

การลดการบิดงอของชิ้นงานสำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยการหาค่าปัจจัย
ในกระบวนการฉีดและกระบวนการอบอ่อนที่เหมาะสม

THE REDUCTION OF WARPAGE FOR PLASTIC INJECTION MOLDING WITH
OPTIMIZING INJECTION PARAMETERS AND THE ANNEALING PROCESS



วิทยานิพนธ์สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-218-123

การลดการบิดงอของชิ้นงานสำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยการหาค่าปัจจัย
ในกระบวนการฉีดและกระบวนการอบอ่อนที่เหมาะสม

THE REDUCTION OF WARPAGE FOR PLASTIC INJECTION MOLDING WITH
OPTIMIZING INJECTION PARAMETERS AND THE ANNEALING PROCESS



วิทยานิพนธ์สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

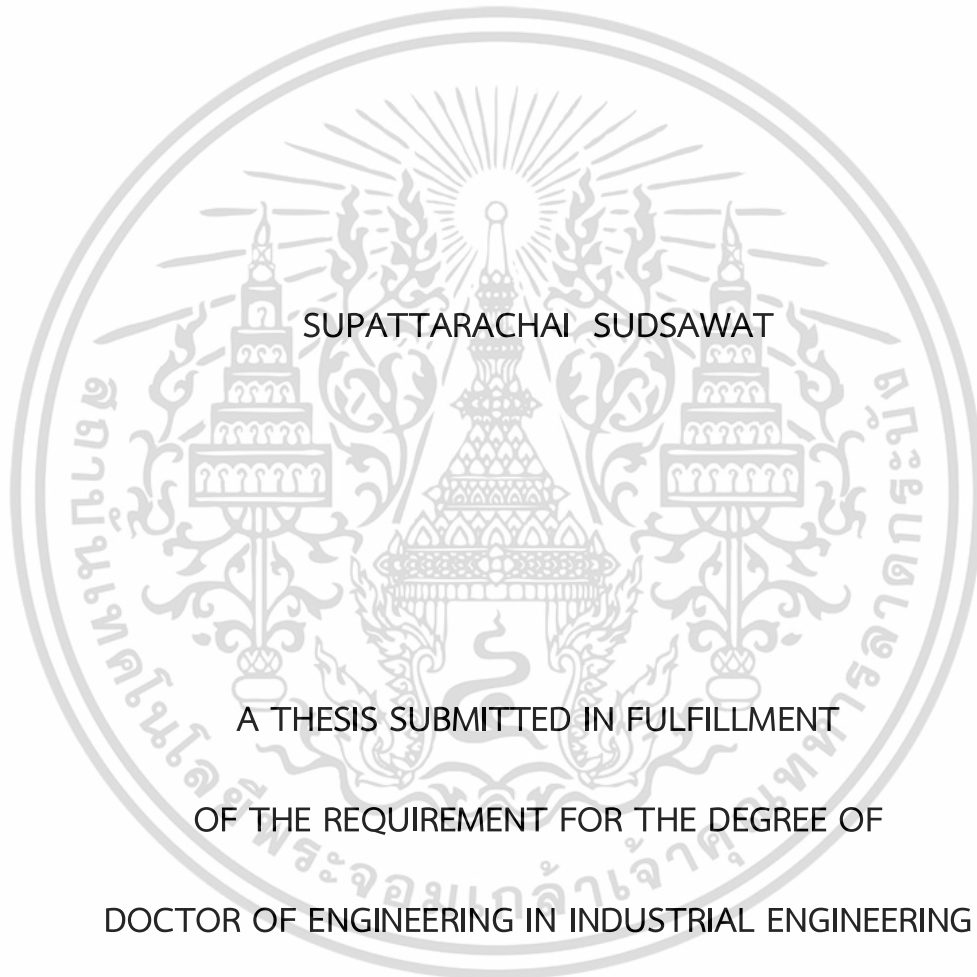
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-218-123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE REDUCTION OF WARPAGE FOR PLASTIC INJECTION MOLDING
WITH OPTIMIZING INJECTION PARAMETERS
AND THE ANNEALING PROCESS



SUPATTARACHAI SUDSAWAT

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-EN-D-218-123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดการบิดงอของชิ้นงานสำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยการ
หาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดและกระบวนการอบอ่อนที่เหมาะสม

นักศึกษา นายสุภัทรชัย สุตสวาท

รหัสประจำตัว 57601427

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

พ.ศ. 2562

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นงานพลาสติกและกระบวนการอบอ่อน (Annealing treatment) เพื่อลดการบิดงอ (Warpage) ของชิ้นงาน เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดเริ่มจากการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมกลาง (Composite Central Design, CCD) และทำการคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (Screening Factor) รวมถึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย (Analysis of Variance, ANOVA) และสร้างสมการการตอบสนองที่ผิว (Response Surface Methodology, RSM) ทำงานร่วมกันกับวิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการบิดงอของชิ้นงาน โดยค้นพบว่าปัจจัยในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการบิดงอของชิ้นงาน คือ อัตราการฉีด เวลาการฉีดช้า ความดันฉีดช้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น และการใช้กระบวนการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย สามารถหาค่าปัจจัยทั้งหมดปัจจัยที่เหมาะสมและลดการบิดงอของชิ้นงานได้ดี เมื่อทำการทดลองฉีดขึ้นงานจริงโดยเปรียบเทียบกับการฉีดขึ้นงานปกติ ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ คือ การนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดแล้วเข้าสู่กระบวนการอบอ่อนเพื่อปรับปรุงการเกิดการบิดงอให้ลดลงมากขึ้น โดยผลการวิจัยพบว่า การอบชิ้นงานโพลิสไตรีน (General Purpose Polystyrene (GPPS) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าการเกิดการบิดงอสามารถลดลงได้ 76.32 เปอร์เซ็นต์ นอกไปจากนี้ยังพบว่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานสามารถลดลงได้ 42.57 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน โดยการวัดความเค้นตกค้างโดยวิธีโฟโตอีลาสติกซิตี (Photoelasticity) ดังนั้นสรุปได้ว่าการแก้ปัญหาคุณภาพด้านการบิดงอของชิ้นงานฉีดพลาสติกโดยใช้วิธีการหาปัจจัยในกระบวนการฉีดแบบหิ่งห้อยร่วมกับวิธีการอบอ่อนชิ้นงานสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีนัยสำคัญและนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการฉีดพลาสติกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	THE REDUCTION OF WARPAGE FOR PLASTIC INJECTION MOLDING WITH OPTIMIZING INJECTION PARAMETERS AND THE ANNEALING PROCESS
Student	Mr. Supattarachai Sudsawat
Student ID.	57601427
Degree	Doctor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This dissertation provided the methodology of optimizing plastic injection parameters and annealing treatment process to achieve the minimization of warpage. The techniques that were implemented to optimize parameters during injection process were the design of Experiment (DOE) by using composite Central Design (CCD), screening factors, and analyzing of variance (ANOVA) and was employed to select the significant factors. Then, there were the implementation of response surface methodology (RSM) and firefly algorithm (FA) to optimize the processing parameters for warpage reduction. The results found that injection flow rate, packing time, packing pressure, melting temperature, mold temperature, and cooling time were indicated to be significant parameters for warpage and FA methodology could present suitable values 6 factors. FA method could reduce warpage more than the recommended condition method. The second section of this dissertation was a post-injection part treatment for more warpage reduction. The results found that General Purpose Polystyrene (GPPS) injected parts could relieve warpage at 76.32 % compared with a part without annealing treatment through annealing process at 85 °C and 120 mins. Furthermore, this research investigated residual stress that annealing process could relieve residual stress at 42.57 % by the measurement of residual stress via the photoelasticity method. In conclusion, the warpage could be handled perfectly through this research methodology and this research could be a guideline for the plastic injection molding industries to avoid and reduce the warpage during manufacturing process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การลดการบิดงอของชิ้นงานสำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดและกระบวนการอบอ่อนที่เหมาะสม” สามารถสำเร็จจุลวงได้ด้วยดี จะต้องอาศัยแหล่งความรู้ต่างๆ ทั้งจากคำแนะนำและการให้คำปรึกษาทั้งในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติจากบุคคลและคณะบุคคลต่างๆ ที่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ดังนี้

1. บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ทุกสถาบันการศึกษาที่เคยศึกษามา ที่ให้การอบรมและสั่งสอนในสิ่งที่ดีพร้อมทั้งสิ่งที่ถูกต้อง ตลอดจนส่งเสริมในด้านการศึกษาได้อย่างดีที่สุด

2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สนับสนุนทุนการนำเสนอผลงานวิทยานิพนธ์

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาระหว่างดำเนินการศึกษา ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขเอกสาร

4. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ รองประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข กรรมการสอบ กรุณาให้คำปรึกษาระหว่างดำเนินการศึกษา ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไข และกรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อความสมบูรณ์ของการจัดทำวิทยานิพนธ์

5. บริษัท คอร์เทค ซิสเต็มส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม Moldex3D ในกระบวนการจำลองการฉีดพลาสติก

6. สำหรับคุณค่าความดีและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอขอบแต่ผู้มีพระคุณและทุกๆ ท่านที่ให้ความกรุณาและความอนุเคราะห์ ที่ยังมีได้กล่าวถึง

สุภัทรชัย สุตสวาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้พื้นฐานของกระบวนการฉีดพลาสติก.....	4
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองในกระบวนการฉีดพลาสติก.....	14
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติและอัลกอริทึมหึ่งห้อย	21
2.4 พฤติกรรมทางกลและปัจจัยที่กระทบกับการบิดงอของชิ้นงาน.....	50
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปัจจัยในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหา ด้านการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก.....	66
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความเค้นตกค้างและการอบอ่อนที่ส่งผลกระทบท่อ การบิดงอของชิ้นงานพลาสติก.....	73
2.7 กระบวนการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่มีผลบ่งชี้โดยตรงต่อการลดการบิดงอของ ชิ้นงานพลาสติกโดยวิธีไฟโตอิลาสติกซิตี.....	74
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	79
3.1 การกำหนดลักษณะทั่วไปของชิ้นงานและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง.....	82
3.2 การออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น.....	83
3.3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยโปรแกรม Moldex3D.....	90
3.4 การทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัย.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยและสร้างสมการกำหนดฟังก์ชันที่เหมาะสม.....	92
3.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการหาจากพื้นผิวตอบสนอง และจากวิธีการหาค่าตอบแบบหึ่งห้อย.....	92
3.7 การยืนยันผลและการเปรียบเทียบผลการทดลองการลดการบิดงอของชิ้นงาน.....	93
3.8 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ.....	94
3.9 นำชิ้นส่วนทดลองเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน.....	95
3.10 การติดตามผลและสรุปผลการทดลอง.....	96
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	97
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4}	97
4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} ด้วย Minitab.....	98
4.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง.....	103
4.4 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง.....	111
4.5 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง และการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสมโดยหลักการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย.....	115
4.6 ผลการวิเคราะห์การฉีดชิ้นงานพลาสติกจริงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานผ่านการจำลองโดยโปรแกรม Moldex3D.....	118
4.7 ผลการวิเคราะห์กระบวนการอบอ่อนชิ้นงานโดยวิธี Photoelasticity.....	126
บทที่ 5 สรุปผล.....	134
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	134
5.2 สิ่งที่ได้จากการพัฒนางานวิจัย.....	135
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย.....	135
เอกสารอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก ก.....	146
ภาคผนวก ข.....	165
ประวัติผู้เขียน.....	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แผนการเก็บข้อมูลและปัจจัยที่กระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง.....	22
2.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table).....	24
2.3 แสดงโครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดแผนการทดลอง.....	33
2.4 แสดงชนิดของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง.....	36
2.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า D_g ที่ $n = 50$ และ $t = 500$ iterations	71
2.6 ค่าความหน่วงสัมพัทธ์ (the relative retardation (δ)) กับค่าแถบสี แดง เขียว น้ำเงิน ตามมาตรฐาน ASTM-D4093-95	78
3.1 คุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกโพลีสไตรีนที่ใช้เป็นวัสดุในการทดลอง.....	82
3.2 การคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ในการทดลองในขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลอง เบื้องต้น.....	85
3.3 การสรุปค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลต่อการบิดงอและหดตัวของ ชิ้นงาน.....	87
3.4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยต่างๆ ที่นำมาทำการทดลองตามแผนการทดลองแฟคทอเรียล บางส่วน 2^{8-4} (2^{8-4} Fractional Factorial Experiment).....	87
3.5 แผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4}	90
4.1 ผลการวิเคราะห์การโค้งงอเสียรูปของชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลอง แฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4}	97
4.2 ค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญและปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญที่มีผลต่อการบิดงอของชิ้นงานจากกระบวนการ Screening factors.....	103
4.3 การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง.....	104
4.4 รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order.....	105
4.5 แผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order.....	107
4.6 ผลการทดลองการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง.....	109
4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการพื้นผิวผลตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับ การบิดงอของชิ้นงาน.....	111
4.8 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์ของทั้ง 6 ปัจจัยในพจน์เส้นตรง พจน์ยกกำลังสอง และพจน์ของ ปัจจัยร่วม ที่ได้จากการวิเคราะห์ ANOVA.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการทดสอบค่าการบิดงอระหว่างค่าการบิดงอที่ได้จากสมการและค่าการบิดงอที่ได้จากโปรแกรม Moldex3D.....	117
4.10 ผลการทดลองการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยโปรแกรม Moldex3D เปรียบเทียบระหว่างค่ากลางการปรับตั้งเครื่องจักรและวิธี FA.....	118
4.11 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากค่าการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method).....	119
4.12 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Response optimization.....	120
4.13 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย.....	121
4.14 สรุปผลเปรียบเทียบของการบิดงอของชิ้นงาน.....	125
4.15 ผลการทดลองการหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงาน 9 สภาวะ ณ จุดตรวจสอบที่ E1 ถึง E33....	130
4.16 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าความบิดงอของชิ้นงาน 9 สภาวะ (No.1 ถึง No.9)..	131
4.17 สรุปผลเปรียบเทียบของการบิดงอและค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบอ่อนและหลังกระบวนการอบอ่อน.....	133

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสายโซ่ของพลาสติกเชิงเดี่ยวที่แสดงมอนอเมอร์และพันธะโคเวเลนต์.....	5
2.2 แสดงโครงสร้างของโมเลกุลพลาสติกทั้ง 3 ชนิด.....	5
2.3 แสดงการเรียงตัวของสายโซ่แบบ Amorphous และแบบ Semi crystalline.....	6
2.4 แสดงลักษณะทางกายภาพและสูตรทางเคมีของโพลีสไตรีน.....	7
2.5 หน่วยการทำงานหลักของเครื่องฉีดพลาสติก	8
2.6 กรวยเติมของเครื่องฉีดพลาสติก	8
2.7 กระบอกฉีดพลาสติก	9
2.8 สกรูโดยทั่วไปที่ใช้กับเครื่องฉีดพลาสติก	9
2.9 หัวฉีดแบบเปิด (Open Nozzle)	11
2.10 หัวฉีดแบบปิด (Shut-off Nozzle)	11
2.11 ชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ทั้งสองแบบ.....	12
2.12 ชุดควบคุมของเครื่องฉีดพลาสติก	12
2.13 ชั้นส่วนแม่พิมพ์ 2 Plates	13
2.14 ชั้นส่วนแม่พิมพ์ 3 Plates	14
2.15 แสดงรอบการทำงานของการฉีดขึ้นงาน.....	14
2.16 แสดงการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกและการทำงานของแต่ละกระบวนการ	15
2.17 แสดงการหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก	16
2.18 แสดงจุดการติดตั้งแผ่นให้ความร้อนในกระบวนการฉีดพลาสติก	17
2.18 แสดงพฤติกรรมของการคลายความเค้นของโพลิเมอร์แต่ละประเภท	21
2.19 ตัวอย่างกราฟ I Chart of Residual	26
2.20 ตัวอย่างกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ.....	27
2.21 ตัวอย่างกราฟทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Residual และ Fit	27
2.22 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรม	28
2.23 แสดงรูปแบบการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย.....	31
2.24 ตัวอย่างรูปพื้นที่ผิวตอบสนองแบบสามมิติ.....	38
2.25 ตัวอย่างโปรแกรมและองค์ประกอบต่างของโปรแกรม Minitab.....	39
2.26 ตัวอย่างการแสดงผลบน Session Window	40
2.27 ตัวอย่างการแสดงผลบน Data Windows	40
2.28 ตัวอย่างการแสดงผลรูปแบบ Graph Windows.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 ตัวอย่างการแสดงรูปแบบ Project Manager	41
2.30 ตัวอย่างการแสดง Open Worksheet.....	42
2.31 ตัวอย่างการแสดงผลบน Session.....	43
2.32 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ Normality Probability.....	44
2.33 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ Pareto chart.....	45
2.34 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main Effect Plot).....	45
2.35 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟวิเคราะห์ปัจจัยร่วม (Interaction Effect Plot).....	46
2.36 แสดงหลักการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย.....	50
2.37 แสดงพฤติกรรมการคลายความเค้นของโพลีเมอร์แต่ละประเภท	51
2.38 ระบบสปริงยืดหยุ่นและระบบหน่วง.....	53
2.39 แบบจำลองความหยุ่นหนืดของ Maxwell.....	53
2.40 แบบจำลองความหยุ่นหนืดของ Kelvin-Voigt.....	54
2.41 แบบจำลองความหยุ่นหนืดของ Standard Linear Solid.....	55
2.42 แบบจำลองความหยุ่นหนืดแบบ Four Element Maxwell แบบ A Maxwell model & a Voigt Model series และแบบ A Maxwell model with a spring & a dashpot.	56
2.43 แสดงแบบจำลองแบบ Modified Two-unit Maxwell Model.....	59
2.44 กระบวนการเกิดความเค้นตกค้างที่เกิดจากสภาวะการเหนียวนำการไหล.....	60
2.45 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากสาเหตุการหดตัวของวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างการฉีดขึ้นรูป.....	61
2.46 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากสาเหตุอัตราการหล่อเย็นที่ไม่สมดุลระหว่างผนังทั้ง 2 ข้างของแม่พิมพ์.....	61
2.47 การหดตัวของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกัน.....	62
2.48 การหดตัวของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	62
2.49 แสดงแผนภูมิ PVT ของโพลีสไตรีน.....	63
2.50 แสดงการหดตัวของปริมาตรจำเพาะของพลาสติกแบบคงที่.....	64
2.51 แสดงการบิดงอของชิ้นงานแบบคานหลังกระบวนการฉีดเสร็จสิ้น.....	65
2.52 แสดงกลุ่มวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด และกลุ่มวิธีหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด.....	67
2.53 แสดงวิธีการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างบนชิ้นงานโดยโพลาลอยด์ตั้งแกนที่ค้นตั้งฉากต่อกัน....	75
3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ชิ้นงาน Dog Bone ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type1.....	82
3.3 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น Toshiba IS80.....	83
3.4 แผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานที่จะนำไปเป็น ปัจจัยนำเข้าในการทดลองตามแผนการทดลองเบื้องต้น.....	86
3.5 แสดงแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} โดยใช้โปรแกรม Minitab.....	89
3.6 รูปแบบจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกบนโปรแกรม Moldex3D.....	91
3.7 แสดงตู้อบชิ้นงานและกระบวนการอบชิ้นงานพลาสติก.....	95
3.8 แสดงจุดการตรวจวัดของการบิดงอของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	96
3.9 แสดงหลักการวัดความเค้นตกค้างของชิ้นงานผ่านกระบวนการ Photoelasticity	96
4.1 Half normal plot วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานโดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น.....	98
4.2 Pareto chart วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานโดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น.....	99
4.3 รูปแบบโครงสร้างซ้ำซ้อนของ Main Effects และ Interaction Effects.....	100
4.4 Main effects plot วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานโดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น.....	101
4.5 Interaction Plot เพื่อใช้วิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน โดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น.....	102
4.6 Residual plots ของค่าผลตอบการบิดงอที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง.....	112
4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสม.....	113
4.8 ผลคำตอบที่เหมาะสมของค่าการบิดงอ (y) ที่ต่ำที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$)	114
4.9 แสดงกระบวนการฉีดชิ้นงานจริง.....	119
4.10 แสดงจุดการวัดความหนาของชิ้นงานเทียบกับกระนาบการวัด XYZ.....	119
4.11 แสดงผลการเกิดการบิดงอของชิ้นงานผ่านโปรแกรม Moldex3D ซึ่งพบว่าที่ปลายของชิ้นงาน ทดสอบมีการบิดงอมากที่สุด.....	122
4.12 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงอจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามการแนะนำของการปรับตั้ง เครื่องจักร.....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงอจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสม แบบ Response optimization.....	124
4.14 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงอจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสม แบบหึ่งห้อย.....	125
4.15 แสดงภาพถ่ายตามหลักการ Photoelasticity ของชิ้นงานเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่สภาวะต่างๆ กับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบอ่อน.....	127
4.16 แสดงผลของค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงาน No.1. ถึง No.9 ทั้ง 33 จุดตรวจสอบ.....	131
4.17 แสดงผลการวัดค่าการบิดงอของแต่ละจุดทดสอบเปรียบเทียบกับระหว่างค่าการบิดงอจากการฉีดจริงที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนและผ่านกระบวนการอบอ่อนที่สภาวะต่างๆ.....	132
ก-1 การสร้าง Mesh Model แบบสามมิติ.....	147
ก-2 การสร้างระบบหล่อเย็นในโปรแกรม Moldex3D Designer	148
ก-3 ไฟล์ชิ้นงาน Dog bone พร้อมระบบการฉีดในโปรแกรม Moldex3D R13.....	148
ก-4 แสดงการกำหนด Project Setting และกระบวนการเลือกชนิดพลาสติกในกระบวนการฉีด	149
ก-5 แสดงการกำหนดเครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 กระบวนการจำลองการฉีด.....	150
ก-6 แสดงการกำหนดค่า Filling และ Packing Setting	150
ก-7 แสดงการกำหนดค่า Cooling Setting.....	151
ก-8 แสดงการสรุปค่าการปรับตั้งในกระบวนการจำลองการฉีด Summary Window.....	151
ก-9 แสดงหน้าต่าง Computation ในกระบวนการเลือกฟังก์ชันวิเคราะห์เพิ่มเติม.....	152
ก-10 แสดงหน้าต่าง Check Run Data ในกระบวนการจำลองการฉีด.....	152
ก-11 แสดงหน้าต่าง Analysis Sequence Setting.....	153
ก-12 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 45 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	154
ก-13 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	155
ก-14 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 75 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-15 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	156
ก-16 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	156
ก-17 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 90 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที.....	157



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมพลาสติกถือเป็นอีกกลุ่มอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของไทยอย่างมาก ในปี 2548 - 2561 มีมูลค่ารวม 1,434,397.32 ล้านบาทหรือเฉลี่ย 102,456.95 ล้านบาทต่อปี [1] นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมพลาสติกยังเป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ ฯลฯ โดยในประเทศไทยมีสมาชิกของกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกจำนวนรวมกว่า 3,000 โรงงาน [2] ซึ่งโรงงานผลิตชิ้นส่วนพลาสติกเป็นโรงงานที่มีการใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างสูง และกลายเป็นต้นทุนหลักของโรงงานประเภทนี้ [3] โดยที่ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกภายในประเทศเป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ โดยที่ประเทศไทยเคยเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกส่งออกติดอันดับ 1 ของอาเซียน ในปี พ.ศ. 2557 [4] โดยที่ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Plastic injection Molding Process) เป็นกระบวนการที่ถูกใช้มากที่สุด [5]

ดังนั้น การให้ความสำคัญกับปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการฉีดจึงเป็นเรื่องสำคัญ ยกตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ คือ การเกิดครีบ (Flash) การเกิดรอยยุบ (Sink mark) การเกิดการหดตัว (Shrinkage) การเกิดการบิดงอ (Warpage) [6] โดยปัญหาของการเกิดการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานเป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้กับชิ้นงานในระหว่างกระบวนการฉีดได้ [7] โดยปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกในอุตสาหกรรมที่ผ่านมา มีการอาศัยประสบการณ์ของช่างหรือผู้ควบคุมเครื่อง และทำการทดลองซ้ำๆ เพื่อค้นหาปัจจัยในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมและกำหนดเป็นเงื่อนไขในกระบวนการฉีด เพื่อให้ชิ้นงานออกมาได้คุณภาพ แต่กระบวนการนี้ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการทดลองเป็นอย่างมากอันเนื่องมาจากต้องทำการทดลองที่สภาวะการปรับตั้งเครื่องฉีดในหลายๆ สภาวะเพื่อค้นหาการปรับตั้งเครื่องจักรที่ดีที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีเทคนิคการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีในการทำนายผลการฉีดและการปรับตั้งที่ประหยัดเวลาในการฉีดพลาสติก เช่น การจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element analysis) ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำสูง [8] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาด้านการหดและบิดงอของชิ้นงานพลาสติกที่เป็นปัญหาสำคัญของชิ้นงานพลาสติก ยกตัวอย่างเช่น มีความพยายามในการวิเคราะห์ผลกระทบของการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพลาสติกที่มีสาเหตุหลักมาจากการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการฉีดและหลังจากกระบวนการฉีดพลาสติก [9 - 15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการวิจัยในครั้งนี้คือการนำเสนออัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ในการระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก และกระบวนการอบอ่อน (Annealing treatment) เพื่อการอบคืนตัวของชิ้นงานพลาสติกหลังกระบวนการฉีดพลาสติก นำไปสู่การผลิตชิ้นงานที่ได้คุณภาพ ไม่ก่อให้เกิดการฉีดขึ้นรูปและขนาดของชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือเกิดชิ้นงานที่เกิดการบิดงอ อันส่งผลทำให้เกิดต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูงขึ้น เพื่อนำไปสู่การยกระดับความสามารถในอุตสาหกรรมพลาสติกให้สามารถตอบสนองความต้องการชิ้นงานพลาสติกที่ได้คุณภาพ พร้อมกับต้นทุนในกระบวนการผลิตที่ต่ำลง โดยในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกจะออกแบบการทดลองใช้กระบวนการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และสร้างสมการการตอบสนองที่ผิว (Response surface equation) ทำงานร่วมกันกับวิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm) และใช้กระบวนการอบคืนตัวเพื่อการปรับปรุงการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกโดยใช้กระบวนการโฟโตอีลาสติคิตี (Photoelasticity) เพื่อการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนว่า ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ได้ถูกกำจัดออก เพราะความเค้นตกค้างมีความสัมพันธ์ทางตรงกับการเกิดการบิดงอของชิ้นงาน โดยกระบวนการฉีดพลาสติกเลือกวัสดุประเภทโพลิสไตรีน (Polystyrene) เพราะเป็นชนิดเม็ดพลาสติกที่ได้รับความนิยมใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก อันเนื่องด้วยเป็นพลาสติกที่แข็ง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมัน ทำให้มีสีสันสวยงาม ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ซาม และนิยมนำมาผลิตในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนแบตเตอรี่รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ [16] นอกจากนี้ยังนิยมนำมาใช้สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น หลอดทดสอบ จาน Petri หรือของใช้ประจำวัน เช่น เครื่องตรวจจับควัน, ซีดี, ภาชนะบรรจุอาหาร, ถ้วยกาแฟ เป็นต้น [17] ซึ่งเป็นวัสดุที่ค่อนข้างมีราคาถูกแต่อยู่ในเกือบทุกกิจกรรมของการดำรงชีวิตทั้งอุปโภคและบริโภค นั่นจึงเป็นเหตุผลที่ในงานวิจัยนี้ทำการวิจัยโพลิสไตรีน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อนำเสนอวิธีการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดให้เหมาะสมเพื่อลดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพลาสติกโดยวิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย

1.2.2 เพื่อนำเสนอกระบวนการอบคืนตัวเพื่อปรับปรุงการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกให้ลดลง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.3.1 ได้วิธีการในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกให้เหมาะสมและเกิดการบิดงอที่เป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาด้านคุณภาพชิ้นงาน

1.3.2 เพื่อการนำเสนอวิธีการปรับปรุงชิ้นงานฉีดพลาสติกให้มีการบิดงอลดลง โดยกระบวนการอบอ่อน

1.3.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกให้มีความเหมาะสมในภาคอุตสาหกรรม

1.3.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการควบคุมพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติก

1.3.5 เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานพลาสติก หลังกระบวนการฉีดพลาสติก โดยนำเสนอกระบวนการอบอ่อนเพื่อลดการบิดงอของชิ้นงาน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 พิจารณาทำการทดลองกับเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) รุ่น TOSHIBA IS80 ขนาด 80 ตัน

1.4.2 พิจารณาวัสดุที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก คือ โพลิสไตรีน (General Purpose Polystyrene, GPPS)

1.4.3 พิจารณาชิ้นงานทดลอง ชิ้นงาน Dog Bone ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type1

1.4.4 พิจารณาคุณภาพชิ้นงานฉีดพลาสติกด้านการบิดงอของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดพลาสติก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของกรทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะทำการศึกษา 5 ส่วนหลักๆ คือ

2.1 ความรู้พื้นฐานของกระบวนการฉีดพลาสติก (Foundation of Injection molding process)

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองในกระบวนการฉีดพลาสติก (Foundation of Experimental design method in plastic injection molding process)

2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติและอัลกอริทึมหึ่งห้อย (Foundation of Design of Experiment amd Firefly Algorithm)

2.4 พฤติกรรมทางกลและปัจจัยที่กระทบกับการบิดงอของชิ้นงาน (Mechanical behavior and factors that effected to warpage)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปัจจัยในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาด้านการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก (Optimized plastic injection molding process and minimized warpage, volume shrinkage)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความเค้นตกค้างและการอบอ่อนที่ส่งผลกระทบต่อ การบิดงอของชิ้นงานพลาสติก (Residual stress and annealing process that affected to injection molded parts)

2.7 กระบวนการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่มีผลบ่งชี้โดยตรงต่อการลดการบิดงอของชิ้นงาน พลาสติกโดยวิธีโพโตอิลาสติกซิตี (Inspection of residual stress that directly indicated warpage phenomenon on specimen via photoelasticity methodology)

2.1 ความรู้พื้นฐานของกระบวนการฉีดพลาสติก (Foundation of Injection molding process)

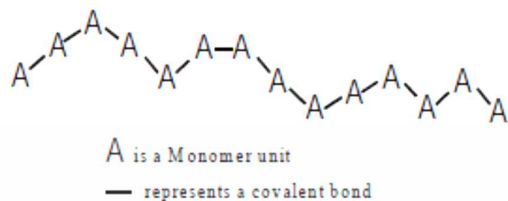
2.1.1 ความหมายของพลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยการนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม มาทำการแยกสารประกอบบริสุทธิ์หลายชนิด โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับก๊าซไฮโดรเจน เมื่อนำเอาสารประกอบแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยาให้มีลักษณะต่อกันเป็นสายโซ่ยาวๆ ก็จะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติก ซึ่งพลาสติกที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์แทนวัสดุประเภทอื่นได้ อาทิเช่น ไม้ โลหะ หรือวัสดุตามธรรมชาติต่างๆ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

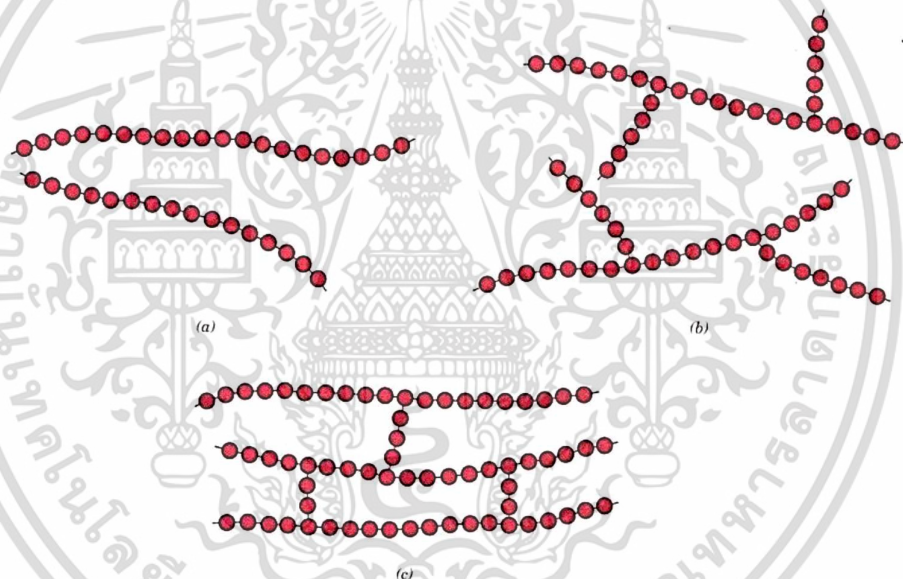
2.1.2 โครงสร้างของโมเลกุล

โครงสร้างของพลาสติกจะประกอบไปด้วยสายโซ่ของโมเลกุลและจะมีมอนอเมอร์หน่วยเล็กทางเคมีระหว่างกลางของสายโซ่ซึ่งจะยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [19]



รูปที่ 2.1 แสดงสายโซ่ของพลาสติกเชิงเดี่ยวที่แสดงมอนอเมอร์และพันธะโคเวเลนต์

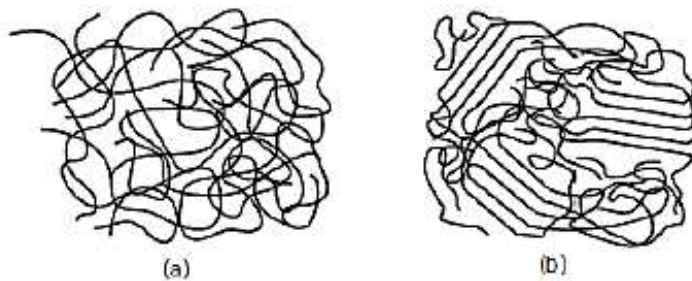
โดยลักษณะทางกายภาพของพลาสติกจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล โดยสามารถที่จะจำแนกของโครงสร้างของโมเลกุลออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [19]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของโมเลกุลพลาสติกทั้ง 3 ชนิดคือ

(a) แบบเส้นตรง (b) แบบมีกิ่งสาขา (c) แบบร่างแห

นอกจากคุณสมบัติของพลาสติกจะขึ้นอยู่กับมอนอเมอร์ และโครงสร้างของโมเลกุลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความเร็วของสายโซ่ในสถานะของแข็งด้วย โดยในการเรียงตัวของสายโซ่ ระดับการเรียงตัวจะถูกเรียกว่า The degree of crystallinity ซึ่งลักษณะการจัดเรียงของพลาสติกจะไม่มี การเรียงตัวเป็นระเบียบได้ 100% โดยสามารถแบ่งกลุ่มการเรียงตัวของสายโซ่พลาสติกออกเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [19]



รูปที่ 2.3 (a) แสดงการเรียงตัวของสายโซ่แบบ Amorphous
(b) แสดงการเรียงตัวของสายโซ่แบบ Semi crystalline

พลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

2.1.2.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermo Plastics)

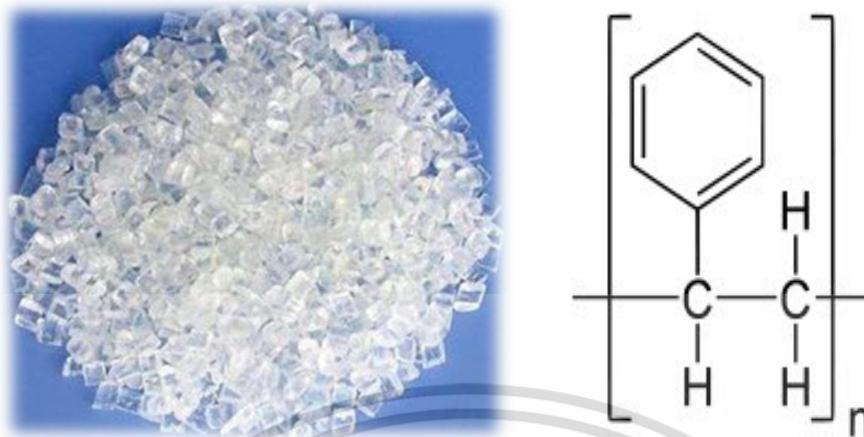
พลาสติกชนิดนี้จะอ่อนตัวลงเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง เมื่อนำกลับมาให้ความร้อนอีกครั้งก็จะอ่อนตัวลงอีก จึงสามารถทำให้กลับคืนเป็นรูปเดิมหรือเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาวมีการเชื่อมต่อระหว่างโพลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลวได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิมหรือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน โพลิสไตรีน เป็นต้น

2.1.2.2 พลาสติกเทอร์โมเซต (Thermosetting Plastics)

พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปหลังจากการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็งแรงมาก ทนความร้อนและความดันได้ เมื่อได้รับความร้อนจะไม่อ่อนตัวและไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ แต่ถ้าได้รับความร้อนที่สูงพอก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำกลับมาหลอมเหลวใหม่ได้หรือไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างเช่น เมลามีน โพลียูรีเทน อีพอกซี เป็นต้น

2.1.3 โพลิสไตรีน

โพลิสไตรีน ชนิดโฮโมโพลิเมอร์ เป็นโพลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติก โดยลักษณะของโมเลกุลจะอยู่ในกลุ่มของอเทกติก (Atactic) ซึ่งโมเลกุลจะอยู่ในกลุ่มโพลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) ที่มีลักษณะโปร่งแสงและใส [20] โดยที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) จะอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 100 องศา และมีลักษณะเด่นคือ มีความแข็ง ไม่ค่อยยืดหยุ่น เปราะ ไม่ดูดความชื้นและน้ำ และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ส่วนมากจะนิยมนำโพลิสไตรีน ไปใช้งานในกลุ่มของอุปกรณ์เครื่องเขียน เครื่องประดับ สันรองเท้า ฝาครอบเครื่องสำอาง ภาชนะบรรจุอาหาร เครื่องสุขภัณฑ์ ส่วนประกอบของเครื่องไฟฟ้า เครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น ลักษณะทางกายภาพและสูตรทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะทางกายภาพและสูตรทางเคมีของโพลีสไตรีน [20]

2.1.4 การฉีดพลาสติก

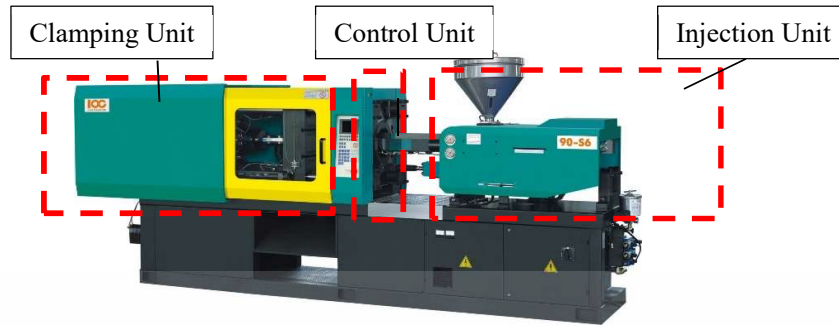
การใช้พลาสติกในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากหลายทศวรรษที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งนับตั้งแต่การผลิตในลอน ในปี ค.ศ. 1939 โดยบริษัท Du Pont de Nemours & Co. เป็นต้นมาจนถึงทุกวันนี้ ปริมาณกำลังการผลิตของกลุ่มผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความต้องการใช้มากกว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์เหล็ก [21] และกระบวนการที่เป็นกระบวนการหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกคือกระบวนการฉีดพลาสติก [22] การขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Injection machine) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1872 โดยสองพี่น้องนักประดิษฐ์ชาวอเมริกัน John Wesley Hyatt และน้องชาย [23] ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายว่าเป็นเครื่องจักรที่มีลักษณะเด่น คือ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีอัตราการเกิดของเสียต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติกประเภทอื่นๆ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างและน้ำหนักที่หลากหลายได้ อีกทั้งยังมีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตต่ำและยังสามารถผลิตครั้งละมากๆ (Mass production) ได้

การฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการการผลิตชิ้นงานโดยอาศัยกรรมวิธีการเติมสารพลาสติกแบบเม็ดหรือแบบผง ซึ่งสารพลาสติกนั้นอาจจะเป็นเทอร์โมเซต เทอร์โมพลาสติก รวมไปถึงอีลาสโตเมอร์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติกที่ดัดแปลงให้เหมาะสมกับพลาสติกชนิดต่างๆ เมื่อพลาสติกผ่านความร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลว เครื่องจักรจะทำการฉีดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ หลังจากที่น่าชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ก็จะได้ชิ้นงานตามแบบแม่พิมพ์

2.1.5 เครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีดพลาสติกโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักของเครื่อง 3 องค์ประกอบหลัก คือ ส่วนองค์ประกอบการฉีด ส่วนองค์ประกอบชุดเปิด - ปิดแม่พิมพ์ และส่วนองค์ประกอบควบคุมเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 หน่วยการทำงานหลักของเครื่องฉีดพลาสติก [18]

2.1.6 ชุดองค์ประกอบการฉีด (Injection Unit)

การทำงานของชุดฉีด คือ เม็ดพลาสติกที่อยู่ในกรวยเติมจะค่อยๆ ลดลงเมื่อสกรูหมุนพาเม็ดพลาสติกออกไปที่กระบอกสูบ และเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมละลายในกระบอกสูบด้วยความร้อนของฮีตเตอร์ สกรูจะทำหน้าที่คลุกเคล้าเม็ดพลาสติกที่ละลายแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกันพร้อมกับขับเคลื่อนให้พลาสติกเหลวพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ชุดองค์ประกอบการฉีดประกอบไปด้วย

2.1.6.1 กรวยเติม (Hopper)

กรวยเติมมีหน้าที่ลำเลียงเม็ดพลาสติกผ่านรูป้อนเพื่อให้ผ่านไปยังกระบอกฉีด (Barrel) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยในช่วงการทำงานเม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนลงมานั้น หากไม่มีระบบน้ำหล่อเย็นเลี้ยงที่บริเวณคอป้อน (Throat) ก็จะทำให้อุณหภูมิของรูป้อนเม็ดสูงขึ้น ทำให้เม็ดพลาสติกเริ่มหลอมละลายเกาะตัวกันมากขึ้น ส่งผลให้การไหลของเม็ดพลาสติกไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบระบบหล่อเย็นอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.6 กรวยเติมของเครื่องฉีดพลาสติก [23]

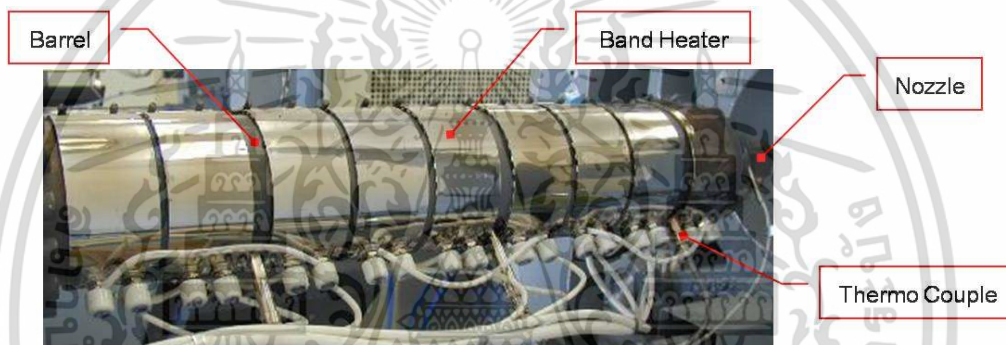
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6.2 กระบอกลวดพลาสติก

กระบอกลวดดัดแสดงในรูปที่ 2.7 จะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกลวดที่ติดตั้งอยู่กับกรวยเติม และคอป้อน ผิวด้านนอกของกระบอกลวดจะติดตั้งปลอกหรือแถบทำความร้อน (Band Heater) เพื่อให้ความร้อนในการหลอมเม็ดพลาสติก ส่วนปลายของกระบอกลวดจะต่อเข้ากับหัวฉีด (Nozzle) และภายในของกระบอกลวดจะมีสกรู (Screw) สวมอยู่เพื่อช่วยในการหลอมเม็ดพลาสติก และอัดเม็ดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์

2.1.6.3 ปลอกหรือแถบทำความร้อน

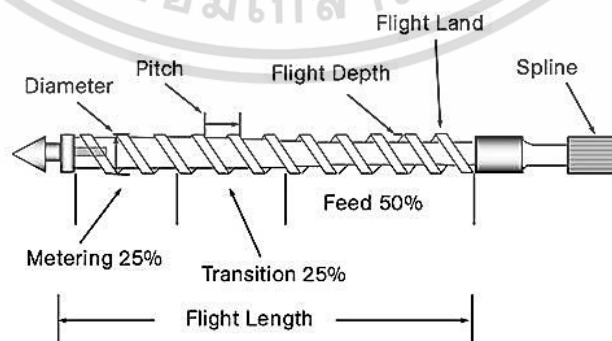
มีหน้าที่ทำความร้อนและถ่ายไปยังกระบอกลวด เพื่อใช้ในการหลอมละลายเม็ดพลาสติก โดยทั่วไปจะทำการติดตั้งไว้โดยการห่อหุ้มอยู่ภายนอกของกระบอกลวด โดยการแยกควบคุมอุณหภูมิออกเป็นส่วนๆ



รูปที่ 2.7 กระบอกลวดพลาสติก [18]

2.1.6.4 สกรู

โดยทั่วไปสกรูที่ใช้กับเครื่องฉีดพลาสติกนั้น มีการออกแบบที่แตกต่างกันไปเพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วนหลัก คือ Feed Zone, Compression Zone และ Metering Zone ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สกรูโดยทั่วไปที่ใช้กับเครื่องฉีดพลาสติก [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Feed Zone เป็นช่วงที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงเม็ดพลาสติกที่ไหลลงมาจากกรวยเติมกับคอป้อน เพื่อที่จะส่งต่อไปยังช่วง Compression Zone ซึ่งความลึกของร่องเกลียวช่วงนี้จะเท่ากันทุกร่องเกลียว การเปลี่ยนแปลงความร้อนในช่วงนี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการเสียดสีกันของเม็ดพลาสติก ดังนั้น ความร้อนที่มาจากปลอกนำความร้อนในช่วงนี้ต้องไม่สูงมากจนเกินไป เพราะจะทำให้พลาสติกหลอมเหลวหรือเกาะตัวเป็นก้อนและเพื่อป้องกันการลำเลียงเม็ดพลาสติกไม่ให้ขาดช่วงหรือขาดความต่อเนื่อง

2) Transition Zone เป็นช่วงที่ทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวและผสมผสานกันได้ดียิ่งขึ้น โดยจะทำให้เกิดการเสียดสีกันของเม็ดพลาสติกเองและทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในเม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลวและอัดแน่นกันมากยิ่งขึ้น ขนาดความลึกของเกลียวช่วงนี้จะค่อยๆ ลดลงไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้เกิดการอัดตัวของพลาสติกที่เกิดการหลอมเม็ดพลาสติก ซึ่งข้อแตกต่างของความลึกของร่องเกลียวช่วงนี้เราเรียกว่า Compression Ratio โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 2 : 1 จากช่วงของ Transition Zone ปริมาณพลาสติกที่ถูกหลอมละลายจะถูกส่งไปยังส่วนสุดท้ายคือ Metering Zone ต่อไป

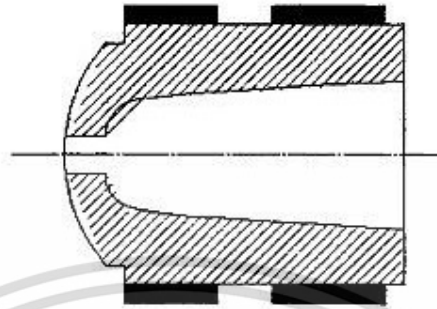
3) Metering Zone เป็นช่วงที่มีการเฉือนกันของพลาสติกมากที่สุด และจะเพิ่มมากขึ้นระหว่างกระบอกฉีดกับสกรูและเพิ่มการหลอมละลายของพลาสติกบางส่วนที่ยังหลอมละลายไม่เพียงพอที่จะทำการฉีดต่อไป การหลอมละลายในช่วงนี้จะเริ่มมีการสะสมกำลังและแรงดันเพิ่มมากขึ้นที่ด้านปลายของกระบอกฉีด ในช่วง Metering Zone ที่จะทำหน้าที่นำพลาสติกที่หลอมละลายดีแล้วผ่านทะเล Non-Return Valve ไปยังด้านหน้าสุดของสกรูและไปสะสมกันอยู่ปลายสุดของกระบอกฉีด ในขณะที่เกิดการสะสมของพลาสติกเหล่านี้ก็จะมีกำลังเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ สกรูหมุนกำลังหรือแรงดันนี้จะเป็นตัวที่ดันให้สกรูถอยหลังไปจนถึงระยะของ SM (ตำแหน่งหยุดการหมุนของสกรู) ตามที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งเป็นการสะสมปริมาณพลาสติกเหลวให้ได้ตามที่ต้องการเพื่อที่จะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ในแต่ละรอบการทำงาน

2.1.6.5 หัวฉีด

หัวฉีดมีไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นทางผ่านของพลาสติกเหลวจากกระบอกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ซึ่งหัวฉีดจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างปลายกระบอกฉีดกับ Sprue bush ของแม่พิมพ์ในขณะที่ทำการฉีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ ขนาดรัศมีของปลายหัวฉีดต้องมีขนาดพอดีที่จะสวมหรือสัมผัสกับขนาดรัศมีของ Sprue Bush ของแม่พิมพ์และต้องไม่มีรอยยุบหรือรอยกระแทกบริเวณใกล้กับรูฉีดของหัวฉีดเพราะอาจทำให้การฉีดมีปัญหา โดยทั่วไปหัวฉีดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

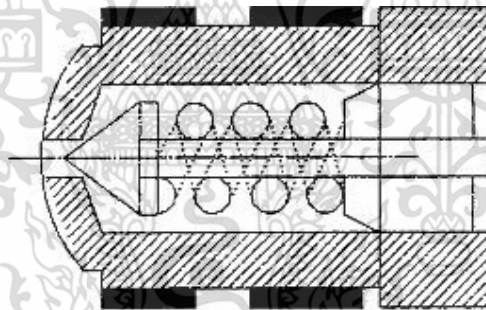
1) หัวฉีดแบบเปิด (Open Nozzle) เป็นหัวฉีดแบบที่ใช้กับพลาสติกที่มีความหนืดค่อนข้างสูง ซึ่งไหลได้ยากเมื่อถึงจุดหลอมเหลว เป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากราคาถูก มีความเสียดทานในการไหลน้อยมาก และทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับหัวฉีดแบบปิด เนื่องจากหัวฉีดแบบเปิดไม่มีระบบเปิด - ปิดรูของหัวฉีดซึ่งอาจจะทำให้เกิดการไหล

ย้อนกลับของพลาสติกที่ปลายหัวฉีดได้ จึงต้องใช้วิธีการป้องกันด้วยการดึงกลับของสกรู (Suck Back) เป็นมาตรฐานการใช้งานหัวฉีดแบบเปิด ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หัวฉีดแบบเปิด (Open Nozzle) [25]

2) หัวฉีดแบบปิด (Shut-off Nozzle) เป็นหัวฉีดที่นิยมใช้กับพลาสติกที่มีความหนืดต่ำ ซึ่งไหลได้ง่ายเมื่อถึงจุดหลอมเหลว หัวฉีดแบบนี้จะมีกลไกหรือระบบควบคุมการเปิด - ปิดรูฉีด เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกเหลวไหลย้อนออกมาที่ปลายหัวฉีด ซึ่งกลไกหรือระบบควบคุมการเปิด - ปิดรูฉีดนั้นมีอยู่มากมายหลายแบบ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบปิด (Shut-off Nozzle) [25]

2.1.7 ชุดองค์ประกอบเปิด - ปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการติดตั้งแม่พิมพ์ เปิด - ปิดแม่พิมพ์และกระทุ้งชิ้นงานที่ฉีดเสร็จแล้วออกจากแม่พิมพ์ โดยเฉพาะการปิดแม่พิมพ์นั้น ชุดเปิด - ปิดแม่พิมพ์จะต้องมีแรงในการปิดที่สามารถต้านทานแรงดันของพลาสติกเหลวในขั้นตอนการฉีดได้ โดยทั่วไปชุดเปิด - ปิดแม่พิมพ์จะมีอยู่ 2 ระบบใหญ่ๆ ดังนี้

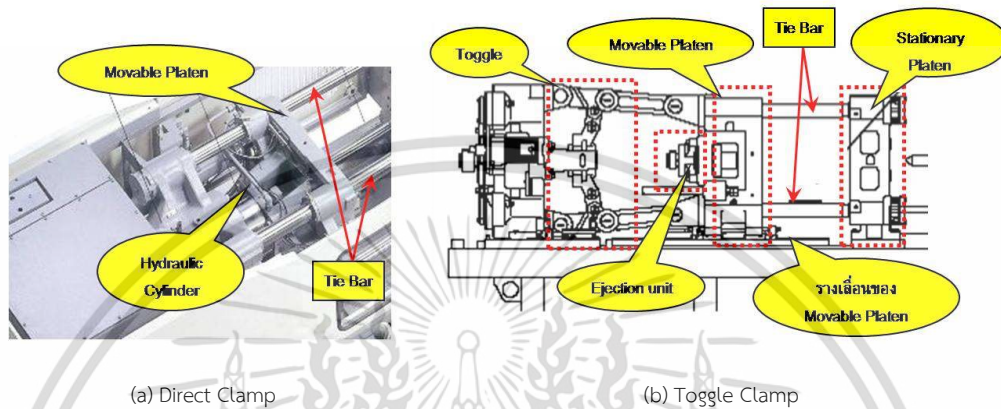
2.1.7.1 Direct Clamp

เป็นระบบการเปิด - ปิดแม่พิมพ์โดยตรงผ่านต้นกำลัง ซึ่งก็คือลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic Cylinder) ระบบนี้เป็นระบบที่นิยมใช้ในเครื่องฉีดระบบไฮดรอลิก ข้อดีคือสามารถติดตั้งได้ง่าย ดังแสดงในรูป 2.11(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7.2 Toggle Clamp

เป็นระบบการเปิด - ปิดแม่พิมพ์ผ่านกลไกหรือระบบกลศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้ได้กับต้นกำลังจาก Servo Motor และลูกสูบไฮดรอลิกซึ่งมีข้อดีคือแรงในการปิดแม่พิมพ์จะเที่ยงตรงและสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูป 2.11(b)



รูปที่ 2.11 ชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ทั้งสองแบบ [18]

2.1.8 ชุดองค์ประกอบการควบคุมเครื่อง (Control Unit)

มีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทุกระบบของเครื่องฉีด เช่น การควบคุมอุณหภูมิของกระบอกฉีด การควบคุมแรงดันและความเร็วในการฉีด การควบคุมความเร็วในการเปิด - ปิดแม่พิมพ์ การควบคุมเวลาการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ของเครื่องฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ชุดควบคุมของเครื่องฉีดพลาสติก [18]

2.1.9 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ฉีดเป็นแม่พิมพ์ที่นำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermo Plastics) และในปัจจุบันมีการปรับปรุงและพัฒนา

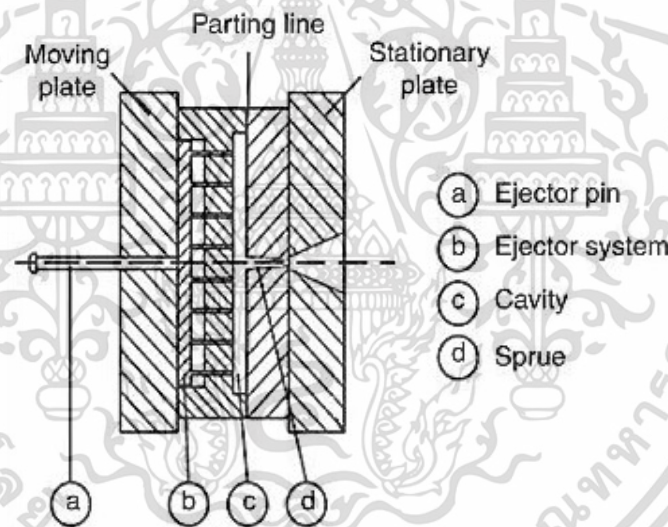
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีดให้สามารถฉีดชิ้นงานพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Plastics) ได้อีกด้วย ทำให้ขอบเขตการใช้งานของแม่พิมพ์ฉีดกว้างยิ่งขึ้น การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดมักจะพิจารณาจากลักษณะรูปร่างของชิ้นงานเป็นหลัก

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (Injection Mold) โดยทั่วไปสามารถจัดแบ่งประเภทออกตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท คือ แม่พิมพ์ 2 แผ่น (2 Plates Mold) และแม่พิมพ์ 3 แผ่น (3 Plates Mold)

2.1.9.1 แม่พิมพ์ 2 แผ่น

แม่พิมพ์ชนิดนี้จะมีด้านที่ขึ้นรูปชิ้นงานอยู่สองฝั่งซึ่งในระหว่างรอบการฉีด แม่พิมพ์จะเปิดออกที่ระนาบเดียวโดยที่อีกระนาบจะติดมันคงอยู่กับเครื่องจักร ระนาบของการเปิดหรือที่เรียกว่าเส้นแบ่ง (Parting Line) ฉีดชิ้นงานทางเข้าน้ำพลาสติก โครงสร้างแม่พิมพ์จะประกอบด้วย 2 ด้าน คือ ด้าน Cavity Mold และด้าน Core Mold ซึ่งจะมีระบบปลด (Ejection) ชิ้นงานที่แตกต่างกันตามลักษณะรูปร่าง และข้อกำหนดของชิ้นงาน ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.13

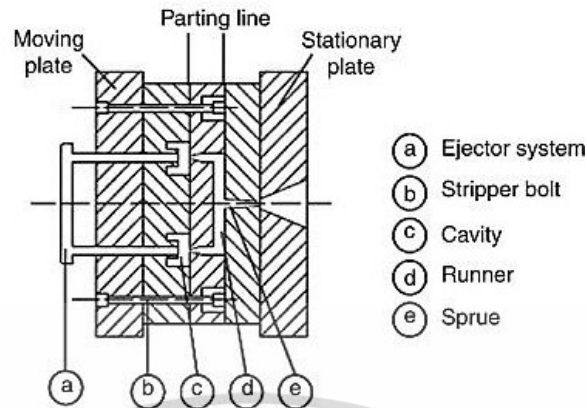


รูปที่ 2.13 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 2 Plates [25]

2.1.9.2 แม่พิมพ์ 3 แผ่น

แม่พิมพ์ 3 แผ่น คือแม่พิมพ์จะเปิดออกในสองระนาบ ส่วนที่อยู่กับที่ของแม่พิมพ์จะประกอบด้วย แผ่น 2 แผ่น โดยแม่พิมพ์แบบ 3 แผ่น มักจะใช้ทางเข้าแบบเข็ม แม่พิมพ์ลักษณะนี้จะ เป็นแม่พิมพ์ที่ฉีดงานที่มีทางเข้าน้ำพลาสติกหลายทางในชิ้นงานเดียวหรือแม่พิมพ์ที่ต้องการหลายชิ้นงาน โดยต้องการให้ทางเข้าน้ำพลาสติกจะเป็นการฉีดแบบ Hot Runner ซึ่งยอมให้เห็นรอย Gate ได้เพียงเล็กน้อยบนชิ้นงาน ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

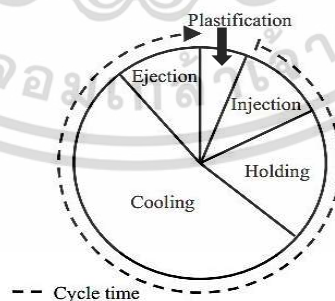


รูปที่ 2.14 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 3 Plates [25]

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองในกระบวนการฉีดพลาสติก (Foundation of Experimental design method in plastic injection molding process)

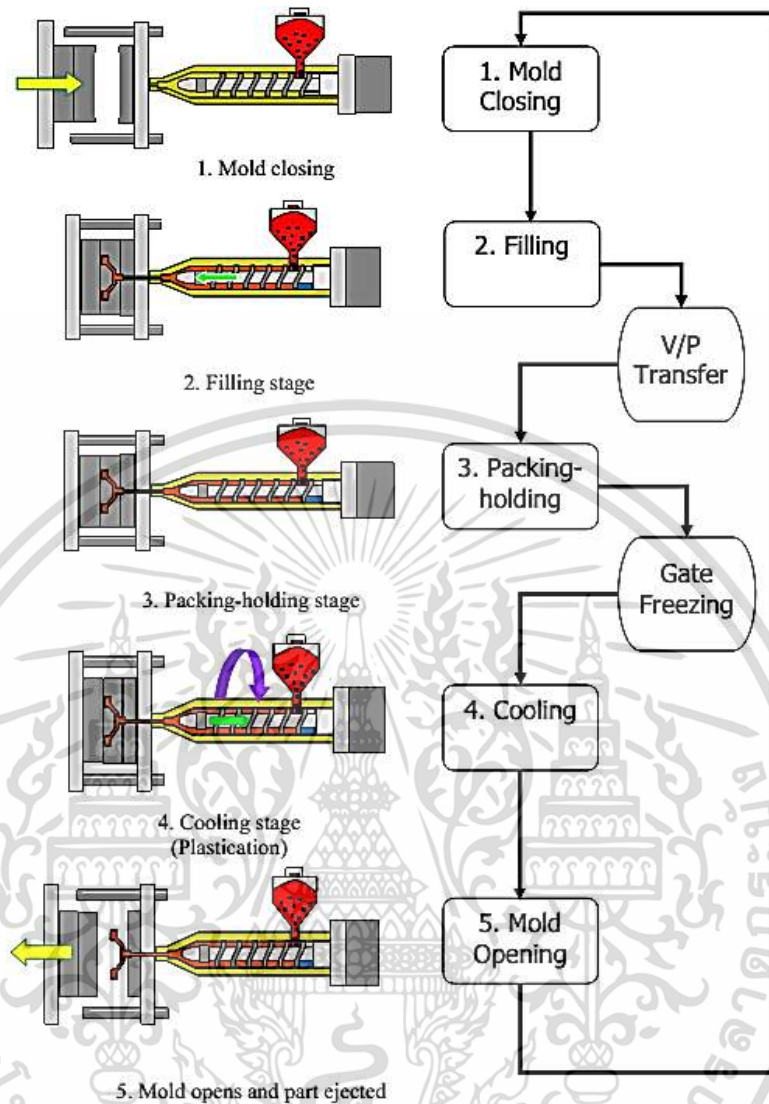
2.2.1 กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection process)

ในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถแบ่งขั้นตอนการฉีดออกเป็น 5 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก (Plastication process) กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection process) กระบวนการฉีดอัด (Packing and holding processes) กระบวนการหล่อเย็น (Cooling process) และกระบวนการกระทุ้งชิ้นงานออก (Ejection process) โดยเมื่อกระบวนการทำงานครบทั้ง 5 ขั้นตอนดังกล่าว เวลาที่ถูกใช้ในการทำงานทั้งหมดจะถูกเรียกว่า รอบการทำงานของการฉีดชิ้นงาน (Cycle time) ซึ่งจะถูกควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสมเพราะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงรอบการทำงานของการฉีดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกและการทำงานของแต่ละกระบวนการ [26]

2.2.1.1 กระบวนการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก

ในกระบวนการหลอมเหลวพลาสติกจะเริ่มด้วยแม่พิมพ์จะทำการปิดผนึก และการเติมเม็ดพลาสติกลงสู่กรวยเติม จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกส่งผ่านไปยังกระบอกฉีดพลาสติก พลาสติกจะถูกหลอมเหลวให้มีการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ให้ความร้อนต่อกระบอกฉีดและการเสียดสีระหว่างโมเลกุลของเม็ดพลาสติกกับสกรูและผนังกระบอกฉีดพลาสติก จนพลาสติกหลอมเหลว และเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพลาสติกต่างๆ เช่น ค่าความหนืด (Viscosity) เอนทาลปี (Enthalpy) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เป็นต้น โดยในกระบวนการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในขั้นตอนที่ 1. Mold closing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 กระบวนการฉีด

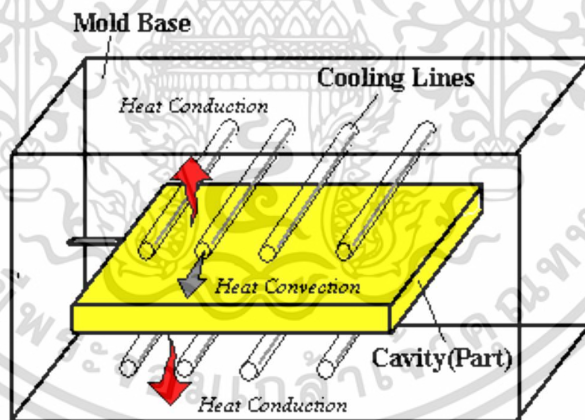
เมื่อช่วงในกระบวนการหลอมเหลวเมื่อการหลอมเหลวของพลาสติกเต็มกระบอกลอด สกรูจะทำการหยุดการผสมและให้ความร้อนการหลอมเหลว หลังจากนั้นจะทำการเคลื่อนกระบอกลอด ไปยังแม่พิมพ์และค้างไว้ด้วยแรงที่พอเหมาะเพื่อป้องกันชุดฉีดถอยหลังและทำการหมุนสกรูและอัด พลาสติกหลอมเหลวให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็มแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในขั้นตอนที่ 2. Filling stage

2.2.1.3 กระบวนการฉีดย้ำ

เป็นช่วงการฉีดย้ำรักษาความดันให้กับพลาสติกเหลวภายในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงาน ที่คงรูป ไม่เกิดรอยยุบตัวหรือบิดงอ (Shrinkage and Warp) ที่ผิวของชิ้นงาน จังหวะการฉีดย้ำ เพื่อรักษาความดันให้กับพลาสติกในแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 2.16 ในขั้นตอนที่ 3. Packing-holding stage

2.2.1.4 กระบวนการหล่อเย็น

ในขั้นตอนของการหล่อเย็นชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ แม่พิมพ์โลหะจะทำการให้ถ่ายเท ความร้อนจากชิ้นงานพลาสติกเพื่อให้เกิดการคงตัวของชิ้นงาน โดยในกระบวนการหล่อเย็นจะให้ ของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำมันเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนแบบนำและพาไปยังชิ้นงานผ่าน ท่อหล่อเย็น (Cooling line) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งเมื่อกระบวนการหล่อเย็นเริ่มทำงาน กระบวนการ เต็มเม็ดพลาสติกเข้ากระบอกลอดจะเริ่มขึ้น และชุดฉีดจะเริ่มถอยหลังกลับไปป้องกันอุณหภูมิของ หัวฉีดลดต่ำลงเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในขั้นตอนที่ 4. Cooling stage



รูปที่ 2.17 แสดงการหล่อเย็นในกระบวนการฉีดพลาสติก [27]

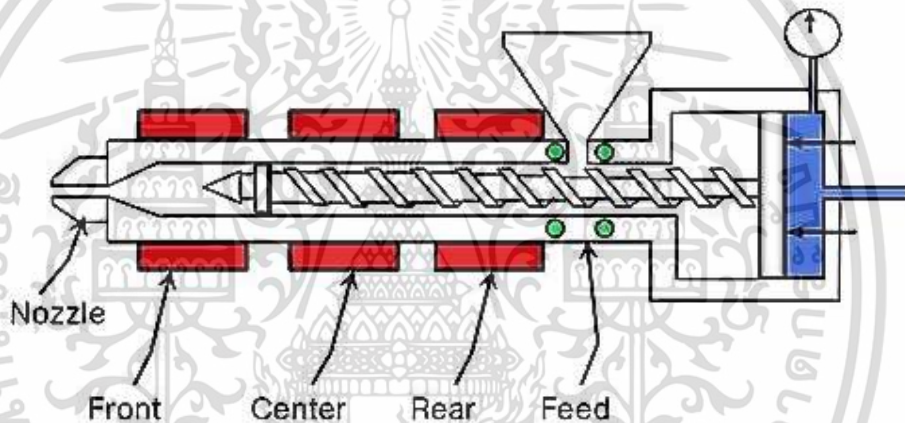
2.2.1.5 กระบวนการกระทุ้งชิ้นงานออก

ในขั้นตอนนี้ชุดกระบอกฉีดจะถอยหลังจนสุดและแม่พิมพ์จะเปิดออกหลังจากสิ้นสุดเวลาในการหล่อเย็น และการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะถูกดันด้วยตัวกระทุ้ง (Ejector) เพื่อปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ขั้นตอนที่ 5. Mold opens and part ejected

2.2.2 พารามิเตอร์สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก

2.2.2.1 อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temperature) [24]

โดยทั่วไปแล้วการให้อุณหภูมิของกระบอกฉีดพลาสติกจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 คือ ส่วนให้อุณหภูมิบริเวณหัวฉีด ส่วนหน้า (Front) ส่วนกลาง (Center) และส่วนหลัง (Rear) ซึ่งจะเป็นแผ่นให้ความร้อนติดอยู่กับทั้ง 4 ส่วน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปรับตั้งค่าอุณหภูมิควบคุมของแผ่นให้ความร้อนของทั้ง 4 ส่วนก็จะมีหลักการตั้งอยู่ 3 หลักการคือ



รูปที่ 2.18 แสดงจุดการติดตั้งแผ่นให้ความร้อนในกระบวนการฉีดพลาสติก [24]

1) รูปแบบการตั้งค่าแบบอุณหภูมิกระบอกฉีดพลาสติกคืออย่าง สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากด้านการป้อนเม็ดพลาสติก ซึ่งจะใช้ระบบนี้เมื่อระยะชักของสกรูที่ค่าระหว่าง 1 ถึง 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู โดยจะตั้งบริเวณหัวฉีดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และช่วงส่วนหน้าอุณหภูมิลดต่ำลงประมาณ 10°C ส่วนกลางลดต่ำลง 20°C เทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว และในส่วนท้ายตั้งค่าอุณหภูมิลดห่างจากอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 40°C

2) รูปแบบการตั้งค่าแบบอุณหภูมิกระบอกฉีดพลาสติกคืออย่าง ต่ำลงจากด้านการป้อนเม็ดพลาสติก ซึ่งจะใช้ระบบนี้เมื่อระยะชักของสกรูที่ค่าระหว่าง 2 ถึง 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู โดยจะตั้งบริเวณหัวฉีดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และช่วงส่วนหน้าอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลอมเหลว ส่วนกลางเพิ่มขึ้น 10°C เทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว และในส่วนท้ายตั้งค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 20°C อันเนื่องมาจากมีระยะทางการเดินทางของของน้ำพลาสติกจึงมีโอกาสเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบอกฉีดกับ

น้ำพลาสติก จึงมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเพื่อช่วยให้พลาสติกอยู่ในสภาวะหลอมเหลวระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก

3) รูปแบบการตั้งค่าแบบอุณหภูมิกระบอกฉีดพลาสติกคงที่ ซึ่งจะใช้ระบบนี้เมื่อระยะชักของสกรูที่ค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู โดยจะตั้งอุณหภูมิในทุกส่วนเท่ากันที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก

2.2.2.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

อุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นที่ตัวแปรสำคัญในการกำหนดคุณภาพของชิ้นงานพลาสติก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแม่พิมพ์จะส่งผลต่อความดันในแม่พิมพ์ ดังนั้นการที่อุณหภูมิมีผลกระทบต่อความดันอาจส่งผลเสียต่อการฉีดขึ้นงานพลาสติกได้ เช่น อาจก่อให้เกิดการฉีดไม่เต็ม ชิ้นงานในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดหนาหรือบางมาก หรือเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานได้ถ้าเลือกอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม

2.2.2.3 อุณหภูมิปลดชิ้นงานจากแม่พิมพ์ (Demolding temperature)

อุณหภูมิปลดชิ้นงานเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของชิ้นงานได้อีกตัว เนื่องด้วยถ้าเกิดการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อุณหภูมิกายนอกกับอุณหภูมิชิ้นงานมีความแตกต่างกันมากและอาจส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอหรือหดตัวจนเสียรูปร่างจากขนาดที่ต้องการได้ ดังนั้นค่าอุณหภูมิปลดชิ้นงานจึงถูกผู้ผลิตเม็ดพลาสติกกำหนดค่ามาตรฐานอุณหภูมิจากโรงงานเพื่อลดปัญหาด้านการเสียรูป โดยจะเลือกใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่พลาสติกเกิดการบิดเบี้ยว หรือหดตัวหลังการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Heat Distortion Temperature, HDT)

2.2.2.4 ความเร็วรอบสกรู (Screw speed)

ความเร็วรอบสกรู มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลวและระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติก หากความเร็วรอบสกรูสูง ก็จะทำให้อุณหภูมิพลาสติกสูงขึ้นแต่จะทำให้เวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติกสั้นลง โดยการคำนวณความเร็วรอบของสกรูสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [28]

$$\text{กรณีที่ 1 พลาสติกทั่วไป} \quad n = \frac{0.2 \times 1000 \times 60}{\pi \times D} \quad (2.1)$$

$$\text{กรณีที่ 2 พลาสติกที่ไวต่อความร้อน} \quad n = \frac{0.05 \times 1000 \times 60}{\pi \times D} \quad (2.2)$$

เมื่อ n = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.5 ความเร็วฉีด (Injection speed)

ความเร็วในการฉีดโดยทั่วไปจะเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรูฉีด (มีหน่วยเป็น mm/s) แต่ถ้าขนาดของสกรูมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ความเร็วตามแนวแกนยังเท่าเดิม จะทำให้อัตราการไหลของพลาสติกเหลวที่ออกจากหัวฉีดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพชิ้นงาน ดังนั้นจึงควรใช้อัตราการฉีดหรืออัตราฉีด (Injection rate) (ซึ่งมีหน่วยเป็น mm³/s) จะมีความเหมาะสมกว่า เพราะถ้ากำหนดให้อัตราฉีดเท่าเดิม ความเร็วตามแนวแกนของสกรูก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดความโตของสกรู ซึ่งเครื่องฉีดรุ่นใหม่ ๆ จะนิยมใช้การบอกความเร็วแบบนี้กันมากขึ้น เนื่องจากการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่เกิดขึ้นจริงกับพลาสติกเป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุด

2.2.2.6 ความดันฉีด (Injection pressure)

ความดันในการฉีด สามารถแสดงและปรับตั้งได้เป็นความดันของน้ำมันไฮดรอลิก (สำหรับเครื่องฉีดระบบไฮดรอลิกทั่วไป) และความดันของพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกฉีดหน้าปลายสกรู (สำหรับเครื่องฉีดรุ่นใหม่บางรุ่นเท่านั้น) โดยสังเกตง่าย ๆ คือถ้าแสดงเป็นความดันของน้ำมันไฮดรอลิกความดันสูงสุดจะไม่เกิน 160 บาร์ (ทั่วไป) และ 200 - 250 บาร์ (บางรุ่น) แต่ถ้าแสดงความดันพลาสติกเหลวความดันจะมีค่าตั้งแต่ 300 บาร์ ขึ้นไปจนถึง 2,000 - 3,000 บาร์ ซึ่งค่าความดันฉีดควรแสดงเป็นความดันที่พลาสติกเหลวจะถูกต้องมากที่สุด

2.2.2.7 ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)

การฉีดย้ำเป็นขั้นตอนในการฉีดเมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ไปแล้วประมาณ 90-95% ความสำคัญในการฉีดย้ำคือป้องกันไม่ให้เกิดพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ไหลย้อนกลับ เนื่องจากในโพรงแม่พิมพ์มีความดันสูงกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุของการยุบตัวของชิ้นงาน เนื่องจากการหดตัวของพลาสติกเหลวที่เย็นตัว และความไม่เที่ยงตรงของชิ้นงาน กระบวนการฉีดย้ำจะทำจนกระทั่งพลาสติกเหลวบริเวณทางเข้าเกิดการแข็งตัวจนปิดสนิท การฉีดย้ำจะใช้ความดันประมาณ 40-60% ของความดันระบบ โดยทำการย้ำพลาสติกเหลวที่เหลืออีกประมาณ 5-10% เข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็ม สำหรับค่าความดันฉีดย้ำที่ทำการปรับตั้งนั้นแนะนำให้ใช้ค่า 50% ของความดันฉีด

2.2.2.8 เวลาในการฉีดย้ำ (Holding time)

เวลาในการฉีดย้ำมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ถ้าหากเวลาในการฉีดย้ำน้อยเกินไป จะทำให้ความดันในแม่พิมพ์ไม่เพียงพอที่จะทำให้พลาสติกเหลวแน่นเต็มแม่พิมพ์ ความดันในโพรงแม่พิมพ์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการไหลย้อนกลับของพลาสติกเหลว ทำให้ชิ้นงานไม่ได้ขนาดและน้ำหนักตามต้องการ แต่หากใช้เวลาในการฉีดย้ำนานเกินไปจะทำให้ความดันในแม่พิมพ์คงสภาพนานเกินไป ทำให้พลาสติกถูกอัดแน่นเป็นเวลานาน จนอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ เวลาในการฉีดย้ำที่เหมาะสมนั้นโดยทั่วไปจะมีวิธีการทดสอบโดยการทดลองฉีดด้วยเวลาในการฉีดย้ำที่แตกต่างกัน และชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน ซึ่งปัญหาที่คือ การควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ ให้คงที่ตลอดเวลา โดยแนะนำให้ใช้เวลาในการฉีดย้ำประมาณ 1-3 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากใช้เวลานานกว่านี้จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดตกค้างในชิ้นงานได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานกับเวลาในการฉีดอัด และความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของชิ้นงานกับเวลาในการฉีดอัด พบว่าเวลาที่ใช้ในการฉีดอัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาของชิ้นงาน คือ เมื่อชิ้นงานหนามาก เวลาฉีดอัดก็ต้องมากขึ้นด้วย

2.2.2.9 แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)

เป็นแรงปิดเพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์แยกออกขณะทำการฉีดพลาสติก ตัวแปรที่มีผลสัมพันธ์กันกับแรงปิดแม่พิมพ์ คือ ความหนืดของพลาสติกเหลว อัตราส่วนระหว่างระยะทางการไหลกับความหนาของชิ้นงาน อุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งสามารถคำนวณคร่าวๆ ได้จากสมการต่อไปนี้ [28]

$$F = \frac{P_{cavity} \times A}{1000} \quad (2.3)$$

เมื่อ F = แรงปิดแม่พิมพ์ (ton)

P_{cavity} = ความดันเฉลี่ยในแม่พิมพ์ (kg/cm²)

A = พื้นที่ภาพฉายของแม่พิมพ์ (cm²)

2.2.2.10 เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)

การปรับตั้งโดยส่วนใหญ่แล้วผู้ทำการปรับตั้งเครื่องมักจะใช้วิธีการเปิดน้ำและทดลองฉีดจนกว่าจะได้เวลาในการหล่อเย็นที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เสียเวลาและวัตถุดิบในการทดลองเป็นอย่างมาก จึงมีการนำสูตรมาใช้ในการคำนวณหาเวลาในการหล่อเย็น สูตรที่ใช้ในการคำนวณนั้นก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่มีลักษณะแบนมีสูตรดังนี้ [28]

$$tk = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_{melt} - T_{mold}}{T_{ejected(max)} - T_{mold}} \right) \quad (2.4)$$

α = การแผ่ความร้อน (Thermal diffusivity, mm²/s)

s = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

T_{melt} = อุณหภูมิพลาสติกเหลว (°C)

T_{mold} = อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)

$T_{ejected(max)}$ = อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานตรงกลางความหนา (°C)

2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติและอัลกอริทึมที่มิ่งห้อย (Foundation of Design of Experiment and Firefly Algorithm)

2.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบว่าสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีมากกว่า 2 ปัจจัยเป็นจริงหรือไม่ จึงมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) มาพิจารณาในกระบวนการตรวจสอบ โดยที่แนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล คือ การคำนวณหาความแตกต่างของข้อมูลประชากรทั้งหมดในรูปของค่าความแปรปรวน และนำผลมาพิจารณาองค์ประกอบที่เกิดขึ้น โดยที่ถ้าค่าความแปรปรวนเป็นศูนย์ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำการพิจารณาไม่มีผลต่อค่าปัจจัย ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าความแปรปรวนไม่เป็นศูนย์ แสดงว่าปัจจัยที่ทำการพิจารณาและสาเหตุของปัจจัยอาจมีผลกระทบ โดยหลักการในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล [29] คือ การคำนวณหาความแปรปรวนรวม แล้วทำการแยกการวิเคราะห์แยกความแปรปรวนแต่ละทรีตเมนต์ และวิเคราะห์ความแปรปรวนอันเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งเรียกว่า รีพีทอะบิลิตี และทำการพิจารณาว่าปัจจัยความแปรปรวนอันเนื่องจากทรีตเมนต์มีจำนวนมากหรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่ถูกควบคุมในระหว่างกระบวนการเงื่อนไขการทดลอง หรือ รีโพรดิวซิบิลิตี กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะพิจารณาศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวโดยที่จะมีจำนวนระดับความสนใจของการศึกษาของปัจจัยนี้ที่ a ระดับ เพื่อพิจารณาว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้น จะส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Y) อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ แสดงข้อมูลและปัจจัยดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แผนการเก็บข้อมูลและปัจจัยที่กระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง [29]

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ						
	1	2	3	4	..i..	a	
1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_{41}	... Y_{i1} ...	Y_{a1}	
2	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_{42}	... Y_{i2} ...	Y_{a2}	
3	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_{43}	... Y_{i3} ...	Y_{a3}	
-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	
j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	... Y_{ij} ...	Y_{aj}	
-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	
n	Y_{1n}	Y_{2n}	Y_{3n}	Y_{4n}	... Y_{in} ...	Y_{an}	
ผลรวม (T_i)	T_1	T_2	T_3	T_4	... T_i ...	T_a	$T_{..}$
(ผลรวม) ² (T_i) ²	$(T_1)^2$	$(T_2)^2$	$(T_3)^2$	$(T_4)^2$	$(T_i)^2$	$(T_a)^2$	$\sum (T_i)^2$

โดยที่ T_i คือ ผลรวมของข้อมูลจากวิธีปฏิบัติที่ $i; i = 1, 2, \dots, a$

$\sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}; n_i$ คือ จำนวนข้อมูลในวิธีปฏิบัติที่ i

$T_{..}$ คือ ผลรวมข้อมูลทั้งหมด $\sum \sum Y_{ij}$

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด $\sum_{i=1}^a n_i$

โดยที่คำจำกัดความต่างๆ ใน ANOVA คือ

Sample Size : $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$

Sample Means : $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_k$

Sample Variation : $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_k^2$

Total Sample Size : $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$

Grand Average : $\bar{\bar{X}} = \text{Average of All } n \text{ Responses}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละประชากร ซึ่งมีการให้ค่าน้ำหนักหรืออัตราส่วน Sample Size เปรียบเทียบกับ Total Sample Size ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$\bar{X} = \left(\frac{n_1}{n}\right)\bar{x}_1 + \left(\frac{n_2}{n}\right)\bar{x}_2 + \left(\frac{n_3}{n}\right)\bar{x}_3 + \cdots + \left(\frac{n_k}{n}\right)\bar{x}_k \quad (2.5)$$

โดยสามารถหาค่า Between-Sample Variation ได้จากสมการที่ (2.6)

$$SSTr = n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + n_3(\bar{x}_3 - \bar{x})^2 + \cdots + n_k(\bar{x}_k - \bar{x})^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ SSTr คือ Treatment Sum of Squares ซึ่งเป็นการบวกกันของพจน์กำลังสองของความแปรปรวน และสามารถคำนวณหา Within-Sample Variation ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$SSE = \sum_{j=1}^{n_1}(x_{1j} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2}(x_{2j} - \bar{x}_2)^2 + \sum_{j=1}^{n_3}(x_{3j} - \bar{x}_3)^2 + \cdots + \sum_{j=1}^{n_k}(x_{kj} - \bar{x}_k)^2 \quad (2.7)$$

ซึ่งสามารถแปลงรูปแบบได้ดังสมการที่ (2.8)

$$SSE = (n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 + (n_3 - 1)S_3^2 + \cdots + (n_k - 1)S_k^2 \quad (2.8)$$

โดยในกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าของ Variation เป็นค่าที่แสดงความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ในกระบวนการพิจารณาจึงมีการใช้คำว่า Error แทนคำว่า Variation และผลบวกของสมการ 2.6 และ 2.7 สามารถที่จะสร้างสมการที่ (2.9) ซึ่งเรียกว่า Sum Square Total

$$SST = SSTr + SSE \quad (2.9)$$

โดยที่ Between-Samples หรือ Within-Sample นั้นค่า Sample จะหมายถึงค่า Level และ Treatment ถ้าเป็นกระบวนการ Between-Samples คือ การพิจารณาค่าระยะห่างระหว่าง Level ส่วน Within-Sample จะพิจารณาข้อมูลในแต่ละ Level ซึ่งกระบวนการหา Degree of Freedom (df) คือ เมื่อผลรวมทั้งหมด (SST) โดยที่ df = n-1 และ n คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมดของทุกๆ Level ในขณะที่ SSTr คือ ผลรวมระหว่าง Level โดยที่ df = k-1 และ k คือจำนวน Level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ SSE คือผลรวมจากทุกๆ ข้อมูลของทุก Level โดยที่ $df = n-k$ ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละพจน์ได้ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11)

$$MSTr = \frac{SSTr}{k-1} \quad (2.10)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad (2.11)$$

เมื่อ MSTr คือ Mean Square for Treatments (Between – Sample)

MSE คือ Mean Square Error (Within – Sample)

ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง MSTr และ MSE ในทาง ANOVA จะเรียกว่าการทดสอบ F test ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table) [29]

Source of Variation	Degree of Freedom (df)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F test
Between Sample (treatment)	k-1	SSTr	MSTr= SSTr/k-1	MSTr/MSE
Within Sample (Error)	n-k	SSE	MSE = SSE/n-k	
ผลรวม	n-1	SST		

2.3.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ สามารถทำได้โดยการกำหนดปัจจัยของการแจกแจงความน่าจะเป็นของกลุ่มประชากรสองกลุ่มขึ้นไป เพื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างหรือเหมือนกันของกลุ่มประชากร ตัวอย่างเช่น การทดสอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรที่หนึ่ง ว่ามีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรที่สองหรือไม่ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ และ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ โดยที่ μ_1 เป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่หนึ่งและ μ_2 เป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่สอง โดยที่ H_0 หมายถึง สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) และ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ เรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative hypothesis) ซึ่งกระบวนการทดสอบสามารถทดสอบแบบสองด้านได้ $\mu_1 < \mu_2$ หรือ $\mu_1 > \mu_2$ ก็ได้ ในกระบวนการวิเคราะห์สมมติฐานอาศัยกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุ่มตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของสมมติฐานจะอาศัย ค่า P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน โดยค่า P-Value คือ ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติของการทดสอบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าพบว่าในกระบวนการทดสอบสมมติฐานหลัก $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ มีระดับนัยสำคัญ P-Value เท่ากับ 0.05 นั้น แสดงว่ายอมรับ H_1 หรือกล่าวได้ว่า ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่หนึ่งมีความเชื่อมั่นน้อย ทำให้จากสมมติฐานจึงยอมรับสมมติฐานรอง หรือในทางกลับกันถ้าพบว่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าความเชื่อมั่นในสมมติฐาน H_0 มากกว่า H_1 ทำให้สรุปได้ว่า มีการยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดสมมติฐานหลัก สมมติฐานรอง และระดับนัยสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

$$\alpha = \text{ทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ } 0.05$$

ดังนั้น $\mu_1 =$ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่หนึ่ง

$\mu_2 =$ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่สอง

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย Paired samples T โดยโปรแกรม Minitab

1) Stat -> ANOVA -> One way Analysis

2) เลือกชุดข้อมูลทั้งสองชุดในแต่ละคอลัมน์

3) ใส่ค่าความเชื่อมั่นในช่อง Confidence level: ซึ่งค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ $1-\alpha$ หรือมีค่าเท่ากับ 95% และเลือกประเภทของสมมติฐานรองที่ต้องการทดสอบ แล้วเลือก Ok

4) เลือก Ok เพื่อเริ่มการประมวลผล ซึ่งวิธีการใช้ Minitab จะกล่าวรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.3.7

ขั้นตอนที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ P-Value ที่ได้จากการคำนวณ

มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1

มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

2.3.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล

ในกระบวนการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล คุณสมบัติหนึ่งของข้อมูลที่ต้องมีคือ ความปกติของข้อมูล (Normal) และความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) รวมทั้งความมีเสถียรภาพด้านความแปรปรวนของข้อมูล โดยกระบวนการตรวจสอบว่าข้อมูลมีความเหมาะสมในกระบวนการวิเคราะห์ความถูกต้องหรือไม่นั้น จะต้องทำการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual) ของ

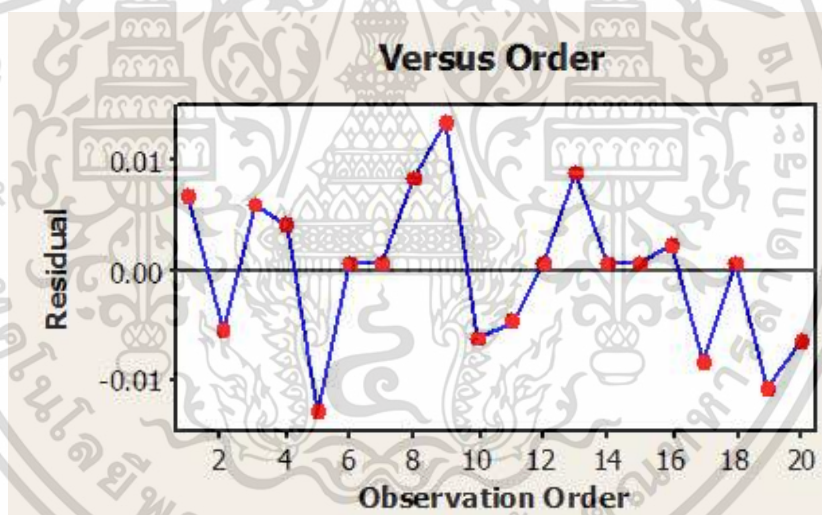
ข้อมูลโดยใช้สัญลักษณ์ e_{ij} ซึ่งหมายถึง Residual สำหรับข้อมูลที่ j และระดับปัจจัยที่ i สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.12)

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.12)$$

โดยที่ \hat{y}_{ij} คือ ค่าประมาณ หรือเรียกว่า Fit ของข้อมูล y_{ij} โดยกระบวนการทดสอบมีแนวทางในการวิเคราะห์ดังนี้

2.3.3.1 การวิเคราะห์ค่าความสุ่มของข้อมูล (Run Test)

โดยการใช้กราฟ Residual test ที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือและเวลาหรือลำดับของข้อมูลในกระบวนการพิจารณา ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.19 โดยที่ถ้าข้อมูลมีความสุ่มแล้วข้อมูลจะต้องมีการกระจายตัวและไม่มีลักษณะเป็นจุดต่อเนื่อง (Run) หรือมีข้อมูลต่อเนื่องเป็นแนวโน้ม (Trend) หรือมีข้อมูลเป็นวัฏจักร (Cycle)

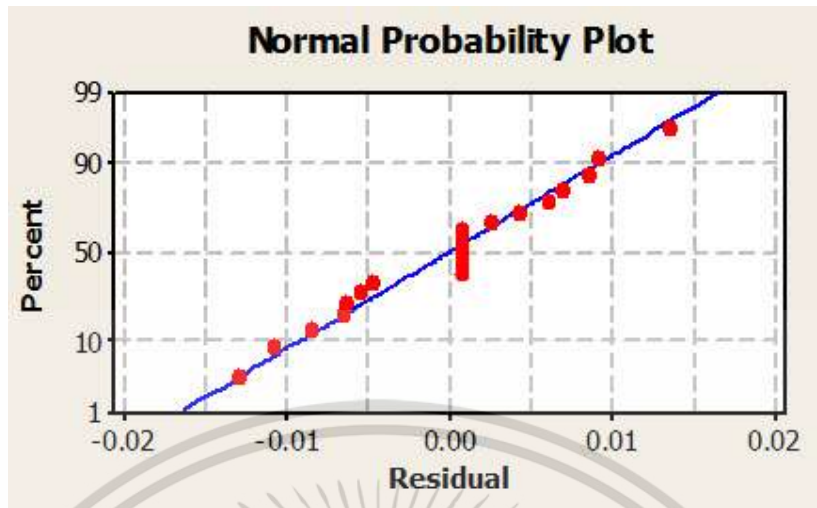


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างกราฟ I Chart of Residual

2.3.3.2 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper; NOPP)

กราฟการแจกแจงของข้อมูลเป็นกราฟระหว่างข้อมูลที่พิจารณาร่วมกับความถี่สะสมในสเกลของการแจกแจงแบบปกติ และทำการตรวจสอบข้อมูลความเป็นปกติโดยอาศัยหลักความน่าจะเป็นและลักษณะกราฟ ถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของข้อมูลจะเรียงตัวกันใกล้เคียงกับเส้นความน่าจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.20

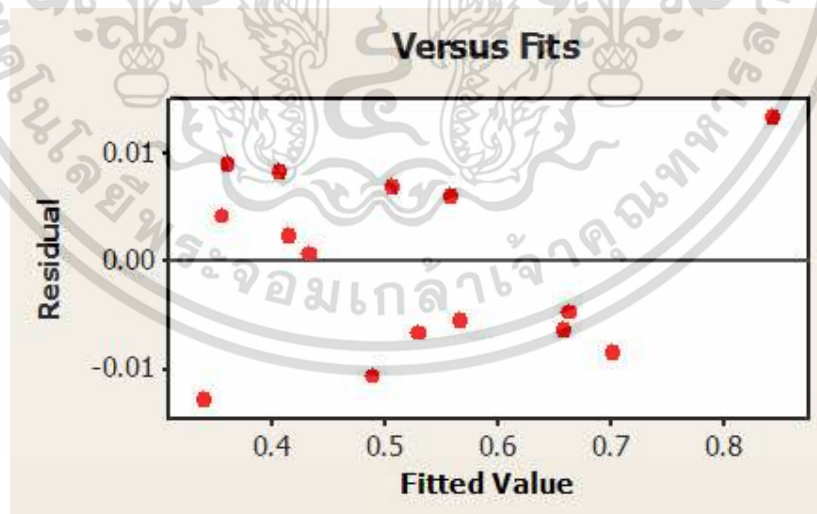
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

2.3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล (Test for Equal Variance)

โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Residual และ Fit ของข้อมูล โดยถ้าข้อมูลมีความเสถียรจะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวของข้อมูลบนเส้นเหนือและใต้ 0 ที่มีความใกล้เคียงกันหรือมีความคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 2.21

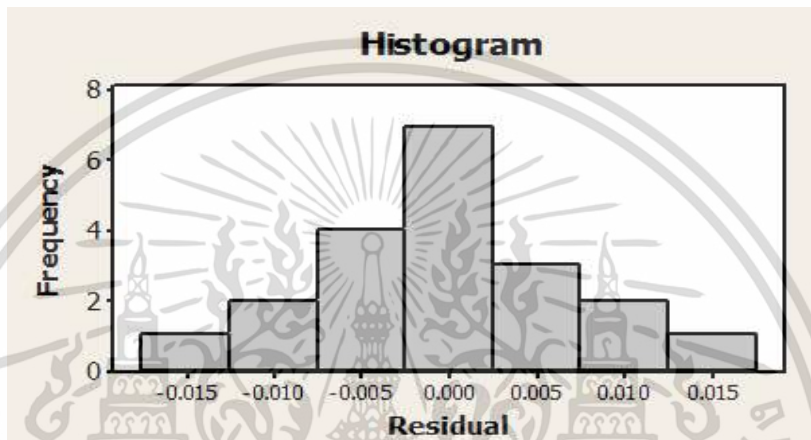


รูปที่ 2.21 ตัวอย่างกราฟทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Residual และ Fit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 การวิเคราะห์ฮิสโตแกรม (Histogram)

เป็นการแสดงการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละช่วงชั้นของข้อมูลชุดนั้นๆ โดยลักษณะของฮิสโตแกรมมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ชนิดรูปทรงปกติหรือระฆังคว่ำ ชนิดรูปฟันหอก ชนิดเบ้ขวา ชนิดเบ้ซ้าย ชนิดที่ราบสูง หรือหลายยอด เป็นต้น ซึ่งจากตัวอย่างรูปที่ 2.22 เป็นการแสดงการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะกราฟระฆังคว่ำ



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรม

2.3.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

2.3.4.1 หลักการออกแบบการทดลอง [29]

กระบวนการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) คือ กระบวนการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลการทดลองที่เหมาะสม สามารถนำผลมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติได้ ซึ่งจะเป็นผลอ้างอิงในการหาข้อสรุปอย่างเป็นเหตุเป็นผล โดยการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการสรุปผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าในกระบวนการทดลองที่กำลังพิจารณามีผลเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทดลองเชิงสถิติเป็นวิธีเดียวที่จะสามารถวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองได้ ซึ่งกระบวนการที่ต้องพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงสถิติมีอยู่ 2 ประการ คือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยที่หลักการพื้นฐานในกระบวนการออกแบบการทดลองมี 3 ประการ คือ

1) Replication คือ การทดลองซ้ำ ซึ่งผลที่ได้จากขั้นตอนนี้จะทำให้ผู้พิจารณาสามารถหาค่าการประมาณของความผิดพลาดของผลการทดลองได้ และได้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่จะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้เพื่อประมาณการผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในกระบวนการทดลอง ดังนั้น Replication สามารถทำให้ได้ผลลัพธ์ของตัวประมาณค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาค่าผลกระทบของการทดลอง

2) Randomization คือ กระบวนการทดลองที่ทุกปัจจัย ทั้งวัสดุและลำดับการทดลองในแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) โดยที่การออกแบบการทดลองแบบเชิงสถิติกำหนดว่า ข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ โดยกระบวนการ Randomization จะเป็นกระบวนการที่ช่วยให้ลดผลกระทบของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3) Blocking คือ กระบวนการที่ใช้เพิ่มความเที่ยงตรงในกระบวนการทดลอง การบล็อกปัจจัยบางส่วนเพื่อพิจารณาส่วนหนึ่งของปัจจัยหรือวัสดุในกระบวนการทดลองจะช่วยให้กระบวนการเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อก

2.3.4.2 ขั้นตอนกระบวนการพิจารณาการออกแบบการทดลอง [29]

ในการทำการทดลองเชิงสถิติการออกแบบและวิเคราะห์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจและศึกษา เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ขั้นตอนในกระบวนการพิจารณามีดังต่อไปนี้

1) การทำความเข้าใจปัญหาทดสอบ ในกระบวนการทำความเข้าใจและวิเคราะห์ปัญหาที่จะทำการทดลองนั้น จะต้องพยายามพัฒนากระบวนการคิดที่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยอาจจะค้นหาข้อมูลอินพุต (Input) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อการสรุปประเด็นปัญหาให้มีความชัดเจนในกระบวนการทดลองมากขึ้น

2) การเลือกปัจจัยและระดับขอบเขตของกระบวนการทดลอง ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญ โดยกระบวนการกำหนดระดับ (Level) ที่จะทำการทดลอง รวมถึงการพิจารณาการควบคุมปัจจัยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จะต้องทำการพิจารณาและทำความเข้าใจถึงปัญหาที่กำลังพิจารณา รวมถึงวัตถุประสงค์ในกระบวนการกรองปัจจัย (Screening Factor) กระบวนการทดลองควรเลือกขอบเขตที่กว้างมากพอที่จะนำผลการทดลองมาพิจารณาคัดกรองปัจจัยที่มีความสำคัญและระดับของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

2.3.4.3 การเลือกตัวแปรผลตอบ

ในกระบวนการเลือกจะต้องแน่ใจว่าปัจจัยนั้นๆ ให้ข้อมูลที่ถูกต้อง และส่วนมากค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบของการทดลอง

2.3.4.4 การเลือกกระบวนการออกแบบการทดลอง

การเลือกแผนการทดลอง จะต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของกระบวนการทดลอง ในกระบวนการทดลองตามหลักวิศวกรรม จะต้องทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบก่อนทำการออกแบบ แต่ผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นการแสดงเพื่อให้เห็นว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีความแตกต่างและผลกระทบแตกต่างกันอย่างไร

2.3.4.5 การทำการทดลอง

ในกระบวนการทดลองจะต้องติดตามและระมัดระวังในขั้นตอนการทดลองเพื่อลดปัจจัยรบกวนและป้องกันการเกิดการผิดพลาดขณะทำการทดลอง

2.3.4.6 การวิเคราะห์ผลข้อมูลในเชิงสถิติ

ในขั้นตอนนี้ถ้ากระบวนการทดลองและการออกแบบการทดลองกระทำมาอย่างเป็นขั้นตอน ผลของการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์เชิงสถิติจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความสมเหตุสมผลและมีความน่าเชื่อถือ

2.3.4.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อผ่านกระบวนการทดลองและวิเคราะห์ผลเรียบร้อยแล้ว จะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังต้องทำการยืนยันผลการทดลอง (Confirmation experiment)

2.3.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) [29]

กระบวนการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล คือ การออกแบบการทดลองที่ต้องคำนึงถึงผลที่จะเกิดรวมกันของระดับ (Level) ของแต่ละปัจจัยที่เป็นไปได้ในกระบวนการทดลอง เช่น การทดลอง 2 ปัจจัย ประกอบด้วย ปัจจัย A ที่ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ที่ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบไปด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง โดยที่เมื่อนำมาจัดเรียงในการทดลองแบบแฟคทอเรียล จะต้องทำการไขว้ (Crossed) ปัจจัยในการทดลองเพื่อดูความสัมพันธ์ของปัจจัย รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย ในแต่ละ Replicate ของกระบวนการทดลองนั้น จะต้องประกอบด้วยการทดลองร่วมดังกล่าว ab การทดลอง และพิจารณาจำนวน Replicate ทั้งหมด n ครั้ง โดยกำหนดให้ y_{ijk} คือ ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) ในขณะที่ ปัจจัย B มีระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับ Replicate ที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) โดยที่ลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้ง ถูกเลือกมาแบบสุ่ม ดังนั้น การออกแบบชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomize Design) โดยแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.23 [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	...				
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

2.3.5.1 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) [30] กระบวนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปจะนิยมใช้เพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยอย่างน้อย 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยจุดประสงค์หลักของการทดลองแบบนี้คือ ต้องการพิจารณาผลกระทบร่วม โดยระดับของปัจจัยจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของปัจจัย โดยที่ปัจจัยที่วิกฤต (Critical Factor) จะต้องทำการศึกษาอย่างละเอียดและจะมีการพิจารณาใช้ระดับของปัจจัยที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถเขียนสมการตัวแบบของการทดลองได้ ดังสมการที่ (2.13)

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.13)$$

โดยที่ y_{ijk} คือ ค่าการตอบสนอง (Response) ของกระบวนการทดลอง โดยที่ปัจจัย A ที่ระดับการทดลอง i และปัจจัย B ที่ระดับการทดลอง j โดยทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k ; $i = 1, 2$; $j = 1, 2$; $k = 1, 2, \dots, n$

μ คือ ผลเฉลี่ยรวม (Grand mean)

α_i คือ ค่าผลกระทบปัจจัย A ที่ระดับ i

β_j คือ ค่าผลกระทบปัจจัย B ที่ระดับ j

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(\alpha\beta)_{ij}$ คือ ค่าอันตรกิริยา หรือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A และ B และที่ระดับปัจจัย i และ j

ε_{ijk} คือ ค่าความผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A และ B ที่ระดับปัจจัย i และ j โดยทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k

2.3.5.2 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) [30]

ในกระบวนการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน ส่วนมากจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening Experiment) คือ เป็นการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องต่อปัญหาเพื่อดูผลตอบสนองต่อระบบมากที่สุด ซึ่งจะนิยมใช้กระบวนการนี้ในการทดลองขั้นตอนแรก กระบวนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเป็นกระบวนการทดลองเพื่อลดรูปลงจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ คือ การทดลอง $2^{k-p} = \frac{2^k}{2^p}$ โดยที่ $p=1$ โดยจำนวนการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ($\frac{1}{2}(2^k)$) ของ k ปัจจัย โดยเรียกว่า One-Half Fraction Factorial โดยถ้า $p=2$ จำนวนวิธีการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ $\frac{2^k}{2^2} = \frac{1}{4}(2^k)$ เรียกว่า One-Forth Fraction Factorial

2.3.5.3 โครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดแผนการทดลอง (Alias Structure and Design Resolution) [30]

ในกระบวนการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนส่วนมากจะนิยมศึกษาปัจจัยในกระบวนการทดลองที่ 2 ระดับ เพื่อทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (Screening Experiment) และศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ เมื่อต้องการหาความสัมพันธ์ โดยสมการความสัมพันธ์กำลังสอง (2nd Order Modeling) โดยที่ในกระบวนการทดลองแบบลดรูปจะต้องรู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่จะต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก (Main Factors) และปัจจัยความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Factors) โดยที่การศึกษาโครงสร้างที่ซ้ำซ้อนนั้นสามารถสังเกตได้จากค่ารายละเอียดของแผนการทดลอง (Design Resolution) ซึ่งเป็นตัวช่วยกำหนดและเลือก Generator โดยรายละเอียดของแผนการทดลองแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดแผนการทดลอง [30]

Resolution	P-Factor	(R-p) Factor	สรุปความหมาย
III	1 (Main Effects)	2 (2-Factor Interaction)	สำหรับ Resolution III ในกลุ่มนี้ ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกัน แต่จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (Two Factor Interaction) เช่น 2^{3-1} โดยที่ I = ABC พบว่า C จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมของ AB เป็นต้น
	(2) (2-Factor Interaction)	(1)	
IV	1	3	Resolution IV ในกลุ่มนี้ ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกัน และไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมทั้ง 2 ปัจจัย เช่น 2^{4-1} เมื่อ I = ABCD โดยที่ A จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม BCD ผลกระทบ B จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมของ ACD เป็นต้น
	2	2	
	(3)	(1)	
V	1	4	สำหรับกลุ่มนี้ ผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก และไม่ซ้ำซ้อนกับ 2-Factor Interaction แต่ผลกระทบร่วมจะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย
	2	3	
	(3)	(2)	

2.3.5.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง [30]

สำหรับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีความเหมาะสมสำหรับการพิจารณาหรือสร้างตัวแบบของปัญหาตอบสนองแบบโพลีโนเมียลดีกรี (Second-Order or Quadratic Model) ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองชนิดอื่น การออกแบบส่วนผสมกลางสามารถที่จะเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูป (2^k Full Factorial) และการออกแบบการทดลองแบบบางส่วน (2^{k-p} Fractional Factorial) โดยสามารถทดลองได้เป็นส่วนๆ คือ การทำการทดลองส่วน Factorial และ จุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน แล้วทำการทดลองตัวแบบสมการเชิงเส้น ถ้าสมการเชิงเส้นไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Portion) ซึ่งจะทำได้สมการตัวแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Quadratic Model)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางจะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียล ที่มี n_f รัน ในแนวแกนหรือในรูปแบบดาว (Star) และ n_c รันที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ ส่วนผสมกลาง ในทางปฏิบัติจะทำการทดลองแบบเป็นอันดับ คือ การออกแบบ 2^k จะถูกนำมาเพื่อทดลองและทดสอบแบบจำลองอันดับหนึ่งก่อน และเมื่อพบว่าแบบจำลองไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อให้เกิดพจน์ของตัวแบบกำลังสอง โดยในกระบวนการทดลองจะต้องมีการกำหนดระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลอง และจำนวนจุดศูนย์กลาง n_c ในกระบวนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ต้องออกแบบ 2^k Factorial โดยมีการทดลองเพิ่มเติมเพื่อนำไปประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแบบสมการอันดับ 2 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_k \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\alpha & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha \end{bmatrix}$$

โดยที่ α เป็นค่าระยะทางของการรันในแนวแกนซึ่งผู้ทดลองเป็นผู้เลือก เช่นกรณีจำนวนปัจจัย (k) = 3 จะได้ Matrix การทดลองดังนี้

$$D = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\alpha & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ 8 จุดแรก คือการออกแบบ Full Factorial 2^k จุดที่ 9 คือ จุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลอง (0, 0, 0) (Center Point) และจุดที่ 10 ถึง 15 คือ จุดในแนวแกน (Axial Point) โดยจำนวนจุดจะเท่ากับ Full Factorial 2^k และโดยทั่วไปจุด Center point จะออกแบบมากกว่า 1 จุด

$$X = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_{11} & \beta_{22} & \beta_{33} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{23} \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & +1 & +1 \\ 1 & -1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & +1 & -1 \\ 1 & -1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & -1 & +1 \\ 1 & +1 & -1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & -1 & +1 \\ 1 & +1 & -1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & -1 & +1 & -1 \\ 1 & +1 & +1 & -1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & -1 & -1 \\ 1 & +1 & +1 & +1 & 1-c & 1-c & 1-c & +1 & +1 & +1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\alpha & 0 & 0 & \alpha^2 - c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha & 0 & 0 & \alpha^2 - c & -c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\alpha & 0 & -c & \alpha^2 - c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \alpha & 0 & -c & \alpha^2 - c & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\alpha & -c & -c & \alpha^2 - c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \alpha & -c & -c & \alpha^2 - c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X/X = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_{11} & \beta_{22} & \beta_{33} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{23} \\ N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F + 2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F + 2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F + 2\alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p & q & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & q & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p & p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้ $k =$ จำนวนปัจจัย

$$F = 2^k \text{ จำนวนแบบการทดลองแบบ Full Factorial}$$

$$T = 2^k + n^c$$

$n_c =$ จำนวนการทดลองที่ Center point ของการออกแบบ

$$C = (F + 2\alpha^2)/(F + T)$$

$$N = \text{จำนวนการทดลองทั้งหมด} = F + T$$

$$p = [(FT - 4F\alpha^2 - 4\alpha^2 + 2)(F + T)\alpha^4]/(F + T)$$

$$q = (FT - 4F\alpha^2 - 4\alpha^4)/(F + T)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า X'/X ไม่ได้เป็นเมตริกซ์แยงมุม ซึ่งส่งผลให้ทำการคำนวณได้ยาก จึงเกิดการออกแบบลักษณะ Orthogonal Central Composite Design) โดยการเลือกค่าที่เหมาะสมโดยที่กำหนดให้

$$\alpha = (qF/4)^{1/4} \quad (2.14)$$

$$q = [(F + T)^{1/2} - F^{1/2}]^2 \quad (2.15)$$

2.3.5.5 ชนิดการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง [31]

สามารถแบ่งออกเป็น 3 คุณลักษณะของการทดลองขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกใช้ในทางปฏิบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งในกระบวนการวิจัยฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางในกระบวนการออกแบบการทดลองเพื่อลดความซับซ้อนในกระบวนการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) [31]

ชนิดของ CCD	สัญลักษณ์	ลักษณะของชนิด CCD	รูปแสดงลักษณะการออกแบบ
Circumscribed	CCC	การออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางแบบวงกลม เป็นการออกแบบโดยกำหนดให้ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลองจะเท่ากับรัศมีของวงกลมดังแสดงในรูป และในกระบวนการออกแบบการทดลองจะต้องกำหนดระดับ (Level) การทดลองเท่ากับ 5 และสามารถที่จะใช้ Resolution V ได้	
Inscribed	CCI	ลักษณะการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางแบบวงกลมย่อส่วน จะมีระเบียบวิธีการปฏิบัติที่คล้ายกับชนิดวงกลม แต่จะย่อส่วนลงมาให้อยู่ในขอบเขตของระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางที่มีค่าน้อยกว่า ± 1 แต่ระดับ (Level) ของปัจจัยยังคงต้องใช้เท่ากับ 5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงชนิดของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) [31]

ชนิดของ CCD	สัญลักษณ์	ลักษณะของชนิด CCD	รูปแสดงลักษณะการออกแบบ
Face Centered	CCF	ลักษณะการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางแบบหน้าศูนย์กลางกำหนดให้ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนของจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลองจะเท่ากับ ± 1 โดยพิจารณาในรูปแบบของพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมและกำหนดระดับการทดลอง (Level) ที่ 3 ระดับ	

2.3.6 การกำหนดตัวแบบด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [29]

วิธีการวิเคราะห์แบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) เป็นกระบวนการที่รวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติมาทำการสร้างตัวแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลลัพธ์ที่พิจารณาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลลัพธ์ โดยส่วนใหญ่ในกระบวนการพิจารณาจะรู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์กับปัจจัยอิสระ ดังนั้น ในขั้นตอนแรกจะต้องประมาณค่าที่เหมาะสมที่จะนำเป็นตัวแทรกสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างค่าผลตอบสนอง (y) และเซตของปัจจัยอิสระ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำและภายใต้เงื่อนไขขอบเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ โดยถ้าตัวแบบจำลองของผลลัพธ์มีความสัมพันธ์ในกำลังพหุนามต่ำหรือเป็นเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันนั้นก็จะสามารถประมาณความสัมพันธ์ออกมาเป็นตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้นกำลังหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.16)

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i \quad (2.16)$$

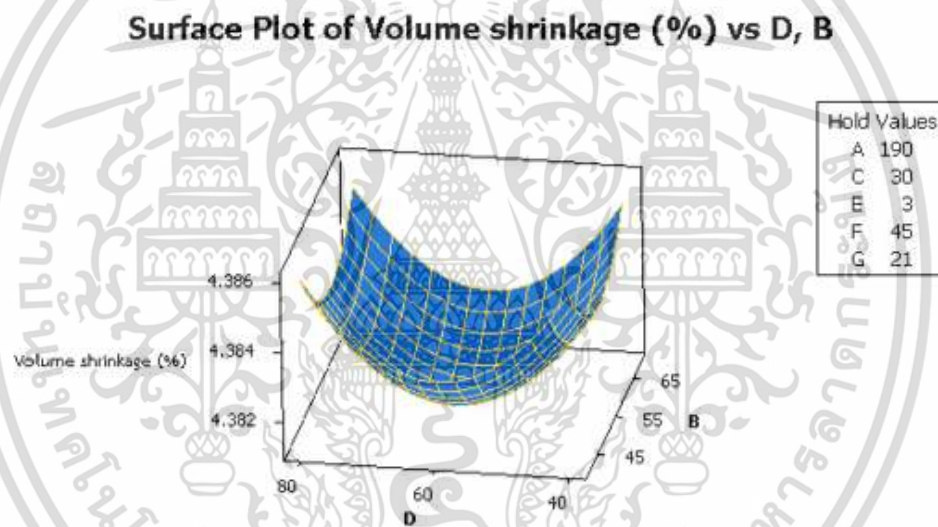
โดยที่ X_i คือตัวแปรอิสระ Y คือค่าฟังก์ชันที่เหมาะสม (ผลลัพธ์ของปัญหาที่พิจารณา) k คือ จำนวนของพารามิเตอร์ที่ออกแบบ A_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าคงที่ A_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น แต่ถ้ามีปัจจัยตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้นและผลลัพธ์ของตัวแบบเชิงเส้นไม่มีความสัมพันธ์ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยอิสระ ในกระบวนการขั้นที่สองคือ การใช้พหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสองเพื่อการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอิสระกับผลลัพธ์ที่พิจารณา ดังสมการที่ (2.17) และแสดงรูปตัวอย่างที่ 2.24

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{i < j}^k A_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} X_i^2 \quad (2.17)$$

โดยที่ X_i คือตัวแปรอิสระ Y คือค่าฟังก์ชันที่เหมาะสม (ค่าการบิดงอ หรือค่าการงอตัวของชิ้นงาน) k คือจำนวนของพารามิเตอร์ที่ออกแบบ A_0 คือค่าสัมประสิทธิ์ของค่าคงที่ A_i คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น A_{ij} คือค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมของผลคูณเชิงเวกเตอร์ A_{ii} คือค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมของผลคูณกำลังสอง

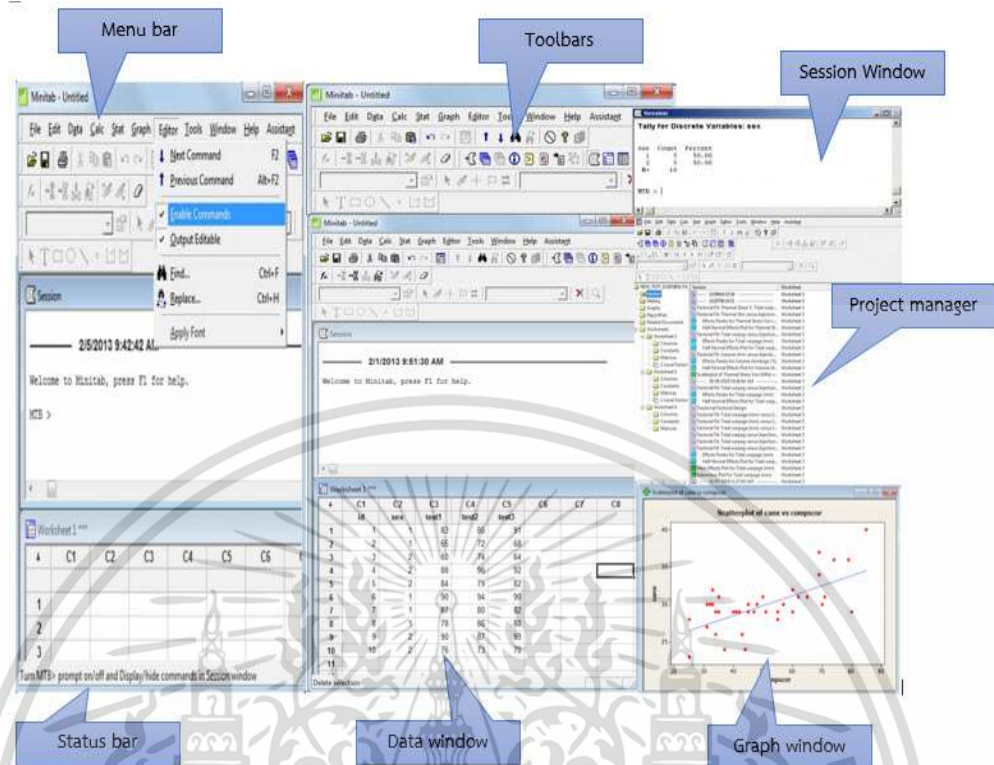


รูปที่ 2.24 ตัวอย่างรูปพื้นที่ผิวตอบสนองแบบสามมิติ

2.3.7 การใช้โปรแกรม Minitab ในกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง [32]

สำหรับโปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยรูปร่างโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างโปรแกรมและองค์ประกอบต่างของโปรแกรม Minitab

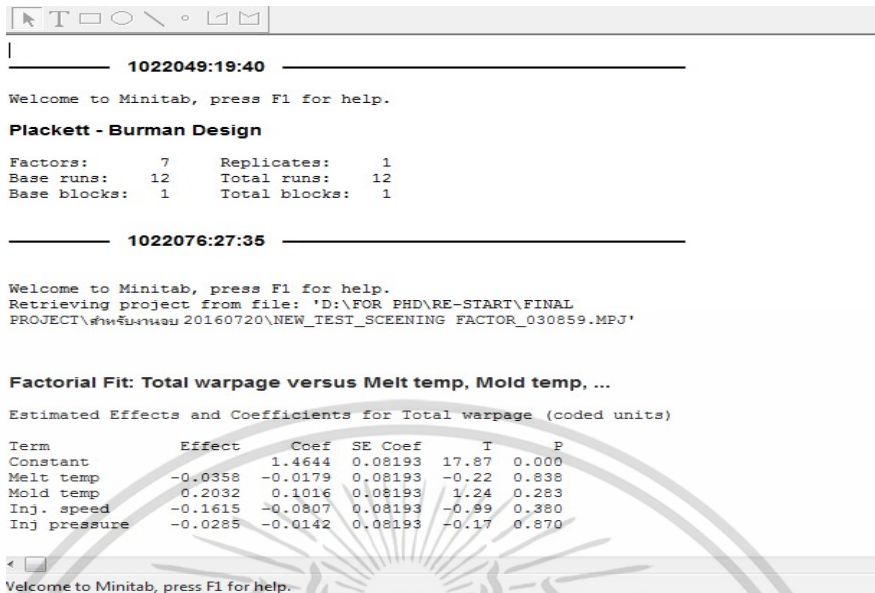
2.3.7.1 Toolbar และ Menu bar

เป็นฟังก์ชันองค์ประกอบหลักที่บรรจุคำสั่ง (Standard Toolbar, Worksheet, Graph Editing, DOE Toolbars (Factorial), Response Surface Design, Mixture Design และ Taguchi Designs) เป็นต้น

2.3.7.2 Session Window

เป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงผลลัพธ์ทางสถิติ โดยสามารถเลือกคำสั่ง Data และ Display Data เพื่อแสดงผลข้อมูลดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างการแสดงผลบน Session Window

2.3.7.3 Data Windows

เป็นตารางแสดงหลัก (Columns) และแถว (Rows) ซึ่งในตารางสามารถที่จะใส่ข้อมูล และแก้ไขข้อมูลดังตัวอย่างแสดงผลรูปที่ 2.27

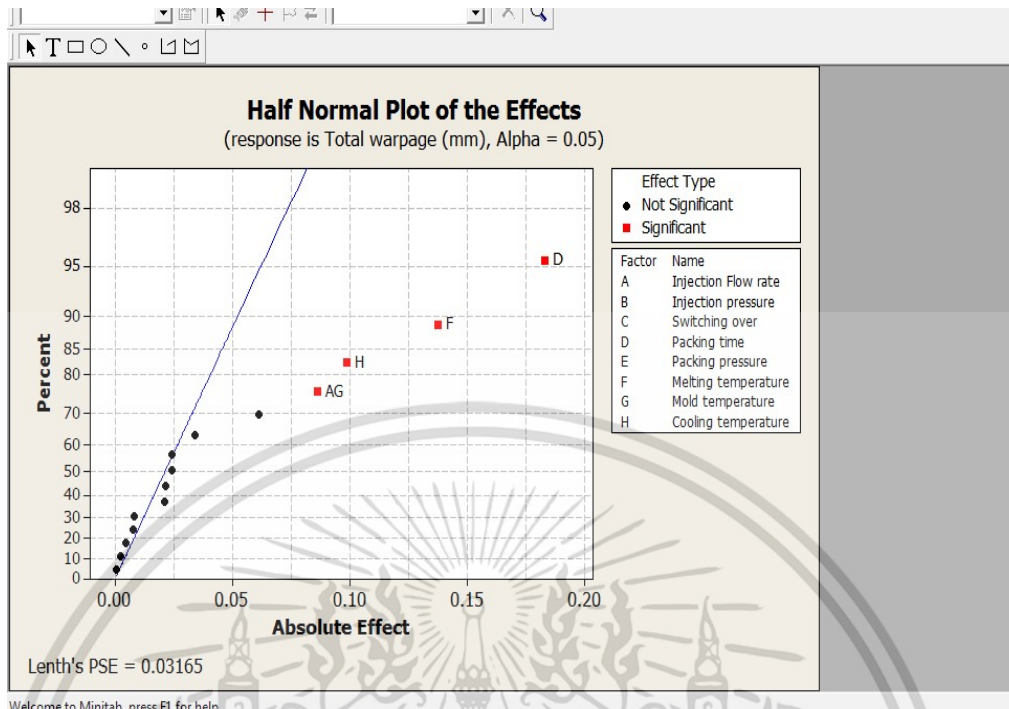
	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	Injection pressure	Switching over	Packing time	Packing pressure	Melting temperature	Mold temperature	Cooling temperature	Warpage x (mm)	Warpage y (mm)	Warpage Z (mm)
2	98	80	3	80	210	70	20	0.8323	0.10030	0.05186
3	60	98	15	60	170	70	60	0.4962	0.05830	0.01071
4	80	98	15	80	170	55	20	0.4705	0.05620	0.01726
5	60	90	3	60	170	55	20	0.6971	0.08257	0.04177
6	60	98	15	60	210	55	20	0.6225	0.07435	0.02313
7	80	98	3	60	210	55	60	0.6810	0.08045	0.01485
8	80	90	15	60	170	55	60	0.4469	0.05210	0.00961
9	80	90	3	80	170	55	20	0.8585	0.10190	0.05438
10	80	90	3	80	170	70	60	0.5624	0.06591	0.01218
11	60	90	3	60	210	70	60	0.6926	0.08156	0.01511
12	80	98	15	80	210	70	60	0.5096	0.06014	0.01103
13	80	90	15	60	210	70	20	0.6155	0.07425	0.02239
14	60	90	15	80	170	70	20	0.3769	0.04476	0.01830
15	80	98	3	60	170	70	20	0.6695	0.07828	0.04222
16	60	90	15	80	210	55	60	0.5572	0.06568	0.01205

รูปที่ 2.27 ตัวอย่างการแสดงผลบน Data Windows

2.3.7.4 Graph Windows

เป็นฟังก์ชันที่ใช้แสดงกราฟ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ 200 กราฟ และมีหลากหลายชนิด กราฟของการแสดงผลขึ้นอยู่กับตัวเลือกใช้ผลวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในรูปที่ 2.28

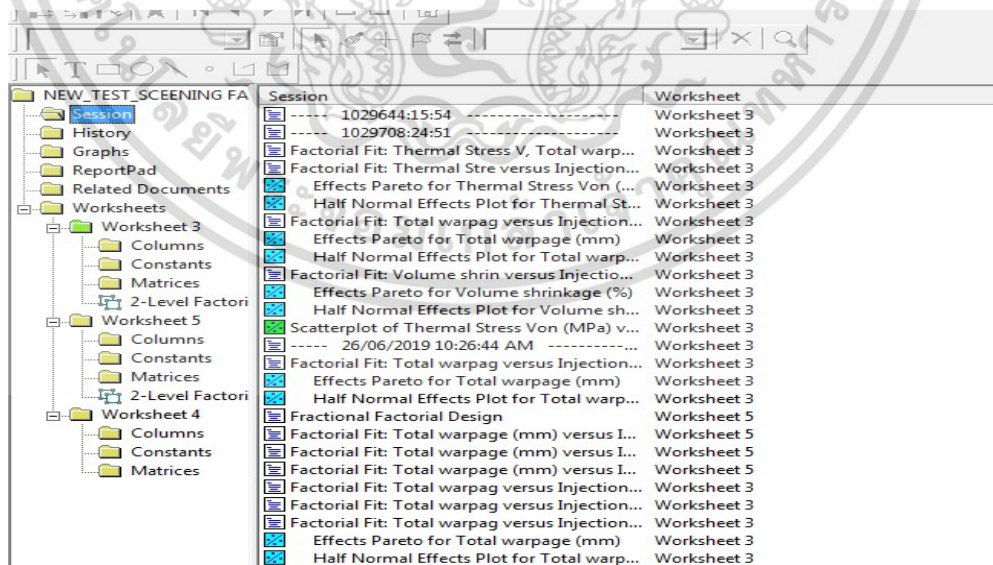
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการแสดงรูปแบบ Graph Windows

2.3.7.5 Project Manager

ใช้เพื่อการแสดงรายละเอียด Files ใน Project โดยสามารถเลือก Folder เพื่อแสดงหน้าจอต่างๆ ได้ตามความต้องการ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.29

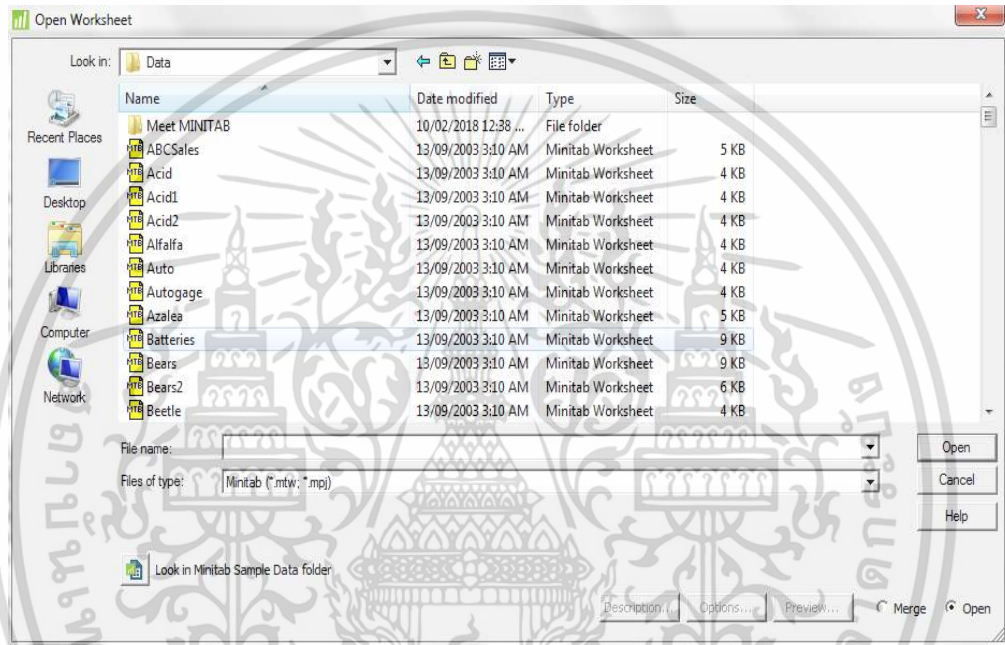


รูปที่ 2.29 ตัวอย่างการแสดงรูปแบบ Project Manager

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7.6 ฟังก์ชัน Open Worksheet

เป็นแหล่งที่เก็บข้อมูล ซึ่งในโปรแกรม Minitab สามารถรองรับข้อมูลสำหรับ Worksheet ได้ 3 รูปแบบ คือ รูปแบบข้อมูลตัวเลข (Numeric Data) รูปแบบข้อมูลตัวอักษร (Text Data) และข้อมูลจำนวน วัน เวลา (Date/Time Data) ซึ่งลักษณะข้อมูลใน Directory แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการแสดง Open Worksheet

2.3.7.7 กระบวนการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองผ่านโปรแกรม

Minitab

ในกระบวนการออกแบบการทดลองใน Minitab สามารถที่จะเลือกประเภทการออกแบบได้เป็น 4 ประเภท คือ Factorial, Response Surface, Mixture, และ Taguchi Method โดยในกระบวนการออกแบบการทดลองไม่ว่าจะเลือกวิธีใดขั้นตอนของการกรอกข้อมูลใน Minitab ก็คล้ายๆ กัน ซึ่งใน Minitab สามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลได้ในหลายมิติ ซึ่งลำดับขั้นในการใช้ Minitab ในกระบวนการออกแบบการทดลองมีดังนี้

- 1) การทดลองชนิดต่างๆ จะต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมต่อการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสร้างและกรอกข้อมูลเพื่อการเก็บค่าการทดลองอย่างอัตโนมัติ หลังจากนั้นเลือกรูปแบบการทดลองพร้อมทั้งระบุข้อมูลที่จำเป็น

3) แสดงและจัดเก็บข้อมูลทางสถิติเพื่อใช้ในการพิจารณาและแสดงผลการทดลอง

4) แสดงผลกราฟเพื่อช่วยในการนำเสนอและแสดงผลลัพธ์ของการทดลอง

ส่วนในกระบวนการวิเคราะห์และแปรผลการทดลอง เมื่อมีการสร้างข้อมูลและทำการทดลองจัดเก็บผลของข้อมูลการทดลองแล้ว จะสามารถหาตัวแบบและสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลตอบสนองของการทดลอง โดยอาศัย Session และกราฟ อธิบายผลที่ได้จากการทดลอง โดยเริ่มจากการแปลงผลโดยดูจาก Session ดังตัวอย่างการแสดงผลบน Session ในรูปที่ 2.31

Factorial Regression: Hours versus OrderSystem, Pack

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	53.894	17.9646	40.25	0.000	
Linear	2	44.915	22.4576	50.32	0.000	
OrderSystem	1	28.768	28.7680	64.46	0.000	
Pack	1	16.147	16.1472	36.18	0.000	
2-Way Interactions	1	8.979	8.9787	20.12	0.002	
OrderSystem*Pack	1	8.979	8.9787	20.12	0.002	
Error	8	3.571	0.4463			
Total	11	57.464				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.668069	93.79%	91.46%	86.02%

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		12.573	0.193	65.20	0.000	
OrderSystem	3.097	1.548	0.193	8.03	0.000	1.0
Pack	-2.320	-1.160	0.193	-6.01	0.000	1.0
OrderSystem*Pack	1.730	0.865	0.193	4.49	0.002	1.0

รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการแสดงผลบน Session

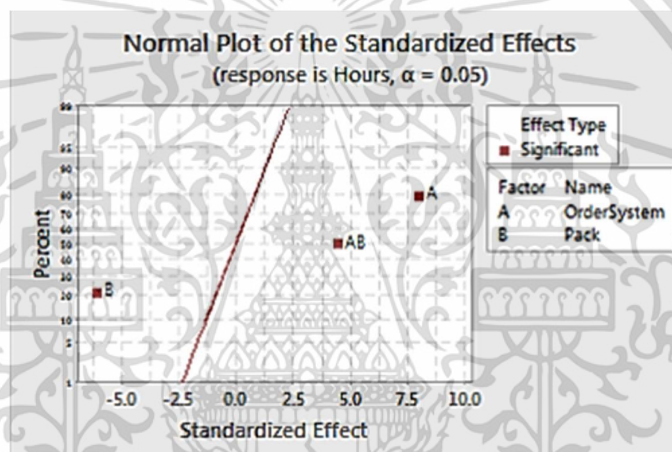
ตัวแบบที่ได้จาก Minitab เป็นอิทธิพลจากปัจจัยหลัก (Main effect) และปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย (Two-Way Interaction) โดยจะใช้ค่า P-values ที่ได้จากตาราง Estimated Effects และมีค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) เพื่อใช้ในการพิจารณาคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญทางสถิติ จากตัวอย่างข้างต้น มีการกำหนดให้ระดับความสำคัญ ($\alpha = 0.05$) โดยพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main effect และ Interaction effect ของทั้งสองปัจจัยมีค่านัยสำคัญทางสถิติเพราะมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

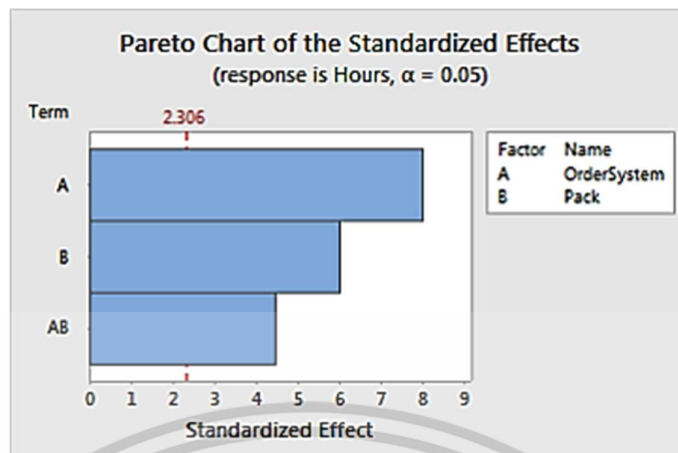
ในกระบวนการแปลผลการมีนัยสำคัญของปัจจัยโดยใช้กราฟ Minitab สามารถที่จะนำเสนอกราฟ Normality Probability และ Pareto chart เพื่อการแสดงผลของค่านัยสำคัญที่ได้ Standardized โดยการแปลผลอิทธิพลของปัจจัยจากกราฟสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) การพิจารณาจากกราฟ Normality Probability ปัจจัยที่พิจารณา (Term) ที่มีค่านัยสำคัญทางสถิติจะถูกนำเสนอด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.32 ที่จะเห็นได้ว่าปัจจัย A, B และ Interaction (A*B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อกันที่ระดับ $\alpha = 0.05$



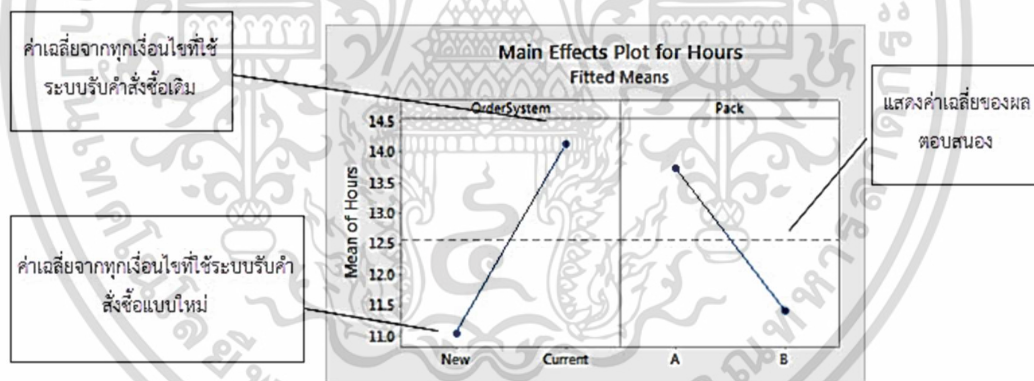
รูปที่ 2.32 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ Normality Probability

2) การพิจารณา Pareto Chart ที่แสดงค่าขนาดของควมมีนัยสำคัญของปัจจัยทั้ง Main และ Interaction effects โดยจะเทียบจากเส้นอ้างอิงดังตัวอย่างรูปที่ 2.33 โดยที่เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ก็จะพบว่าทั้งปัจจัย A,B และ A*B มีอิทธิพลต่อปัญหาทั้งสาม



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ Pareto chart

3) นอกจากการใช้ Normality Probability และ Pareto chart ในการพิจารณา Main and Interaction effects ใน Minitab ยังควรมีการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effects) ผ่านการพิจารณาจากกราฟ Main Effect Plot ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.34 ที่แสดงให้เห็นถึงการใช้ระบบรับคำสั่งซื้อระบบใหม่และแบบเดิม ร่วมทำการบรรจุสินค้าแบบ A เทียบแบบ B

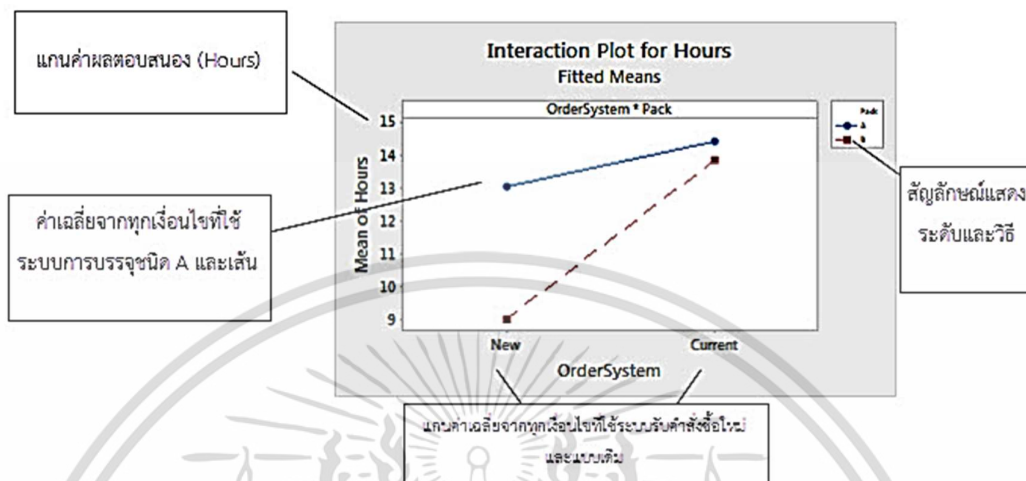


รูปที่ 2.34 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main Effect Plot)

จากรูปที่ 2.34 จะพบว่าระบบรับคำสั่งซื้อและวิธีการบรรจุมีอิทธิพลต่อเวลาในกระบวนการจัดเตรียมสินค้าก่อนจัดส่งทั้งคู่ ที่เส้นเชื่อมของค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ (Hours) โดยสามารถสรุปผลจากกราฟ Main Effect Plot ได้ดังนี้ ระบบการรับคำสั่งซื้อแบบใหม่ (New) จะใช้เวลาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบแบบเดิม (Current) และวิธีบรรจุแบบ B จะใช้เวลาในการจัดของน้อยกว่าวิธีบรรจุแบบ A นอกจากการพิจารณานัยสำคัญของปัจจัยหลัก การพิจารณากราฟ Interaction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect Plot ก็เป็นอีกหนึ่งกราฟที่ Minitab สามารถนำเสนอผลการวิเคราะห์เพื่อความต้องการในการทดลองมากขึ้น โดยตัวอย่างการพิจารณา Interaction Effect Plot ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟวิเคราะห์ปัจจัยร่วม (Interaction Effect Plot)

จากผลของกราฟสามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้ โดยที่การเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่ง กับอีกปัจจัยหนึ่งอันเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยร่วมอาจส่งผลต่อบรรยากาศ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ดังนั้น Interaction effect จึงเป็นส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ โดยจากกราฟรูปที่ 2.35 แสดงให้เห็นว่า การเตรียมสินค้าก่อนส่งลูกค้าด้วยวิธีการบรรจุสินค้าแบบ B ใช้เวลาสั้นที่สุดที่ 9 ชั่วโมง ในขณะที่การบรรจุแบบ A จะใช้เวลาประมาณ 13 ชั่วโมง ที่วิธีการรับคำสั่งแบบใหม่ทั้งคู่ ในขณะที่การบรรจุแบบ A และ B ที่วิธีการรับคำสั่งแบบเดิมจะใช้เวลาในกระบวนการเตรียมสินค้าที่มากที่สุดประมาณ 13.5 ชั่วโมงและ 14.5 ชั่วโมง จึงสรุปได้ว่าวิธีการบรรจุจะมีอิทธิพลมากกว่าเดิมเมื่อใช้กระบวนการรับคำสั่งแบบใหม่ จึงแนะนำให้ใช้ระบบรับคำสั่งแบบใหม่และวิธีการบรรจุแบบ B ก็จะได้เวลาในกระบวนการเตรียมสินค้าที่สั้นที่สุด

2.3.8 อัลกอริทึมหึ่งห้อย [33]

สำหรับอัลกอริทึมหึ่งห้อย เป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยมีแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมของหึ่งห้อยที่ใช้แสงในการนำทางเพื่อหาคู่หรือหาอาหาร ผู้คิดค้น คือ Xin She Yang จากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ในปี ค.ศ. 2007 โดยที่อัลกอริทึมนี้ได้ทำการเลียนแบบพฤติกรรมของหึ่งห้อยมาเป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยมีการกำหนดสมมติฐานตามวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดให้หึ่งห้อยไม่มีเพศและหึ่งห้อยทุกตัวสามารถดึงดูดเข้าหาซึ่งกันและกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) จุดดึงดูดของหิ่งห้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงสว่างที่ถูกปล่อยออกมา โดยที่หิ่งห้อยที่ปล่อยความสว่างของแสงออกมามากกว่าจะดึงดูดหิ่งห้อยที่มีความส่องสว่างออกมาน้อยเข้าหาตัวมัน โดยที่ระยะทางระหว่างหิ่งห้อยเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสว่าง และหากไม่มีหิ่งห้อยตัวใดมีความส่องสว่างออกมามากแตกต่างจากตัวอื่นก็จะมีกรให้หิ่งห้อยมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มไปเรื่อยๆ

3) โดยตั้งที่กล่าวว่าความส่องสว่างของหิ่งห้อยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหิ่งห้อยซึ่งจะอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Landscape of the objective function)

2.3.8.1 ค่าความเข้มและความส่องสว่างของหิ่งห้อย [33]

ค่าความเข้มของการส่องสว่างของหิ่งห้อยจะถูกปล่อยออกมาจากตัวหิ่งห้อย โดยที่ตัวหิ่งห้อยที่ปล่อยแสงออกมามากกว่าตัวอื่นจะเป็นจุดสนใจ ทำให้หิ่งห้อยที่มีการปล่อยแสงออกมาความเข้มน้อยกว่าถูกดึงดูดเข้าหา โดยอัตราความเข้มที่ได้รับแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างหิ่งห้อยทั้งสองตัว โดยสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.18)

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (2.18)$$

และความน่าดึงดูดของตัวหิ่งห้อยที่มีความเข้มแสงมากจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสง โดยสามารถเขียนออกมาเป็นสมการที่ (2.19)

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (2.19)$$

โดยกำหนดให้ I เป็นความเข้มแสงที่หิ่งห้อยตัวรับแสงได้รับ

I_0 เป็นความเข้มแสงที่หิ่งห้อยตัวปล่อยแสง

β เป็นความน่าดึงดูดของหิ่งห้อยตัวรับแสงได้รับ

β_0 เป็นความน่าดึงดูดของหิ่งห้อยตัวปล่อยแสงได้รับ

γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการกรองแสงของวัตถุตัวกลาง โดยสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง ∞

r เป็นระยะทางระหว่างหิ่งห้อยทั้งสองตัวที่ดึงดูดเข้าหากัน โดยที่ หิ่งห้อย i ไปหาหิ่งห้อย j

โดยที่การคำนวณหาระยะทางระหว่างหิ่งห้อยสามารถที่จะคำนวณได้ตามสมการที่ (2.20)

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{1,j} - x_{1,i})^2 + (x_{2,j} - x_{2,i})^2} \quad (2.20)$$

โดยกำหนดให้ $x_{1,i}$ คือ พิกัดในแกน x_1 ของหิ่งห้อยตัวที่ได้รับแสง

$x_{1,j}$ คือ พิกัดในแกน x_1 ของหิ่งห้อยตัวกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x_{2,i}$ คือ พิกัดในแกน x_2 ของหิ่งห้อยตัวที่ได้รับแสง

$x_{2,j}$ คือ พิกัดในแกน x_2 ของหิ่งห้อยตัวกำเนิดแสง

โดยที่หลักการในการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยตัวอื่นๆ ไปหาหิ่งห้อยตัวที่มีค่าความน่าสนใจมากที่สุด ซึ่งวัดจากค่าความหนาแน่นของแสงของหิ่งห้อยตัวนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.21)

$$x_i = x_i + \beta * (x_j - x_i) + \alpha * (rand - 0.5) \quad (2.21)$$

โดยกำหนดให้ α คือ ค่าคงที่ของการสุ่มของหิ่งห้อยจะขึ้นอยู่กับค่าระยะทาง r_{ij} ที่มีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบ $rand$ คือค่าการสุ่ม 0 ถึง 1 โดยกระบวนการสุ่มทุกครั้งหิ่งห้อยมีการเคลื่อนที่และค่าการสุ่มต้องแตกต่างกันสำหรับหิ่งห้อยแต่ละตัว

โดยจากที่ได้อธิบายสมการความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของหิ่งห้อยจะพบว่า ถ้าหากหิ่งห้อยไม่มีการส่องแสง ($\beta_0 = 0$) หิ่งห้อยจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบสุ่มตลอดเวลา โดยหิ่งห้อยจะไม่มีการลู่เข้าหาจุดที่แสงเข้มหรือการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมได้เลย ถึงแม้ว่าหิ่งห้อยจะเจอคำตอบที่เหมาะสมแต่ถ้าไม่มีค่าการส่องแสงก็จะไม่สามารถดึงดูดหิ่งห้อยตัวอื่นๆ มายังตำแหน่งนั้นได้ ในขณะที่ค่าการกรองแสงของวัตถุตัวกลาง (γ) จะมีผลต่อความไวในการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยได้ โดยที่ถ้าพื้นที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากหิ่งห้อยจะมีตำแหน่งที่อยู่ห่างกันมาก ค่าสัมประสิทธิ์ของการกรองแสงก็ควรจะมีค่าที่ต่ำเพื่อจะให้หิ่งห้อยนั้นสามารถส่องแสงดึงดูดหากันได้ แต่ถ้ามีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการกรองแสงมากเกินไป ($\gamma \rightarrow \infty$) หิ่งห้อยก็อาจจะมองไม่เห็นกันและจะกลายเป็นการหาค่าคำตอบแบบสุ่มไปเรื่อยๆ ซึ่งเปรียบเสมือนหิ่งห้อยไม่มีแสงส่องออกมาทำให้ไม่มีการดึงดูดกัน ในทางกลับกันถ้าพบว่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงมีค่าน้อยเกินไป ($\gamma \rightarrow 0$) แสงจากหิ่งห้อยอาจมีการปรากฏความเข้มสูงที่เหมือนกัน อันส่งผลให้พฤติกรรมเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยวิ่งเข้าหากันโดยไม่พบคำตอบที่เหมาะสมได้ ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ที่นิยมใช้ในกระบวนการกรองแสงของวัตถุตัวกลางจะอยู่ที่ 0.1 ถึง 10

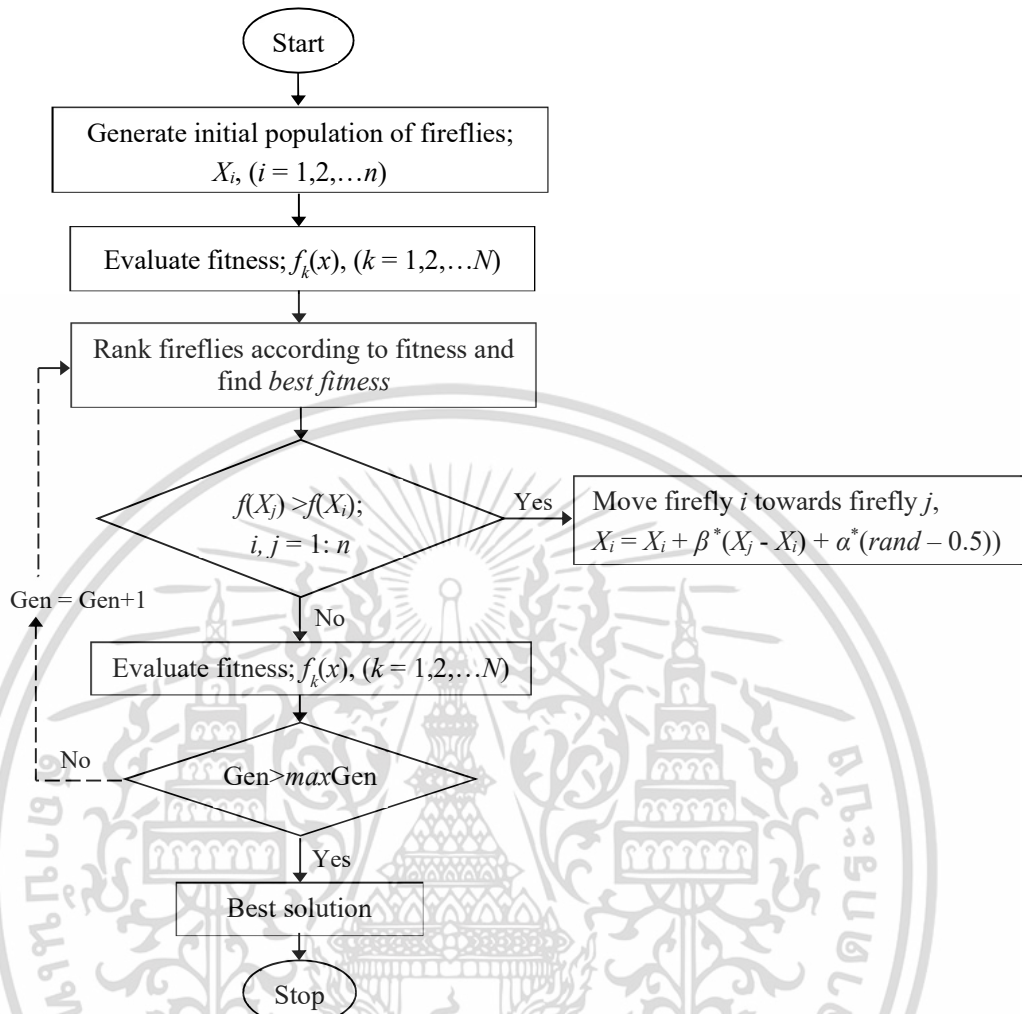
สำหรับกระบวนการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยการสุ่ม (α) โดยหากมีการกำหนดค่าการสุ่มที่มากพอระยะทางการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยในแต่ละครั้งก็จะมีมากตามไปด้วย ส่งผลให้หิ่งห้อยสามารถที่จะสำรวจพื้นที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้ากำหนดค่าปัจจัยการสุ่มมากเกินไปก็อาจจะส่งผลให้หิ่งห้อยเคลื่อนที่เร็วเกินกว่าจะดึงดูดจากแสงหิ่งห้อยตัวอื่นๆ ทำให้การหาค่าคำตอบกลายเป็นแบบสุ่มไม่ลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ในทางตรงกันข้ามหากกำหนดปัจจัยการสุ่มที่น้อย จะทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ในแต่ละครั้งน้อย ทำให้สำรวจหาค่าที่ละเอียดมากขึ้น แต่จะใช้จำนวนครั้งในการเดินทางมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้สำรวจพื้นที่ไม่ครบและอาจได้คำตอบที่ยังไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่สุดได้

ลักษณะเด่นของอัลกอริทึมหึ่งห้อยที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือ การสำรวจพบคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่ทั้งหมด เพื่อเป็นการยืนยันว่าพฤติกรรมของหึ่งห้อยสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแท้จริงอย่างแน่นอนได้ โดยทั้งนี้ก็ต้องขึ้นกับการกำหนดจำนวนหึ่งห้อย (N) สัมประสิทธิ์ของการกรองแสงของวัตถุตัวกลาง (γ) ปัจจัยการสุ่ม (α) ที่เหมาะสมกับปัญหา โดยในงานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาแบบมีขอบเขตจำกัด (Constraint handling control) โดยตัวอัลกอริทึมจะไม่ยอมรับค่าที่อยู่นอกฟังก์ชันและข้อกำหนดที่มีการตั้งไว้ และจะทำการเคลื่อนที่หาค่าที่เหมาะสมในพื้นที่และขอบเขตที่มีการกำหนดไว้

2.3.8.2 ขั้นตอนการทำงานของการค้นหาคำตอบแบบหึ่งห้อย [33]

- โดยสามารถจำแนกขั้นตอนการค้นหาคำตอบแบบหึ่งห้อยได้ทั้งหมด 8 กระบวนการ ดังนี้
- 1) กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ฟังก์ชันค่าการบิดงอของชิ้นงาน) กำหนดข้อจำกัดและขอบเขตของปัจจัยต่างๆ กำหนดค่าการดึงดูดของตัวกำเนิดแสง (β_0) จำนวนของหึ่งห้อย (N) ค่าสัมประสิทธิ์ของวัตถุตัวกลางการกรองแสง (γ) กำหนดค่าการสุ่ม (α) ตัวแปรระยะทางการเคลื่อนที่ จำนวนครั้งการเคลื่อนที่หรือเงื่อนไขของการหยุดทำงานของอัลกอริทึมหึ่งห้อย
 - 2) เริ่มสุ่มหาตำแหน่งเริ่มต้นของหึ่งห้อยโดยให้กระจายทั่วทั้งพื้นที่ของฟังก์ชันที่เราพิจารณา (ฟังก์ชันค่าการบิดงอของชิ้นงาน) แต่ยังคงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และทำการเก็บค่าจากการเคลื่อนที่ผ่านในทุกๆ ตำแหน่ง
 - 3) ทำการตรวจสอบหึ่งห้อยที่เคลื่อนที่ว่าเกิดข้อกำหนดหรือไม่ หากไม่ให้ทำการสุ่มตัวที่ยังไม่ผ่านใหม่จนกระทั่งอยู่ในฟังก์ชัน
 - 4) ทำการเคลื่อนที่ผลของหึ่งห้อยตัวที่ส่องสว่างน้อยกว่าเข้าหาตัวที่มีความเข้มของแสงมากที่สุดด้วยสมการที่ (2.21)
 - 5) ทำการเช็คในตัวแปรทุกอย่างอยู่ในขอบเขตหรือไม่ หากไม่ ให้ปรับจนอยู่ในขอบเขตและตรวจสอบว่าหึ่งห้อยทุกตัวอยู่ในฟังก์ชันและขอบเขต หากไม่อยู่ก็ทำการวนปรับแก้จนอยู่ในขอบเขตฟังก์ชัน
 - 6) เปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ที่ได้จากหึ่งห้อยทุกตัว เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเดินทางของหึ่งห้อย
 - 7) ตรวจสอบเช็คข้อกำหนดการหยุดการเดินทาง หากผ่านข้อกำหนดให้ดำเนินการขั้นต่อไป หากไม่ผ่านให้กลับไปดำเนินการขั้นตอนที่ 4) อีกครั้ง
 - 8) ใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 7) กำหนดเป็นค่าคำตอบ (ค่าการบิดงอที่น้อยที่สุด) ที่เหมาะสมที่สุด และจบการคำนวณของอัลกอริทึม

โดยหลักการการค้นหาคำตอบแบบหึ่งห้อยสามารถสรุปเป็นภาพได้ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงหลักการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย

2.4 พฤติกรรมทางกลและปัจจัยที่กระทบกับการบิดงอของชิ้นงาน (Mechanical behaviors and factors that effected to warpage)

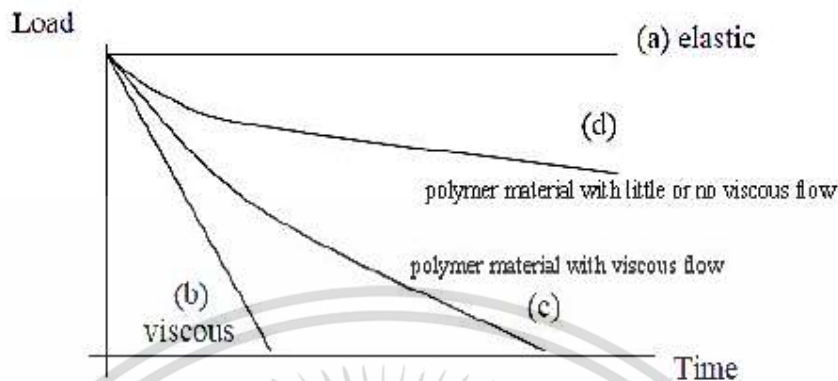
2.4.1 พฤติกรรมของวัสดุที่กระทบกับการบิดงอของชิ้นงาน

2.4.1.1 พฤติกรรมการคลายความเค้นของโพลีเมอร์

สำหรับวัสดุที่มีค่ายืดหยุ่นบริสุทธ์จะไม่มีกรคลายตัวของความเค้นเพราะวัสดุสามารถคืนรูปได้สมบูรณ์ การคลายความเค้นที่สูงอาจจะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีความหนืดบริสุทธ์ได้แต่สุดท้ายก็สามารถคืนรูปคลายความเค้นจนเข้าใกล้ศูนย์ได้ วัสดุจำพวกโพลีเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณลักษณะเด่นถึง 2 ประการ คือ เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง และเป็นวัสดุที่มีความหนืด โพลีเมอร์ในสถานะการไหลแบบมีความหนืดสามารถที่จะคลายความเค้นจนเข้าใกล้ศูนย์ได้หลังจากใช้เวลาในการคลายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น แต่เมื่อโพลิเมอร์อยู่ในสภาวะการไหลที่ยากลำบากจะส่งผลให้การคลายเค้นจะมีขีดจำกัด [24] ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงพฤติกรรมของการคลายความเค้นของโพลิเมอร์แต่ละประเภท [34]

นอกจากนี้ในกรณีที่โพลิเมอร์ได้รับความเครียดเป็นเวลานานจะส่งผลทำให้สายโซ่หลักของโมเลกุลในวัสดุเกิดการแยกออกจากกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการคลายความเค้น ซึ่งจากการศึกษา [24] พบว่ามีหลายปัจจัยที่กระทบและควบคุมปฏิกิริยาการแยกตัวของโมเลกุลในสายโซ่ของโพลิเมอร์ เช่น ความเค้นในสายโซ่ ปฏิกิริยารบกวนทางเคมี ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายของสายโซ่โมเลกุล สาเหตุเหล่านี้เป็นสาเหตุของการกำหนดว่าการคลายความเค้นจะมีค่าเท่าไร ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา การคลายความเค้นของโพลิเมอร์ จะค่อยๆ ลดลงหลังใช้เวลา 24 ชั่วโมงไปจนถึง 2 สัปดาห์ นอกจากนี้ ปัจจัยที่อาจส่งผลให้อัตราการคลายความเค้นมีแนวโน้มลดลงคือ ถ้าโพลิเมอร์มีการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นผลึกสูง รวมทั้งถ้ามีการเรียงตัวของโมเลกุลที่มีไฟเบอร์และน้ำหนักของโมเลกุลสูงขึ้น อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการคลายความเครียดของโพลิเมอร์ได้ [24]

2.4.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการคลายความเค้น

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเกิดการคลายความเค้นของโพลิเมอร์ จะประกอบไปด้วยหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ระดับของค่าความเครียดของวัสดุ โดยที่เวลาที่ถูกใช้ในกระบวนการคลายความเค้นจะถูกเรียกว่า Relaxation time จากหลายๆ งานวิจัย [24, 35] พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิสูง เวลาในกระบวนการคลายความเค้นจะเร็วกว่าที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์พบว่า ที่สภาวะความสัมพันธ์ 100% จะส่งผลให้เวลาในการคลายความเค้นได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับที่สภาวะความสัมพันธ์ 0% เพราะในทั้งสองปัจจัยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี

2.4.1.3 การคลายยังโมดูลัสยืดหยุ่น

กระบวนการลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงานพลาสติก สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับคุณสมบัติของโพลิเมอร์ คือ ค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรง อีกทั้งยังส่งผลต่อการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคุณสมบัติหยุ่นหนืด (Viscoelastic) ที่เป็นเส้นตรง จะส่งผลให้ความเครียดแปรผันตรงด้วย ในขณะที่ถ้าคุณสมบัติหยุ่นหนืด ไม่เป็นเส้นตรงหรือมีความแปรปรวนสูงจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเครียดสูงเกินขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limits) [25] โดยคุณสมบัติหยุ่นหนืดที่เป็นเส้นตรงของวัสดุ (linear viscoelastic material) สามารถกำหนดสมการของการคลายยังโมดูลัสยืดหยุ่นได้ดังสมการ (2.22) [36]

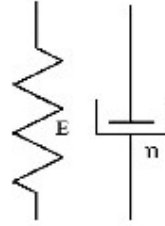
$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (2.22)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าความเครียดคงที่ และ $\sigma(t)$ คือ ความเค้นของวัสดุที่แปรผันตามเวลา และ $E(t)$ คือ ค่าการคลายยังโมดูลัสยืดหยุ่นที่แปรผันตามเวลา

2.4.1.4 แบบจำลองของความหยุ่นหนืด (Viscoelastic model)

ค่าความหยุ่นหนืดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติของวัสดุที่มีทั้งคุณลักษณะของความหนืดและความยืดหยุ่น ซึ่งจะถูกพบได้เมื่อวัสดุเข้าสู่สภาวะการเปลี่ยนรูป ซึ่งพฤติกรรมของการเกิดความหยุ่นหนืดเป็นหนึ่งในสมบัติทางกลของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยการทดสอบความหยุ่นหนืด คือ เมื่อมีแรงหรือความเค้นกระทำต่อวัสดุให้เกิดการยืดตัวหลังจากนั้นปล่อยแรงออก วัสดุจะทำการคืนตัว 100% สำหรับวัสดุที่มีค่าความยืดหยุ่นบริสุทธิ์ แต่สำหรับวัสดุที่มีความหยุ่นหนืดมีโอกาสที่วัสดุจะไม่สามารถคืนรูปกลับได้สมบูรณ์และต้องใช้เวลาในการคืนตัว อันเนื่องมาจากความหยุ่นหนืดที่โครงสร้างร่างแหของโพลิเมอร์ที่แรงกระทำเป็นเวลานานจนส่งผลให้เกิดการแยกตัวและไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ [24]

มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่พยายามพัฒนาแบบจำลองของความหยุ่นหนืด เช่น Maxwell model, Kelvin-Voigt model, Four element model, Modified Two unit Maxwell model, Standard linear solid model เป็นต้น โดยเป็นแบบจำลองทางกลของวัสดุที่อธิบายใช้ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบสปริงและระบบหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.38 โดยที่ระบบสปริงจะเป็นตัวแทนของค่าความยืดหยุ่นบริสุทธิ์ของวัสดุ และระบบหน่วงเป็นตัวแทนของค่าความหนืดของวัสดุบริสุทธิ์ โดยที่สมการของค่าความยืดหยุ่นบริสุทธิ์ตามกฎของ Hook คือ $\sigma = E\epsilon$ โดยที่ σ คือค่าความเค้น E คือค่ายังโมดูลัส และ ϵ คือ ค่าความเครียดของวัสดุ ในขณะที่สมการค่าความหนืดบริสุทธิ์ตามกฎของ Newton คือ $\sigma = \eta \frac{d\epsilon}{dt}$ โดยที่ σ คือ ค่าความเค้น และ η คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของวัสดุ และ $\frac{d\epsilon}{dt}$ คือ อัตราส่วนของความเครียดที่แปรผันตามเวลา



รูปที่ 2.38 ระบบสปริงยืดหยุ่นและระบบหน่วง

1) แบบจำลองแบบ Maxwell (Maxwell model)

แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาโดย James Clerk Maxwell ในปี ค.ศ. 1867 โดยใช้หลักการ ออกแบบพื้นฐานมาจากกฎของ Hook โดยอธิบายค่าความยืดหยุ่น และกฎของ Newton ในการ อธิบายพฤติกรรมความหนืดของวัสดุ โดยนำทั้งสองกฎมาต่ออนุกรมต่อกัน โดยแบบจำลองนี้สามารถ อธิบายพฤติกรรมของการคายความเค้นของวัสดุได้ดี ดังแสดงรูปแบบจำลองในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 แบบจำลองความยืดหยุ่นหนืดของ Maxwell [24]

จากรูป 2.39 ค่ายังโมดูลัส (E) ของสปริง และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของวัสดุ (η) ถูกใช้ในการคำนวณตามแบบจำลอง โดยผลรวมของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถ คำนวณได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24) [23]

$$\sigma_{total} = \sigma_D = \sigma_S \quad (2.23)$$

และ
$$\epsilon_{total} = \epsilon_D + \epsilon_S \quad (2.24)$$

โดยที่ D คือค่าความหน่วง และ S คือ ค่าของสปริง และค่าความเครียดของระบบที่ แปรผันกับเวลาสามารถจะคำนวณได้ในสมการที่ (2.25)

$$\frac{d\epsilon_{total}}{dt} = \frac{d\epsilon_D}{dt} + \frac{d\epsilon_S}{dt} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ค่าความเครียดของสปริง คือ $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ และค่าความหน่วงที่แปรผันตามเวลา คือ $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$ ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น สมการที่ (2.26)

$$\frac{d\varepsilon_{total}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.26)$$

ถ้ากำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดเป็นศูนย์ ดังนั้น สามารถจัดรูปสมการเป็น

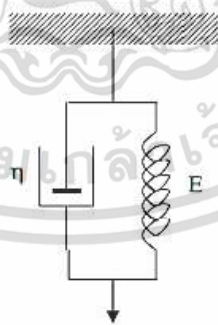
$$\frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad (2.27)$$

หรือ
$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-\frac{Et}{\eta}} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.28)$$

โดยที่ $\tau = \frac{\eta}{E}$ คือ เวลาในการคลายความเค้น

2) แบบจำลองแบบ Kelvin-Voigt (Kelvin-Voigt model)

นักฟิสิกส์และวิศวกรชาวอังกฤษ William Thomson และนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Woldemar Voigt ได้พัฒนาแบบจำลองนี้ โดยในแบบจำลองนี้จะแตกต่างจากของ Maxwell คือการนำเอาระบบสปริงต่อขนานกับระบบหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.40 โดยหลักการของโมเดลนี้ คือ เมื่อมีแรงมากระทำต่อระบบทั้งระบบสปริงและความหน่วงจะพยายามกลับคืนสู่สภาวะเดิม แต่ระบบจะไม่สามารถกลับคืนหรือคายความเค้นได้ 100% จะยังคงมีความเค้นตกค้างเหลืออยู่ [24]



รูปที่ 2.40 แบบจำลองความหยุ่นหนืดของ Kelvin-Voigt [24]

ผลรวมของค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.29) และ (2.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{total} = \sigma_D + \sigma_S$$

และ $\epsilon_{total} = \epsilon_D = \epsilon_S$ (2.29)

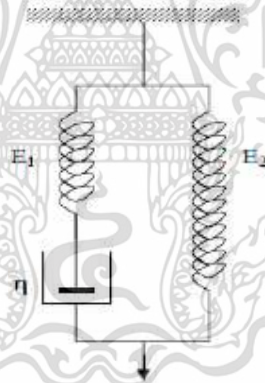
โดยที่ค่าความเค้นและความเครียดจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.30)

$$\sigma(t) = E\epsilon(t) + \eta \frac{d\epsilon_s(t)}{dt} \quad (2.30)$$

ในแบบจำลองนี้ถ้ากำหนดให้ ค่าความเครียดคงที่ ดังนั้น อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดจะเป็นศูนย์ สมการความเค้นจะเป็น $\sigma(t) = E\epsilon$ ตลอดเวลา

3) แบบจำลองแบบ Standard Linear Solid (Standard Linear Solid model)

แบบจำลองนี้เป็นการพัฒนาและรวมแบบจำลองทั้ง Maxwell และ Kelvin-Voigt โดยจะประกอบไปด้วยระบบสปริง 2 สปริง และตัวหน่วง 1 ตัวหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 แบบจำลองความหนืดของ Standard Linear Solid [24]

สมการของแบบจำลองนี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.31)

$$\sigma_{total} = \sigma_{maxw} + \sigma_{S2} \text{ และ } \epsilon_{total} = \epsilon_{maxw} = \epsilon_{S2}$$

$$\sigma_{maxw} = \sigma_D + \sigma_{S1} \text{ และ } \epsilon_{maxw} = \epsilon_D + \epsilon_{S1} \quad (2.31)$$

โดยที่ $maxw$ คือ แบบจำลอง Maxwell, D คือ ตัวหน่วง s_1 คือ สปริงตัวที่ 1 และ s_2 คือ สปริงตัวที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณผลรวมของความเค้นได้ ดังสมการที่ (2.32)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{total} = \sigma_{01}e^{-\frac{t}{\tau}} + \sigma_{02}$$

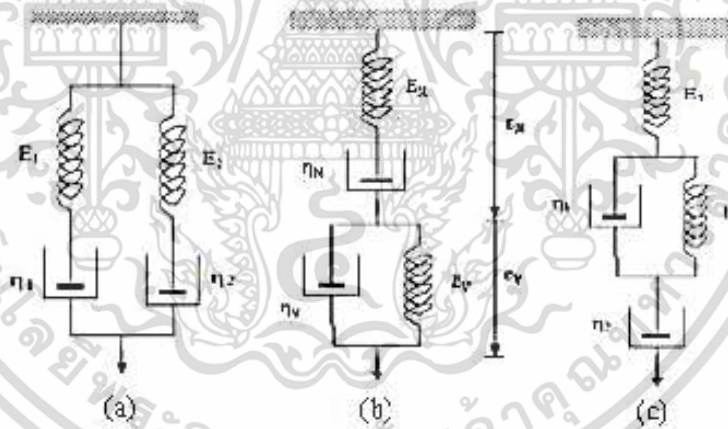
$$\text{หรือ} \quad \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{02}}e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{01} + \sigma_{02}}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{\sigma}{\sigma_0} = A_1e^{-\frac{t}{\tau}} + A_2 \quad (2.32)$$

โดยที่ $\sigma_{01} + \sigma_{02} = \sigma_0$ และ A_1, A_2 คือ ค่าคงที่ และ $\tau = \frac{\eta}{E}$ คือ เวลาในการคลายความเค้น

4) แบบจำลองแบบ Four element model (Four element model)

เป็นแบบจำลองที่มีการพัฒนาให้มีความละเอียดและซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการคลายความเค้นและเวลาในการคลายความเค้นที่ใกล้เคียงมากขึ้น โดยระบบจะประกอบไปด้วย สปริง 2 สปริงและตัวหน่วง 2 ตัวหน่วง อยู่ในแบบจำลอง [24] ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 (a) แบบจำลองความหยุ่นหนืดแบบ Four Element Maxwell

(b) แบบจำลองความหยุ่นหนืดแบบ A Maxwell model & a Voigt Model series

(c) แบบจำลองความหยุ่นหนืดแบบ A Maxwell model with a spring & a dashpot [24, 37,38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) แบบจำลองแบบ Four element Maxwell model (Four element Maxwell model)

แบบจำลองนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Two unit Maxwell model [37] โดยลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2.42 (a) ในแบบจำลองแบบ Maxwell ค่าความเค้นจะอยู่ในรูปเอกโพแนนเชียลฟังก์ชันของเวลา และมีเพียงเวลาการคลายความเค้นค่าเดียว แต่ในสภาวะการคลายความเค้นจริงการใช้ Maxwell model ในการทำนายการคลายความเค้นอาจจะยังได้ผลไม่ดีพอ จึงมีความพยายามปรับปรุงแบบจำลองของ Maxwell โดยให้มีการพิจารณาใส่แบบจำลองของ Maxwell แบบคู่ขนานกับแบบดั้งเดิมเพื่อพิจารณาปัจจัยการคลายความเค้นที่มากกว่าหนึ่งดังสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.33)

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} = \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt} + \frac{\sigma_2}{\eta_2} \quad (2.33)$$

โดยที่ E_1 และ E_2 คือ ค่ายังโมดูลัสของทั้ง 2 สปริง และ η_1 และ η_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของทั้ง 2 ตัวหน่วง ทั้งนี้สามารถคำนวณสมการความเค้นที่สภาวะผลรวมของความเครียดคงที่ โดยที่ $\dot{\varepsilon} = 0$ ได้ดังสมการที่ (2.34)

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\text{หรือ } \sigma = \sigma_{01} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \sigma_{02} e^{-\frac{t}{\tau_2}}; \tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \text{ และ } \tau_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$$

$$\text{หรือ } \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{02}} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{01} + \sigma_{02}} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

$$\text{หรือ } \frac{\sigma}{\sigma_0} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2.34)$$

โดยที่ $\sigma_{01} + \sigma_{02} = \sigma_0$ และ A_1, A_2 คือค่าคงที่ และ $\tau = \frac{\eta}{E}$ คือเวลาในการคลายความเค้น

6) แบบจำลองแบบ A simple Maxwell Model and a simple Voigt Model in series

ลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองนี้แสดงในรูป 2.42 (b) ที่เกิดจากการผสมแบบจำลองของ Maxwell & Voigt [38] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_M \frac{d^2 \varepsilon_s}{dt^2} + \frac{E_M E_V}{\eta_V} \frac{d\varepsilon_s}{dt} = \left(\frac{E_M}{\eta_V} + \frac{E_V}{\eta_V} + \frac{E_M}{\eta_M} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{E_M E_V}{\eta_V \eta_M} \sigma \quad (2.35)$$

โดยที่การคลายความเค้นคงที่ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดที่แปรผันกับเวลาเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.36)

$$\left(\frac{E_M}{\eta_V} + \frac{E_V}{\eta_V} + \frac{E_M}{\eta_M} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{E_M E_V}{\eta_V \eta_M} \sigma = 0 \quad (2.36)$$

โดยที่ E_M, E_V คือ ค่ายังโมดูลัสของแบบจำลอง Maxwell & Voigt

η_V, η_M คือสัมประสิทธิ์ความหนืดของแบบจำลอง Maxwell & Voigt

7) แบบจำลองแบบ A Maxwell Model and a spring and a dashpot

โดยลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองนี้แสดงในรูปที่ 2.42 (c) โดยในแบบจำลองนี้ จะใช้ต้นแบบจำลอง Maxwell และเพิ่มระบบสปริงและตัวหน่วงต่อกันแบบอนุกรม เมื่อมีการรับแรง จะมีการยืดตัวของวัสดุด้วยกัน 3 ส่วนคือ เกิดจากสปริงส่วนแรก E_1 และเข้าสู่ส่วนของระบบแบบจำลอง Maxwell คือมีทั้งระบบสปริงและตัวหน่วง E_2 และ η_1 และเข้าสู่กระบวนการยืดหยุ่นสุดท้ายที่ η_2 [23] โดยรูปแบบจำลองของการหย่อนหนืดนี้ สามารถที่จะอธิบายพฤติกรรมการคลายตัวของความเค้นและการคืนตัวของวัสดุได้ดี โดยสามารถจะสรุปมาเป็นผลรวมของความเครียดได้ ดังสมการที่ (2.37)

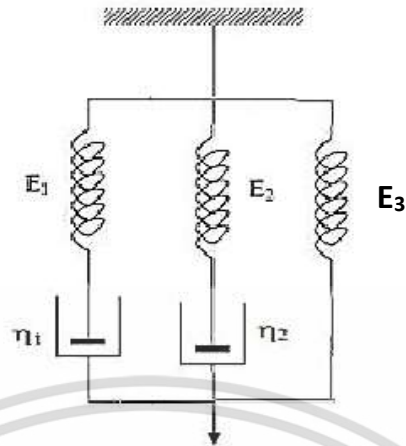
$$\varepsilon_{total} = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma_0}{\eta_2} t \quad (2.37)$$

โดยที่ σ_0 คือค่าความเค้นที่ประยุกต์เข้าไปในระบบแบบจำลอง และ $\tau = \frac{\eta_1}{E_2}$ คือเวลา

ในการคลายความเค้น เมื่อแรงกระทำถูกปล่อยออกที่เวลา t_1 การคืนรูปจะค่อยๆ คืนรูปยกเว้นบริเวณตัวหน่วงที่ 2 (η_2) ที่อาจจะส่งผลให้คืนรูปไม่สมบูรณ์ตามพฤติกรรมของวัสดุ

8) แบบจำลองแบบ Modified Two-unit Maxwell

ลักษณะของแบบจำลองนี้จะถูกพัฒนามาจากแบบจำลองแบบ Two-unit Maxwell โดยมีการนำเอากฎของ Hook คือเอาระบบสปริงเข้ามาช่วยปรับปรุงเพื่อให้ค่าการคลายความเค้นเข้าใกล้ศูนย์มากยิ่งขึ้น [37] โดยระบบที่ถูกปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 แสดงแบบจำลองแบบ Modified Two-unit Maxwell Model [37]

ผลรวมของค่าความเค้นของแบบจำลองสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.38)

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

หรือ

$$\sigma = \sigma_{01} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \sigma_{02} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \sigma_{03}$$

หรือ

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{02} + \sigma_{03}} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{01} + \sigma_{02} + \sigma_{03}} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{\sigma_{03}}{\sigma_{01} + \sigma_{02} + \sigma_{03}}$$

หรือ

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + A_3 \quad (2.38)$$

โดยที่ $\sigma_{01} + \sigma_{02} + \sigma_{03} = \sigma_0$ และ A_1, A_2, A_3 คือค่าคงที่ และ τ_1, τ_2 คือเวลาในการคลายความเค้น

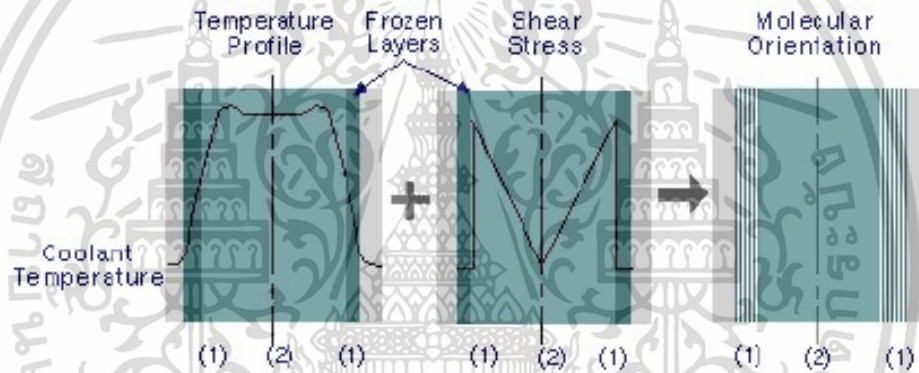
โดยแบบจำลองของความหยุ่นหนืดนั้นเป็นการเข้าใจถึงเทอมของความเป็นอีลาสติก (Elastic) และความหนืด (Viscosity) ที่มีความสัมพันธ์ต่อกันโดยอธิบายในรูปของแรงกล (Mechanical force)

2.4.2 พฤติกรรมทางกลที่กระทบกับการบิดงอของชิ้นงาน

การเกิดการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกสาเหตุหลักๆ มักจะเกิดจากความเค้นตกค้างบริเวณผิวของชิ้นงานรวมถึงความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้นตกค้างสะสมในชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุของการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพลาสติก โดยสามารถแยกความเค้นตกค้างในชิ้นงานฉีดพลาสติกได้เป็น 2 ประเภท [39] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

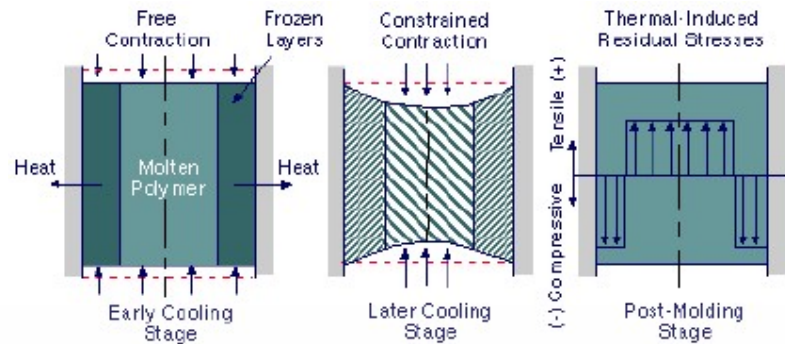
2.4.2.1 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลการไหล (Flow – induced residual stress)
 ในสภาวะที่อุณหภูมิในกระบวนการฉีดพลาสติกสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของ โพลีเมอร์ โมเลกุลในสายโซ่ของโพลีเมอร์ที่ยาว (Long polymer chain molecules) จะอยู่ในสภาวะไร้ความเค้นและลอยอิสระอยู่ในสภาวะสมดุล โดยสภาวะการไหลโมเลกุลจะเรียงตัวไปตามทิศทางการไหล และเมื่อโพลีเมอร์เข้าสู่สถานะของแข็ง ก็เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่พร้อมกันและเกิดการไม่กระจายตัวของโมเลกุลส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานพลาสติก [40] ดังสามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.44 ว่าโมเลกุลของพลาสติกที่บริเวณผิวจะเย็นตัวเร็วกว่าส่วนกลางของชิ้นงานและมีการเรียงตัวในสภาวะของแข็งอย่างรวดเร็วในสภาวะการใช้อัตราการหล่อเย็นสูง โดยจะส่งผลให้เกิดค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณผิวอันเป็นสาเหตุให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกได้ โดยเมื่อผิวด้านนอกเกิดการเย็นตัวและเปลี่ยนสถานะอย่างรวดเร็ว ก็จะส่งผลให้การเรียงตัวของของโมเลกุลและการเปลี่ยนสถานะของพลาสติกจากของเหลวเป็นของแข็งบริเวณใจกลางเป็นไปได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.44 กระบวนการเกิดความเค้นตกค้างที่เกิดจากสภาวะการเหนี่ยวนำการไหล โดยส่วนที่ (1) แสดงการเย็นตัวและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว ส่วนที่ (2) แสดงการเย็นตัว และการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหลวเป็นของแข็งอย่างช้าๆ [40]

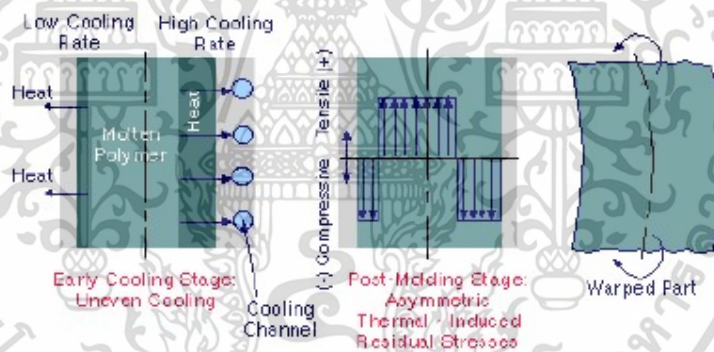
2.4.2.2 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลทางการถ่ายเทความร้อน (Thermal– induced residual stress)

ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ สาเหตุสำคัญ คือ การหดตัวของวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างการฉีดขึ้นรูป โดยสาเหตุของการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ คือเมื่อบริเวณผิวของชิ้นงานได้รับการถ่ายเทความร้อนจากกระบวนการหล่อเย็นและเริ่มมีการหดตัวของโมเลกุลพลาสติก แต่ในขณะที่บริเวณเนื้อพลาสติกด้านในยังคงร้อนอยู่และได้รับการถ่ายเทความร้อนที่ช้ากว่าทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลแตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2.45 ว่าที่บริเวณเนื้อด้านในของชิ้นงานจะเกิดสภาวะความเค้นดึงเกิดขึ้นในขณะที่บริเวณที่ผิวจะเกิดความเค้นกดอัดเกิดขึ้น



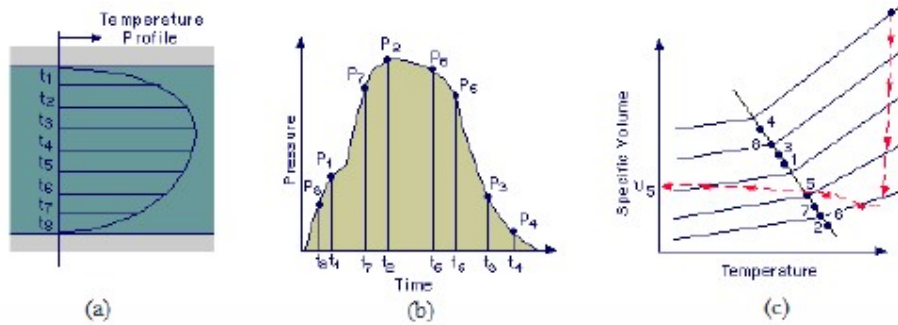
รูปที่ 2.45 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากสาเหตุการหดตัวของวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างการฉีดขึ้นรูป [40]

อีกหนึ่งสาเหตุสำหรับการเกิดความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิ คือ กระบวนการหล่อเย็นที่ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตราการหล่อเย็นไม่เท่ากันของกระบวนการหล่อเย็นทั้งสองข้างของแม่พิมพ์ ก็อาจส่งผลให้เกิดค่าความเค้นตกค้างจนก่อให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.46



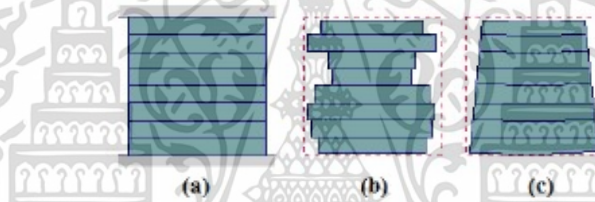
รูปที่ 2.46 ความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากสาเหตุอัตราการหล่อเย็นที่ไม่สมดุลระหว่างผนังทั้ง 2 ข้างของแม่พิมพ์ [40]

นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งสาเหตุของการเกิดความเค้นตกค้างที่เกิดจากอิทธิพลด้านการถ่ายเทของอุณหภูมิ คือการหดตัวที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นของพลาสติก อันเนื่องมาจากถ่ายเทอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันที่ ณ ความหนาของชิ้นงานต่าง โดยมักจะเกิดกับชิ้นงานที่มีความหนาค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 การหาค่าของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกัน [40]

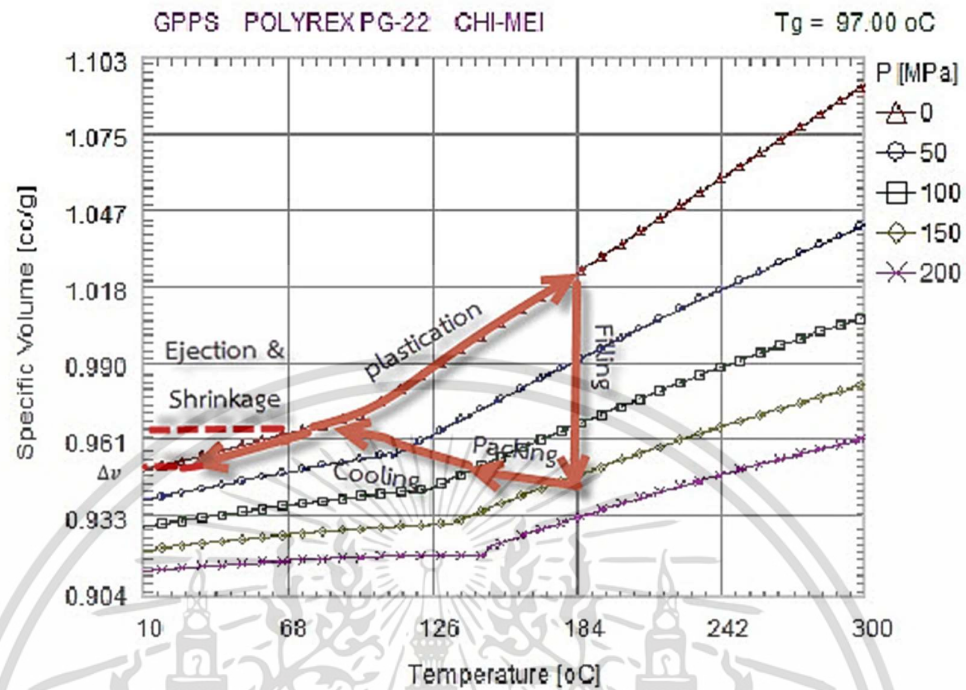
การหาค่าของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งอุณหภูมิที่ต่างกันสามารถจะจำแนกพฤติกรรมการหาค่าออกเป็น 2 จำนวนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.48 (a) และ 2.48 (b) ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 กรณี โดยถ้าเกิดจากการหล่อเย็นที่ไม่สมดุลด้วยก็อาจเกิดดังรูปที่ 2.48 (c)



รูปที่ 2.48 การหาค่าของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งอุณหภูมิที่แตกต่างกัน [40]

2.4.3 การเกิดการบิดงอของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดพลาสติก

ในกระบวนการฉีดพลาสติกประกอบด้วยกระบวนการหลอมเหลว การเติมพลาสติก กระบวนการฉีดเข้า การหล่อเย็น และการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งถ้าเมื่อวิเคราะห์ในทุกกระบวนการผ่านแผนภูมิ PVT diagram ด้านล่าง จะเห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเทียบกับอุณหภูมิ และที่ความดันต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 แสดงแผนภูมิ PVT ของโพลิสไตรีน

จากแผนภูมิ PVT ของโพลิสไตรีน (General Purpose Polystyrene (GPPS)) จะสังเกตได้ว่าเมื่อพลาสติกเริ่มเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนรูปจนสิ้นสุดกระบวนการฉีด อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของอุณหภูมิและความดัน ซึ่งสามารถหาผลต่างการหดตัวของชิ้นงานโดยคิดที่สภาวะ Uniform shrinkages ได้ดังสมการ (2.39) ด้านล่างนี้ [28]

$$\Delta v = v(T_{\text{no_flow}}, P_{\text{pack}}) - v(T_{\text{end_use}}, P_{\text{end_use}}) \quad (2.39)$$

โดยที่ Δv = ผลต่างของปริมาตรพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไปหลังกระบวนการฉีดพลาสติก

$v(T_{\text{no_flow}}, P_{\text{pack}})$ = ปริมาตรพลาสติกที่สภาวะก่อนเริ่มกระบวนการฉีด

$v(T_{\text{end_use}}, P_{\text{end_use}})$ = ปริมาตรพลาสติกที่สภาวะหลังกระบวนการฉีด

จากสมการที่ (2.39) สามารถจะเปลี่ยนรูปเป็นเป็นอัตราส่วนของปริมาตรจำเพาะของกระบวนการพลาสติกได้ดังสมการที่ (2.40) ด้านล่างนี้ [28]

$$r_v = \frac{v(T_{\text{no_flow}}, P_{\text{pack}})}{v(T_{\text{end_use}}, P_{\text{end_use}})} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่สภาวะความดันและอุณหภูมิต่างๆ สามารถหาได้จากสมการ (2.41) ของ Tait [28] ด้านล่างนี้

$$V(p, T) = V_0(T) \left[1 - 0.0894 \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right]$$

$$V_0(T) = \begin{cases} b_{1m} + b_{2m}(T - b_5); & T > T_g \\ b_{1s} + b_{2s}(T - b_5); & T \leq T_g \end{cases} \quad (2.41)$$

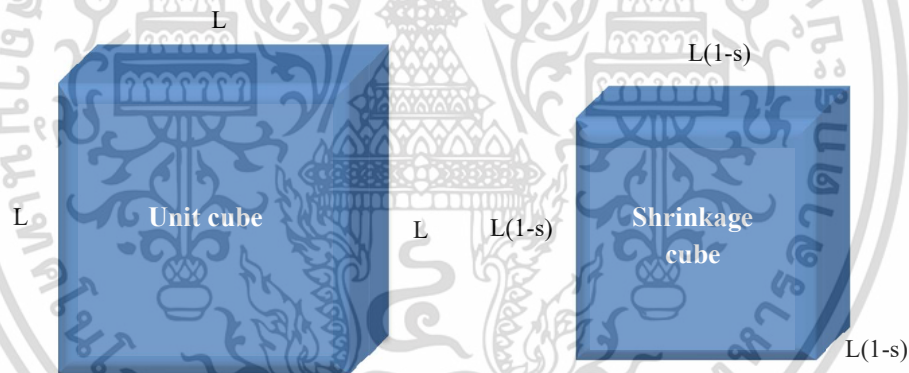
$$B(T) = \begin{cases} b_{3m} \exp[-b_{4m}(T - b_5)]; & T > T_g \\ b_{3s} \exp[-b_{4s}(T - b_5)]; & T \leq T_g \end{cases}$$

โดยที่ $b_{1m}, b_{2m}, b_5, b_{1s}, b_{2s}, b_{3m}, b_{3s}, b_{4m}, b_{4s}$ คือ ค่าคงที่ของคุณสมบัติของวัสดุ

T คือ ณ อุณหภูมิต่างๆ

T_g คือ ณ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass Transition Temperature)

ซึ่งเมื่อพิจารณาเป็น Cubic element ของพลาสติกพิจารณาการหดตัวของพลาสติกแบบคงที่ (Consistency Shrinkage) ซึ่งสามารถอธิบายการหดตัวของพลาสติกได้ดังรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 แสดงการหดตัวของปริมาตรจำเพาะของพลาสติกแบบคงที่

จากรูปที่ 2.50 จะสามารถสรุปเป็นอัตราส่วนของปริมาตรจำเพาะก่อนการหดตัวและหลังการหดตัวได้ดังสมการที่ (2.42) และ 2.43 [28]

$$L^3 \cdot r_v = [L(1 - s)]^3 \quad (2.42)$$

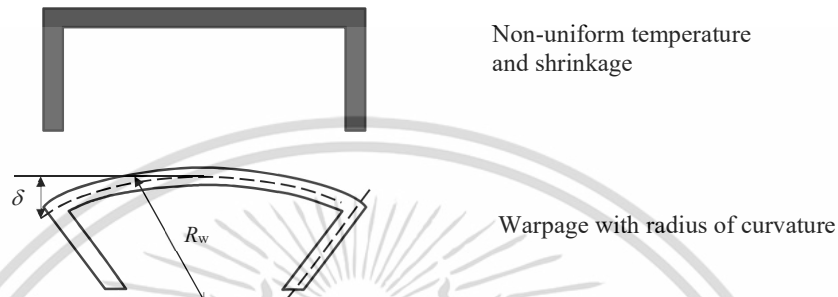
$$s = 1 - \sqrt[3]{r_v} \quad (2.43)$$

โดยที่ L คือ ขนาดของอีลิเมนต์ปกติ (mm)

s คือ อัตราการหดตัวของชิ้นงานคงที่ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาการบิดงอของชิ้นงานอันเป็นผลกระทบมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาตรจำเพาะและมีความเค้นตกค้างในชิ้นงานพลาสติก เพื่อพิจารณาการบิดงอของชิ้นงาน ประเภทคานก็จะสามารถมองเห็นพฤติกรรมการบิดงอของชิ้นงานหลังจากกระบวนการหล่อเย็น เสร็จสิ้น และชิ้นงานของจากแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 แสดงการบิดงอของชิ้นงานแบบคานหลังกระบวนการฉีดเสร็จสิ้น

จากรูปที่ 2.51 ทำให้สามารถคำนวณค่ารัศมีความโค้งของชิ้นงาน รวมไปถึงการเกิดการบิดงอของชิ้นงานแบบคานได้ดังสมการ (2.44) และ (2.45)

$$R_{\text{warpage}} = \frac{2 \cdot h}{(S_{\text{core}} - S_{\text{cavity}})} \quad (2.44)$$

$$\delta = W \cdot \sin\left(\frac{W}{R_{\text{warpage}}}\right) \quad (2.45)$$

โดยที่ R_{warpage} คือ รัศมีการบิดงอของชิ้นงาน (mm)

h คือ ความหนาของชิ้นงานแบบคานที่ (mm)

S_{core} คือ อัตราการหดตัวของแม่พิมพ์ (%)

S_{cavity} คือ อัตราการหดตัวของชิ้นงานพลาสติก (%)

W คือ ความกว้างของชิ้นงาน (mm)

δ คือ ความบิดงอของชิ้นงาน (mm)

ซึ่งกระบวนการบิดงอที่เป็นศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถที่จะทำนายเบื้องต้นโดยอาศัยสมการของ Tait [28] ได้โดยอาศัยการวิเคราะห์กราฟ PVT diagram ตามรูปที่ 2.49 ประกอบได้เพื่อใช้ในกระบวนการประเมินออกแบบกระบวนการฉีดพลาสติกเบื้องต้นก่อนกระบวนการฉีดจริงได้ ทั้งนี้

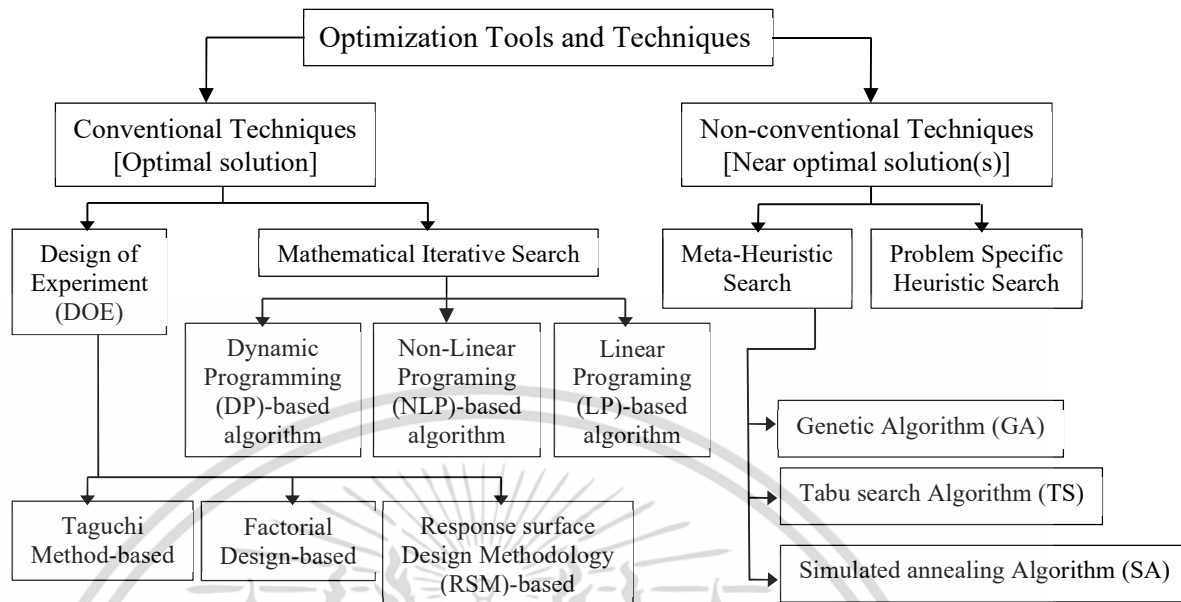
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ Tait ได้ถูกบรรจุในโปรแกรม Moldex 3D เพื่อการวิเคราะห์กระบวนการฉีดตามหลักการการวิเคราะห์ปริมาตรเชิงตัวเลข (Finite element volume)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปัจจัยในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหา ด้านการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก (Optimized plastic injection molding process and minimized warpage, volume shrinkage)

เนื่องด้วยปัจจุบันในยุคแห่งการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมในการตอบสนองความต้องการสินค้าที่ต้องการสินค้าที่มีคุณภาพ ราคาถูก และมีความหลากหลาย การเลือกใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มพลาสติกจึงเป็นอีกทางเลือกที่ตอบโจทย์ทางด้านต้นทุน รูปลักษณะทางกายภาพที่มีความหลากหลาย และคุณสมบัติในการใช้สินค้าที่สะดวกต่อการใช้งาน เมื่อเทียบกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ [36] และในกลุ่มการผลิตผลิตภัณฑ์ทางด้านพลาสติกกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด (Plastic Injection Molding, PIM) ก็เป็นอีกกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เพื่อการผลิตสินค้ากลุ่มพลาสติก ด้วยเหตุผลว่า สามารถผลิตได้หลายรูปร่างลักษณะ และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำ เวลาในกระบวนการผลิตต่อรอบค่อนข้างน้อย และผิวชิ้นงานค่อนข้างละเอียดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ แต่ถึงแม้ข้อดีในการใช้กระบวนการฉีดพลาสติกขึ้นรูปชิ้นงานจะมากมายด้าน แต่การใช้เครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม การใช้ชนิดวัสดุที่ไม่เหมาะสมกับการตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดที่ไม่เหมาะสมก็อาจนำไปสู่การเกิดของเสีย ชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ เช่น การฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shots) เกิดรอยยุบของชิ้นงาน (Sink marks) รอยประสานเนื้อพลาสติก (Weld lines) เกิดปริมาตรหดตัวของชิ้นงาน (Volume shrinkage) เกิดการบิดงอของชิ้นงาน เป็นต้น [41]

วิวัฒนาการในการหาปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องจักรสามารถจะแยกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มวิธีที่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) และกลุ่มที่สามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Nearest optimal solution) [35] ซึ่งในการหาคำตอบแบบกลุ่มแรกจะได้คำตอบที่ดีที่สุดและเหมาะสมมากกว่าวิธีที่ 2 แต่ข้อเสียคือ ต้องใช้ระยะเวลา และอาจจะรวมถึงต้นทุนในการทดลองหาคำตอบมากกว่าวิธีที่ 2 อย่างมาก ซึ่งสามารถสร้างแผนภูมิการเลือกใช้วิธีในการหาคำตอบของทั้ง 2 กลุ่มได้ดังแสดงในรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 แสดงกลุ่มวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด และกลุ่มวิธีหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด [42]

สำหรับการบดงและการหดตัวของปริมาตรชิ้นงานพลาสติกเป็นปัญหาด้านคุณภาพที่สำคัญมากปัจจัยหนึ่ง โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อเกิดการบดงและหดตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการปรับตั้งพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดที่ไม่เหมาะสม [36] โดยเทคนิคในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการหดตัวและบดงของชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ การใช้วิธีการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Experimental methods) และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยการคำนวณสมัยใหม่ (Modern computational methods) เข้ามาช่วยในการหาค่าที่เหมาะสม [41] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.1 การใช้วิธีการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Experimental methods)

สำหรับการหาปัจจัยที่เหมาะสมของในกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อลดการหดตัวและบดงของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 วิธี

2.5.1.1 วิธีการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

Chiang และ Chang (2007) [36] ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดการหดตัวและบดงของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติกโดยการใช้วิธีการออกแบบพื้นผิวตอบสนองในการทดลอง และได้แสดงปัจจัยที่มีผลกระทบในกระบวนการฉีด ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ เวลาในการฉีด ความดันในการฉีด และเวลาในการหล่อเย็น ผลการวิจัยพบว่า การหดตัวจะเพิ่มมากขึ้นถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และถ้ากำหนดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำระหว่าง 45 ถึง 55 °C จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบิดงอเกิดขึ้นน้อย เพราะว่าถ้าอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงเวลาระบายความร้อนสั้นก็จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปขึ้นได้ นอกไปจากนี้ Chen และคณะ (2009) [37] ยังใช้วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนองในการทดลองเพื่อลดการเกิดการหดตัวของชิ้นงานพลาสติกโดยปัจจัยที่พิจารณาจะแตกต่างจาก Chiang และ Chang, (2007) [36] โดยมีการเพิ่มการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบ คือ ความเร็วในการฉีด และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้นมา โดยค้นพบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงานมากที่สุด เมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น การเลือกใช้วิธีนี้ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่าน [38, 43] ที่ได้ทำการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานโดยการใช้ วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ต้องการอาศัยการทดลองจริงในจำนวนหลายครั้งและอาจจะต้องใช้เวลาในการทดลองมาก

2.5.1.2 วิธีการทดลองของทาคุชิ (Taguchi's method)

จากการศึกษาของ Mehat และ Kamaruddin, (2012) [44] พบว่าวิธีการทดลองของทาคุชิเริ่มมีการใช้อย่างแพร่หลายในวงการฉีดพลาสติก เพราะสามารถออกแบบการทดลองที่น้อยลงเพื่อเทียบกับการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full factorial method) อีกทั้งยังสามารถให้ผลลัพธ์ในเชิงความสัมพันธ์ของปัจจัยในการฉีดพลาสติกได้ดี โดยที่ในปี 2005 Erzurumlu และ Ozcelik [45] ได้ใช้วิธีการทดลองหาค่ากระบวนการฉีดพลาสติกที่เหมาะสมแบบวิธีการทดลองของทาคุชิ โดยพยายามลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงาน โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบด้านการบิดงอ คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความดันในการฉีด ย้ำ ชนิดของครีบช่วยเพื่อความแข็งแรงของชิ้นงาน มุมของครีบ ผลลัพธ์ของการวิจัยนี้พบว่าลักษณะของครีบแต่ละชนิด และมุมของครีบส่งผลต่อการเกิดการบิดงอของชิ้น ต่อมาในปี 2010 Chiang และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาการบิดงอของชิ้นงานบาง โดยใช้วิธีการทดลองของทาคุชิ ผลพบว่า การใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ ความเร็วในการฉีดสูง และความดันในการฉีดย่ำสูง ส่งผลดีต่อการลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงาน และต่อมาในปี 2015 Zheng และคณะ [47] ได้ใช้วิธีของทาคุชิ แบบ L27(3³) ในการออกแบบการทดลองและลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงาน โดยเพิ่มปัจจัยทดลองจากนักวิจัยที่กล่าวมาแล้วคือ พิจารณาระยะการเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเต็มเป็นฉีดย่ำ (V/P Switching over) และได้บทสรุปว่า มีผลต่อการเกิดการบิดงอ ยิ่งเพิ่ม Switching ก็จะทำให้การบิดงอน้อยลงอันเนื่องจากการจะเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่น้อยลง และพบว่าความดันการฉีดย่ำมีผลอย่างมากต่อการเกิดการบิดงอ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถลดจำนวนการทดลองให้น้อยลงได้เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน แต่มีโอกาสผิดพลาดและกรณีปัจจัยในกระบวนการผลิตค่อนข้างมีความแปรปรวนมากๆ เพราะมีโอกาสได้คำตอบที่ยังไม่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ

2.5.2 วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยการคำนวณสมัยใหม่ (Modern computational Methods)

สำหรับการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 3 วิธี

2.5.2.1 วิธีการคำนวณอย่างหนัก (Hard computing techniques)

เป็นวิธีการเพื่อหาคำตอบบนพื้นฐานของสมการการคิดคำนวณที่ถูกป้อนเข้าไปในโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งสำหรับโปรแกรมสำเร็จรูปที่นิยมนำมาใช้เพื่อการปรับปรุงกระบวนการฉีดพลาสติก คือ Moldflow simulation program และ Moldex 3D program ซึ่งในการนำโปรแกรมเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุงกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อให้ลดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานนั้น Lam และคณะ (2003) [48] ได้มีการนำโปรแกรม Moldflow simulation มาใช้ในการหาคำปัจจัยในการฉีดที่เหมาะสมโดยการจำลองการฉีดบนโปรแกรม ผลงานวิจัยพบว่าสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้การหดตัวของชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุด ก่อนจะนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองไปฉีดจริงกับเครื่องจักร นอกไปจากนี้ กลุ่มนักวิจัยของ Cellere และคณะ (2010) [49] และ Kurt และคณะ (2010) [50] ยังได้มีการนำโปรแกรมสำเร็จรูป Moldflow มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อลดการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน ผลลัพธ์จากการคำนวณได้ผลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานค่อนข้างดี และปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบ คือ ความดันในการฉีดและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก

2.5.2.2 วิธีการแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ (Soft computing techniques)

เป็นเทคนิคที่จำลองกระบวนการความคิดมาจากธรรมชาติ และความคิดมนุษย์ วิธีการโครงข่ายตาข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) วิธีการทางเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) วิธีการค้นหาคำตอบแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization, ACO) เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้จะเป็นวิธีการคำนวณสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอนและมีความซับซ้อนของปัญหา วิธีการแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เริ่มได้รับความนิยมในการนำมาใช้แก้ไขปัญหาในการปรับตั้งค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยๆ [36] คือ

1) กลุ่มนักวิจัยที่ใช้วิธีการโครงข่ายตาข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) เพื่อลดการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน ดังเช่น Qzcelik และ Erzurumlu, (2006) [51] ที่ใช้วิธีโครงข่ายตาข่ายประสาทเทียมในการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการบิดงอของชิ้นและพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบคือความดันการฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก เวลาการฉีด และเวลาการหล่อเย็น เช่นเดียวกันนี้ Yin และคณะ (2010) [52] ได้ใช้วิธีการโครงข่ายตาข่ายประสาทเทียมในการช่วยปรับปรุงการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งผลนอกจากจะแสดงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับ Qzcelik และ Erzurumlu, (2006) [51] ที่กล่าวมา แต่ยังคงแสดงผลให้เห็นว่าการใช้วิธีโครงข่ายตาข่ายประสาทเทียมสามารถประมวลผลหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดเพื่อลดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานได้เพียงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 0.001 วินาที และสามารถลดเวลาในกระบวนการหล่อเย็นลงได้ 50% ในขณะที่ Shi และคณะ (2012) [53] ก็ได้วิเคราะห์การเกิดการบิดงอของชิ้นงานโดยใช้วิธีการโครงสร้างตาข่ายประสาทเทียมในการหาปัจจัยที่กระทบต่อการบิดงอของชิ้นงาน และพบว่าเวลาในการฉีดอัดมีผลกระทบมากที่สุดรวมไปถึงเวลาในการฉีด อุณหภูมิในการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก เวลาในการหล่อเย็น และความดันฉีดอัดที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการบิดงอของชิ้นงานเช่นกัน

2) กลุ่มนักวิจัยที่ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm, EA) เพื่อลดการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน Xu และคณะ (2011) [54] ได้ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของวิธีการแบบวิวิธนาการในการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงาน ผลสรุปเมื่อนำผลลัพธ์ของการหาปัจจัยในกระบวนการแบบกลุ่มอนุภาคเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าตอบแบบกลุ่มแรกคือการทดลองทางตรง (Experimental method) พบว่า ได้ค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกิดการบิดงอและหดตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่กระบวนการแบบกลุ่มอนุภาคสามารถใช้เวลาในการหาค่าตอบที่น้อยกว่า นอกจากวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคยังมีวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ที่ Guo และคณะ (2014) [55] และกลุ่มวิจัยของ Zhao และคณะ (2015) [56] ได้นำวิธีทางพันธุกรรมมาปรับใช้เพื่อหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกให้เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการหดตัวของชิ้นงานพร้อมกับลดการยุบตัว และการบิดงอของชิ้นงาน บทสรุปใช้เชิงความสัมพันธ์กับปัญหาด้านคุณภาพทั้ง 3 ชนิดพบว่า การบิดงอและการหดตัวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการบิดงอกับการยุบตัว (Sink Marks) และการหดตัวกับการยุบตัว พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน โดยปัจจัยในกระบวนการผลิตที่พิจารณา คือ เวลาในการฉีด อุณหภูมิการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก เวลาในการฉีดอัด ความดันการฉีดอัด อุณหภูมิการหล่อเย็น และเวลาในการหล่อเย็น และพบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวพลาสติกที่ต่ำยังมีแนวโน้มว่า การบิดตัว การหดตัว และการยุบตัวของชิ้นงานจะได้ค่าที่ต่ำลง และกลุ่มวิจัยของ Kitayama และคณะ, (2014) [57] และ Wang, (2015) [58] ได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยการประมาณการแบบลำดับขั้น (Sequential approximate optimization) เพื่อลดการบิดงอของชิ้นงานพลาสติก ผลการทดลองพบว่า จากการพิจารณาปัจจัยในกระบวนการผลิตเหมือนกับนักวิจัยหลายๆ คน พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดในการจะลดการเกิดการบิดงอคือ อุณหภูมิการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก จากผลการทดลองของ Kitayama และคณะ, (2014) [57] พบว่าเมื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยการประมาณการแบบลำดับขั้น และใช้ที่อุณหภูมิของการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกที่ต่ำจะสามารถลดการเกิดการบิดงอได้ 13.2% เทียบกับกระบวนการฉีดแบบปกติที่ค่ามาตรฐานการฉีด

3) กลุ่มนักวิจัยที่ใช้วิธีการผสมผสานกันของวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Hybrid approaches) เพื่อลดการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน Qzcelik และ Erzurumlu, (2006) [51] ใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีการโครงสร้างประสาทเทียมร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อลดการเกิดการบิดงอของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงาน โดยที่ผลคือ สามารถปรับปรุงการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติก และลดการบิดงอลงได้ถึง 51% เมื่อเทียบกับการปรับตั้งการฉีดพลาสติกแบบปกติ ต่อมาในปี 2010 Deng และคณะ, (2010) [59] ได้ใช้วิธีแบบผสมผสานโดยนำวิธีแบบการเลือกหาค่าตอบแบบสุ่มตัวอย่าง (Mode-pursuing sampling, MPS) ทำงานร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) เพื่อลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงาน โดยพิจารณาปัจจัยในกระบวนการฉีด 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก เวลาการฉีด และความดันในการฉีดย้ำ ผลการทดลองพบว่าสามารถลดการเกิดการบิดงอได้ดีและใช้เวลาในการประมวลผลเพื่อให้ได้ปัจจัยในกระบวนการฉีดต่ำลง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมโดยการคำนวณสมัยใหม่ (Modern computational methods) สำหรับการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของในกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อลดการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานพอสรุปได้ว่า การใช้วิธีนี้ในยุคปัจจุบันถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพทั้งในเชิงของกรอบเวลาการทำงาน และต้นทุนในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกที่เหมาะสม ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เลือกกลุ่มวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสม โดยการคำนวณสมัยใหม่เป็นหนึ่งในกระบวนการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพร้อมทั้งควบคุมการใช้พลังงานในกระบวนการฉีดอย่างมีประสิทธิภาพ จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกลุ่มวิธีการหาค่าตอบโดยการคำนวณสมัยใหม่พบว่ายังคงมีอีกหลายวิธีในกลุ่มของกระบวนการหาค่าตอบโดยการคำนวณสมัยใหม่ที่ยังไม่ได้ถูกนำมาทดลองและปรับใช้กับกระบวนการฉีดพลาสติก หนึ่งในนั้นคือ ขั้นตอนวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อย ดังนั้นผู้คิดค้นวิธีนี้ Yang, (2009) [60] ได้รายงานผลการทดลองว่าวิธีการหาค่าค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อยสามารถใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี โดยเฉพาะปัญหาที่มีสมการเป้าหมายหลายสมการ (Multi-objective function) Yang, (2013) [61] ดังแสดงผลการทดลองวัดผลค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับคำตอบของปัญหาเกณฑ์โดยการคำนวณสมัยใหม่วิธีอื่นๆ ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า D_g ที่ $n = 50$ และ $t = 500$ iterations

Methods	ZDT1	ZDT2	ZDT3	SCH	LZ
VEGA	3.79E-02	2.73E-03	3.29E-01	6.98E-02	1.47E-03
NSGA-II	3.33E-02	7.24E-02	1.14E-01	5.73E-03	2.77E-02
MODE	5.80E-03	5.50E-03	2.15E-02	9.32E-04	3.19E-03
DEMO	1.08E-03	7.55E-04	1.18E-03	1.79E-04	1.40E-03
Bees	2.40E-02	1.69E-02	1.91E-01	1.25E-02	1.88E-02
SPEA	1.78E-03	1.34E-03	4.75E-02	5.17E-03	1.92E-03
MOFA	1.90E-04	1.52E-04	1.97E-04	4.55E-06	8.70E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ZDT1 ถึง 3 คือ ปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะของ Zitzler–Deb–Thiele [62]

LZ คือ ปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะของ Li and Zang [62]

SCH คือ ปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะของ Schaffer [62]

VEGA คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Vector evaluated genetic algorithm

NSGA-II คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Nondominated sorting genetic algorithm

MODE คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Multiobjective differential evolution

DEMO คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Differential evolution for multiobjective optimization

Bees คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Multiobjective bees algorithm

SPEA คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Strength Pareto evolutionary algorithm

MOFA คือ วิธีการหาคำตอบแบบ Multiobjective Firefly algorithm

ซึ่งจะพบว่าวิธีการหาคำตอบแบบหลายสมการเป้าหมายแบบหิ่งห้อย (Multiobjective firefly algorithm) สามารถได้คำตอบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดวิธีอื่น สังเกตได้จากผลลัพธ์ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าทุกวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.1 จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการเลือกการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบหิ่งห้อยมาใช้ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติก

2.5.2.3 วิธีการควบคุมแบบตอบสนองทันที (Real time techniques)

จากการศึกษาภาพรวมของการใช้วิธีการควบคุมแบบตอบสนองทันทีในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 2001 ถึง 2013 ของ Mamodiya และ Sharma (2014) [63] โดยได้สรุปไว้ว่าในการจะควบคุมคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกให้ดีขึ้น การใช้ตัวควบคุมแบบตอบสนองทันที เช่น PID (Proportional Integral Derivation) ตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic) และการใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm) เข้ามาช่วยควบคุมเครื่องฉีดพลาสติกจะส่งผลให้คุณภาพชิ้นงานดีขึ้น ในขณะที่ Lin และ Lian (2010) [64] ใช้วิธีการควบคุมแบบตอบสนองทันที โดยใช้การควบคุมแบบตรรกะคลุมเครือแบบจัดการตัวเอง (Self-organizing fuzzy controller, SOFC) เพื่อใช้ควบคุมความเร็วของสกรูในกระบอกฉีดพลาสติกและความดันบริเวณหัวฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อควบคุมการฉีดตามปัจจัยที่มีการตั้งค่าตามปกติและควบคุมแบบตอบสนองทันทีสำหรับ 2 ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานลดน้อยลงมากกว่าไม่มีการควบคุมเชิงตอบสนองแบบทันที แต่จากการศึกษาพบว่า วิธีการควบคุมเชิงตอบสนองแบบทันทียังคงมีอุปสรรคด้านการควบคุมปัจจัยภายนอกในการควบคุม ส่งผลให้การติดตั้งและค่าควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ทำได้ยาก อีกทั้งกระบวนการติดตั้งและการปรับปรุงระบบควบคุมโดยให้วิธีการควบคุมแบบตอบสนองทันที (Real time techniques) มีการลงทุนและใช้เวลามากกว่าวิธีอื่นดังที่กล่าวมา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำวิธีการควบคุมแบบตอบสนองทันทีมาพิจารณาในกระบวนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความเค้นตกค้างและการอบอ่อนที่ส่งผลกระทบต่อ การบิดงอของชิ้นงานพลาสติก (Residual stress and annealing process that affected to injection molded parts)

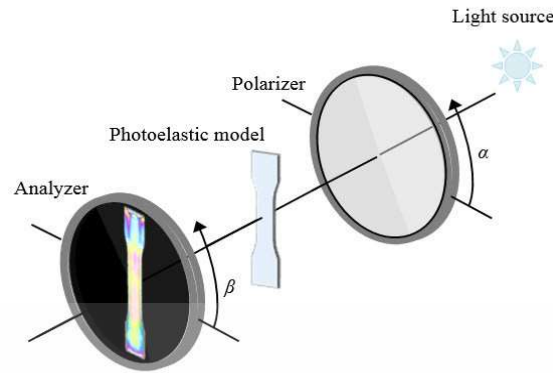
กระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ในกระบวนการฉีดพลาสติก กระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการปรับปรุงชิ้นงานโดยอุณหภูมิ การอบอ่อนจะอยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิการบิดงอ (Heat Distortion temperature, HDT) และ อุณหภูมิการหลอมเหลวของพลาสติก (Melting temperature, Tm) [65] โดยกระบวนการอบอ่อน ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการทำให้โมเลกุลของ โพลีเมอร์เกิดการคลายตัว หรือเรียกว่าการคลายความเค้นนั่นเอง โดยกระบวนการอบอ่อนจะเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการคลายตัวเร็วขึ้นกว่าการนำชิ้นงานวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยสายโครงสร้าง ตาข่ายของโพลีเมอร์ (Semi-crystalline chain) จะถูกสร้างให้มีขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อคุณสมบัติทางกล และการลดการบิดงอของชิ้นงาน [66-69] จากการศึกษาในหลายๆ งานวิจัย [66, 70-73] พบว่า ถ้ามีการใช้อุณหภูมิที่เพียงพอและเหมาะสมในกระบวนการอบอ่อนจะส่งผลให้เกิดสายโครงสร้างตาข่าย ของโพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพดีและอัตราการเกิดการบิดงอน้อยลง นอกไปจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัย [66, 72, 74] ได้มีการเปิดเผยว่า การใช้อุณหภูมิใน กระบวนการอบอ่อนที่ต่ำ จะส่งผลดีต่อการคลายความเค้นของชิ้นงาน และการใช้อุณหภูมิใน กระบวนการอบอ่อนที่สูง จะส่งผลให้พลาสติกเกิดการเรียงตัวของสายโครงสร้างตาข่ายของพลาสติกที่ มากขึ้น แต่ ณ ปัจจุบันก็ยังไม่พบว่ามีงานวิจัยเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียที่ชัดเจนในการเลือกใช้อุณหภูมิ ในกระบวนการอบอ่อนของพลาสติก ในกระบวนการอบอ่อนสิ่งสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน โดยตรง คือ การเปลี่ยนแปลงและจัดเรียงตัวของโมเลกุลและสายโซ่ของพลาสติกที่จะส่งผลต่อ คุณสมบัติทางกลและรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน เช่น การบิดงอของชิ้นงาน [67, 70-71, 75-83]

งานวิจัยบางกลุ่ม [84-86] มีการค้นพบว่า ในกระบวนการอบอ่อนของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ได้มีการสร้างสายร่างเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ มากขึ้น (Lamellae) ในพื้นที่ ของวัสดุอสัณฐาน (Amorphous phase) Wang และคณะ [87] พบว่า ในกระบวนการอบอ่อนความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของ Structural Relaxation of rigid amorphous Fraction (RAF) เป็นหนึ่ง เหตุผลที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและรูปร่างของชิ้นงาน นอกจากนี้ Li และคณะ [88] ได้มีการเปิดเผยว่า การอบอ่อนที่ความดันบรรยากาศสูงนอกจากจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของผลึกของ พอลิแลกไทด์ชนิดเบต้า (β) เป็นชนิดอัลฟา (α) แต่ยังคงเปลี่ยนแปลงผลึกชนิดเบต้า (β) เป็นชนิด แกมมา (γ) อีกด้วย ซึ่งส่งผลทำให้คุณสมบัติการรับแรงกระแทกของพลาสติกสามารถทำได้สูงขึ้น เนื่องจากผลึกของโพลีเมอร์ชนิดอัลฟา (α) และแกมมา (γ) จะมีเสถียรภาพมากกว่าผลึกชนิดเบต้า (β)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาจะพบว่า ยังไม่ปรากฏอย่างชัดเจนในการวิเคราะห์กระบวนการอบอ่อนที่มีผลกระทบต่อการบินงของชิ้นงานพลาสติกซึ่งเป็นปัจจัยด้านคุณภาพที่สำคัญ จึงเป็นที่มาของส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้ ที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลลัพธ์ของการใช้กระบวนการอบอ่อนเพื่อลดการเกิดการบิดงของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดพลาสติก และใช้ทฤษฎีโฟโตอีลาสติซิตี ในกระบวนการพิสูจน์ การลดความเค้นตกค้างหลังชิ้นงานพลาสติกผ่านกระบวนการอบอ่อนซึ่งเป็นผลทางตรงต่อการลดลงของการบิดงของชิ้นงาน

2.7 กระบวนการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่มีผลบ่งชี้โดยตรงต่อการลดการบิดงของชิ้นงานพลาสติกโดยวิธีโฟโตอีลาสติซิตี (Inspection of residual stress that directly indicated warpage phenomenon on specimen via photoelasticity methodology)

ในปัจจุบันมีหลายเทคนิคที่ถูกใช้เพื่อการวิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้างสำหรับชิ้นงานตัวอย่าง ยกตัวอย่างเช่น เทคนิคการวัดค่าความเค้นตกค้างด้วยสเตรนเกจ (Strain gage measurement technique) การใช้รังสีเอ็กซ์ (X-ray technique) การใช้วิธีการทดสอบด้วยสารตัวนำทางเคมี (Chemical probe testing technique) เป็นต้น แต่พบว่าวิธีโฟโตอีลาสติซิตีเป็นอีกวิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบชิ้นงานพลาสติก นอกจากจะให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่ดี ยังพบว่าเป็นวิธีที่ไม่ต้องทำลายชิ้นงานเพื่อทดสอบ และมีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ โดยที่การวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธีโฟโตอีลาสติซิตีสามารถระบุการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานได้ทุกตำแหน่งโดยเฉพาะชิ้นงานพลาสติกที่มีความโปร่งแสง ตัวอย่างเช่น Chang และคณะ, (2008) [89] ได้ทำการศึกษาวิจัยการใช้เทคนิคโฟโตอีลาสติซิตีร่วมกับเทคนิคการจับภาพ (Image processing techniques) เพื่อการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างในแต่ละจุดของชิ้นงานทดสอบ เทคนิคนี้อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่องผ่านวัตถุโปร่งแสง เพื่อให้แถบของสีที่เกิดจากการหักเหและส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัตถุ ซึ่งเป็นการบอกถึงโมเมนต์ของวัสดุที่มีการเรียงตัวที่ไม่เหมือนกันในแต่ละจุด และเมื่อมีการส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดแถบสีที่หักเหออกมาที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่แตกต่างกันในแต่ละจุดของชิ้นงาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นโพลารอยด์ตั้งแกนที่ขนานตั้งฉากกัน (The dark-field polarization plan) และใช้แสงส่องผ่านชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์แถบความเค้นตกค้างบนชิ้นงาน [90] ดังแสดงในรูป 2.53



รูป 2.53 แสดงวิธีการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างบนชิ้นงานโดยโพลาไรซ์ตั้งแกนที่ศูนย์ตั้งฉากต่อกัน

ความเค้นตกค้างจะถูกแสดงออกมาเป็นแถบสีของสีและสามารถสังเกตเห็นอันดับริ้วของความเค้นได้ผ่านริ้วของแถบสีที่เกิดจากการหักเหของแสงแสดงออกมา [89] การกระจายตัวของความเค้นตกค้างสามารถอธิบายได้ผ่านกฎแห่งแสงและความเค้น (stress-optic law) โดยที่กฎของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและดัชนีการหักเหของแสง แสดงดังสมการที่ (2.46) [91]

$$\begin{aligned} n_1 - n &= (c_1 \sigma_1 - c \sigma) \\ n_2 - n &= (c_2 \sigma_2 - c \sigma) \end{aligned} \quad (2.46)$$

โดยที่ ค่า σ_1 และ σ_2 คือ ค่าความเค้นหลัก ที่เกิดจากค่าความเค้นสูงสุดตามแนวแกนอ้างอิง และ n_1 และ n_2 คือ ดัชนีหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านมาจากแนวแกนของโพลาไรซ์ ขณะที่ n คือ ดัชนีหักเหของแสงที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะมีความเค้น c_1 และ c_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ของแสงและความเค้น เมื่อกระบวนการส่องแสงผ่านวัตถุเกิดการหักเหขึ้น สภาวะการเกิดหน่วยของแสงจะเกิดขึ้น ซึ่งความหน่วงสัมพัทธ์นี้ (The relative retardation (δ)) สามารถจะอธิบายได้ดังสมการที่ (2.47)

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (2.47)$$

โดยที่ λ คือค่าความยาวคลื่น h คือ ค่าความหนาของชิ้นงานทดสอบคงที่ โดยสามารถนำสมการที่ (2.46) และ (2.47) รวมกันได้สมการที่ (2.48) ดังนี้

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (c_1 - c_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.48)$$

เมื่อรวม c_1 และ c_2 สามารถนิยามใหม่ได้เป็น ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ของแสงและความเค้น C และ $(\sigma_1 - \sigma_2)$ คือ ผลต่างของความเค้นหลักดังแสดงในสมการที่ (2.49)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.49)$$

โดยหากนำ 2π หารตลอดในสมการที่ (2.49) จะสามารถแปลงสมการเพื่อหาค่าอันดับริ้ว (fringe order (N)) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.50)

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = h \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.50)$$

สามารถแปลงจากสมการที่ 2.24 และ 2.25 รวมเพื่อหาค่าผลต่างความเค้นได้ดังสมการที่ (2.51)

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot \lambda}{h \cdot C} = \frac{\delta \cdot \lambda}{2\pi \cdot h \cdot C} \quad (2.51)$$

โดยสัมประสิทธิ์ของการมองเห็นของโพลิเมอร์สามารถแปลงสมการได้ดังสมการที่ (2.52) [92]

$$K = \frac{2\pi \cdot C}{\lambda} \quad (2.52)$$

โดยที่ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ของแสงและความเค้น C และ K คือค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นของโพลิเมอร์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นของของโพลิสไตรีน มีค่าเท่ากับ 5000 Brewster หรือมีค่าเท่ากับ $5000 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ [92] ซึ่งสามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่มีลักษณะบางและความหนาคงที่ ดังนั้น สามารถสรุปสมการเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดได้ดังสมการที่ (2.53) [92]

$$\sigma = \frac{N \cdot \lambda}{h \cdot C} = \frac{\delta}{K \cdot h} \quad (2.53)$$

ก่อนการระบุหาค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานพลาสติกที่เป็นผลกระทบโดยตรงต่อการก่อให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกจะต้องมีการระบุหาทิศทางของการเกิดอันดับริ้วของความเค้น และระบุหาค่าความหน่วงสัมพัทธ์นี้ (The relative retardation (δ)) เพื่อนำไปคำนวณในสมการที่ 2.53 วิธีในการระบุหาค่าความหน่วงสัมพัทธ์หรือค่าอันดับริ้วที่สามารถระบุได้อย่างแม่นยำ คือ วิธีโพโตอลาสติกซิตีแบบสามริ้ว (Three Fringe Photoelasticity, TFP) วิธีการทำงานของวิธีนี้คือ ขั้นตอนแรกการอาศัยกฎของแม่สีที่มีอยู่สามสี คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เพื่อทำการแยกแยะความหน่วงสัมพัทธ์ตามมาตรฐาน ASTM-D4093-95 ในแต่ละจุดตรวจสอบบนชิ้นงาน หลังจากได้ค่าแม่สีทั้งสามสี ณ บริเวณจุดตรวจสอบ นำค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (Red (R), Green (G), Blue (B)) ของชิ้นงานทดลองเทียบค่าความผิดพลาดกับตารางมาตรฐานเปรียบเทียบ โดยหลักในการพิจารณาเลือกค่าความหน่วงสัมพัทธ์ จากตารางเปรียบเทียบมาตรฐานกับค่าวัดจริงจากการทดลอง จะต้องได้ผลของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าวัดจริงกับค่ามาตรฐาน ดังสมการที่ (2.54) [91]

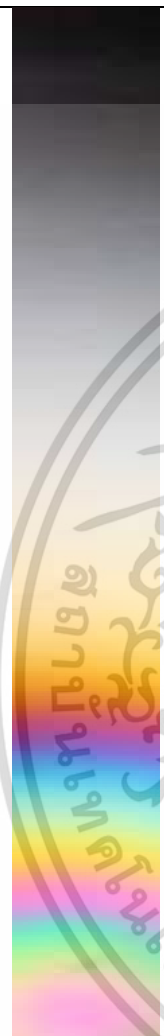
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Error = \sqrt{(R_e - R_c)^2 + (G_e - G_c)^2 + (B_e - B_c)^2} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) กำหนดให้ e เป็นตัวแทนของค่าแม่สีแดง เขียว น้ำเงิน ที่ได้จากการทดลอง และกำหนดให้ c เป็นตัวบ่งชี้ค่าแม่สีแดง เขียว น้ำเงินที่ได้จากตารางมาตรฐานการเปรียบเทียบมาตรฐาน ASTM-D4093-95 โดยการคำนวณสมการที่ (2.54) จะนำค่าที่ได้จากการทดลองคำนวณเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจนกระทั่งได้ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ต่ำสุด เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน จึงทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อหาค่าความหน่วงสัมพัทธ์ หรือค่าอันดับรีวี ตามตารางที่ 2.6 หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์มาคำนวณในสมการที่ (2.53) เพื่อหาค่าความเค้นตกค้างสูงสุดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นตกค้างกับความบิดงอของชิ้นงานพลาสติก โดยที่ถ้าพบว่าความเค้นตกค้างต่ำจะสัมพันธ์โดยตรงต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานที่จะลดต่ำลงด้วยเช่นกัน [66, 70 - 73]



ตารางที่ 2.6 ค่าความหน่วงสัมพัทธ์ (the relative retardation (δ)) กับค่าแถบสี แดง เขียว น้ำเงิน ตามมาตรฐาน ASTM-D4093-95

Colour lines	Colour	Retardation (δ)(nm)	R-STD	G-STD	B-STD
	black	0	23	14	17
	Grey	160	125	122	129
	White	260	230	227	220
	Yellow	350	255	233	189
	Orange	460	245	158	16
	Dull Red	520	210	79	71
	Tint of Passage	577	122	77	178
	Blue	620	64	186	225
	Blue-green	700	108	217	222
	Green-Yellow	800	203	242	149
	Orange	940	255	204	85
	Rose Red	1050	255	135	204
	Tint of Passage	1150	109	223	198
	Green	1350	142	240	153
	Green-Yellow	1450	204	211	143
	Pink	1550	255	189	199
	Tint of Passage	1730	255	164	221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ภาพรวมของงานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วยการทำงาน 10 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดลักษณะทั่วไปของชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น

- 1) คัดเลือกแผนการทดลอง
- 2) คัดเลือกปัจจัยและระดับปัจจัย
- 3) กำหนดค่าผลตอบแทนในการทดลอง (ค่าการบิดงอของชิ้นงาน)
- 4) สร้างแผนการทดลองเบื้องต้น

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยโปรแกรม Moldex3D

ขั้นตอนที่ 4 การทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัย

- 1) จำลองกระบวนการฉีดพลาสติก โดย Moldex3D ตามแผนการทดลองเบื้องต้น
- 2) วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น โดย Minitab

ขั้นตอนที่ 5 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยและสร้างสมการกำหนดฟังก์ชันที่เหมาะสม

- 1) ออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง
- 2) วิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology, RSM) และสร้างสมการกำหนดฟังก์ชันที่เหมาะสม (Fitness function)

ขั้นตอนที่ 6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Response optimization) จากการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง และจากวิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm optimization)

- 1) จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยปรับค่าตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface optimization)

2) จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยปรับค่าตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย

ขั้นตอนที่ 7 การยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการทดลองการลดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน

- 1) ยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D
- 2) ยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดขึ้นส่วนจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธีการจำลองและการทดลองฉีดขึ้นส่วน

ขั้นตอนที่ 8 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

ขั้นตอนที่ 9 การนำขึ้นส่วนทดลองเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน

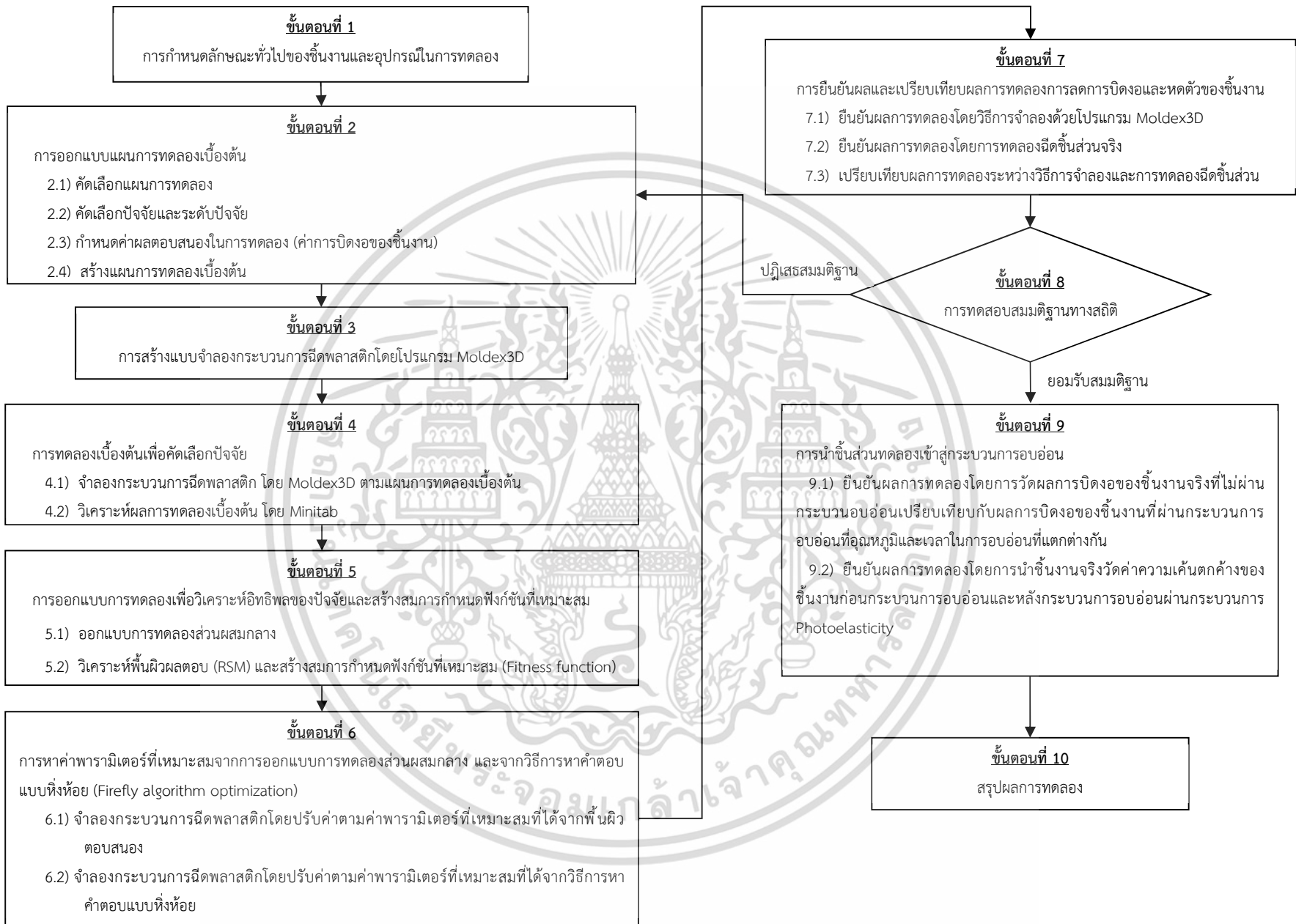
1) ยืนยันผลการทดลองโดยการวัดผลการบดงอของชิ้นงานจริงที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนเปรียบเทียบกับผลการบดงอของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนที่แตกต่างกัน

2) ยืนยันผลการทดลองโดยการนำชิ้นงานจริงวัดค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบอ่อนและหลังกระบวนการอบอ่อนผ่านกระบวนการ Photoelasticity

ขั้นตอนที่ 10 สรุปผลการทดลอง

จากขั้นตอนการดำเนินการวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยสามารถลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานได้ ดังรูปที่ 3.1





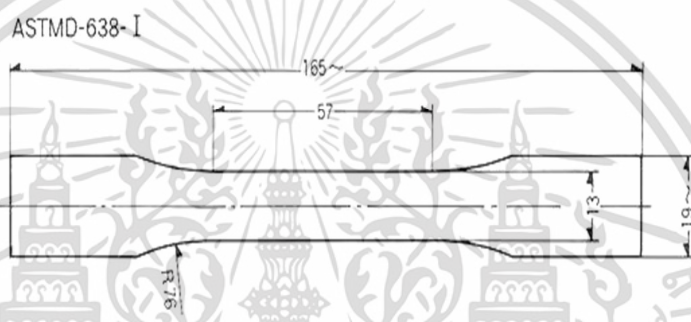
รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การกำหนดลักษณะทั่วไปของชิ้นงานและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 ออกแบบขนาดชิ้นงาน

ชิ้นงานในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเลือกชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานของ ASTM D638 Type1 หรือว่าชิ้นงานแบบ Dog bone เพื่อนำมาศึกษาการหดตัวและบิดงอของพลาสติก ชิ้นงานมีความหนาเท่ากับ 3.2 mm ออกแบบชิ้นงานโดยโปรแกรม Solid Work 2015 ชิ้นงานมีขนาดดังรูปที่ 3.2

ASTM D638 Type I



รูปที่ 3.2 ชิ้นงาน Dog Bone ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type1

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการทดลองนี้เลือกใช้ โพลีสไตรีน (PG-22, CHI MEI corporation, Taiwan) มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกโพลีสไตรีนที่ใช้เป็นวัสดุในการทดลอง

Physical Properties			
Properties	Method	Unit	Value
Melt Flow Index (5kg/230°C)	ASTM D1238	g / 10 min	17.5
CharpyNotchcd Impact Strength (6.4mm/23°C)	ASTM D256	Kg-cm/mm	1.4
Tensile Strength at Yield (6 mm/min)	ASTM D638	kg/cm ²	425
Flexural Strength at Yield (6 mm/min)	ASTM D790	kg /cm ²	540
Flexural Modulus (2.8 mm/min)	ASTM D790	10 ⁴ Kg/cm ²	3.1
Rockwell Hardness	ASTM D785	M-Scale	74
Heat Distortion Temperature (Unannealed)	ASTM D648	°C	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) คุณสมบัติต่างๆ ของพลาสติกโพลีสไตรีนที่ใช้เป็นวัสดุในการทดลอง

Chemical Properties			
Chemical Name	CAS Number	EC Number	Percent Weight
Polystyrene or styrene polymer	9003-53-6	Polymer	≥ 95
Processing Technique			
Ejection Temperature	108 °C		
Processing Temperature	170 – 210 °C		
Mold Temperature	40 -70 °C		
Vicat Softening Point	87 °C		

3.1.3 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) ใช้ รุ่น Toshiba IS80 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น Toshiba IS80

3.2 การออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment Design)

3.2.1 คัดเลือกแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ เนื่องจากจำนวนปัจจัยที่นำมาทำการทดลองมีจำนวนมาก และเพื่อลดจำนวนแผนการทดลองให้เหลือน้อยลง แต่ยังคงเพียงพอต่อการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่นำมาทดลอง จึงเลือกแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) มาทำการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละระดับปัจจัยต่างๆ และเนื่องจากแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนนั้นมีคุณสมบัติเป็นส่วนใหญ่ที่ลดรูปมาจากแผนการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งหมายความว่า หากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยมีผลน้อยมากจนไม่สามารถคัดกรองปัจจัยหรือแยกผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effects) ออกได้ ก็ยังสามารถเพิ่มแผนการทดลองและทำการทดลองเพิ่มเติมได้อีก จนกว่าจะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัดกรองปัจจัยหรือแยกผลกระทบของปัจจัยร่วมออกได้ แต่หากการทดลองเริ่มต้นสามารถคัดกรองปัจจัยได้ แผนการทดลองนี้จะมีจำนวนการทดลอง (Run order) ไม่มากจนเกินความจำเป็น ใช้เวลาและต้นทุนในการทดลองต่ำกว่าแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment)

3.2.2 คัดเลือกปัจจัยและลำดับของปัจจัย

เนื่องจากการคัดเลือกปัจจัยที่จะนำมาศึกษาผลกระทบตามแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้นนั้น จำเป็นต้องประกอบไปด้วยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในกระบวนการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก (Simulation) โดยโปรแกรมวิเคราะห์การฉีดพลาสติก Moldex3D และต้องสอดคล้องกับข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง จึงทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากหลายๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 มาใช้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยเพื่อใช้เป็นปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable, KPIV) ในแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน คือกลุ่มปัจจัยที่เกิดจากวิธีการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการฉีดพลาสติก และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีผลต่อการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างมีทั้งหมด 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

กลุ่มที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา (Time) ได้แก่

- 1) เวลาในการฉีดอัด (Packing Time)
- 2) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)

กลุ่มที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความดัน (Pressure) ได้แก่

- 1) ความดันฉีด (Injection Pressure)
- 2) ความดันฉีดอัด (Packing Pressure)

กลุ่มที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วและระยะทาง ได้แก่

- 1) ระยะชักสกรู (Metering Stroke)
- 2) ระยะสำรอง (Cushion)
- 3) ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดอัด (V/P Switching Over)
- 4) ความเร็วรอบสกรู (Screw Speed)
- 5) อัตราความเร็วฉีด (Injection Flow Rate)

กลุ่มที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ (Temperature) ได้แก่

- 1) อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melting Temperature)
- 2) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature)
- 3) อุณหภูมิขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Ejection Temperature)

จากข้อมูลข้างต้น จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้า

ที่จะใช้ในการทดลองเบื้องต้น โดยใช้ข้อมูล 2 ส่วนด้วยกัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก (ศึกษาเพิ่มเติมบทที่ 2)
- 2) ความสามารถในการควบคุมค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองบนโปรแกรมวิเคราะห์การฉีดพลาสติก Moldex3D

โดยเกณฑ์ในการคัดเลือกปัจจัยนำเข้าของการออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีความเป็นไปได้จากข้อมูลใน 2 ส่วนข้างต้นนี้ รายละเอียดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ในการทดลองในขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment Design)

ลำดับ	ปัจจัย / ค่าพารามิเตอร์	ความเป็นไปได้จากแหล่งที่มาของปัจจัย		การวิเคราะห์การทดลองเบื้องต้น
		พารามิเตอร์จากการปรับตั้งเครื่องฉีด*	พารามิเตอร์จากแบบจำลอง**	
1	อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melting Temp)	มี	มี	เลือก
2	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp)	มี	มี	เลือก
3	อุณหภูมิขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding Temp)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
4	เวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกฉีด (Resident Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
5	ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (V/P Switching over)	มี	มี	เลือก
6	อัตราความเร็วฉีด (Injection flow rate)	มี	มี	เลือก
7	ความดันฉีด (Injection pressure)	มี	มี	เลือก
8	ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)	มี	มี	เลือก
9	เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)	มี	มี	เลือก
10	เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	มี	มี	เลือก

* จากพารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีด

** ความสามารถในการควบคุมค่าพารามิเตอร์โดยแบบจำลอง

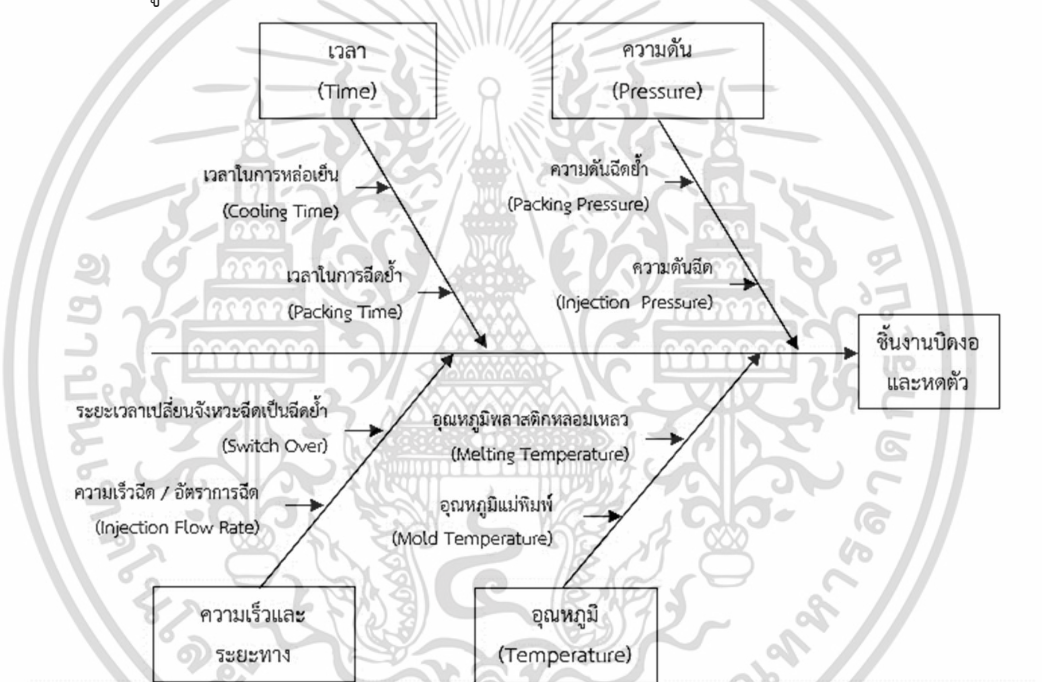
จากตาราง ผู้วิจัยสามารถคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะนำไปทดลองในแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีผลกระทบได้ทั้งหมด 8 ปัจจัย ดังนี้

- 1) อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว
- 2) อุณหภูมิแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ระยะเปลี่ยนจิ้งหะฉืดเป็นฉืดย้า
- 4) อัตราความเร็วฉืด
- 5) ความดันฉืด
- 6) ความดันฉืดย้า
- 7) เวลาในการฉืดย้า
- 8) เวลาในการหล่อเย็น

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถสร้างแผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการบดงอและหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการบดงอและหดตัวของชิ้นงานที่จะนำไปเป็นปัจจัยนำเข้าในการทดลองตามแผนการทดลองเบื้องต้น

การคัดเลือกระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุดิบที่ใช้ลักษณะต่างๆ ของชิ้นงานรวมไปถึงเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง ในการวิเคราะห์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทดลองเบื้องต้นโดยแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} (2^{8-4} Fractional Factorial Experiment) ในขั้นตอนต่อไป รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การสรุปค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลต่อการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
1. อัตราความเร็วฉีด (Injection Flow Rate)	20-70	%
2. ความดันฉีด (Injection Pressure)	60-80	%
3. ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (V/P Switching Over)	90-98	%
4. เวลาในการฉีดย้ำ (Packing Time)	3-15	Sec
5. ความดันฉีดย้ำ (Packing Pressure)	60-80	%
6. อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melting Temperature)	170-210	°C
7. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature)	55-70	°C
8. เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)	20-60	Sec

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa

จากข้อมูลเบื้องต้น สามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น ด้วยแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยต่างๆ ที่นำมาทำการทดลองตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} (2^{8-4} Fractional Factorial Experiment)

ปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment)	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		หน่วย
		ต่ำ	สูง	
1. ความเร็วฉีด (Injection flow rate)	A	20	70	%
2. ความดันฉีด (Injection pressure)	B	60	80	%
3. ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (V/P Switching over)	C	90	98	%
4. เวลาในการฉีดย้ำ (Packing time)	D	3	15	Sec
5. ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure)	E	60	80	%
6. อุณหภูมิพลาสติกหลอมเหลว (Melting Temp)	F	170	210	°C
7. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp)	G	55	70	°C
8. เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	H	20	60	Sec

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa

และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

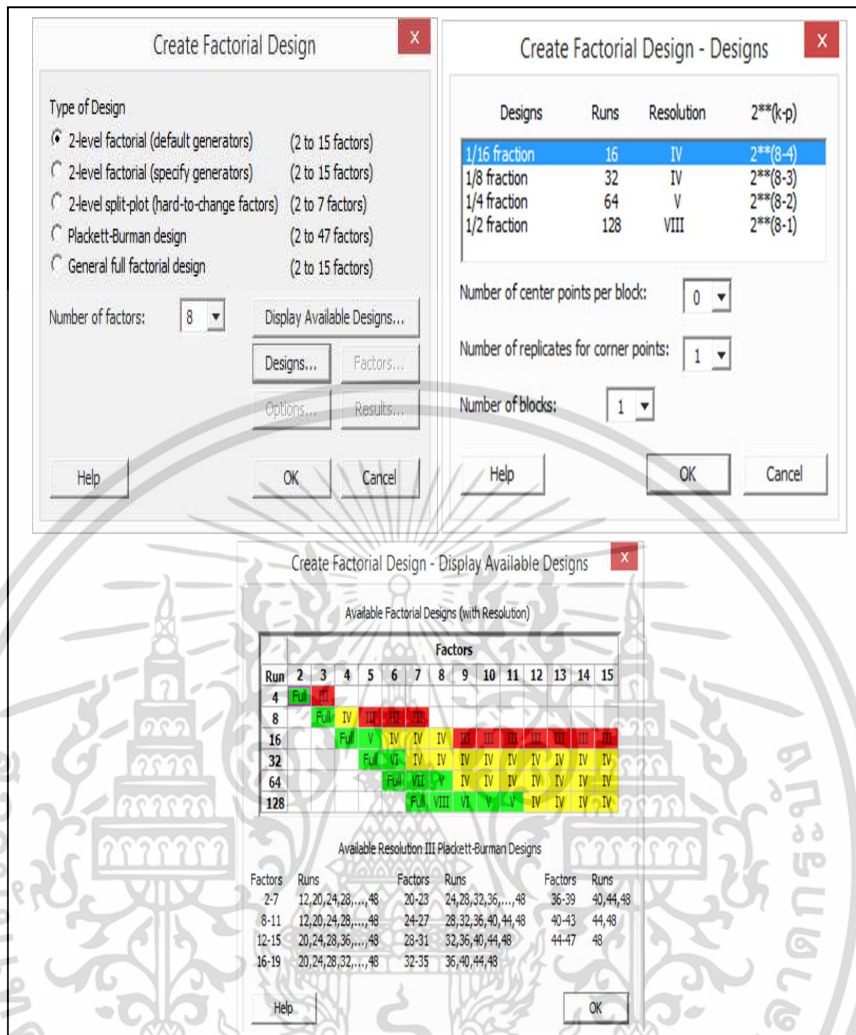
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 กำหนดค่าผลตอบแทนในการทดลอง (ค่าการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน)

ในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โปรแกรม Moldex3D สามารถแสดงค่าผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพลาสติก ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือปัจจัย (Screening) จึงได้กำหนดค่าของผลตอบแทน คือ การบิดงอและหดตัวเสียรูปสูงสุดของชิ้นส่วน เนื่องจากค่าดังกล่าวสามารถวัดได้จากการทดลองฉีดขึ้นรูปจริงบนเวอร์เนียร์ทศนิยม 3 ตำแหน่งในการวัดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานไปจากระยะและขนาดของชิ้นงานตามแบบได้ และสามารถใช้เป็นค่าผลลัพธ์ในการเปรียบเทียบผลการทดลอง

3.2.4 สร้างแผนการทดลองเบื้องต้น

จากแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน ผู้วิจัยได้เลือกแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เนื่องจากผลลัพธ์ของแผนการทดลองดังกล่าวนี้มีข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบหลัก (Main effects) และผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effects) ได้ โดยแผนการทดลองนี้จะต้องทำการทดลองและเก็บข้อมูลทั้งหมด 16 การทดลอง รายละเอียดของแผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5 และลักษณะรูปแบบการสร้างแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 3.5 หรือศึกษาเพิ่มเติมในเนื้อหาการใช้โปรแกรม Minitab ในกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองในบทที่ 2



รูปที่ 3.5 แสดงแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} โดยใช้โปรแกรม Minitab

โดยในกระบวนการเลือกแผนการทดลองสำหรับ Screening factors Minitab โดยการกดคำสั่ง เลือก Stat -> DOE -> Factorial -> Create Factorial Design หลังจากนั้นทำการเลือกแผนแบบ 2 ลำดับ ดังรูป และเลือก Resolution แบบ IV เพื่อลดจำนวนการทดลอง จะได้แผนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2⁸⁻⁴

Run Order	Factors								Warpage (MM)
	Inj Flow (A)	Inj Pres (B)	V/P SW Over (C)	Packting Time (D)	Packting Pres (E)	Melt Temp (F)	Mold Temp (G)	Cooling Time (H)	
1	70	60	98	3	80	210	55	60	
2	20	60	98	3	80	210	70	20	
3	20	60	98	15	60	170	70	60	
4	20	80	98	15	80	170	55	20	
5	20	60	90	3	60	170	55	20	
6	70	60	98	15	60	210	55	20	
7	20	80	98	3	60	210	55	60	
8	70	80	90	15	60	170	55	60	
9	70	80	90	3	80	210	55	20	
10	20	80	90	3	80	170	70	60	
11	70	60	90	3	60	210	70	60	
12	70	80	98	15	80	210	70	60	
13	20	80	90	15	60	210	70	20	
14	70	60	90	15	80	170	70	20	
15	70	80	98	3	60	170	70	20	
16	20	60	90	15	80	210	55	60	

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa

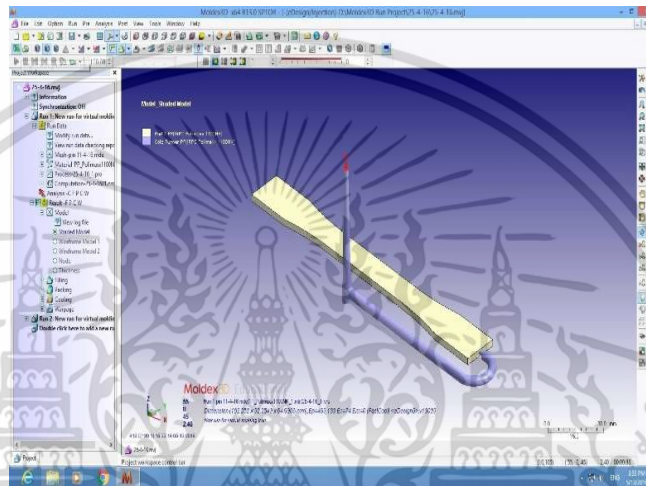
และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

3.3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยโปรแกรม Moldex3D

การสร้างรูปแบบและการจำลองระบบเป็นกระบวนการในการสร้างเงื่อนไขและลักษณะต่างๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองระบบ Moldex3D R13 Designer เช่น ระบบทางวิ่งพลาสติก (Runner system) ระบบหล่อเย็น (Cooling system) (ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก) ขนาดและระบบการทำงานของแม่พิมพ์ การกำหนดและการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง เป็นต้น เมื่อได้รูปแบบของระบบจำลองแม่พิมพ์แล้วจะนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบชิ้นต้นเข้าประมวลผล (Import) โดยโปรแกรม Moldex3D R13 ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฉีดพลาสติก เช่น การกำหนดวัสดุ (Assign material) เงื่อนไขของกระบวนการ (Process Condition) การตั้งค่าพารามิเตอร์ (Setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

computation parameters) เป็นต้น ในการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกนี้ ผู้วิจัยจะใช้วัตถุดิบ GPPS เครื่องฉีดพลาสติกขนาด 80 Tf ส่วนเงื่อนไขและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะกำหนดตามรูปแบบการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนทั้งหมด 16 การทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากประมวลผลการจำลองการฉีดโดยโปรแกรม Moldex3D แล้วทำการสรุปและวิเคราะห์ข้อมูลค่าการบิดงอของชิ้นงาน (Warpage analysis) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ โดยโปรแกรม Minitab ต่อไปแบบจำลองระบบแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกกับโปรแกรม Moldex3D

3.4 การทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกปัจจัย

ในขั้นตอนนี้คือการหาค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานที่ได้จากการประมวลผลการจำลองการฉีดพลาสติกโดยโปรแกรม Moldex3D ตามค่าพารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบไว้ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design 2^{8-4}) โดยจะนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติออก ส่วนปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะถูกนำไปเป็นปัจจัยนำเข้าในแผนการทดลองอย่างละเอียดในขั้นตอนต่อไป

3.5 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยและสร้างสมการกำหนดฟังก์ชันที่เหมาะสม

การทดลองในขั้นตอนนี้ จะนำปัจจัยที่มีผลกระทบที่ได้จากแผนการทดลองแพคทอเรียลบางส่วนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น (Screening experiment) มาทำการทดลองด้วยแผนการทดลองที่ละเอียดขึ้น คือ วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง เพื่อทำการทดลองในขั้นตอนนี้ ซึ่งแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second order หรือ Quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{i < j}^k A_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} X_i^2 \quad (3.1)$$

โดยที่ X_i คือ ตัวแปรอิสระ Y คือ ค่าฟังก์ชันที่เหมาะสม (ค่าการบิดงอหรือค่าการงอตัวของชิ้นงาน) k คือ จำนวนของพารามิเตอร์ที่ออกแบบ A_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าคงที่ A_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น A_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมของผลคูณเชิงเวกเตอร์ A_{ii} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมของผลคูณกำลังสอง จากนั้นจึงนำแผนการทดลองดังกล่าวมาทำการจำลองกระบวนการฉีดและเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองและหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสร้างเป็นสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 ดังสมการที่ (2.17)

3.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง และจากวิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm optimization)

3.6.1 จำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยปรับค่าตามพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากพื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง จะทำการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม การประมาณค่าผลตอบที่เหมาะสมของปัจจัยต่อระบบ เป็นการนำข้อมูลค่าการบิดงอของชิ้นงาน ที่ได้จากการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นส่วนด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง โดยผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อประมาณหาค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลทำให้ค่าการบิดงอของชิ้นงานมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม เมื่อสามารถกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

ต่อระบบได้แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลและการเปรียบเทียบผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.6.2 หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากวิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm optimization)

สำหรับการหาค่าคำตอบของพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดพลาสติกที่เหมาะสมด้วยการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย จะเริ่มด้วยการสร้างสมการการหาค่าที่เหมาะสม (Fitness function) ผ่านสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 ดังสมการที่ 3.1 โดยจะสร้างสมการการหาค่าที่เหมาะสมของทั้งการบิดงอของชิ้นงาน หลังจากนั้นประยุกต์การทำงานเข้าวิธีแบบหิ่งห้อยตามหลักการในบทที่ 2 คือ ใช้หลักการในการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยตัวอื่นๆ ไปหาหิ่งห้อยตัวที่มีค่าความน่าสนใจมากที่สุด ซึ่งวัดจากค่าความหนาแน่นของแสงของหิ่งห้อยตัวนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.21) และกำหนดค่าจำนวนหิ่งห้อย (N) เท่ากับ 50 ตัว สัมประสิทธิ์ของการกรองแสงของวัตถุตัวกลาง (γ) เท่ากับ 0.5 ปัจจัยการสุ่ม (α) เท่ากับ 0.2 และค่าความน่าดึงดูดของหิ่งห้อยตัวรับแสงได้รับ (β_0) เท่ากับ 0.5 ตามงานวิจัยของ Lobato และ Steffen , (2013) [93] และทำการประมวลผลของการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้การบิดงอของชิ้นงานมีค่าต่ำสุดผ่านโปรแกรม Matlab ดังแสดงโค้ดโปรแกรมในภาคผนวก ก

3.7 การยืนยันผลและการเปรียบเทียบผลการทดลองการลดการบิดงอและหดตัวของชิ้นงาน

กระบวนการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นการเพิ่มระดับความเชื่อมั่นของผลการทดลองในขั้นตอนต่างๆ โดยหลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อการประมาณค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อระบบด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบเพื่อการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม และการหาค่าตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบหิ่งห้อย จนได้ผลลัพธ์แล้ว จะนำผลลัพธ์ที่ได้ คือค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าผลตอบ Warpage ต่ำที่สุดมาทำการทดลองเพื่อยืนยันผล และเปรียบเทียบผลการทดลองดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 ยืนยันผลการทดลองโดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Moldex3D

วิธีการนี้เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม และจากการหาค่าตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบหิ่งห้อย ที่ทำให้ค่าผลตอบ Warpage ต่ำที่สุดมาทำการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยโปรแกรม Moldex3D แล้วเก็บข้อมูลค่าการบิดงอของชิ้นงาน เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.7.2 ยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองฉีดขึ้นส่วนจริง

วิธีการนี้เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม และจากการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบหึ่งห้อย ที่ทำให้ค่าผลตอบ Warpage ต่ำที่สุดมาทำการทดลองฉีดพลาสติก

3.7.3 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธีการจำลองและการทดลองฉีดขึ้นส่วน

วิธีการนี้จะนำค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 วิธีการ กล่าวคือ วิธีการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบหึ่งห้อย วิธีการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดย Moldex3D และวิธีการทดลองฉีดจริง มาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดลองเพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติในขั้นตอนต่อไป

3.8 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

กระบวนการทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ยของการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกผ่านโปรแกรม Minitab โดยสำหรับงานวิจัยนี้ เราต้องทำการวัดค่าการบิดงอสูงสุดของชิ้นงานจากกระบวนการจำลองการฉีดงานผ่านโปรแกรม Moldex3D และผ่านกระบวนการฉีดจริง ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่เชิงของผลลัพธ์ของการบิดงอของชิ้นงาน โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดสมมติฐานหลัก สมมติฐานรอง และระดับนัยสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

$$\alpha = \text{ทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ } 0.05$$

ดังนั้น μ_1 = ค่าความบิดงอของชิ้นงานพลาสติกที่ได้จากโปรแกรม Moldex3D

μ_2 = ค่าความบิดงอของชิ้นงานพลาสติกที่ได้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA

IS80 ขนาด 80 ตัน

ขั้นตอนที่ 2: ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย Paired samples T

1) Stat -> ANOVA -> One way Analysis

2) เลือกชุดข้อมูลทั้งสองชุดในแต่ละคอลัมน์

3) ใส่ค่าความเชื่อมั่นในช่อง Confidence level: ซึ่งค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ $1-\alpha$

หรือมีค่าเท่ากับ 95% และเลือกประเภทของสมมติฐานรองที่ต้องการทดสอบ แล้วเลือก Ok

4) เลือก Ok เพื่อเริ่มการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 3: ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ P-Value ที่ได้จากการคำนวณ

มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ยอมรับ H_0 และ ปฏิเสธ H_1

มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 : ให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

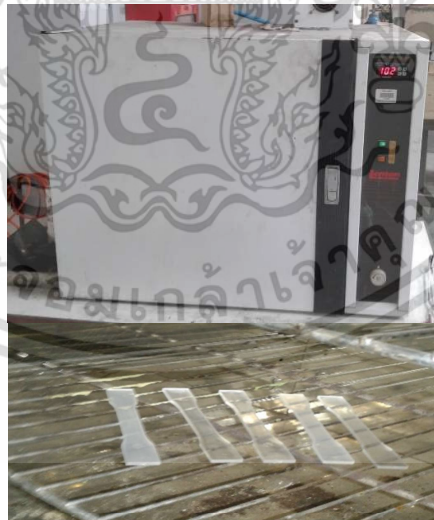
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าวแล้ว จะนำค่าการบิดงอของชิ้นงาน ทั้ง 4 กระบวนการ คือวิธีการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม การหาค่าตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบ หึ่งห้อย วิธีการจำลองด้วย Moldex3D และการทดลองฉีดพลาสติกด้วยแม่พิมพ์จริง มาทำการ เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของข้อมูลด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดย กระบวนการดังกล่าวจะใช้โปรแกรม Minitab ในการประมวลผลและคำนวณหาค่าระดับความเชื่อมั่น ทางสถิติ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการยอมรับ H0 และปฏิเสธ H1 หรือปฏิเสธ H0 และยอมรับ H1 การวิจัยในครั้งนี้

3.9 การนำชิ้นส่วนทดลองเข้าสู่กระบวนการอบอ่อน

3.9.1 ยืนยันผลการทดลองโดยการวัดผลการบิดงอของชิ้นงานจริงที่ไม่ผ่านกระบวนการ อบอ่อนเปรียบเทียบกับผลการบิดงอของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิและเวลาใน การอบอ่อนที่ต่างกัน

หลังจากการพิสูจน์การฉีดชิ้นงานพลาสติกโดยการปรับปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการฉีด เพื่อให้งานเกิดการบิดงอต่ำสุด พบว่าชิ้นงานยังคงเกิดการบิดงออยู่ จึงมีการเพิ่มกระบวนการปรับปรุง หลังการฉีดชิ้นงานพลาสติกเพื่อลดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการบิดงอ ของชิ้นงาน โดยการนำชิ้นงานเข้าเตาอบแบบควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำการอบคายความเค้นตกค้างของ ชิ้นงานดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงตู้อบชิ้นงานและกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

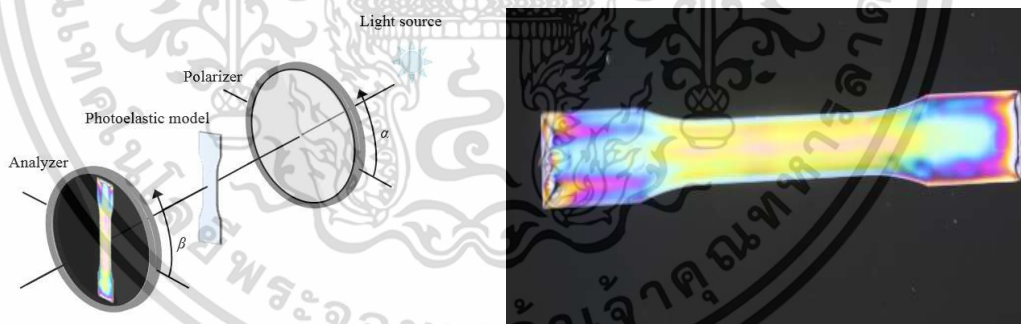
หลังจากกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานที่สภาวะอุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติก (Vicat Softening Point $\leq 87\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำการวางชิ้นงานในอากาศเพื่อระบายความร้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดค่าการบิดงอของชิ้นงานทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงจุดการตรวจวัดของการบิดงอของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติก

3.9.2 ยืนยันผลการทดลองโดยการนำชิ้นงานจริงวัดค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานก่อนกระบวนการอบอ่อนและหลังกระบวนการอบอ่อนผ่านกระบวนการ Photoelasticity

หลังจากทำการตรวจวัดค่าการบิดงอของชิ้นงานเทียบกับแบบจำลองแล้ว ปัจจัยสำคัญอีกประการที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพการเกิดการบิดงอของชิ้นงานคือ ค่าความเค้นตกค้างของชิ้นซึ่งมีค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานน้อยลง เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกล และคุณภาพด้านการลดการบิดงอของชิ้นงานจะดีขึ้นตามลำดับด้วย โดยในกระบวนการตรวจวัดค่าความเค้นตกค้างจะตรวจวัดผ่านกระบวนการ Photoelasticity



รูปที่ 3.9 แสดงหลักการวัดความเค้นตกค้างของชิ้นงานผ่านกระบวนการ Photoelasticity

3.10 การติดตามผลและสรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการทำการวิจัย โดยจะนำบทสรุปของกระบวนการปรับปรุงชิ้นงานเพื่อให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานให้น้อยที่สุด ผ่านกระบวนการออกแบบและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการฉีดขึ้นรูป รวมถึงกระบวนการปรับปรุงชิ้นงานเพื่อลดการบิดงอหลังกระบวนการฉีดโดยการอบอ่อน เพื่อเพิ่มคุณภาพชิ้นงานให้เกิดการบิดงอให้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ผลการทดลองต่างๆ ที่ได้รับจากการดำเนินการตามแผนการทดลองที่กล่าวในบทที่ 3 ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4}

จากการออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น ได้เลือกวิธีการทดลองด้วยแผนการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} (2^{8-4} Fractional Factorial Experiment) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเบื้องต้น ซึ่งวิธีการในการทดลองนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้แล้วตามแผนการทดลองมากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง (Simulation) กระบวนการฉีดขึ้นรูปและวิเคราะห์ผลของการหดตัวและบิดงอของชิ้นงานตัวอย่างด้วยโปรแกรม Moldex3D จากการทดลองจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การโก่งงอเสียรูปของชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4}

Run Order	Factors								Warpage (MM)
	Inj Flow (A)	Inj pres (B)	V/P SW Over (C)	Packting Time (D)	Packting Pres (E)	Melt Temp (F)	Mold Temp (G)	Cooling Time (H)	
1	70	60	98	3	80	210	55	60	0.56
2	20	60	98	3	80	210	70	20	0.84
3	20	60	98	15	60	170	70	60	0.50
4	20	80	98	15	80	170	55	20	0.47
5	20	60	90	3	60	170	55	20	0.70
6	70	60	98	15	60	210	55	20	0.63
7	20	80	98	3	60	210	55	60	0.69
8	70	80	90	15	60	170	55	60	0.45
9	70	80	90	3	80	210	55	20	0.86
10	20	80	90	3	80	170	70	60	0.57
11	70	60	90	3	60	210	70	60	0.70
12	70	80	98	15	80	210	70	60	0.51
13	20	80	90	15	60	210	70	20	0.62
14	70	60	90	15	80	170	70	20	0.38
15	70	80	98	3	60	170	70	20	0.67
16	20	60	90	15	80	210	55	60	0.56

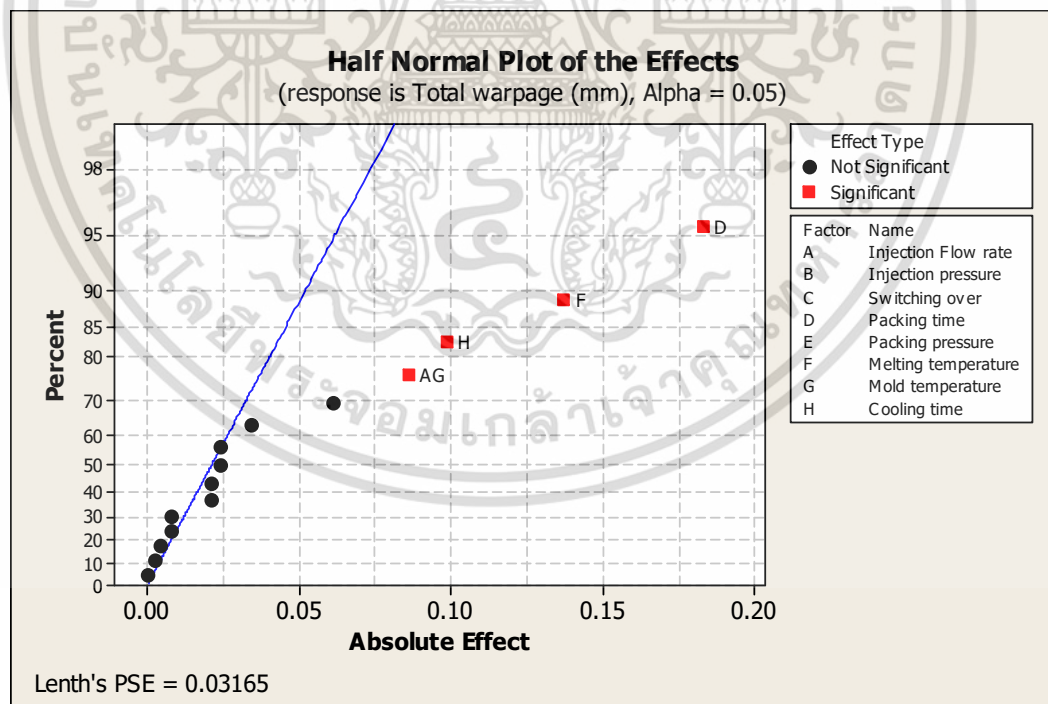
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa
และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

จากตารางการวิเคราะห์การบิดงอและหดตัวของชิ้นงานตามแผนการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} จึงนำผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นมาทำการวิเคราะห์ระดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยใช้โปรแกรม Minitab ในหัวข้อ 3.4

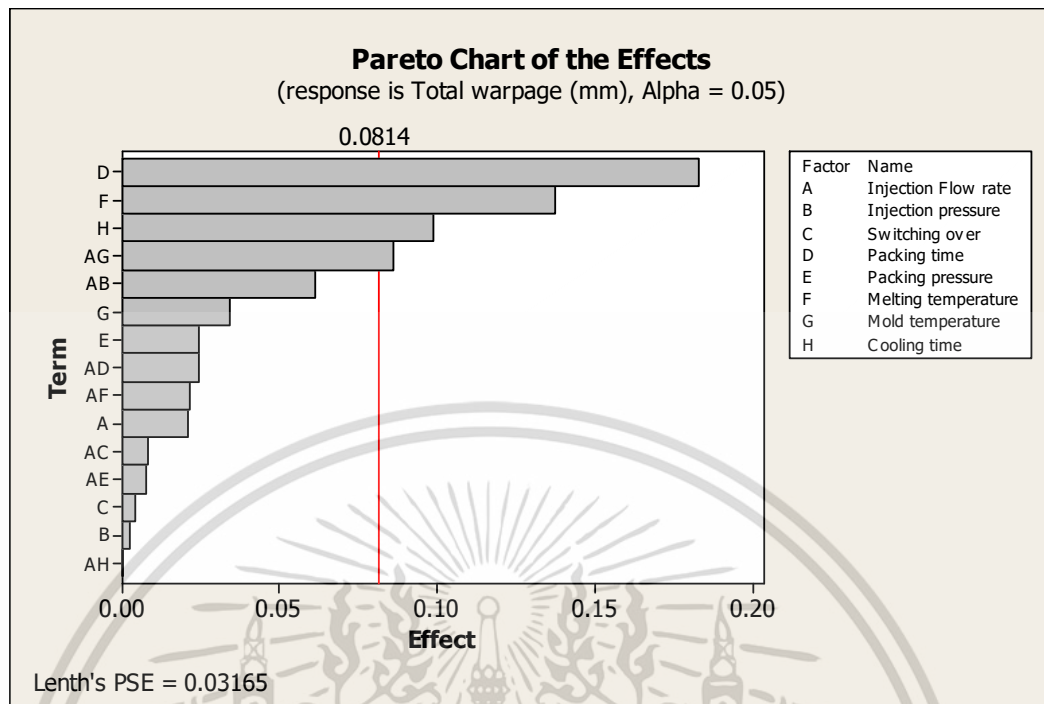
4.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment) ตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{8-4} ด้วย Minitab

จากผลการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นส่วนด้วยโปรแกรม Moldex3D โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองตามแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{8-4} เมื่อนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน ด้วยโปรแกรม Minitab ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.1 - 4.2



รูปที่ 4.1 Half normal plot วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน โดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 Pareto chart วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน โดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น

จากข้อมูล ของ Half normal plot และ Pareto chart เมื่อพิจารณาที่ผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานมีทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ

- 1) เวลาการฉีด (Packing time; D)
- 2) อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melt Temperature; F)
- 3) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time; H)

และถ้าพิจารณาเรื่องผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effects) ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าปัจจัยร่วม คือ อัตราการฉีด (Injection flow rate) ร่วมกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) ทั้งนี้ยังไม่สามารถที่จะบ่งชี้ได้โดยตรงว่าเป็นผลของปัจจัยทั้งหมด (สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในบทที่ 2) ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกับข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) ของแผนการทดลองและข้อมูลใน Interaction Plot ในการวิเคราะห์ผลอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effects)

เนื่องจากแผนการทดลองแฟคทอเรียล (2^{8-4} Fractional factorial) แบบ 16 การทดลอง (16 Run order) ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีลักษณะรูปแบบโครงสร้างซ้ำซ้อน Resolution4 (IV) ซึ่งความหมายว่าอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่สามารถตรวจพบได้จากผลการวิเคราะห์ค่าการบิดงอหรือการหดตัวของชิ้นงาน ในแผนการทดลองนี้จะเป็นอิทธิพลร่วมที่มีโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) แบบ 2 ปัจจัยร่วมคู่กับอีก 2 ปัจจัยร่วม ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วจะถือได้ว่ามีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถตีผลกระทบนี้ออกจากการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) ของแผนการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.3

Fractional Factorial Design			
Factors:	8	Base Designs:	8, 16
Runs:	16	Replicates:	1
Blocks:	1	Center pts (total):	0
		Resolution:	IV
		Fraction:	1/16

Design Generators: E = BCD, F = ACD, G = ABC, H = ABD

Alias Structure (up to order 4)

I + ABCG + ABDH + ABEF + ACDF + ACEH + ADEG + AFGH + BCDE + BCFH + BDFG + BEGH
+ CDGH + CEFG + DEFH

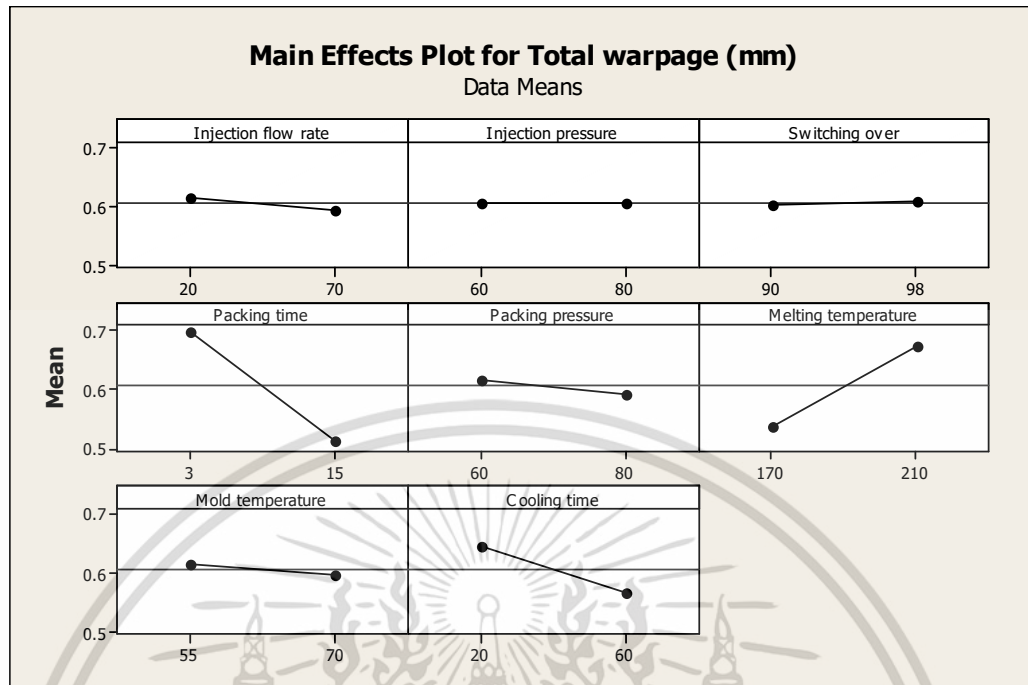
A + BCG + BDH + BEF + CDF + CEH + DEG + FGH
B + ACG + ADH + AEF + CDE + CFH + DFG + EGH
C + ABG + ADE + AEH + BDE + BFH + DGH + EFG
D + ABH + ACF + AEG + BCE + BFG + CGH + EFH
E + ABF + ACH + ADG + BCD + BGH + CFG + DFH
F + ABE + ACD + AGH + BCH + BDG + CEG + DEH
G + ABC + ADE + AFH + BDF + BEH + CDH + CEF
H + ABD + ACE + AFG + BCF + BEG + CDG + DEF

AB + CG + DH + EF + ACDE + ACFH + ADFG + AEGH + BCDF + BCEH + BDEG + BFGH
AC + BG + DF + EH + ABDE + ABFH + ADGH + ACFG + BCDH + BCEF + CDEG + CFGH
AD + BH + CF + EG + ABCE + ABFG + ACGH + AEFH + BCDG + BDEF + CDEH + DFGH
AE + BF + CH + DG + ABCD + ABGH + ACFG + ADFH + BCEG + BDEH + CDEF + EFGH
AF + BE + CD + GH + ABCH + ABDG + ACEG + ADEH + BCFG + BDFH + CEFH + DEFG
AG + BC + DE + FH + ABDF + ABEH + ACDH + ACEF + BDGH + BEFG + CDFG + CEGH
AH + BD + CE + FG + ABCF + ABEG + ACDG + ADEF + BCGH + BEFH + CDFH + DEGH

รูปที่ 4.3 รูปแบบโครงสร้างซ้ำซ้อนของ Main Effects และ Interaction Effects

Main effects plot และ Interaction plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของทั้ง 8 ปัจจัยที่พิจารณาในกระบวนการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานในกระบวนการฉีด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



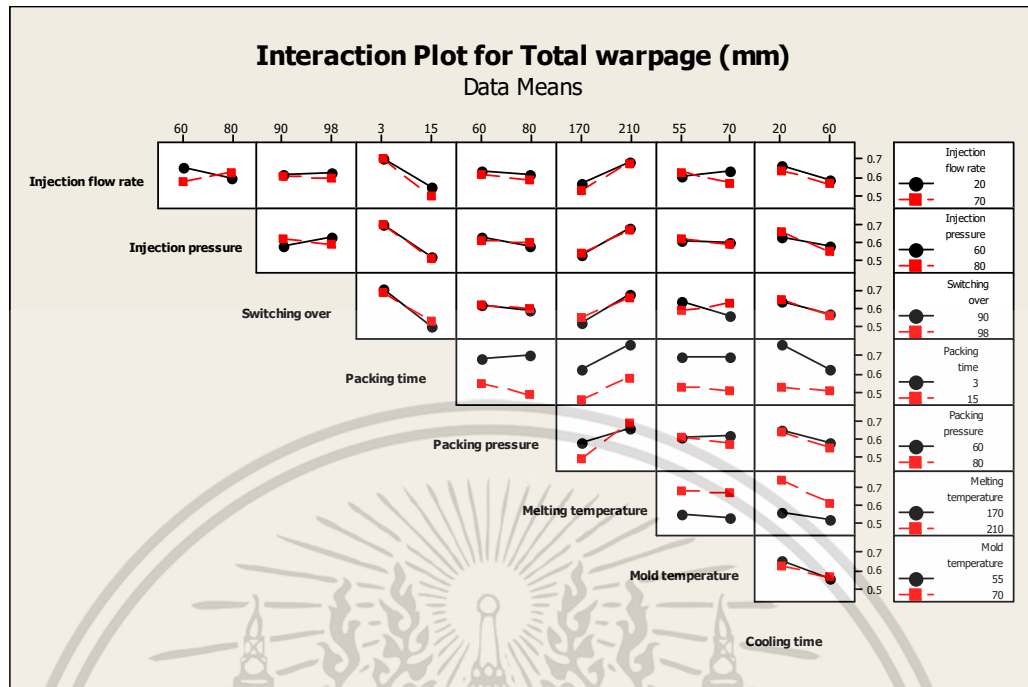
รูปที่ 4.4 Main effects plot วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน

โดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น

จากข้อมูล Main effects plot ในรูปที่ 4.4 จะนำไปใช้เป็นเกณฑ์กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ทั้งปัจจัยที่มีนัยสำคัญและปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อค่า Y (ค่าการบิดงอเสียรูปของชิ้นส่วน) ซึ่งจากรูปการวิเคราะห์ผลกระทบหลักปัจจัยที่มีผลต่อค่าการบิดงอพบว่ามีทั้งหมด 6 ปัจจัย คือ

- 1) อัตราการฉีด (Injection flow rate; A)
- 2) เวลาการฉีดย้ำ (Packing time; D)
- 3) ความดันฉีดย้ำ (Packing pressure; E)
- 4) อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melt Temperature; F)
- 5) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature; G)
- 6) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time; H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 Interaction Plot เพื่อใช้วิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่าการบิดงอของชิ้นงาน โดยโปรแกรม Minitab ตามแผนการทดลองเบื้องต้น

จากข้อมูล Interaction plot ในรูปที่ 4.5 เป็นผลต่อเนื่องจาก Main effect ที่ต้องพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกโดยที่ค่าการพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมเบื้องต้น ตัวอย่างเช่น Interaction plot ประกอบด้วย Packing time กับ Packing pressure, Packing time กับ Cooling time, Melting temperature กับ Cooling time, Injection flow rate กับ Mold temperature เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับ Injection pressure และ V/P Switching over มีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น Injection flow rate กับ Injection pressure หรือ Injection pressure กับ V/P Switching over แต่ผลการวิเคราะห์ Main effect ในรูปที่ 4.4 พบว่าผลกระทบหลักของ Injection pressure และ V/P Switching over ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าการบิดงอของชิ้นงานจึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นจึงใช้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งหมดเป็นเกณฑ์กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ทั้งปัจจัยที่มีนัยสำคัญและปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อค่า Y (ค่าการบิดงอเสียรูปของชิ้นส่วน) เพื่อใช้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญและปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญที่มีผลต่อการบิดงอของชิ้นงาน
จากกระบวนการ Screening factors

รายละเอียด	ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการบิดงอ						ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการบิดงอ	
	Injection flow rate	Packing time	Packing pressure	Melt Temperature	Mold Temperature	Cooling time	Injection pressure	V/P Swichting over
สัญลักษณ์	A	D	E	F	G	H	B	C
ค่าปัจจัยที่ทำให้การบิดงอต่ำจาก Main Effects และ Interaction Effects	70%	15 Sec	80%	170 °C	70 °C	60 Sec	80%	90%

4.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

จากการศึกษาผลการทดลองเบื้องต้น สามารถคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบิดงอจะมีปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 6 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ ในกระบวนการนี้จึงมีการนำทั้ง 6 ปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ระดับอิทธิพลอย่างละเอียด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากผลการทดลองเบื้องต้น ด้วยแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง เนื่องจากผลการวิเคราะห์เบื้องต้น มีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์ลักษณะกำลังสอง (Second order) ได้ดีที่สุด และนอกจากนี้แผนการทดลองดังกล่าว จะไม่ทำการทดลองทุกจุด (Corner point) เหมือนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล จึงทำให้สะดวกในการทำการทดลองรวมถึงประหยัดต้นทุนและเวลาในการทดลอง แต่ยังสามารถวิเคราะห์ผลของอิทธิพลของปัจจัยอย่างละเอียดได้ สามารถกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง แบบ Face centered (CCF) (ศึกษาเพิ่มเติมได้ในบทที่ 2) ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย					หน่วย
		$-\alpha$	-1	0	1	α	
อัตราการฉีด (Injection flow rate)	A	20	20	45	70	70	%
เวลาการฉีดอัด (Packing Time)	D	3	3	9	15	15	Sec
ความดันฉีดอัด (Packing pressure)	E	60	60	70	80	80	%
อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melt Temp)	F	170	170	190	210	210	°C
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature)	G	55	55	62.5	70	70	°C
เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)	H	20	20	40	60	60	Sec

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดอัด 100% เท่ากับ 199MPa

และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

กำหนดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ Injection pressure เท่ากับ 80% และ V/P Switching over เท่ากับ 90%

เมื่อกำหนดให้

จุด $-\alpha$ และ α คือ การทดลองที่จุดในแนวแกน (Axial point) ของการออกแบบการทดลอง

จุด -1 และ 1 คือ การออกแบบ 2^k แฟกทอเรียล

จุด 0 คือ การทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center point) ของการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบแผนการทดสอบแบบส่วนผสมกลาง เนื่องจากมีปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้งหมด 6 ปัจจัย และวิธีออกแบบการทดลองตามแผนการทดลองนี้ต้องเพิ่มการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Central composite) ดังนั้น แผนการทดลองจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 53 การทดลอง (53 Run order) ดังแสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order

Run Order	ระดับปัจจัย					
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดันฉีด (Packing pressure, E)	อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature, G)	เวลาหล่อเย็น (Cooling time, H)
1	0	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1
4	-1	1	-1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	-1	1	-1
6	-1	1	1	1	-1	1
7	-1	1	-1	1	1	1
8	-1	1	-1	1	-1	-1
9	-1	1	1	-1	1	1
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0
12	-1	1	-1	-1	1	-1
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	-1	-1	-1	1	1	-1
16	1	-1	1	1	1	-1
17	0	0	0	0	0	0
18	-1	-1	1	1	1	1
19	0	0	0	0	1	0
20	1	-1	-1	1	1	1
21	0	0	0	1	0	0
22	1	1	1	-1	-1	1
23	-1	-1	1	1	-1	-1
24	1	1	-1	-1	1	1
25	1	1	-1	-1	-1	-1
26	0	0	0	0	0	0
27	-1	-1	-1	-1	1	1
28	1	-1	-1	-1	-1	1
29	1	-1	1	1	-1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order

Run Order	ระดับปัจจัย					
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดันฉีด (Packing pressure, E)	อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature, G)	เวลาหล่อเย็น (Cooling time, H)
30	1	-1	-1	-1	1	-1
31	1	1	1	-1	1	-1
32	0	0	0	0	0	0
33	1	1	-1	1	-1	1
34	1	-1	1	-1	-1	-1
35	-1	-1	1	-1	-1	1
36	0	0	0	-1	0	0
37	0	0	0	0	0	-1
38	-1	1	1	1	1	-1
39	1	1	1	1	-1	-1
40	0	0	0	0	0	0
41	-1	0	0	0	0	0
42	1	1	-1	1	1	-1
43	-1	1	1	-1	-1	-1
44	0	0	0	0	0	0
45	-1	-1	-1	1	-1	1
46	0	0	-1	0	0	0
47	1	1	1	1	1	1
48	0	0	0	0	-1	0
49	-1	-1	-1	-1	-1	-1
50	1	-1	-1	1	-1	-1
51	0	0	0	0	0	0
52	1	-1	1	-1	1	1
53	0	-1	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order

Run Order	ระดับปัจจัย						Warpage (mm)
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดันฉีด (Packing pressure, E)	อุณหภูมิหลอมพลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature, G)	เวลาหล่อเย็น (Cooling time, H)	
1	45	15	70	190	62.5	40	
2	70	9	70	190	62.5	40	
3	45	9	70	190	62.5	60	
4	20	15	60	170	55.0	60	
5	20	3	80	170	70.0	20	
6	20	15	80	210	55.0	60	
7	20	15	60	210	70.0	60	
8	20	15	60	210	55.0	20	
9	20	15	80	170	70.0	60	
10	45	9	70	190	62.5	40	
11	45	9	80	190	62.5	40	
12	20	15	60	170	70.0	20	
13	45	9	70	190	62.5	40	
14	45	9	70	190	62.5	40	
15	20	3	60	210	70.0	20	
16	70	3	80	210	70.0	20	
17	45	9	70	190	62.5	40	
18	20	3	80	210	70.0	60	
19	45	9	70	190	70.0	40	
20	70	3	60	210	70.0	60	
21	45	9	70	210	62.5	40	
22	70	15	80	170	55.0	60	
23	20	3	80	210	55.0	20	
24	70	15	60	170	70.0	60	
25	70	15	60	170	55.0	20	
26	45	9	70	190	62.5	40	
27	20	3	60	170	70.0	60	
28	70	3	60	170	55.0	60	
29	70	3	80	210	55.0	60	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) แผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order

Run Order	ระดับปัจจัย						Warpage (mm)
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดันฉีด (Packing pressure, E)	อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature, G)	เวลาหล่อเย็น (Cooling time, H)	
30	70	3	60	170	70.0	20	
31	70	15	80	170	70.0	20	
32	45	9	70	190	62.5	40	
33	70	15	60	210	55.0	60	
34	70	3	80	170	55.0	20	
35	20	3	80	170	55.0	60	
36	45	9	70	170	62.5	40	
37	45	9	70	190	62.5	20	
38	20	15	80	210	70.0	20	
39	70	15	80	210	55.0	20	
40	45	9	70	190	62.5	40	
41	20	9	70	190	62.5	40	
42	70	15	60	210	70.0	20	
43	20	15	80	170	55.0	20	
44	45	9	70	190	62.5	40	
45	20	3	60	210	55.0	60	
46	45	9	60	190	62.5	40	
47	70	15	80	210	70.0	60	
48	45	9	70	190	55.0	40	
49	20	3	60	170	55.0	20	
50	70	3	60	210	55.0	20	
51	45	9	70	190	62.5	40	
52	70	3	80	170	70.0	60	
53	45	3	70	190	62.5	40	

จากแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง 53 Run order เมื่อนำเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ไปทำการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกและวิเคราะห์ค่าการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Moldex3D อีกครั้ง แล้วทำการบันทึกข้อมูลค่าการบิดงอและหดตัวดังผลการทดลองที่แสดงในตาราง 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยโปรแกรม

Moldex3D ตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

Run Order	ระดับปัจจัย						Warpage (mm)
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดัน ฉีด (Packing pressure , E)	อุณหภูมิ หลอมเหลว พลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature , G)	เวลาหล่อ เย็น (Cooling time, H)	
1	45	15	70	190	62.5	40	0.4849
2	70	9	70	190	62.5	40	0.4739
3	45	9	70	190	62.5	60	0.4868
4	20	15	60	170	55.0	60	0.4998
5	20	3	80	170	70.0	20	0.6575
6	20	15	80	210	55.0	60	0.5606
7	20	15	60	210	70.0	60	0.5655
8	20	15	60	210	55.0	20	0.6186
9	20	15	80	170	70.0	60	0.4385
10	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
11	45	9	80	190	62.5	40	0.4675
12	20	15	60	170	70.0	20	0.5437
13	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
14	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
15	20	3	60	210	70.0	20	0.8354
16	70	3	80	210	70.0	20	0.8631
17	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
18	20	3	80	210	70.0	60	0.6835
19	45	9	70	190	70.0	40	0.5040
20	70	3	60	210	70.0	60	0.6969
21	45	9	70	210	62.5	40	0.5850
22	70	15	80	170	55.0	60	0.4337
23	20	3	80	210	55.0	20	0.8371
24	70	15	60	170	70.0	60	0.4524
25	70	15	60	170	55.0	20	0.4959
26	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
27	20	3	60	170	70.0	60	0.5918
28	70	3	60	170	55.0	60	0.5721

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

Run Order	ระดับปัจจัย						Warpage (mm)
	อัตราการฉีด (Injection flow rate, A)	เวลาในการฉีด (Packing time, D)	ความดันฉีด (Packing pressure, E)	อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melting Temp, F)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature, G)	เวลาหล่อเย็น (Cooling time, H)	
29	70	3	80	210	55.0	60	0.6997
30	70	3	60	170	70.0	20	0.6844
31	70	15	80	170	70.0	20	0.4782
32	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
33	70	15	60	210	55.0	60	0.5774
34	70	3	80	170	55.0	20	0.6481
35	20	3	80	170	55.0	60	0.5715
36	45	9	70	170	62.5	40	0.4608
37	45	9	70	190	62.5	20	0.5508
38	20	15	80	210	70.0	20	0.6164
39	70	15	80	210	55.0	20	0.5691
40	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
41	20	9	70	190	62.5	40	0.5259
42	70	15	60	210	70.0	20	0.6287
43	20	15	80	170	55.0	20	0.4806
44	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
45	20	3	60	210	55.0	60	0.6820
46	45	9	60	190	62.5	40	0.5361
47	70	15	80	210	70.0	60	0.5207
48	45	9	70	190	55.0	40	0.5037
49	20	3	60	170	55.0	20	0.6988
50	70	3	60	210	55.0	20	0.8640
51	45	9	70	190	62.5	40	0.5036
52	70	3	80	170	70.0	60	0.5601
53	45	3	70	190	62.5	40	0.6591

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดอัด 100% เท่ากับ 199MPa

และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

กำหนดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ Injection pressure เท่ากับ 80% และ V/P Switching over เท่ากับ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology)

จากข้อมูลผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ชนิด Face centered (FCC) ในตารางที่ 4.6 เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) และวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ต่ำที่สุดที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ผลลัพธ์ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการพื้นผิวผลตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการบิดงอของชิ้นงาน

Source	Df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	16	0.668949	0.041809	220.39	< 0.001
Linear	6	0.513717	0.085619	451.32	< 0.001
A	1	0.004446	0.004446	23.44	< 0.001
D	1	0.271883	0.271883	1433.15	< 0.001
E	1	0.012719	0.012719	67.04	< 0.001
F	1	0.160469	0.160469	845.87	< 0.001
G	1	0.000002	0.000002	0.01	0.920
H	1	0.064197	0.064197	338.40	< 0.001
Square	2	0.120453	0.060226	317.47	< 0.001
D*D	1	0.021157	0.021157	111.52	< 0.001
H*H	1	0.002639	0.002639	13.91	< 0.001
2-Way Interaction	8	0.034779	0.004347	22.92	< 0.001
A*D	1	0.004960	0.004960	26.15	< 0.001
A*E	1	0.001368	0.001368	7.21	0.011
A*F	1	0.004460	0.004460	23.51	< 0.001
A*G	1	0.000053	0.000053	0.28	0.0400
D*E	1	0.004498	0.004498	23.71	< 0.001
D*H	1	0.013130	0.013130	69.21	< 0.001
E*F	1	0.003881	0.003881	20.46	< 0.001
F*H	1	0.002429	0.002429	12.80	0.001

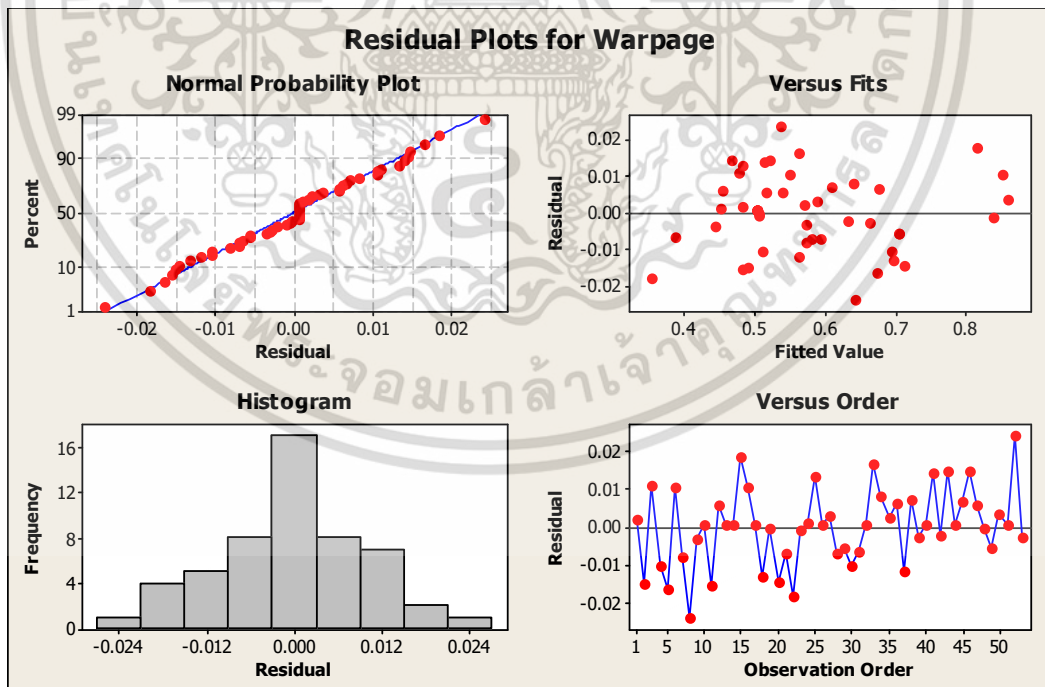
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการพื้นผิวผลตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการบิดงอของชิ้นงาน

Error	36	0.006830	0.000190
Lack-of-Fit	28	0.006830	0.000244
Pure Error	8	0	0
Total	52	0.675779	

หมายเหตุ : $S = 0.0137735$, $R\text{-Sq} = 98.99\%$, $R\text{-Sq (adjust)} = 98.54\%$,
 $R\text{-Sq (prediction)} = 97.02\%$.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.7 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนของข้อมูล หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกระบวนการเกิดการบิดงอของชิ้นงานแล้วนำปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ชนิด Face centered (FCC) ค้นพบว่าความสัมพันธ์ของทั้ง 6 ปัจจัยมีความสัมพันธ์ในเชิงพื้นผิวตอบสนองต่อการเกิดการบิดงอของชิ้นงานดังแสดงให้เห็นในค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ที่บ่งบอกถึงว่ามีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัย ทั้งความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง ผลต่างกำลังสอง และความสัมพันธ์ในเชิงที่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน



รูปที่ 4.6 Residual plots ของค่าผลตอบการบิดงอที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

1) ข้อมูลจากกราฟ Normal probability plot ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

2) ข้อมูลจากแผนภูมิ Histogram ที่สามารถลากเส้นโค้งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ Normal curve แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

3) ข้อมูลจากกราฟ Versus fitted value ซึ่งมีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่แน่นอนและกระจายตัวกระจายแสดงว่าข้อมูลเป็นแบบสุ่มและแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่าๆ กัน

4) ข้อมูลจากกราฟ Versus order ที่มีลักษณะการกระจายทั้งด้านบนและด้านล่างที่เท่าๆ กัน และไม่อยู่ในด้านใดด้านหนึ่ง แสดงว่าข้อมูลแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน

ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลและตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลการทดลองผ่านการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 ในรูปที่ 4.6 สมเหตุสมผลและเป็นการยืนยันว่าข้อมูลการออกแบบการทดลองและผลลัพธ์การบิดงอของชิ้นงานเชื่อถือได้

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Warpage	Minimum	0	0	0.9	1	1
Global Solution						
Injection Fl	=		70			
Packing time	=	12.6969				
Packing pres	=		80			
Melting temp	=		170			
Mold tempera	=		55			
Cooling time	=		60			
Predicted Responses						
Warpage	=	0.336789,	desirability =	0.625790		
Composite Desirability = 0.625790						

รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimal D 0.62579	High Cur Low	Injectio 70.0 [70.0] 20.0	Packing 15.0 [12.6969] 3.0	Packing 80.0 [80.0] 60.0	Melting 210.0 [170.0] 170.0	Mold tem 70.0 [55.0] 55.0	Cooling 60.0 [60.0] 20.0
Composite Desirability 0.62579							
Warpage Minimum $y = 0.3368$ $d = 0.62579$							

รูปที่ 4.8 ผลคำตอบที่เหมาะสมของค่าการบิดงอ (y) ที่ต่ำที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$)

โดยจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เป็นการวิเคราะห์ผลโดยการหาผลตอบที่เหมาะสมจาก Response optimization ซึ่งสรุปได้ว่าค่าการบิดงอที่ต่ำที่สุด (y) เท่ากับ 0.3368 mm โดยที่ค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทั้ง 6 ปัจจัยคือ

- 1) อัตราการฉีด (Injection flow rate; A) เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์
- 2) เวลาการฉีดเข้า (Packing time; D) เท่ากับ 12.7 วินาที
- 3) ความดันฉีดเข้า (Packing pressure; E) เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์
- 4) อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก (Melt Temperature; F) เท่ากับ 170 องศา
- 5) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature; G) เท่ากับ 55 องศา
- 6) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time; H) เท่ากับ 60 นาที

และปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการบิดงอ 2 ปัจจัย คือ

- 1) ความดันฉีด (Injection pressure; B) เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์
- 2) ระยะเวลาเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเต็มเป็นฉีดเข้า (V/P switching over; C) เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

และจากการวิเคราะห์ ANOVA สามารถทำให้สรุปหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second order หรือ Quadratic model) ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์ของทั้ง 6 ปัจจัยในพจน์เส้นตรง พจน์ยกกำลังสอง และพจน์ของปัจจัยร่วม ที่ได้จากการวิเคราะห์ ANOVA

Term	Coefficient
Constant	3.42463
A	-0.00279545
D	-0.0420422
E	-0.00944081
F	-0.0260773
G	-2.77235E-04
H	0.000446572
D*D	0.00210853
H*H	6.70173E-05
A*D	-8.30000E-05
A*E	-2.61500E-05
A*F	2.36125E-05
A*G	6.86667E-06
D*E	-1.97604E-04
D*H	0.000168802
E*F	5.50625E-05
F*H	-2.17813E-05

4.5 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการพันผิวผลตอบสนอง และการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เหมาะสมโดยหลักการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย (Firefly algorithm method)

หลังจากกระบวนการวิเคราะห์ปัจจัยโดรนใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นที่ผิวตอบสนอง กระบวนการต่อมาคือการนำผลการจำลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดโดยหลักการทำงานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย จากเนื้อหาในบทที่ 2 ซึ่งจะได้สมการแบบจำลองการคำนวณการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานพลาสติกได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Minimize. } f(X) = y \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Find} \quad & X = [D, F, H] \\ \text{Subject to:} \quad & 20 \leq A \leq 70 \%, \\ & 3 \leq D \leq 15 \text{ s}, \\ & 60 \leq E \leq 80 \%, \\ & 170 \leq F \leq 210 \text{ }^\circ\text{C}, \\ & 55 \leq G \leq 70 \text{ }^\circ\text{C}, \\ & 20 \leq H \leq 60 \text{ s}. \end{aligned}$$

จากการทดลองด้วยแผนการทดลองที่ละเอียดขึ้น คือ วิธีการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง เพื่อทำการทดลองในขั้นตอนนี้ซึ่งแผนการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีความเหมาะสม สำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second order or Quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ (3.1) โดยนำค่าจากตารางที่ 4.8 สรุปผลลัพธ์ในการคำนวณ สมการการบิดงอและหดตัวของชิ้นงานได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\begin{aligned} \text{Warpage (y)} = & 3.42463 - 0.00279545 * A - 0.0420422 * D - 0.00944081 * E \\ & - 0.0260773 * F - 0.000277235 * G + 0.000446572 * H \\ & + 0.00210853 * D^2 + 0.0000670173 * F^2 - 0.000083 * A * D \\ & - 0.00002615 * A * E + 0.0000236125 * A * F + 0.00000686667 * A * G \\ & - 0.000197604 * D * E + 0.000168802 * D * H + 0.0000550625 * E * F \\ & - 0.0000217813 * F * H \end{aligned} \quad (4.2)$$

จากการได้สมการการทำนายการเกิดการบิดงอที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยในการปรับตั้ง กระบวนการฉีดทั้ง 6 ปัจจัย จึงทำการทดสอบสมการโดยการสุ่มค่าการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติกทั้ง 6 ปัจจัยโดยทำการทดลอง 8 ชุดค่าปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าการบิดงอระหว่างค่าการบิดงอที่ได้จากสมการและค่าการบิดงอที่ได้จากโปรแกรม Moldex3D

No.	A (%)	D (sec)	E (%)	F (°C)	G (°C)	H (sec)	Moldex3D simulation	predicted models	% model deviation based on Moldex3D
							y (mm)	y (mm)	y (%)
1	30	5	80	195	56	28	0.6524	0.64734	0.78
2	55	10	66	201	62	55	0.5154	0.50758	1.52
3	66	11	65	185	60	38	0.4875	0.47018	3.55
4	30	13	68	180	65	25	0.5204	0.49048	5.75
5	35	4	75	208	68	28	0.7523	0.75303	-0.10
6	53	12	72	199	69	40	0.5006	0.50658	-1.19
7	44	6	61	205	61	33	0.6682	0.65939	1.32
8	45	9	58	188	58	28	0.5585	0.54718	2.03

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa

และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

กำหนดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ Injection pressure เท่ากับ 80% และ V/P Swichting over เท่ากับ 90%

จากตาราง 4.9 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนของสมการการบิดงอเมื่อเทียบผลการบิดงอจากสมการที่ได้จากโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second order or Quadratic model) และผลที่ได้จากการจำลองการฉีดพลาสติกผ่านโปรแกรม Moldex3D พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์อยู่ที่ 0.10 ถึง 5.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ทำให้สรุปได้ว่าสมการการบิดงอที่ได้จากโพลีโนเมียลดีกรี 2 สามารถนำไปเป็นสมการเป้าหมายในการเข้ากระบวนการค่าปัจจัยในกระบวนการปรับตั้งเครื่องฉีดเพื่อให้ได้ค่าการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm optimization) ตามกระบวนการในหัวข้อที่ 3.6.2 ผลลัพธ์ของค่าการบิดงอและค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการหาค่าตอบแบบหิ่งห้อยเปรียบเทียบกับค่าการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักรและค่าที่ได้จากวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนตัวอย่างโดยโปรแกรม Moldex3D เปรียบเทียบระหว่างค่ากลางการปรับตั้งเครื่องจักรและวิธี FA

Method	A (%)	D (sec)	E (%)	F (°C)	G (°C)	H (sec)	Warpage [mm]
A	45	9	70	190	62.5	40	0.50
B	70	12.7	80	170	55	60	0.39
C	70	12.6	80	170	65	60	0.33

หมายเหตุ จากพารามิเตอร์ความดันฉีดและความดันฉีดย้ำ 100% เท่ากับ 199MPa

และกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิหล่อเย็นเท่ากับ 55 °C

กำหนดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ Injection pressure เท่ากับ 80% และ V/P Switching over เท่ากับ 90%

A = วิธีการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร

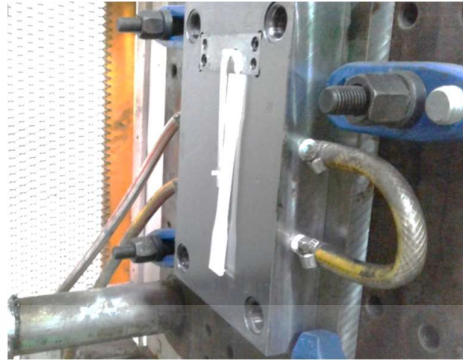
B = วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง

C = วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย

จากตารางที่ 4.10 จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปรับตั้งในกระบวนการฉีดจนได้ผลลัพธ์ของการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกของทั้ง 3 วิธี การหาค่าตอบที่เหมาะสมโดยค่าการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method) จะได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดี ในขณะที่วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย จะค่อนข้างแตกต่างกันเล็กน้อย โดยจากผลลัพธ์ในตารางที่ 4.9 บ่งชี้ว่าการเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย (FA) ซึ่งเป็นวิธีแบบประมาณการได้ผลที่ดีแม้จะเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าตอบแบบการทดลองรูปแบบ RSM ซึ่งเป็นวิธีแบบการทดลองแบบแม่นยำตรง (Exact method) และนอกจากนี้ข้อดีของการเลือกใช้วิธี FA คือสามารถที่จะปรับปัจจัยต่างๆ และหาค่าที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว และไม่ต้องทำการทดลองซ้ำในขอบเขตที่กำหนดในวิธี ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนและเวลาในการหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการฉีด

4.6 ผลการวิเคราะห์การฉีดชิ้นงานพลาสติกจริงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การเกิดการบิดงอของชิ้นงานผ่านการจำลองโดยโปรแกรม Moldex3D

หลังจากทำการหาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดที่เหมาะสมโดยการจำลองการฉีดผ่าน Moldex3D จึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการปรับตั้งที่เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) รุ่น Toshiba IS80 ดังแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการฉีดขึ้นงานจริง

หลังจากทำการฉีดขึ้นงานพลาสติกจะเข้าสู่กระบวนการตรวจวัดการบิดงอของชิ้นงานเพื่อพิสูจน์ผลของการทดลองจริงเทียบกับผลการจากจำลองในโปรแกรม Moldex3D ดังแสดงจุดวัดการบิดงอในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 - 4.13



รูปที่ 4.10 แสดงจุดการวัดความหนาของชิ้นงานเทียบกับระนาบการวัด XYZ

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากค่าการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method)

No.	Dimension Measurement (mm)				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	3.5	3.56	3.25	3.56	3.7
2	3.55	3.57	3.22	3.55	3.68
3	3.6	3.59	3.29	3.58	3.72
4	3.61	3.42	3.31	3.56	3.75
5	3.64	3.49	3.22	3.55	3.7
6	3.62	3.53	3.24	3.6	3.71
7	3.68	3.56	3.25	3.61	3.75
8	3.62	3.57	3.27	3.61	3.72
9	3.61	3.55	3.24	3.65	3.68
10	3.63	3.53	3.23	3.62	3.75
11	3.66	3.53	3.23	3.63	3.71
12	3.64	3.56	3.23	3.63	3.68
13	3.65	3.58	3.24	3.63	3.74
14	3.65	3.59	3.22	3.62	3.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากค่าการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method)

No.	Dimension Measurement (mm)				
	P1	P2	P3	P4	P5
15	3.62	3.58	3.24	3.65	3.71
16	3.69	3.57	3.28	3.64	3.72
17	3.63	3.57	3.22	3.59	3.71
18	3.61	3.59	3.25	3.59	3.76
19	3.66	3.57	3.26	3.61	3.74
20	3.62	3.57	3.25	3.6	3.74
ค่าเฉลี่ย	3.62	3.55	3.25	3.60	3.72

ตารางที่ 4.12 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Response optimization

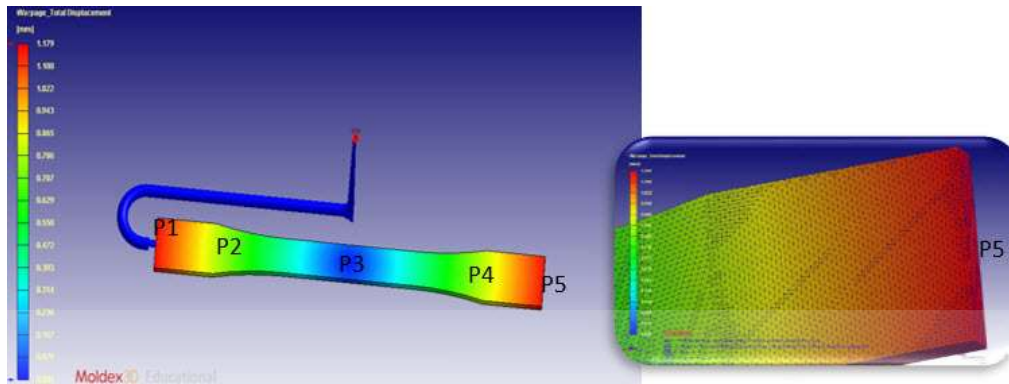
No.	Dimension Measurement (mm)				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	3.48	3.36	3.21	3.37	3.61
2	3.54	3.47	3.2	3.42	3.61
3	3.57	3.38	3.2	3.44	3.66
4	3.49	3.31	3.22	3.45	3.61
5	3.45	3.29	3.21	3.38	3.54
6	3.51	3.32	3.2	3.32	3.52
7	3.59	3.47	3.23	3.47	3.6
8	3.53	3.48	3.21	3.45	3.67
9	3.54	3.44	3.23	3.42	3.61
10	3.55	3.42	3.2	3.41	3.68
11	3.58	3.44	3.22	3.44	3.65
12	3.53	3.48	3.22	3.45	3.67
13	3.54	3.48	3.23	3.46	3.63
14	3.52	3.43	3.21	3.48	3.56
15	3.52	3.42	3.23	3.45	3.65
16	3.51	3.41	3.25	3.44	3.63
17	3.52	3.48	3.22	3.45	3.68
18	3.49	3.41	3.25	3.42	3.61
19	3.55	3.41	3.27	3.46	3.65
20	3.53	3.46	3.21	3.47	3.61
ค่าเฉลี่ย	3.53	3.42	3.22	3.43	3.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ผลการตรวจวัดความหนาของแต่ละจุดทดสอบของชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ได้จากวิธีการ
หาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย

No.	Dimension Measurement (mm)				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	3.49	3.37	3.2	3.36	3.53
2	3.53	3.48	3.21	3.43	3.61
3	3.56	3.37	3.19	3.34	3.72
4	3.51	3.32	3.21	3.46	3.58
5	3.44	3.29	3.22	3.35	3.44
6	3.52	3.33	3.21	3.34	3.51
7	3.58	3.46	3.25	3.51	3.7
8	3.52	3.47	3.22	3.46	3.57
9	3.52	3.45	3.24	3.43	3.54
10	3.53	3.43	3.21	3.42	3.65
11	3.59	3.43	3.23	3.46	3.61
12	3.54	3.47	3.21	3.43	3.58
13	3.55	3.47	3.22	3.46	3.54
14	3.5	3.44	3.22	3.47	3.54
15	3.52	3.43	3.24	3.44	3.55
16	3.49	3.42	3.28	3.44	3.5
17	3.53	3.47	3.22	3.47	3.71
18	3.51	3.4	3.25	3.41	3.61
19	3.56	3.4	3.26	3.47	3.54
20	3.52	3.47	3.22	3.48	3.56
ค่าเฉลี่ย	3.53	3.42	3.23	3.43	3.58

โดยค่าที่วัดได้จะวัดรวมความหนาของชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร และจาก
ตารางที่ 4.11 และ 4.13 จะพบว่าบริเวณจุดตรวจสอบที่ P5 เป็นจุดที่ชิ้นงานมีความบิดงอมากที่สุด
ซึ่งสอดคล้องกับจุดตรวจสอบการบิดงอของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองการฉีดพลาสติกผ่านโปรแกรม
Moldex 3D ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงผลการเกิดการบิดงอของชิ้นงานผ่านโปรแกรม Moldex3D ซึ่งพบว่าที่ปลายของชิ้นงานทดสอบมีการบิดงอมากที่สุด

จากรูปที่ 4.11 จุดตรวจวัดที่มีการบิดงอมากที่สุดจะพบว่าอยู่ที่ปลายของชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นจึงสรุปว่า ที่จุด P5 เป็นจุดที่บ่งบอกถึงการบิดงอของชิ้นงานที่มากที่สุด ดังนั้นจึงนำผลของการตรวจวัดจริงทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม Moldex3D โดยทำการทดสอบทั้งค่าการบิดงอที่ได้จากกระบวนการปรับตั้งค่าตามการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Response optimization และค่าการบิดงอที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm optimization) โดยนำค่าทดสอบที่ลบจากค่าความหนาของชิ้นงาน 3.2 มิลลิเมตร

ตั้งสมมติฐานวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของข้อมูลโดยมีการตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 = \text{มีอย่างน้อยหนึ่งข้อมูลที่ไม่เท่ากับข้อมูลอื่น}$$

โดยกำหนดให้

μ_1 = ค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากกระบวนการปรับตั้งค่าตามการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method) ผ่านโปรแกรม Moldex3D

μ_2 = ค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากกระบวนการปรับตั้งค่าตามการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร (Recommended condition method) ผ่านกระบวนการฉีดจริง โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 ขนาด 80 ตัน

One-way ANOVA: Total warpage (Moldex3d result), Total Warpage From Actual test

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.000381	0.000381	0.62	0.439
Error	19	0.011600	0.000611		
Total	20	0.011981			

S = 0.02471 R-Sq = 3.18% R-Sq(adj) = 0.00%

Level	N	Mean	StDev
Empericle warpage test	20	3.7200	0.0247
Moldex Simulation Warpag	1	3.7000	*

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	Lower CI	Upper CI
Empericle warpage test	(---*---)	
Moldex Simulation Warpag	(-----*-----)	

3.660 3.690 3.720 3.750

Pooled StDev = 0.0247

รูปที่ 4.12 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงอจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามการแนะนำของการปรับตั้งเครื่องจักร

จากรูปที่ 4.12 หลังพิจารณาว่าความแตกต่างของค่าการบิดงอโดยดูจากค่า P-Value ที่ได้เท่ากับ 0.439 ซึ่งมากกว่า 0.05 ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง (ข้อมูลไม่แตกต่างกัน)

และส่วนที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Response optimization ทำการตั้งสมมติฐานวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของข้อมูลโดยมีการตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 = \text{มีอย่างน้อยหนึ่งข้อมูลที่ไม่เท่ากับข้อมูลอื่น}$$

โดยกำหนดให้

$$\mu_1 = \text{ค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ}$$

Response optimization ผ่านโปรแกรม Moldex3D

$$\mu_2 = \text{ค่าการบิดงอของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ}$$

Response optimization ผ่านกระบวนการฉีดจริงโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 ขนาด 80 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

One-way ANOVA: Total warpage(mm) From empirical compared between Moldex result, Measurement(P5) results

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0.00101	0.00101	0.51	0.484
Error	19	0.03757	0.00198		
Total	20	0.03858			

S = 0.04447 R-Sq = 2.61% R-Sq(adj) = 0.00%

Level	N	Mean	StDev
Empericle warpage test	20	3.6225	0.0445
Moldex Simulation Warpag	1	3.5900	*

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	Lower CI	Upper CI
Empericle warpage test	(-----)	(-----)
Moldex Simulation Warpag	(-----)	(-----)

3.500 3.550 3.600 3.650

Pooled StDev = 0.0445

รูปที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Response optimization

จากรูปที่ 4.13 หลังพิจารณาว่าความแตกต่างของค่าการบิดงโดยดูจากค่า P-Value ที่ได้เท่ากับ 0.484 ซึ่งมากกว่า 0.05 ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง (ข้อมูลไม่แตกต่างกัน)

และส่วนที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยทำการตั้งสมมติฐานวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของข้อมูลโดยมีการตั้งสมมติฐานว่า

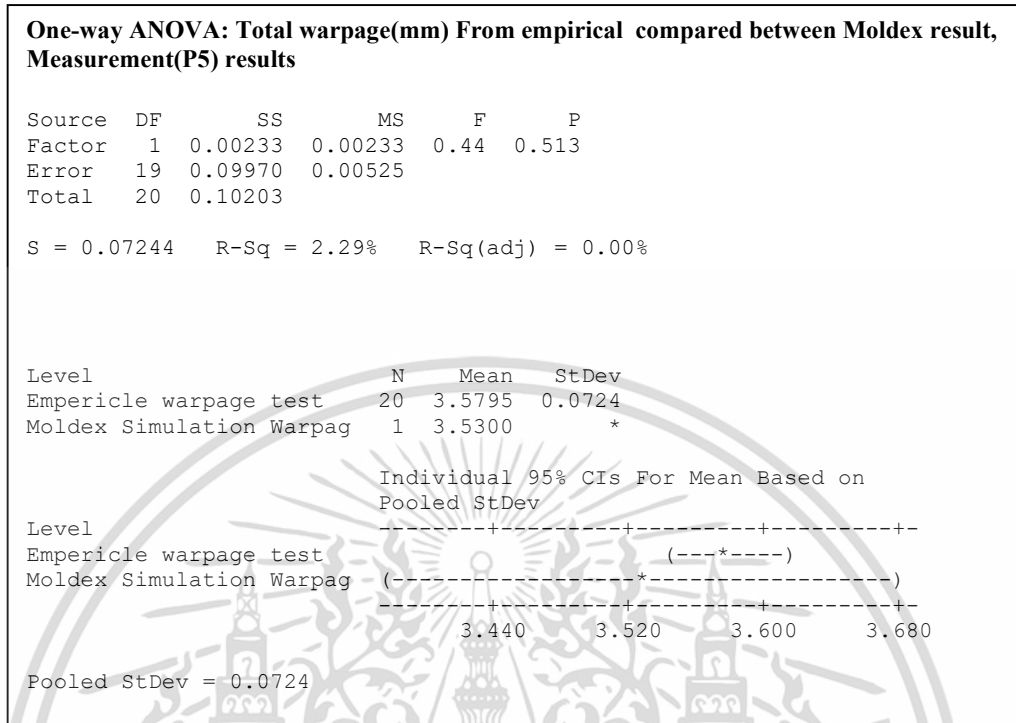
$$H_0 = \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 = \text{มีอย่างน้อยหนึ่งข้อมูลที่ไม่เท่ากับข้อมูลอื่น}$$

โดยกำหนดให้

μ_1 = ค่าการบิดงของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยผ่านโปรแกรม Moldex3D

μ_2 = ค่าการบิดงของชิ้นงานที่ได้ค่าปัจจัยจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยผ่านกระบวนการฉีดจริงโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 ขนาด 80 ตัน



รูปที่ 4.14 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการบิดงจากการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D เทียบกับกระบวนการฉีดจริงจากการปรับตั้งค่าตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย

จากรูปที่ 4.14 หลังพิจารณาว่าความแตกต่างของค่าการบิดงโดยดูจากค่า P-Value ที่ได้เท่ากับ 0.513 ซึ่งมากกว่า 0.05 ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง (ข้อมูลไม่แตกต่างกัน)

ตารางที่ 4.14 สรุปผลเปรียบเทียบของการบิดงของชิ้นงาน

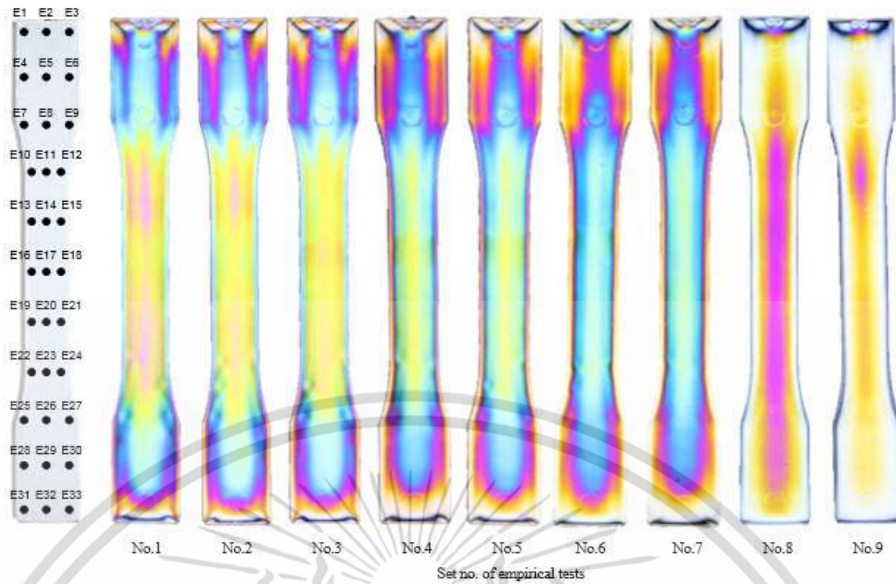
Objective	Recommended condition method		Response optimization		FA method	
	Moldex3D simulation	Experiment	Moldex3D simulation	Experiment	Moldex3D simulation	Experiment
Maximum warpage (mm)	0.50	0.52	0.39	0.42	0.33	0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.14 เป็นการสรุปผลการตรวจวัดการบิดงอของชิ้นงานระหว่างการจำลองการฉีดในโปรแกรม Moldex3D และการฉีดจริง จะเห็นได้ว่าผลของการเกิดการบิดงอของชิ้นงานระหว่างการจำลองการฉีดกับการฉีดจริงได้ผลความใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะการทดลองการฉีด โดยมีความคลาดเคลื่อนระหว่างการจำลองกับฉีดชิ้นงานจริงอยู่ที่ 3.85%, 7.14%, และ 13.15% ตามลำดับ ซึ่งสรุปผลได้ว่าผลของการหาปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกโดยการจำลองการฉีดและผลการฉีดจริงมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์แม่นยำเกิน 80% และผลของการใช้วิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm) สามารถลดการเกิดการบิดงอได้มากกว่าการฉีดพลาสติกแบบปกติถึง 26.92% และมากกว่าแบบวิธี Response optimization 9.52% เมื่อเทียบกับที่สภาวะการฉีดชิ้นงานพลาสติกจริงผ่านเครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 ขนาด 80 ตัน

4.7 ผลการวิเคราะห์กระบวนการอบอ่อนชิ้นงานโดยวิธี Photoelasticity

หลังจากทำการพิสูจน์แล้วว่าวิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหิ่งห้อย ช่วยให้การเกิดการบิดงอลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการฉีดแบบปกติ ในส่วนของขั้นตอนนี้เป็นการปรับปรุงชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดพลาสติกเพื่อให้เกิดการบิดงอลดลง โดยใช้กระบวนการอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิในช่วง 45 °C ถึง 90 °C เหตุผลที่เลือกช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนในช่วงนี้ เนื่องจากอ้างอิงจากอุณหภูมิการอ่อนตัวของ โพลิสไตรีน จะอยู่ที่ 87 °C ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกอุณหภูมิที่ใกล้เคียงจุดอ่อนตัวของพลาสติกให้มากที่สุด และช่วงเวลาในกระบวนการอบในกระบวนการทดลองทำการทดลองตั้งแต่ 5 นาที จนถึง 180 นาที แต่จากกระบวนการทดสอบพบว่า อุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างจะอยู่ในช่วง 60 °C ถึง 85 °C และเวลาในกระบวนการอบอ่อนจะอยู่ในช่วง 60 และ 120 นาที จะสามารถวิเคราะห์ผลของการลดความเค้นตกค้างที่ส่งผลกระทบต่อการลดการบิดงอของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



หมายเหตุ : No.1. คือชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน
 No.2.และ No.3. คือชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ใช้เวลาในการอบอ่อนที่ 60 และ 120 นาที
 No.4.และ No.5. คือชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 75 °C ที่ใช้เวลาในการอบอ่อนที่ 60 และ 120 นาที
 No.6.และ No.7. คือชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 80 °C ที่ใช้เวลาในการอบอ่อนที่ 60 และ 120 นาที
 No.8.และ No.9. คือชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C ที่ใช้เวลาในการอบอ่อนที่ 60 และ 120 นาที

รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายตามหลักการ Photoelasticity ของชิ้นงานเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่สภาวะต่างๆ กับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน

หลังจากทำการอบชิ้นงานที่สภาวะอุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆ จึงกำหนดจุดตรวจวัดค่าความเค้นตกค้างเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบบางตรงที่สอดคล้องต่อการลดการบิดงอของชิ้นงานเพื่อหาอุณหภูมิและช่วงเวลาในการอบชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชิ้นงานโพลีไสตรีน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 หลังจากกำหนดจุดตรวจวัดค่าแทบสี R,G,B ได้ทั้ง 33 จุด จึงนำตารางการคำนวณค่าความหน่วงสัมพัทธ์ (The relative retardation (δ)) ตามหลักมาตรฐาน ASTM-D4093-95 ดังแสดงในตารางที่ 2.6 เพื่อมาคำนวณหาค่าความหน่วงสัมพัทธ์ เพื่อนำไปคำนวณในสมการที่ (2.53) ต่อไป เพื่อหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานสูงสุด

หลังจากตรวจวัดค่าความเค้นตกค้าง ณ จุดต่างๆ โดยในกระบวนการตรวจวัดตามหลักการ Photoelasticity คือจะได้ค่า Red Green Blue ของชิ้นงานออกมาเป็นค่า พิกเซล (Pixel) และนำไปคำนวณหาค่า Error ที่น้อยที่สุดเทียบกับค่า Red Green Blue ตามมาตรฐานในตารางที่ 2.6 โดยสมการการหาค่า Error คำนวณได้จากสมการที่ (2.54) หลังจากคำนวณหาค่า Error ในสมการที่ 4.4 จะได้ค่า Error ที่ใกล้เคียงกับช่วงแถบสีสองแถบ หลังจากนั้นให้ทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างช่วงของค่าความหน่วงสัมพัทธ์ (the relative retardation (δ)) ตามหลักมาตรฐาน ASTM-D4093-95 เพื่อคำนวณหาค่าความหน่วงสัมพัทธ์ของจุดตรวจสอบ หลังจากได้ค่าค่าความหน่วงสัมพัทธ์ จึงนำไปคำนวณในสมการที่ (2.53) เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างสูงสุดของชิ้นงาน ยกตัวอย่างการคำนวณค่าความเค้นตกค้างสูงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อน 120 นาที และวางชิ้นงานในอากาศทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง พบว่าจุดตรวจสอบที่ E22 มีความเค้นตกค้างสูงสุดในชิ้นงานที่ 0.058 MPa คำนวณจาก

$$\sigma = \frac{N \cdot \lambda}{h \cdot C} = \frac{\delta}{K \cdot h} \quad (4.3)$$

โดยกำหนดให้ ความหนาของชิ้นงาน (h) เท่ากับ 3.2 mm และกำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นของโพลีไสตรีน (C) มีค่าเท่ากับ 5000 Brewster หรือมีค่าเท่ากับ 5000×10^{-12} [92]

จากการตรวจวัด ณ จุดตรวจสอบชิ้นงานที่ E22 พบว่ามีค่า Red เท่ากับ 250.54 pixel Green เท่ากับ 207.25 และค่า Blue เท่ากับ 90.49 pixel จึงนำค่า Red Green และ Blue ไปคำนวณหาค่า Error ในสมการที่ (2.54) เทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 2.6 จะได้

$$Error = \sqrt{(R_e - R_c)^2 + (G_e - G_c)^2 + (B_e - B_c)^2} \quad (4.4)$$

โดยพบว่าค่ามาตรฐานของ RGB ที่ใกล้เคียงกับจุดทดสอบคือช่วงค่าความหน่วงสัมพัทธ์ ที่ 940 นาโนเมตร และ 800 นาโนเมตร ดังนั้น

$$Error_{940nm} = \sqrt{((255 - 250.54)^2 + (204 - 207.25)^2 + (85 - 90.49)^2)}$$

$$Error = 7.78$$

$$Error_{800nm} = \sqrt{((203 - 250.54)^2 + (242 - 207.25)^2 + (149 - 90.49)^2)}$$

$$Error = 83.01$$

$$Error_{940-800nm} = \sqrt{((255 - 203)^2 + (204 - 242)^2 + (85 - 149)^2)}$$

$$Error = 90.80$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ช่วงการหาค่าค่าความหน่วงสัมพัทธ์แล้วจึงทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างช่วงของค่า Error และค่าความหน่วงสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{7.78}{90.80} = \frac{940 - \delta_{E22}}{940 - 800}$$

ดังนั้น

$$\delta_{E2} = 940 - \left(\frac{7.78}{90.80} \times (940 - 800) \right)$$

$$\delta_{E22} = 928 \text{ nm}$$

หลังจากได้ค่าความหน่วงสัมพัทธ์ที่ 928 นาโนเมตร จึงนำค่าความหน่วงสัมพัทธ์คำนวณในสมการที่ 4.3 เพื่อหาค่าความเค้นดังนี้

$$\sigma_{928nm} = \frac{928 \times 10^{-9}}{3.2 \times 10^{-3} \times 5000 \times 10^{-12}}$$

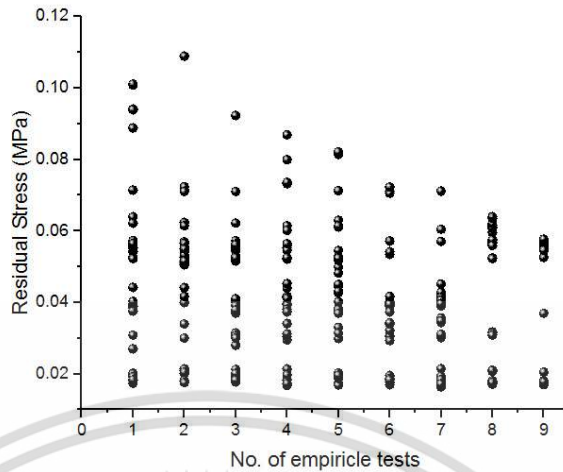
$$\sigma_{928nm} = 0.058 \times 10^6 \text{ Pa}$$

ดังนั้นสรุปว่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อน 120 นาที และวางชิ้นงานในอากาศทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง ที่จุดตรวจสอบที่ E22 มีค่าเท่ากับ 0.058 MPa ซึ่งเป็นจุดที่มีความเค้นสูงสุดของชิ้นงาน และเมื่อเทียบกับกระบวนการอบอ่อนในสภาวะอื่นๆ พบว่า การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อน 120 นาที และวางชิ้นงานในอากาศทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง สามารถลดความเค้นตกค้างได้มากที่สุด นอกจากนี้รายละเอียดของความเค้นตกค้างของจุดตรวจสอบอื่นๆ และจุดตรวจสอบของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน แสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 โดยการทดสอบชิ้นงานฉีดยาพลาสติกสภาวะการอบอ่อน จำนวน 20 ชิ้นต่อสภาวะ และนำเสนอค่าเฉลี่ยความเค้นตกค้างของแต่ละจุดตรวจสอบ

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองการหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงาน 9 สภาวะ ณ จุดตรวจสอบที่ E1 ถึง E33

Inspection Points	Residual stress No.1	Residual stress No.2	Residual stress No.3	Residual stress No.4	Residual stress No.5	Residual stress No.6	Residual stress No.7	Residual stress No.8	Residual stress No.9
E1	0.020	0.053	0.052	0.052	0.052	0.020	0.019	0.060	0.055
E2	0.094	0.020	0.019	0.021	0.017	0.017	0.017	0.018	0.018
E3	0.039	0.062	0.031	0.029	0.030	0.057	0.031	0.018	0.018
E4	0.020	0.051	0.040	0.040	0.043	0.040	0.022	0.032	0.053
E5	0.071	0.072	0.037	0.030	0.055	0.031	0.030	0.021	0.018
E6	0.064	0.040	0.071	0.034	0.063	0.031	0.030	0.018	0.018
E7	0.053	0.018	0.018	0.042	0.038	0.040	0.042	0.057	0.057
E8	0.039	0.042	0.041	0.061	0.061	0.032	0.031	0.017	0.018
E9	0.056	0.018	0.019	0.042	0.045	0.071	0.040	0.052	0.017
E10	0.054	0.052	0.052	0.018	0.019	0.040	0.019	0.064	0.056
E11	0.018	0.051	0.018	0.056	0.040	0.034	0.036	0.057	0.017
E12	0.027	0.057	0.056	0.073	0.050	0.040	0.040	0.056	0.017
E13	0.101	0.021	0.054	0.052	0.020	0.019	0.045	0.062	0.055
E14	0.057	0.057	0.055	0.038	0.048	0.039	0.039	0.018	0.018
E15	0.055	0.052	0.057	0.087	0.081	0.040	0.042	0.057	0.018
E16	0.019	0.054	0.019	0.055	0.053	0.019	0.018	0.061	0.057
E17	0.056	0.056	0.056	0.080	0.052	0.039	0.039	0.018	0.018
E18	0.089	0.057	0.056	0.060	0.045	0.039	0.043	0.031	0.017
E19	0.017	0.053	0.020	0.055	0.053	0.018	0.018	0.061	0.037
E20	0.057	0.042	0.055	0.074	0.082	0.039	0.039	0.057	0.018
E21	0.056	0.052	0.092	0.044	0.043	0.040	0.039	0.058	0.021
E22	0.101	0.021	0.053	0.053	0.052	0.018	0.018	0.061	0.058
E23	0.089	0.109	0.056	0.039	0.071	0.039	0.041	0.018	0.017
E24	0.040	0.072	0.028	0.038	0.033	0.034	0.034	0.018	0.017
E25	0.052	0.055	0.053	0.045	0.019	0.037	0.041	0.062	0.057
E26	0.044	0.044	0.039	0.037	0.038	0.034	0.035	0.056	0.018
E27	0.040	0.021	0.039	0.034	0.061	0.071	0.060	0.017	0.017
E28	0.018	0.018	0.018	0.041	0.037	0.042	0.040	0.064	0.055
E29	0.038	0.034	0.038	0.031	0.031	0.072	0.071	0.052	0.018
E30	0.057	0.061	0.031	0.020	0.020	0.053	0.017	0.021	0.018
E31	0.062	0.071	0.062	0.056	0.061	0.029	0.057	0.031	0.017
E32	0.031	0.030	0.030	0.017	0.020	0.054	0.017	0.018	0.018
E33	0.101	0.109	0.092	0.087	0.082	0.072	0.071	0.064	0.018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



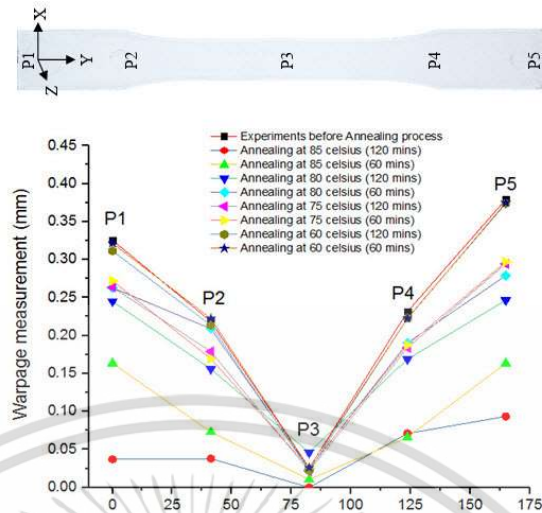
รูปที่ 4.16 แสดงผลของค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงาน No.1. ถึง No.9 ทั้ง 33 จุดตรวจสอบ

หลังกระบวนการอบอ่อนในการพิสูจน์ความเค้นตกค้างที่ลดลงหลังผ่านกระบวนการ ดังแสดงในผลการทดลองดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 จึงทำการตรวจวัดความบิดงอเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดยาโดยการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดยาที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยโดยไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนกับชิ้นงานที่นำมาผ่านกระบวนการอบอ่อนที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน 20 ชิ้นต่อสภาวะ ผลดังแสดงในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าความบิดงอของชิ้นงาน 9 สภาวะ (No.1 ถึง No.9)

จุดตรวจวัด ชิ้นงาน (mm)	ผลค่าความบิดงอของชิ้นงาน 9 สภาวะ (No.1 ถึง No.9)								
	No.1. (mm)	No.2. (mm)	No.3. (mm)	No.4. (mm)	No.5. (mm)	No.6. (mm)	No.7. (mm)	No.8. (mm)	No.9. (mm)
P1	0.33	0.32	0.31	0.27	0.26	0.26	0.25	0.16	0.04
P2	0.22	0.22	0.21	0.17	0.18	0.21	0.16	0.07	0.04
P3	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.01	0.00
P4	0.23	0.22	0.22	0.19	0.18	0.19	0.17	0.07	0.07
P5	0.38	0.38	0.37	0.30	0.29	0.28	0.25	0.16	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงผลการวัดค่าการบิดงอของแต่ละจุดทดสอบเปรียบเทียบกับค่าการบิดงอจากการฉีดจริงที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนและผ่านกระบวนการอบอ่อนที่สภาวะต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 จะสังเกตเห็นได้ว่าจุดการตรวจสอบ P1 ถึง P5 ยังคงเป็นจุดตรวจสอบที่ปลายชิ้นงาน P5 ที่เป็นจุดที่มีความบิดงอของชิ้นงานมากที่สุด และจากตารางที่ 4.17 จะสังเกตเห็นว่าถ้าเปรียบเทียบการบิดงอของชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ จะพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนเกิดการบิดงอจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจากตารางที่ 4.17 สรุปว่าการผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อนที่ 120 นาที สามารถลดการเกิดการบิดงอลงไปได้ถึง 76.32 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ซึ่งจะส่งผลของความเค้นตึงในชิ้นงานกับผลของการบิดงอของชิ้นงานจะแปรผันตรงกันเมื่อยิ่งอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นและใช้เวลาในกระบวนการอบมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ทั้งค่าการบิดงอของชิ้นงานและความเค้นตึงของชิ้นงานยิ่งต่ำลงดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยพบว่าค่าความเค้นตึงสามารถลดลงไปได้ 42.57 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อนที่ 120 นาที กับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบอ่อน โดยลดลงจาก 0.101 MPa เหลือเพียง 0.058 MPa

ตารางที่ 4.17 สรุปผลเปรียบเทียบของการบิดงอและค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานก่อน
กระบวนการอบอ่อนและหลังกระบวนการอบอ่อน

Methods	Maximum warpage (mm)			Maximum residual stress (MPa)		
	Before annealing process	Annealing process (60 mins)	Annealing process (120 mins)	Before annealing process	Annealing process (60 mins)	Annealing process (120 mins)
Post-injection process	0.38			0.101		
Annealing at 60 °C		0.38	0.37		0.109	0.092
Annealing at 75 °C		0.30	0.29		0.087	0.082
Annealing at 80 °C		0.28	0.25		0.072	0.071
Annealing at 85 °C		0.16	0.09		0.064	0.058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อิทธิพลของการวิเคราะห์และหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการลดการบิดงอของชิ้นงาน

จากงานวิจัยนี้ค้นพบว่าในกระบวนการฉีดพลาสติกมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับตั้งเครื่องจักร และค่าควบคุมในกระบวนการฉีดต่างๆ ที่หลากหลายปัจจัย แต่หากศึกษาเกี่ยวกับปัญหาด้านคุณภาพชิ้นงานพลาสติกที่ไม่ได้มาตรฐาน เกิดการบิดงอไม่เป็นไปตามแบบ จะพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพนี้ คือ อัตราการฉีด เวลาในกระบวนการฉีดย้ำ ความดันฉีดย้ำ อุณหภูมิการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในกระบวนการหล่อเย็น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปัญหาด้านคุณภาพการบิดงอของชิ้นงาน

5.1.2 อิทธิพลของของใช้วิธีการแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ (Soft computing techniques) ในกระบวนการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดพลาสติก

หลังจากกระบวนการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อปัญหาด้านคุณภาพการบิดงอของชิ้นงานกระบวนการหาค่าทั้งหกปัจจัยให้มีความเหมาะสมที่สุดและประหยัดเวลาในกระบวนการผลิตให้มากที่สุด ค้นพบว่า วิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อย เป็นหนึ่งวิธีแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์อื่นๆ ซึ่งจากงานวิจัยค้นพบว่าวิธีการหาปัจจัยที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยสามารถลดการเกิดการบิดงอของชิ้นงานได้ดีแม้เทียบกับวิธีการทดลองแบบแม่นยำตรง (Exact Method) และเมื่อเทียบกับวิธีการฉีดชิ้นงานแบบปรับตั้งปกติ

5.1.3 อิทธิพลของการใช้กระบวนการอบอ่อนปรับปรุงคุณภาพการบิดงอชิ้นงานพลาสติก

หลังจากกระบวนการฉีดชิ้นงานพลาสติกตามหลักการวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยแล้ว ในงานวิจัยนี้ต้องการที่ลดปัญหาคุณภาพด้านงานบิดงอให้ลดลงให้มากที่สุด กระบวนการอบอ่อนจึงถูกนำมาพัฒนาและวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน และค้นพบว่าถ้านำชิ้นงานผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิการอ่อนตัวของวัสดุ คือ 85 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถที่จะลดการบิดงอของชิ้นงานลงไปถึง 76.32 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนซึ่งเป็นบทสรุปว่าการแก้ปัญหาด้านคุณภาพการบิดงอของชิ้นงาน ถ้านำวิธีการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดแบบหึ่งห้อย และมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานที่ต่อเนื่องด้วยกระบวนการอบอ่อน จะทำให้คุณภาพของชิ้นงานด้านการลดการบิดงอของชิ้นลงได้ถึง 81.63 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเทียบกับกระบวนการปรับตั้งปัจจัยกระบวนการฉีดพลาสติกแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 อิทธิพลของใช้กระบวนการอบอ่อนที่มีผลต่อการลดความเค้นตกค้างใช้ชิ้นงานฉีดพลาสติก

นอกจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการลดการบิดงอของชิ้นงาน ปัญหาด้านความเค้นตกค้างก็เป็นอีกส่วนของการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ โดยค้นพบว่าหลังจากนำชิ้นงานผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิการอ่อนตัวของวัสดุ คือ 85 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงพบว่าสามารถลดความเค้นตกค้างในชิ้นงานลงได้ถึง 42.57 เปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน โดยการวัดค่าความเค้นตกค้างโดยวิธี Photoelasticity

5.2 สิ่งที่ได้จากการพัฒนาและวิจัย

สรุปผลของงานวิจัยนี้ที่ได้คือวิธีการในการแก้ปัญหาคุณภาพด้านงานบิดงอของชิ้นงานพลาสติก โดยวิธีการหาค่าปัจจัยในกระบวนการฉีดพลาสติกที่เหมาะสมแบบหึ่งห้อยเพื่อลดการบิดงอของชิ้นงาน ซึ่งยังไม่พบว่ามีงานวิจัยและพัฒนามาก่อน จึงนำมาวิจัยและพัฒนาในงานวิจัยนี้ อีกทั้งกระบวนการอบอ่อนเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านการบิดงอชิ้นงานพลาสติกโดยการบ่งชี้โดยความเค้นตกค้างที่ลดลงในชิ้นงาน ก็เป็นอีกองค์ประกอบของการลดปัญหาด้านการบิดงอของชิ้นงานพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

จากการวิจัยและพัฒนาในงานวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงวิธีการลดปัญหาด้านคุณภาพการบิดงอของชิ้นงานและสามารถที่จะขยายผลการวิจัยในอนาคตได้ดังนี้

- 1) ศึกษาการลดปัญหาคุณภาพด้านอื่นๆ ในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้หลักการและวิธีการเดียวกับงานวิจัยนี้
- 2) การนำผลของงานวิจัยนี้ต่อยอดในกระบวนการออกแบบและนำวิธีการนี้สู่กระบวนการผลิตแบบปริมาณมากๆ
- 3) ศึกษากระบวนการอบอ่อนที่ลดระยะเวลาในการอบชิ้นงานให้สั้นลง เพื่อปรับให้ภาคอุตสาหกรรมลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตเพื่อเหมาะสมต่อการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] พลาสติกสถานแห่งประเทศไทย. สถิติการส่งออกผลิตภัณฑ์พลาสติกของไทยสู่ตลาดสากล ปี 2548-2561. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://plastic.oie.go.th/>. [6 มีนาคม 2562].
- [2] กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. เอกสารเผยแพร่ ผลกระทบจากการรวมกลุ่มประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC) ต่อกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทย 6 สาขา. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www.thaifta.com/thaifta/Portals/0 / File/vol4 Ch_9 _plastic.doc. [5 ตุลาคม 2557].
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. เอกสารเผยแพร่ โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib11138.pdf>. [5 ตุลาคม 2557].
- [4] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. เอกสารเผยแพร่ โครงการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมไบโอชีวภาพ. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www.thaiplastics.org/bio_network_info.php [13 พฤษภาคม 2562].
- [5] พิเชษฐ์ พินิจ. 2552. “ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโพลีเอทิลีนสติกซีตและโพลีเอทิลีนสติกซีตเชิงเลข.” *วิศวกรรมสาร มข.*, 36(3) : 195–203.
- [6] Jongsoo, L. and Jonghum, K. 2007. “Micro genetic algorithm based optimal gate positioning in injection molding design.” *Journal of mechanical science and technology*. 21(5) : 789-798.
- [7] Moldex3D. **Manual R10**. [Online]. Available: www.moldex3d.com. [16 March 2019].
- [8] Ajit, R. Michael, F James, G. and Benoit, L. 2007. “A multi-segment injection line and real-time adaptive, model-based controller for vacuum assisted resin transfer molding.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38(3) : 1058–1069.
- [9] Chen, X. Lam, Y. C. and Li, D. 2000. “Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding.” *Journal of Materials Processing Technology*. 101(1-3) : 275-280.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Tang, S. H. Kong, Y. M. Supaun, S. M. Samin R. and Sulaiman, S. 2006. "Design and thermal analysis of plastic injection mould." **Journal of Materials Processing Technology**. 171(2) : 259-267.
- [11] Acevedo-Morantes, M. T. Brieva-Sarmiento, M. and Realpe-Jimenes, A. 2014. "Effect of the molding temperature and cooling time on the residual stress of crystal polystyrene." **Dyna**. 81(187) : 73-80.
- [12] Kim, B. and Min, J. 2017. "Residual stress distribution and their influence on post-manufacturing deformation of injection-molded plastic parts." **Journal of Materials Processing Technology**. 245 : 215-226.
- [13] Guevara-Morales, A. and Figueroa-Lopez, U. 2014. "Residual stresses in injection molded products." **Journal of Materials Science**. 49(13) : 4399-4415.
- [14] Lee, Y. B. and Kwon, T. H. 2001. "Modeling and numerical simulation of residual stresses and birefringence in injection molded center-gated disks." **Journal of Materials Processing Technology**. 111(1-3) : 214-218.
- [15] Weng, C. Lee, W. B. To, S. and Jiang, B. Y. 2009. "Numerical simulation of residual stress and birefringence in the precision injection molding of plastic microlens arrays." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 36(3) : 213-219.
- [16] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www2.mtec.or.th/>. [28 มกราคม 2560].
- [17] Yangzhou Chengsen พลาสติก จำกัด. โพลีสไตรีน (PS): การผลิต การตลาด ราคา และคุณสมบัติ. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://th.absextruding.com/info/polystyrene-pps-production-market-price-an-25506652.html>. [29 มีนาคม 2561].
- [18] เขาวลิต เจริญรักษา. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=bright-brave&date=23-09-2011&group=3&gblog=2>. [8 เมษายน 2559].
- [19] Calliste Jr., W.D. 1999. **Material science and engineering; an introduction**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] บริษัท สหโชคอินเตอร์เทรด จำกัด. **General Purpose Polystyrene**. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.sci-polymers.com/types-of-polymers/gpps/>. [17 กุมภาพันธ์ 2562].
- [21] McCrum, N.G. Buckley, C.P. and Bucknall, C.B. 1997. **Principles of Polymer Engineering**. London: Oxford University Press.
- [22] Michaeli, W. 1995. **Plastic Processing, An introduction**. Germany: Hanser Publishers.
- [23] Goodship, V. Middleton B. and Cherrington R. 2016. **Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality**. Oxford: William Andrew.
- [24] Plastic technology magazine. **How to set Barrel Temps**. [Online]. Available: <http://www.ptonline.com/columns/how-to-set-barrel-zone-temps>. [27 August 2016].
- [25] Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation. **Injection molding**. [Online]. Available: <http://www.mep.co.jp/en/pdf/product/novaduran/molding.pdf>. [25 August 2016].
- [26] Wong, H.Y. 2007. “**A capacitive transducer for solidification rate monitoring of polymer in injection molding**.” Research Thesis. Chemical Engineering. Hong Kong University of Science and Technology.
- [27] Rannar, L.E. 2008. “**On optimization of Injection Molding Cooling**.” Ph.D.dissertation, Faculty of Engineering Science and Technology. Norwegian University of Science and Technology.
- [28] David O. Kazmer. 2007. **Injection Mold Design Engineering**. 2nd ed. America: Hansar Publications.
- [29] ปารเมศ ชูติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป.
- [31] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. **Engineering Statistics Handbook**. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>. [1 July 2019].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Minitab, LLC. **Getting Started with Minitab 19 for Windows.** [Online]. Available: https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/MinitabGettingStarted_EN.pdf. [2 July 2019].
- [33] Yang,X.-S. 2010. **Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications.** USA.: John Wiley & Sons.
- [34] Phillips, Kristie Jo. 2002. **“Stress relaxation of Tufted Carpets and Carpet components.”** Doctoral Thesis. Textile Technology Management. North Carolina state University.
- [35] Yusup, N. Zain, A.M. and Hashim, S.Z.M. 2012. “Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011).” **Journal of Expert Systems with Applications.** 39(10) : 9909-9927.
- [36] Chiang, K.T. and Chang, F.P. 2007. “Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 35(5-6) : 468-479.
- [37] Chen, C.-C. Su, P.-L. and Lin, Y.-C. 2009. “Analysis and modeling of effective parameters for dimension shrinkage variation of injection molded part with thin shell feature using response surface methodology.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 45(11): 1087-1095.
- [38] Rajalingam,S. et.al. 2016. “Optimization of injection Molding Process Parameters by Response Surface Methods. ” **Journal Information Technology & Software Engineering.** 6(2): 174-186.
- [39] Dowling Norman, E. 1998. **Mechanical Behavior of Materials.** 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- [40] Santa Clara University Engineering Design Center. **Residual stress.** [Online]. Available:http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3400001.htm. [29 January 2017].
- [41] Kashyap, S. and Datta, D. 2015. “Process parameter optimization of plastic injection molding: a review.” **International Journal of Plastic Technology.** 19(1): 1-18.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [42] Mukherjee, I. and Ray, P. K. 2006. "A review of optimization techniques in metal cutting processes." **Journal of Computers and Industrial Engineering.** 50(1-2): 15-34.
- [43] Chen, W.L. Huang, C.Y. and Hung, C.W. 2010. "Optimization of plastic injection molding process by dual response surface method with non-linear programming." **Journal of Engineering Computations.** 27(8): 951-966.
- [44] Mehat, N.M. and Kamaruddin, S. 2012. "Quality control and design optimization of plastic product using Taguchi method: a comprehensive review." **International Journal of Plastic Technology.** 16(2): 194-209.
- [45] Erzurumlu, T. and Ozelik, B. 2005. "Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method." **Journal of Materials and Design.** 27(10): 853-861.
- [46] Chiang, Y.C. et.al. 2010. "Warpage phenomenon of thin-wall injection molding." **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 55(5-8): 517-526.
- [47] Zheng, G. Guo, W. Wang, Q. and Guo, X. 2015. "Influence of processing parameters on warpage according to the Taguchi experiment." **Journal of Mechanical Science and Technology.** 29(10): 4153-4158.
- [48] Lam, Y.C. Britton, G.A. and Deng, Y.-M. 2003. "A computer-aided system for an optimal moulding conditions design using a simulation-based approach." **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 22(7-8): 574-586.
- [49] Cellere, A. and Lucchetta, G. 2010. "Identification of Crims model parameters for warpage prediction in injection moulding simulation." **International Journal of Material Forming.** 3(Suppl 1): 37-40.
- [50] Kurt, M. et.al. 2010. "Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts." **International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 46(5-8): 571-578.
- [51] Ozelik, B. and Erzurumlu, T. 2006. "Comparison of the warpage optimization in plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm." **Journal of Materials Processing Technology.** 171(3): 437-445.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] Yin, F. et.al. 2010. “Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding.” **Journal of Materials and Design**. 32(4): 1844-1850.
- [53] Shi, H. Suming, S. and Wang, X. 2012. “A warpage optimization method for injection molding using artificial neural network with parametric sampling evaluation strategy.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 65(1-4): 343–353.
- [54] Xu, G. Yang, Z.-T. and Long, G.-d. 2011. “Multi-objective optimization of MIMO plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 58(5-8): 521–531.
- [55] Guo, W. Hua, L. and Mao, H. 2014. “Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 72(1-4): 365–375.
- [56] Zhao, J. Cheng, G. Ruan, S. and Li, Z. 2015. “Multi-objective optimization design of injection molding process parameters based on the improved efficient global optimization algorithm and non-dominated sorting-based genetic algorithm.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 78(9-12): 1813–1826.
- [57] Kitayama, S. Onuki, R. and Yamazaki, K. 2014. “Warp reduction with variable pressure profile in plastic injection molding via sequential approximate optimization.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 72(5-8): 827–838.
- [58] Wang, X. et.al. 2015. “Warp optimization with dynamic injection molding technology and sequential optimization method.” **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 78(1-4): 177–187.
- [59] Deng, Y.-M. Zhang, Y. and Lam, Y.C. 2010. “A hybrid of mode-pursuing sampling method and genetic algorithm for minimization of injection molding warpage.” **Journal of Materials and Design**. 31(4): 2118-2123.
- [60] Yang, X.S. 2009. “Firefly Algorithms for Multimodal Optimization.” **American Journal of Applied Mathematics and Statistics**. 5792: 169-178.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [61] Yang, X.S. 2013. “Multiobjective Firefly Algorithm for Continuous Optimization.” **Journal of Engineering with Computers**. 29(2): 175-184.
- [62] Tsihrintzis, G.A. Virvou, M. and Jain, L.C. 2016. **Engineering Application Areas, -Intelligent Computing Systems**. Germany: Springer Publishers.
- [63] Mamodiya, U. and Sharma, P. 2014. “Review in controlling Analysis of Injection Molding Machine.” **International Journal of Engineering Research & Technology**. 3(6): 509–513.
- [64] Lin, J. and Lian, R.-J. 2010. “Self-organizing fuzzy controller for injection molding machines.” **Journal of Process Control**. 20(5): 585–595.
- [65] Ceccia, S. Bellucci, F. Monticelli, O. Frache, A. Traverso, G. and Casale, A. 2010. “The effect of annealing conditions on the intercalation and exfoliation of layered silicates in polymer nanocomposites.” **Journal of Polymer Science**. 48: 2476-2483.
- [66] Bai, H.W. Luo, F. Zhou, T.N. Deng, H. Wang, K. and Fu, Q. 2011. “New insight on the annealing induced microstructural changes and their roles in the toughening of β -form polypropylene.” **Polymer**. 52(10): 2351-2360.
- [67] Zhao, J.C. Qiu, J. Niu, Y.H. and Wang, Z.G. 2009. “Evolutions of morphology and crystalline ordering upon annealing of quenched isotactic polypropylene.” **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**. 47(17): 1703-1712.
- [68] Wu, H.Y. Li, X.X. Chen, J.W. Shao, L.N. Huang, T. Shi, Y.Y. and Wang, Y. 2013. “Reinforcement and toughening of polypropylene/organic montmorillonite nanocomposite using β -nucleating agent and annealing.” **Composites Part B: Engineering**. 44(1): 439-445.
- [69] Anny, L. Flory. Ramanathan, T. and Brinson, L.C. 2010. “Physical Aging of Single Wall Carbon Nanotube Polymer Nanocomposites: Effect of Functionalization of the Nanotube on the Enthalpy Relaxation.” **Macromolecules**. 43(9): 4247-4252.
- [70] Wu, H.Y. Li, X.X. Xiang, F.M. Huang, T. Shi, Y.Y. and Wang, Y. 2012. “Microstructure evolution of isotactic polypropylene during annealing: Effect of poly(ethylene oxide).” **Polymer Science**. 30(2): 199-208.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [71] Song, S.J. Feng, J.C. and Wu, P. 2010. "Relaxation of shear-enhanced crystallization in impact-resistant polypropylene copolymer: Insight from morphological evolution upon thermal treatment." **Polymer**. 51(22): 5267-5275.
- [72] Ding, Z.T. Bao, R.Y. Zhao, B. Yan, J. Liu, Z.Y. and Yang, M.B. 2013. "Effects of annealing on structure and deformation mechanism of isotactic polypropylene film with row-nucleated lamellar structure." **Journal of Applied Polymer Science**. 130(3): 1659-1666.
- [73] Horvath, Z. Menyhard, A. Doshev, P. Gahleitner, M. Friel, D. Varga, J. and Pukanszky, B. 2016. "Improvement of the impact strength of ethylene-propylene random copolymers by nucleation." **Journal of Applied Polymer Science**. 133(34).
- [74] Hedesiu, C. Demco, D. E. Kleppinger, R. Vanden Poel, G. Gijssbers, W. Blumich, B. Remerie, K. and Litvinov, V. M. 2007. "Effect of Temperature and Annealing on the Phase Composition, Molecular Mobility, and the Thickness of Domains in Isotactic Polypropylene Studied by Proton Solid-State NMR, SAXS, and DSC." **Macromolecules**. 40(11): 3977-3989.
- [75] Hedesiu, C. Demco, D.E. Kleppinger, R. Buda, A.A. ; Blumich, B. Remerie, K. and Litvinov, V.M. 2007. "The effect of temperature and annealing on the phase composition, molecular mobility and the thickness of domains in high-density polyethylene." **Polymer**. 48(3): 763-777.
- [76] Zia, Q. Mileva, D. and Androsch, R. 2008. "Rigid Amorphous Fraction in Isotactic Polypropylene." **Macromolecules**. 41(21): 8095-8102.
- [77] Bai, H.W. Wang, Y. Zhang, Z. J. Han, L. Li, Y.L. ; Liu, L. Zhou, Z.W. and Men, Y.F. 2009. "Influence of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Isotactic Polypropylene with β -Phase Nucleating Agent." **Macromolecules**. 42(17): 6647-6655.
- [78] Na, B. Li, Z. J. Lv, R. and Zou, S. 2011. "Annealing-induced structural rearrangement and its toughening effect in injection-molded isotactic polypropylene." **Polymer Engineering & Science**. 52(4): 893-900.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [79] Li, X.X. Wu, H.Y. Han, L. Huang, T. Wang, Y. Bai, H.W. and Zhou, Z.W. 2010. "Annealing induced microstructure and fracture resistance changes in isotactic polypropylene/ethylene-octene copolymer blends with and without β -phase nucleating agent." **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**. 48(20): 2108-2120.
- [80] Chen, R.F. Shangguan, Y.G. Zhang, C.H. Chen, F. Jones, E.H. and Zheng, Q. 2011. "Influence of molten-state annealing on the phase structure and crystallization behaviour of high impact polypropylene copolymer." **Polymer**. 52(13): 2956-2963.
- [81] Tian, Y.F. Song, S.J. Feng, J.C. and Yi, J.J. 2012. "Phase morphology evolution upon melt annealing treatment and corresponding mechanical performance of impact-resistant polypropylene copolymer." **Materials Chemistry and Physics**. 133(2-3): 893-900.
- [82] Zhao, J.C. Wang, Z.G. Niu, Y.H. Hsiao, B.S. and Piccarolo, S. 2012. "Phase Transitions in Prequenched Mesomorphic Isotactic Polypropylene during Heating and Annealing Processes As Revealed by Simultaneous Synchrotron SAXS and WAXD Technique." **Journal of Physical Chemistry B**. 116(1): 147-153.
- [83] Wang, Y. Xu, J.Z. Chen, Y.H. Qiao, K. Xu, L. Ji, X. Li, Z.M. and Hsiao, B.S. 2013. "Crystalline Structure Changes in Preoriented Metallocene-Based Isotactic Polypropylene upon Annealing." **Journal of Physical Chemistry B**. 117(23): 7113-7122.
- [84] Krueger, K.N. and Zachmann, H.G. 1993. "Investigation of the melting behavior of poly(aryl ether ketones) by simultaneous measurements of SAXS and WAXS employing synchrotron radiation." **Macromolecules**. 26(19): 5202-5208.
- [85] Saengsuwan, S. 2008. "Influence of annealing on microstructure & molecular orientation, thermal behaviour, mechanical properties and their correlations of uniaxially drawn iPP thin film." **e-Polymers**. 8(1): 1289.
- [86] Kong, Y. and Hay, J.N. 2003. "Multiple melting behaviour of poly(ethylene terephthalate)." **Polymer**. 44(3): 623-633.
- [87] Wang, X.H. Zhao, J.J. and Li, L. 2007. "Multiple melting behavior of poly(butylene succinate)." **European Polymer Journal**, 43(8): 3163-3170.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [88] Li, X.X. Wu, H.Y. Yang, G. Liu, X.R. Hong, S.M. and Wang, Y.J. 2012. "Phase Transition in β -nucleated Isotactic Polypropylene Induced by Combination of Annealing and High Pressure." **Journal of Macromolecular Science, Part B, Physics.** 51(12): 2377-2391.
- [89] Chang, C. W. Lien, H. S. and Lin, J. H. 2008. "Determination of reflection photoelasticity fringes analysis with digital image-discrete processing." **Measurement.** 41(8): 862-869.
- [90] Frocht, M. 1941. **Photoelasticity.** New York: John Wiley & Sons.
- [91] Ramesh, K. 2000. **Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Applications.** Heidelberg: Springer-Verlag.
- [92] Des Cloizeaux, J. and Jannink, G. 2010. **Polymers in solution: Their modelling and structure.** Ed. Vol. 1. New York: Oxford University Press.
- [93] Lobato, F.-S. and Steffen, J.-V. 2013. "Multi-objective optimization firefly algorithm applied to (Bio) chemical engineering system design." **American Journal of Applied Mathematics and Statistics.** 1(6) : 110-116.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



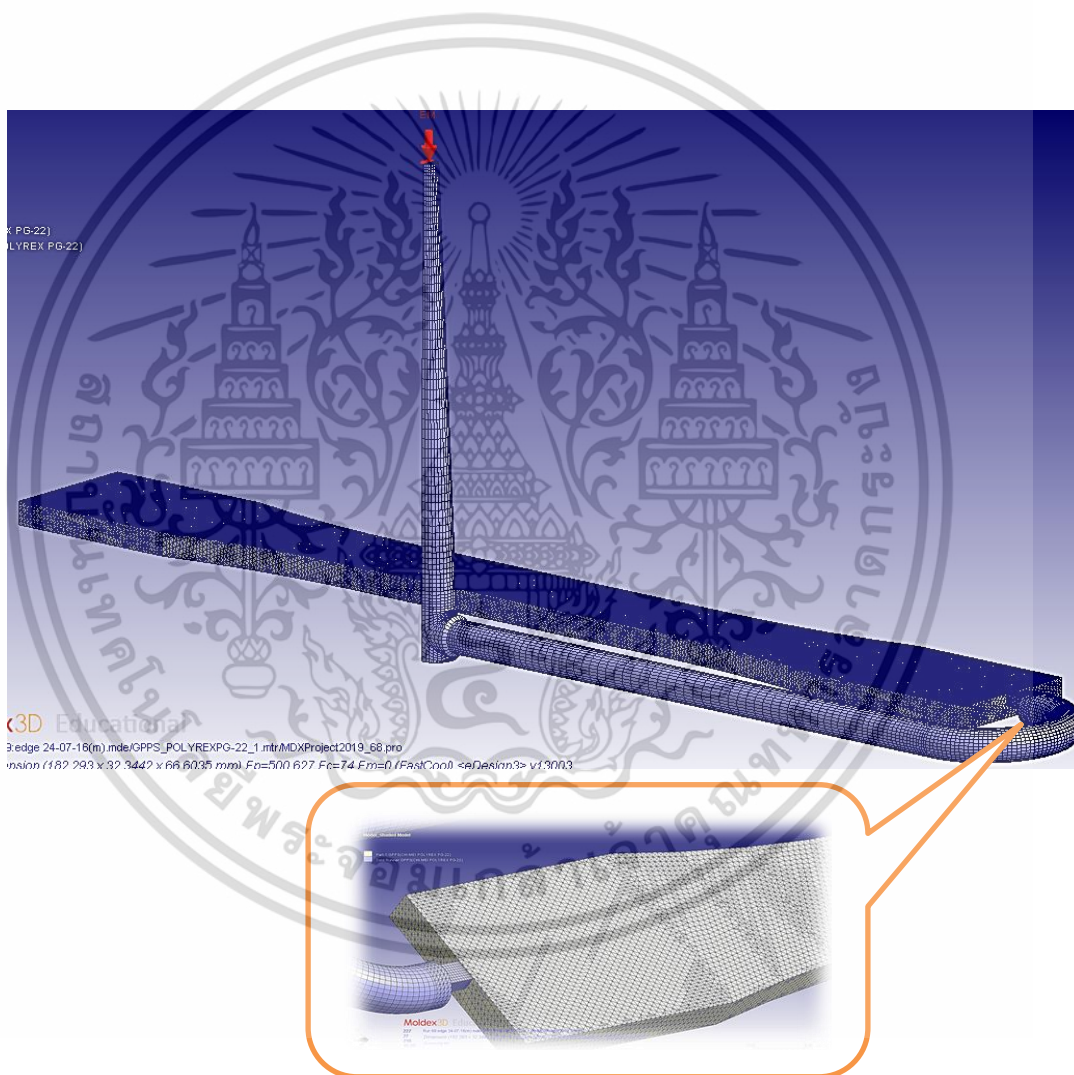
ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldex3D. R13

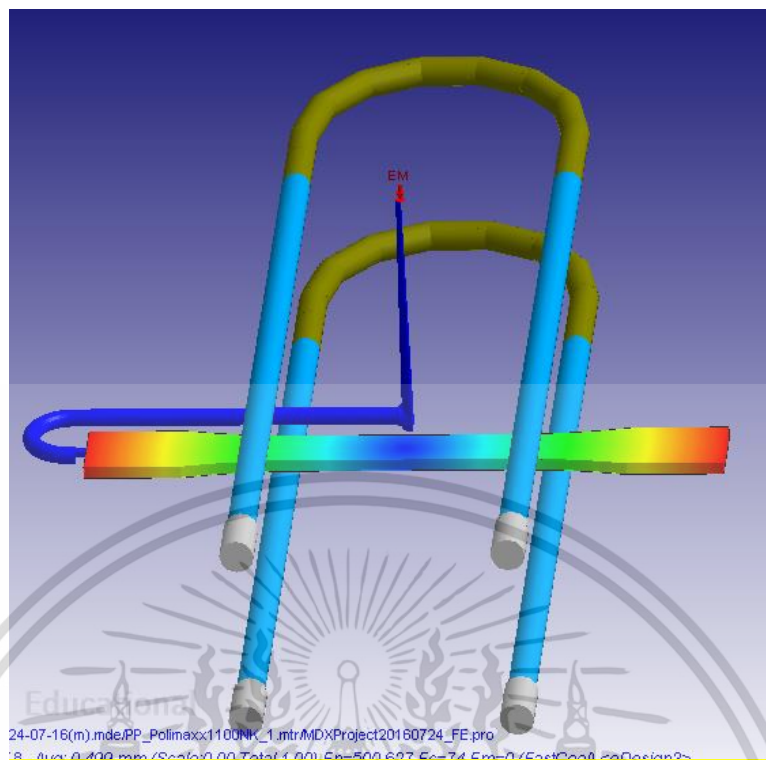
แบบจำลองสำหรับใช้วิเคราะห์ CAE [7]

1. เริ่มจากการสร้างแบบชิ้นงานเป็น Dog bone Model ผ่านโปรแกรม Solid work และแปลง Dog bone Model ให้เป็นไฟล์ข้อมูลสกุล STL File แล้วทำการส่งเข้าโปรแกรม Moldex3D Designer เพื่อทำการสร้าง Mesh Model ดังแสดงในรูปที่ ก-1 แล้วทำการออกแบบระบบหล่อเย็นให้กับชิ้นงานในกระบวนการฉีด ดังรูปที่ ก-2 แล้วหลังจากนั้นส่งไฟไปยังโปรแกรมการประมวลผลของ Moldex3D. R13 เพื่อวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติก



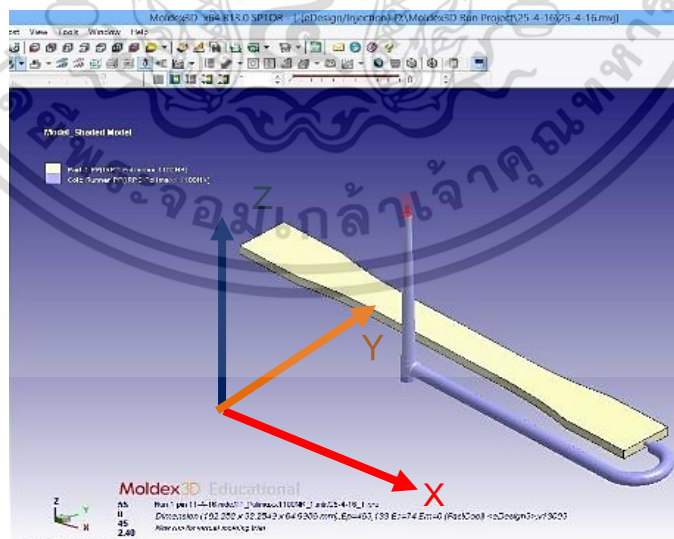
รูปที่ ก-1 การสร้าง Mesh Model แบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 การสร้างระบบหล่อเย็นในโปรแกรม Moldex3D Designer

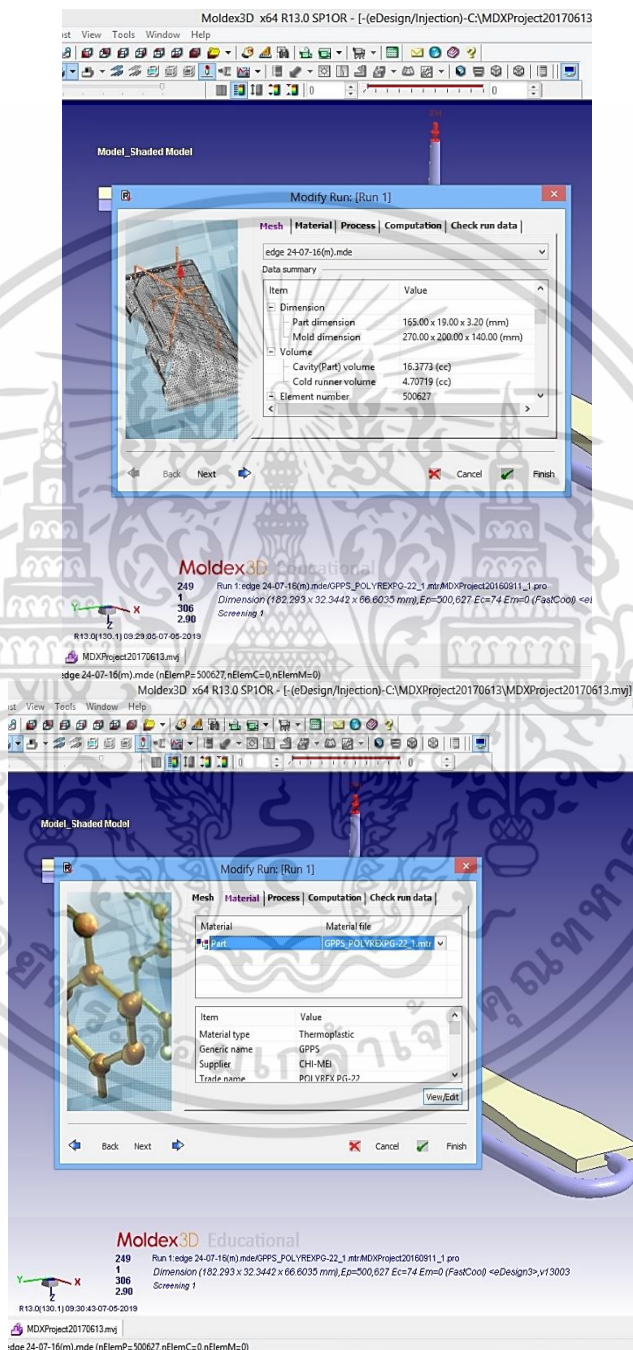
2. ในกระบวนการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติกโดยโปรแกรม Moldex3D R13 โดยนำไฟล์ชิ้นงานที่ได้ออกแบบจาก Moldex3D Design มาใช้ในการประมวลผลผ่าน Moldex3D R13 โดยตั้งพิกัดการจำลองการฉีด ดังรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 ไฟล์ชิ้นงาน Dog bone พร้อมระบบการฉีดในโปรแกรม Moldex3D R13

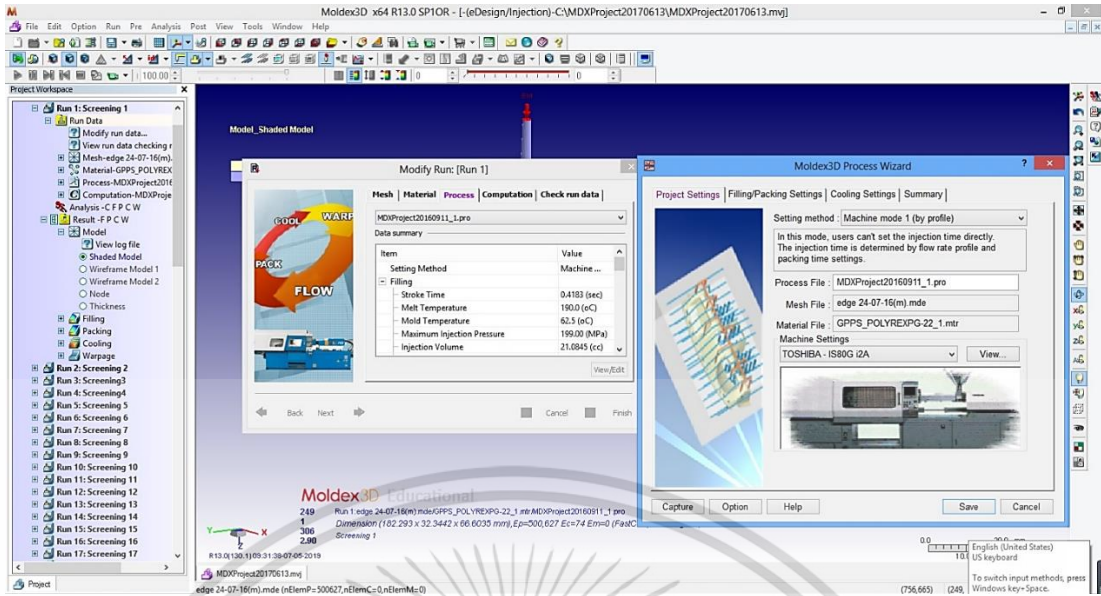
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการป้อน Project Setting เป็นกระบวนการตั้งชื่อไฟล์ และทำการเลือกวัสดุในการจำลองการฉีดพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติก โพลิสไตรีน ดังแสดงในรูปที่ ก-4 และทำการเลือกเครื่องจักรในแบบจำลองในกระบวนการฉีดซึ่งในที่นี้เลือก เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 ดังแสดงในรูปที่ ก-5



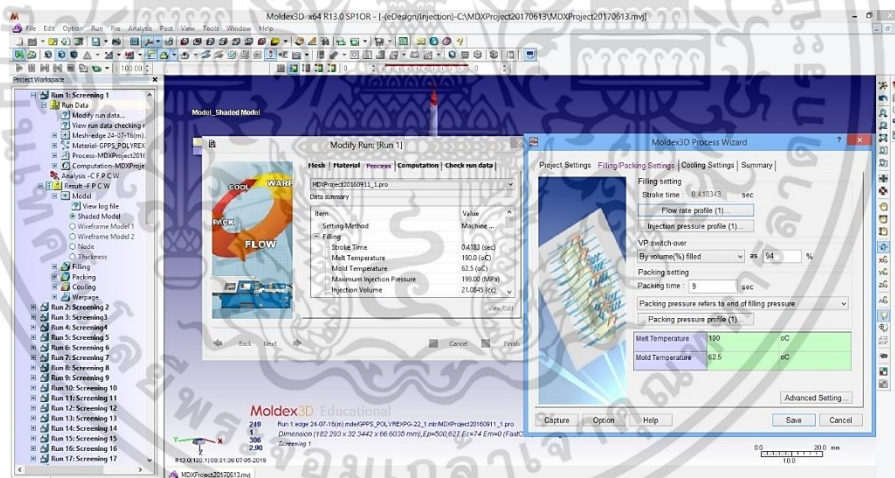
รูปที่ ก-4 แสดงการกำหนด Project Setting และกระบวนการเลือกชนิดพลาสติกในกระบวนการฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 แสดงการกำหนดเครื่องฉีดพลาสติก รุ่น TOSHIBA IS80 กระบวนการจำลองการฉีด

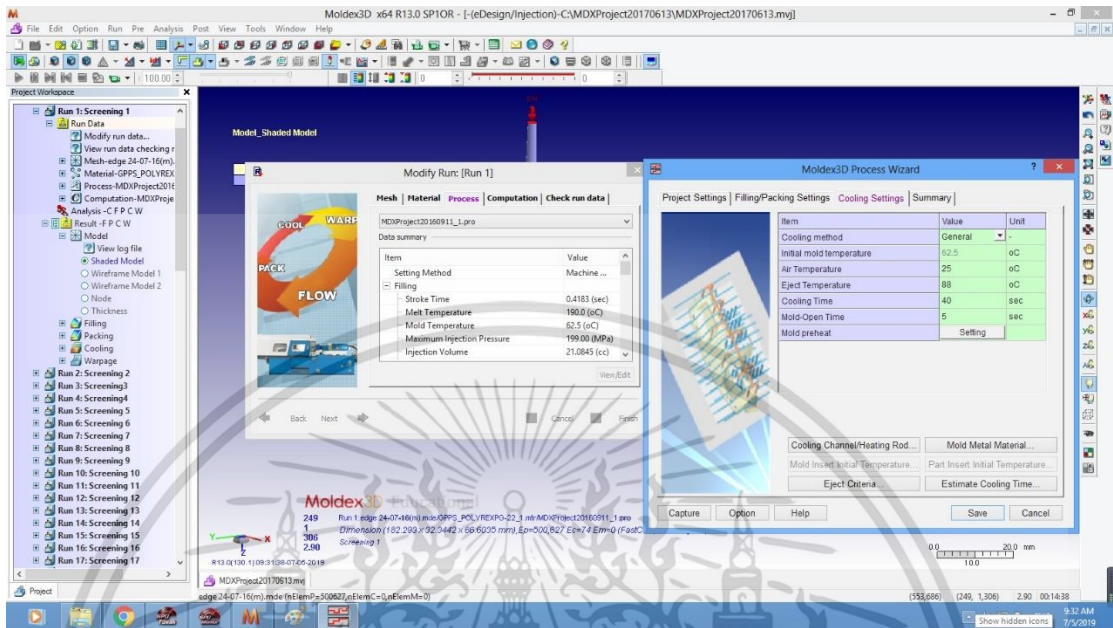
4. ทำการกรอกค่าปัจจัยควบคุม Filling และ Packing Setting ตามการกำหนดในการออกแบบการทดลองดังแสดงในรูปที่ ก-6



รูปที่ ก-6 แสดงการกำหนดค่า Filling และ Packing Setting

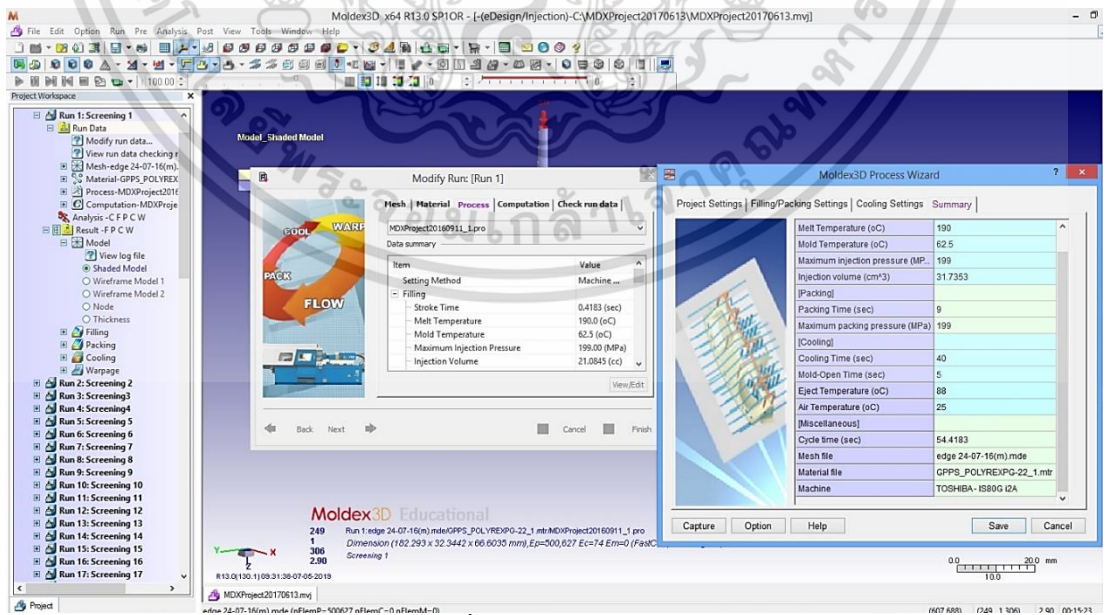
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการกรอกค่าปัจจัยควบคุม Cooling Setting ตามการกำหนดในการออกแบบการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก-7



รูปที่ ก-7 แสดงการกำหนดค่า Cooling Setting

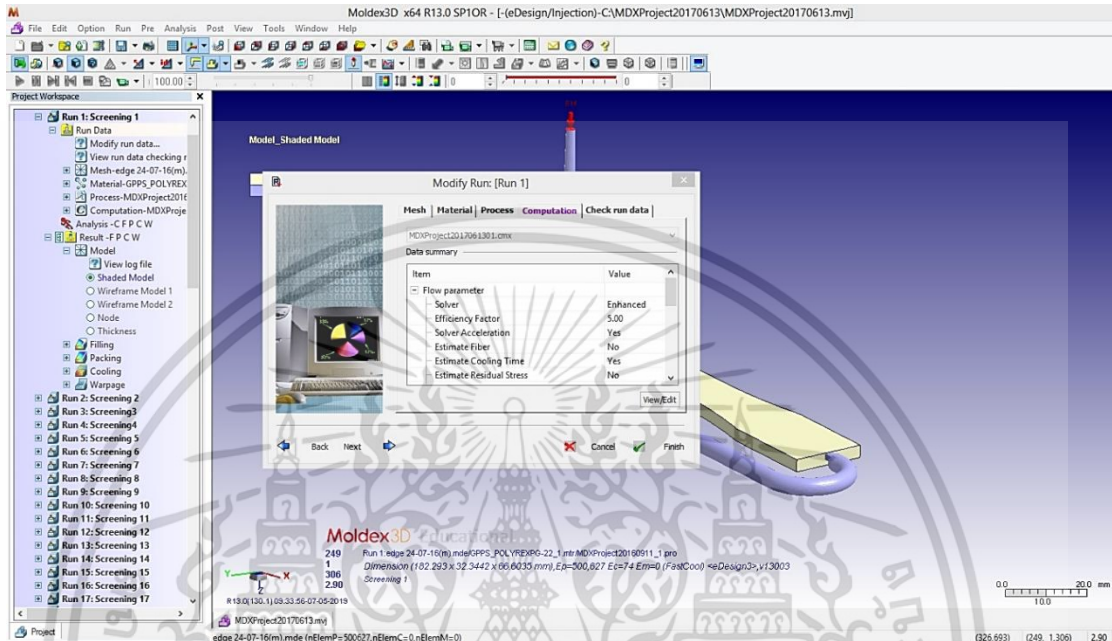
6. ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการกำหนดปัจจัยควบคุมต่างๆ ผ่านหน้าต่าง Summary หลังจากตรวจเช็คแล้วจึงทำการกดบันทึกดังแสดงในรูปที่ ก-8



รูปที่ ก-8 แสดงการสรุปค่าการปรับตั้งในกระบวนการจำลองการฉีด Summary Window

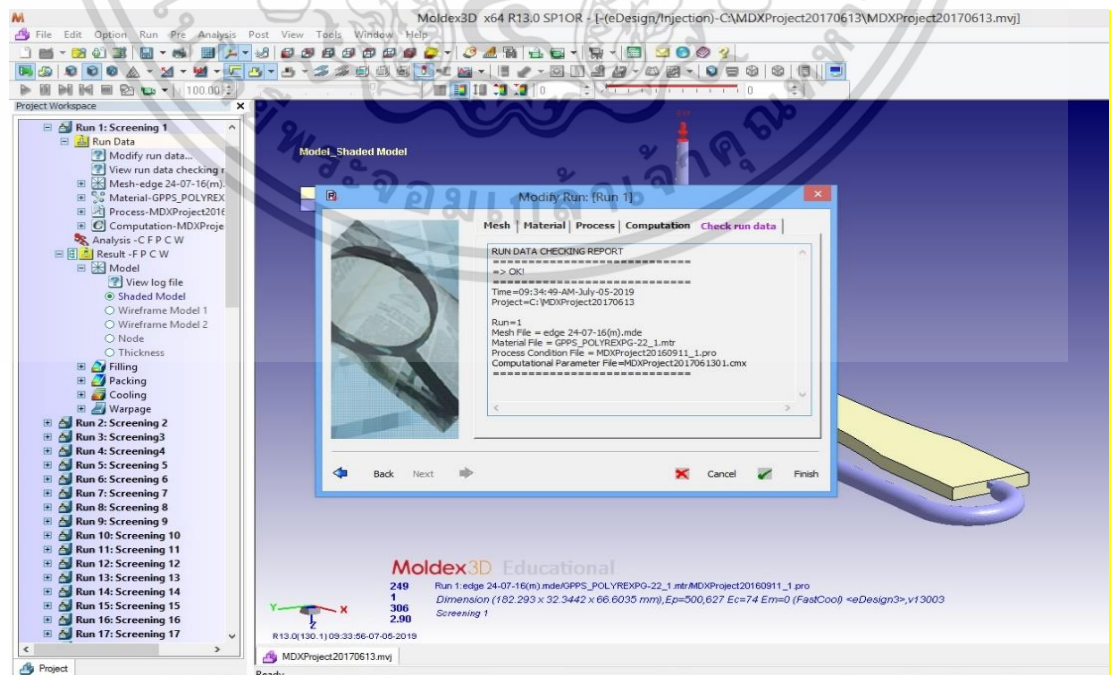
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หลังผ่านกระบวนการทั้ง 6 ขั้นตอน จึงเลือกคำสั่ง Modify Run ซึ่งเป็นคำสั่งในการใช้ป้อนคำสั่งให้ครบถ้วน โดยมีการตรวจสอบที่หน้าต่าง Computation อีกครั้งโดยหน้าต่างนี้สามารถที่จะเพิ่มเงื่อนไขในกระบวนการจำลองการฉีดเพิ่มเติมได้ เช่น การ Predict Gate Freeze Time การประเมินความเค้นตกค้าง (Residual Stress) เป็นต้น ซึ่งแสดงในรูปที่ ก-9



รูปที่ ก-9 แสดงหน้าต่าง Computation ในกระบวนการเลือกฟังก์ชันวิเคราะห์เพิ่มเติม

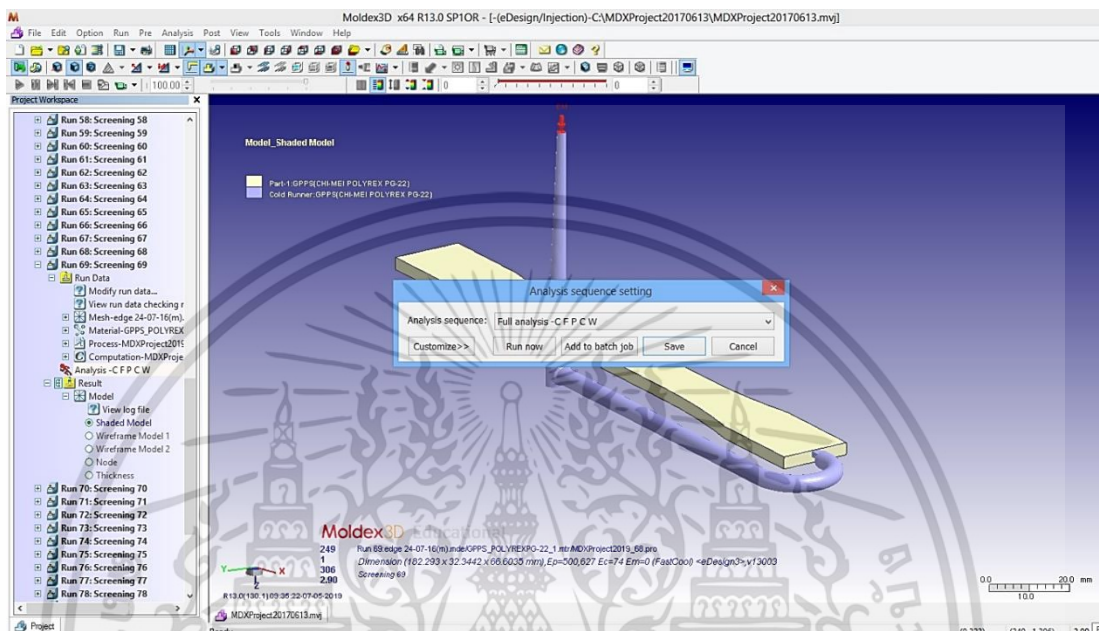
8. ในขั้นตอนก่อนทำการจำลองการฉีดจะต้องมาสู่หน้าต่างการตรวจสอบขั้นสุดท้าย Check Run Data ดังแสดงในรูปที่ ก-10



รูปที่ ก-10 แสดงหน้าต่าง Check Run Data ในกระบวนการจำลองการฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆ ไม่ควรแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ในขั้นตอนนี้คือการเลือกการจำลองการฉีดโดยเลือกคำสั่งการวิเคราะห์ที่ Analysis Sequence Setting โดยในกระบวนการวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การบิดงอของชิ้นงานหลังกระบวนการฉีดเสร็จ จึงเลือกการวิเคราะห์แบบ Full Analysis ซึ่งประกอบด้วย Cooling, Filling, Packing, Cooling และ Warpage เมื่อเลือกเสร็จสิ้นจึงทำการกดคำสั่ง Run ดังแสดงในรูปที่ ก-11



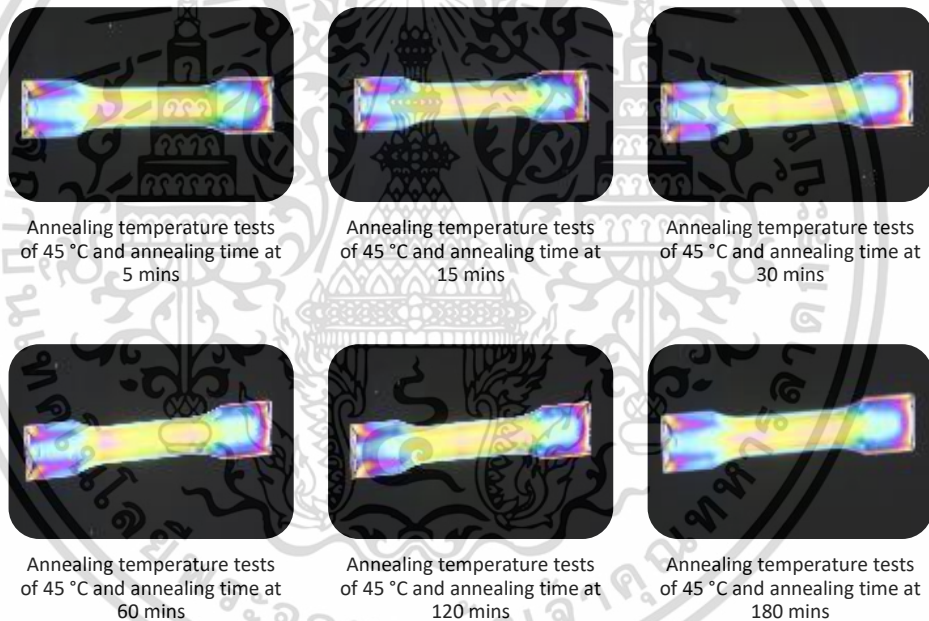
รูปที่ ก-11 แสดงหน้าต่าง Analysis Sequence Setting

หลังจากกระบวนการกดคำสั่งเสร็จสิ้น Moldex3D R13 จะทำการประมวลผลตามปัจจัยค่าควบคุมที่ได้มีการกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

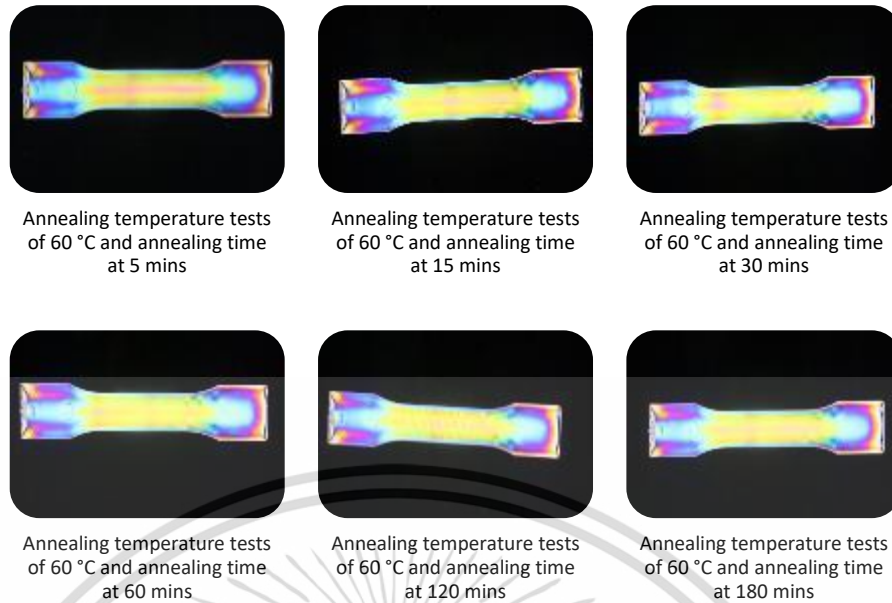
กระบวนการอบอ่อนชิ้นงาน Dog Bone

จากกระบวนการอบอ่อนในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 45 °C จนถึง 90 °C โดยจากรูป B.Q จนถึง B.Q6 จะพบว่าการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 45 °C ไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นตกค้างและการบิดงอของชิ้นงาน และถ้าสังเกตกระบวนการอบอ่อนที่ 85 °C และใช้เวลาในกระบวนการอบอ่อนที่ 180 นาที จะพบว่าภาพเป็นสีขาวนั้นเป็นการบ่งบอกว่าไม่มีความเค้นตกค้างแต่กลับพบว่าวัสดุเกิดการเสียรูปทำให้ไม่ถูกแสดงในงานวิจัยว่าควรอบอ่อนที่เวลา 180 นาที และในรูปที่ B.Q6 ไม่ถูกนำมาสรุปในงานวิจัยเหตุผลเพราะเมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิ 90 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกินกว่าอุณหภูมิการเสียรูปของวัสดุที่ 87 °C พบว่าชิ้นงานเกิดการเสียรูปถึงแม้ว่าความเค้นตกค้างจะถูกกำจัดออกแต่ชิ้นงานไม่คงสภาพเดิมจึงเป็นเหตุผลที่งานวิจัยนี้ไม่สรุปเอาการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 90 °C มาพิจารณา

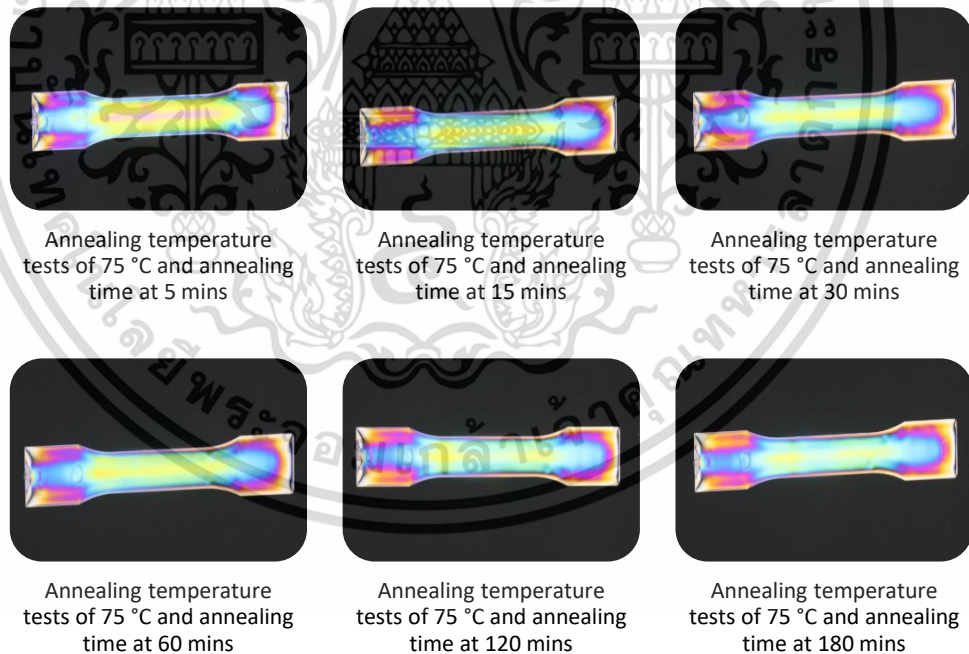


รูปที่ ก-12 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 45 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

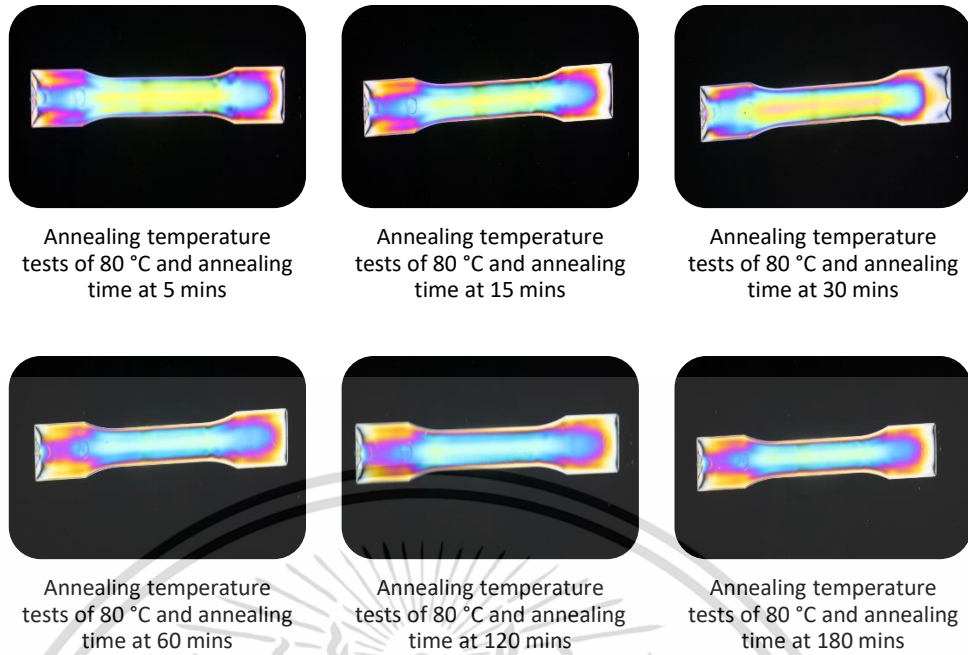


รูปที่ ก-13 แสดงผลค่าความเค้นตึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที

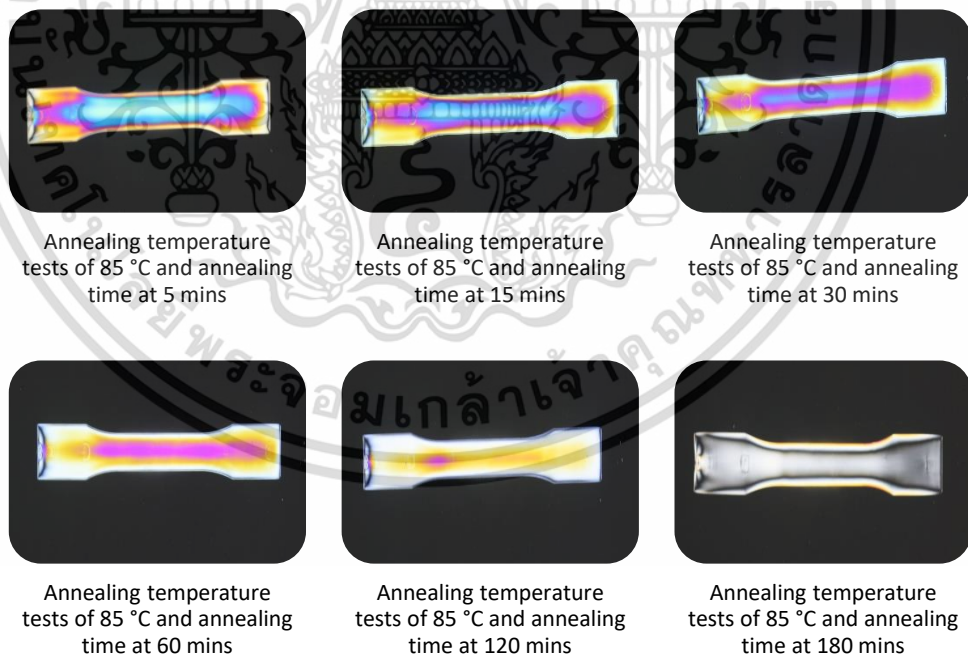


รูปที่ ก-14 แสดงผลค่าความเค้นตึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 75 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

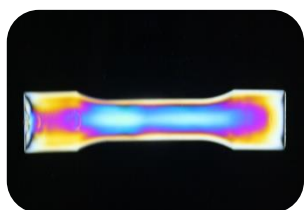


รูปที่ ก-15 แสดงผลค่าความเค้นตึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที



รูปที่ ก-16 แสดงผลค่าความเค้นตึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 85 °C และเวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



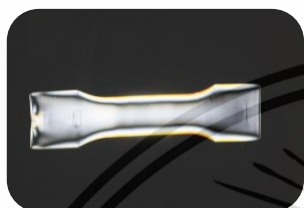
Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 5 mins



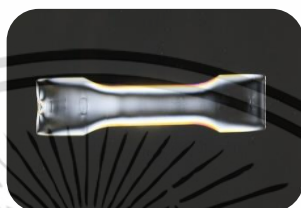
Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 15 mins



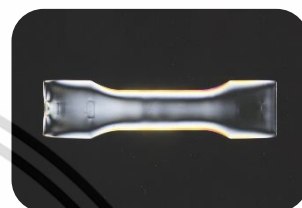
Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 30 mins



Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 60 mins



Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 120 mins



Annealing temperature tests of 90 °C and annealing time at 180 mins

รูปที่ ก-17 แสดงผลค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 90 °C และ เวลาในการอบอ่อนที่ 5,15,30,60,120, และ 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Firefly algorithm Matlab code

```

% parameters [n N_iteration alpha beta min gamma]
para=[50 200 0.2 0.5 0.5];

% Simple bounds/limits

disp('Solve the multi-objective problem of Injection molding process
parameters ...');

Lb=[20 3 60 170 55 20];
Ub=[70 15 80 210 70 60];

% Initial random guess
u0=Lb+(Ub-Lb).*rand(size(Lb));

[u,fval,NumEval]=ffa_mincon(@cost, @constraint,u0,Lb,Ub,para);

% Display results (best solution => u, best objective value => fval
bestsolution=u
bestobjb=fval
total_number_of_function_evaluations=NumEval

global w
    j=5;
for k=1:j,
    % Generate a weighting coefficient:w so that w1=w
    % Observations suggest that systematically monotonic weights are
    % better than random weights.
    w=k/j;
end;

%%% Put your own cost/objective function -----
-%%%

%% Cost or Objective function

% objectives

function [obj1]=Funobj(x)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

obj1=sum(((3.42463)-(0.00279545.*(x(1)))-(0.0420422.*(x(2)))-
(0.00944081.*(x(3)))-(0.0260773.*(x(4)))-
(0.000277235.*(x(5)))+(0.000446572.*(x(6)))...

+(0.00210853.*(x(2).^2)+(0.0000670173.*(x(4).^2))...

-(0.000083.*(x(1).*x(2)))-
(0.00002615.*(x(1).*x(3)))+(0.0000236125.*(x(1).*x(4)))+(0.0000068666
7.*(x(1).*x(5)))-
(0.000197604.*(x(2).*x(3)))+(0.000168802.*(x(2).*x(6)))+(0.0000550625
.*(x(3).*x(4)))-(0.0000217813.*(x(4).*x(6)))));

function z=cost(x)

    global w;

[obj1]=Funobj(x);

z=obj1;

function [g,geq]=constraint(x)

g=[];

% all nonlinear equality constraints should be here
% formation geq(1)= ....., geq(2)=...
% If no equality constraint at all, put geq=[] as follows
geq=[];

% Start FA

function [nbest,fbest,NumEval]=ffa_mincon(fhandle,nonhandle,u0, Lb,
Ub, para)

% Check input parameters (otherwise set as default values)
if nargin<6, para=[50 200 0.2 0.5 0.5]; end
if nargin<5, Ub=[]; end
if nargin<4, Lb=[]; end

if nargin<3,

    disp('Usage: FA_mincon(@cost, @constraint, u0, Lb, Ub, para)');

end

% n=number of fireflies

% MaxGeneration=number of pseudo time steps

% -----

% alpha=0.2;      % Randomness 0--1 (highly random)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% betamn=0.5;      % minimum value of beta

% gamma=0.5;      % Absorption coefficient

% -----

n=para(1);  MaxGeneration=para(2);

alpha=para(3); betamin=para(4); gamma=para(5);

% Total number of function evaluations
NumEval=n*MaxGeneration;

% Check if the upper bound and lower bound are of the same size
if length(Lb) ~=length(Ub),
    disp('Simple bounds/limits are improper!');
    return
end

% Calculate dimension
d=length(u0);
% Initial values of an array
zn=ones(n,1)*10^100;
% -----
% generating the initial locations of n fireflies
[ns,Lightn]=init_ffa(n,d,Lb,Ub,u0);
% Iterations or pseudo time marching
for k=1:MaxGeneration,      %%%% start iterations
% This line of reducing alpha is optional
    alpha=alpha_new(alpha,MaxGeneration);
% Evaluate new solutions (for all n fireflies)
for i=1:n,
    zn(i)=Fun(fhandle,nonhandle,ns(i,:));
    Lightn(i)=zn(i);
end
% Ranking the fireflies by their light intensity/objectives
[Lightn,Index]=sort(zn);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ns_tmp=ns;
for i=1:n,
    ns(i,:)=ns_tmp(Index(i),:);
end
%% Find the current best
nso=ns; Lighto=Lightn;
nbest=ns(1,:); Lightbest=Lightn(1);
% For output only
fbest=Lightbest;
% For debug and display, you can uncomment the following line
% nbest, fval=Lightn(1)
% Move all fireflies to the better locations
[ns]=ffa_move(n,d,ns,Lightn,nso,Lighto,nbest,Lightbest,alpha,betamin,
gamma,Lb,Ub);
end %%%% end of iterations
% The initial locations of n fireflies
function [ns,Lightn]=init_ffa(n,d,Lb,Ub,u0)
    % if there are bounds/limits,
if length(Lb)>0,
    for i=1:n,
        ns(i,:)=Lb+(Ub-Lb).*rand(1,d);
    end
else
    % generate solutions around the random guess
    for i=1:n,
        ns(i,:)=u0+randn(1,d);
    end
end
% initial value before function evaluations
Lightn=ones(n,1)*10^100;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Move all fireflies toward brighter ones

function
[ns]=ffa_move(n,d,ns,Lightn,nso,Lighto,nbest,Lightbest,alpha,betamin,
gamma,Lb,Ub)

% Scaling of the system

scale=abs(Ub-Lb);

% Updating fireflies

for i=1:n,

% The attractiveness parameter beta=exp(-gamma*r)

    for j=1:n,

        r=sqrt(sum((ns(i,:)-ns(j,:)).^2));

        % Update moves

        if Lightn(i)>Lighto(j), % Brighter and more attractive
            % Here betamin is necessary. If betamin is too small (say 0)
            % then, the movement towards the global best is too slow
            beta0=1; beta=(beta0-betamin)*exp(-gamma*r.^2)+betamin;
            tmpf=alpha.*(rand(1,d)-0.5).*scale;
            ns(i,:)=ns(i,:).*(1-beta)+nso(j,:).*beta+tmpf;
        end
    end % end for j;
end % end for i

% Check if the updated solutions/locations are within limits

[ns]=findlimits(n,ns,Lb,Ub);

% This function is optional, as it is not part of the original FA

% The main idea to reduce randomness is to increase the convergence,

% however, if you reduce randomness too quickly, then premature

% convergence can occur. So use with care.

function alpha=alpha_new(alpha,NGen)

% alpha_n=alpha_0(1-delta)^NGen=0.005

% alpha_0=0.9

delta=1-(10^(-4)/0.9)^(1/NGen);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

alpha=(1-delta)*alpha;

% Make sure the fireflies are within the bounds/limits
function [ns]=findlimits(n,ns,Lb,Ub)
for i=1:n,
    % Apply the lower bound
    ns_tmp=ns(i,:);
    I=ns_tmp<Lb;
    ns_tmp(I)=Lb(I);
    % Apply the upper bounds
    J=ns_tmp>Ub;
    ns_tmp(J)=Ub(J);
    % Update this new move
    ns(i,:)=ns_tmp;
end
% -----
% d-dimensional objective function
function z=Fun(fhandle,nonhandle,u)
% Objective
z=fhandle(u);
% Apply nonlinear constraints by penalty method
%  $Z=f+\sum_{k=1}^N \lambda_k g_k^2 * H(g_k)$  where  $\lambda_k \gg 1$ 
z=z+getnonlinear(nonhandle,u);
function Z=getnonlinear(nonhandle,u)
Z=0;
% Penalty constant  $\gg 1$ 
lam=10^15; lameq=10^15;
% Get nonlinear constraints
[g,geq]=nonhandle(u);
% Apply all inequality constraints as a penalty function
for k=1:length(g),

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Z=Z+ lam*g(k)^2*getH(g(k));

end

% Apply all equality constraints (when geq=[], length->0)
for k=1:length(geq),

    Z=Z+lameq*geq(k)^2*geteqH(geq(k));

end

% Test if inequalities hold so as to get the value of the Index
function

% H(g) which is something like Index functions as in interior-point
methods

function H=getH(g)
if g<=0,
    H=0;
else
    H=1;
end
% Test if equalities hold
function H=geteqH(g)
if g==0,
    H=0;
else
    H=1;
end

===== End of Firefly Algorithm implementation =====

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with genetic algorithm and firefly algorithm techniques

Supattarachai Sudsawat & Wipoo Sriseubsai*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Received 15 February 2016; accepted 27 January 2017

This goal of this paper is an optimization approach to generate suitable process setting of multi responses of the minimization of warpage and volume shrinkage in the plastic injection molding (PIM). Central composite design (CCD) was employed to handle the orthogonal array for experimental test runs and using the response surface methodology (RSM) to construct response surface equation model. Then the optimization methods of firefly algorithm (FA) that have never been applied to minimize warpage and volume shrinkage in the plastic injection molding (PIM) and genetic algorithm (GA) were employed to optimal parameter conditions with fitness function generated from RSM. Simulation software Moldex 3D and plastic injection machine were used as the experimental tests to show the comparison of the optimal performance of both metaheuristic algorithms. The results showed that the firefly algorithm created the suitable process parameters to meet the minimization of warpage and volume shrinkage better than the popular genetic algorithm for this study. It can be concluded that FA is very proper to approach the good performance in PIM.

Keywords: Plastic injection molding (PIM), Response surface methodology (RSM), Genetic algorithm (GA), Firefly algorithm (FA), Moldex 3D simulation

Nowadays, plastic injection molding (PIM) is used to form the major part in many areas of industry because it can easily meet various requirements such as the wide variation of geometry, low unit cost to produce compared with others, short production cycle time, and perfect surface quality of the products. Therefore, for these reasons it is not surprising that PIM has been mainly used to produce plastic products. In PIM process, loss during the operation is an obstacle that may lead to a tendency of higher product cycle time, cost, and dissatisfied customers. Warpage and volume shrinkage are among the most significant defects. The intensity of these losses is highly involved with the parameter setting in the injection molding operation¹.

Many researchers studied, and recommended the method to avoid an occurrence of warpage and volume shrinkage based on the finite volume analysis method, computer-aided engineering (CAE) simulation, and practical experiments². Chaing and Chang¹ investigated the relationship between shrinkage and warpage in injection-molded parts via various process parameters

being mold temperature, packing time, packing pressure and cooling time. It was found that mold temperature was significant.

The volume shrinkage was increased as the mold temperature increased, and the mold temperature range from 45°C to 55°C was suitable or minimum warpage values, but the velocity injection was not considered. Zhao *et al.*³ did a study of the correlation of warpage, shrinkage, and sink marks. The research result could indicate that warpage and shrinkage were significant trade-off, whereas warpage and sink index or shrinkage and sink index were not both significant trade-off. Santos *et al.*⁴ tried to improve the volume shrinkage and warpage problems of polymeric composite reinforced by using short natural fibers. The results found that the short natural fiber can continually decrease the problems as the percentage of short natural fiber increases, but this research did not pay attention to the process parameters in PIM. Chiang *et al.*⁵ researched the minimization of warpage by using material test between acrylonitrile-butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC)+ABS based on process conditions such as melt temperature, injection speed, and packing pressure. The results found that

*Corresponding author (Email: wipoo.sr@kmitl.ac.th, s.supattarachai@gmail.com)

melt temperature was the most important factor to minimize warpage and ABS was more suitable material than PC+ABS. This research could not find that mold temperature, injection pressure, packing time, and cooling time were considered. Much research employed a mathematical model to use statistical analysis and optimization methods to manage loss problems such as warpage, volume shrinkage, sink index, and short shot. The optimization techniques can mainly be classified as five techniques, namely the Taguchi technique for design of experiments, modern computational techniques, hard computing techniques, real time techniques, and soft computing techniques⁶. Zheng *et al.*⁷ used the Taguchi experimental method to minimize warpage by using an L27(3³) orthogonal array to construct experimental tests. Then there was an investigation of the process parameters such as mold temperature, melt temperature, and packing pressure, but cooling time and injection pressure were not considered. There was use of computer-aided engineering (CAE) to determine the extent of warpage. The results show the warpage value from the Taguchi method was less than the amount of warpage when there was a recommendation of process parameters. Erzurumlu and Ozeelik⁸ studied the minimization of warpage and sink index by using the Taguchi optimization technique via process conditions such as mold temperature, melt temperature, packing pressure, rib cross-section types, and rib layout angles, but packing time, cooling time and other factors were not considered. The experimental result could confirm that this technique gained the minimum warpage and sink index. Lam *et al.*⁹ used the modern computational techniques via Moldflow commercial simulation software to investigate the suitable process conditions. The results indicated that software could find the nearest process condition compared with the optimal result, but the cooling system was not added in the consideration. Lin and Lian¹⁰ used self-organizing fuzzy controller (SOFC) for PIM operation by controlling injection screw velocity and injection-nozzle holding pressure. The results found that this controller can reduce the loss problems such as shrinkage and residual stress more than the controlled process with fuzzy logic controller (FLC) and the proportional-integral-derivation (PID). The soft computing technique that has been popularly used in PIM operation can be separated into three parts as artificial neural network (ANN), evolutionary algorithm (EA), and hybrid approaches⁶. Shi *et al.*¹¹,

used the ANN to solve the warpage problem and used Moldflow Corporation's Plastics Insight software to analyze the problem. The results show the effective optimization of parameters in PIM for producing TV covers and plastic lenses as a quick approach. Guo *et al.*² investigated the minimization of sink mark depth via design of experiment (DOE) integrated with evolutionary algorithm (as genetic algorithm, GA) to solve the problem by considering mold temperature, packing pressure, coolant temperature, rib thickness, etc., but injection pressure was not considered. The results illustrate the good performance of minimized sink mark. Xu *et al.*¹² used another evolutionary algorithm (as particle swarm optimization, PSO) to find suitable process parameters. The results found that it was suitable for multi-objective optimization of PIM process. Hybrid approaches were also another choice for improving loss problems in PIM process. For example, Ozeelik and Erzurumlu¹³ used a hybrid of neural network model and genetic algorithm to seek the warpage optimization. This algorithm can improve the warpage problem by 51%. Deng *et al.*¹⁴ made a study of a hybrid optimization by combining a mode-pursuing sampling (MPS) and genetic algorithm to minimize the warpage of injection molded plastic parts. This approach considered mold temperature, melt temperature, injection time, and packing pressure; research results showed good performance as minimization of warpage and the time-consuming CAE simulation. Presently, soft computing techniques were widely applied in PIM process to improve process qualities as mentioned. Another soft computing technique is firefly algorithms that can afford perfectly complex nonlinear problems¹⁵. Yang¹⁶ created the firefly algorithm (FA) by simulating firefly nature behavior. This algorithm was proved and compared with other metaheuristics such as genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO). The results found that FA could give better and quicker convergence answers toward the optimality¹⁵.

The purpose of this research was to minimize the warpage and volume shrinkage by seeking an optimization model of process parameters via metaheuristic methodology through the comparison of popular genetic algorithm and firefly algorithm to lead to better performance. Central composite design (CCD) was used to design the experiment as 84 runs. Then an example part was employed to simulation software Moldex 3D to get the simulated data. Genetic algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and firefly algorithm were employed to minimize warpage and volume shrinkage for plastic injection molding process (PIM) and the results of both algorithms were compared by empirical tests through injection molding machine. Finally, the direct utilization of this research work will provide appropriate parameter setting for injection molding operators.

Materials and Part

To approach the finite volume analysis, a 3D wrench model part in this study was illustrated in solidworks, as shown in Fig. 1. The dimension of this work-piece was 121.33 mm x 4.01 mm x 72.85 mm. General purpose polystyrene (GPPS) was chosen from the Moldex 3D software, and the manufacturer was CHI-MEI Co. Ltd. The material properties are presented in Table 1. The size characteristics of model part, cooling, modeling and meshing process performed by Moldex 3D shown

in Fig. 2. The simulated model of the part consists of 191,786 elements. The pin gate and water cooling system were established in Moldex 3D software following common gate and cooling system design and creating actual injection mold shown in Fig. 3 for empirical tests.

Experimental Methodology

The research methodology can be summarized clearly as a flow chart which is illustrated in Fig. 4. The first step, experimental orthogonal array is created by central composite design (CCD), and second, the predicted model is established by



Fig. 1 — A 3D wrench example part

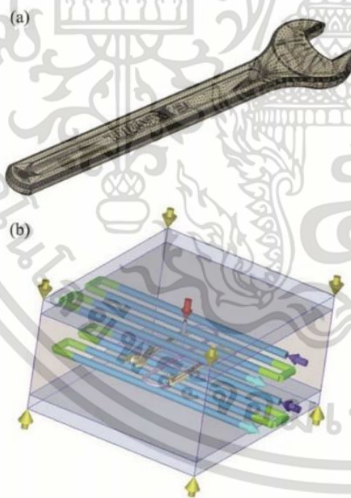


Fig. 2 — Mesh element (a) Part and cooling line (b)



Fig. 3 — Toshiba 80T injection molding machine

Table 1 — Material properties of general purpose polystyrene (GPPS) (PG-22, CHI MEI corporation, Taiwan)

Physical Properties			
Properties	Method	Unit	Value
Melt flow index (5kg/230°C)	ASTM D1238	g / 10 min	17.5
Izod impact strength (6.4mm/23°C)	ASTM D256 (Notched)	kg-cm/cm	1.4
Tensile strength at yield (6mm/min)	ASTM D638	kg/cm ²	425
Flexural strength at yield (6mm/min)	ASTM D790	kg/cm ²	540
Flexural modulus (2.8mm/min)	ASTM D790	10 ⁴ kg/cm ²	3.1
Rockwell Hardness	ASTM D785	M-Scale	74
Heat distortion temperature (Unannealed)	ASTM D648	°C	75
Vicat softening point (1kg/50°C/h)	ASTM D1525	°C	87
Chemical properties			
Chemical name	CAS number	EC number	Percent weight
Polystyrene or styrene polymer	9003-53-6	Polymer	> 95%
Additives	-	-	≤ 5%
Processing technique			
Ejection temperature		108°C	
Processing temperature		170 – 210°C	
Mold temperature		40 - 70°C	
Freeze temperature		117° C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

response surface methodology (RSM). Then the predicted model is applied into Genetic algorithm and Firefly algorithm to seek the minimization of warpage and volume shrinkage. In the last step, the comparison of the results of both algorithms is made to find the smallest warpage and volume shrinkage through Toshiba 80T injection molding machine as shown in Fig. 3.

Central composite design of process parameters

In this research, central composite design (CCD) is used to design experimental tests run on Moldex 3D software. CCD is well known as a designer of experiment arrays to produce the quadratic model of RSM^{1,17}.

To indicate the effect of process parameters on warpage and volume shrinkage of PIM, the

parameters in Table 2 are selected for consideration. According to the CCD design experiment method, seven factors are classified to be three levels as shown in Table 2, and consist of fourteen star points, and six central points, and α value of 1 according to Chiang and Change's research methodology¹. Then the 84 experimental runs are established based on the CCD method as given in Table 3.

Creating predicted model

Before going to the optimization methodology step, the response surface methodology has to establish the nonlinear mathematical model based on polynomial equation for warpage and volume shrinkage as shown in Eqs (1) and (2), respectively.

Table 2 — Processing parameters and levels

Number	Factors	Levels		
		Low	Median	High
1	Melt temperature (A) (°C)	170	190	210
2	Mold temperature (B) (°C)	40	55	70
3	Flow rate profile (C) (%)	10	30	50
4	Injection pressure (D) (%)	40	60	80
5	Packing time (E) (s)	1	5	10
6	Packing pressure (F) (%)	20	50	80
7	Cooling time (G) (s)	10	27.5	45

Addition: Water coolant temperature is constant as 55°C
 Maximum injection and packing pressures equal to 199 Mpa following Toshiba 80T Injection molding machine specification

$$W = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{i<j}^k A_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} X_i^2 \quad \dots (1)$$

$$V = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i<j}^k B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2 \quad \dots (2)$$

where X_i is independent variables, W represents warpage response, V represents volume shrinkage response, k is the number of design variables, A_0 and B_0 are the coefficients of constant, A_i and B_i are the coefficients of linear, A_{ij} and B_{ij} are the coefficients of cross product term, and A_{ii} and B_{ii} are the coefficients of quadratic.

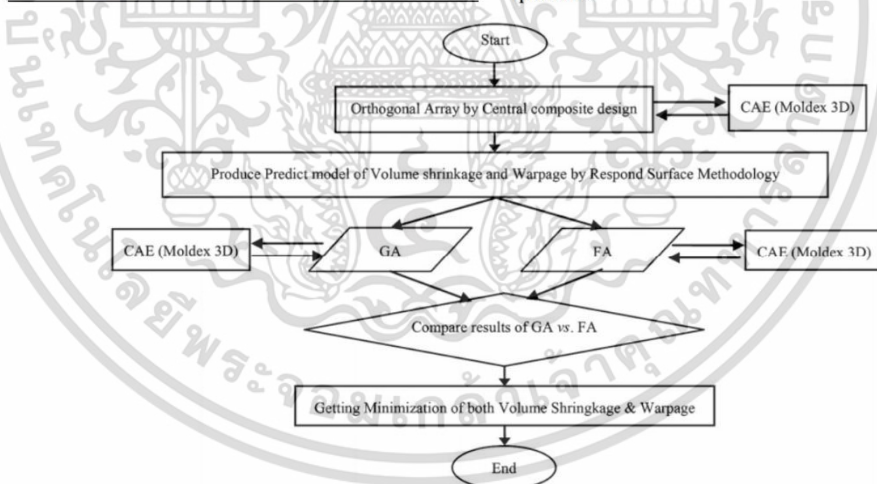


Fig. 4 — Flow chart of methodology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Genetic algorithm established

After creating predicted fitness model, GA is implemented. GA is one of the stochastic search algorithms based on natural genetic behavior. In GA, each solution is encoded, which is called a chromosome. GA will construct the initial population of chromosomes from the predicted fitness model via cost function, then crossover and mutation mechanism will be employed in the algorithm². Pareto-optimal solution will be selected for the best solution as shown in Fig. 5(a).

Firefly algorithm established

In the same way as GA, after gaining fitness function from RSM methodology, it will be employed to be a multi-objective function (warpage and volume shrinkage) in firefly algorithm (FA). Firstly FA creates the initial population of n fireflies as represented in the search space of solutions and sets parameters of the attractiveness, light absorption coefficient, and randomization factor. Then the evaluate fitness is employed by calculating the intensity, relative brightness, and attraction and next the best fitness through firefly algorithm is ranked¹⁵. Then the methodology provides the best solution of minimization of warpage and shrinkage. The flow chart of the algorithm is shown in Fig. 5(b).

Optimal model

Optimized plastic injection parameters and minimized the warpage and volume shrinkage can be stated in Eq. (3) and Eq. (4) respectively.

$$\text{Find } X = [A, B, C, D, E, F, G] \quad \dots (3)$$

$$\text{Minimize } f(X) = W \text{ and } f(X) = V \quad \dots (4)$$

Subject to: $170 \leq A \leq 210 \leq ^\circ\text{C}$, $40 \leq B \leq 70^\circ\text{C}$

$$1 \leq C \leq 50\%$$
, $40 \leq D \leq 80\%$

$$1 \leq E \leq 10\text{s}$$
, $20 \leq F \leq 80\%$

$$10 \leq G \leq 45\text{s}$$

Based on 199 MPa maximum of both injection and packing pressures following Toshiba 80T Injection molding machine specification, $f(X)$ represents the quantified warpage and volume shrinkage of the experimental part.

Results and Discussion

RSM through CCD method

The 84 experimental tests were established according to CCD method. Table 3 shows the results based on Moldex 3D simulation. Then this result was used to create the predicted models of warpage and

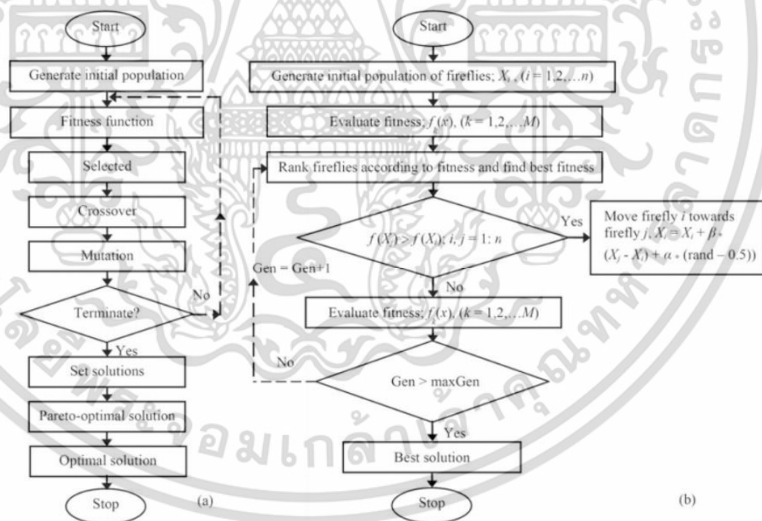


Fig. 5 — Flow chart of multi-objective grouping genetic algorithm (a) and multi-objective firefly algorithm (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 — Design and result of central composite design experiments

No.	A	B	C	D	E	F	G	Volume shrinkage (%)	Warping (mm)
1	170	40	10	40	1	60	10	5.497	0.573
2	170	40	50	40	5	60	10	4.953	0.522
3	190	70	30	60	3	45	21	4.382	0.485
4	190	55	30	60	5	45	21	4.102	0.473
5	210	40	50	80	1	60	32	4.055	0.528
6	170	70	50	80	1	30	10	5.472	0.569
7	170	70	50	80	5	60	10	4.953	0.522
8	190	55	10	60	3	45	21	4.383	0.485
9	190	55	30	60	1	45	21	4.668	0.496
10	170	70	50	40	5	30	10	4.907	0.514
11	170	70	10	80	5	60	32	2.852	0.444
12	170	70	10	40	5	60	10	4.953	0.522
13	210	55	30	60	3	45	21	5.219	0.551
14	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
15	170	70	10	80	1	60	10	5.497	0.573
16	210	40	10	40	1	30	10	7.189	0.704
17	210	70	10	40	1	60	10	7.206	0.707
18	210	70	10	40	5	60	32	3.622	0.516
19	190	55	30	80	3	45	21	4.383	0.485
20	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
21	190	55	30	60	3	60	21	4.398	0.487
22	190	55	30	40	3	45	21	4.383	0.485
23	210	40	10	80	5	60	32	3.623	0.516
24	170	40	10	80	5	60	10	4.953	0.522
25	170	70	50	40	1	60	10	5.497	0.573
26	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
27	170	70	10	80	5	30	10	4.907	0.514
28	210	70	10	80	5	60	10	6.546	0.618
29	210	40	50	80	5	60	10	6.546	0.618
30	210	40	10	80	1	30	32	4.045	0.526
31	210	40	10	80	1	60	10	7.206	0.707
32	170	40	10	80	5	30	32	2.809	0.436
33	210	70	10	40	1	30	32	4.044	0.526
34	210	70	10	80	5	30	32	3.612	0.514
35	170	70	50	40	5	60	32	2.852	0.444
36	210	70	50	80	1	30	32	4.044	0.526
37	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
38	170	70	10	40	1	30	10	5.472	0.569
39	170	70	10	80	1	30	32	3.002	0.454
40	210	70	50	40	5	60	10	6.546	0.618
41	170	70	50	80	1	60	32	3.021	0.457
42	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
43	210	70	50	40	1	60	32	4.055	0.528
44	170	40	50	80	1	60	10	5.497	0.573
45	210	70	50	80	5	30	10	6.526	0.616
46	170	40	10	40	1	30	32	3.003	0.454
47	190	40	30	60	3	45	21	4.382	0.485
48	210	70	50	80	5	60	32	3.622	0.516
49	210	70	10	40	5	30	10	6.526	0.616
50	210	40	50	80	5	30	32	3.613	0.514
51	170	40	50	80	5	30	10	4.907	0.514
52	170	40	10	80	1	30	10	5.477	0.570
53	210	70	10	80	1	60	32	4.055	0.528
54	210	40	50	40	5	60	32	3.623	0.516
55	170	40	50	40	1	30	10	5.477	0.570
56	210	70	50	80	1	60	10	7.206	0.707

Contd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 — Design and result of central composite design experiments

No.	A	B	C	D	E	F	G	Volume shrinkage (%)	Warpage (mm)
57	210	40	50	40	1	30	32	4.045	0.526
58	210	40	50	40	5	30	10	6.527	0.616
59	170	40	50	80	1	30	32	3.003	0.454
60	170	40	10	40	5	30	10	4.907	0.514
61	210	70	10	80	1	30	10	7.189	0.704
62	210	40	50	80	1	30	10	7.189	0.704
63	210	40	10	40	5	30	32	3.613	0.514
64	210	70	50	40	1	30	10	7.189	0.704
65	190	55	30	60	3	45	32	3.151	0.455
66	210	40	10	40	5	60	10	6.546	0.618
67	190	55	50	60	3	45	21	4.383	0.485
68	170	40	10	40	5	60	32	2.852	0.444
69	170	70	50	80	5	30	32	2.809	0.436
70	170	70	50	40	1	30	32	3.002	0.454
71	170	70	10	40	5	30	32	2.809	0.436
72	170	55	30	60	3	45	21	3.829	0.474
73	210	40	50	40	1	60	10	7.206	0.707
74	170	40	50	40	1	60	32	3.021	0.457
75	210	40	10	80	5	30	10	6.527	0.616
76	210	70	50	40	5	30	32	3.612	0.514
77	190	55	30	60	3	30	21	4.373	0.483
78	170	40	50	40	5	30	32	2.809	0.436
79	190	55	30	60	3	45	21	4.383	0.485
80	170	40	50	80	5	60	32	2.852	0.444
81	210	40	10	40	1	60	32	4.055	0.528
82	170	40	10	80	1	60	32	3.021	0.457
83	170	70	10	40	1	60	32	3.021	0.457
84	190	55	30	60	3	45	10	5.940	0.574

Table 4 — NOVA table for volume shrinkage (after backward elimination)

Source	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	152.124	16.903	28874.56	0
Linear	4	148.016	37.004	63213.4	0
A	1	27.411	27.411	46826.12	0
E	1	3.505	3.505	5987.89	0
F	1	0.009	0.009	15.47	0
G	1	117.091	117.091	200024.1	0
Square	2	1.388	0.694	1185.13	0
A*A	1	0.086	0.086	146.1	0
G*G	1	0.111	0.111	190.45	0
2-Way Interaction	3	2.72	0.907	1549.04	0
A*E	1	0.127	0.127	217.11	0
A*G	1	2.229	2.229	3807.85	0
E*G	1	0.364	0.364	622.18	0
Error	74	0.043	0.001		
Lack-of-Fit	69	0.043	0.001		
Pure Error	5	0	0		

Addition: S = 0.0241947, R-Sq = 99.97%, R-Sq(adjust) = 99.97%, R-Sq(prediction) = 99.96%

volume shrinkage. Analysis of variance (ANOVA) was selected to consider the significance of the model terms for warpage and volume shrinkage in Tables 4 and 5, respectively. The term “Seq SS” is the sum of squares for each term. It is used to validate of the data. “df” refers to degrees of freedom used to

contribute to the error prediction. “Adj SS” is adjusted sum of squares that is used to be a sign after removing insignificant terms from the model. “Adj Ms” is adjusted mean squared for a term. Then both models are processed using the backward term elimination, which means some of the terms that are not significant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5 – ANOVA table for warpage (after backward elimination)

Source	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.4754	0.052822	1999.64	0
Linear	4	0.407981	0.101995	3861.13	0
A	1	0.146981	0.146981	5564.1	0
E	1	0.028821	0.028821	1091.05	0
F	1	0.000281	0.000281	10.62	0.002
G	1	0.231899	0.231899	8778.75	0
Square	2	0.045778	0.022889	866.48	0
A*A	1	0.003	0.003	113.56	0
G*G	1	0.003482	0.003482	131.83	0
2-Way Interaction	3	0.021641	0.007214	273.07	0
A*E	1	0.001027	0.001027	38.89	0
A*G	1	0.00756	0.00756	286.2	0
E*G	1	0.013053	0.013053	494.14	0
Error	74	0.001955	0.000026		
Lack-of-Fit	69	0.001955	0.000028		
Pure Error	5	0	0		

Addition: S = 0.0051396, R-Sq = 99.59%, R-Sq(adjust) = 99.54%, R-Sq(prediction) = 99.45%

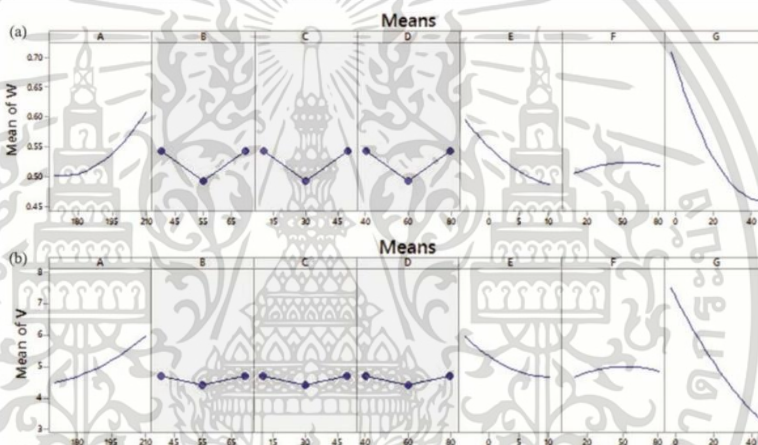


Fig. 6— Main Effects Plots for warpage problem (a) and volume shrinkage problem (b) Addition: a gray background represents a term not in the model

are cut. Finally, Tables 4 and 5 show that “*P-value*” is less than 0,05 and the values of “*R-Sq (prediction)*” were more than 99% of both. Therefore, these tables of results found that melt temperature (*A*), mold temperature (*B*), maximum velocity injection (*C*), maximum injection pressure (*D*), packing time (*E*), maximum packing pressure (*F*), and cooling time (*G*), only four factors are significant, namely *A*, *E*, *F*, *G* as showing the main effect of warpage and volume shrinkage in Fig. 6. Thus, it can be concluded that these parameters have a tendency of effects that are the same for both problems as shown in Fig. 6,

whereby if the melt temperature inclines continuously, the warpage and volume shrinkage will lead to minimized values and vice versa. Also packing pressure has a little tendency of effect, if it becomes low value; warpage and volume shrinkage will be minimized. Meanwhile packing time and cooling time are high, warpage and volume shrinkage will reduce continuously and vice versa. Moreover, Fig. 7(a) and (b) show interaction plots of three interaction factors that are significant with warpage and volume shrinkage, namely *A*E*, *A*G*, *E*G* after backward elimination of other interaction factors. They obviously are found that

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

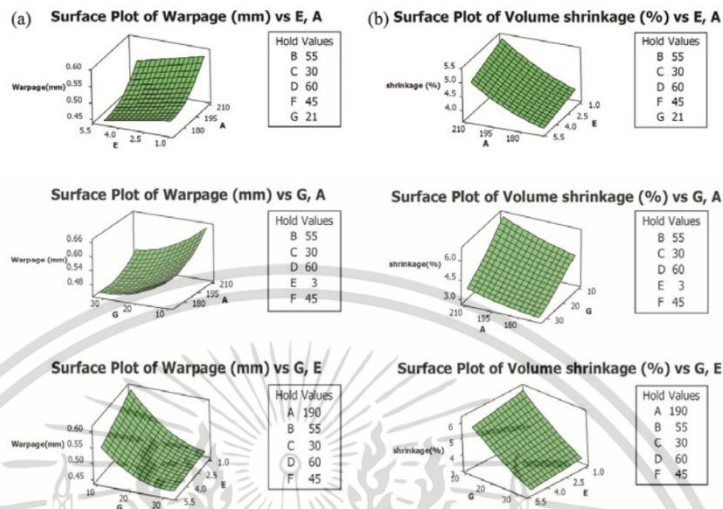


Fig. 7 — Interaction Plots for warpage problem after backward elimination (a) and volume shrinkage problem after backward elimination (b)

if the melt temperature inclines whereas packing time and cooling time climb high, both warpage and volume shrinkage will decrease continually. According to RSM method, it can simply generate the polynomial equation consisting of $A, E, F, G, A^2, G^2, AE, AG,$ and EG terms. Thus, the final predicted models of warpage and volume shrinkage are given in Eqs (5) and (6), respectively.

$$\text{Warpage (W)} = 2.637 - 0.02329 A - 0.00505 E + 0.000137 F - 0.00857 G + 0.000071 A^2 + 0.000253 G^2 - 0.000100 AE - 0.000049 AG + 0.000649 EG \quad \dots (5)$$

$$\text{Volume Shrinkage (V)} = 11.63 - 0.0907 A + 0.0244 E + 0.000781 F - 0.03031 G + 0.000379 A^2 + 0.001431 G^2 - 0.001114 AE - 0.000848 AG + 0.003429 EG \quad \dots (6)$$

After created the predicted models, validation of the models was carried out by using experimental random tests of 18 test runs as shown in Table 6. The results were the average absolute percentage deviation of each model as 0.63 and 0.77, respectively.

Thus, these models that were used for GA and FA implementation to seek the minimization of warpage and shrinkage are reliable.

Optimization through GA and FA

Substituting Eqs (5) and (6) added into Eq. (4) to optimize processes of both GA and FA, respectively, all variable constraints were fed into an optimal structure. Figure 8 show experiments of wrench

specimens. Table 6 compares the minimized values of warpage and shrinkage problems from recommendation condition (medium conditions), using GA and FA method. It can be seen that the result of recommendation condition provided the minimized values as 3.370% and 3.677% shrinkages and 0.460 mm and 0.494 mm warpages via Moldex 3D simulation and actual experiment respectively by providing 190°C melt temperature, 5 s packing time, 50% packing pressure, and 27.5 s cooling time. The GA result found that the minimized values were provided as 2.553% and 2.848% volume shrinkage and 0.426 mm and 0.447 mm warpage through Moldex 3D simulation and actual experiment respectively by using 175.44°C melt temperature, 3.17 s packing time, 20.22% packing pressure, and 44.91 s cooling time, and using the main control parameters as size of population at 100, crossing-over rate at 0.6, aberration rate at 0.2, and maximum generation at 600 iterations according to Guo *et al.*'s research².

Whereas FA result provided 2.377% and 2.556% shrinkage and 0.409 mm and 0.433 mm warpage through Moldex 3D simulation and actual experiment respectively by using 183.63°C melt temperature, 10 s packing time, 20% packing pressure, and 45s cooling time and using control conditions of the method as population size equal to 50, maximum number of iterations equal to 200, the maximum attractiveness at

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6 — Comparison of predicted vs. actual run based on Moldex 3D software

No.	A (°C)	E (s)	F (%)	G (s)	Volume shrinkage (%)	Warpage (mm)	Predicted volume shrinkage (%)	Predicted warpage (mm)	% volume shrinkage deviation	% warpage deviation
1	170	1	30	10	5.475	0.577	5.455	0.574	-0.36%	-0.43%
2	170	2	37.5	13.75	4.872	0.522	4.829	0.524	-0.89%	0.38%
3	170	3	45	17.5	4.243	0.486	4.269	0.485	0.62%	-0.11%
4	190	4	30	10	5.766	0.560	5.719	0.555	-0.82%	-0.86%
5	210	3	37.5	21.25	5.186	0.550	5.134	0.559	-1.01%	1.59%
6	210	4	45	25	4.545	0.534	4.521	0.531	-0.52%	-0.55%
7	210	5	52.5	10	6.513	0.612	6.521	0.623	0.12%	1.77%
8	170	1	60	21.25	4.076	0.488	4.058	0.485	-0.46%	-0.61%
9	170	2	30	25	3.502	0.466	3.562	0.458	1.66%	-1.71%
10	170	3	37.5	10	5.198	0.542	5.199	0.544	0.03%	0.46%
11	180	3	45	13.75	5.064	0.521	4.987	0.518	-1.55%	-0.58%
12	190	1	37.5	25	4.136	0.480	4.115	0.483	-0.52%	0.81%
13	190	4	60	17.5	4.727	0.496	4.705	0.497	-0.48%	0.18%
14	200	2	52.5	25	4.377	0.502	4.362	0.507	-0.34%	0.96%
15	200	3	60	10	6.377	0.613	6.348	0.613	-0.45%	0.08%
16	210	3	30	21.25	5.176	0.548	5.128	0.558	-0.92%	1.70%
17	210	4	37.5	25	4.532	0.532	4.516	0.530	-0.37%	-0.43%
18	210	5	45	10	6.528	0.618	6.515	0.622	-0.20%	0.64%

% deviation was calculated using the equation: [(predicted value – simulated value)/predicted value] x100

Table 7 — Volume shrinkage and warpage values before and after optimization methods

Objectives	Recommended condition method		GA method		FA method	
	Moldex 3D simulation	Experiments	Moldex 3D simulation	Experiments	Moldex 3D simulation	Experiments
Volume shrinkage (%)	3.370	3.677	2.553	2.848	2.553	2.556
Warpage (mm)	0.460	0.494	0.426	0.447	0.426	0.433

0.5, the absorption coefficient at 0.5, and the random perturbation rate at 0.2 according to Lobato and Steffen's research¹⁸. For the comparison of actual experiments and Moldex 3D simulated tests found that empirical results provide experimental values nearby simulated values at 94% and 90% accuracy of warpage and volume shrinkage respectively.

Comparison of RSM, GA and FA results

The results from both optimization methods clearly show that the FA performance can generate better results than GA and at recommended condition performances as shown in Table 7. Warpage and volume shrinkage that are provided from FA algorithm achieve better minimized values than GA algorithm at 4.05% and 7.4% respectively, and better than the recommended condition 11.33% and 41.73% for warpage and volume shrinkage by Moldex 3D simulated tests. Similarly, FA algorithm provides better minimized values than GA algorithm at 3.28% and



Fig. 8 — wrench example part from actual experiments

10.26% respectively, and better than the recommended condition 12.42% and 30.49% for warpage and volume shrinkage by experiments through Toshiba 80T injection molding machine. Meanwhile GA performance can provide minimized values of warpage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and volume shrinkage better than at recommended condition at 9.45% and 22.54% respectively. Therefore, this research experiment can conclude that use of FA algorithm can find suitable process parameters to minimize warpage and volume shrinkage better than GA implementation according to Yang's research^{15,16} that proved FA algorithm performance better than the performance of the popular GA algorithm.

Conclusions

This research deals with the study of the minimization of warpage and volume shrinkage problems. An optimization model using FA was successfully compared with GA by both algorithms developed and based on the second-order response surface regression methodology. This research seeks to provide a flexible and better optimization model to discover suitable process parameters to accommodate moveable limitations, conditions, and constraints of different injection molding machines. For this study, general purpose polystyrene was employed for analysis; it was found that melt temperature and cooling time were the main influences for warpage and volume shrinkage. Packing time and packing pressure were the next priorities. This conclusion can be applied to consider process parameters to reduce warpage and volume shrinkage for global allowable ranges for the injection molding process. Moreover, this research illustrates that the Firefly algorithm for optimizing process parameters is another one that can produce better results of warpage and volume shrinkage reduction than the previously favored genetic algorithm, which has been widely employed in plastic injection molding processes.

Acknowledgment

This research is supported by Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, and CoreTech System Co., Ltd.

References

- 1 Chiang K T & Chang F P, *Int J Adv Manuf Technol*, 35 (2006) 468-479.
- 2 Guo W, Hua L & Mao H, *Int J Adv Manuf Technol*, 72 (2014) 365-375.
- 3 Zhao J, Cheng G, Ruan S & Li Z, *Int J Adv Manuf Technol*, 78 (2015) 1813-1826.
- 4 Santos J D, Fajardo J I, Cuji A R, Garcia J A, Garzón L E & López L M, *Front Mech Eng*, 10 (2015) 287-293.
- 5 Chiang Y C, Cheng H C, C F, Lee J L, Lin Y & Shen Y K, *Int J Adv Manuf Technol*, 55 (2010) 517-526.
- 6 Kashyap S & Datta D, *Int J Plast Technol*, 19 (2015) 1-18.
- 7 Zheng G, Guo W, Wang Q & Guo X, *J Mech Sci Technol*, 29 (2015) 4153-4158.
- 8 Erzurumlu T & Ozelik B, *Mater Des*, 27 (2006) 853-861.
- 9 Lam Y C, Britton G A & Deng Y M, *Int J Adv Manuf Technol*, 22 (2013) 574-586.
- 10 Lin J & Lian R J, *J Process Control*, 20 (2010) 585-595.
- 11 Shi H, Suming S & Wang X, *Int J Adv Manuf Technol*, 65 (2012) 343-353.
- 12 Xu G, Yang Z T & Long G d, *Int J Adv Manuf Technol*, 58 (2011) 521-531.
- 13 Ozelik B & Erzurumlu T, *J Mater Process Technol*, 171 (2005) 437-445.
- 14 Beng Y M, Zhang Y & Lam Y C, *Mater Des*, 31 (2009) 2118-2123.
- 15 Yang X S, *J Eng Comput*, 29 (2013) 175-184.
- 16 Yang X S, *Am J Appl Math Stat*, 5792 (2009) 169-178.
- 17 Chen C C, Su P L & Lin Y C, *Int J Adv Manuf Technol*, 45 (2009) 1087-1095.
- 18 Lobato F S & Steffen J V, *Am J Appl Math Stat*, 1 (2013) 110-116.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Warpage reduction through optimized process parameters and annealed process of injection-molded plastic parts[†]

Supattarachai Sudsawat and Wipoo Sriseubsai*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Manuscript Received October 20, 2017; Revised June 20, 2018; Accepted July 2, 2018)

Abstract

The objective of this paper is to achieve the minimization of warpage for an injection molded part. The techniques that were implemented to minimize the warpage are the design of experiment (DOE), response surface methodology (RSM), firefly algorithm (FA), and annealing treatment. The packing time, cooling time, and melt temperature were shown to be significant parameters and FA was employed to seek these suitable values by experimental tests based on simulation software Moldex3D and injection machine. Analysis of variance (ANOVA) was used to validate experiments. Annealing treatment process was then applied to reduce more warpage phenomenon; the results showed that warpage phenomenon decreased dramatically compared with popular optimized parameter methodology. Moreover, the residual stress which was obtained by using photoelasticity showed that it has a direct relationship with warpage reduction. Therefore, the best solution of warpage mitigation can be solved by popular optimum process parameters and also annealing treatment.

Keywords: Warpage; Design of experiment; Response surface methodology; Firefly algorithm; Photoelasticity

1. Introduction

Everywhere in daily life plastic products have become part of our daily routine such as the covers of cellular phones, laptop housings, food boxes, and pen or pencil frames. The main reasons that plastic products have become popular to consumers are that they are lightweight, easy to form the parts, have low manufacturing costs when compared with other processes, and so on. The plastic injection molding (PIM) is one of the plastic forming processes which can produce good plastic products, provide high productivity, short cycle times for production, and perfectly meet complex requirements such as thin shell features and smooth product surfaces. During the injection molding process, the molding conditions are one of the causes of the quality problems of plastic parts. One of the most important problems is a distorted part referred to as warpage [1]. Thus, warpage reduction is a topic of interest for many researchers in seeking the best solution for avoiding this defect. Currently minimized warpage is a main topic in optimized injection molding process conditions [1–22].

Many publications of research about optimized plastic injection molding (PIM) parameters for reducing warpage occurrence have concentrated on computer-aided engineering (CAE) simulation, finite element and volume analysis, em-

pirical practice experiments, and also a class of evaluation algorithm optimization methods. Subramanian et al. [2] used finite element volume analysis through C-MOLD simulation software to minimize warpage of the injection-mold part as a compact disc (CD) optical pickup. There was also use of complex methods for integration with simulation software to seek suitable process parameters such as injection location and bridge rib. The result illustrated that the thickness of the rib is the most effective constraint for avoiding warpage problems. Ozcelik et al. [1] and Kurtaran et al. [3] tried to mitigate warpage problems via genetic algorithm to find the perfect process conditions. Packing pressure, mold temperature, melt temperature, packing time, and cooling time are the terms of the most important process parameters. The results of both researcher groups found that packing pressure has the most effect on warpage, followed by mold temperature, melt temperature, packing time and cooling time respectively. Erzurulu et al. [4] used Taguchi optimization method running on CAE simulation to minimize warpage and sink index because this method can reduce experimental test array better than the usual design of the experiment, especially the full factorial design experiment. This research considered mold and melt temperature, packing pressure, rib cross-section types, and rib layout angle. The results indicated clarify that the different rib cross-section types and rib layout dramatically affected warpage and sink index problems. Chiang et al. [5] concentrated on a thin shell product to avoid shrinkage and warpage prob-

*Corresponding author. Tel.: +66 2329 8339 ext. 103. Fax.: +66 2329 8340

E-mail address: wipoo.sr@kmitl.ac.th

[†] Recommended by Associate Editor Yongho Jeon

© KSME & Springer 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

lems by using the response surface methodology associated with sequential approximation optimization (SAO) method to handle the optimal value of machining parameters (such as mold temperature, packing time, packing pressure, and cooling time). The main effects that were obtained from this result were the sufficient time of packing and cooling beneficial for minimizing shrinkage and warpage problems. Gao et al. [6, 7] had researched the effective warpage optimization method by using Kriging model and Surrogated-based process optimization that is an adaptive method based on the Kriging model. Two years of development research for minimizing warpage concluded that packing time was the most important factor and Surrogated-based process optimization can provide the reduction of warpage at 38 % compared with the minimal warpage value of specimens. Ozcelik et al. [8], Hakimian et al. [9], and Zheng et al. [10] have been continually studying warpage phenomena by using the Taguchi experimental method. There was consideration of various machine parameters such as mold temperature, melt temperature, packing pressure, packing time, cooling temperature, fiber glass percentage, and V/P switchover and using Moldflow simulation software without empirical tests to seek the factors which affected warpage problems. The results show that packing pressure has the most important effect on warpage followed by other factors. Farshi et al. [11] and Kitayama et al. [12] applied sequential approximate optimization for mitigating warpage problems. Outcomes from these pieces of research were melt temperature and packing pressure profiles being the main effects and also during warped consideration, cycle time and residual stress during PIM were of concern because they had an effect in terms of quality products. Many researchers used neural network modeling research group methodology to minimize warpage defects of PIM process such as the researches of Yin et al. [13], Shi et al. [14], and Chen et al. [15]. They considered melt temperature, injection velocity, packing pressure, packing time, cooling time, and mold temperature that affected the warped product. The advantages of this research are short run time for verifying the warpage model and the research concluded that packing time was the most significant for warpage phenomenon. For practical experiment research cluster, there was research about machining parameters involved in warpage elimination. For example, Chaing et al. [16] investigated warpage of electronic battery cover parts that had a thin-wall part characteristic and verified practical results through simulation software and experimental results. The demonstration of this research result illustrated that melt temperature is a main process parameter for eliminating warpage occurrence based on Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and Polycarbonate + Acrylonitrile-butadiene-styrene (PC+ABS) materials. Larpurisyakul et al. [17] were concerned with the warpage problem of plastic labeling parts that were produced by PIM process. This research solved the warpage problem of production of packaging because there were injection tests to search for suitable process parameters especially several of mold temperature to reduce warpage under accept-

able values. Sánchez et al. [18] defined the relationship between cooling factors and warped parts. The emphatic solution of this research was cooling time factor that was the significant key to reducing warpage problem. Wang et al. [19] studied the warpage problem of the rapid heat cycle molding process that had a new design screw structure and was external gas assisted. It can be noticed that warpage problem is still mainly affected by packing time and cooling time even if this research did not use conventional injection molding as previous researches mentioned. And Wang et al. [20] concentrated warpage prediction of strip-like plastic parts by using thermal finite element analysis associated with experimental tests to define it. The result found that stress relaxation, or equivalently, strain creep impacted warpage predicted phenomenon. Yang [23] created Firefly algorithm for solving optimal values problems and many researchers applied this algorithm to optimize various problem fields such as using Firefly algorithm to seek process parameters of vehicle routing problems of a newspaper distribution system [24], electric discharge machining (EDM) and abrasive water jet machining (AWJM) [25], and the multi-pass turning operations problem [26]. Sudsawat et al. [27] used Firefly algorithm to find optimal process setting of PIM for warpage and volume shrinkage reduction. While it has rarely been found that this algorithm has been used to optimize injection molding machine parameters, therefore, the first step of the purpose of this research was to employ Firefly algorithm associated response surface methodology to find suitable parameters in PIM process to minimize warpage through Moldex3D simulation software and empirical tests.

All literature reviews as previously mentioned were purposed deeply to provide good performance for warped elimination and all the researches provided the results with the most process parameter adjustments through software simulations based on finite element volume analysis theories, experimental corollary, and also non-conventional algorithm optimization methods. Another main factor that impacted directly on warpage problem is residual stress on the plastic injection product. There were many researches that concentrated on the effect of residual stress. For instance, researcher groups of Chen et al. [28], Tang et al. [29], Acevedo-Morantes et al. [30], and Kim et al. [31] had the same consideration of cooling temperature and time analysis that affected residual stress of the plastic injection part. There was a strong conclusion that the warpage of injection molded parts during post-manufacturing thermal cycling occurred because of the residual stress effect that formed during the cooling stage. Also Guevara-Morales et al. [32] presented that the processing parameters that were of the most influence on residual stress and warpage have been seen as an indicator of residual stress phenomenon and vice versa. Some researchers concentrated on residual stress of plastic transparent materials in the injection molding process; Lee et al. [33] and Weng et al. [34] tried to mitigate residual stress by using numerical simulation and creating a predicted model. The result presented that maxi-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

imum residual stress occurred exactly at or near the gate and the processing parameters formed the highest influence that might be directly affecting warpage phenomenon. From solving residual stress researches, it can clearly be concluded that if the research aim really wants to mitigate warpage problem, then this must be indicated also through residual stress on a specimen. Thus, heat treatment is another good choice to improve plastic product quality especially warpage defeat [35] such as Prashantha et al. [36] who used polypropylene injection molding by using the Taguchi design of experiment to optimize process parameters, then there was a comparison before and after the annealing process of warpage occurrence. Digital Photoelasticity has become one of the most popular methods to investigate residual stress via birefringence measurement system. Ramesh et al. [37] researched automation of white light photoelasticity by using color image processing hardware to evaluate equivalent wavelength of red, green and blue (RGB) planes to define material stress fringe values to define residual stress on a specimen. Ramesh et al. [38] tried to separate the data acquisition techniques in digital photoelasticity. One of the outcomes from this research was a technique that used a direct evaluation of total fringe order to seek residual stress of transparent materials, especially the three fringe photoelasticity (TFP) method. This method utilized the RGB values for total fringe order determination before it was employed into the stress-optic laws to define residual stress on plastic parts.

From all previous studies, they can be summarized that warpage mitigated methodology offered two main solutions. Firstly, they concentrated on optimizing process parameters and secondly, heat treatment to relieve warpage phenomenon. These two solutions have not found that these methods were integrated to handle warpage phenomenon of plastic injection parts. Thus, this research concentrates on warpage reduction of transparent polystyrene parts by using response surface methodology associated with firefly algorithm to seek suitable process parameters including annealing process after post-injection molding process for improving the quality of plastic part occurrence by noticing residual stress via photoelasticity methodology.

2. Materials and equipment

The design specimen is according to ASTM-D638 Type 1 and the dimensions are 165 mm × 19 mm × 3.2 mm. The model, cooling system, and setting process parameters are performed with Moldex3D simulation and illustrated in Fig. 1. The material setting is general purpose polystyrene (GPPS), PG-22 that was manufactured by CHI MEI corporation; an 80-ton injection molding machine was used to performed the experiment. The electronic laboratory oven was used for annealing treatment process. The specifications of the oven are the maximum annealing temperature at 300 °C, power rating at 240 volts and 200 watts, holding power at maximum temperature at 800 watts, temperature stability with proportional

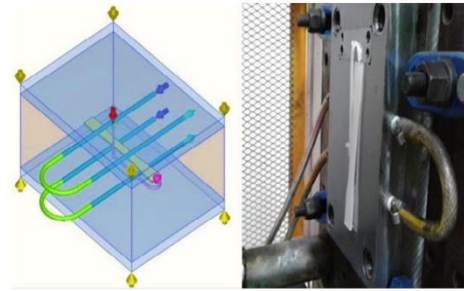


Fig. 1. The specimen and cooling system design via Moldex3D simulation and Toshiba IS80 Injection molding machine.

integral derivative (PID) control at ± 0.2 °C, using 25 minutes for heat up time to 300 °C and using 4 minutes for recovery time with door open for 60 seconds. The photoelasticity method was employed using a polariscope and pictures were recorded using a digital camera fitted with a polarized filter.

3. The research methodology

The methodology consisted of identification of machine parameters, screening important process parameters, response surface implement, firefly algorithm implement, creating optimal process model, and annealing treatment for warpage reduction can be concluded basically as a flow chart which is indicated in Fig. 2.

3.1 Identification of process parameters

The research goal is warpage reduction based on the identification of critical process parameters and mitigating warpage through heat treatment. The selection of machining set-up factors can be performed starting from many previous scientific research papers. Many studies [1–22] considered the relationship of several setting injection machine factors during the injection molding process on final warpage reduction. The list of related main factors that this research is interested to employ in experiment tests is: injection flow rate, injection pressure, switching over, packing time, packing pressure, melting temperature, mold temperature, and cooling time.

After there was a consideration of influent parameters that impact the injection molding process, a fractional two-levels factorial was used for the initial stage of analysis. The variability parameter range was indicated based on two levels being upper and lower limits as shown in Table 1.

Then fractional two-levels run and provide a good screening performance through Moldex3D simulation software.

3.2 Screening experiment of process parameters

Factor screening is used to evaluate main and interaction ef-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Process parameters and levels.

Screening experiment (Unit)	Symbol	Level	
		Low	High
1. Injection flow rate (%)	A	20	70
2. Injection pressure (%)	B	60	80
3. Switching over (%)	C	90	98
4. Packing time (sec)	D	3	15
5. Packing pressure (%)	E	60	80
6. Melting temperature (°C)	F	170	210
7. Mold temperature (°C)	G	55	70
8. Cooling time (sec)	H	20	60

Addition: Water coolant temperature is 55 °C.

Table 2. Screening experiment 2⁸⁻⁴ fractional factorial experiment through Moldex3D simulation software.

Run order	Factors								Warpage (mm.)
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	70	60	98	3	80	10	55	60	0.56
2	20	60	98	3	80	210	70	20	0.84
3	20	60	98	15	60	170	70	60	0.50
4	20	80	98	15	80	170	55	20	0.47
5	20	60	90	3	60	170	55	20	0.70
6	70	60	98	15	60	210	55	20	0.63
7	20	80	98	3	60	210	55	60	0.69
8	70	80	90	15	60	170	55	60	0.45
9	70	80	90	3	80	210	55	20	0.86
10	20	80	90	3	80	170	70	60	0.57
11	70	60	90	3	60	210	70	60	0.70
12	70	80	98	15	80	210	70	60	0.51
13	20	80	90	15	60	210	70	20	0.62
14	70	60	90	15	80	170	70	20	0.38
15	70	80	98	3	60	170	70	20	0.67
16	20	60	90	15	80	210	55	60	0.56

Table 3. Central composite design (CCD) as face centered composite design type.

Factors	Symbol	Level				
		-α	-1	0	1	α
Packing time (sec)	D	3	3	9	15	15
Melt temp (°C)	F	170	170	190	210	210
Cooling time (sec)	H	20	20	40	60	60

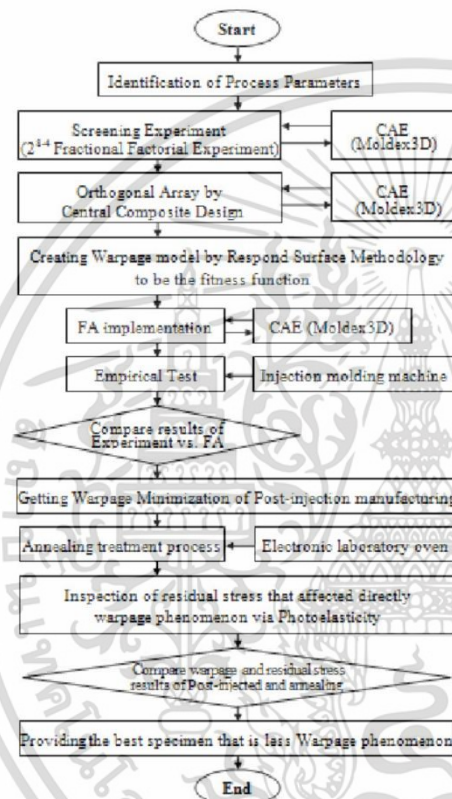


Fig. 2. Flow chart of methodology.

facts without impacting the final second quadratic regression model. For example, Tsai et al. [39], Mathivanan et al. [40], Zhang and Jiang [41] applied fractional two-levels for experimental design to present the initial step of screening ex-

perimental analysis.

The procedures of this step are an indication of the design space, next the implementation of Moldex3D simulation experiments and then the effected parameters are automatically optioned. The fractional factorial design of screening 8 factors with two-levels each is shown in Table 2, then all the design experiments set for processing parameters in Moldex3D simulation to investigate warpage phenomenon. The warpage results are screened for providing influent parameters through analysis of variance (ANOVA).

3.3 Response surface implementation

After screening experiments, screened factors can be clarified to use in response surface method as shown in Table 3. Three main parameters as indicated in Table 3 are generated from analysis of variance (ANOVA) that evaluates main and interaction effects. Response surface methodology (RSM) is a collection of statistical techniques that is employed to define the warpage mathematical models. RSM used to evaluate the relationship between machining process parameters that influence warpage phenomenon to be a two or three-dimensional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

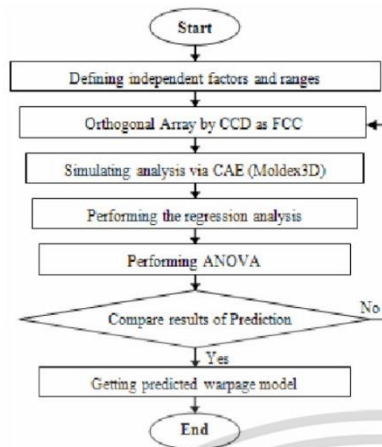


Fig. 3. Flow chart of response surface methodology (RMS).

quadratic surface [42]. Fig. 3 shows the response surface procedure in this research.

3.3.1 Central composite design

Before becoming the forecasting model stage of warpage, central composite design (CCD) is a necessary step to design and run the experiments. CCD is a full factorial design with all combinations of the important parameters and a suitable method to build the quadratic model. In this research, one kind of CCD being the central composite face-centered (CCF) is used to design experiments. This design type for this research consists of 8 cube points, 4 center points in the cube, 6 axial points, 2 center points in axial, and a circle of radius (α) equal to 1.0 according to Chaing et al. [16] as shown in the design table in Table 4. The warpage results as illustrated in Table 4 are employed to evaluate the respective impact of three main parameters and generated the second quadratic model.

3.3.2 Creating predicted model

After establishing CCF design experiments, the second quadratic model has to be created based on warpage simulation experimental results as shown in Eq. (1).

$$Y = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i X_i + \sum_{i < j} c_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k c_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

where X_i denotes independent variables, Y represents warpage response, k is the number of design variables, c_0 is the coefficients of constant, c_i is the coefficients of linear, c_{ii} is the coefficients of quadratic, and c_{ij} is the coefficients of cross product term.

3.3.3 Analysis of variance (ANOVA)

Filter step before Firefly algorithm methodology is the veri-

Table 4. Design and results of central composite design (CCD) experiments.

Run order	Factors			Warpage (mm.)
	D	F	H	
1	3	190	40	0.66
2	9	190	40	0.43
3	9	210	40	0.52
4	9	190	40	0.43
5	9	170	40	0.36
6	9	190	20	0.48
7	9	190	60	0.42
8	15	190	40	0.42
9	3	210	20	0.86
10	9	190	40	0.43
11	9	190	40	0.43
12	15	170	60	0.33
13	15	210	60	0.51
14	15	210	20	0.56
15	15	170	20	0.37
16	3	170	20	0.65
17	9	190	40	0.43
18	3	210	60	0.69
19	3	170	60	0.56
20	9	190	40	0.43

fication by analysis of variance (ANOVA); to be specific, either the warpage quadratic model was statistically reliable or otherwise. All the most influent parameters are indicated in terms of how they impact the warpage problem. The main and interaction effects are provided in analysis of variance.

3.4 Firefly algorithm established for optimized process parameter

Warpage polynomial equation generated from Eq. (1) is used as the fitness equation in optimization stage. Then Firefly algorithm from Yang [23] created following idealized rules of flashing patterns and behavior of fireflies algorithm is used for optimized process parameters. This algorithm has to establish the initial population of n fireflies as represented in a random searched set of solutions, the same as warpage solution and process parameters of the attractiveness, light absorption coefficient, and randomization parameters. A firefly will move forward to approve other fireflies by finding a firefly which has a high proportion of brightness that can evaluate the distance of firefly i to another attractive firefly j in Eq. (2):

$$X_i = X_i + \beta * (X_j - X_i) + \alpha * (\text{rand} - 0.5)) \quad (2)$$

where β and α are parameters of attractiveness and randomization by which both parameters were affected from Cartesian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

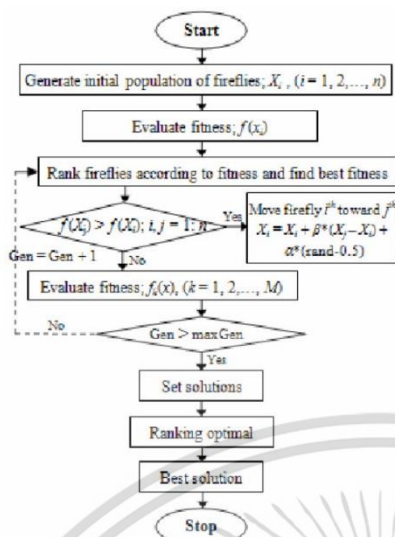


Fig. 4. Flow chart of firefly algorithm.

distance (r_{ij}) (distance between two fireflies). The attractiveness factor can be generated from Eq. (3).

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \tag{3}$$

Given β_0 is the attractiveness at distance (r_{ij}) = 0 and γ is a light absorption coefficient. The firefly algorithm can present the step by step as shown in Fig. 4.

3.5 Optimal injection process model

After verifying fitness function via RSM methodology then the objective model is employed to minimize warpage phenomenon as indicated in Eqs. (4) and (5), respectively.

$$\text{Find } X = [D, F, H] \tag{4}$$

$$\text{Minimize } Y(X) \tag{5}$$

Subject to: $3 \leq D \leq 15$ s
 $170 \leq F \leq 210$ °C
 $20 \leq H \leq 60$ s.

All process parameters for an injection molding process following Toshiba IS80 Injection molding machine specification.

3.6 Annealing process for warpage reduction

After optimized process parameters, the annealing treatment process has a role to improve product quality of plastic parts. The annealing process is a secondary processing procedure that is employed during post-manufacturing. The certain tem-

perature that should be below melting temperature points and around the glass transition temperature is used to be the annealing temperature. The purpose of annealing treatment depends on the various properties that need to be improved. For instance, improving dimensional stability and crack resistance especially warpage, volume shrinkage and residual stress problems. Plastic components can be classified to be crystalline and amorphous types, thus when amorphous areas become more crystalline under melting temperature, the dimensional accuracy can be shown as a better result. Also when annealing process is applied, the molecular orientation of plastic will adapt automatically and relieving residual stresses. Another advantage of heat treatment is the improvement of mechanical properties and heat resistance due to the annealing stage; an increase of crystallization will occur then density, tensile strength, flexural strength, glass transition temperature, and heat resistance will also be better [35]. Therefore, this research is concerned with using annealing treatment during post-manufacturing of plastic injection parts. Annealing temperature tests of 60 °C, 75 °C, 80 °C and 85 °C were used, and annealing time at 60 mins and 120 mins and cooling down in air over 12 hours, then the specimens are used to investigate the relationship of residual stress and warpage behavior. Next, use of photoelasticity to notice a behavior change of plastic injection parts.

3.6.1 Inspection of residual stress that directly affected warpage phenomenon on specimen via photoelasticity methodology

Presently, several techniques are used to investigate the residual stress on a specimen including strain gage measurement technique, X-ray technique, chemical probe testing technique, and so on. The useful technique is photoelasticity and this method can provide good practical results and it is not necessary to destruct a specimen which can be used to determine the stress distribution especially of a birefringent material. For instance, Realpe et al. [43, 44] had confirmed that they used the image processing techniques for photoelasticity methodology for particles concentration and characterization of shape, sizes of particles and shear stress. This testing methodology is used based on electromagnetic waves that pass through transparent materials. The dark-field polarization plan associated light waves and shows the stress distribution on a specimen [45] as shown in Fig. 5.

The stress appearance depends merely on the recognition of color steamer and investigation of the order of stress values via a color steamer [46]. The stress distribution can be delivered by using stress-optic law. Firstly, there must be a consideration of a transparent model of polymer subjected to a plane state of stress. The relationships between stress and indices of refraction are as shown in Eq. (6) [47].

$$\begin{aligned} n_1 - n &= c_1 \sigma_1 - c_2 \sigma_2 \\ n_2 - n &= c_1 \sigma_2 - c_2 \sigma_1 \end{aligned} \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

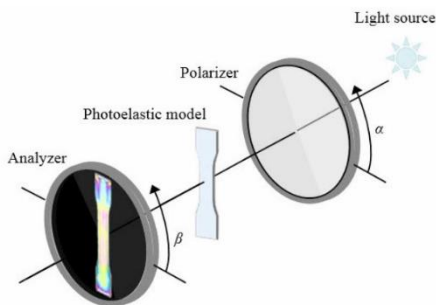


Fig. 5. The photoelasticity technique by the dark-field isochromatic of a specimen.

where σ_1 and σ_2 are the principle stresses that are oriented with reference to a set of axes, n_1 and n_2 are the refractive indices that vibrate from polarizing axes whereas n is the refractive index in the unstressed condition. c_1 and c_2 are the direct stress-optic and the transverse stress optic coefficients. When this model is employed on a plane polarized light then the relative retardation (δ) can be provided as the refractive index function as show in Eq. (7):

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) \tag{7}$$

where λ is light wavelength, h is the thickness of a specimen.

Then combination of Eqs. (6) and (7) as shown in Eq. (8):

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (c_1 - c_2) (\sigma_1 - \sigma_2) \tag{8}$$

c_1 and c_2 can combine to be C as referred to as the optical activity coefficient or Brewster's constant as shown in Eq. (9):

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C (\sigma_1 - \sigma_2) \tag{9}$$

When there are concerns to relate fringe order (N), it can be rewritten as Eq. (10):

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = h \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \tag{10}$$

From Eq. (10) can be recast to be easier for defending residual stress as Eq. (11).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{2 * h * C} = \frac{N * \lambda}{2 * h * C} \tag{11}$$

The constant C for polystyrene has a value of 5000 Brewster or equal to 5000×10^{-12} [48] and if there are uses of common geometry such as a thin-wall part or a flat sheet, the stress

should be determined as Eq. (12).

$$\sigma = \frac{\delta}{h * C} = \frac{N * \lambda}{h * C} \tag{12}$$

Before there is the determination of the residual stress on a specimen that affects warpage problem, there must be identification of fringe gradient direction via the relative retardation (δ) or defining fringe order (N) to implement into Eq. (12). Common methods use it to investigate the relative retardation (δ) and defining fringe order (N) is three fringe photoelasticity (TFP). The first step of this technique is creation of a color code in terms of R, G, B by a procedure of calibration according to ASTM-D4093-95. Then the total fringe order or the relative retardation in terms of R, G and B at a point on a specimen that is interested can be compared with the values of R, G, B in the calibration table. The error verification of values of R, G and B between the interested point and the calibration table can provide an error at Eq. (13) [47].

$$Error = (R_e - R_c)^2 + (G_e - G_c)^2 + (B_e - B_c)^2 \tag{13}$$

Given, values of the experiment points are subscript "e" and subscript "c" denotes the values in the calibration table. When a calculation of "error" should seek till the minimum of Error values, R, G, B outcome for Error equation is defined as the total fringe order and the relative retardation for employed Eq. (12). After it is able to seek residual stress on a specimen, this research will compare the results of warpage and residual stress of post-injection process parts and the parts that are annealed.

4. Results and analysis

The following section illustrates the results of screening process parameters, face centered composite design, optimized process parameters via Firefly algorithm, and minimized warpage through annealing treatment process.

4.1 Screening experiments step

After identifying machine factors based on an available adjustment of Toshiba IS80's machine parameters, simulation of warpage based on 2^{8+4} fractional factorial experiment design via Molder3D was generated as shown in Table 2; next there is analysis of variance (ANOVA) of eight parameters. The significant terms of ANOVA that consider an effect are "df", "Adj SS", "Adj Ms", "F-value" and "P-value". "df" is a degree of freedom. "Adj SS" is adjusted sum of squares that is used to measure a variation of terms. "Adj Ms" is adjusted mean squares that is used to measure a variation of terms. "F-value" is a ratio of variation between sample means and variation within the samples. "P-value" is a probability of finding the observed results. Especially in this experiment, the factors that "P-value" is less than 0.05 are the most significant. Then the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5. ANOVA table for screening factors of warpage phenomenon.

Source	df	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Main effects	8	0.240302	0.030038	7.80	0.007
<i>A</i>	1	0.001949	0.001949	0.51	0.500
<i>B</i>	1	0.000022	0.000022	0.10	0.942
<i>C</i>	1	0.000074	0.000074	0.02	0.894
<i>D</i>	1	0.134176	0.134176	34.86	0.001
<i>E</i>	1	0.002357	0.002357	0.61	0.460
<i>F</i>	1	0.075598	0.075598	19.64	0.003
<i>G</i>	1	0.001163	0.001163	0.30	0.600
<i>H</i>	1	0.024964	0.024964	6.49	0.038
Error	7	0.026943	0.003849	-	-

Addition: S = 0.0620408, R-Sq = 89.92 %, R-Sq (adjust) = 78.40 %, R-Sq (prediction) = 47.33 %.

Table 6. ANOVA table for warpage (after backward elimination).

Source	df	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Model	7	0.314192	0.044885	332.47	< 0.001
Linear	3	0.165577	0.055192	408.83	< 0.001
<i>D</i>	1	0.069896	0.069896	517.74	< 0.001
<i>F</i>	1	0.019151	0.019151	141.86	< 0.001
<i>H</i>	1	0.000202	0.000202	1.50	0.246
Square	2	0.062784	0.031392	232.53	< 0.001
<i>D</i> * <i>D</i>	1	0.037613	0.037613	278.61	< 0.001
<i>H</i> * <i>H</i>	1	0.001202	0.001202	8.90	0.012
2-way interaction	2	0.004125	0.002063	15.28	0.001
<i>D</i> * <i>H</i>	1	0.003374	0.003374	24.99	< 0.001
<i>F</i> * <i>H</i>	1	0.000751	0.000751	5.56	0.038
Error	11	0.001485	0.000135	-	-
Lack-of-fit	7	0.001485	0.000212	-	-
Pure error	4	0	0	-	-

Addition: S = 0.011619, R-Sq = 99.55 %, R-Sq (adjust) = 99.23 %, R-Sq (prediction) = 97.02 %.

eight factors were presented in Table 5, it shows that the significant factors that should be used in central composite design stage are packing time (*D*), melt temperature (*F*) and cooling time (*H*) as noticed as the coefficient of determination “R-Sq” at 89.92 %, “P-value” at less than 0.05 of three factors.

4.2 Creating modelling through face centered composite design step

Gaining packing time (*D*), melt temperature (*F*) and cooling time (*H*) being the main effects from initial screening step, meant that the face centered composite design (FCC) was simulated to provide warpage results as shown in Table 4. Analysis of variance (ANOVA) is used to validate and expertly seek the predicted warpage models through a backward elimination stage as shown in Table 6. In Table 6, the coefficient of predicted determination (R-Sq (prediction)) was more than 99 %, which means high reliability of the warpage model. Therefore, this table indicates a backward elimination situa-

tion that packing time (*D*), melt temperature (*F*) and cooling time (*H*) mainly affected warpage phenomenon. There were also square actions and interaction impacts of both *D* and *H* factors that affected the warpage problem. Following response surface methodology can produce a polynomial warpage equation of the main three factors as established as in Eq. (14).

$$\begin{aligned} \text{Warpage } (W) = & 0.072196 - 0.083144D + 0.00536F \\ & - 0.002926H + 0.003090D*D \\ & + 0.00005H*H + 0.000171D*H \\ & - 0.000024F*H. \end{aligned} \quad (14)$$

Then the confirmable model was validated by using random tests of 8 test simulations compared between warpage results of Moldex3D results and calculated model as illustrated in Table 7. The deviated percentage of warpage results between model calculation and Moldex3D simulation were a range of 1.08 and -2.28 that means that the warpage polynomial equation is reliable to be employed in the firefly algorithm step for

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 7. Comparison of predicted vs. actual run based on Moldex3D software and empirical test.

No.	D (sec)	F (° C)	H (sec)	Moldex3D simulation	Predicted models	% model deviation based on Moldex3D
				W (mm)	W (mm)	W (%)
1	4	175	38	0.5513	0.5545	0.58
2	5	185	40	0.5528	0.5449	-1.45
3	7	188	60	0.4499	0.4548	1.08
4	9	180	55	0.3850	0.3764	-2.28
5	10	195	44	0.4314	0.4323	0.21
6	14	200	48	0.4446	0.4451	0.11
7	8	205	52	0.5114	0.5019	-1.89
8	15	179	39	0.3792	0.3742	-1.34

% deviation based on Moldex3D was calculated using the equation: [(predicted value – simulated value)/predicted value] × 100

Table 8. Warpage values before and after optimization methods.

Objectives	Recommended condition method		FA method	
	Moldex3D simulation	Experiments	Moldex3D simulation	Experiments
Maximum warpage (mm)	0.43	0.49	0.33	0.38

seeking suitable process parameters.

4.3 Optimal step

Substituting Eq. (14) added into Eq. (5) to be a fitness equation, packing time, melt temperature, and cooling time were optimized suitable values as shown in Fig. 4. Firefly parameters are set-up as the number of iterations equal to 200, the size of population equal to 50, the absorption coefficient equal to 0.5, the maximum attractiveness equal to 0.5, and the random perturbation rate equal to 0.2 according to researches of Sudsawat et al. [27] and Lobato et al. [49]. Then the optimal results suggest as shown in Fig. 6 and Table 8, the measurement of a deflection used 5 positions, a long dog bone length compared to warpage results between Moldex3D simulation and empirical experiment via Toshiba IS80 injection molding. The highest maximum of warpage was at P5 position as shown in Fig. 6, and Table 8 presents the maximum warpage equal to 0.43 and 0.49 mm that was simulated via Moldex3D software and actual experiments respectively for recommended condition (9 s packing time, 190 °C melt temperature, and 40 s cooling time). Meanwhile the maximum warpage that was generated from Firefly algorithm provides 0.33 and 0.38 mm that were simulated through Moldex3D software and actual experiments respectively at 12 s packing time, 170 °C melt temperature, and 50 s cooling time.

All the results were based on Moldex3D and actual experiments provide the percentage of averaged error deviation at 13.95 % and 15.15 % of warpage measurement from a ratio of recommended condition and Firefly algorithm method.

The Firefly algorithm performance can provide the better warpage reduction than recommended condition results as

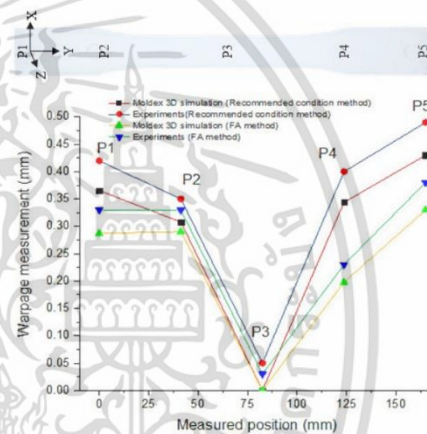


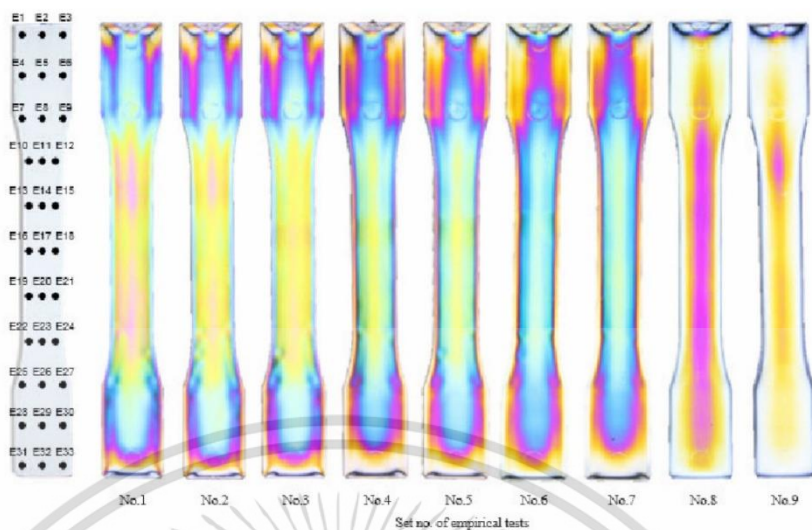
Fig. 6. Measurement of warpage on specimens at each point compared between experiments and Moldex3D simulations.

23.26 % and 22.45 % by Moldex3D simulation tests and empirical tests respectively.

4.4 Annealing treatment step

In this step, heat treatment process is used to reduce warpage phenomenon by using an electronic laboratory oven. Heat provided the effective result of rearranging the amorphous structure to become the crystalline structure [35] that directly affected the mitigation of residual stress on a specimen. After annealing treatment process, there is use of pho-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Addition: No. 1 is a post-injection molding part without annealing process, No. 2 and 3 are injection molding parts with annealing process at 60 °C and using 60 and 120 mins for annealing time No. 4 and 5 are injection molding parts with annealing process at 75 °C and using 60 and 120 mins for annealing time No. 6 and 7 are injection molding parts with annealing process at 80 °C and using 60 and 120 mins for annealing time No. 8 and 9 are injection molding parts with annealing process at 85 °C and using 60 and 120 mins for annealing time

Fig. 7. Photoelasticity measurement of specimens before and after annealing treatment process.

toelasticity technique along with warpage measurements to investigate whether residual stress affected warpage phenomenon. Fig. 7 presents a set of 10 variable photoelasticity tests at each annealing temperature and time. Residual stress reflection via the pattern of the fringes show that no. 1 provides various colors more than others especially if there are comparisons of no. 1, no. 8 and 9, it was the most difference of colors. The colors that show on a specimen used to verify a retardation of light wave and fringe order according to three fringe photoelasticity (TFP) methodology [47] by specifying 33 measured positions (E1 to E33 points) are as shown in Fig. 7. The residual stress results that generated a retardation and fringe order by TFP methodology and added into Eq. (12) are illustrated in Fig. 8. When looking at no. 1, maximum and minimum residual stress outcomes that were calculated from TFP methodology are 0.101 and 0.017 MPa while the specimens which passed annealing process of no. 8 and 9 provided 0.064, 0.017, 0.058 and 0.017 respectively. These results present that annealing process at a suitable temperature can be a good choice to reduce the residual stress of plastic parts.

4.5 Comparisons of warpage reduction and residual stress on specimens

Warpage measurement at 5 positions (P1 to P5) as shown in Fig. 9 can provide good performance. This measurement sug-

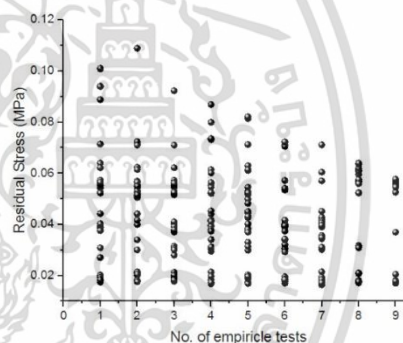


Fig. 8. Measurement of residual stress on specimens before and after annealing treatment process.

gests that the maximum warpage reflection occurs at the end of a specimen (P5). If there is a comparison of warpage occurrence between a specimen without annealing treatment and a specimen through annealing process, it can be summarized that more annealing temperature and time can provide a good solution for warpage reduction. The specimens that through annealing process at 85 °C and 120 mins can reduce warpage at 76.32 % compared with an optimized specimen before an-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 9. Warpage and residual stress values before and after annealing treatment process.

Methods	Maximum warpage (mm)			Maximum residual stress (MPa)		
	Before annealing process	Annealing process (60 mins)	Annealing process (120 mins)	Before annealing process	Annealing process (60 mins)	Annealing process (120 mins)
Post-injection process	0.38	-	-	0.101	-	-
Annealing at 60 °C	-	0.38	0.37	-	0.109	0.092
Annealing at 75 °C	-	0.30	0.29	-	0.087	0.082
Annealing at 80 °C	-	0.28	0.25	-	0.072	0.071
Annealing at 85 °C	-	0.16	0.09	-	0.064	0.058

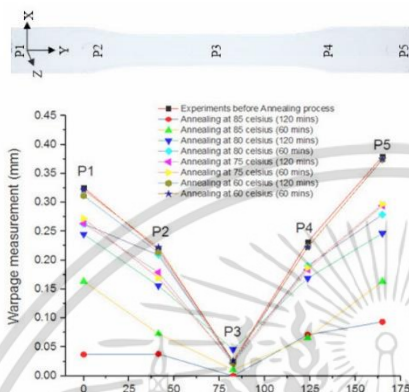


Fig. 9. Measurement of warpage on specimens at each point compared between experiments before and after annealing treatment.

nealing process. Therefore, it can be clarified as shown in Fig. 9 that if there is use of annealing treatment that sets the consumption of more temperature and time for solving warpage phenomenon, the warpage will reduce dramatically. Also, Table 9 can indicate when enhanced annealing temperature and time are from 60 °C to 85 °C and 60 mins to 120 mins respectively, warpage phenomenon will successively decline. Likewise, for residual stress, when it is given more annealing temperature and time, the residual stress can be relieved continually at 42.57 % compared between a specimen without annealing treatment and using annealing process at 85 °C and 120 mins. Therefore, the warpage can be mitigated dramatically by using Firefly algorithm to optimize process parameter during PIM process and also if relieving of more warpage phenomenon is required, annealing treatment is the best choice to reduce obvious warpage phenomenon from 0.38 mm to 0.09 mm. Also annealing treatment can relieve the residual stress from 0.101 MPa to 0.058 MPa which affected the reduction of the warpage problem and crack resistance problems [35].

5. Conclusions

In this research, an efficient optimization methodology us-

ing firefly algorithm (FA) and response surface methodology (RSM) and heat treatment are employed to minimize warpage of thin PIM parts according to ASTM-D638 Type1. The results of this study are illustrated as follows:

- (1) According empirical experiment, packing time, cooling time, and melt temperature are the most significant factors influencing warpage reduction.
- (2) According to response surface methodology and Firefly algorithm optimization, it can seek suitable packing time, cooling time, and melt temperature that provide a warpage mitigation less than recommended factor setting at 23.26 % and 22.45 % by Moldex3D simulation tests and empirical tests respectively.
- (3) In annealing treatment process, warpage phenomenon reduced more from optimization stage at 76.32 % by using annealing process at 85 °C and 120 mins.
- (4) In photoelasticity technique, which is a practical, low cost technique, it can notice residual stresses for injection molding polystyrene parts. The residual stresses decreased considerably with high temperature annealing at 42.57 % compared with a specimen without annealing process and contrasted with warpage occurrence.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, and Core Tech System Co., Ltd. for supporting to access to their software simulation and research facilities.

References

[1] B. Ozcelik and T. Erzurumlu, Comparison of the warpage optimization in plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm, *J. Matprotec.*, 171 (2006) 437-445.
 [2] N. R. Subramanian, L. Tingyu and Y. A. Seng, Optimizing warpage analysis for an optical housing, *J. Mechatronics*, 15 (2005) 111-127.
 [3] H. Kutaran and T. Erzurumlu, Efficient warpage optimization of thin shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27 (2006) 468-472.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] T. Erzurumlu and B. Ozcelik, Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method, *J. Matdes.*, 27 (2006) 853-861.
- [5] K. T. Chiang and F. P. Chang, Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 35 (2007) 468-479.
- [6] Y. Gao and X. Wang, An effective warpage optimization method in injection molding based on the Kriging model, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 37 (2008) 953-960.
- [7] Y. Gao and X. Wang, Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding, *J. Matprotec.*, 209 (2009) 1302-1309.
- [8] B. Ozcelik and I. Sonat, Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding, *J. Matdes.*, 30 (2009) 367-375.
- [9] E. Hakimian and A. B. Sulong, Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method, *J. Matdes.*, 42 (2012) 62-71.
- [10] G. Zheng, W. Guo, Q. Wang and X. Guo, Influence of processing parameters on warpage according to the Taguchi experiment, *J. Mech. Sci. Technol.*, 29 (2015) 4153-4158.
- [11] B. Farshi, S. Gheshmi and E. Miandoabchi, Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm, *J. Matdes.*, 32 (2011) 414-423.
- [12] S. Kitayama, R. Onuki and K. Yamazaki, Warpage reduction with variable pressure profile in plastic injection molding via sequential approximate optimization, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 72 (2014) 827-838.
- [13] F. Yin, H. Mao, L. Hua, W. Guo and M. Shu, Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding, *J. Matdes.*, 32 (2011) 1844-1850.
- [14] H. Shi, S. Suming and X. Wang, A warpage optimization method for injection molding using artificial neural network with parametric sampling evaluation strategy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 65 (2013) 343-353.
- [15] W. C. Chen and D. Kurniawan, Process parameters optimization for multiple quality characteristics in plastic injection molding using Taguchi method, BPNN, GA, and hybrid PSO-GA, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 15 (2014) 1583-1593.
- [16] Y. C. Chiang, H. C. Cheng, C. F. Huang, J. L. Lee, Y. Lin and Y. K. Shen, Warpage phenomenon of thin-wall injection molding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 55 (2011) 517-526.
- [17] P. Larpsuriyakul and H. G. Fritz, Warpage and counter-measure for injection-molded in-mold labeling parts, *J. Polymer Engineering and Science.*, 51 (2011) 411-418.
- [18] R. Sánchez, J. Ajsa, A. Martínez and D. Mercado, On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding, *J. Measurement.*, 45 (2012) 1051-1056.
- [19] X. Wang, G. Zhao and G. Wang, Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process, *J. Matdes.*, 47 (2013) 779-792.
- [20] C. Wang, M. Huang, C. Shen and Z. Zhao, Warpage prediction of the injection-molded strip-like plastic parts, *J. Cjche.*, 24 (2016) 665-670.
- [21] W. Guo, L. Hua, H. Mao and Z. Meng, Prediction of warpage in plastic injection molding based on design of experiments, *J. Mech. Sci. Technol.*, 26 (2012) 1133-1139.
- [22] G. J. Kang, C. H. Park and D. H. Choi, Metamodel-based design optimization of injection molding process variables and gates of an automotive glove box for enhancing its quality, *J. Mech. Sci. Technol.*, 30 (2016) 1723-1732.
- [23] X. S. Yang, Firefly algorithms for multimodal optimization, *J. Aijms.*, 5792 (2009) 169-178.
- [24] E. Osaba, X. S. Yang, F. Diaz, E. Onieva, A. D. Masegosa and A. Perillos, A discrete firefly algorithm to solve a rich vehicle routing problem modelling a newspaper distribution system with recycling policy, *J. Soft Computing.*, 20 (2016) 1-14.
- [25] R. Shukla and D. Singh, Selection of parameters for advanced machining process using firefly algorithm, *J. Estch.*, 20 (2017) 212-221.
- [26] A. Belloufi, M. Assas and I. Rezgui, Intelligent selection of machining parameters in multipass turning using firefly algorithm, *Int. J. Model. Simu.*, 2014 (2014) 1-6.
- [27] S. Sudsawat and W. Sriseubsai, Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with genetic algorithm and firefly algorithm techniques, *India J. Eng. Mater. S.*, 24 (2017) 228-238.
- [28] X. Chen, Y. C. Lam and D. Li, Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding, *J. Jmatprotec.*, 101 (2000) 275-280.
- [29] S. H. Tang, Y. M. Kong, S. M. Supaun, R. Samin and S. Sulaiman, Design and thermal analysis of plastic injection mould, *J. Jmatprotec.*, 171 (2006) 259-267.
- [30] M. T. Acevedo-Morantes, M. Brieva-Sarmiento and A. Realpe-Jimenes, Effect of the molding temperature and cooling time on the residual stress of crystal polystyrene, *J. Dyna.*, 81 (2014) 73-80.
- [31] B. Kim and J. Min, Residual stress distribution and their influence on post-manufacturing deformation of injection-molded plastic parts, *J. Jmatprotec.*, 245 (2017) 215-226.
- [32] A. Guevara-Morales and U. Figueroa-Lopez, Residual stresses in injection molded products, *J. Meter. Sci.*, 49 (2014) 4399-4415.
- [33] Y. B. Lee and T. H. Kwon, Modeling and numerical simulation of residual stresses and birefringence in injection molded center-gated disks, *J. Jmatprotec.*, 111 (2001) 214-218.
- [34] C. Weng, W. B. Lee, S. To and B. Y. Jiang, Numerical simulation of residual stress and birefringence in the precision injection molding of plastic microlens arrays, *J. Icheatmasstransfer.*, 36 (2009) 213-219.
- [35] A. A. Aly, Heat treatment of polymers: A review, *Int. J. Materials Chemistry and Physics.*, 1 (2015) 132-140.
- [36] K. Prashantha, J. Soulestin, E. Lafranche, P. Krawczak, G. Dupin and M. Claes, Taguchi analysis of shrinkage and war-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- page of injection-moulded polypropylene/multiwall carbon nanotubes nanocomposites, *Epresspolymlett*, 3 (2009) 630-638.
- [37] K. Ramesh and S. S. Deshmukh, Automation of white light photoelasticity by phase-shifting technique using colour image processing hardware, *J. Optlaseng*, 28 (1997) 47-60.
- [38] K. Ramesh and S. K. Mangal, Data acquisition techniques in digital photoelasticity: A review, *J. Optlaseng*, 30 (1998) 53-75.
- [39] K.-M. Tsai, C.-Y. Hsieh and W.-C. Lo, A study of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses, *J. Matprotec.*, 209 (2009) 3469-3477.
- [40] D. Mathivanan, M. Nouby and R. Vidhya, Minimization of sink mark defects in injection molding process – Taguchi approach, *Int. J. Jtest*, 2 (2010) 13-22.
- [41] Z. Zhang and B. Jiang, Optimal process design of shrinkage and sink marks in injection molding, *J. Wutuan Univ. Technol.*, 22 (2007) 404-407.
- [42] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley and Sons, New York, NY (2005).
- [43] A. Realpe and C. Velazquez, Growth kinetics and mechanism of wet granulation in a laboratory-scale high shear mixer: Effect of initial polydispersity of particle size, *Chemical Engineering Science*, 63 (2008) 1602-1611.
- [44] A. Realpe and C. Velazquez, Pattern recognition for characterization of pharmaceutical powders, *Powder Technology*, 169 (2) (2006) 108-113.
- [45] M. Frocht, *Photoelasticity*, John Wiley & Sons, 1 (1941) 100-108.
- [46] C. W. Chang, H. S. Lien and J. H. Lin, Determination of reflection photoelasticity fringes analysis with digital image-discrete processing, *Measurement*, 41 (2008) 861-8.
- [47] K. Ramesh, *Digital photoelasticity: Advanced techniques and applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2000) ISBN-13:978-3-642-64099-5.
- [48] J. Des Cloizeaux and G. Jannink, *Polymers in solution: Their modelling and structure*, New York: Ed., Oxford University Press, 1 (2010).
- [49] F.-S. Lobato and J.-V. Steffen, Multi-objective optimization firefly algorithm applied to (Bio) chemical engineering system design, *J. Ajams.*, 1 (2013) 110-116.



Supattarachai Sudsawat is working in the methodology for warpage reduction in plastic injection molding through optimized process parameters and annealing treatment. He is pursuing a Ph.D. at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.



Wipoo Sriseubsai received his Ph.D. degree in Plastic Engineering from University of Massachusetts Lowell, USA. He is currently an Assistant Professor at the Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Asst. Prof. Dr. Sriseubsai's research interests include Injection Mold and Die Design, Plastic Design and Manufacturing, including Plastic Extrusion.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุภัทรชัย สุตสวาท
วัน เดือน ปีเกิด	22 ตุลาคม 2528
ที่อยู่	เลขที่ 37/3 หมู่ที่ 3 ตำบลยางซ้าย อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย 64000 โทรศัพท์: 086-9347763
ประวัติการศึกษา	2548-2551 วศ.บ. (วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2552-2555 M.Sc. (Product development and Materials Engineering) Jonkoping University ประเทศสวีเดน
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.การจัดการอุตสาหกรรม 2.วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ
ประสบการณ์การทำงาน	ก.ย.2555-พ.ค.2556 อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ค.2556-ก.ค.2560 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตีพิมพ์บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสารทางวิชาการ

- [1] **Supattarachai Sudsawat, Wipoo Sriseubsai.** “Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with Genetic algorithm and Firefly algorithm techniques.” **Indian journal of engineering & materials sciences (IJEMS)**, vol.24, 2016. pp 228-238.
- [2] **Supattarachai Sudsawat, Wipoo Sriseubsai.** “Warpage reduction through optimized process parameters and annealed process of injection-molded plastic parts.” **Journal of Mechanical Science and Technology (JMST)**, vol.30, 2018. pp 4787-4799.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้