

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมบัติเชิงกลจากการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโพลีพรพิลีน

วรรณมนต์ ชมจิตร

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2562

OPTIMIZATION OF INJECTION PROCESS PARAMETERS FOR MECHANICAL PROPERTIES
OF POLYPROPYLENE

Wassamon Chomjit

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2019

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมบัติเชิงกลจากการฉีดขึ้นรูป
พลาสติกโพลีโพรพิลีน

โดย

วรรณมนต์ ชมจิตร

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. ดอน แก้วดก

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. ดอน แก้วดก)

วรรณนต์ ชมจิตร : การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมบัติเชิงกลจากการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โพลีโพรพิลีน. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. ดอน แก้วดก, 96 หน้า.

การผลิตชิ้นงานพลาสติกโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกรรมวิธีการผลิตที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูง และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว หลักการพื้นฐานคือ การให้ความร้อนวัสดุและแม่พิมพ์ การฉีดเข้าแม่พิมพ์ การอัดยี้ และการเย็นตัวของชิ้นงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเงื่อนไขการฉีดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ให้สมบัติเชิงกลชิ้นงานสูงที่สุด โดยทำการทดลองบนเครื่องฉีดพลาสติก Toshiba รุ่น EC100S วัสดุคือเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด 1100N จำลองพฤติกรรมการฉีดบนโปรแกรม Moldex3D เพื่อทำการหาเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดพลาสติก และแรงดันฉีดยี้ และนำเงื่อนไขหลักที่ได้มาทำการออกแบบการทดลองแบ่งเป็น 5 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก 220°C, 230°C, 240°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C, 40°C, 50°C ความเร็วในการฉีด 60 mm/sec, 130 mm/sec, 200 mm/sec ความดันฉีดพลาสติก 50 MPa, 60 MPa, 70 MPa และแรงดันฉีดยี้ 20 MPa, 35 MPa, 50 MPa ตามลำดับ ออกแบบการทดลองโดยเลือกวิธี Orthogonal Array แบบ 3 ระดับ มีทั้งหมด 27 เงื่อนไขการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบความแข็งตาม ASTM จากผลการทดสอบแรงดึง พบว่ามีค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 34.16 N/mm.² ค่าการทดสอบแรงกระแทกมากที่สุดที่ 4.5 kJ/mm.² ค่าความแข็งที่มากที่สุดที่ 117.5 R-Scale ที่อุณหภูมิหลอมละลาย 240°C, อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40°C, ความเร็วในการฉีด 20 mm/sec, ความดันการฉีด 70 MPa, แรงดันฉีดยี้ 130 MPa

TNI

WASSAMON CHOMJIT : OPTIMIZATION OF INJECTION PROCESS PARAMETERS
FOR MECHANICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE. ADVISOR : DR. DON
KAEWDOK, 96 PP.

The production of plastic parts by injection molding is one of the widely used production processes, which provides high production efficiency, complex shape, high accurately and precisely. The process principle is heating plastic materials and injection molding, compression and cooling. The objective of this research aims to study the parameters of injection process for polypropylene plastic (PP) which provide the highest mechanical property. Toshiba injection machine model EC100S was used in this study, PP material commercial grade 1100N, simulating the injection behavior via the Moldex3D program to find the optimization of injection parameters. The parameters including 5 items were melting temperature, mold temperature, injection speed, injection pressure, and repeated injection pressure. The design of experiment divided 5 factors 3 levels start from melting temperature are 220°C, 230°C, 240°C the mold temperature were 30°C, 40°C, 50°C the injection speed were 60 mm/sec, 130 mm/sec, 200 mm/sec plastic injection pressure were 50 MPa, 60 MPa, 70 MPa and the repeated injection pressure were 20 MPa, 35 MPa, 50 MPa respectively. The mechanical properties including the tensile strength, impact test and hardness test are presented. The maximum tensile strength is 34.45 N/mm.², the maximum impact test at 5.22 J/mm.², the maximum hardness at 80.13 shore D was found at the parameter as melting temperature 240°C, mold temperature 40°C, injection speed 20 mm/sec, injection pressure 70 MPa and the repeated injection pressure 130 MPa.

Graduate School
Field of Engineering of Technology
Academic Year 2019

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต สุขสวัสดิ์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวนามที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และคอยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับ งานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณสิทธิเดช ศิลปะประภา บริษัท Toshiba Machine Thailand ในการให้คำแนะนำเทคนิคการใช้งานเครื่องฉีดพลาสติก บริษัท Quality Report ที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิเคราะห์ ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุน อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาไม่มากนักน้อย ซึ่งขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วรรณมนต์ ชมจิตร

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ.....	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการพื้นฐาน.....	5
2.2 คุณสมบัติทางเคมีของพลาสติกโพลิโพรพิลีน (Polypropylene).....	5
2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก.....	6
2.4 การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE).....	10
2.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	12
2.6 แบบจำลองการไหลในระบบการฉีดพลาสติก.....	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย.....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	3.3 กระบวนการวิจัย..... 23
	3.4 วิธีดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล..... 29
	3.5 ผลการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล..... 31
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 33
	4.1 ผลจากกระบวนการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D..... 33
	4.2 ผลการทดลองโดยวิธีการทางปฏิบัติ..... 34
	4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 49
5	บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... 50
	5.1 สรุปผลการวิจัย..... 50
	5.2 อภิปรายผล..... 51
	5.3 ข้อเสนอแนะ..... 51
บรรณานุกรม	 53
ภาคผนวก	 56
	ภาคผนวก ก. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก..... 57
	ภาคผนวก ข. แบบภาพประกอบและภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก..... 68
	ภาคผนวก ค. ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน..... 73
	ภาคผนวก ง. ข้อมูลการตั้งค่าบนโปรแกรมจำลองทางวิศวกรรมของ การฉีดพลาสติก..... 80
	ภาคผนวก จ. บทความการประชุมวิชาการ..... 85
ประวัติย่อผู้วิจัย	 96

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2560 - 2561	4
2.1 เปรียบเทียบการหาจำนวนการทดลองระหว่าง Factorial กับ Orthogonal Ar-ray	12
3.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย	19
3.2 ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย	20
3.3 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	20
3.4 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์อินเสิร์ต	21
3.5 พารามิเตอร์หลักโดยการใช้โปรแกรมจำลองโปรแกรม Moldex3D.....	26
3.6 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง	27
3.7 แผนการทดลอง Orthogonal Array L27	27
3.8 พารามิเตอร์การทดลองกระบวนการฉีด.....	28
3.9 พารามิเตอร์และผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรมจำลอง Moldex3D	31
3.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผนการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ 27 การทดลอง.....	31
4.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการจำลอง.....	33
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน.....	34
4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน	35
4.4 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึง.....	36
4.5 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง	38
4.6 ผลการทดสอบแรงกระแทก.....	39
4.7 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทก.....	40
4.8 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง	43
4.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน	44
4.10 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็ง.....	45
4.11 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง	48
4.12 ค่าสมบัติเชิงกลของเงื่อนไขที่ได้จากโปรแกรมจำลองและวิธีการออกแบบการทดลอง แบบทางสถิติ.....	49

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ก.1 ค่าของความดันฉีดและความดันในโพรงแบบของพลาสติกชนิดต่างๆ.....	62
ค.1 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบแรงดึง	74
ค.2 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบแรงกระแทก	75
ค.3 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบความแข็ง	76



สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1	อันดับสินค้าการส่งออกของประเทศไทยในปี 2018 ข้อมูลจากกระทรวงพาณิชย์ 1
1.2	สถิตินำเข้า-ส่งออก ผลิตภัณฑ์พลาสติกของไทยปี 2008 ถึง 2018..... 2
2.1	การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง..... 7
2.2	การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ..... 7
2.3	การจำลองการไหลในโปรแกรม Moldex3D..... 14
3.1	ลำดับขั้นตอนการวิจัย 18
3.2	เครื่องฉีดพลาสติก Toshiba รุ่น EC100S..... 19
3.3	แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์อินเสิร์ตหึ่งควิตี้ (ซ้าย) และคอร์ (ขวา)..... 21
3.4	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) 21
3.5	เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Pendulum Impact Test) 22
3.6	เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test) 22
3.7	การจำลองการออกแบบท่อให้ความร้อนและหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก 23
3.8	ชิ้นงานจากการออกแบบโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์..... 24
3.9	ทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในชิ้นงาน 25
3.10	ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก 25
3.11	เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine 29
3.12	เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing Machine) 30
3.13	เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine)..... 30
4.1	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่า SN 36
4.2	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวม 37
4.3	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทกจากค่า SN 41
4.4	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทกจาก ค่าเฉลี่ยรวม 42
4.5	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งจากค่า SN 46
4.6	กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งจากค่าเฉลี่ยรวม 47
ก.1	ภาพชิ้นงานฉีดพลาสติกแบบ 2 ควิตี้ ทางวิ่งและรูเข้า..... 58
ก.2	พื้นที่การคิดปริมาตรของชิ้นงานด้วยตัวเอง..... 59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
ก.3	ปริมาตรของชิ้นงานที่คำนวณจากโปรแกรม CATIA.....	60
ก.4	พื้นที่การคิดปริมาตรของทางวิ่งด้วยตัวเอง.....	61
ก.5	หน้าตัดแสดงพื้นที่ฉายของแม่พิมพ์.....	62
ข.1	ภาพประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย.....	69
ข.2	ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย.....	71
ข.3	ภาพร่างแสดงขนาดของชิ้นงานมาตรฐาน ASTM : D638.....	72



บทที่ 1

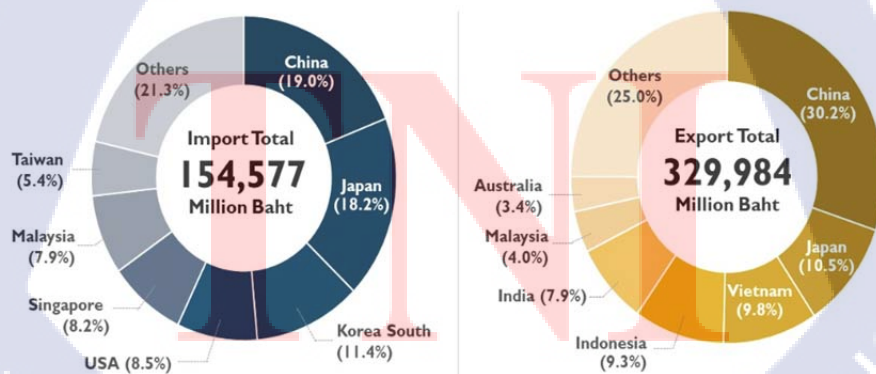
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมพลาสติกในปัจจุบันเป็นอุตสาหกรรมที่ได้รับความนิยมและถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่สนับสนุนในหลายอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุตสาหกรรมยานยนต์ล้วนมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบไม่มากนักน้อย ซึ่งจากสถิติการส่งออกสินค้าสำคัญของไทยในปี 2018 พบว่าสินค้าส่งออกของไทยที่มีการส่งออกมากเป็นอันดับ 1 คือ อุปกรณ์และส่วนประกอบรถยนต์ ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์และส่วนประกอบไม่ว่าจะเป็นในท้องผู้โดยสารหรือภายนอกของรถยนต์มีพลาสติกเป็นส่วนประกอบด้วยกันทั้งนั้น อุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบันเป็นอุตสาหกรรมที่ผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมพลาสติกส่วนใหญ่ให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะเนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มของการเติบโตและได้รับความนิยมมากขึ้นอีกในอนาคต นอกจากอุปกรณ์และส่วนประกอบรถยนต์ แล้วยังมีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องปรับอากาศและส่วนประกอบ ล้วนมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบเช่นกัน จากสถิติการส่งออกสินค้าของไทยปี 2018 ได้มีการส่งออกชิ้นส่วนพลาสติกในภาคอุตสาหกรรมรถยนต์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ ซึ่งมีการส่งออกมากที่สุดเป็นอันดับแรกของไทย

2018 Thailand's plastic resin trading partner country

China is the first rank of resin trading partner country of Thailand



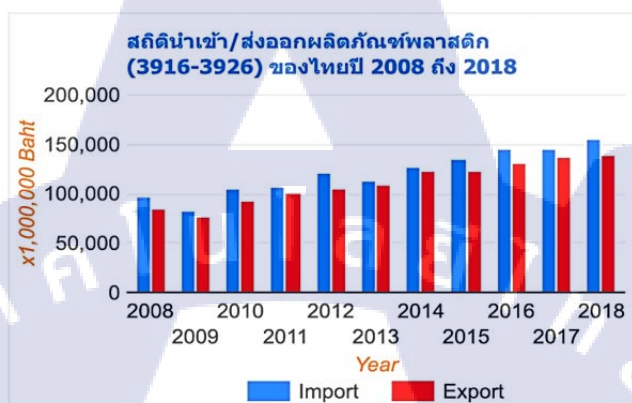
Remark: Plastic Resin HS Code 3901-3915
Source: Office of Industrial Economics, retrieved on July 8th, 2019

สถาบันพลาสติก
Plastics Institute of Thailand

PIC
PLASTICS
INTELLIGENT
CENTER

รูปที่ 1.1 อันดับสินค้าการส่งออกของประเทศไทยในปี 2018 ข้อมูลจากกระทรวงพาณิชย์ [1]

และจากสถิติการนำเข้า-และการส่งออกผลิตภัณฑ์พลาสติกของไทยตั้งแต่ปี 2008 ถึง 2018 ดังรูปที่ 1.2 พบว่าอุตสาหกรรมพลาสติกมีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงทิศทาง การใช้งานในอนาคตจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมพลาสติกได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นและทำให้การแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมพลาสติกสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 1.2 สถิตินำเข้า-ส่งออก ผลิตภัณฑ์พลาสติกของไทยปี 2008 ถึง 2018 [2]

เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีน้ำหนักเบาแต่ได้สมบัติทางกล ทำให้รูปแบบของผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความหลากหลายมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติก จึงมีความจำเป็น ต้องให้ความสำคัญและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะเริ่มจากขั้นตอนการออกแบบรูปร่างผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้า หรือผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ เช่น มีรูปทรงที่สวยงามเหมาะสมกับการใช้งาน มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับภาระขณะใช้งาน หรือใช้เนื้อวัสดุน้อยเป็นต้นซึ่งในส่วนนี้จะต้องพิจารณาจากพารามิเตอร์แม่พิมพ์ (Geometry Parameters) รวมกับการออกแบบ สิ่งสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีคุณภาพดีแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือการออกแบบแม่พิมพ์ (Injection Mold Design) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนที่สองคือ เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) รวมไปถึงการออกแบบกระบวนการฉีด (Injection Molding Process Design) และส่วนสุดท้ายคือ วัสดุพอลิเมอร์ (Raw Materials) นอกจากนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ (Material Properties) และที่สำคัญคือการปรับตั้งเงื่อนไขสำหรับการฉีดขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection Temperature) ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (Injection Temperature) แรงดันคงค้าง (Holding Pressure) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด (Mold Temperature) เป็นต้น

ดังนั้นโครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ในการฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับชิ้นงานฉีดพลาสติกโพลิโพรพิลีน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมในการกำหนดเงื่อนไขการฉีด เพื่อช่วยลดเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิตได้

1.2 ความสำคัญของการวิจัย

1.2.1 ลดข้อบกพร่องด้านคุณภาพของชิ้นส่วนพลาสติกสำเร็จรูป เช่น ลดรอยเชื่อมพลาสติก และลดปัญหาการฉีดไม่เต็มชิ้นงาน เป็นต้น

1.2.2 สามารถลดขั้นตอนหรือลดการใช้เวลาในตรวจสอบและแก้ไขกระบวนการฉีดพลาสติกโพลิโพรพิลีน

1.2.3 สามารถนำพารามิเตอร์มาใช้เป็นแนวทางในการปรับใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถลดการ ใช้เวลา แรงงาน ในการตรวจสอบและแก้ไขกระบวนการฉีดพลาสติก

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อหาพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกโพลิโพรพิลีน ที่เหมาะสมด้วยวิธีการการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความดันฉีด ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติกโพลิโพรพิลีน ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด, ความต้านทานต่อแรงกระแทก และ ความแข็งของชิ้นงาน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลองในรูปแบบของการศึกษาสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกโพลิโพรพิลีน และเพิ่มมูลค่าของชิ้นงานฉีดพลาสติกเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดพลาสติกและสามารถพัฒนาต่อไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตจริง ซึ่งเป็นการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้นของการกำหนดตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อชิ้นงาน อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย มีขอบเขตของการวิจัยดังต่อไปนี้

1.4.1 การออกแบบแม่พิมพ์และวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการหล่อเย็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของชิ้นงานฉีดพลาสติกสำหรับเครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน โดยใช้เทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) บนโปรแกรม Moldex3D R14 เพื่อหาอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ฝั่ง cavity ในช่วงเวลาต่างๆ

1.4.2 การทดลองใช้วัสดุพอลิโพรพิลีน ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกสำหรับเครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอนยี่ห้อโตชิบา (Toshiba) รุ่น EC100S ขนาด 100 ตัน และขนาดชิ้นงานพลาสติกประมาณ 34 กรัม ขนาด Mold Size: 250 x 400 x 300 มม. และใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature Controller) ในการควบคุมอุณหภูมิการหล่อเย็น

1.4.3 นำพารามิเตอร์ที่เลือกมาทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากุชิ

1.4.4 วิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลเป็นหลักเพื่อจัดขึ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM D638

1.4.5 วิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลเป็นหลักเพื่อจัดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy ตามมาตรฐาน DIN 53453

1.4.6 วิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลเป็นหลักเพื่อวัดชิ้นงาน ทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D785

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ลดเวลาการสูญเสียในระหว่างกระบวนการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ได้ขึ้นส่วนพลาสติกที่มีข้อบกพร่องน้อยลง

1.5.2 รู้และเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนพลาสติกที่มีความต้องการสมบัติเชิงกลได้

1.5.3 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาของกระบวนการฉีดยาขึ้นรูปพลาสติกที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานได้

1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2560 - 2561

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกล่าวถึงองค์ความรู้ เทคนิคต่างๆ รวมทั้งทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

- คุณสมบัติทางเคมีของพลาสติกโพลิโพรพิลีน (Polypropylene)
- พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก
- การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE)
- การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
- แบบจำลองการไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 คุณสมบัติทางเคมีของพลาสติกโพลิโพรพิลีน (Polypropylene) [3]

พลาสติกเป็นสารสังเคราะห์มาจากเซลลูโลสซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ นำมาสังเคราะห์โดยกระบวนการที่เรียกว่า “พอลิเมอร์ไรเซชัน” คำว่า “พลาสติก” จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เป็นสารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำกันต่อกันเป็นสาย พลาสติกมีโครงสร้างพิเศษเรียกว่า High Molecular Weight คือ โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันยาวกว่าสารชนิดอื่นมากมาย นับเป็นพันธะจึงทำให้พลาสติกมีสมบัติหลายๆ อย่างไปพร้อมกัน คือ

- สมบัติทางกล (Mechanical): มีความแข็งแรงเหนียว ยืดหยุ่น ทนแรงกระแทก (Impact Strength) ได้ดีมีความทนทานทางกลสูง (Mechanical Strength)
- สมบัติทางไฟฟ้า (Electric): เป็นฉนวนไฟฟ้า
- สมบัติทางเคมี (Chemical): มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีจุดหลอมเหลวสูงตั้งแต่ 80-100 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิต่ำจะแข็ง ส่วนใหญ่มีความถ่วงจำเพาะต่ำจึงมีน้ำหนักเบาทนกรดต่างและสารเคมีอื่นๆ และโดยมากไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ พลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) มีสมบัติพิเศษคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี พลาสติกแบบนี้เมื่อหลอมตัวเป็นรูปแบบใดจะเป็นรูปแบบนั้นอย่างถาวร ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่เมื่อขึ้นรูปแล้วสามารถนำกลับ มาหลอมและใช้ใหม่ได้ เป็นชนิดพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุด มีอยู่ประมาณ 8 ประเภท ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP), โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), โพลีสไตรีน (PS), เอบีเอส (ABS), อะคริลิก (PMMA), โพลีอะซีทัล (Poyace-tal) และโพลีคาร์บอนเนต (PC)

โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นเม็ดพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกชนิด HDPE และ LDPE สามารถใช้ทดแทนกันได้ สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 150°C มีความเหนียว และแข็งแรง ทนต่อแรงอัดและแรงกระแทก ไม่สึกกร่อนง่าย ทนต่อสารเคมีเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

Homopolymer Polypropylene เป็นโพลีโพรพิลีนที่มีคุณสมบัติแข็งแรงกว่าโพลีเอทิลีน ขึ้นรูปง่ายใช้ในงานฉีดทั่วไป งานที่ใช้เม็ดพลาสติกประเภทนี้ได้แก่ ถัง กะละมัง ตะกร้า ของเด็กเล่น เฟอร์นิเจอร์เครื่องใช้ทางการแพทย์ภาชนะบรรจุทั่วไป

Block Copolymer Polypropylene เป็นโพลีโพรพิลีนที่สามารถที่จะรับแรงกระแทกสูงกว่าประเภท Homopolymer ขึ้นรูปง่าย งานที่ใช้เช่นเดียวกับ Homopolymer Poly-Propylene แต่ต้องรับแรงกระแทกสูงที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำเช่น Top Table ในตู้เย็น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า อุปกรณ์รถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ภาชนะบรรจุที่ต้องการรับแรงกระแทกสูง แบตเตอรี่ แก้วใส่น้ำ เป็นต้น

Random Copolymer Polypropylene เป็นโพลีโพรพิลีนที่มีความใสเป็น คุณสมบัติพิเศษ ใช้งานฉีดเป็นส่วนใหญ่งานที่ใช้ ได้แก่ กล่องบรรจุอาหารทั่ว ๆ ไป

2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งค่าเครื่องฉีดพลาสติก [4]

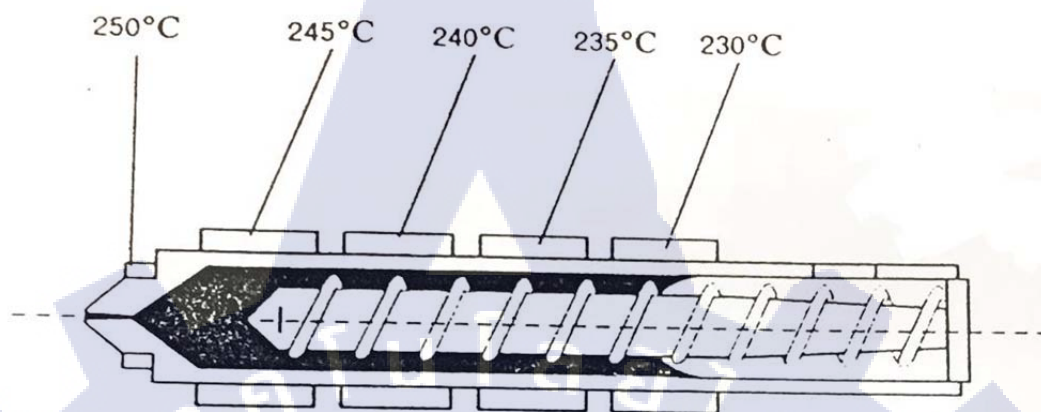
การฉีดพลาสติกเป็นงานที่ซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ว่าถูกต้องหรือเหมาะสมกับลักษณะงานหรือไม่ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานฉีดพลาสติกและมีอิทธิพลต่อเวลาการทำงาน ตลอดจนคุณภาพของชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงนั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. อุณหภูมิ (พลาสติกเหลว แม่พิมพ์)
2. เวลา (ฉีด ฉีดช้า หล่อเย็น และวงจรทำงาน)
3. ความดัน (ฉีด ฉีดช้า ด้านการถอยของเกลียวหนอน และในแม่พิมพ์)
4. ความเร็ว (ฉีด ปิด-เปิดแม่พิมพ์ ชุดเคลื่อนเข้า-ออก และรอบเกลียวหนอน)

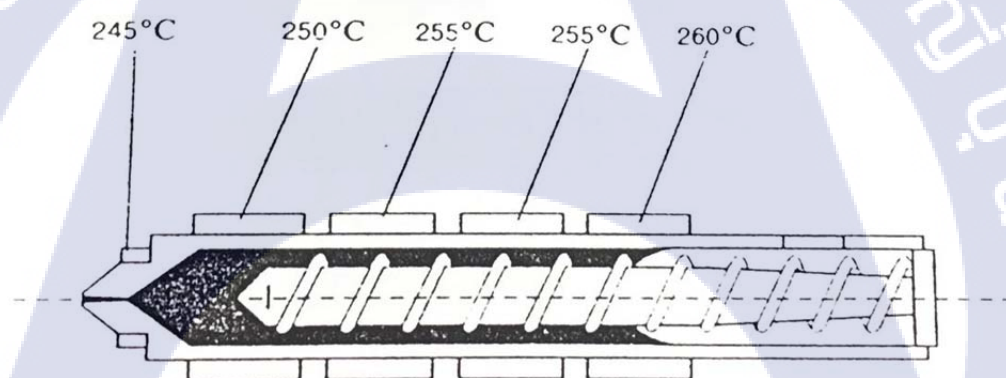
อุณหภูมิพลาสติกเหลว

อุณหภูมิพลาสติกเป็นอุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ออกมาจากเครื่องฉีดพลาสติกโดยหัวฉีดขณะทำการฉีด อุณหภูมิของพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดพลาสติกนั้นขึ้นอยู่กับพลาสติกที่ใช้ ซึ่งโดย

ปกติสามารถสอบถามได้จากผู้ผลิตโดยตรงจากบริษัทผู้ผลิต การที่จะเลือกใช้อุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละลักษณะงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดยาจากต่ำไปหาสูง [5]



รูปที่ 2.2 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดยาจากสูงไปหาต่ำ [5]

วิธีที่นิยมใช้กันมากคือใช้อุณหภูมิต่ำและค่อยๆ สูงขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันพลาสติกตรงตำแหน่งใต้กรวยเติมพลาสติกอาจเกิดการหลอมเหลวจนเกิดการอุดตัน

อุณหภูมิของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหรือน้ำมันที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ทำการปรับตั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก กล่าวคือถ้าต้องการอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเราสามารถเปิดน้ำเข้าแม่พิมพ์ไปพร้อมๆ กับการฉีดได้เลย

แล้วค่อยๆ ปรับปริมาณและความเร็วของน้ำให้มากขึ้น เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากพลาสติก หลอมเหลว จนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ แต่ถ้าต้องการอุณหภูมิสูงจะต้องปิดน้ำไว้ก่อน หลังจากทำการ ฉีดไปได้สักระยะหนึ่งจนอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้นตามที่ต้องการแล้วจึงค่อยเปิดน้ำให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ แล้วทำการปรับปริมาณและความของน้ำจนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่

เวลาในการฉีด

เวลาในการฉีดพลาสติกเหลวพืมนั้นเราสามารถปรับตั้งค่าได้โดยตรงที่เครื่องฉีด ซึ่งการ ฉีดจริงจะสัมพันธ์กับความเร็วในการฉีดหรือการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน และระยะ ทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน

เวลาในการฉีดย้ารักษาความดัน

เวลามีบทบาทมากต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก เพราะถ้าใช้เวลาในการฉีดย้าเพื่อ รักษาความดันนี้น้อยเกินไป ชิ้นงานก็จะเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้นานเกินไปก็อาจเกิดความดันคั่ง ภายในเนื้อชิ้นงานได้

เวลาในการหล่อเย็น

เวลาในการหล่อเย็นที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์และความหนาชิ้นงาน ความเร็วใน การหล่อเย็นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการหล่อเย็นเร็วสามารถทำได้กับ พลาสติกที่ไม่มีผลึก ส่วนการหล่อเย็นช้าจำเป็นต้องใช้กับพลาสติกที่มีผลึกเพื่อให้การเกาะผลึกเป็นไป อย่างสม่ำเสมอ ขนาดของผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่และชิ้นงานจะมีความแข็งแรง ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ พลาสติกประเภทเอบีเอสซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่มีผลึก ส่วนการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นจะอยู่ในส่วน ของภาคผนวก

เวลาในการทำงานทั้งวงจร

เวลาในการทำงานทั้งวงจรเป็นเวลารวมที่ใช้ทั้งหมดตั้งแต่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าและปิด จนกระทั่งเสร็จสิ้นการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เวลานี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการย้ารักษา ความดันและเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้ง การคิดคำนวณราคางานฉีดก็จะใช้เวลาในการทำงานทั้ง วงจรนี้มาเป็นปัจจัยในการคำนวณตัวหนึ่งเช่นกัน

ความดันฉีด

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน โดยการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันของน้ำมันไฮดรอลิกที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบไฮดรอลิก ความดันนี้เองที่เป็นตัวทำให้พลาสติกหลอมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเคลื่อนที่เข้าไปในแม่พิมพ์และจะไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดนี้เหมือนกัน ความดันนี้สามารถปรับได้โดยตรงที่เครื่องฉีดพลาสติก

ความดันฉีดช้า

ความดันฉีดช้าเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน เหมือนกันความดันฉีดทุกประการ แตกต่างกันที่ขนาดของความดันฉีดช้านี้จะน้อยกว่าโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 30-70 เปอร์เซ็นต์ของความดันฉีด (ความดันของพลาสติกหลอมเหลวหน้าปลายเกลียวหนอนที่ปรับตั้ง) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกด้วย ความดันฉีดช้าบางครั้งเรียกว่า ความดันฉีดจังหวะสอง ความดันนี้มีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานโดยตรง เช่น การหดตัวของพลาสติก ความเค้นภายใน น้ำหนักของชิ้นงานและการยุบตัวที่ผิวชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาเลือกใช้ค่าความดันฉีดช้านี้ให้เหมาะสม

ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน

ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนเป็นความดันที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งด้านท้ายของเกลียวหนอน เพื่อดำเนินการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนเนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นของพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ปลายเกลียวในจังหวะที่ทำการหลอมเหลวและป้อนพลาสติก เป็นตัวช่วยให้เกลียวหนอนถอยหลังกลับอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการหลอมเหลวและการผสมกันของวัสดุพลาสติก ความดันนี้โดยปกติจะใช้ประมาณ 50-150 บาร์ (ความดันด้านท้ายเกลียวหนอน) หรือ 5-15 (ความดันไฮดรอลิก)

ความดันในแม่พิมพ์

ความดันในแม่พิมพ์เป็นความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์เนื่องจากความดันฉีด ความดันจะมีค่าสูงสุดเมื่อพลาสติกเริ่มเต็มแม่พิมพ์และจะเป็นตัวก่อให้เกิดแรงกระทำภายในแม่พิมพ์ทำให้แม่พิมพ์เผยออกถ้ามีความดันภายในแม่พิมพ์มากเกินไปหรือแรงปิดแม่พิมพ์ไม่เพียงพอ

ความดันในการค้ำหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์

ความดันในการค้ำหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์นี้จะคอยต้านแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีด ถ้าแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันนี้น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความดันฉีด พลาสติกหลอมเหลวจะมีโอกาสทะลักออกมาที่หัวฉีดได้แทนที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์

ความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีดเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอนเพื่อดันพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ต้นกำลังขับเคลื่อนได้มาจากไฮดรอลิก ความเร็วในการฉีดจะเกิดควบคู่ไปกับความดันฉีดเพราะต้นกำลังขับเคลื่อนมาจากจุดเดียวกัน ความเร็วในการฉีดจะเป็นตัวควบคุมความดันฉีด

ความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์

เวลาในการทำงานทั้งวงจรจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 3 ชั้นความเร็วสำหรับเครื่องฉีดแบบใหม่และมีช่วงป้องกันแม่พิมพ์ (Mold Protection) ด้วย โดยช่วงนี้สามารถปรับตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนปิดได้ ในกรณีที่ชิ้นงานเกิดค้างติดอยู่ที่แม่พิมพ์ โดยเฉพาะชิ้นงานพลาสติกที่แข็งซึ่งถ้าเราใช้ความเร็วในการเคลื่อนแม่พิมพ์เข้าปิดสูงที่มีชิ้นงานแข็งค้างอยู่ แม่พิมพ์ทั้งสองฝั่งอาจเกิดความเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรใช้ความเร็วและช้าในขณะแม่พิมพ์เริ่มเปิดและปิดให้เหมาะสม

2.4 การออกแบบทดลอง (Design of Experiment, DOE) [6]

การออกแบบการทดลอง หมายถึง การทดสอบที่เปลี่ยนตัวแปรนำเข้า (Input Factors) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสามารถสังเกตและระบุถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อผลลัพธ์ (Output or Responses) จากกระบวนการดังต่อไปนี้

- การทำซ้ำ (Replication) การที่ทรีทเมนต์หนึ่งๆ ปรากฏในหน่วยทดลองมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและความแน่นอนของการทดลอง
- การสุ่ม (Randomization) วิธีจัดทรีทเมนต์ให้แก่หน่วยทดลอง โดยแต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสเท่าๆ กันที่จะได้รับทรีทเมนต์ใดก็ได้
- การบล็อก (Blocking) การใช้กลุ่มของหน่วยทดลองที่เหมือนกันให้ได้รับทรีทเมนต์เดียวกัน การจัดกลุ่มทดลองนี้เพื่อลดความผันแปรจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

การออกแบบการทดลองโดยวิธีทาคุชิ [6]

การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิพัฒนาโดย Dr.Genichi Taguchi วิศวกรชาวญี่ปุ่น เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อปรับปรุงเครื่องมือ กระบวนการ และวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับการผลิต โดยศึกษาการควบคุมตัวแปรหลักในกระบวนการ และการหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองหรือการออกแบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด วิธีทาคุชิออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial ร่วมกับ Or-thonal Array (OA) จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรที่ต้องการทดลอง (Design Variable) และตัวแปรรบกวน (Noise Variable) มาจัดวางลงในการทดลอง เพื่อคำนวณหาค่าตอบสนองที่เหมาะสมในรูปแบบอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio: S/N Ratio) จากนั้นจึงเลือกตัวแปรให้ตรงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด จำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด

ขั้นตอนของวิธีทาคุชิ

1. การวางแผนการทดลอง (Planning Experiment) เป็นขั้นตอนการกำหนดวัตถุประสงค์ที่ต้องการรวมทั้งพิจารณาตัวแปรต่างๆ
2. การออกแบบการทดลอง (Designing Experiment) เป็นขั้นตอนของการกำหนดหรือเลือก Orthogonal Array ที่เหมาะสมกับระบบรวมทั้งกำหนดตัวแปรและระดับของตัวแปร
3. การทดลอง (Conducting) เป็นขั้นตอนการทำการทดลองตามสภาวะของตัวแปรและระดับของตัวแปรที่กำหนดใน Orthogonal Array
4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Analyzing Experiment) เป็นขั้นตอนของการพิจารณาผลของตัวแปรที่มีความสำคัญกับระบบมากที่สุดพร้อมทำนายผลคาดหวัง
5. การทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming/Predicted) เป็นขั้นตอนของการพิสูจน์หรือทวนสอบสภาวะที่เหมาะสมต่อระบบที่หาได้นั้นตรงกับความต้องการจริงหรือไม่ Orthogonal Array วิธีทาคุชิออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial ร่วมกับ Or-thonal Array (OA) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$N = (L-1) F + 1 \quad (2.1)$$

N = จำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด

F = จำนวนแฟคเตอร์ (Factory)

L = จำนวนระดับ (Levels)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการหาจำนวนการทดลองระหว่าง Factorial กับ Orthogonal Ar-ray

การออกแบบการทดลองแบบ Factorial	การออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal Array
จำนวนปัจจัย (Factors) ↓ $3^5 = 243$ ↑ จำนวนการทดลอง (Treatment) ระดับของปัจจัย (Level)	จำนวนปัจจัย (Factors) ↓ L27 (3^5) ↑ ระดับของปัจจัย (Level) จำนวนการทดลอง (Treatment)

2.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล [7, 8]

คุณสมบัติเชิงกลคือ พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อได้รับแรงจากภายนอกเข้ามากระทำกับวัสดุ ซึ่งสมบัติเชิงกลถือว่ามีค่าสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นสมบัติหนึ่งสำหรับใช้พิจารณาการเลือกวัสดุไปใช้ให้เหมาะสมกับ งานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยนอกจากนั้น ยังใช้ค่าต่างๆ ของสมบัติเชิงกลนี้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือเครื่องจักรให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบโดยไม่เกิดการเสียหายภายใต้แรงกระทำ ในสภาวะงานนั้นๆ อีกด้วย

การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test)

สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรง Dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ ในกรณีของพลาสติกที่ได้จากกระบวนการฉีด (Injection Molding) ขณะทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่ง ปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง

การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

การทดสอบแรงกระแทก เป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำขึ้นทดสอบด้วย ความเร็วสูง ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป โดยประเมินจากปริมาณของพลังงาน (Impact Energy) ที่วัสดุสามารถดูดซับไว้ก่อนที่จะขึ้นทดสอบจะเกิดการแตกหัก หรือ

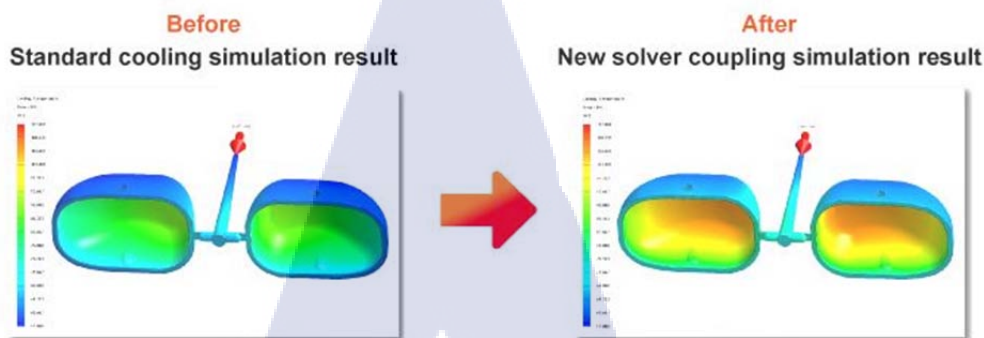
ปริมาณพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกนี้ใช้บ่งชี้ว่า วัสดุเปราะหรือวัสดุเหนียวได้ โดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่ดูดซับ หรือค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก หากพลังงานที่วัสดุนั้นดูดซับได้มีปริมาณมาก หรือค่าการต้านทานแรงกระแทกมากแสดงว่าวัสดุนั้น เป็นวัสดุเหนียว ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

คือการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีค่าความแข็งแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยสำหรับการทดสอบความแข็งของ พอลิเมอร์นั้น สามารถทดสอบได้ 2 วิธีได้แก่ ร็อกเวลล์ (Rockwell) และ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) หรือที่รู้จักกัน ทั่วไปว่าแบบชอร์ (Shore) ซึ่งจะเลือกใช้การทดสอบแบบใดนั้นขึ้นกับชนิดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบการทดสอบความแข็งสำหรับพลาสติก ที่มีลักษณะแข็งนั้นจะทดสอบความแข็งแบบ Rockwell ซึ่งจะมี 5 สเกลด้วยกัน ได้แก่ R, L, M, E และ K ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับ พลาสติกที่มีความแข็งไม่สูงมากเช่น ยางและพลาสติก

2.6 แบบจำลองการไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก

การเข้ามาของคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในทางวิศวกรรม (CAE) ของกระบวนการผลิตของแม่พิมพ์และขั้นตอนการฉีดพลาสติก สามารถทำนายคุณภาพของชิ้นงานก่อนการฉีดจริงและป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตตั้งแต่การออกแบบแม่พิมพ์ ช่วยให้ลดเวลาการทำงาน ลดค่าใช้จ่ายและสามารถปรับตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ในงานวิจัยนี้โปรแกรมที่นำมาใช้จะใช้โปรแกรม Moldex3D R14 ในการจำลองอุณหภูมิต่างๆ ที่ผิวของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝั่งควิตี่เปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง แล้วสรุปผลออกมาเป็นค่าความผิดพลาดเพื่อใช้ในการกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกสำหรับงานวิจัยถัดไป สำหรับโปรแกรม Moldex3D R14 เป็นโปรแกรมที่จำลองรูปแบบการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ เพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรมก่อนฉีดจริง อาทิเช่น การเติมเนื้อพลาสติก ความดัน ความดันย้า เวลาการหล่อเย็น เป็นต้น สำหรับการลดเวลาในการตั้งค่าที่เครื่องฉีดพลาสติกจริงอีกครั้ง ในส่วนนี้จะสามารถจำลองการไหลของชิ้นงานและตรวจสอบว่าพลาสติกไหลหมดเหลวไหลเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ ตรวจสอบตำแหน่งรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น และอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ขณะฉีด ดังนี้แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การจำลองการไหลในโปรแกรม Moldex3D [9]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่างๆ อาทิ เช่น www.sciencedirect.com และบทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานแม่พิมพ์พลาสติก เทคนิคการผลิตของการฉีดพลาสติก เป็นต้น โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

กำชัย ไทยไชยนต์ [10] การปรับปรุงคุณภาพการฉีดพลาสติกโดยวิธีการของทางสถิติ โดยค้นหาระบบการปรับตั้งค่าการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวของผลิตภัณฑ์กับค่าเป้าหมายของลูกค้า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตั้งค่าการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ที่เหมาะสมมีจำนวนทั้งสิ้น 8 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ บริเวณปลายหัวฉีดของกระบอกฉีดพลาสติก บริเวณส่วนกลางของกระบอกฉีดพลาสติก บริเวณส่วนต้นของกระบอกฉีดพลาสติก ความเร็วฉีดของพลาสติก แรงดันในการฉีด แรงดันย่ำ ระยะการฉีดพลาสติก ขั้นตอนการศึกษาได้ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วม โดยใช้การออกแบบการทดลองชนิดสุ่มสมบูรณ์เพื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสม

E. Farotti and M. Natalini [11] ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ Polypropylene ซึ่งมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความดันและอุณหภูมิในแม่พิมพ์ ในการทดลองกระบวนการฉีดตรวจสอบโดยใช้เทคนิค DoE วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ Polypropylene โดยศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) ความดันการบรรจุ (Packing Pressure) และเวลาในการทำความเย็น (Cooling Time) ได้รับการวิเคราะห์ทางด้านสมบัติเชิงกล ซึ่งใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) เป็นตัวกำหนดสมบัติเชิงกลของ Polypropylene พร้อมกับความดัน การบรรจุ (Packing Pressure) อย่างไรก็ตามค่าที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้เกิดการ Over Packing หรือความเปราะบางของชิ้นส่วน

M. Zrida et al. [12] ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบแรงดึง High-Speed Tensile Test Polypropyl-ene (PPC7712) การศึกษานี้มีการทดสอบความเครียดตั้งแต่ 0.8 ถึง 200 วินาที ซึ่งพบว่าค่าโมดูลัสยังเพิ่มขึ้นตามอัตราความเครียด ส่วนการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาพื้นผิวแตกหักพบว่าพื้นผิวขรุขระขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง Hyperelasto-Visco-Hysteresis พบว่าเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียด

C. Nicolazo et al. [13] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในโพลีเมอร์ระหว่างขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองขึ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดตั้งแต่เฟสแรกในการเติมจนถึงจุดสิ้นสุดของการหล่อเย็นหลังจากการดึงขึ้นส่วน แบบจำลองได้จากการประเมินโดยการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้ในความลึกและที่ผิวของขึ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีด การวัดอุณหภูมิภายในส่วนที่อยู่ใกล้ผิวหน้าจะเน้นลักษณะของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสองระดับ ซึ่งความร้อนที่สองเกี่ยวข้องกับ การขับออก ในกรณีของ PS ความร้อนในส่วนแรกอธิบายได้จากการลดลงของความดันการบรรจุ (Packing Pressure) ที่มาของความร้อนอยู่ในบริเวณด้านข้างของขึ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ ส่วน ในกรณีของ PP อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอยู่ใกล้ด้านข้างของส่วนที่คงที่ของแม่พิมพ์เกิดขึ้นในลักษณะล่าช้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของการระบายความร้อนเพื่ออธิบายสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ล่าช้า ปรากฏว่าความร้อนที่ล่าช้าเกิดขึ้นพร้อมกับความกว้างสูงสุดของการตกผลึกของขึ้นส่วน ความเร็วสูงสุดของการตกผลึกทั้งหมดของส่วนนี้เกี่ยวข้องกับการหดตัว ซึ่งการระบายความร้อนมีผลมาจากความแตกต่างระหว่างพื้นผิวของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ซึ่งในการระบายความร้อนนั้นมีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน

T. Gómez-del Río and J. Rodríguez [14] ในงานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของวัสดุสองชนิดคือโพลีโพรพิลีน และโคพอลิเมอร์เอทิลีนโพรพิลีน ซึ่งในการทดลองศึกษาอัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยมีการทดสอบทั้งเชิงสถิติและการทดสอบแบบไดนามิก พบว่าจากการทดลองที่อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่ต่างกัน โพลีโพรพิลีน ภายใต้การศึกษาในการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเครียดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของอัตราความเค้นที่มีผลต่ออัตราความเครียด การเพิ่มขึ้นนี้เน้นที่อัตราความเครียดสูง ซึ่งโพรพิลีนเอทิลีน-โพรพิลีนโคพอลิเมอร์มีค่าความเค้นของแรงกด ความไวต่อความเครียดและอุณหภูมิต่ำกว่า พอลิโพรพิลีน ซึ่งในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าบาร์ Hopkinson เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการตรวจสอบความเค้นของโพลีโพรพิลีนที่อัตราความเครียดสูง ซึ่งเมื่อมีความผันแปรของอุณหภูมิเกิดขึ้นสามารถอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับอุณหภูมิและอัตราความเครียดได้อย่างสมบูรณ์

R. Sánchez et al. [15] ในงานวิจัยนี้พบว่าเวลาในการทำความเย็นเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่จะช่วยลดการโก่งของชิ้นงาน ส่วนอุณหภูมิหลอมละลายมีความสำคัญน้อยมากและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นนั้นไม่มีความสำคัญสำหรับแม่พิมพ์สไลด์เย็นผ้า แต่ในการทดลองมีความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับรูปทรงที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะเป็นปรากฏการณ์ที่ผู้วิจัยก็ไม่ได้คาดคิด ซึ่งต้องใช้การวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบของการย่ำ (Pack-ing) ซึ่งไม่ได้มีการพิจารณาในบทความนี้

M. D. Azaman et al. [16] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวและการเสีรูปของวัสดุผสมโพลิเมอร์ลิกโนเซลลูโลส (พอลิพรพิลีน (PP) + ไม้ ร้อยละ 50%) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการกระจายตัวของปริมาตรการหดตัวมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าการโก่งของชิ้นงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์และความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปในช่วงเวลาภายหลังการเติมเต็มแบบมีผลต่อการหดตัวและการยุบตัวมากที่สุด ในขณะที่เวลาในการทำความเย็นและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปในช่วงเวลาภายหลังการเติมเต็มแบบมีผลน้อย อย่างไรก็ตามควรให้เวลาในการทำความเย็นที่เหมาะสมและเวลาการย่ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ช่วงที่เหมาะสมคือ 40-45 องศาเซลเซียสสำหรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 20-30 วินาทีสำหรับเวลาระบายความร้อน 0.85 และ 15-20 วินาที สำหรับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปในช่วงเวลาภายหลังการเติมเต็ม

X. P. Dang [17] บทความนี้จะทบทวนสถานะของกระบวนการฉีดขึ้นรูป การมีอยู่ของวิธีการและเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีวิธีที่สมบูรณ์แบบในการแก้ปัญหาการปรับแก้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามกรอบการใช้งานและแนวทางที่เหมาะสมสามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดได้ เราได้นำเสนอสองกรอบการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์รวมทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงตัวเลขโดยตรงและการเพิ่มประสิทธิภาพตาม Meta Model โครงร่างที่เสนอคือระบบทั่วไป แต่ยืดหยุ่นมาก การเลือกใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ Meta Model และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับลักษณะการขึ้นรูปของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ประสบการณ์และเครื่องมือที่มีอยู่ของนักออกแบบวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในงาน การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองในการฉีดขึ้นรูป กรอบการทำงานที่เร่งกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพและเชื่อมต่อเครื่องมือจำลองของ CAE ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและเครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างเป็นระบบ กระบวนการปรับแต่งจะดำเนินการโดยอัตโนมัติ จากการสำรวจข้อดีข้อด้อยและขอบเขตของการประยุกต์ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพรวมทั้งผลการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยตรงของ GA เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาต้นทุนจำลองต่ำหรือ ส่วนแม่พิมพ์ง่าย งานวิจัยนี้ส่วนใหญ่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลอง อย่างไรก็ตามมีช่องว่างระหว่างการจำลองและการทดสอบทางกายภาพเนื่องจากข้อ จำกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์เทคนิคการจำลองและการทำให้

เข้าใจง่ายและข้อผิดพลาดโดยประมาณ ดังนั้นผลลัพธ์การเพิ่มประสิทธิภาพการจำลองแบบสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและควรได้รับการยืนยันในรูปแบบการฉีดขึ้นรูปจริง นอกจากนี้จะใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพใหม่ๆ และการตรวจสอบร่วมกับกรอบการเพิ่มประสิทธิภาพที่เสนอ จะมีการศึกษากรณีศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ซับซ้อนเพื่อให้ได้แนวทางที่เฉพาะเจาะจงมาก

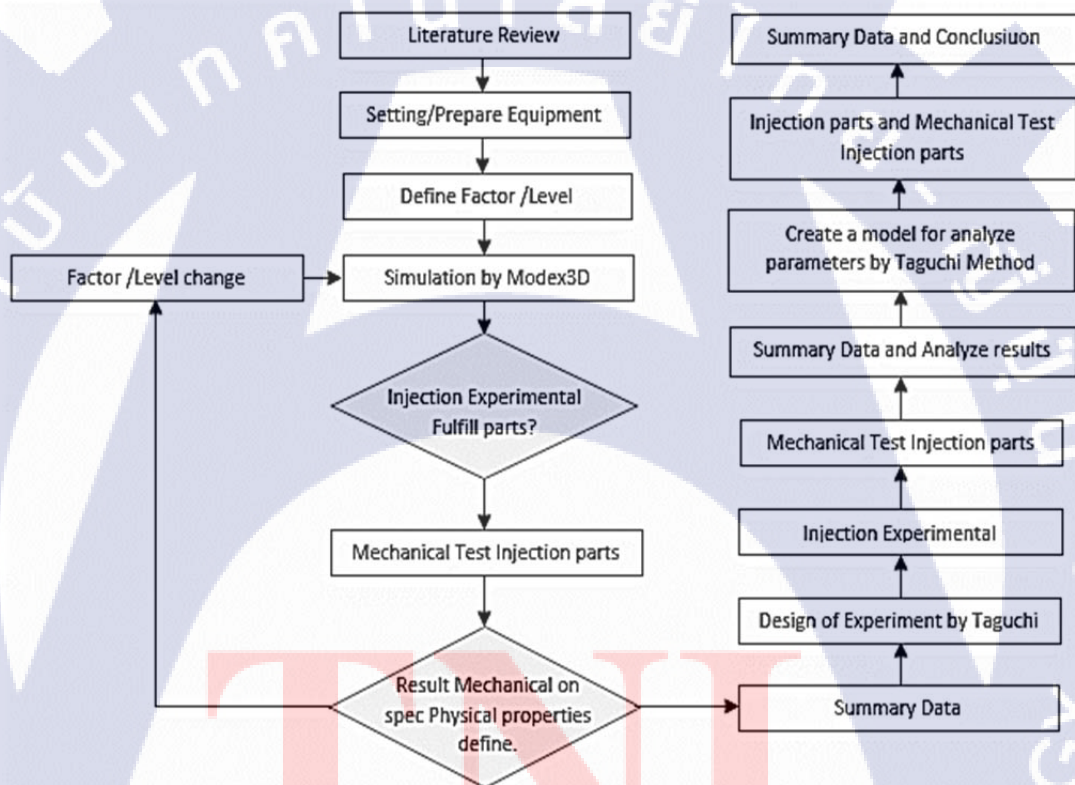


บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลองในรูปแบบของกรณีศึกษาสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานฉีดพลาสติกโพลีเอทิลีน เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ และเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดพลาสติกและสามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่อุตสาหกรรมการผลิตจริงได้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการตามขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการวิจัย

3.2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1.1 โปรแกรม Moldex3D R14 และโปรแกรม CATIA สำหรับจำลองการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1.2 โปรแกรม Minitab สำหรับคำนวณข้อมูลทางสถิติและพล็อตกราฟพื้นผิวตอบสนองและเส้นโครงร่างของวิธีพื้นผิวตอบสนอง

3.2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุภายใต้การศึกษาคือโพรพิลีนเกรด 1100NK เป็นโพลีโพรพิลีน Homo-Polymer สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่จัดทำโดย บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) คุณสมบัติทั่วไปของ PP ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

Physical Properties	Standard	Unit	Value
Melt Flow Index (2.16 kg/230°C)	ASTM D1238	g/10 min.	11
Tensile Strength at Yield	ASTM D638	N/mm ²	33
Elongation at Yield	ASTM D638	%	30
Charpy Notched Impact Strength (at 23°C)	DIN 53453	mJ/m ²	3
Flexural Modulus (1% SECANT)	ASTM D790	MPa	1300
Rockwell Hardness	ASTM D785	R-Scale	105
Heat Distortion Temperature (Load 0.45 N/MM2)	ASTM D 648	°C	95

3.2.3 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.3.1 เครื่องฉีดพลาสติกชนิดฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine) ของบริษัท Toshiba รุ่น EC100S ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดพลาสติก Toshiba รุ่น EC100S

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย

รายการ	หน่วย	ค่าที่กำหนด
แรงปิดแม่พิมพ์	ตัน	100
ระยะไทด์บาร์ (กว้าง x ยาว)	มิลลิเมตร	460 x 410
ขนาดแผ่นแม่พิมพ์ (กว้าง x ยาว)	มิลลิเมตร	660 x 610
ระยะปิดแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	350
ความสูงแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	180 ~ 550
แรงกระทุ้งแม่พิมพ์	ตัน	3
ระยะกระทุ้งแม่พิมพ์	มิลลิเมตร	90
ความดันในการฉีด	เมกะปาสกาล	158 ~ 287
อัตราการฉีด	เซนติเมตร ³ /วินาที	76 ~ 557
ความเร็วในการฉีด	มิลลิเมตร/วินาที	200 ~ 350

3.2.3.2 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ S50C แสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับการคำนวณขนาดของแม่พิมพ์จะใส่เนื้อหาไว้ในส่วนของภาคผนวก

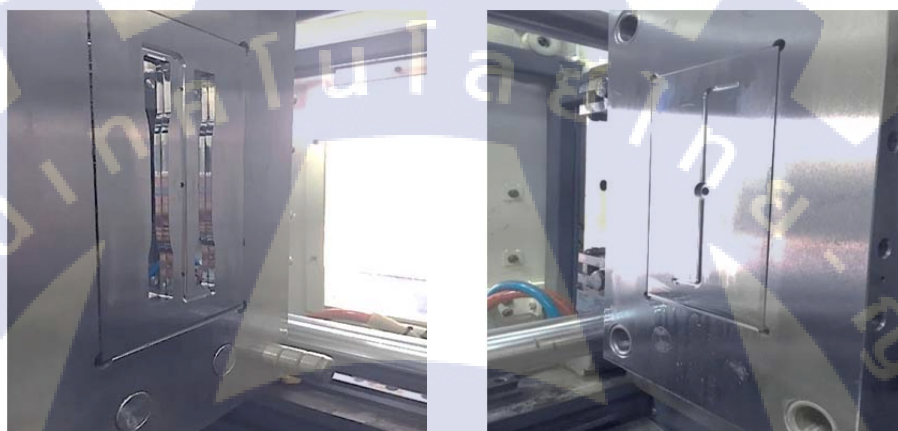
3.2.3.3 แม่พิมพ์อินเสิร์ตสำหรับขึ้นงานมาตรฐานสำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) สำหรับฟั้งคอร์และควาิตี้ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เป็นวัสดุ P20 แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

คุณสมบัติทางกายภาพ	หน่วย	อุณหภูมิ (°C)		
		20	100	200
ความหนาแน่น	กรัม/เซนติเมตร ³	7.8	-	-
การนำความร้อน	วัตต์/เมตร.องศาเซลเซียส	42.5	38.5	34.2
ความจุความร้อนจำเพาะ	จูล/กิโลกรัม.องศาเซลเซียส	0.48	-	-
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	10 ³ นิวตัน/มิลลิเมตร ²	210	-	-

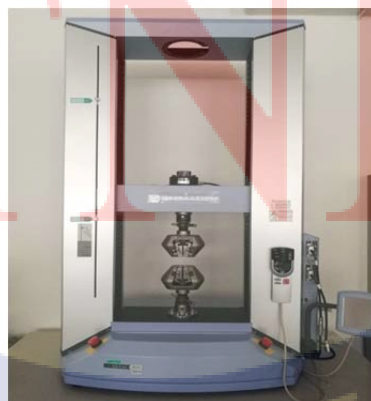
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของแม่พิมพ์อินเสิร์ต

คุณสมบัติทางกายภาพ	หน่วย	อุณหภูมิ (°C)	
		20	100
ความหนาแน่น	กรัม/เซนติเมตร ³	7.8	7.75
การนำความร้อน	วัตต์/เมตร.องศาเซลเซียส	29	29.5
ความจุความร้อนจำเพาะ	จูล/กิโลกรัม.องศาเซลเซียส	-	0.127
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	10 ³ นิวตัน/มิลลิเมตร ²	250	200



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์อินเสิร์ตฝังควาดี (ซ้าย) และคอร์ (ขวา)

3.2.3.4 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น AG - X 50 KN โหลดเซลล์ขนาด 50 kN โดยบริษัท Shimadzu



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

3.2.3.5 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Pendulum Impact Test) ขนาด Hummer

Load 21.6 J



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Pendulum Impact Test)

3.2.3.5 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Pendulum Impact Test) ขนาด Hummer

Load 21.6 J

3.2.3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test) XHRD-150



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test)

3.3 กระบวนการวิจัย

กระบวนการวิจัยของการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการฉีดพลาสติก PP มีระเบียบวิธีการวิจัย ดังแสดงหัวข้อต่อไปนี้

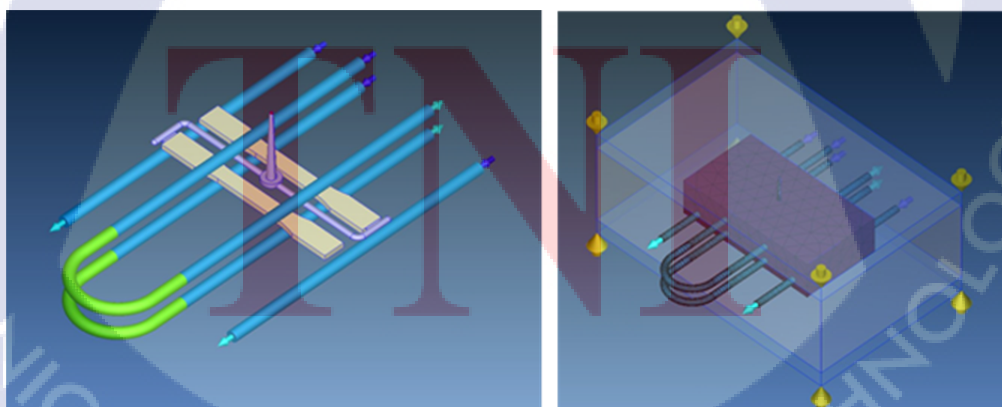
3.3.1 กระบวนการเตรียมการฉีดพลาสติก

3.3.1.1 การเตรียมเม็ดพลาสติกชนิดเอบีเอสประเภทที่ใช้ทำการทดลอง จำเป็นต้องมีการอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อกำจัดความชื้นให้หมดไปจากเม็ดพลาสติก

3.3.1.2 ติดตั้งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเข้ากับเครื่องฉีดพลาสติกและติดตั้งปลั๊กสำหรับรูหล่อเย็นที่ฝั่งคอร์และกระจายความร้อน และตรวจสอบให้มั่นใจว่าไม่มีจุดรอยรั่วของของไหลออกจากแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานและความปลอดภัย

3.3.1.3 ศึกษาวิธีการวัดค่าโดยอุปกรณ์การวัดเทอร์โมคัปเปิลและเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โดยให้ความร้อนติดตั้งไว้ที่แม่พิมพ์ฝั่งควิตี้ เพื่อทำการอุ่นแม่พิมพ์จนได้อุณหภูมิที่ต้องการและทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิแม่พิมพ์ในการฉีดขึ้นงานทุกครั้ง ในตำแหน่งของจุดที่เทอร์โมคัปเปิลและรูที่ให้ความร้อนจะอธิบายในส่วนของบทถัดไปและภาคผนวก

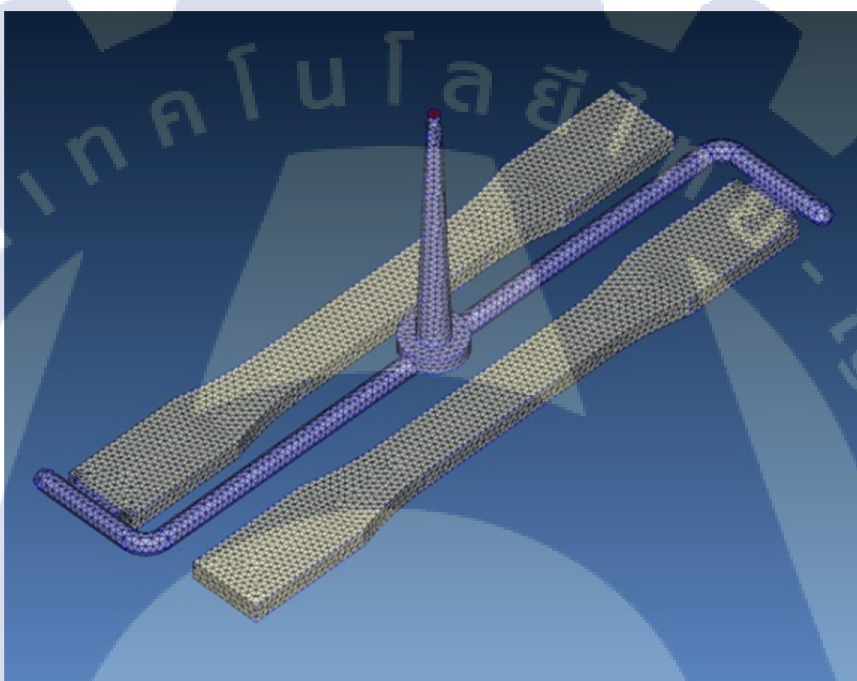
สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกได้ใช้กระบวนการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรมศาสตร์ที่มีชื่อว่า Moldex3D ดังแสดงดังรูปเพื่อหาค่าการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพื่อตรวจสอบว่าพลาสติกสามารถไหลเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ ปัญหาเรื่องคุณภาพของการก่อเกิดชิ้นที่ขึ้นงานในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่ การออกแบบทางเข้าต้องตรวจสอบความเค้นในการปลดชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 3.7 การจำลองการออกแบบท่อให้ความร้อนและหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

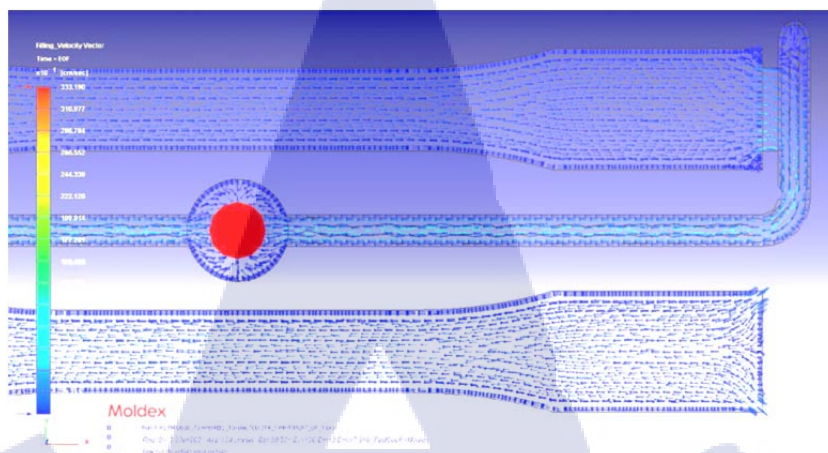
3.3.2 การจำลองด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

จากการออกแบบชิ้นงานจะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ (Moveable Side) มีชิ้นงานทั้งหมด 2 คาวิตี ชิ้นงานฉีดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง โดยมีทางวิ่ง (Runner) อยู่ระหว่างชิ้นงานทั้งสองและทางเข้า (Gate) ที่ปลายของชิ้นงานและมีตำแหน่งปลดกระทุ้งทั้งสอง จากรูปที่ 3.8 แสดงชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ออกแบบในโปรแกรม CAD ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CATIA ในส่วนของการคำนวณ และจำลองการสร้างเมชด้วยโปรแกรม Moldex3D R14 สำหรับรายละเอียดการออกแบบและภาพร่างจะใส่ในไว้ภาคผนวก



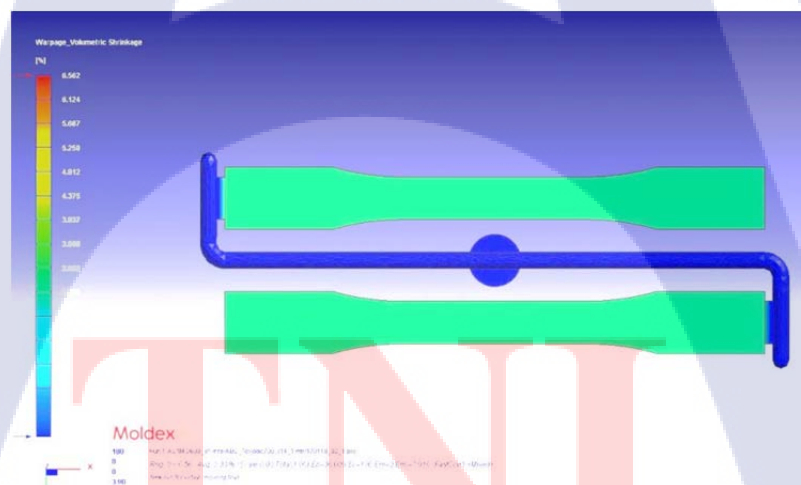
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานจากการออกแบบโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องฉีดพลาสติกก่อนที่จะทำการฉีดจริง ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Moldex3D R14 เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพในการไหลของพลาสติกหลอมเหลวว่าสามารถไหลได้เต็มเบ้าคาวิตีหรือไม่ รวมถึงลักษณะทิศทางการไหลที่ส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่ยอมรับให้เกิดรอยฉีกหรือรอยเชื่อมพลาสติกในชิ้นงานเกิดขึ้นได้ แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ทิศทางการไหลของพลาสติกหลอมเหลวในชิ้นงาน

สำหรับการหัดตัวตามแนวชิ้นงานจากโปรแกรมจำลองจะมีการหัดตัวหลังพลาสติกเย็นตัวลงแล้วประมาณ 1.7-2.6% สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งชิ้นงานมีความหนาทำให้มีการหัดตัวมากตามสัดส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก

การยืนยันผลการจำลองจากโปรแกรม Moldex3D โดยการนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการจำลองจากแบบจำลองมาทำการทดลองฉีดขึ้นส่วนจริง เพื่อตรวจสอบชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่สามารถยอมรับชิ้นงานที่ฉีดไม่เต็ม ชิ้นงานที่เกิดรอยฉีก รอยเชื่อมพลาสติกในชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ได้จากการฉีดจริงไม่พบข้อบกพร่องบนตัวชิ้นงาน และค่า

คุณสมบัติเชิงกลอยู่ในค่าที่กำหนด ซึ่งผู้วิจัยจะนำพารามิเตอร์หลักไปออกแบบการทดลองเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ในขั้นตอนต่อไป

3.3.3 การออกแบบการทดลอง

นำพารามิเตอร์หลักที่ได้จากการออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมจำลองโปรแกรม Moldex3D โดยกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุมทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.2 มาทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดและเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์หลักโดยใช้โปรแกรมจำลองโปรแกรม Moldex3D

Item No.	Factors	Value
1	Melt Temperature, A ($^{\circ}\text{C}$)	230
2	Mold Temperature, B ($^{\circ}\text{C}$)	20
3	Injection Speed, C (mm./sec.)	130
4	Injection Pressure, D (MPa)	60
5	Holding Pressure, E (MPa)	35

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง 5 ปัจจัย 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งถ้าใช้การทดลองแบบ Full Factorial design จะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 243$ การทดลอง ซึ่งต้องสูญเสียวัตถุดิบในการทดลองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและลดการสูญเสียวัตถุดิบจึงต้องลดจำนวนครั้งในการทดลอง วิธีการทางสถิติจึงถูกนำมาใช้สำหรับการทดลองซึ่งการศึกษานี้เลือกอาร์เรย์ L27 orthogonal โดยการทดลองได้ดำเนินการกับพารามิเตอร์การประมวลผลที่ควบคุมได้สามระดับห้าปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์, อุณหภูมิหลอมละลาย, ความเร็วในการฉีด, ความดันการฉีด และแรงดันฉีดย้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array L27

ตารางที่ 3.6 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

Item No.	Factors	Level 1	Level 2	Level 3
1	Melt Temperature, A (°C)	220	230	240
2	Mold Temperature, B (°C)	10	20	30
3	Injection Speed, C (mm./sec.)	60	130	200
4	Injection Pressure, D (MPa)	50	60	70
5	Holding Pressure, E (MPa)	20	35	50

ตารางที่ 3.7 แผนการทดลอง Orthogonal Array L27

Parameters	Melt Temperature	Mold Temperature	Injection Speed	Injection Pressure	Holding Pressure
Unit	(°C)	(°C)	mm./sec.	MPa	MPa
1	220	10	20	50	30% (60)
2	220	10	20	50	65%(130)
3	220	10	20	50	100%(200)
4	220	20	35	60	30% (60)
5	220	20	35	60	65%(130)
6	220	20	35	60	100%(200)
7	220	30	50	70	30% (60)
8	220	30	50	70	65%(130)
9	220	30	50	70	100%(200)
10	230	10	35	70	30% (60)
11	230	10	35	70	65%(130)
12	230	10	35	70	100%(200)
13	230	20	50	50	30% (60)
14	230	20	50	50	65%(130)
15	230	20	50	50	100%(200)
16	230	30	20	60	30% (60)
17	230	30	20	60	65%(130)
18	230	30	20	60	100%(200)

ตารางที่ 3.7 แผนการทดลอง Orthogonal Array L27 (ต่อ)

Parameters	Melt Temperature	Mold Temperature	Injection Speed	Injection Pressure	Holding Pressure
Unit	(°C)	(°C)	mm./sec.	MPa	MPa
19	240	10	50	60	30% (60)
20	240	10	50	60	65%(130)
21	240	10	50	60	100%(200)
22	240	20	20	70	30% (60)
23	240	20	20	70	65%(130)
24	240	20	20	70	100%(200)
25	240	30	35	50	30% (60)
26	240	30	35	50	65%(130)
27	240	30	35	50	100%(200)

จากแผนการทดลองผู้วิจัยจะนำแผนการทดลองที่ได้ไปทำการทดสอบเพื่อทำการฉีดขึ้นงานจริง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเพื่อนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ของแต่ละการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.3.4 การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานโพลีฟอสฟิน

ผู้วิจัยได้นำค่าจากการออกแบบการทดลองมาปรับตั้งค่าการฉีดจริงที่หน้าเครื่องฉีดพลาสติก

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์การทดลองกระบวนการฉีด

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ฉีด
เวลาการฉีดเต็มแบบ (วินาที)	0.5
ตำแหน่งเปลี่ยนความดันฉีด (วินาที)	32.5
ความดันฉีด (เมกะปาสกาล)	33
เวลาการฉีด (วินาที)	3
ความเร็วฉีด (มิลลิเมตร/วินาที)	32.5

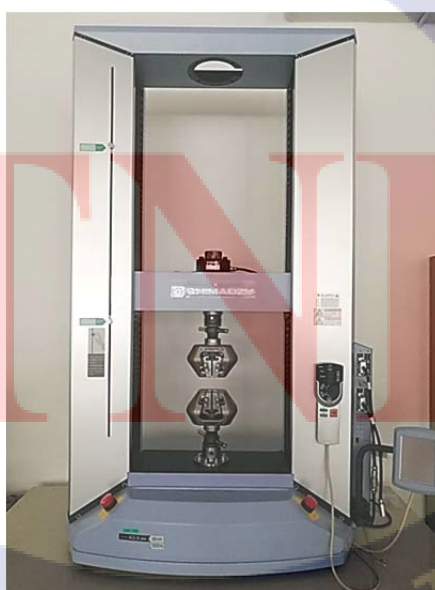
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์การทดลองกระบวนการฉีด (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ฉีด
เวลาหล่อเย็น (วินาที)	20 - 35
ความดันฉีด (เมกะปาสกาล)	150
อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด (องศาเซลเซียส)	43.18 – 76.82
ความเร็วฉีด (มิลลิเมตร/วินาที)	133.18 – 166.81
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	223.18 – 256.81

3.4 วิธีดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

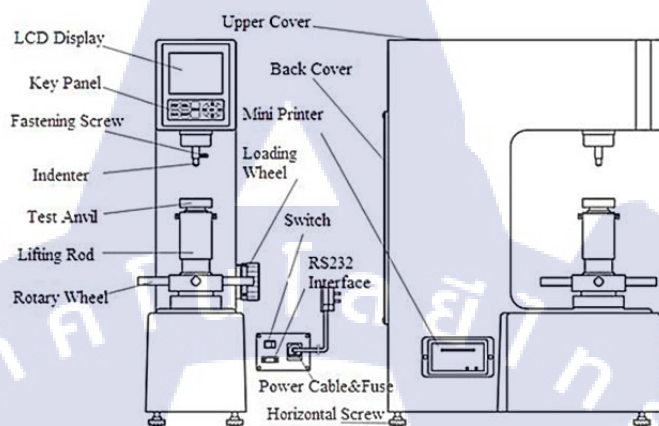
หลังจากทดลองฉีดชิ้นงานจริงทั้งพารามิเตอร์หลักและตามแผนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ผู้วิจัยจะปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวเป็นเวลาหนึ่งวัน หลังจากนั้นผู้วิจัยจะนำชิ้นงานที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) โดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาดโหลดเซลล์ 50 kN บริษัท Shimadzu ในการทดลองนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-10 โดยชิ้นส่วนที่ใช้ในการทดสอบเป็น ประเภทที่ 1 ความหนาชิ้นงานประมาณ 3.2 mm. ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อ หาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ค่ามอดูลัสยัง (Young's Modulus) และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation)



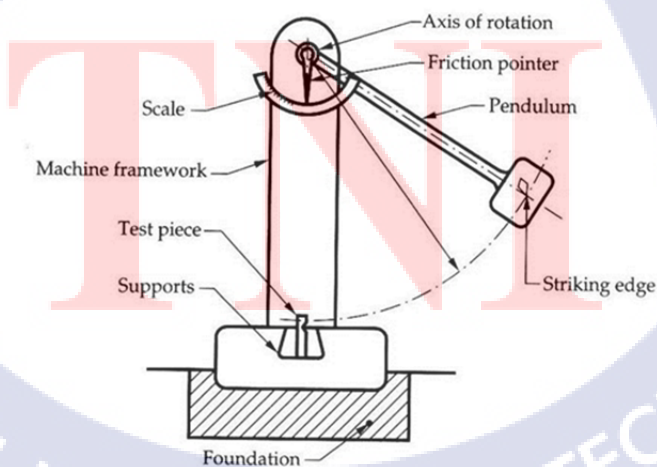
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

2. การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ในการทดสอบนี้จะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing Machine) โดยใช้หัวกดแบบ Shore D 5 จุดต่อชิ้นงาน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240-05



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing Machine)

3. การทดสอบแรงกระแทกจะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine) แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 โดยชิ้นทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 63.5 mm. x 12.7 mm. ความหนา 3.2 mm. รอยบากลึก (Notched) 2.54 mm. ภาระที่ใช้ (Energy Load) 2.7 J ที่อุณหภูมิ 25°C ในการหาค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength)



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine)

3.5 ผลการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้จากพารามิเตอร์หลักสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรมจำลอง Moldex3D

พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง					ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล		
อุณหภูมิหลอมละลาย	อุณหภูมิแม่พิมพ์	ความเร็วในการฉีด	ความดันการฉีด	แรงดันฉีด	ผลการทดสอบแรงกระแทก	ผลการทดสอบแรงกด	ผลการทดสอบแรงดึง
°C	°C	mm./sec.	MPa	MPa	KJ/m ²	R-Scale	N
230	20	130	60	35	4.5	117.5	2,109.87

แผนการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ การทดลองได้ดำเนินการกับพารามิเตอร์การประมวลผลที่ควบคุมได้ 3 ระดับ 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์, อุณหภูมิหลอมละลาย, ความเร็วในการฉีด, ความดันการฉีด และแรงดันฉีด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผนการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ 27 การทดลอง

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิหลอมละลาย	อุณหภูมิแม่พิมพ์	ความเร็วในการฉีด	ความดันการฉีด	แรงดันฉีด	ผลการทดสอบแรงกระแทก	ผลการทดสอบแรงกด	ผลการทดสอบแรงดึง
หน่วย	°C	°C	mm./sec.	MPa	MPa	KJ/m ²	R-Scale	N
1	220	10	20	50	60	3.8	116.4	2004.22
2	220	10	20	50	130	4.2	117.3	2054.92
3	220	10	20	50	200	3.8	118.2	2058.41
4	220	20	35	60	60	4.3	117.9	1987.39
5	220	20	35	60	130	4	116.9	2097.97
6	220	20	35	60	200	4.5	117.7	2069.26
7	220	30	50	70	60	4.0	118.4	2123.96
8	220	30	50	70	130	3.8	117.4	2123.42
9	220	30	50	70	200	4.0	116.6	2087.52
10	230	10	35	70	60	3.8	117.8	2226.73
11	230	10	35	70	130	3.8	118.2	2100.87
12	230	10	35	70	200	4.2	118.7	2134.81
13	230	20	50	50	60	4.8	118.3	2256.65

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผนการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ 27 การทดลอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิหล่อละลาย	อุณหภูมิแม่พิมพ์	ความเร็วในการฉีด	ความดันการฉีด	แรงดันฉีด	ผลการทดสอบแรงกระแทก	ผลการทดสอบแรงกด	ผลการทดสอบแรงดึง
หน่วย	°C	°C	mm./sec.	MPa	MPa	KJ/m ²	R-Scale	N
14	230	20	50	50	130	4.3	117.9	2240.70
15	230	20	50	50	200	3.8	119	2253.45
16	230	30	20	60	60	4.8	118.5	2178.66
17	230	30	20	60	130	4.0	117.3	2223.30
18	230	30	20	60	200	4.6	118.1	2134.81
19	240	10	50	60	60	4.3	117.9	2227.63
20	240	10	50	60	130	5.0	118.6	2275.73
21	240	10	50	60	200	4.8	118.1	2264.89
22	240	20	20	70	60	4.3	118.4	2224.10
23	240	20	20	70	130	5.0	119.1	2284.13
24	240	20	20	70	200	4.8	118.6	2267.57
25	240	30	35	50	60	4.8	118.3	2250.99
26	240	30	35	50	130	5.0	117.6	2213.54
27	240	30	35	50	200	4.3	118.2	2240.70

จากผลการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งในบทถัดไปเป็นการสรุปผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab R17 มาช่วยในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลในการวิจัยนี้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้อภิปรายผลการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองแบบ ได้แก่ ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองโปรแกรม Moldex3D R14 และผลการทดลองจากแผนการทดลองโดยวิธีทางสถิติซึ่งในการออกแบบการทดลองกำหนดปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์, อุณหภูมิหลอมละลาย, ความเร็วในการฉีด, ความดันการฉีด และแรงดันฉีดอัด สามารถทำการสรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

- ผลจากระบวนการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D
- ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยวิธีการทางสถิติ
- การวิเคราะห์การทดลอง

4.1 ผลจากระบวนการจำลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D

กระบวนการจำลองผลลัพธ์และการวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D สามารถช่วยตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้สำหรับการปรับกระบวนการให้เหมาะสมพารามิเตอร์ต้องทำงานในระดับที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองโปรแกรม Moldex3D และจากผลการทดลองฉีดขึ้นงานจริงเพื่อยืนยันพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองพบว่าขึ้นงานไม่พบข้อบกพร่อง ขึ้นงานฉีดเต็ม ไม่พบรอยเชื่อมที่ขึ้นงาน เมื่อนำขึ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์โปรแกรมจำลอง Moldex3D ไปทดสอบสมบัติเชิงกลของขึ้นงานพบว่าผลการทดสอบความเครียดสูงสุดเท่ากับ 35.16 N/mm^2 ผลการทดสอบแรงกระแทกคือ 4.5 KJ/mm^2 และผลการทดสอบความแข็ง 117.5 R-Scale จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลอยู่ในค่าที่ผู้วิจัยกำหนดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากระบวนการจำลอง

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์
อุณหภูมิหลอมละลาย	230°C
อุณหภูมิแม่พิมพ์	20°C
แรงดันฉีดอัด	35 MPa
ความดันฉีด	60 MPa
ความเร็วฉีด	130 มม./วินาที

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

สมบัติเชิงกล	ค่าสมบัติเชิงกล
Tensile Strength at Yield (N/mm^2)	34.16
Charpy Notched Impact Strength (KJ/mm^2)	4.5
Rockwell Hardness (R-Scale)	117.5

พารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองดังตารางที่ 4.1 ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ดังนั้นพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.2 ได้ถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์หลักเพื่อออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองไปทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

4.2 ผลการทดลองโดยวิธีการทากูชิ

เมื่อนำพารามิเตอร์หลักมาออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิ ซึ่งมีปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย 3 ระดับรวมทั้ง 27 การทดลอง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ใช้พารามิเตอร์จากการออกแบบการทดลองทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยทดสอบกับชิ้นงานตัวอย่าง 3 ชิ้นต่อการทดสอบเพื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและปัจจัยการขึ้นรูป หลังจากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำผลการทดลองนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) จากนั้นหาค่า SN (Signal to Noise) หรือ อัตราส่วนของค่าเฉลี่ย (Signal) ต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ในการวิเคราะห์นั้นได้เลือกใช้สมการที่คำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (S/N Ratio) ตามวัตถุประสงค์ของระบบคุณภาพคือค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better) เพื่อหาสมบัติเชิงกลมากที่สุด ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด โหลดเซลล์ 5 kN ที่อุณหภูมิห้อง จากค่าทดสอบแรงดึงสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) เพื่อนำมาหาค่า SN (Signal to Noise) ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังในตารางที่ 4.3

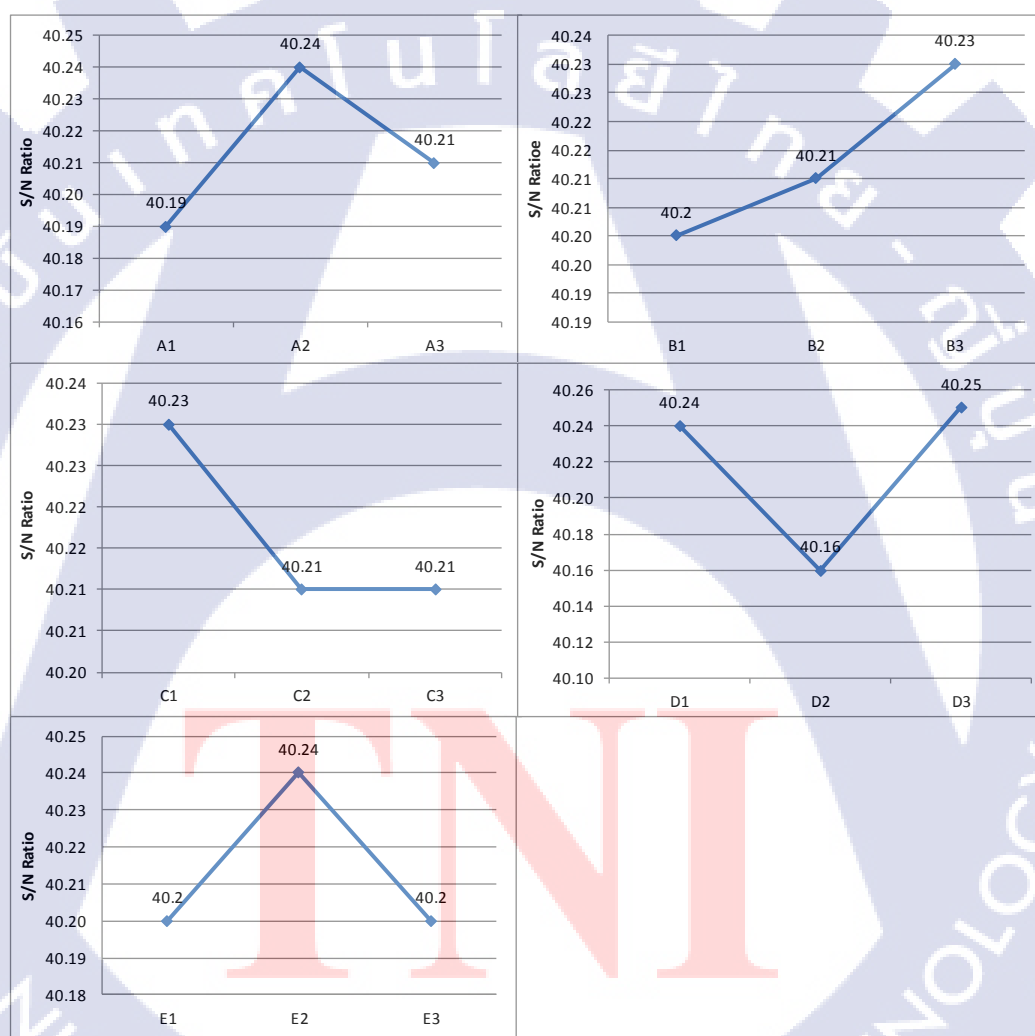
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน

ลำดับการ ทดลอง	A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	Signal to Noise (SN)
1	220	10	20	50	60	34.25	0.08	40.242
2	220	10	20	60	130	34.31	0.24	40.227
3	220	10	20	70	200	33.93	0.05	40.152
4	220	20	35	50	60	33.79	0.17	40.125
5	220	20	35	60	130	33.78	0.22	40.094
6	220	20	35	70	200	34.01	0.23	40.170
7	220	30	50	50	60	34.15	0.09	40.202
8	220	30	50	60	130	34.37	0.23	40.245
9	220	30	50	70	200	34.36	0.24	40.246
10	230	10	50	70	60	34.31	0.33	40.227
11	230	10	50	50	130	34.43	0.09	40.283
12	230	10	50	60	200	34.41	0.09	40.270
13	230	20	35	50	60	34.36	0.24	40.246
14	230	20	35	60	130	34.24	0.02	40.235
15	230	20	35	70	200	34.43	0.09	40.287
16	230	30	20	70	60	34.11	0.49	40.156
17	230	30	20	60	130	34.4	0.15	40.261
18	230	30	20	50	200	34.22	0.1	40.237
19	240	10	35	50	60	34.2	0.03	40.226
20	240	10	35	60	130	34.29	0.05	40.244
21	240	10	35	70	200	32.85	0.44	39.917
22	240	20	50	60	60	34.28	0.69	40.198
23	240	20	50	70	130	34.45	0.44	40.288
24	240	20	50	50	200	34.38	0.13	40.275
25	240	30	20	50	60	34.32	0.38	40.217
26	240	30	20	60	130	34.41	0.42	40.259
27	240	30	20	70	200	34.43	0.03	40.283

จากนั้นนำค่า SN (Signal to Noise) ของค่าทดสอบแรงดึงที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.3 ซึ่งสามารถหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึง

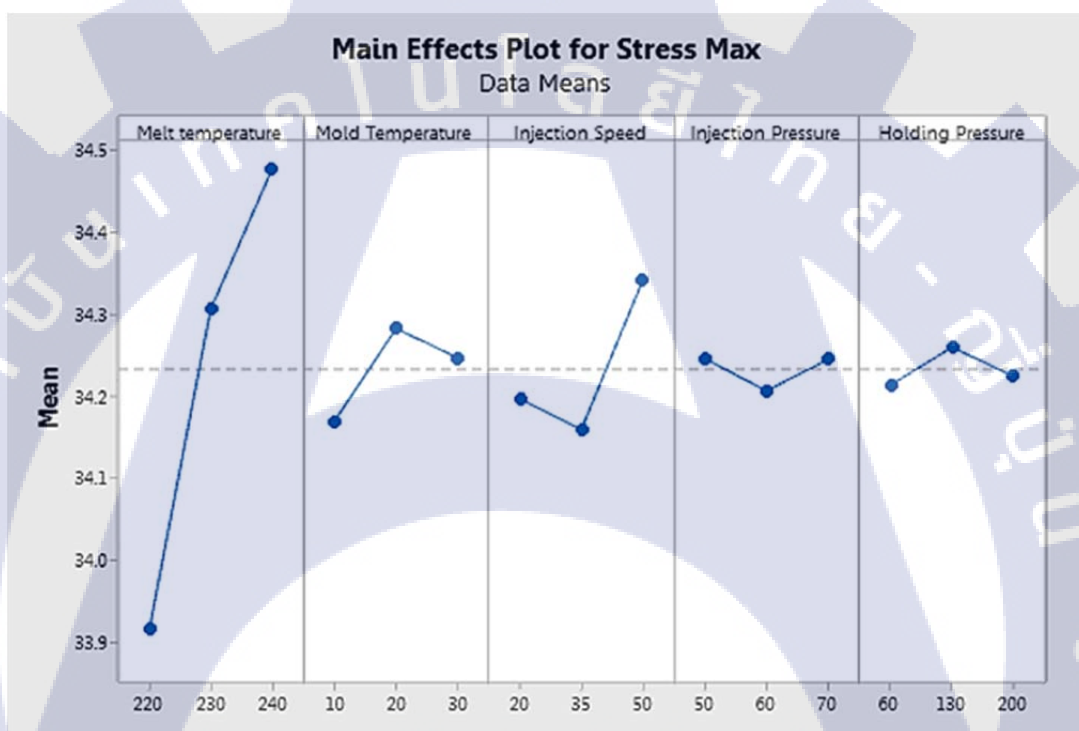
Level	A	B	C	D	E
1	40.19	40.20	40.23	40.24	40.20
2	40.24	40.21	40.21	40.16	40.24
3	40.21	40.23	40.21	40.25	40.20
Δ	0.055	0.035	0.021	0.090	0.033
Rank	2	3	5	1	4



รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่า SN

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่า SN โดยหาผลต่างของ SN มากที่สุดกับน้อยที่สุดแต่ละปัจจัยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดของการทดสอบแรงดึง คือ ความดันการฉีด ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิหลอมละลาย อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันย้ำ และความเร็วในการฉีด ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ และสร้างกราฟเพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่า SN ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 คือ ผลกระทบของค่าความไวต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของพารามิเตอร์



รูปที่ 4.2 กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวม

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.2 สามารถพิจารณาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

1. อุณหภูมิหลอมละลาย พบว่าที่อุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น โดยที่ระดับอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงดึงมากที่สุด
2. อุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 10-20 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น แต่ที่ระดับอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันลง โดยระดับอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงดึงมากที่สุด

3. ความเร็วในการฉีดยา พบว่าที่ระดับความเร็ว 20-35 mm/sec กราฟมีลักษณะชันลง และกราฟจะชันขึ้นที่ระดับความเร็ว 35-50 mm/sec โดยระดับความเร็วที่ 50 mm/sec จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงดึงมากที่สุด

4. แรงดันในการฉีดยา พบว่าที่ระดับแรงดัน 50-60 MPa กราฟมีลักษณะชันลง แต่ระดับแรงดันที่ 60-70 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น โดยระดับแรงดันที่ 70 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงดึงมากที่สุด

5. แรงดันยา พบว่าที่ระดับแรงดันยา 60-130 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น แต่ระดับแรงดันยา 130-200 MPa กราฟมีลักษณะชันลง โดยระดับแรงดันยา 130 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงดึงมากที่สุด

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.2 สามารถเลือกกระดပ်ปัจจัยได้ A3 B2 C3 D3 E2

นำผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากตารางที่ 4.4 มาหาค่าที่เหมาะสมตามกรณี ซึ่งผลการทำนายพบว่า

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\text{opt}} - m] &= (A3-m) + (B2-m) + (C3-m) + (D3-m) + (E2-m) \\
 &= (40.21-40.22) + (40.21-40.22) + (40.21-40.22) + \\
 &\quad (40.25-40.22) + (40.20-40.22) \\
 &= (-0.01) + (-0.01) + (-0.01) + 0.03 + (-0.02) \\
 &= -0.02 \\
 Y_{\text{optimal}} &= 40.22 - 0.02 = 40.20
 \end{aligned}$$

การทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming/Predicted) แผนการทดลอง A3 B2 C3 D3 E2 ผู้วิจัยนำมาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองซึ่งได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง

Trial	A	B	C	D	E	ผลลัพธ์
1	240	20	50	70	130	40.19
2	240	20	50	70	130	40.18
3	240	20	50	70	130	40.24

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากการควบคุมกระบวนการฉีดและผู้ปฏิบัติงานในการทำการทดลองจึงทำให้ค่าที่ได้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง

4.2.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

ผลลัพธ์ที่ได้มาจากการนำชิ้นงานมาทดสอบแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบ Pendulum Impact Tester (PIT) Hummer 21.6 J ตามมาตรฐานการทดสอบ DIN 53453 ซึ่งผลการทดสอบแรงกระแทกสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อนำมาหาค่า SN (Signal to Noise) ซึ่งผลการทดสอบแรงกระแทกแสดงดังในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ลำดับการทดลอง	A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	Signal to Noise (SN)
1	220	10	20	50	60	3.7	0.2	20.787
2	220	10	20	60	130	4.0	0.1	21.578
3	220	10	20	70	200	3.8	0.1	21.034
4	220	20	35	50	60	4.2	0.1	22.002
5	220	20	35	60	130	4.0	0.1	21.608
6	220	20	35	70	200	3.8	0.2	21.186
7	220	30	50	50	60	4.1	0.1	21.793
8	220	30	50	60	130	3.7	0.1	20.900
9	220	30	50	70	200	3.9	0.2	21.108
10	230	10	50	70	60	4.0	0.2	21.586
11	230	10	50	50	130	4.3	0.1	22.229
12	230	10	50	60	200	4.2	0.2	22.051
13	230	20	35	50	60	4.7	0.2	22.882
14	230	20	35	60	130	4.2	0.1	22.025
15	230	20	35	70	200	4.7	0.1	22.980
16	230	30	20	70	60	4.7	0.2	22.822
17	230	30	20	60	130	4.1	0.2	21.857
18	230	30	20	50	200	4.4	0.2	22.394
19	240	10	35	50	60	4.5	0.2	22.589
20	240	10	35	60	130	4.9	0.2	23.305

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงกระแทก (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	Signal to Noise (SN)
21	240	10	35	70	200	4.7	0.1	22.960
22	240	20	50	60	60	4.2	0.1	22.098
23	240	20	50	70	130	5.0	0.2	23.591
24	240	20	50	50	200	4.6	0.2	22.872
25	240	30	20	50	60	4.6	0.2	22.830
26	240	30	20	60	130	5.0	0.2	23.381
27	240	30	20	70	200	4.4	0.2	22.444

จากนั้นนำค่า SN (Signal to Noise) ของค่าทดสอบแรงกระแทกที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.7 ซึ่งสามารถหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทก

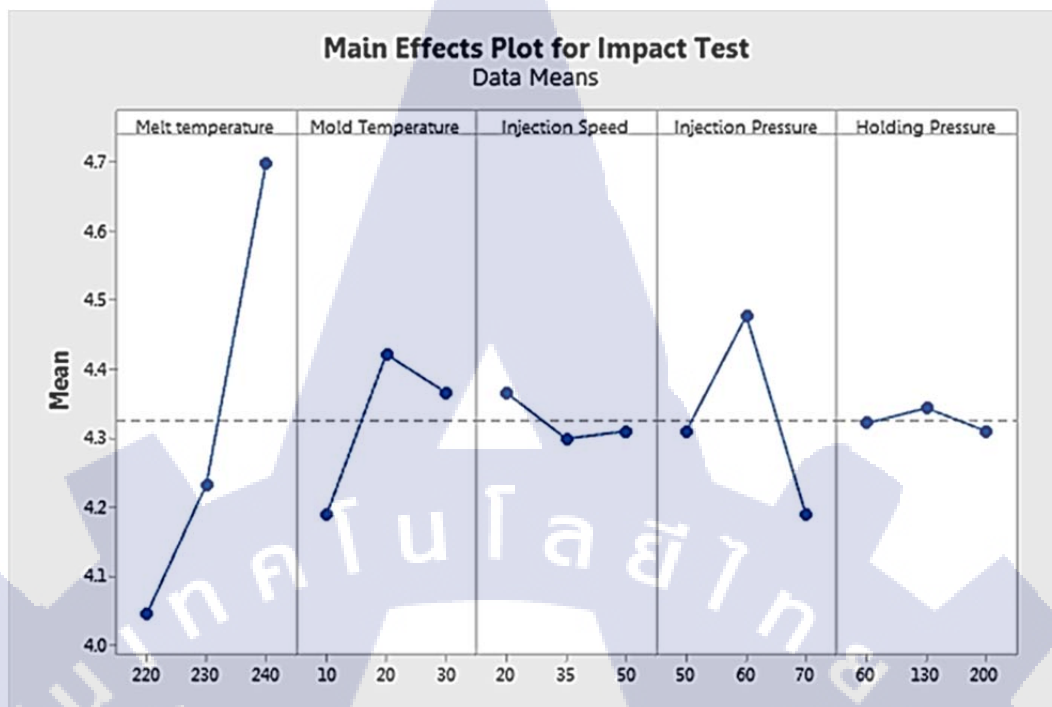
Level	A	B	C	D	E
1	21.33	22.01	22.11	22.22	22.15
2	22.31	22.36	22.15	22.30	22.27
3	22.90	22.17	22.28	22.03	22.11
Δ	1.564	0.347	0.168	0.277	0.161
Rank	1	2	4	3	5

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าแรงกระแทกจากค่า SN โดยหาผลต่างของ SN มากที่สุดกับน้อยที่สุดแต่ละปัจจัยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดของการทดสอบแรงดึง คือ อุณหภูมิหลอมละลาย ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันการฉีด ความเร็วในการฉีด และแรงดันย้า ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ และสร้างกราฟเพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 คือผลกระทบของค่าความไวต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของพารามิเตอร์ซึ่งค่าอัตราส่วนของ S/N ที่มีขนาดมากกว่าจะมีผลกระทบในการปรับค่าพารามิเตอร์มากกว่า S/N ที่มีขนาดน้อย



รูปที่ 4.3 กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทกจากค่า SN



รูปที่ 4.4 กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทกจากค่าเฉลี่ยรวม

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงกระแทกจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.4 สามารถพิจารณาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

1. อุณหภูมิหลอมละลาย พบว่าที่อุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น โดยที่ระดับอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงกระแทกมากที่สุด
2. อุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 10-20 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น แต่ที่ระดับอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันลง โดยระดับอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงกระแทกมากที่สุด
3. ความเร็วในการฉีด พบว่าที่ระดับความเร็ว 20-35 mm/sec กราฟมีลักษณะชันลง และกราฟจะชันขึ้นที่ระดับความเร็ว 35-50 mm/sec โดยระดับความเร็วที่ 20 mm/sec จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงกระแทกมากที่สุด
4. แรงดันในการฉีด พบว่าที่ระดับแรงดัน 50-60 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น แต่ระดับแรงดันที่ 60-70 MPa กราฟมีลักษณะชันลง โดยระดับแรงดันที่ 60 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงกระแทกมากที่สุด

5. แรงดันย่ำ พบว่าที่ระดับแรงดันย่ำ 60-130 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น แต่ระดับแรงดันย่ำ 130-200 MPa กราฟมีลักษณะชันลง โดยระดับแรงดันย่ำ 130 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าแรงกระแทกมากที่สุด

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.4 สามารถเลือกระดับปัจจัยได้ A3 B2 C1 D2 E2

นำผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากตารางที่ 4.7 มาหาค่าที่เหมาะสมตามกรณี ซึ่งผลการทำนายพบว่า

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\text{opt}} - m] &= (A3-m) + (B2-m) + (C1-m) + (D2-m) + (E2-m) \\
 &= (22.90-22.26) + (22.36-22.26) + (22.11-22.26) + \\
 &\quad (22.30-22.26) + (22.27-22.26) \\
 &= 0.64 + 0.10 + (-0.15) + 0.04 + 0.01 \\
 &= 0.64 \\
 Y_{\text{optimal}} &= 22.26 - 0.64 = 21.62
 \end{aligned}$$

การทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming/Predicted)

แผนการทดลอง A3 B2 C1 D2 E2 ผู้วิจัยนำมาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองซึ่งได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง

Trial	A	B	C	D	E	ผลลัพธ์
1	240	20	20	60	130	22.45
2	240	20	20	60	130	22.37
3	240	20	20	60	130	22.63

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการควบคุมกระบวนการฉีดและผู้ปฏิบัติงานในขณะที่ทำการทดลองจึงทำให้ค่าที่ได้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงแตกต่างกัน

4.2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ผลลัพธ์ที่ได้มาจากการนำชิ้นงานที่ทดสอบมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Rockwell Hardness Tester XHRD-150 ที่ 60 kgf แสดงจากค่าทดสอบความแข็งสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อนำมาหาค่า SN (Signal to Noise) ซึ่งผลการทดสอบความแข็งแสดงดังในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

ลำดับการ ทดลอง	A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	Signal to Noise (SN)
1	220	10	20	50	60	117.50	0.10	50.941
2	220	10	20	60	130	117.47	0.15	50.937
3	220	10	20	70	200	117.57	0.57	50.952
4	220	20	35	50	60	117.80	0.17	50.970
5	220	20	35	60	130	117.70	0.26	50.965
6	220	20	35	70	200	117.73	0.15	50.964
7	220	30	50	50	60	118.20	0.10	50.992
8	220	30	50	60	130	117.60	0.44	50.958
9	220	30	50	70	200	118.13	0.25	50.996
10	230	10	50	70	60	118.40	0.36	51.012
11	230	10	50	50	130	118.23	0.15	51.000
12	230	10	50	60	200	118.43	0.23	51.015
13	230	20	35	50	60	118.20	0.10	50.995
14	230	20	35	60	130	118.30	0.20	51.002
15	230	20	35	70	200	118.60	0.30	51.024
16	230	30	20	70	60	118.23	0.31	51.005
17	230	30	20	60	130	118.47	0.15	51.014
18	230	30	20	50	200	118.33	0.25	50.998
19	240	10	35	50	60	117.37	0.68	50.952
20	240	10	35	60	130	118.37	0.32	51.004
21	240	10	35	70	200	118.40	0.26	51.005
22	240	20	50	60	60	118.23	0.15	50.998
23	240	20	50	70	130	119.13	0.06	51.064
24	240	20	50	50	200	118.67	0.21	51.033

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	Signal to Noise (SN)
25	240	30	20	50	60	118.60	0.30	51.017
26	240	30	20	60	130	118.77	0.15	51.033
27	240	30	20	70	200	118.53	0.21	51.015

จากนั้นนำค่า SN (Signal to Noise) ของค่าทดสอบความแข็งแรงที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.10 ซึ่งสามารถหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

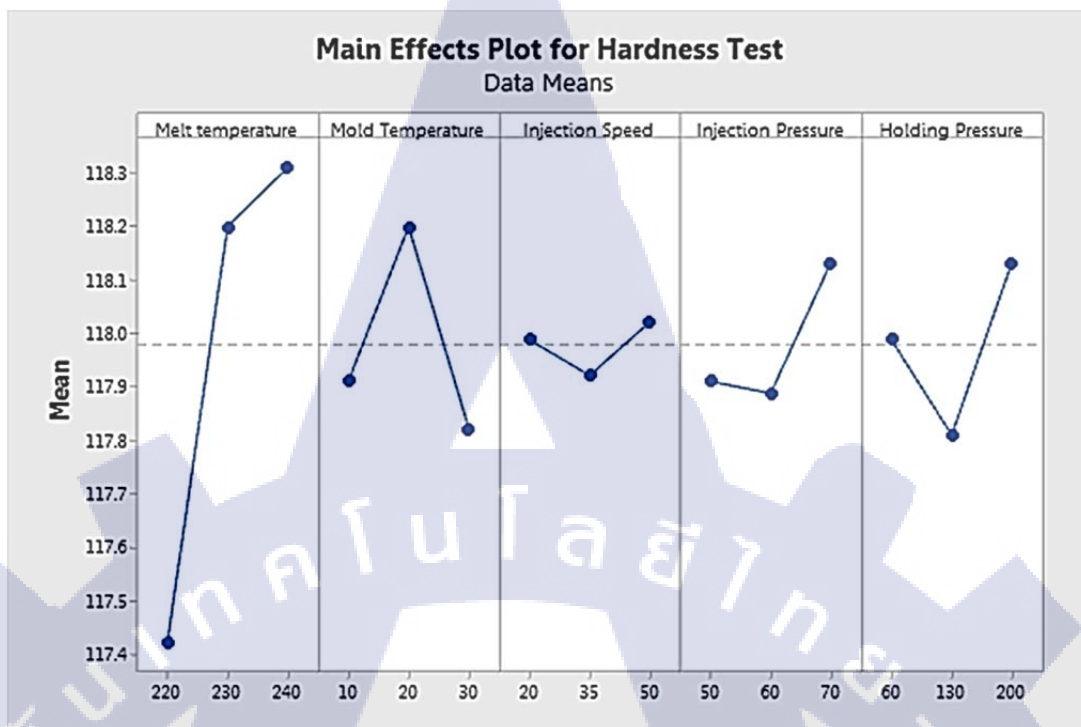
ตารางที่ 4.10 ผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งแรง

Level	A	B	C	D	E
1	50.96	50.98	50.99	50.99	50.99
2	51.01	51.00	51.00	50.99	51.00
3	51.01	51.00	50.99	51.01	51.00
Δ	0.049	0.023	0.007	0.021	0.013
Rank	1	2	5	3	4

จากผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ และสร้างกราฟเพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 คือผลกระทบของค่าความไวต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของพารามิเตอร์ซึ่งค่าอัตราส่วนของ S/N ที่มีขนาดมากกว่าจะมีผลกระทบในการปรับค่าพารามิเตอร์มากกว่า S/N ที่มีขนาดน้อย



รูปที่ 4.5 กราฟฟิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งแรงจากค่า SN



รูปที่ 4.6 กราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งจากค่าเฉลี่ยรวม

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบความแข็งจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.5 สามารถพิจารณาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

- อุณหภูมิหลอมละลาย พบว่าที่อุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น โดยที่ระดับอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าทดสอบความแข็งมากที่สุด
- อุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 10-20 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันขึ้น แต่ที่ระดับอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียสกราฟจะมีลักษณะชันลง โดยระดับอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสจะเป็นระดับที่ให้ค่าทดสอบความแข็งมากที่สุด
- ความเร็วในการฉีด พบว่าที่ระดับความเร็ว 20-35 mm/sec กราฟมีลักษณะชันลง และกราฟจะชันขึ้นที่ระดับความเร็ว 35-50 mm/sec โดยระดับความเร็วที่ 50 mm/sec จะเป็นระดับที่ให้ค่าทดสอบความแข็งมากที่สุด
- แรงดันในการฉีด พบว่าที่ระดับแรงดัน 50-60 MPa กราฟมีลักษณะชันลง แต่ระดับแรงดันที่ 60-70 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น โดยระดับแรงดันที่ 70 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าทดสอบความแข็งมากที่สุด

5. แรงดันย่ำ พบว่าที่ระดับแรงดันย่ำ 60-130 MPa กราฟมีลักษณะชันลง แต่ระดับแรงดันย่ำ 130-200 MPa กราฟมีลักษณะชันขึ้น โดยระดับแรงดันย่ำ 200 MPa จะเป็นระดับที่ให้ค่าทดสอบความแข็งแรงมากที่สุด

ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยค่าทดสอบความแข็งแรงจากค่า SN โดยหาผลต่างของ SN มากที่สุดกับน้อยที่สุดแต่ละปัจจัยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดของการทดสอบแรงดึง คือ อุณหภูมิหลอมละลาย ปัจจัยรองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันการฉีด แรงดันย่ำ และความเร็วในการฉีด ตามลำดับ

จากกราฟอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากค่าเฉลี่ยรวมดังรูปที่ 4.6 สามารถเลือกระดับปัจจัยได้ A3 B2 C3 D3 E3

นำผลการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของค่าทดสอบแรงดึงจากตารางที่ 4.10 มาหาค่าที่เหมาะสมตามกรณี ซึ่งผลการทำนายพบว่า

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\text{opt}} - m] &= (A3-m) + (B2-m) + (C3-m) + (D3-m) + (E3-m) \\
 &= (51.01-51.00) + (51.00-51.00) + (50.99-51.00) + \\
 &\quad (51.01-51.00) + (51.00-51.00) \\
 &= 0.01+0.00 + (-0.01) + 0.01 + 0.00 \\
 &= 0.01 \\
 Y_{\text{optimal}} &= 51.00 - 0.01 = 50.99
 \end{aligned}$$

การทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง (Confirming/Predicted)

แผนการทดลอง A3 B2 C3 D3 E3 ผู้วิจัยนำมาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าทดสอบแรงดึง

Trial	A	B	C	D	E	ผลลัพธ์
1	240	20	50	70	200	51.04
2	240	20	50	70	200	51.06
3	240	20	50	70	200	51.03

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการควบคุมกระบวนการฉีดและผู้ปฏิบัติงานในขณะที่ทำการทดลองจึงทำให้ค่าที่ได้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงแตกต่างกัน

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึง, ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงกระแทก และตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็ง สามารถทราบค่าเงื่อนไขที่ทำให้ได้ค่าแรงดึง, แรงกระแทก และ ความแข็งมากที่สุดได้แก่เงื่อนไขที่ 23 ที่อุณหภูมิหลอมละลาย 240°C , อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C , ความเร็วในการฉีด 20 mm/sec , ความดันการฉีด 70 MPa , แรงดันฉีดย้ำ 130 MPa ซึ่งให้ค่าแรงดึงที่ 34.45 N/mm^2 , ค่าแรงกระแทก เท่ากับ 5 kJ/mm^2 และค่าความแข็งที่ 119.13 R-Scale

ตารางที่ 4.12 ค่าสมบัติเชิงกลของเงื่อนไขที่ได้จากโปรแกรมจำลองและวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

สมบัติเชิงกล	ค่าสมบัติเชิงกล	
	โปรแกรมจำลอง	ทากูชิ
Tensile Strength at Yield Min 33 N/mm^2	34.16	34.45
Charpy Notched Impact Strength Min 3 KJ/mm^2	4.5	5.0
Rockwell Hardness Min 105 R-Scale	117.50	119.13

จากตารางที่ 4.12 พบว่าโปรแกรมจำลองสามารถออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสมบัติเชิงกลในช่วงที่กำหนดได้และวิธีทากูชิสามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

บทที่ 5

บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการการออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Moldex3D ร่วมกับการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมจำลอง

จากผลการวิจัยการออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมจำลองพบว่าชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรมจำลองไม่พบข้อบกพร่องจากการฉีดขึ้นงานจริงด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองจะได้รับพารามิเตอร์กระบวนการที่ดีที่สุดสำหรับความแข็งแรงสูงสุดในช่วงที่กำหนด

5.1.2 การหาพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกโดยการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติ

จากผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฉีดขึ้นงานที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลสูงสุดคือ อุณหภูมิหลอมละลาย 240°C , อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C , ความเร็วในการฉีด 20 mm/sec, ความดันการฉีด 70 MPa และ แรงดันฉีดย้ำ 130 จากการออกแบบการทดลองดังกล่าวสามารถให้ค่าแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 34.45 N/mm^2 , ค่าแรงกระแทก เท่ากับ 5 kJ/mm^2 และค่าความแข็งที่ 119.13 R-scale

จากการวิจัยพบว่าการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติสามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดขึ้นงานที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดได้แตเมื่อนำมาวิเคราะห์การทดลองได้จากทฤษฎีทางสถิติพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีความสำคัญในแต่ละสมบัติเชิงกลพบว่ามีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากปัจจัยอื่นๆ ที่ผู้วิจัยไม่ได้ทำการควบคุม รวมทั้งในระหว่างการทำวิจัยพบความผิดปกติในระหว่างการทำทดลองซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันในช่วงการทดลอง

5.2 อภิปรายผล

กระบวนการฉีดพลาสติกเป็นสิ่งสำคัญในวัสดุโพลีเมอร์ที่ดำเนินการในอุตสาหกรรมพลาสติก งานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคโนโลยีด้านการจำลองทางวิศวกรรมโปรแกรม Moldex3D R14 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการฉีดและเปรียบเทียบการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกกับชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดจริงโดยใช้พารามิเตอร์เดียวกันในการทดลอง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของการฉีดขึ้นรูปโพรพิลีน (PP) เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลสูงสุดจากผลการวิจัยพบว่าผู้วิจัยสามารถหาพารามิเตอร์หลักที่เหมาะสมสำหรับฉีดขึ้นงานที่ต้องการค่าคุณสมบัติเชิงกลที่อยู่ในค่าที่กำหนด

และการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิมารหาเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สูงที่สุดได้ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าการฉีดขึ้นงานเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการของผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการปรับตั้งค่าและสามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมรวมทั้งยังสามารถทราบถึงตัวแปรมีอิทธิพลต่อชิ้นงานได้ทำให้สามารถเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกและยังช่วยลดระยะเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฉีดพลาสติกที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกล การนำเอาเทคนิควิธีการทากูชิมารช่วยในการออกแบบการทดลอง ง่ายสะดวกและเป็นวิธีดำเนินการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการวางแผนการเตรียมงานอย่างเป็นระบบกับงานที่จะทำการศึกษาและเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพการฉีดพลาสติกโดยใช้วิธีการของทากูชิมารสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติก ประสิทธิภาพของการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม [18] เพื่อลดปัญหาการเสียรูปของชิ้นส่วนในกระบวนการผลิต ซึ่งผลในงานวิจัยอาจเกิดความคลาดเคลื่อนกับผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการฉีดจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุและองค์ประกอบในหลายส่วน เช่น ความสมบูรณ์ของกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ที่อาจมีความคลาดเคลื่อนจาก CAD ที่ออกแบบไว้ในแบบจำลอง หรืออาจเกิดจากปัจจัยรบกวนอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งสาเหตุต่างๆ เหล่านี้อาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ในการทดลองได้ [10]

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ใช้พลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีนเพียงชนิดเดียวในการศึกษา หากมีการดำเนินงานวิจัยต่อจากงานวิจัยนี้แนะนำให้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกอื่นซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทอื่นๆ ด้วยเช่นกัน

2. ในงานวิจัยนี้ออกแบบพารามิเตอร์หลักโดยใช้โปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรม Moldex 3D เท่านั้นดังนั้น งานวิจัยครั้งต่อไปควรนำโปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรมโปรแกรมอื่นๆ มาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์หลัก



บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, “สถิติการส่งออกสินค้าของไทยปี 2561,” [Online]. Available : <http://tradereport.moc.go.th/TradThai>. [Accessed : 4 เมษายน 2562].
- [2] อุตสาหกรรมพลาสติกสถิติแห่งประเทศไทย, “นำเข้า/ส่งออกผลิตภัณฑ์พลาสติกของไทยปี 2008 ถึง 2018,” [Online]. Available : <http://plastic.oie.go.th>. [Accessed : 9 เมษายน 2562].
- [3] วรวิทย์ จันทรสุวรรณ, *พอลิเมอร์*, กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2554.
- [4] สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย, “การนำผลการวิเคราะห์และการแก้ปัญหากระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อใช้ในการออกแบบ,” *วารสารอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 15-28, ธันวาคม 2550.
- [5] L. A. Plastic Industry, “Important Parameters in the Injection of Plastic,” [Online]. Available from : <https://www.laplastic.biz/parameters-plastic-injection>. [Accessed : December 24, 2018].
- [6] บัณฑิต สุขสวัสดิ์, “การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีทาภูมิ,” *วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 1-16, ตุลาคม 2562.
- [7] บรรจบ อรรถ, “การทดสอบเชิงกล,” *วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 3, หน้า 1-23, มิถุนายน-สิงหาคม 2558.
- [8] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา, *วัสดุวิศวกรรม*, กรุงเทพฯ : เจริญรุ่งเรืองการพิมพ์, 2540.
- [9] Moldex3D Company, “Fully Coupled Process Simulation to Satisfy Specific Needs for High-Precision Plastic Parts,” [Online]. Available from : <http://www.Moldex3d.com/en/>. [Accessed : December 24, 2018].
- [10] กำชัย ไทยไชยนต์. “การปรับปรุงคุณภาพการฉีดพลาสติกโดยวิธีการของทาภูมิ,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2552.
- [11] E. Farotti and M. Natalini, “Injection molding influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer : A first study,” *International Conference on Stress Analysis, AIAS 2017*, Pisa, Italy, September 6-9, 2017, pp. 256-264.
- [12] M. Zrida et al., “High-speed tensile tests on a polypropylene material,” *Polymer Testing Journal*, vol. 29, no. 6, pp. 685-692, September 2010.
- [13] C. Nicolazo et al., “Change on temperature at the surface of injection moulded parts,” *Materials Processing Technology Journal*, vol. 210, no. 2, pp. 233-237, January 2010.

- [14] T. Gómez-del Río and J. Rodríguez, "Compression yielding of polypropylenes above glass transition temperature," *European Polymer Journal*, vol. 46, no. 6, pp. 1,244-1,250, June 2010.
- [15] R. Sánchez et al., "On the relationship between cooling setup and war page in injection molding," *Measurment Journal*, vol 45, no. 5, pp. 1,051-1,056, June 2012.
- [16] M. D. Azaman et al., "Shrinkages and warpage in the processability of wood-filled polypropylene composite thin-walled parts formed by injection molding," *Materials & Design Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 1,018-1,026, December 2013.
- [17] X. P. Dang, "General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters," *Simulation Modelling Practice and Theory Journal*, vol. 41, no. 1, pp. 15-27, February 2014.
- [18] สุรพงศ์ บางพาน และคณะ, "การประยุกต์ด้วยวิธีการทางสถิติสำหรับค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการกลึงชิ้นงานประกอบเพลลาโดยผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ในเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต," *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.บ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 132-153, มกราคม-มิถุนายน 2559.

ภาคผนวก

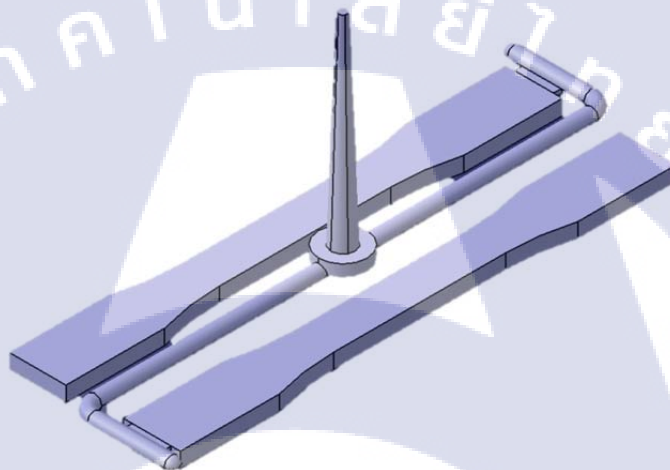
TNI

ภาคผนวก ก.
การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

TNI

ขั้นตอนในการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

ขั้นตอนแรกของการออกแบบในงานวิจัยนี้เริ่มจะจากการออกแบบชิ้นงาน ซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงด้านความเค้นไพบ์หนึ่ง (Tensile Strength Specimen Type I) สำหรับทดสอบแรงดึง โดยตำแหน่งที่วัดกว้างพอที่จะสามารถทดสอบวัดความมันเงาได้ แสดงตามรูปที่ ก.1 โดยหลักการออกแบบจะคำนึงถึงการประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง รวมถึงความพร้อมของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตขึ้นส่วนแม่พิมพ์และขนาดกำลังเครื่องฉีดพลาสติกเพื่อที่จะสามารถให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชุดนี้ คือ การคำนวณหาค่าต่างๆ จากทฤษฎีการคำนวณดังนี้



รูปที่ ก.1 ภาพชิ้นงานฉีดพลาสติกแบบ 2 ควาดี ทางวิ่งและรูเข้า

การคำนวณปริมาตรและน้ำหนักของชิ้นงานฉีดพลาสติก

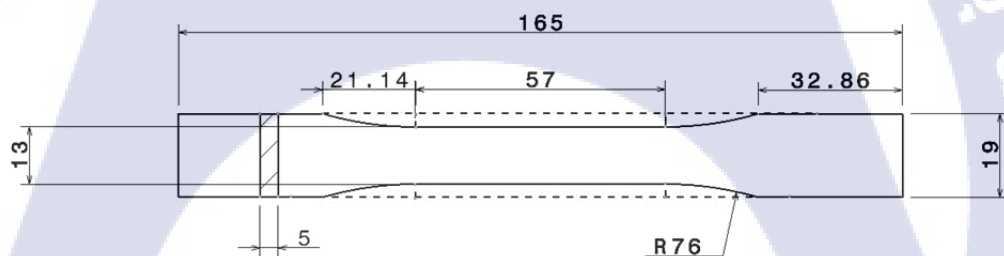
การคำนวณขนาดของชิ้นงานฉีดพลาสติกจำเป็นต้องรู้ข้อมูลในการคำนวณก่อน ดังนี้

- ชนิดของพลาสติก ในการวิจัยนี้ใช้พลาสติกประเภทเอปียีส จากบริษัท Toray Plastic เกรด 700-314 สีดำ
- ความหนาแน่นของพลาสติก ของเม็ดพลาสติกเกรดนี้จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 1.04 g/mm^3

การคำนวณหาปริมาตรของชิ้นงาน

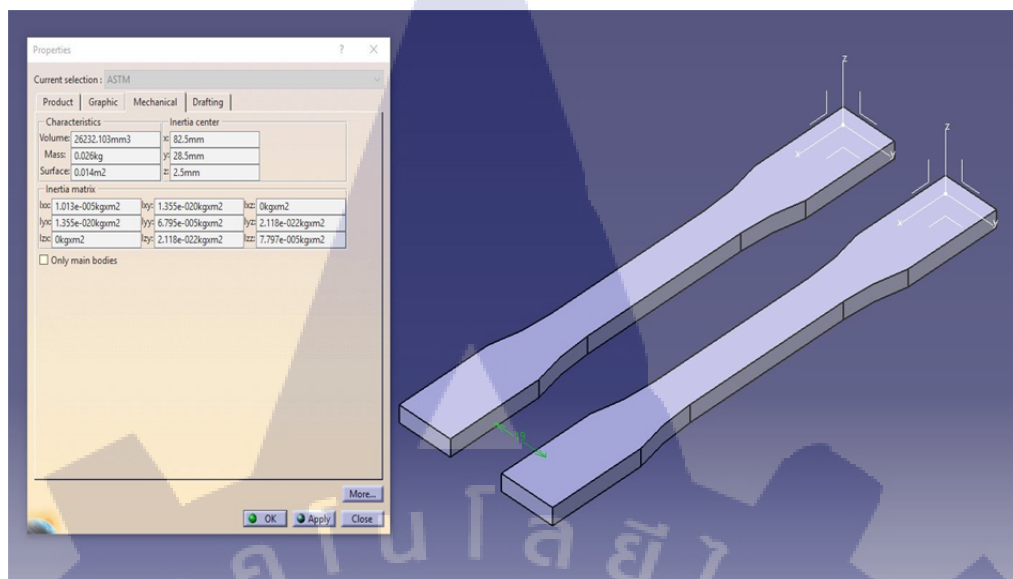
$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรที่ 1} &= 19 \text{ mm.} \times 165 \text{ mm.} \times 5 \text{ mm} \\ &= 15,675 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรที่ 2} &= 3 \text{ mm.} \times 57 \text{ mm.} \times 5 \text{ mm.} \\
 &= 855 \text{ mm.}^3 \\
 \text{ทั้งหมด 2 ด้าน} &= 855 \times 2 \text{ mm.}^3 \\
 &= 1,710 \text{ mm.}^3 \\
 \text{พื้นที่ฐานปริมาตรที่ 3} &= \frac{1}{2} \times 3 \text{ mm.} \times 21.14 \text{ mm.} \\
 &= 31.71 \text{ mm.}^2 \\
 \text{ปริมาตรที่ 3} &= 31.71 \text{ mm.}^2 \times 5 \text{ mm.} \\
 &= 158.55 \text{ mm.}^3 \\
 \text{ทั้งหมด 4 ด้าน} &= 158.55 \times 4 \text{ mm.}^3 \\
 &= 634.2 \text{ mm.}^3 \\
 \text{ปริมาตรชิ้นงาน} &= 15,675 \text{ mm.}^3 - (1,710 \text{ mm.}^3 + 634.2 \text{ mm.}^3) \\
 &= 13,330.8 \text{ mm.}^3 \\
 \therefore \text{ปริมาตรชิ้นงานทั้งหมด (2 ชิ้น)} &= 13,330.8 \times 2 \text{ mm.}^3 = 26,661.6 \text{ mm.}^3 \\
 &= 26.66 \text{ cm.}^3
 \end{aligned}$$



รูปที่ ก.2 พื้นที่การคิดปริมาตรของชิ้นงานด้วยตัวเอง

จากการคำนวณปริมาตรชิ้นงานด้วยการคำนวณประมาณด้วยตัวเอง ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม CATIA แต่การคำนวณค่าปริมาตรชิ้นงานด้วยโปรแกรม CATIA ให้ความแม่นยำกว่า เพราะชิ้นงานมีส่วนโค้งละเอียดซึ่งไม่สามารถคำนวณชัดเจนด้วยตัวเองได้ จึงเลือกค่าจากโปรแกรมมาใช้ในการหาค่าน้ำหนักของชิ้นงาน



รูปที่ ก.3 ปริมาตรของชิ้นงานที่คำนวณจากโปรแกรม CATIA

สูตร น้ำหนักของชิ้นงาน = ปริมาตรชิ้นงาน x ความหนาแน่นของพลาสติก

ผลจากการคำนวณตามปริมาตรชิ้นงานจากโปรแกรม CATIA

$$\begin{aligned}\text{น้ำหนักรวมของชิ้นงาน (2 ชิ้น)} &= 26.232 \text{ cm}^3 \times 1.04 \text{ g/cm}^3 \\ &= 27.28 \text{ g.}\end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาตรของทางวิ่ง

$$\begin{aligned}\text{ปริมาตรของทางวิ่ง 1} &= (\pi \times 2.5^2) \times (30.5+5+165+5+30.5) \\ (\text{ทางวิ่ง } \varnothing 5 \text{ mm.}) &+ \left(\frac{4}{3} \times 2.5^3 \times \pi\right)\end{aligned}$$

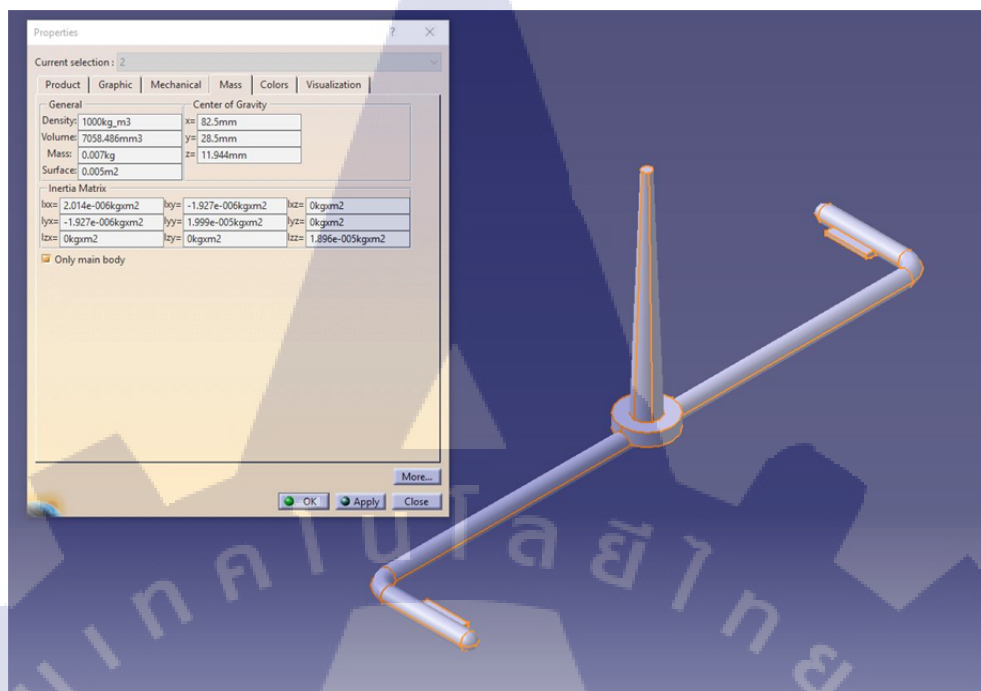
$$= 4,633.86 + 64.45 = 4,699.31 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned}\text{ปริมาตรของทางวิ่ง 2} &= \left(\frac{1}{3} \times \pi \times 4^2 \times 67\right) + (\pi \times 8^2 \times 4) \text{ mm}^3\end{aligned}$$

$$(\text{ทางวิ่งรูเข้า}) = 1,122.59 + 804.24 = 1,926.84 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned}\text{ปริมาตรรูเข้า (2 ด้าน)} &= (13 \times 2.5 \times 1.5) \times 2 \\ &= 97.5 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \text{ปริมาตรทางวิ่งทั้งหมด} &= 4,669.31 + 1,926.84 + 97.5 \text{ mm}^3 \\ &= 6,773.92 \text{ mm}^3 \\ &= 6.77 \text{ cm}^3\end{aligned}$$



รูปที่ ก.4 พื้นที่การคิดปริมาตรของทางวิ่งด้วยตัวเอง

ผลจากการคำนวณตามปริมาตรทางวิ่งและรูเข้าจากโปรแกรม CATIA ซึ่งให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่า

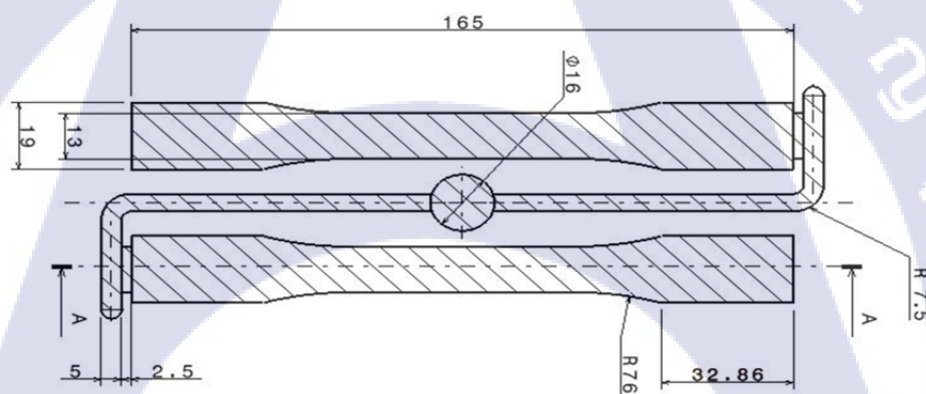
$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักรวมของทางวิ่งและรูเข้า} &= 7.058 \text{ cm}^3 \times 1.04 \text{ g/cm}^3 \\
 &= 7.34 \text{ g.} \\
 \therefore \text{น้ำหนักรวมของชิ้นงานทั้งหมด} &= 27.28 + 7.34 \text{ g.} \\
 &= 34.62 \text{ g.}
 \end{aligned}$$

การคำนวณแรงบิดแม่พิมพ์และขนาดเครื่องฉีดพลาสติก

ชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ออกแบบมีจำนวน 2 คาวิตี้รูปร่างและขนาดเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ ก.7 วัสดุที่ใช้ฉีดเป็นพลาสติกประเภทเอบีเอส โดยกำหนดให้ความดันในโพรงแบบตามตารางด้านล่างเพื่อใช้คำนวณค่าแรงบิดแม่พิมพ์และคำนวณขนาดเครื่องฉีดพลาสติก

ตารางที่ ก.1 ค่าของความดันฉีดและความดันในโพรงแบบของพลาสติกชนิดต่างๆ

ชนิดของพลาสติก (Plastic Type)	ความดันฉีด (กก./ชม. ²) (Injection Pressure)	ความดันในโพรงแบบ (กก./ชม. ²) (Cavity Pressure)
พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)	600 -1,400	230 – 320
พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	600 -1,400	220 – 320
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC)	1,000 – 1,500	280 -290
พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)	700 – 1,700	260 - 320
พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)	800 – 1,500	270 – 300
อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดเอน- (Acrylonitrile-butadien-styrene, ABS)	700 – 1,500	330 - 440
พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA)	800 – 1,500	240 - 450



รูปที่ ก.5 หน้าตัดแสดงพื้นที่ฉายของแม่พิมพ์

จากภาพ

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้พื้นที่ฉายของชิ้นงาน (2 Cavity)} &= (13,305 \text{ mm.}^3 / 5 \text{ mm.}) \times 2 \\
 &= 5,323 \text{ mm.}^2 \\
 &= 53.23 \text{ cm.}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ฉายของทางวิ่งและรูเข้า} &= [(23 + 7.5 + 165 + 7.5 + 23) \times 5] + \\
 &\quad [2 \times (2.5 \times 13)] \\
 &= 1,130 + 65 \text{ mm.}^2 \\
 &= 1,195 \text{ mm.}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.195 \text{ cm.}^2 \\
 \text{รวมพื้นที่ฉายทั้งหมด} &= 53.23 + 1.195 \text{ cm.}^2 \\
 &= 54.425 \text{ cm.}^2
 \end{aligned}$$

ในการฉีดพลาสติกจริงเราจะพิจารณาพื้นที่ฉายทั้งหมดของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานมีการออกแบบให้มีขนาดรูปร่างที่ยาวและขนาดมีทางเข้าแบบพัต จึงจำเป็นต้องพิจารณาในการคำนวณนี้ด้วย โดยแรงปิดแม่พิมพ์ที่ใช้จะเผื่อค่าแรงปิดแม่พิมพ์เพิ่มอีก 25% เพื่อความปลอดภัยของเครื่องจักรและคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก ตามสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned}
 F &= 1.25 \text{ PA}_{\text{projected}} \\
 &= 1.25 \times 385 \times 54.425 \text{ kg.} \\
 &= 26,192 \text{ kg.} = 26 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณควรเลือกใช้ขนาดเครื่องพลาสติกขนาดประมาณ 26 ตันขึ้นไป ค่าความดันในโปรแกรมงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุประเภทเอปียเอสโดยอ้างอิงจากตารางด้านบน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความดันตลอดช่วงของการฉีด ณ จุดต่างๆ ในขณะที่แม่พิมพ์ปิดได้จึงจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงที่แนะนำ จะเห็นได้ว่าความสามารถของเครื่องฉีดพลาสติกของห้องปฏิบัติการมีขนาดแรงปิดแม่พิมพ์เพียงพอกับการออกแบบแม่พิมพ์นี้

การคำนวณเวลาในการหล่อเย็น

ในการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นจะต้องคำนวณถึงรูปทรงของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบแผ่นเรียบ ซึ่งมีการคำนวณเวลาที่พลาสติกหลอมเหลวแข็งตัวที่ผิวชิ้นงานและจุดกึ่งกลางชิ้นงาน โดยจะมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\text{เวลาหล่อเย็นที่ผิวชิ้นงานแบบแผ่นเรียบ } t_e = \frac{s^2}{\pi^2 a_{\text{eff}}} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right]$$

โดยที่ t_c คือ เวลาในการหล่อเย็น

S คือ ความหนาของชิ้นงาน (จากการออกแบบชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร)

a_{eff} คือ อัตราการแพร่กระจายความร้อนของพลาสติก (Thermal Diffusivity, mm^2/s)

T_M คือ อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว

T_E คือ อุณหภูมิปลดขึ้นงาน

T_W คือ อุณหภูมิผนังแม่พิมพ์

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } t_c &= \frac{5^2}{3.14^2 0.17} \ln \left[\frac{8}{3.14^2} \left(\frac{240 - 60}{95 - 60} \right) \right] \\ &= 14.92 \ln (4.16) \\ &= 21.31 \text{ sec.} \approx 21 \text{ sec.} \end{aligned}$$

สำหรับสูตรคำนวณเวลาหล่อเย็นนี้ สามารถใช้ปลดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ แต่จากประสบการณ์ของผู้วิจัย พบว่าการออกแบบทางเข้าหรือรูวิ่งที่ความหนาที่ขนาดขึ้นงานมีโอกาสทำให้เวลาปลดขึ้นงานขึ้นงานฉีดพลาสติกมีโอกาสขาดออกจากกัน ทำให้รูวิ่งและขึ้นงานแยกไปในฝั่งปลอกนำฉีดและโพรงแบบตามลำดับ เพราะว่าเกิดสภาวะที่จุดกึ่งกลางขึ้นงานพลาสติกยังไม่แข็งตัวสนิท (Metling Core) จึงเป็นสาเหตุให้จำเป็นต้องใช้เวลาหล่อเย็นที่นานขึ้นกว่าที่ผิวขึ้นงาน เพื่อให้ขึ้นงานแข็งตัวได้ทั่วถึงขึ้นงาน ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{เวลาหล่อเย็นที่จุดกึ่งกลางขึ้นงานแบบแผ่นเรียบ } t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a_{\text{eff}}} \ln \left[\frac{4}{\pi^2} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } t_c &= \frac{5^2}{3.14^2 0.17} \ln \left[\frac{4}{3.14^2} \left(\frac{240 - 60}{95 - 60} \right) \right] \\ &= 14.92 \ln (6.54) \\ &= 28.05 \text{ sec.} \approx 28 \text{ sec.} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าเวลาหล่อเย็นที่จุดกึ่งกลางขึ้นงานจะยาวนานกว่าเวลาหล่อเย็นที่ผิวขึ้นงานด้วยเนื่องจาก ตำแหน่งของการพาความร้อนที่จุดกึ่งกลางขึ้นงานนั้นไกลกว่าตำแหน่งที่ผิวขึ้นงาน ยิ่งขึ้นงานมีความหนามากขึ้นเท่าไรโอกาสที่จะเกิด Melting Core ที่เวลาหล่อเย็นเท่ากันก็จะเกิดมากยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นเราจึงควรเลือกใช้เวลาหล่อเย็นที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาการผลิตและสามารถปลดขึ้นงานได้อย่างปลอดภัย

ในการวิจัยครั้งนี้ เวลาในการหล่อเย็นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่กำหนด เนื่องจากศึกษาอิทธิพลของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาจากอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นค่า T_M และค่า T_W ตามลำดับ ทำให้ ในการคำนวณจะยกตัวอย่างเฉพาะค่ากึ่งกลางของการออกแบบการทดลองเท่านั้น (อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวที่ 240°C และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 60°C) สำหรับช่วงเวลาการหล่อเย็นของชิ้นงานที่ออกแบบจากการคำนวณนี้จะมีค่าระหว่าง 20-40 วินาที

การคำนวณฟลักซ์ความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

จากสมการที่ 2 ในบทที่ 2 แสดงสมการสมดุลความร้อนระหว่างความร้อนจากพลาสติกหลอมเหลวที่ถ่ายเทให้กับแม่พิมพ์สัมพันธ์กับการหล่อเย็นด้วยน้ำในแต่ละวัฏจักรของการฉีด เพื่อให้ได้ตามทฤษฎีที่ว่า ฟลักซ์ความร้อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์เท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่จะต้องนำออกจากแม่พิมพ์ ในสมการที่กล่าวมาได้กำหนดให้อุณหภูมิจากแม่พิมพ์มีค่าคงที่จึงไม่นำมารวมเข้าแต่ละวัฏจักรของการฉีด กล่าวคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีค่าสูงหรือต่ำลงแต่จะไม่นับรวมเข้ามาในระบบ แสดงดังสมการด้านล่างดังนี้

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0$$

ฟลักซ์ความร้อนของพลาสติกหลอมเหลว สามารถเขียนในรูปแบบสมการด้านล่าง ดังนี้

$$\dot{Q}_m = 10^{-3} [C_p(T_M - T_E) + i_m] \rho \frac{5}{2} x$$

- โดยที่ C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ สำหรับพลาสติกเอปียเอสจะอยู่ที่ $1,423 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
 i_m คือ ความร้อนแฝงของพลาสติก สำหรับพลาสติกเอปียเอสจะอยู่ที่ประมาณ 600 kJ/kg
 ρ คือ ความหนาแน่นหลอมเหลวของพลาสติก สำหรับพลาสติกเอปียเอสที่ใช้เท่ากับ 1.04 g/cm^3
 x คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูหล่อเย็น จากการออกแบบเท่ากับ 10 mm
 S คือ ความหนาของชิ้นงาน จากการออกแบบเท่ากับ 5 mm .

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก กำหนดค่ากลางของงานวิจัยเท่ากับ 250°C

T_E คือ อุณหภูมิปลดชิ้นงาน สำหรับพลาสติกเอปียเอสที่ใช้เท่ากับ 95°C

$$\begin{aligned}\text{จะได้ } \dot{Q}_m &= 10^{-3} [1,423(250 - 95) + 600] \times 1.04 \times \frac{5}{2} \times 10 \\ &= 5,752 \text{ จูล}\end{aligned}$$

ฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็นที่สัมพันธ์กับเวลา สามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ ดังนี้

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} \left(\frac{1}{2} t_f + t_c + \frac{1}{2} t_o \right) \left(\frac{1}{10^{-3} \alpha \pi d} - 1 \frac{1}{k_{st} S_e} \right)^{-1} (\bar{T}_w - T_c)$$

โดยที่ t_f คือ เวลาที่ใช้ในการฉีด กำหนดเท่ากับ 3.5 sec

t_c คือ เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น กำหนดเท่ากับ 25 sec

t_o คือ เวลาที่ใช้ในการเปิดปิดแม่พิมพ์ กำหนดเท่ากับ 5 sec

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหล่อเย็น จากการออกแบบเท่ากับ 10 mm.

k_{st} คือ ค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์ ข้อมูลในโปรแกรม Molded3D กำหนดเท่ากับ $25,000 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

S_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น

$\bar{T}_w$ คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ก่อนเริ่มหล่อเย็น ควบคุมให้คงที่เท่ากับ 50°C

T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อเย็น กำหนดให้เท่ากับ 30°C

สำหรับอิทธิพลของตำแหน่งรูหล่อเย็นในการนำความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการสัมประสิทธิ์ของรูปทรงหน้าตัดรูหล่อเย็น (Shape Factor, S_e) ได้ดังนี้

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \left[\frac{2 \times \sinh(2\pi y/x)}{\pi d} \right]}$$

จะได้

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \left[\frac{2 \times 10 \sinh(2\pi \cdot 20 / 10)}{\pi \times 10} \right]}$$

$$= \frac{6.2832}{2.6881}$$

$$= 2.34$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ของน้ำหล่อเย็น สามารถเขียน ดังนี้

จะได้

$$\alpha = \frac{31.395}{d} R_e^{0.8}$$

$$= \frac{31.395}{10} 10,000^{0.8}$$

$$= 4,975.77$$

เมื่อนำมาคำนวณฟลักซ์ความร้อนของน้ำหล่อเย็น จะได้

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} \left(\frac{3.5}{2} + 25 + \frac{5}{2} \right) \left(\frac{1}{10^{-3} 4,975.747 \times 10} - 1 \frac{1}{25,000 \times 2.34} \right)^{-1} (50 - 30)$$

$$= 10^{-3} \times 29.25 \times 0.1583 \times 58,434.33 \times 20$$

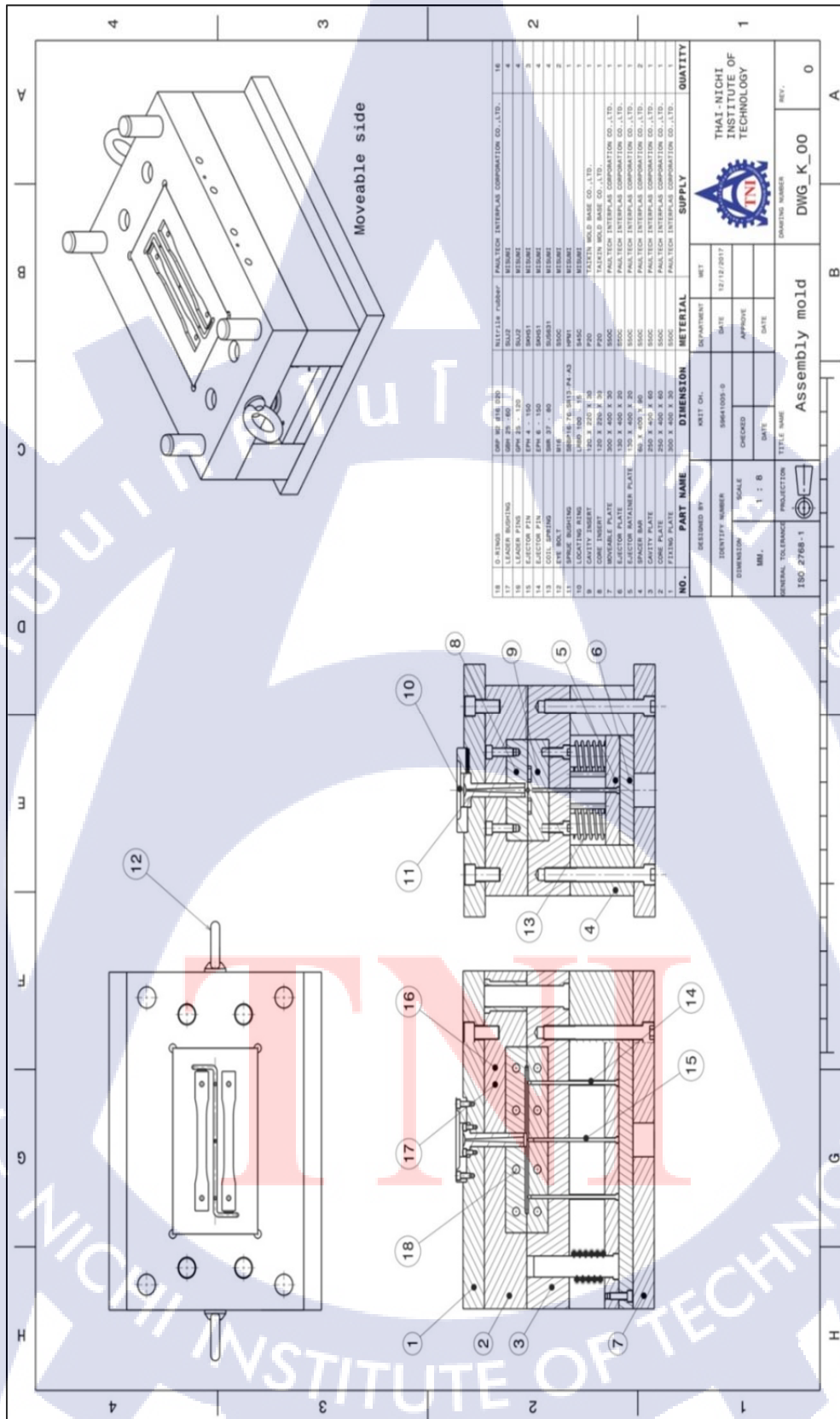
$$= 5,414.2 \text{ จูล}$$

สำหรับการคำนวณฟลักซ์ความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าประมาณเริ่มต้นเพื่อปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฉีดให้ได้ค่าคงของอุณหภูมิแม่พิมพ์ในแต่ละวัฏจักรและปรับค่าเพิ่มเติมอีกเล็กน้อยสำหรับงานฉีดจริง

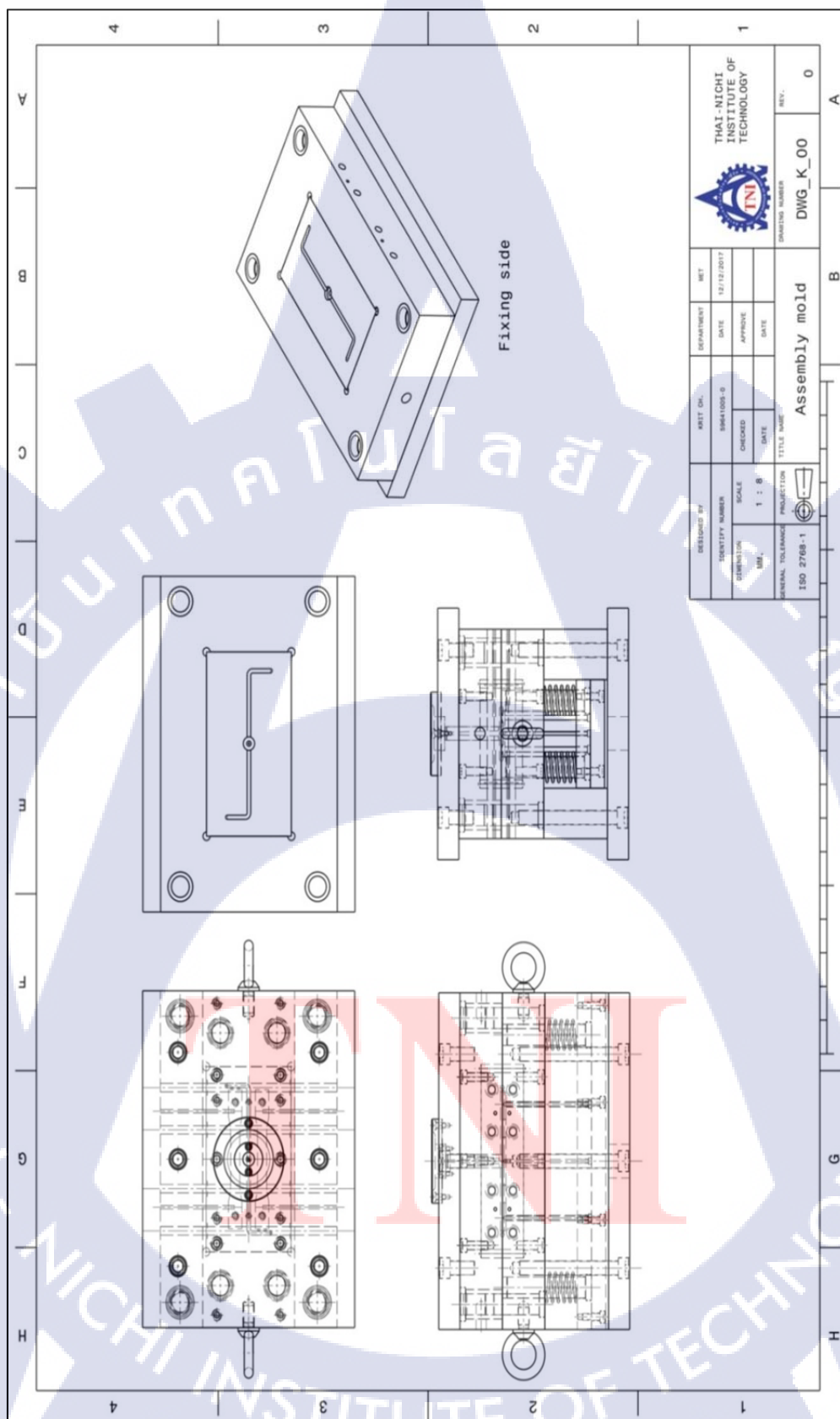
ภาคผนวก ข.

แบบภาพประกอบและภาพแยกชิ้นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

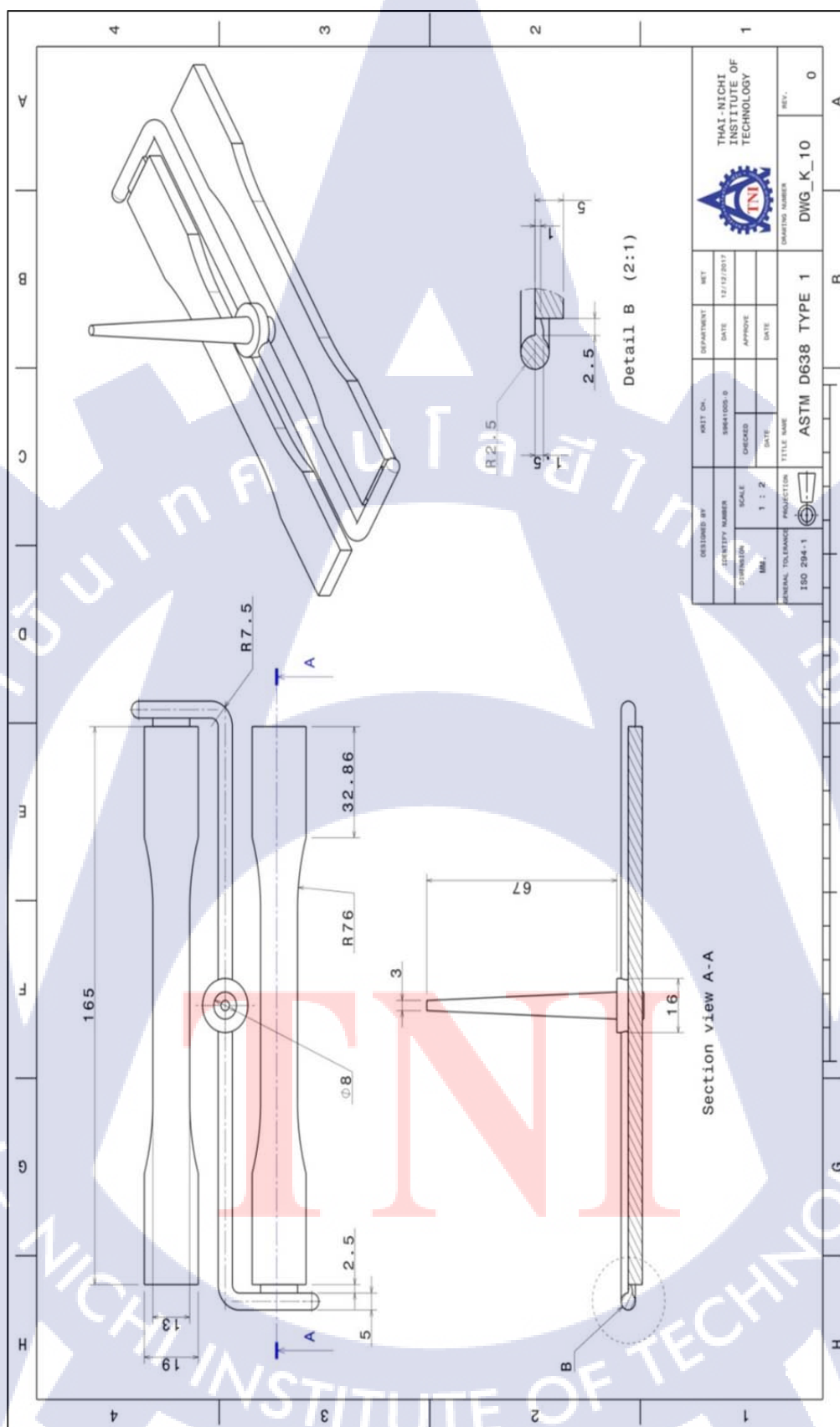
TNI



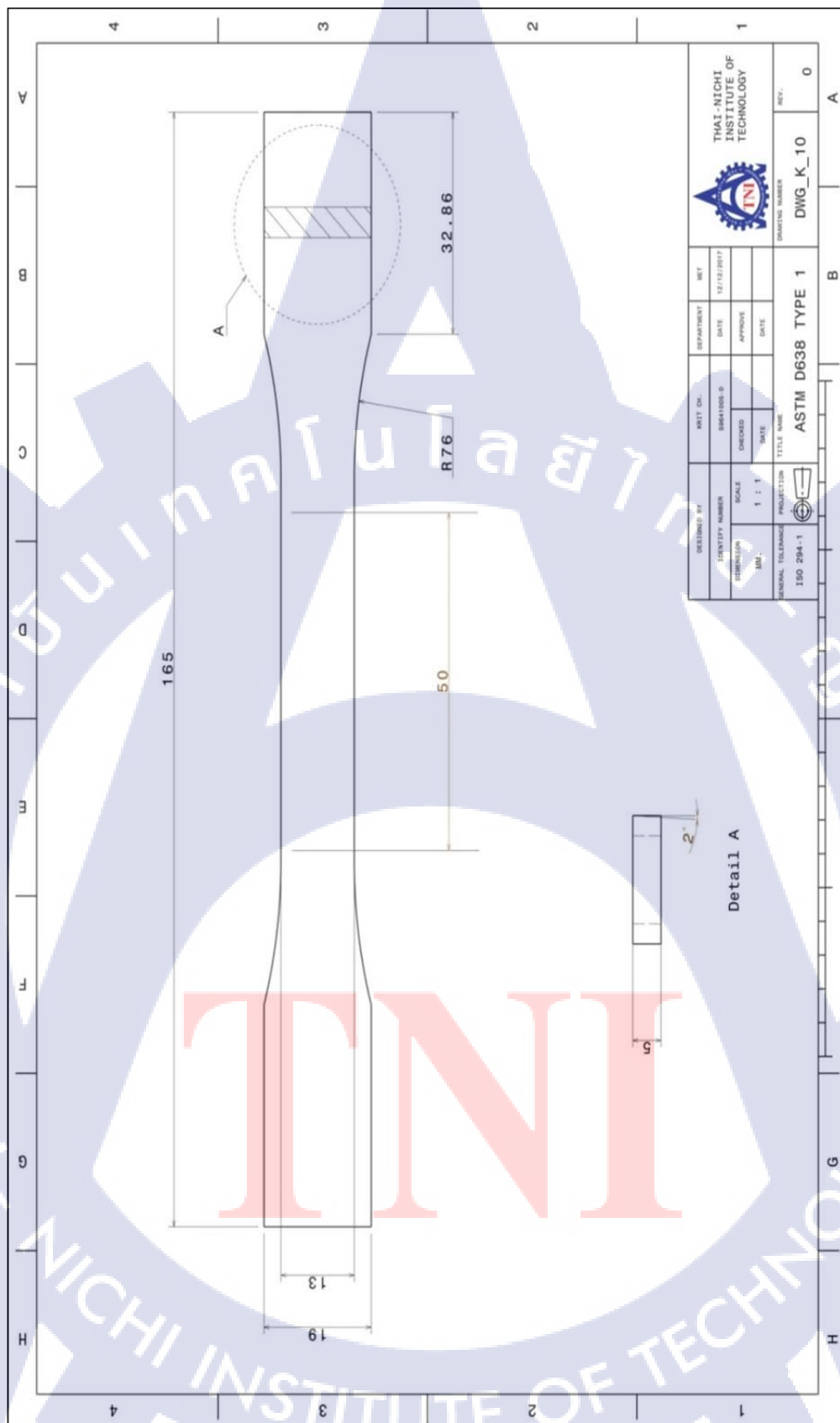
รูปที่ ข.1 ภาพประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ ข.1 ภาพประกอบของแม่พิมพ์พลาสติกที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)



รูปที่ ข.2 ภาพร่างของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ ข.3 ภาพร่างแสดงขนาดของชิ้นงานมาตรฐาน ASTM : D638

ภาคผนวก ค.

ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

TNI

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบแรงดึง

ลำดับการทดลอง	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)
1	11.333	12.783	5.1
2	11.1667	12.75	5.1333
3	11.166	12.6166	5
4	11	12.633	5.1333
5	11	12.66	5.1
6	11.5	12.75	5.1
7	11	12.566	5
8	11.5	12.75	5
9	11.366	12.75	5.066
10	11	12.8	5.1
11	11	12.85	5
12	11	12.766	5.1
13	10.8333	12.75	5.1
14	11	12.8167	5.1
15	11.1666	12.583	5
16	11.166	12.667	5.0666
17	11.667	12.816	5.0667
18	11.1666	12.783	5
19	11	12.65	5
20	11.166	12.6833	5.066
21	11	12.65	5
22	11.2666	12.7333	5
23	11.33	12.65	5.066
24	11.2733	12.75	5.1
25	11.166	12.75	5.1
26	11.1666	12.616	5.066
27	11	12.6	5

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบแรงกระแทก

ลำดับการทดลอง	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)
1	11.2	12.6	5
2	11.347	12.733	5.066
3	11.1116	12.586	5
4	11.11	12.65	5
5	11.316	12.683	5.05
6	11.333	12.6111	5
7	11.276	12.666	5
8	11.25	12.65	5
9	11.263	12.633	5
10	11.1096	12.616	5.105
11	11.243	12.7	5
12	11.195	12.633	5.072
13	11.1983	12.766	5.1
14	11.243	12.583	5
15	11.2286	12.633	5.1106
16	11.256	12.583	5.09
17	11.234	12.616	5.1
18	11.333	12.783	5.1066
19	11.263	12.716	5.085
20	11.2783	12.616	5.05
21	11.2566	12.6	5.1
22	11.227	12.616	5.1
23	11.236	12.666	5.1
24	11.248	12.733	5.066
25	11.322	12.633	5.0516
26	11.256	12.65	5.1
27	11.246	12.6833	5.1

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลชิ้นงาน 27 เงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดสอบการทดสอบความแข็ง

ลำดับการทดลอง	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)
1	11.113	12.55	5.15
2	11.2013	12.6	5.116
3	11.2766	12.6	5.1
4	11.265	12.666	5.0666
5	11.143	12.566	5.15
6	11.0667	12.616	5.1
7	11.133	12.6	5.083
8	11.251	12.55	5.1
9	11.184	12.65	5.1
10	11.08	12.65	5.05
11	11.143	12.616	5
12	11.0786	12.566	5.083
13	11.153	12.566	5.05
14	11.124	12.633	5
15	11.134	12.617	5.066
16	11.223	12.624	5.0566
17	11.221	12.65	5.05
18	11.223	12.657	5
19	11.1546	12.66	5.05
20	11.144	12.7	5.066
21	11.076	12.75	5.083
22	11.153	12.65	5.083
23	11.213	12.583	5.066
24	11.143	12.716	5.103
25	11.177	12.714	5.05
26	11.0667	12.716	5
27	11.153	12.75	5

การทดลองที่ 1

Product Name	Polypropylene (PP)		
Report Date	3/12/2019	Test Date	2/19/2019
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50 mm/min	Shape	Plate
No of Batch	1	Qty/Batch	3

Name	Max_Force	Max_Stress	Break_Force	Break_Stroke_Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	N	%
Sample _ 1	2050.03	34.1671	1180.08	144.768
Sample _ 2	2058.98	34.3163	1195.55	218.132
Sample _ 3	2055.76	34.2627	1187.79	340.834
Average	2054.92	34.2487	1187.81	234.578
Standard Deviation	4.53326	0.07558	7.73506	99.0622
Maximum	2058.98	34.3163	1195.55	340.834
Minimum	2050.03	34.1671	1180.08	144.768
Range	8.94995	0.14920	15.4701	196.066

Name	YS2_Force	Max_Stroke	Max_Stroke_Strain	Max_Displ.
Parameters	0.2 %	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	mm	%	mm
Sample _ 1	--	10.5379	15.0542	10.5379
Sample _ 2	--	10.4255	14.8936	10.4255
Sample _ 3	--	10.3172	14.7389	10.3172
Average	--	10.4269	14.8956	10.4269
Standard Deviation	--	0.11036	0.15766	0.11036
Maximum	--	10.5379	15.0542	10.5379
Minimum	--	10.3172	14.7389	10.3172
Range	--	0.22070	0.31530	0.22070

Name	Max_Strain	Max_Time
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	%	sec
Sample _ 1	15.0542	12.6500
Sample _ 2	14.8936	12.5200
Sample _ 3	14.7389	12.3900
Average	14.8956	12.5200
Standard Deviation	0.15766	0.13000
Maximum	15.0542	12.6500
Minimum	14.7389	12.3900
Range	0.31530	0.26000

การทดลองที่ 2

Product Name	Polypropylene (PP)		
Report Date	3/12/2019	Test Date	2/19/2019
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50 mm/min	Shape	Plate
No of Batch	1	Qty/Batch	3

Name	Max_Force	Max_Stress	Break_Force	Break_Stroke_Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	N	%
Sample _ 1	2050.03	34.1671	1180.08	144.768
Sample _ 2	2058.98	34.3163	1195.55	218.132
Sample _ 3	2055.76	34.2627	1187.79	340.834
Average	2054.92	34.2487	1187.81	234.578
Standard Deviation	4.53326	0.07558	7.73506	99.0622
Maximum	2058.98	34.3163	1195.55	340.834
Minimum	2050.03	34.1671	1180.08	144.768
Range	8.94995	0.14920	15.4701	196.066

Name	YS2_Force	Max_Stroke	Max_Stroke_Strain	Max_Disp.
Parameters	0.2 %	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	mm	%	mm
Sample _ 1	--	10.5379	15.0542	10.5379
Sample _ 2	--	10.4255	14.8936	10.4255
Sample _ 3	--	10.3172	14.7389	10.3172
Average	--	10.4269	14.8956	10.4269
Standard Deviation	--	0.11036	0.15766	0.11036
Maximum	--	10.5379	15.0542	10.5379
Minimum	--	10.3172	14.7389	10.3172
Range	--	0.22070	0.31530	0.22070

Name	Max_Strain	Max_Time
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	%	sec
Sample _ 1	15.0542	12.6500
Sample _ 2	14.8936	12.5200
Sample _ 3	14.7389	12.3900
Average	14.8956	12.5200
Standard Deviation	0.15766	0.13000
Maximum	15.0542	12.6500
Minimum	14.7389	12.3900
Range	0.31530	0.26000

การทดลองที่ 3

Product Name	Polypropylene (PP)		
Report Date	3/12/2019	Test Date	2/19/2019
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50 mm/min	Shape	Plate
No of Batch	1	Qty/Batch	3

Name	Max_Force	Max_Stress	Break_Force	Break_Stroke_Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm ²	N	%
Sample _1	2036.98	33.9496	1158.10	167.429
Sample _2	2020.23	33.6705	1140.89	129.858
Sample _3	2020.20	33.6700	612.156	139.957
Average	2025.80	33.7634	970.382	145.748
Standard Deviation	9.67930	0.16128	310.352	19.4434
Maximum	2036.98	33.9496	1158.10	167.429
Minimum	2020.20	33.6700	612.156	129.858
Range	16.7800	0.27960	545.944	37.5710

Name	YS2_Force	Max_Stroke	Max_Stroke_Strain	Max_Displ.
Parameters	0.2 %	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	mm	%	mm
Sample _1	--	9.98390	14.2627	9.98390
Sample _2	--	10.0839	14.4056	10.0839
Sample _3	--	9.59458	13.7066	9.59458
Average	--	9.88746	14.1250	9.88746
Standard Deviation	--	0.25852	0.36929	0.25852
Maximum	--	10.0839	14.4056	10.0839
Minimum	--	9.59458	13.7066	9.59458
Range	--	0.48932	0.69900	0.48932

Name	Max_Strain	Max_Time
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	%	sec
Sample _1	14.2627	11.9900
Sample _2	14.4056	12.1100
Sample _3	13.7066	11.5200
Average	14.1250	11.8733
Standard Deviation	0.36929	0.31182
Maximum	14.4056	12.1100
Minimum	13.7066	11.5200
Range	0.69900	0.59000

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการตั้งค่าบนโปรแกรมจำลองทางวิศวกรรมของการฉีดพลาสติก

TNI

Cooling channel

Setting : By flow rate

Channel ID	T (oC)	Q (cm ³ /sec)	Coolant	D (mm)	Re
EC1 (Group 1)	140	120	Oil	10	5256.44
EC2 (Group 2)	140	120	Oil	10	5256.44
EC3 (Group 3)	40	200	Water	10	38575.3
EC4 (Group 4)	40	200	Water	10	38575.3

Apply current setting to group Apply current setting to all

Heating rod

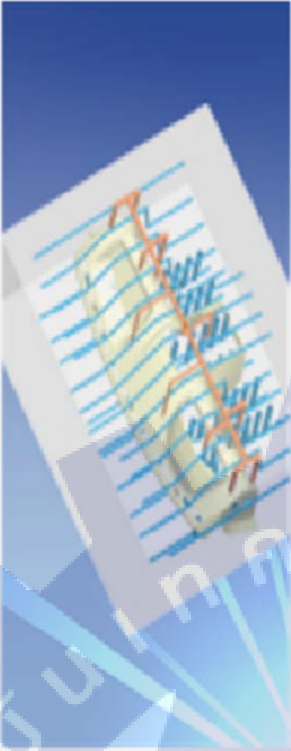
Heating rod ID	Heating method	Value	Unit

Apply current setting to all

Mold metal ID	Material
Mold Metal [Moldbase material]	S55C
Mold Insert-1 [Mold insert material]	P20

Material properties :

Mold metal ID	Mold Metal [Moldbase material]	
Density	7.85	g/cm ³
Heat Capacity	4.86e+006	erg/g.K
Thermal conductivity	4.69e+006	erg/sec.cm.K
Elastic modulus	2.05941e+012	dyne/cm ²
Poisson ratio	0.29	-
CLTE	1.19e-005	1/K



Item	Value	Unit
Cooling method	General	-
Initial Mold Temperature	50	oC
Air Temperature	25	oC
Eject Temperature	95	oC
Cooling Time	25	sec
Mold-Open Time	5	sec
Mold preheat	Setting	

Filling setting

Stroke time : 0.317816 sec

VP switch-over

By volume(%) filled as 98 %

Packing setting

Packing time : 3 sec

Packing pressure refers to end of filling pressure

Melt Temperature	250	oC
Mold Temperature	50	oC



Setting method : Machine mode 1 (by profile) ▾

In this mode, users can't set the injection time directly.
The injection time is determined by flow rate profile and packing time settings.

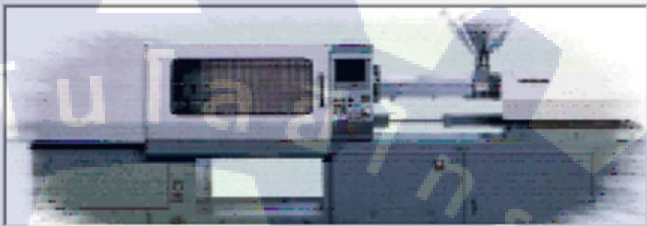
Process File : 020218_1

Mesh File : ASTM D638_82.mfe

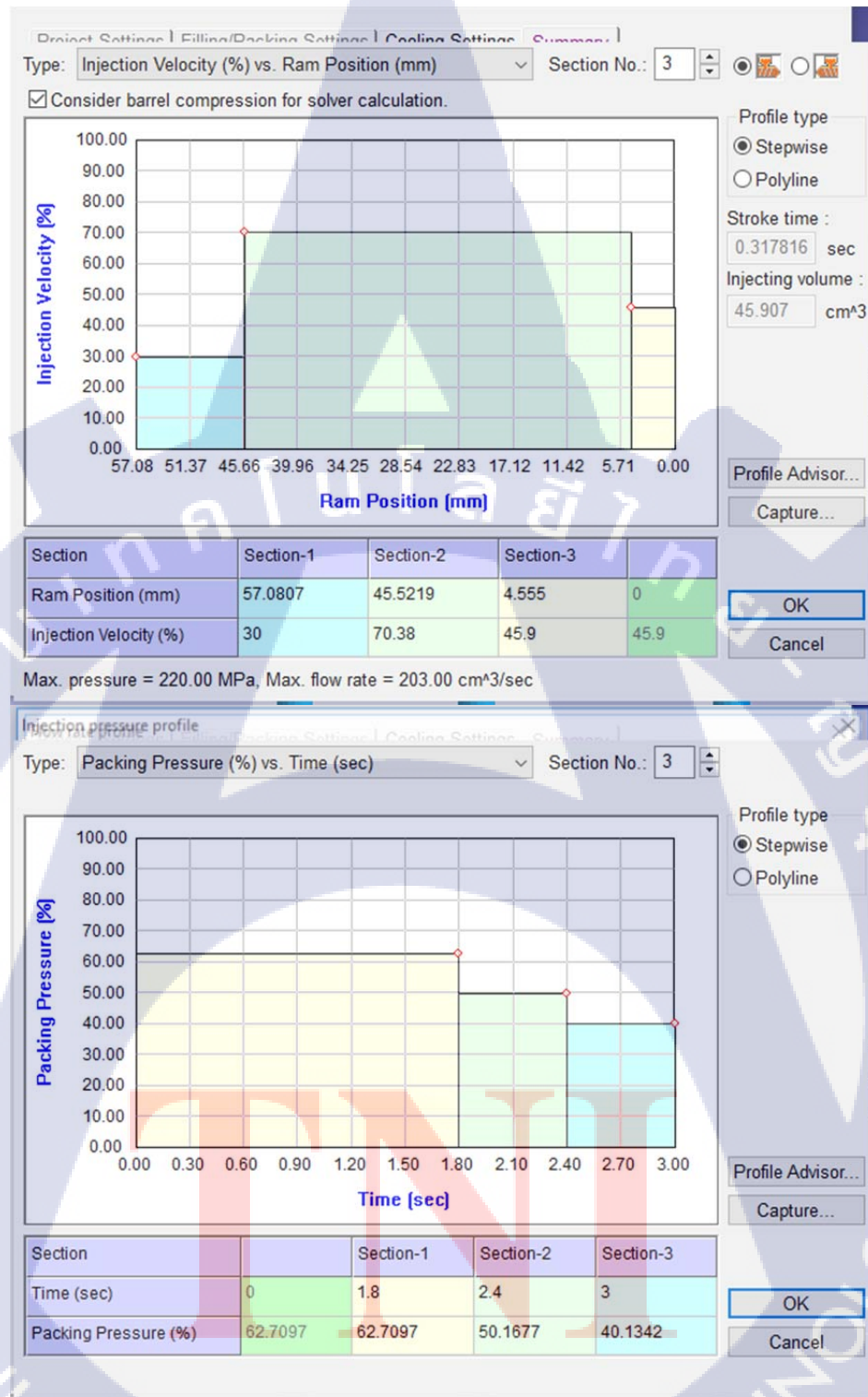
Material File : ABS_Toyolac700-314_1.mtr

Machine Settings

TOSHIBA - EC100 i2A cc ▾ View...



[Filling]	
Stroke time (sec)	0.317816
Melt Temperature (oC)	250
Mold Temperature (oC)	50
Maximum injection pressure (MPa)	220
Injection volume (cm ³)	45.907
[Packing]	
Packing Time (sec)	3
Maximum packing pressure (MPa)	220
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	25
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	95
Air Temperature (oC)	25
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	33.3178
Mesh file	ASTM D638_82.mfe
Material file	ABS_Toyolac700-314_1.mtr



ภาคผนวก จ.
บทความการประชุมวิชาการ

TNI

การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมนคลสุนทร ครั้งที่ 10”
 “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุนทร



การออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการร่วมกับการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน

Design of Injection Molding Conditions Using Process
 Simulator with Experiment to Study the Influence of
 Mechanical Properties of Polypropylene

วรชมนต์ ขมิจิตร์ และ ดอน แก้วดก

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตขั้นสูง สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
 เลขที่ 1771/1 ซ.พัฒนาการ 37 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

E-mail ch.wassamon_st@tni.ac.th

บทคัดย่อ

คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกนอกจากจะขึ้นกับชนิดของพลาสติกแล้วยังขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งเป็นส่วนสำคัญ การที่จะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ผู้ผลิตต้องเข้าใจถึงอิทธิพลของกระบวนการที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของการฉีดขึ้นรูปพลาสติกพอลิโพรพิลีน เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลสูงสุด หลักการพื้นฐานคือ การเปลี่ยนสถานะของพลาสติกให้เป็นของเหลว การฉีดเข้าตามแบบแม่พิมพ์ การอัดยี้ การหล่อเย็น งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองร่วมกับการจำลองการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม แบ่งการทดลองเป็น 5 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันฉีด อัตราความเร็วในการฉีดและความดันฉีดพลาสติก ในการฉีดขึ้นรูปอุณหภูมิในการหลอมละลายเป็นพารามิเตอร์การประมวลผลที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุณหภูมิในการหลอมละลาย เนื่องจากจะส่งผลต่อพฤติกรรมทางกายภาพของอุณหภูมิของขึ้นรูปแม่พิมพ์ ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมพบว่ามีความเชื่อมโยงกับลักษณะทางกายภาพของขึ้นงานฉีด จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบเงื่อนไขการฉีดร่วมกับวิธีการทางสถิติเพื่อระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อความแข็งแรงนั้นได้มาและวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของขึ้นงานฉีด

คำสำคัญ: พารามิเตอร์การฉีดขึ้นรูป, พอลิโพรพิลีน, คุณสมบัติเชิงกล, วิธีการทางสถิติ

Abstract

Properties of plastic products depend not only on the type of plastic but also on the production process, which is an important part. To mold the product to meet the desired specifications Manufacturers must understand the factor of the process on the properties of the molded product. The objective of this research is to study the parameters of injection molding of polypropylene plastic. To obtain the highest mechanical properties. The basic principle is Changing the status of plastic to liquid Injection by mold, compression, coolant. This research was designed to made experiment with injection molding simulation using engineering programs simultaneously. The

experiment was divided into 5 factors and each factor was divided into 3 levels which are plastic Melt temperature, Mold temperature, Holding pressure, Injection speed and Injection pressure. In injection molding melting temperature is an important processing parameter to increase efficiency of melting temperature because it will affect the flow behavior and quality control of the molded parts. The simulation results from the program show that it is linked to the physical characteristics of the injection molding work. Therefore, it is used as a tool for designing injection conditions together with Taguchi method to specify the most suitable conditions. The results show that the main parameters affecting the strength are obtained and analyzed to improve the mechanical strength of the injection molding workpiece.

Keywords: Injection Molding Parameters, Polypropylene, Mechanical Properties, Taguchi method

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกกำลังเป็นที่นิยมและกำลังเติบโตเนื่องจากพลาสติกสามารถใช้ทดแทนโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติเชิงกลซึ่งหมายถึงความสามารถในการทนต่อภาระในขณะใช้งาน ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่เป็นที่นิยมคือกระบวนการฉีดพลาสติก ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีคุณภาพตามความต้องการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การออกแบบแม่พิมพ์ ส่วนที่สองคือเครื่องฉีดพลาสติกรวมถึงการออกแบบกระบวนการฉีดขึ้นรูป ส่วนสุดท้ายคือวัตถุดิบเครื่องจักรกล การศึกษาสมบัติของพอลิโพรพิลีน (PP) พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และแรงกดต่อความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์ [1] การออกแบบการทดลอง (DoE) ได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบแนวโน้มของความแข็งแรงเชิงกลของ PP [2] วิธีการทางสถิตินำไปใช้ในการวางแผนการจำลองและการทดลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่สุดคืออุณหภูมิหลอมเหลวและความดันในการบรรจุในกระบวนการฉีดขึ้นรูปสำหรับชิ้นส่วนพลาสติกเปลือกบาง [3] ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลมากที่สุดคืออุณหภูมิหัวฉีดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงโมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ [4] อิทธิพลของพารามิเตอร์การฉีดและรอยเชื่อมต่อสมบัติเชิงกลของ PP ในระหว่างการฉีดพลาสติกพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อแรงดึงสูงสุดและการขยายที่จุดหักคือแรงดันในการฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลว [5] ผลของพารามิเตอร์การฉีดขึ้นรูป การหดตัวในโพรพิลีน (PP) ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการศึกษาโดยใช้วิธีการทางสถิติและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ให้การสนับสนุนเปอร์เซ็นต์และปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดการหดตัวของ PP คืออุณหภูมิของแม่พิมพ์ [6] ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งความดันในการบรรจุมีประสิทธิภาพมากที่สุดในขณะที่ความดันในการฉีดมีความสำคัญน้อยที่สุด และอุณหภูมิหลอมเหลวและเวลาบรรจุมีความสำคัญ [7] ซอฟต์แวร์ Minitab ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยใช้อัตราส่วน S / N และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อดูปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดการหดตัวการทดสอบการยืนยันแสดงให้เห็นถึงการรวมกันที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์กระบวนการโดยใช้วิธีการทางสถิติเพื่อลดการหดตัวของชิ้นส่วน [8] พารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตชิ้นส่วนแบบบาง การศึกษาโดยใช้วิธีการทางสถิติและการทดสอบพบว่าความดันการบรรจุมีผลมากที่สุดในการบิดงอและการหดตัว [9-10] วิธีการทางสถิติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหดตัวของพลาสติก PP และ PS นอกจากนี้ยังใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อจำลองกระบวนการและสามารถหาตัวแปรที่มีอิทธิพลของการหดตัวในได้ PP [11]

การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10”
 “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์



บทความนี้ใช้วิธีการทางทฤษฎีเป็นหนึ่งในวิธีการปรับให้เหมาะสมซึ่งอาร์เรย์แบบตั้งฉากนั้นสร้างขึ้นจากการออกแบบการทดลอง พารามิเตอร์การประมวลผลที่สำคัญโดยใช้ Moldex3D ถูกนำมาใช้เพื่อทำการทดลองหลัก ซอฟต์แวร์จำลอง Moldex3D เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้น สำหรับการปรับกระบวนการให้เหมาะสมพารามิเตอร์ต้องทำงานในระดับที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่ยอมรับได้

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 โปรแกรม Moldex3D R14 เป็นซอฟต์แวร์การจำลอง Moldex3D เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้น การทดลองนี้ใช้เพื่อดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทดสอบหลักเนื่องจากพารามิเตอร์ต้องทำงานในระดับที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพที่ยอมรับได้

1.2 โปรแกรม Minitab เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลทางสถิติและพล็อตกราฟ

2. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัสดุภายใต้การศึกษาคือพอลิโพรพิลีนเกรด 1100NK เป็นพอลิโพรพิลีน Homo-polymer สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่จัดทำโดย บริษัท โออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) คุณสมบัติทั่วไปของ PP แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน

Physical properties	Standard	Unit	Value
Melt Flow Index (2.16 kg/230°C)	ASTM D1238	g/10min.	11
Tensile Strength at Yield	ASTM D638	N/mm ²	33
Elongation at Yield	ASTM D638	%	30
Charpy Notched Impact Strength (at 23°C)	DIN 53453	kJ/m ²	3
Flexural Modulus (1% SECANT)	ASTM D790	MPa	1300
Rockwell Hardness	ASTM D785	R-Scale	105
Heat Distortion Temperature (Load 0.45 N/MM ²)	ASTM D 648	°C	95

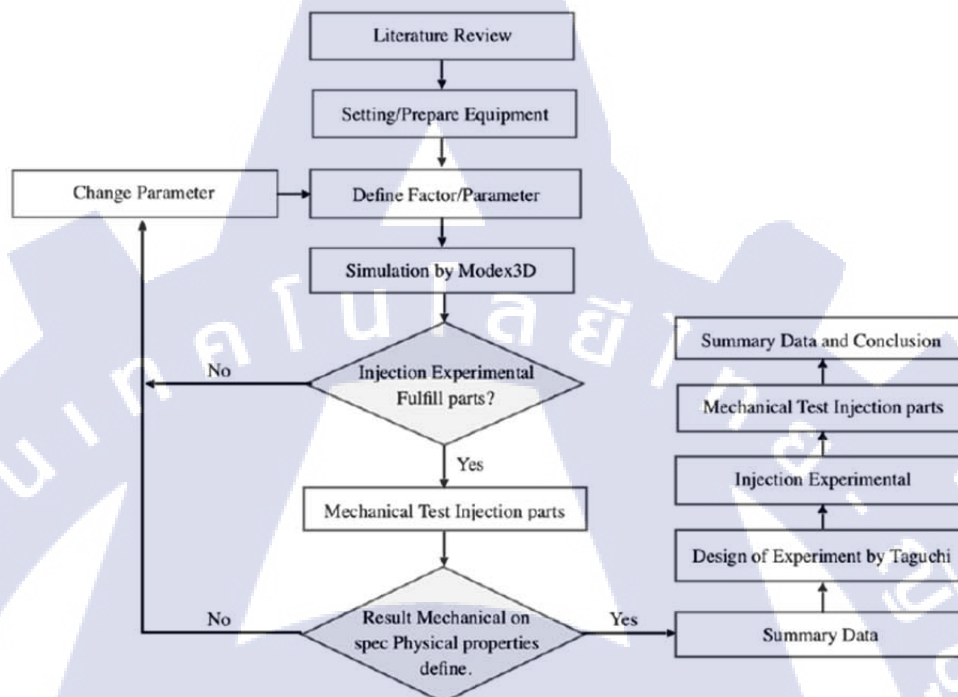
ที่มา:IRPC Public company limited

2.2 เครื่องฉีดพลาสติกในการทดลองใช้เครื่องฉีดพลาสติกของ Toshiba Machine รุ่น EC100S

3. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของการฉีดขึ้นรูปของพอลิโพรพิลีน (PP) สำหรับสมบัติเชิงกลสูงสุด เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนฉีดพลาสติก วิธีการวิจัยอธิบายไว้ในรูปที่ 1

การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10”
 “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์



รูปที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการทางสถิติที่ใช้สำหรับการทดลองซึ่งการศึกษานี้เลือกอาร์เรย์ L27 orthogonal โดยการทดลองได้ดำเนินการกับ พารามิเตอร์การประมวลผลที่ควบคุมได้สามระดับห้าปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์, อุณหภูมิหลอมละลาย, ความเร็วในการฉีด, ความดันการฉีด และ แรงดันฉีด อาร์เรย์ L27 orthogonal และพารามิเตอร์กระบวนการและระดับแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: พารามิเตอร์และระดับของการทดลอง

Item No.	Factors	Level 1	Level 2	Level 3
1	Melt Temperature, A ($^{\circ}$ C)	220	230	240
2	Mold Temperature, B ($^{\circ}$ C)	10	20	30
3	Injection Speed, C (mm/sec)	60	130	200
4	Injection pressure, D (MPa)	50	60	70
5	Holding Pressure, E (MPa)	20	35	50

ผลการวิจัย

1. กระบวนการจำลองผลลัพธ์และการวิเคราะห์ที่ใช้ซอฟต์แวร์ Moldex3D สามารถช่วยตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ สำหรับการปรับกระบวนการให้เหมาะสมพารามิเตอร์ต้องทำงานในระดับที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ ซึ่งพารามิเตอร์การจำลองที่ใช้ในการดำเนินการหลักมีดังต่อไปนี้:

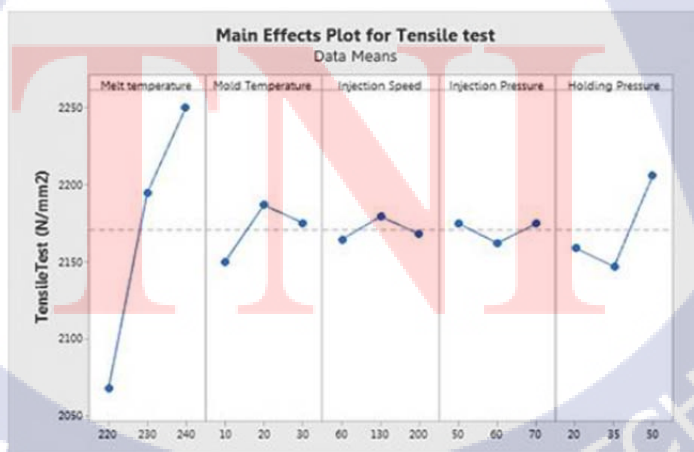
- อุณหภูมิหลอมละลาย: 230 °C
- อุณหภูมิแม่พิมพ์: 20 °C
- แรงดันฉีด: 35 MPa
- ความดันฉีด: 60 MPa
- ความเร็วฉีด: 130 มม. / วินาที

ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจากการทดลองพบว่าผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุด 2109.87 N การทดสอบความเครียดสูงสุดเท่ากับ 35.1645 N / mm² ผลการทดสอบแรงกระแทกคือ 4.5 KJ / m² และผลการทดสอบความแข็ง 117.5 หลังจากได้พารามิเตอร์หลักจากโปรแกรมได้นำพารามิเตอร์ที่ได้ไปทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งผลลัพธ์มีดังต่อไปนี้

2. กระบวนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.1 การทดสอบแรงดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและผลการฉีดปัจจัยตามรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าสภาพการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดสำหรับการทดสอบแรงดึงสูงสุดคืออุณหภูมิหลอมเหลว 240 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C ความเร็วในการฉีด 130 มม / วินาที ความดันฉีด 50 MPa แรงดันฉีด 50 MPa ผลทางกลพบว่าผลการทดสอบความแข็งแรงสูงสุดคือ 2284.13 N



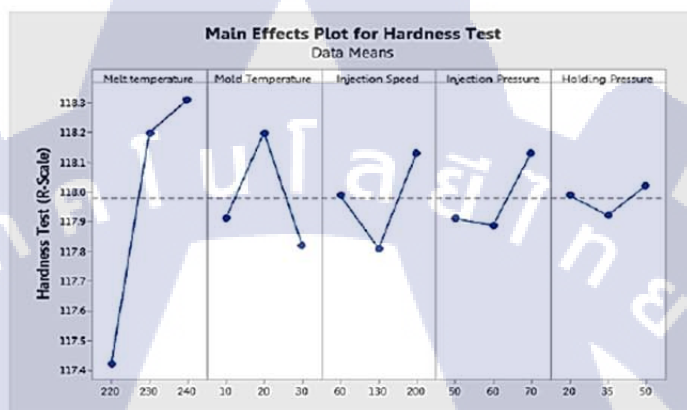
รูปที่ 2: ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและปัจจัยการฉีดขึ้นรูป

การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10”
 “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์



2.2 ทดสอบความแข็ง

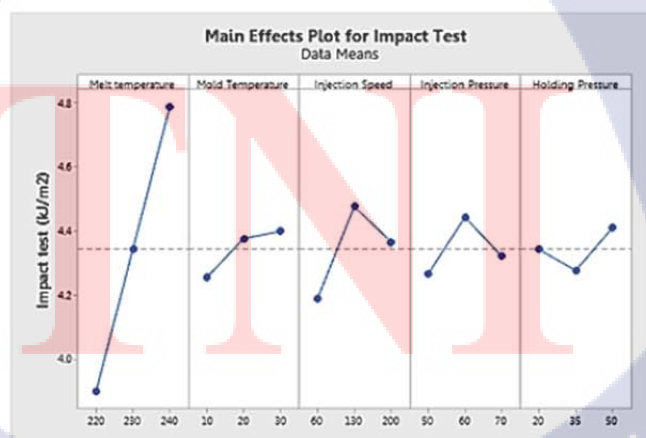
ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความแข็งและผลการฉีดปัจจัยดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสภาพการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดสำหรับการทดสอบแรงดึงสูงสุดคืออุณหภูมิหลอมเหลว 240 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20 °C ความเร็วฉีด 200 มม. / วินาที ความดันฉีด: 70 MPa แรงดันฉีดต่ำ 50 MPa ผลทางกลพบว่าค่าการทดสอบความแข็งสูงสุดคือ 118.6 N



รูปที่ 3: ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความแข็งกับปัจจัยการฉีดขึ้นรูป

2.3 การทดสอบแรงกระแทก

ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงกระแทกและปัจจัยการฉีดขึ้นรูปดังรูปที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิการฉีด 240 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C ความเร็วในการฉีด 130 มม. / วินาที ความดันฉีด 60 MPa แรงดันฉีดต่ำ 50 MPa การทดสอบแรงกระแทกสูงสุด คือ 4.8 KJ / m²



รูปที่ 4: ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงกระแทกและปัจจัยการฉีดขึ้นรูป

3. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในเชิงสถิติ [11] แสดงในตารางที่ 3, ตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามตารางทั้งสามนี้ กำหนดความหมายของแต่ละปัจจัยที่ตอบสนองต่อตัวแปรตอบสนองตามตารางทั้งสามนี้ อุณหภูมิหลอมเหลวมีผลกระทบมากที่สุดต่อคุณสมบัติเชิงกล [4] สอดคล้องกับหลักการที่ว่าอุณหภูมิในการหลอมละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานด้านคุณสมบัติเชิงกล [12] และแรงดันฉีดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกล [13] ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Minitab สามารถหาค่า P-Value ของอุณหภูมิหลอมเหลวของทั้งสามการทดสอบซึ่ง ผลการทดสอบแรงดึง ค่า P-Value ของอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 0.015 ผลการทดสอบความแข็ง ค่า P-Value ของอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 0.005 และผลการทดสอบแรงกระแทกค่า P-Value ของอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 0.000 ดังแสดงในตารางที่ 3, ตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 3: การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดสอบแรงดึง

Source	Degree of Freedom (DF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value
Melt temperature	1	1.26405	1.26405	7.08	0.015
Mold Temperature	1	0.15867	0.15867	0.89	0.357
Holding Pressure	1	0.24500	0.24500	1.37	0.255
Injection Speed	1	0.56180	0.56180	3.15	0.091
Injection Pressure	1	0.00642	0.00642	0.04	0.851
Error	21	3.75055	0.17860		
Total	26	5.98650			

ตารางที่ 4: การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดสอบความแข็ง

Source	Degree of Freedom (DF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value
Melt temperature	1	3.5556	3.55556	9.60	0.005
Mold Temperature	1	0.0356	0.03556	0.10	0.760
Holding Pressure	1	0.0050	0.00500	0.01	0.909
Injection Speed	1	0.0939	0.09389	0.25	0.620
Injection Pressure	1	0.2222	0.22222	0.60	0.447
Error	21	7.7744	0.37021		
Total	26	11.6867			

การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมนคลสุนทร ครั้งที่ 10”
 “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุนทร



ตารางที่ 5: การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของผลการทดสอบแรงกระแทก

Source	Degree of Freedom (DF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Value	P-Value
Melt temperature	1	3.55556	3.55556	65.43	0.000
Mold Temperature	1	0.09389	0.09389	1.73	0.203
Holding Pressure	1	0.02000	0.02000	0.37	0.551
Injection Speed	1	0.14222	0.14222	2.62	0.121
Injection Pressure	1	0.01389	0.01389	0.26	0.618
Error	21	1.14111	0.05434		
Total	26	4.96667			

บทสรุป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อความแข็งแรงนั้นได้มาและวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานฉีดและผลการจำลองจะได้รับพารามิเตอร์กระบวนการที่ดีที่สุดสำหรับความแข็งแรงสูงสุดในช่วงที่กำหนด ซึ่งจากการทดลองสามารถหาตัวแปรสำคัญในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ได้

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้พลาสติกประเภทพอลิโพรพิลีนเพียงชนิดเดียวในการศึกษา หากมีการดำเนินงานวิจัยต่อจากงานวิจัยนี้แนะนำให้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกอื่นซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทอื่นๆด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบพารามิเตอร์หลักโดยใช้โปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรม Moldex 3D เท่านั้นดังนั้น งานวิจัยครั้งต่อไปควรนำโปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรมโปรแกรมอื่นๆมาช่วยในการออกแบบพารามิเตอร์หลัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.Farotti and M.Natalini. (2018). Injection molding Influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer A first study. pp. 256–264. : Procedia structure Integrity.
- [2] Natalini, M. Sasso, M. Amodio, D. (2013). Comparison of numerical and experimental data in multi-objective optimization of a thermoplastic molded part. pp84-106: International Polymer Processing 28.
- [3] Ch. Chen, M. Chuang, Y. Hsiao, Y. Yang, Ch. Tsai, (2009). Simulation and experimental study in

การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชมนคลสุนทร ครั้งที่ 10"
 "วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน" ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์



- determining injection molding process parameters for thin shell plastic parts via design of experiments analysis. pp. 10752–10759: Expert Systems with Applications 36.
- [4] B. Ozcelik, (2011). Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method. pp. 1067–1072: International Communications in Heat and Mass Transfer 38.
- [5] T. Singh, M. Singh, M. Alam, M. Scholar, J. Uni-versity, Ch. Jaipur, (2014). Taguchi and ANOVA Analysis of Shrinkage of Injection molded polypropylene Component . Volume 5. Issue 7: The International Journal of Scientific & Engineering Research.
- [6] A. Akbarzadeh and M. Sadeghi. (2011). Parameter Study in Plastic Injection Molding Process using Statistical Methods and IWO Algorithm. Vol. 1, No. 2: International Journal of Modeling and Optimization.
- [7] H. Radhwan, M. T. Mustafa, A. F. Annuar, H. Azmi, M. Z. Zakaria and A. N. M. Khalil. (2015). An Optimization of Shrinkage in Injection Molding Parts by Using Taguchi Method. pp 1-8 | Vol. 10, No. 1. : Journal of Advanced Research in Applied Mechanics
- [8] Liao SJ, Chang DY. Chen HJ, Tsou LS. Ho JR, Yau HT, (2004). Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. pp. 917–28 : Polym Eng Sci.
- [9] E. Hakimian, A.B. Sulong, (2012). Analysis of warpage and shrinkage properties of injection molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method Materials and Design 42. pp.62–71
- [10] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ จันทนา จันทโร. (2536). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม.กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] Hsiung, C.M. and Cakmak, M. Journal of Applied Polymer Science.(1993).Effect of Injection Molding Conditions on the Crystallinity Orientation Gradient and Mechanical Properties of Poly, pp: 149-165, Vol. 47



RSNC2019

The 10th Rajamangala Surin National Conference

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

วราชมณฑ์ ชมจิตร และ ดอน แก้วดก

ได้นำเสนอผลงานวิจัยกลุ่ม วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ภาค บรรยาย
เรื่อง การออกแบบเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปโดยการใส่โปรแกรมจำลอง กระบวนการร่วมกับการทดลอง
เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของ PP

ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ราชชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10
"วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน"

ระหว่างวันที่ 19-20 กันยายน 2562

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

ให้ไว้ ณ วันที่ 20 กันยายน 2562

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ ลิม้ไชแสง)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สานาว์ เสากุล)
รองอธิการบดีประจำวิทยาเขตสุรินทร์