

อิทธิพลปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล

Effect of injection molding parameters on mechanical properties

ศรีสัจจา บุญฤทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

E-mail : srisatjab@nu.ac.th

บทคัดย่อ : การศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโพลิโพรพิลีน โดยใช้การออกแบบการทดลอง แบบแฟกตอเรียลแบบเต็ม จำนวน 2^5 ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่ศึกษา 5 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันรักษารูปร่างให้อยู่ในแม่พิมพ์ (Holding pressure) แรงดันการฉีด (Injection pressure) ความเร็วการฉีด (Injection speed) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และความเร็วรอบสกรู (Screw speed) คุณสมบัติเชิงกลที่วิเคราะห์ ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และความแข็งแรง

ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลมากที่สุดคือ อุณหภูมิหัวฉีดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งแรงจะลดลง ส่วนแรงดันรักษารูปร่าง (Holding pressure) และแรงดันฉีด (Injection pressure) เป็นปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อแรงดันรักษารูปร่าง (Holding pressure) และแรงดันฉีด (Injection Pressure) เพิ่มขึ้น โมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น และสุดท้ายคือ แรงดันฉีด (Injection pressure) ความเร็วฉีด (Injection speed) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และความเร็วสกรู (Screw speed)

เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ โดยความแข็งแรงจะลดลงเมื่อแรงดันฉีด (Injection pressure) ความเร็วฉีด (Injection speed) และอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) เพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วสกรู (Screw speed) เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : Injection parameters, Polypropylene, Injection molding

1. ความเป็นมา

โพลิเมอร์ นับว่าเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตสินค้าอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ในบ้านเรือนจนถึงอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน เช่น สินค้าอุปโภคบริโภค บรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมรถยนต์ อุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้า เป็นต้น โพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายอย่างร่วมกัน เช่น เบา เหนียวทนทาน ทนความร้อน ทนการสึกกร่อน ทำสีต่างๆได้ เป็นต้น โพลิเมอร์แบ่งเป็นสามประเภท[1] คือ 1) เทอร์โมพลาสติก เช่น โพลีเอทิลีน (PE) โพลิโพรพิลีน (PP) เป็นต้น 2) เทอร์โมเซตติง เช่น ฟีนอลิก (Phenolics) อีพอกซี (Epoxyes) เป็นต้น และ 3) อีลาสโตเมอร์ เช่น โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene) โพลีคลอโรพรีน (Polychloroprene) เป็นต้น

กระบวนการขึ้นรูปโพลิเมอร์มีหลายวิธี เช่น การฉีด (Injection molding) การเป่า (Blow molding)

การหล่อ (Casting) เป็นต้น [2] ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ ในแต่ละวิธีการจะมีค่าปัจจัยในการทำงานที่แตกต่างกัน การฉีดขึ้นรูปเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมรองเท้า อุตสาหกรรมของเล่น ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน[3] คือ 1) ฉีด (Injection) 2) รักษาชิ้นงานด้วยแรงดัน (Holding) และ 3) ดันชิ้นงานออก (Ejection) โดยในแต่ละขั้นตอนจะต้องปรับค่าปัจจัยเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เนื่องจากค่าคุณสมบัติ จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนค่าปัจจัยฉีดขึ้นรูปดังตัวอย่างในตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของโพลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นช่วง เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยฉีด [4]

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของโพลิโพรพิลีน

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
Tensile load at failure (lb _p)	130-202
Flexural strength (lb _f /in ²)	2,340-4,092
Izod impact strength (ft-lb _f /in)	0.9-8.3
Ball drop impact strength (in-lb _p)	46-120
Shrinkage across flow (in/in)	0.007-0.016
Shrinkage with flow(in/in)	0.010-0.014
Stiffness modulus (lb _f /in ² x 10 ⁻⁵)	0.9-1.8

การทดสอบแรงดึง เป็นวิธีทดสอบที่นิยมเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลขั้นพื้นฐานของวัสดุ ทำให้ทราบถึงค่าคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ โมดูลัสความยืดหยุ่น หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุ ซึ่งวัสดุที่มีค่าโมดูลัสสูงไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูงเสมอไป [5] ส่วนความแข็งเป็นการวัดความต่อต้านของวัสดุ ที่จะเปลี่ยนรูปอย่างถาวรต่อแรง

กด วัสดุที่แข็งมากจะต่อต้านต่อแรงกดมาก จึงมีความแข็งแรงมาก

2. เทคนิคและวิธีการวิจัย

ปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่ศึกษามี 5 ปัจจัยคือ

- 1. แรงดันรักษาชิ้นงานให้อยู่ในแม่พิมพ์ (Holding pressure)
- 2. แรงดันการฉีด (Injection speed)
- 3. ความเร็วการฉีด (Injection pressure)
- 4. อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature)
- 5. ความเร็วรอบสกรู (Screw speed)

ในการออกแบบการทดลอง เป็นแฟกตอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full factorial) [6], [7] 2⁵ ทำซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง ดังนั้น จำนวนการทดลองทั้งหมด 64 ครั้ง โดยทำการทดลองแบบสุ่ม ค่าต่ำสุดและสูงสุดของทุกปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยทีละตัวจากค่าต่ำ สุดถึงค่าสูงสุด และตรวจสอบชิ้นงานที่ฉีดออกมาต้องมีลักษณะทางกายภาพที่ดี ผิวเรียบ ไม่มีริ้วขาวภายในเนื้อชิ้นงาน และไม่มีครีบ

ตารางที่ 2 แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของปัจจัย

ปัจจัย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	แทนด้วย
Holding pressure (bar)	50	90	X ₁
Injection pressure (bar)	50	70	X ₂
Injection speed (%)	30	100	X ₃
Nozzle temperature (°C)	180	220	X ₄
Screw speed (%)	40	60	X ₅

เมื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานไปทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลคือ การทดสอบแรงดึงและความแข็ง ซึ่งขนาดชิ้นงาน จำนวนชิ้นงาน และเงื่อนไขในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM D2240 ตามลำดับ คุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นและความแข็ง จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติในเชิงสถิติ [6], [8]

3. ข้อมูลและผลการวิเคราะห์วิจัย

จากผลทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ทำการ
วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ สามารถลำดับผลการทดลอง
และการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เมื่อนำค่าคุณสมบัติเชิงกล วิเคราะห์ความ
แปรปรวนสามารถสรุปค่า F และ P-value ของปัจจัยชนิด
ชั้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติอย่างมีนัยสำคัญดังตารางที่ 3

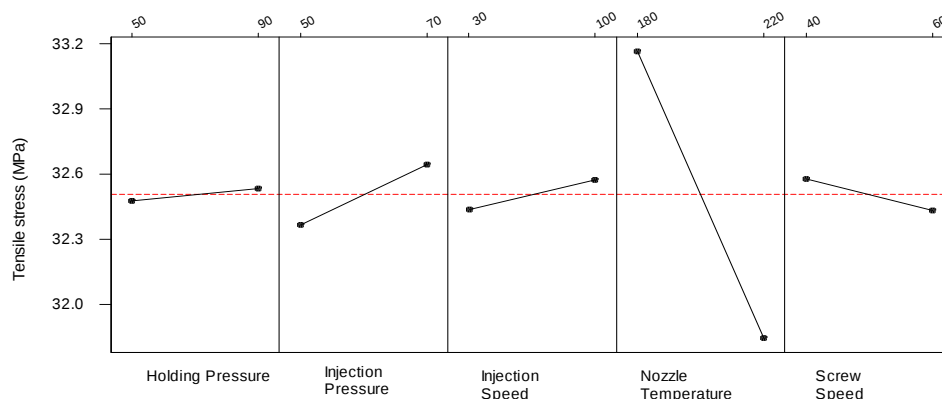
ตารางที่ 3 ค่า F และ P-value ที่ได้จากการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยชนิดชั้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติ
เชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตัวแปร (Factor)	ความทนต่อแรงดึง		โมดูลัสความยืดหยุ่น		ความแข็ง	
	F	P-value	F	P-value	F	P-value
X_1			4.72	0.037		
X_2			15.74	0.000	34.52	0.000
X_3					98.29	0.000
X_4	33.51	0.000	101.71	0.000	432.78	0.000
X_5					84.42	0.000
X_1X_2					18.78	0.000
X_1X_3					24.68	0.000
X_1X_5					14.01	0.001
X_2X_3					54.36	0.000
X_2X_4	7.78	0.009	17.39	0.000		
$X_1X_2X_3$					35.06	0.000
$X_1X_3X_4$					21.63	0.000
$X_1X_3X_5$					5.25	0.029
$X_2X_3X_4$					13.01	0.001
$X_2X_4X_5$	5.15	0.030	7.97	0.008	6.81	0.014
$X_1X_2X_3X_4$					23.79	0.000
$X_1X_2X_3X_5$					11.12	0.002
$X_1X_2X_4X_5$					22.05	0.000
$X_1X_3X_4X_5$					9.38	0.004

3.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าความทนต่อแรงดึง

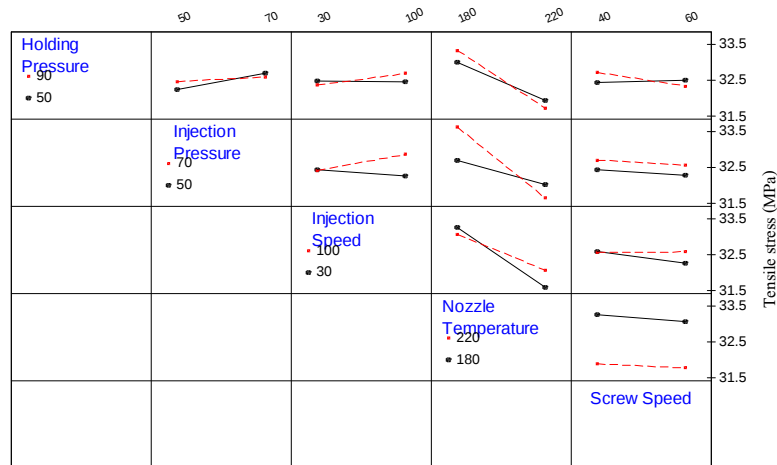
จากตารางที่ 3 สรุปได้ว่าอุณหภูมิหัวฉีด(Nozzle temperature) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีด (Injection pressure)กับอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีด (Injection pressure) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และความเร็วสกรู (Screw speed) มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของ โพลีเมอร์ PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งความทนต่อแรงดึงจะลดลง เมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้นจาก 180 °C เป็น 220 °C ซึ่งเกิดจากการเสื่อมของ โพลีเมอร์ด้านโครงสร้าง

จากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดึงกับปัจจัยฉีดขึ้นรูปทั้ง 5 ปัจจัยในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับความทนต่อแรงดึง

อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง แต่ความทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด และความเร็วฉีดเพิ่มขึ้น [3] สำหรับรูปที่ 2 แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปสองปัจจัยที่มีต่อค่าความทนต่อแรงดึง ถ้าเส้นกราฟตัดกันแสดงว่า ปัจจัยฉีดขึ้นรูปสองปัจจัยนั้นมีปฏิสัมพันธ์กัน ซึ่งแรงดันฉีดกับอุณหภูมิหัวฉีดเป็นสองปัจจัย ที่มีปฏิสัมพันธ์กันสอดคล้องกับตารางที่ 3 นอกจากนี้จากรูปที่ 2 จะได้ว่ายังมีปัจจัยอื่นที่มีปฏิสัมพันธ์กัน เช่น แรงดันรักษาชิ้นงานกับแรงดันฉีด แรงดันรักษาชิ้นงานกับอุณหภูมิหัวฉีด แต่จากการทดสอบความแปรปรวน พบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ



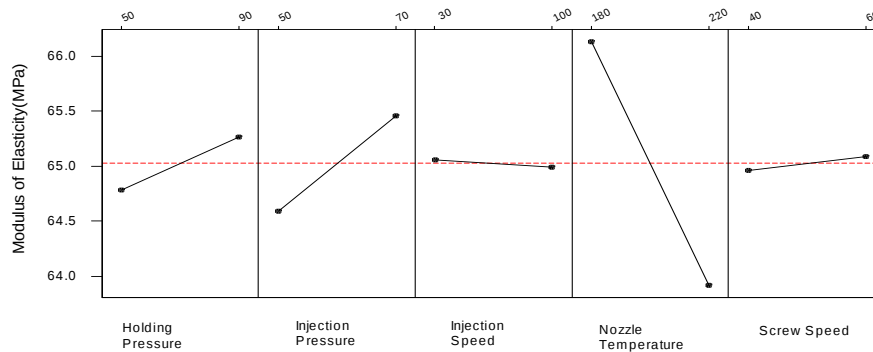
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับความทนต่อแรงดึง

3.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

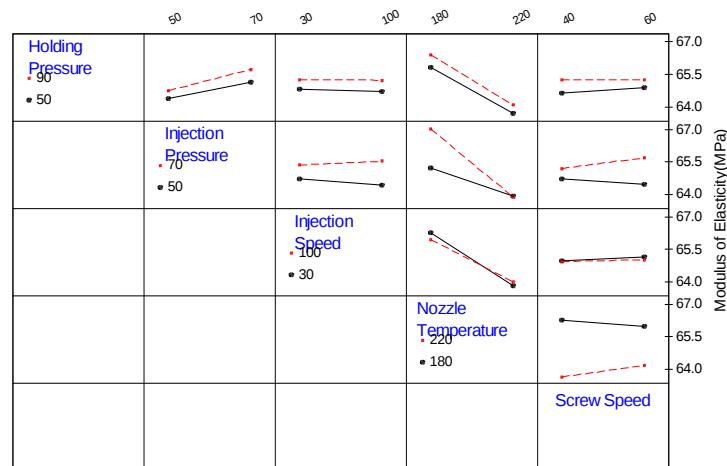
เมื่อนำผลค่าโมดูลัส ความยืดหยุ่นมาวิเคราะห์ความแปรปรวน สรุปได้ว่า แรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) แรงดันฉีด (Injection pressure) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีด (Injection pressure) กับอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันฉีด (Injection pressure) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และความเร็วสกรู (Screw Speed) มีผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังสรุปในตารางที่ 3 โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง เมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้นจาก 180 °C เป็น 220 °C เนื่องจากเกิดการเสื่อมของโพลิเมอร์ แต่โมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันรักษาชิ้นงาน และแรงดันฉีดเพิ่มขึ้น

ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า แรงดันรักษาชิ้นงานเป็นปัจจัยที่มีต่อคุณภาพ ของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล [9] ส่วนแรงดันฉีดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโมดูลัสความยืดหยุ่น [10]

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นกับปัจจัยฉีดขึ้นรูปทั้ง 5 ปัจจัยในรูปที่ 3 อธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีดและความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วฉีดและอุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง สำหรับรูปที่ 4 แสดงถึงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปสองปัจจัยที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น แรงดันฉีดกับอุณหภูมิหัวฉีด เป็นสองปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์กัน เพราะเส้นกราฟตัดกันสอดคล้อง กับสรุปดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

3.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

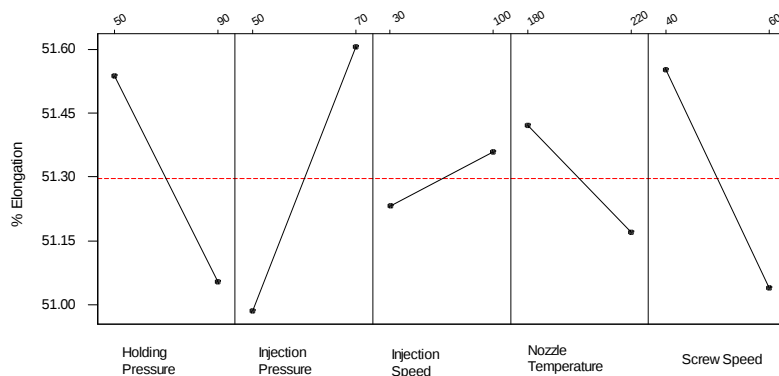
เมื่อนำผลค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน สรุปได้ว่า ไม่มีปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ PP อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งอาจเนื่องมาจากจำนวนของระดับค่าของปัจจัยฉีดขึ้นรูปน้อย

เกินไป จึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ

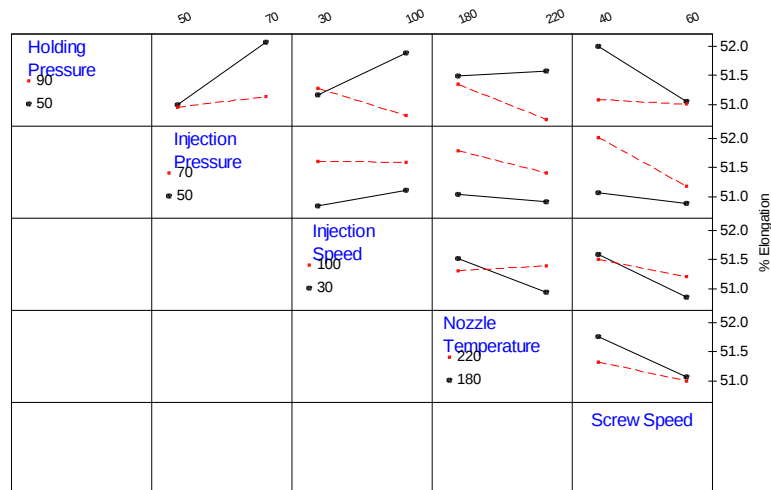
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นกับปัจจัยฉีดขึ้นรูป 5 ปัจจัยในรูปที่ 5 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันรักษาขึ้นงาน อุณหภูมิหัวฉีด และความเร็วรอบสกรู เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะลดลง เมื่อแรงดันฉีดและ

ความเร็วฉีดเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น สำหรับรูปที่ 6 จะแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปสองปัจจัย ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟของปัจจัยที่ตัดกัน

แรงดันรักษาชิ้นงานกับความเร็วฉีด แรงดันรักษาชิ้นงานกับอุณหภูมิหัวฉีด และความเร็วฉีดกับความเร็วสกรู เป็นสองปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์กัน แต่จากการทดสอบความแปรปรวน พบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น

3.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าความแข็ง

เมื่อนำผลค่าความแข็ง ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน สรุปได้ว่าปัจจัยฉีดขึ้นรูปหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญคือ แรงดันฉีด(Injection pressure) ความเร็วฉีด (Injection Speed) อุณหภูมิหัวฉีด

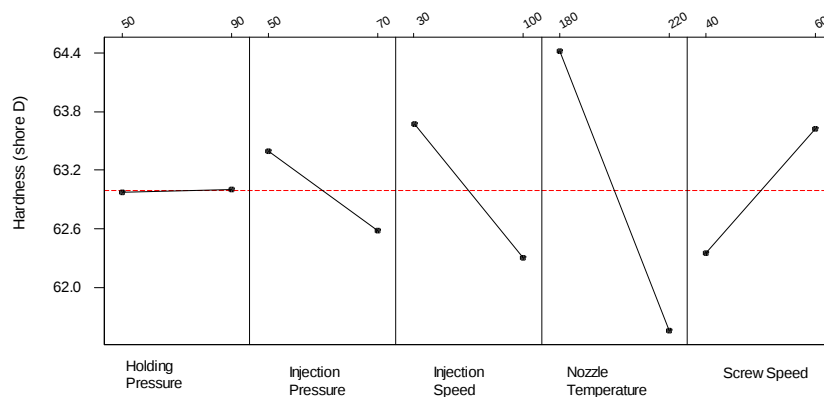
(Nozzle temperature) และความเร็วสกรู (Screw speed) ดังตารางที่ 3 โดยความแข็งจะลดลงเมื่อแรงดันฉีด (Injection pressure) ความเร็วฉีด(Injection speed) และอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) เพิ่มขึ้น แต่ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วสกรูเพิ่มขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากเกิดการเสื่อมของโพลีเมอร์ อุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้นจาก

180 °C เป็น 220 °C ทำให้โครงสร้างของโพลิเมอร์ มีความเปราะมากขึ้น ค่าความแข็งจึงมากขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับผลด้านเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ที่มีค่า ลดลงเมื่อความเร็วสกรูเพิ่มขึ้น

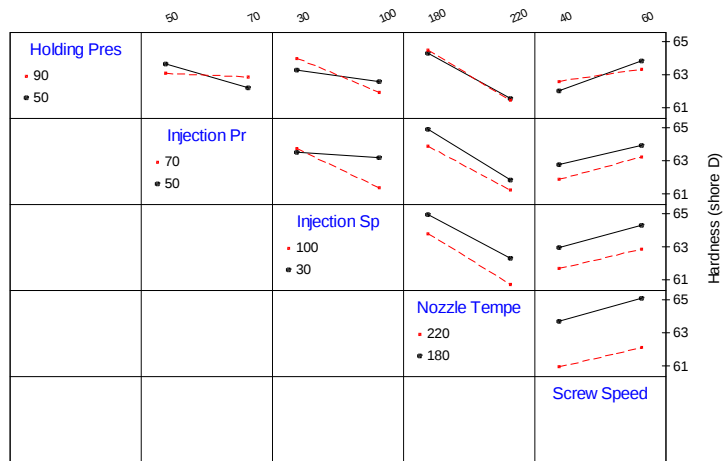
ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างสอง และสามปัจจัย ที่มีผลต่อมีผลต่อค่าความแข็งของโพลิเมอร์ PP อย่างมีนัยสำคัญ ประกอบด้วยปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) กับแรงดันฉีด (Injection pressure) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) กับความเร็วฉีด (Injection speed) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) กับความเร็วสกรู (Screw speed) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีด (Injection pressure) กับความเร็วฉีด (Injection speed) ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด และความเร็วฉีด ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน ความเร็วฉีด และอุณหภูมิ

หัวฉีด ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันรักษาชิ้นงาน ความเร็วฉีด และความเร็วสกรู ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันฉีด ความเร็วฉีด และอุณหภูมิหัวฉีด ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันฉีดอุณหภูมิหัวฉีด และความเร็วสกรู

จากกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปัจจัยฉีดขึ้นรูปทั้ง 5 ปัจจัยในรูปที่ 7 อธิบายได้ว่า เมื่อแรงดันฉีด ความเร็วฉีด และอุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะลดลง เมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น สำหรับรูปที่ 8 จะแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปสองปัจจัยที่มีต่อค่าความแข็ง โดยพิจารณาจากเส้นกราฟที่ตัดกัน สรุปได้ว่า แรงดันรักษาชิ้นงานกับแรงดันฉีด แรงดันรักษาชิ้นงานกับความเร็วฉีด แรงดันรักษาชิ้นงานกับความเร็วสกรู และแรงดันฉีดกับความเร็วฉีด เป็นปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์กัน ส่งผลต่อค่าความแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับผลสรุปในตารางที่3



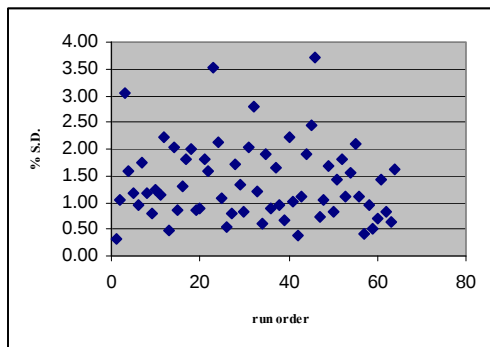
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับค่าความแข็ง



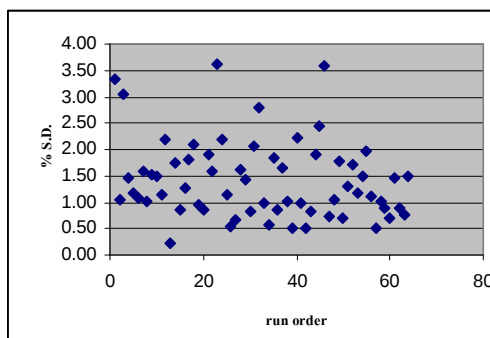
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยที่ขึ้นรูปกับค่าความแข็ง

จากรูปที่ 9 ถึง 12 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติเชิงกล ของการทดลอง 64 ครั้ง (run order) โดยเปอร์เซ็นต์ความ ยืดหยุ่นนับว่าเป็น

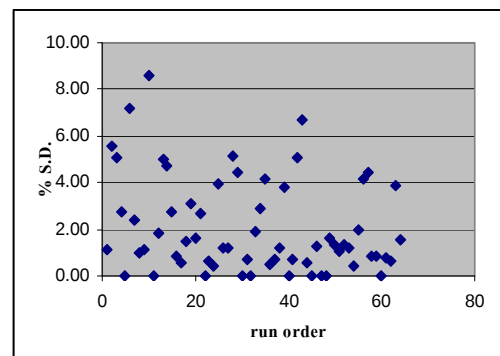
คุณสมบัติ ที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด คือ 8.5% ซึ่งยอมรับได้เพราะค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยทั่วไปไม่เกิน 5-10%



รูปที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความทนต่อแรงดึง



รูปที่ 10 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 11 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น



รูปที่ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็ง

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยฉีดขึ้นรูปกับคุณสมบัติเชิงกล

เมื่อนำข้อมูลทำการวิเคราะห์ การถดถอยจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล กับปัจจัยฉีดขึ้นรูปดังตารางที่ 4 โดยค่าต่ำสุดของปัจจัยแทนด้วย -1 และค่าสูงสุดแทนด้วย +1 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.2.1 ความทนต่อแรงดึงมีค่าสูงสุด 33.7 MPa เมื่อแทนค่าตัวแปร X_4 ด้วย -1 แทนค่า X_2 กับ X_5 ด้วย +1 ค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น แรงดันฉีด และความเร็วสกรูลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 1 และจากรูปที่ 2 ค่าแรงดันฉีดกับอุณหภูมิหัวฉีดมีปฏิสัมพันธ์กัน

3.2.2 โมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าสูงสุด 67.6 MPa เมื่อแทนค่าตัวแปร X_1 , X_2 และ X_5 ด้วย +1 แทนค่า X_4 ด้วย -1 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงเมื่อค่า

แรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด และความเร็วสกรูลดลง และอุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3 และจากรูปที่ 4 ค่าแรงดันฉีดกับอุณหภูมิหัวฉีดมีปฏิสัมพันธ์กัน

3.2.3 ความแข็ง (shore D) มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลายตัว จากสมการในตารางที่ 4 ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย และสัมพันธ์กับปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยสูงสุดถึง 4 ปัจจัยด้วยกัน จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อหาสมการดังตารางที่ 4 อุณหภูมิหัวฉีดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 3 อุณหภูมิหัวฉีดเป็นปัจจัยที่มีค่า F มากที่สุด จึงมีผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด

ตารางที่ 4 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติเชิงกลกับปัจจัยฉีดขึ้นรูป

คุณสมบัติเชิงกล	สมการความสัมพันธ์	R^2
ความทนต่อแรงดึง	$Y = 32.5 - 0.662 X_4 - 0.319X_2X_4 - 0.259X_2X_4X_5$	0.671
โมดูลัสความยืดหยุ่น	$Y = 65.02 + 0.239X_1 + 0.436X_2 - 1.109X_4 - 0.459X_2X_4 - 0.311X_2X_4X_5$	0.835
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ	-
ความแข็ง	$Y = 62.9 - 0.405X_2 - 0.683X_3 - 1.433X_4 + 0.633X_5 + 0.298X_1X_2 - 0.342X_1X_3 - 0.258X_1X_5 - 0.508X_2X_3 + 0.408X_1X_2X_3 - 0.320X_1X_3X_4 + 0.158X_1X_3X_5 + 0.248X_2X_3X_5 + 0.180X_2X_4X_5 + 0.336X_1X_2X_3X_4 - 0.230X_1X_2X_3X_5 - 0.323X_1X_3X_4X_5$	0.957

หมายเหตุ

X_1 = แรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure)

X_2 = แรงดันฉีด (Injection pressure)

X_3 = ความเร็วฉีด (Injection speed)

X_4 = อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature)

X_5 = ความเร็วสกรู (Screw speed)

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาปัจจัยชนิดขึ้นรูป และคุณสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ ชนิดโพลิโพรพิลีน(Polypropylene: PP) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งจะลดลง ดังนั้น อุณหภูมิหัวฉีดจึงนับว่าเป็นปัจจัยชนิดขึ้นรูป ที่สำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน และจากตารางที่ 3 ค่า F จากการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิหัวฉีด (X_4) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยชนิดขึ้นรูปอื่น ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า อุณหภูมิในการหลอมละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล [9]

2. แรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) และแรงดันฉีด (Injection pressure) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อแรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding pressure) และแรงดันฉีด (Injection pressure) เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น

3. แรงดันฉีด (Injection pressure) ความเร็วฉีด (Injection speed) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) และความเร็วสกรู (Screw Speed) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งจะลดลงเมื่อแรงดันฉีด (Injection pressure) ความเร็วฉีด (Injection speed) และอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature) เพิ่มขึ้น และความเร็วสกรู (Screw speed) ลดลง

4. จากสมการในตารางที่ 4 ความทนต่อแรงดึงมีค่าสูงสุด 33.7 MPa ค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น แรงดันฉีด และความเร็วสกรูลดลง

5. โมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าสูงสุด 67.6 MPa ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น จะมีค่าลดลงเมื่อค่าแรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด และความเร็วสกรูลดลง และอุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น

6. ความแข็ง (shore D) มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลายตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิหัวฉีดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งมากที่สุด

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปัจจัยชนิดขึ้นรูปบางปัจจัยจะมีหลายค่าตามระยะการเคลื่อนที่ของสกรู เช่น ความเร็วฉีดจะมีระยะการเคลื่อนที่ของสกรู 3 ช่วง ความเร็วฉีดจึงมี 3 ค่า แต่ทำการศึกษาโดยกำหนดให้ค่าความเร็วฉีดทุกช่วงเท่ากัน งานวิจัยครั้งต่อไป จึงควรศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าความเร็วฉีดแต่ละค่า ตามระยะการเคลื่อนที่ของสกรูกับคุณสมบัติเชิงกล

2. งานวิจัยนี้ใช้โพลิเมอร์เพียงชนิดเดียว งานวิจัยครั้งต่อไป ควรศึกษาผลกระทบของชนิดของโพลิเมอร์ และปัจจัยชนิดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ชนิดอื่น

3. ในการออกแบบการทดลองนี้ได้เลือก ใช้เป็นแบบแฟกทอเรียล มีการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยชนิดขึ้นรูป 2 ระดับ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยชนิดขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลเท่านั้น งานวิจัยครั้งต่อไปอาจทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาของทุกหน่วยงาน ที่มีส่วนสนับสนุนและอำนวยความสะดวก ได้แก่

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านภายในภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวก

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณาจารย์
และเจ้าหน้าที่ทุกท่านภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบแรงดึง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่ง
สนับสนุนด้านงบประมาณในการทำวิจัย และส่งเสริม
การทำวิจัยให้มีการพัฒนายิ่งขึ้นต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Donald R. Askeland and Pradeep P. Phule, The Science and engineering of materials, inter-national student edition, THOMSON, 2006.
- [2] Edward A. Muccio, Plastic Processing Technology, The Material Information Society, 1994.
- [3] Lopez Cabarcos, E., Bayer, R. K. and Zachmann, H. G., Journal of POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE MID-FEBRUARY, " Properties of Elongational Flow Injection - Molded Polyethylene Part 2: Influence of Processing Parameters ", Vol. 29, No. 3, 1989: 193-201.
- [4] Whelan, A., Developments in Injection Moulding, London, Applied Science Publisher., 1978.
- [5] จินตมัย สุวรรณประทีป การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. กรุงเทพมหานคร , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) 2547.
- [6] ปารเมศ ชูติมา การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545.
- [7] Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 4th, John Wiley & Sons, 1997.
- [8] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ จันทนา จันทโร สติดีสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2536.

[9] Johannaber, F., Injection molding machine : a user's guide, New York : Hanser, 1983.

[10] Hsiung, C. M. and Cakmak, M., Journal of Applied Polymer Science, "Effect of Injection - Molding Conditions on the Crystallinity, Orientation Gradient and Mechanical Properties of Poly (aryletherketone). II. Large Dumbell Parts", Vol. 47, 1993 : 149-165 .