารถปฏิเสธ $H_0: \mu_{1i} = \mu_{2i} = \dots = \mu_{ki} ; i = 1, 2, \dots, p$ ทุกค่าของ i

2. เมื่อใช้ MANOVA สรุปได้ว่ายอมรับ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ แต่เมื่อใช้สถิติทดสอบ F ของ ANOVA ตรวจสอบตัวแปรตามที่ละตัว พบว่ามีการปฏิเสธ $H_0: \mu_{1i} = \mu_{2i} = \dots = \mu_{ki}$ บางค่าของ i นั่นคือมีตัวแปรตามบางตัวมีค่าเฉลี่ยต่างกันเมื่ออยู่ต่างกลุ่มกัน

ถ้าเกิดทั้งกรณีที่ 1 หรือ 2 หรือกล่าวได้ว่า ผลการทดสอบของ Wilks' λ ใน MANOVA และของ F ใน ANOVA ขัดแย้งกัน ผู้ศึกษาควรจะใช้ผลสรุปของ MANOVA มากกว่าของ ANOVA

1.2 สถิติทดสอบ Roy (Roy's Test)

สถิติทดสอบของ Roy หรือที่เรียกว่า Roy's union-intersection test หรือ Roy's largest root test โดยที่

$$\text{Roy's largest root} = \theta = \frac{\lambda_{\max}}{1 + \lambda_{\max}} = \frac{\lambda_1}{1 + \lambda_1}$$

โดยที่ $\lambda_{\max}$ เป็นค่าไอเกนที่มากที่สุดของ $W^{-1}B$ และ $\lambda_{\max} = \lambda_1$

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ ถ้า $\theta = \theta_{\alpha;s,m,n}$ โดยที่ $\theta_{\alpha;s,m,n}$ ได้จาก ตาราง Upper Critical Values for Roy's Test โดยที่ $s = \min \{k-1, p\}$, $m = \frac{1}{2}(|k-1-p|-1)$, $N = \frac{1}{2}(n-k-p-1)$ และ $n = \sum_{i=1}^k n_i$

การแปลงสถิติ Roy's largest root เป็นสถิติทดสอบ F

โดยทั่วไปจะไม่สามารถแปลงค่า θ หรือ $\lambda_{\max}$ ให้มีการแจกแจงแบบ F ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติบางโปรแกรม เช่น SPSS ได้คำนวณค่า upper bound ของ F ไว้ดังนี้

$$F = \frac{(n-k-d-1)\lambda_{\max}}{d} \quad (ง5)$$

โดย F มีองศาอิสระ d และ $(n-k-d-1)$ ตามลำดับและ $d = \max(p, k-1)$ ถ้าคำนวณค่า F จากสมการ (1.5) ได้ มากกว่า $F_{d,n-k-d-1}$ จะปฏิเสธ H_0 โดย F ได้จากตาราง F ซึ่งเป็นตารางความน่าจะเป็นแบบเอฟ อย่างไรก็ตามถ้าใช้สถิติทดสอบ F ในสมการที่ (1.5) แล้วสรุปว่ายอมรับ H_0 ผลลัพธ์จะน่าเชื่อถือมากกว่ากรณีปฏิเสธ H_0

1.3 สถิติทดสอบ Pillai's Trace

$$\text{Pillai's Trace} = V^{(s)} = \sum_{i=1}^s \frac{\lambda_i}{1-\lambda_i}$$

โดยที่ $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ เป็นค่าไอเกนของ $W^{-1}B$

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $V^{(s)} \geq V_{\alpha}^{(s)}$ โดยที่ $V_{\alpha}^{(s)}$ ได้จากตาราง Upper Critical Value of Pillai's Statistics ซึ่งค่า $V_{\alpha}^{(s)}$ ขึ้นกับค่า s, m และ N โดยที่

$$s = \min \{k-1, p\}, \quad m = \frac{1}{2}(|k-1-p|-1), \quad N = \frac{1}{2}(n-k-p-1)$$

ในตาราง Upper Critical Value of Pillai's Statistics มีค่า s , m และ N กรณีที่ค่า s , m และ N เป็นค่าอื่น ๆ นอกเหนือจากตาราง ให้ใช้ค่าสถิติทดสอบ F โดยที่

$$F = \frac{(2N + s + 1)V^{(s)}}{(2m + s + 1)(s - V^{(s)})} \quad (36)$$

ซึ่ง F ในสมการที่ (1.6) มีการแจกแจงโดยประมาณแบบ F ที่องศาอิสระ $s(2m + s + 1)$ และ $s(2N + s + 1)$ ตามลำดับ และจะปฏิเสธ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ ถ้า $F > F_{s(2m+s+1), s(2N+s+1)}$ โดยค่า F ได้จากตารางความน่าจะเป็นแบบเอฟ

1.4 สถิติทดสอบ Lawley-Hotelling

Lawley (1938) และ Hotelling (1951) ได้เสนอสถิติทดสอบ Lawley-hotelling ($U^{(s)}$) หรือเรียกว่า Hotelling's โดยที่

$$U^{(s)} = \sum_{i=1}^s \lambda_i$$

$$\text{สถิติทดสอบที่ใช้คือ } U = \left(\frac{n-k}{k-1} \right) U^{(s)}$$

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $U > U_{table; p, DFB, DFW}$ โดยค่า U_{table} ได้จากตาราง Upper Critical Value for the Lawley-Hotelling Statistics โดยที่ p = จำนวนตัวแปรตาม DFB เป็นองศาอิสระของระหว่างกลุ่ม ส่วน DFW เป็นองศาอิสระภายในกลุ่ม จากตาราง MANOVA

สำหรับตาราง Upper Critical Value for the Lawley-Hotelling Statistics จะใช้เมื่อ $p \leq DFB$ และ $p \geq DFW$ ถ้า $p \geq DFB$ จะใช้ U_{table} เป็น $U_{DFB, p, DFB+DFW-p}$

$$\text{กรณีที่ DFB} = 1 \text{ และ } p > 1 \text{ จะได้ } U^{(s)} = U^{(1)} = \frac{T^2}{DFW}$$

กรณีที่ค่า p , DFB และ DFW นอกเหนือจากที่กำหนดไว้ในตาราง Upper Critical Value for the Lawley-Hotelling ให้ใช้สถิติทดสอบ F ซึ่งมีการแจกแจงโคนประมาณแบบ F โดยสามารถใช้สถิติทดสอบ F เป็น 3 รูปแบบ คือ F_1 , F_2 และ F_3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$F_1 = \frac{U^{(s)}}{c}$$

โดยที่ F มีการแจกแจงโดยประมาณแบบ F ที่องศาอิสระ a และ b ตามลำดับ ซึ่ง

$$a = p\text{DFB}, \quad b = 4 + \frac{a+2}{B-1}, \quad c = \frac{a(b-2)}{b(\text{DFW} - p - 1)}$$

$$\text{และ } B = \frac{(\text{DFW} + \text{DFB} - p - 1)(\text{DFW} - 1)}{(\text{DFW} - p - 3)(\text{DFW} - p)}$$

สำหรับสถิติ F_2 เป็นดังนี้

$$F_2 = \frac{2(sN+1)U^{(s)}}{s^2(2m+s+1)}$$

โดยที่ F_2 มีการแจกแจงโดยประมาณแบบ F ที่องศาอิสระ $s(2m+s+1)$ และ $2(sN+1)$ ตามลำดับ

ส่วนสถิติทดสอบ F_3 คือ

$$F_3 = \frac{[s(\text{DFW} - \text{DFB} - 1) + 1]U^{(s)}}{sp \cdot \text{DFB}}$$

โดยที่ F_3 มีการแจกแจงโดยประมาณแบบ F ที่องศาอิสระ $p \cdot \text{DBF}$ และ $s(\text{DFW} - \text{DFB} - 1)$ ตามลำดับ

การสรุปผลการทดสอบ จะปฏิเสธ $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ ถ้าสถิติทดสอบ F_1 หรือ F_2 หรือ F_3 มากกว่าค่า F จากตารางการแจกแจงแบบเอฟ ตามองศาอิสระที่กำหนดข้างต้น

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวณัฏฐา ดวงพัตรา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2549)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2550