

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด

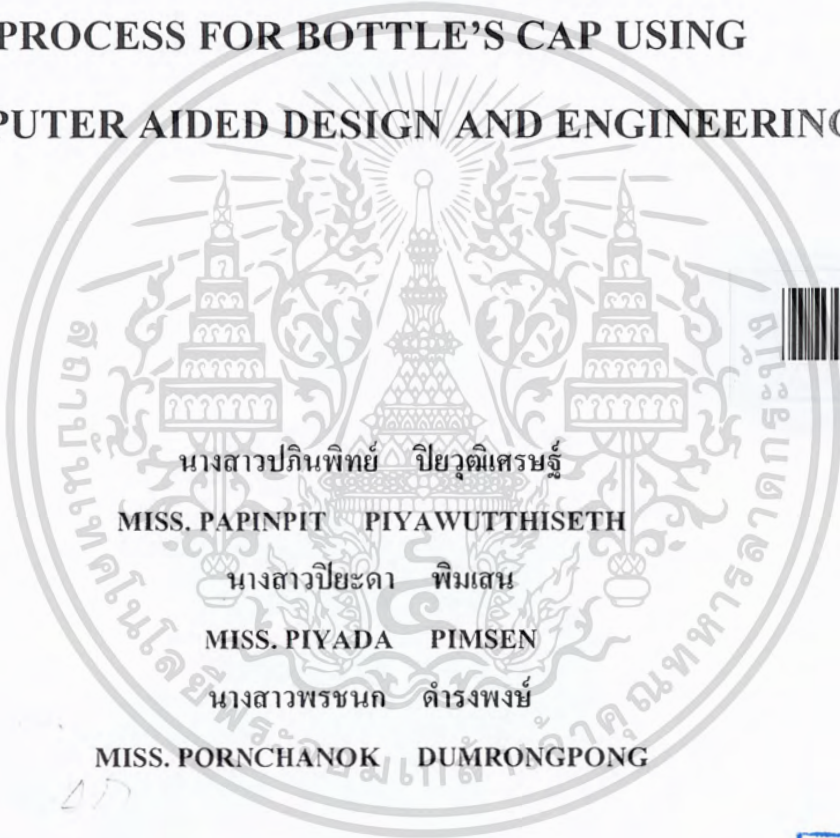
สำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

ด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

THE IMPROVEMENT OF INJECTION MOLDING

PROCESS FOR BOTTLE'S CAP USING

COMPUTER AIDED DESIGN AND ENGINEERING



T119346

นางสาวปิ่นพิทย์ ปิยวุฒิเศรษฐ์

MISS. PAPINPIT PIYAWUTTHISETH

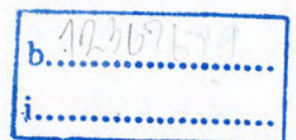
นางสาวปิยะดา พิมพ์เสน

MISS. PIYADA PIMSEN

นางสาวพรชนก ดำรงพงษ์

MISS. PORNCHANOK DUMRONGPONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119346
วัน,เดือน,ปี.....- 7 S.A. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE IMPROVEMENT OF INJECTION MOLDING
PROCESS FOR BOTTLE'S CAP USING
COMPUTER AIDED DESIGN AND ENGINEERING**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2010
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวด
พลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์
ทางวิศวกรรม

The Improvement of Injection Molding Process for Bottle's Cap
Using Computer Aided Design and Engineering

นักศึกษา

นางสาวปัทมาพิชญ์ ปิยะวิเศษชัย	รหัสประจำตัว	50010964
นางสาวปิยะดา พิมพ์เสน	รหัสประจำตัว	50010975
นางสาวพรชนก คำรังพงษ์	รหัสประจำตัว	50011033

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ดร. วิภู ศรีสืบสาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวด
พลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์
ทางวิศวกรรม

นักศึกษา

นางสาวปัทมา พิษณุศรี

นางสาวปิยะดา พิมพ์

นางสาวพรชนก คำรงพงษ์

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ดร.วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดขึ้นเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าหาสภาวะเงื่อนไขงานฉีดที่เหมาะสมที่สุดในการการฉีดขึ้นรูปฝาขวดน้ำพลาสติกแบบเกลียวจากวัสดุประเภทพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน EL-Lene H555J ของบริษัท เอสซีจีพลาสติก จำกัด ซึ่งเป็นเม็ดพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ ผ่านการรับรองด้านประสาทสัมผัส ไร้การกักกรองในสภาพแวดล้อม มีความคงตัวของมิติ มีความเหนียวและทนแรงกระแทกได้ดี มีสารเพิ่มความลื่น เหมาะสำหรับการผลิตฝาขวดน้ำพลาสติกโดยเฉพาะ โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k ซึ่งวิธีการทดลองที่สามารถช่วยให้ศึกษาปัจจัยหลายปัจจัยได้ภายในการทดลองครั้งเดียว โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับเท่านั้น คือ ระดับต่ำ และระดับสูงของแต่ละปัจจัย โดยระดับของปัจจัยทั้งหมดเป็นค่าคงที่ ในการศึกษาครั้งนี้มีการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวรวมทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีด ย้ำ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และความเร็วในการฉีด ทำให้ได้รูปแบบของการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 32 ครั้ง กระทำการทดลองขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดพลาสติกโดยการใช้โปรแกรม Autodesk Moldflow ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ (Computer Aided Engineering : CAE) ที่ช่วยในการจำลองและวิเคราะห์การไหลของพลาสติกสำหรับงานฉีดพลาสติก ที่สามารถวิเคราะห์ ตรวจสอบคุณภาพ และหาความเหมาะสมในการฉีดพลาสติก เมื่อได้ผลการทดลองแล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแทป หลังจากออกแบบการทดลองและทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ได้ ออกแบบไว้ และเก็บรวบรวมข้อมูลของผลการทดลองที่ได้จากแต่ละแบบการทดลอง บันทึกข้อมูลของผลการทดลองในโปรแกรมมินิแทปโดยใช้ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองโดยใช้ Main Effects Plot และการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรด้วย Interaction Plot จากการทดลองพบว่า ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดขึ้นรูปฝาพลาสติกแบบเกลียว คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันฉีด 72 MPa และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นมีค่าตั้งแต่ 25 – 75 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่ส่งผลต่อชิ้นงานภายใต้ขอบเขตการยอมรับชิ้นงาน เมื่อตั้งค่าปัจจัยในการฉีดขึ้นรูปฝาพลาสติกแบบเกลียวดังกล่าว ชิ้นงานจะไม่ปรากฏปัญหา การฉีดไม่เต็มแบบ การโค้งตัว การหดตัว รอยยุบ และความเค้นตกค้าง

ในชิ้นงาน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Improvement of Injection Molding Process for Bottle's Cap Using Computer Aided Design and Engineering
Student	Miss. Papinpit Piyawutthiseth Miss. Piyada Pimsen Miss. Pornchanok Dumrongpong
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic	2010
Thesis Advisor	Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

The purpose of the thesis is to determine the most appropriate condition for an injection molding process by the spiral cap of water bottles made of polyethylene, EL-Lene H555j. This plastic is specially manufactured designed by SCG Plastic Company, and it is qualified for the sensory touching. Furthermore, the plastic could resist the corrosion in various environments and it has a consistent shaped dimension as well. The stiffness, good impact strength and the extra lubricity are all its properties, which are very suitable for manufacturing flawlessly. The designs of experiments are factorial 2^k method, which could helps to monitor many factors in a single experiment. Each factor consists of two levels that are low and high by the levels of all factors are constant. In this study of factors that influence the injection molded plastic bottles, including all five factors, namely the melting temperature, mold temperature, holding temperature, cooling temperature and injection speed. As model of the experiment, a total 32 patterns was performed by injection molding by using Autodesk MoldFlow the software (Computer Aided Engineering: CAE) that supports the simulation and flow analysis of plastic for the injection. The program can be used to analyze, inspect and identify a suitable plastic for injection molding. When the results are obtained and analyzed by using a Minitab software, collecting all results from each experiment and recording all data by using the same program. Analysis of Main Effects Plot interaction between variables with Interaction Plot results shows that the most suitable factor values of injection molding process are 30 degrees C of molding temperature, 160 degrees C of melting temperature, 20 mm/sec of injection speed and 72 MPa of injection pressure. However, the temperature of cooling water can be variable because it does not affect to work. Therefore, when setting factors in injection molding process as a result, the technical problems will not occur including short shot, warpage, shrinkage, sink mark and residual stress at first.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม กรณีศึกษา บริษัท เอสซีจี พลาสติกส์ จำกัด สามารถสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำจากอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีตลอดมาตั้งแต่เริ่มค้นจนจบ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ดร.วิฑู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้ โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ คำชี้แนะถึงแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ความ ช่วยเหลือในทุกๆด้าน รวมถึงความเอาใจใส่ในการทำปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างดีและทุกสิ่งทุกอย่างที่อาจารย์มอบให้แก่กลุ่ม ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการทำโครงการ

บริษัท เอสซีจี พลาสติก จำกัด (SCG) กลุ่มผู้วิจัยขอขอบคุณ ที่เอื้อเฟื้อซอฟต์แวร์ลิซซิง (Moldflow) และ คำแนะนำในการใช้งานต่างๆของโปรแกรม สำหรับการทำให้โปรเจกต์นี้

ดร.ชุมพล ขวงโย กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำและให้ความรู้ในเรื่องการออกแบบ การทดลองและการใช้โปรแกรม Minitab

ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำดีๆ เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Minitab และขอขอบคุณที่คอยดูแลนักศึกษาที่กำลังทำปริญญาานิพนธ์และปิดประตูภาควิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกคืน

ผศ.ดร.สรรเพชญ์ ลิ้มบรรณรัตน์ กลุ่มผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง สำหรับบรรยากาศดี ๆ ที่ทำให้นักศึกษาไม่ รู้สึกกดดันจนเกินไปในขณะที่สอบปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพรชัย แสงรุ่งศรี ตำแหน่ง Technical Service Manager, pipe compound บริษัท เอสซีจี พลาสติก จำกัด ที่ได้ให้ข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับเม็ดพลาสติกและรูปแบบการวางระบบทางวิ่งที่ใช้ในการทดลอง

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่สุดในการให้โอกาสในการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาที่มอบ ให้แก่กลุ่มผู้วิจัยทำให้มีความสำเร็จที่สดใสในวันนี้

ขอบพระคุณภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง เป็นที่ที่ให้มากกว่าคำว่าวิชาการ

ขอบคุณเพื่อนๆ 4Z และพี่น้องชาวลาดกระบังทุกคนที่ให้ความรู้ดีๆ ที่มีให้กันตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และให้กำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าในการทำปริญญาานิพนธ์และแหล่ง ความรู้ทุกแหล่งข้อมูลอันทรงคุณค่าสำหรับการทำโครงการนี้

นางสาวปณิธิพย์ ปิยะดิศเรชญ์

นางสาวปิยะดา พิมพ์เสน

นางสาวพรชนก ดำรงพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ของโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก.....	3
2.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding).....	8
2.3 แม่พิมพ์ (Mold).....	12
2.4 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานฉีดพลาสติก.....	16
2.5 ทฤษฎีการไหลของน้ำพลาสติก.....	17
2.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก.....	24
2.7 รูเข้า (Gate).....	27
2.8 ระบบทางวิ่ง (Runner).....	32
2.9 ระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก.....	36
2.10 ผลของการฉีดพลาสติกต่อการหดตัว.....	38
2.11 ลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นกับงานฉีดและวิธีแก้ไข.....	40
2.12 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....	43
2.13 โปรแกรมทางด้าน CAD/CAM/CAE.....	48
2.14 โปรแกรม Moldflow.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	55
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	55
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง	56
3.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา	57
3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ระดับและขอบเขต	57
3.3.3 เลือกการออกแบบการทดลอง	57
3.3.4 แผนการทดลอง	58
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	59
3.4.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง	59
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง	66
3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง	66
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการทดลอง	67
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของการถดถอยในรูปแบบผืนพลาสติกแบบเกลียว	69
4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลอง โดยใช้ Main Effects Plot	69
4.2.2 การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปร โดยใช้ Interaction Plot	75
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
หนังสืออ้างอิง	83
ภาคผนวก ก	ผก1
ภาคผนวก ข	ผข1
ภาคผนวก ค	ผค1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกบางชนิด.....	6
ตารางที่ 2.2 ค่า Flow Path Ratio ของการฉีดพลาสติกบางชนิด	20
ตารางที่ 2.3 ลักษณะของ Gate ชนิดต่างๆ	29
ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบทางวิ่ง	33
ตารางที่ 2.5 รูปร่างหน้าตัดของระบบทางวิ่ง	34
ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบการจับวาง Runner/Cavity แบบต่างๆ	36
ตารางที่ 2.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นที่เหมาะสม	38
ตารางที่ 2.8 ค่าการหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด	40
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง	58
ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการทดลอง	59
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดพลาสติกเกรดEL-Lene H555J	62
ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุทำแม่พิมพ์ P20 ที่อุณหภูมิห้อง	63
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว	67
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ.....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่แบบมีผลึก (Partial Crystalline Thermoplastics)	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่แบบไม่มีผลึก (Amorphous Thermoplastic)	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมเซตติง (Thermosetting)	5
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก	8
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของชุดฉีด	9
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของชุดปิด - เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)	9
รูปที่ 2.8 พลาสติกเหลวที่เตรียมฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ปิดสนิท	10
รูปที่ 2.9 พลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์	10
รูปที่ 2.10 ฉีดเข้าเพื่อรักษาความดัน	11
รูปที่ 2.11 สกรูยังคงหมุนหลอมพลาสติกเพื่อฉีดเติมเนื้อพลาสติกในส่วนการหดตัว	11
รูปที่ 2.12 แม่พิมพ์เปิดออกและปลดชิ้นงาน	11
รูปที่ 2.13 แม่พิมพ์ฉีดสองแผ่นแบบ Hot Runner	12
รูปที่ 2.14 แม่พิมพ์ฉีดสองแผ่นแบบ Cold Runner	12
รูปที่ 2.15 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น	13
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการจัดวางหลุมแบบ เพื่อลดขนาดของแม่แบบ	13
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการจัดวางระบบทางวิ่ง	14
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการจัดหลุมชิ้นงานให้สมดุลแรงภายในแบบ	14
รูปที่ 2.19 แผนภาพการไหลตามทฤษฎี Newtonian Fluid	18
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress τ กับ Shear Rate $\dot{\gamma}$ และการไหล Newtonian เป็นเส้นตรง	19
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress และ Shear Rate ของ Newtonian Fluid และ Non-Newtonian Fluid ..	19
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ PvT ไดอะแกรม	21
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ PvT สำหรับวัสดุ เซมิ คริสตัลไลน์ ชนิด PP.....	23
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ PvT สำหรับวัสดุอะมอर्फัส ชนิด PS	23
รูปที่ 2.25 Gate เข้าตรงกลาง (Center Spure or Pin Gate)	27
รูปที่ 2.26 Gate เข้าด้านข้างแบบปกติ (Normal, Lateral Gate)	27
รูปที่ 2.27 การไหลเป็นรูไส้กรอก (Sausage) หรือพุ่งเป็นลำ (Jetting) ถ้าน้ำพลาสติกถูกฉีดเข้าไปใน Cavity	27
รูปที่ 2.28 Pin Gate เข้าหลายจุด	28
รูปที่ 2.29 Lateral film gate	28
รูปที่ 2.30 แบบของรูเข้า (Gate) ทั้งแบบถูกและผิด	31
รูปที่ 2.31 ปลาย Runner เข้าสู่ Cavity ทั้งแบบถูกและผิด	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.32 การจัดวาง Cavity/Runner แบบเอียงศูนย์และได้ศูนย์	35
รูปที่ 2.33 การถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอ	37
รูปที่ 2.34 การถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอ	37
รูปที่ 2.35 กราฟของแรงดันและอุณหภูมิของน้ำพลาสติกในระหว่างที่ไหลเข้า Cavity	39
รูปที่ 2.36 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ	44
รูปที่ 2.37 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน	47
รูปที่ 2.38 ตัวแปรที่ไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน	47
รูปที่ 2.39 แผนภาพ (Flow Chart) ขั้นตอนการวิเคราะห์ของโปรแกรม Mold Flow®	51
รูปที่ 2.40 Block Diagram ขั้นตอนการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกของโปรแกรม Mold Flow®	53
รูปที่ 3.1 เวอร์เนี่ยคาลิปเปอร์ ระบบดิจิทัล	55
รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น 450 MG	56
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม Solid Work 2009	60
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานต้นแบบฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว	60
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการ Generate Mesh	60
รูปที่ 3.6 หน้าต่างการ Check Mesh Statistics	61
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ต้องแก้ไข Node และ Element	61
รูปที่ 3.8 ตำแหน่ง gate ที่เหมาะสมของการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว	63
รูปที่ 3.9 ลักษณะหัวฉีด (Nozzle) ที่เลือกใช้	64
รูปที่ 3.10 ทางวิ่งของชิ้นงานฝาเกลียวพลาสติก	65
รูปที่ 3.11 ระบบน้ำหล่อเย็น	65
รูปที่ 4.1 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการฉีดขึ้นงานไม่เต็มแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	70
รูปที่ 4.2 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดรอยยุบในชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	71
รูปที่ 4.3 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดการ โกงตัวในชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	72
รูปที่ 4.4 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวในชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดความเค้นดก้างในชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	74
รูปที่ 4.6 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการฉีกชิ้นงานไม่เต็มแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	75
รูปที่ 4.7 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดรอยยุบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	76
รูปที่ 4.8 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการโค้งตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	77
รูปที่ 4.9 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	78
รูปที่ 4.10 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดความเค้นดก้างในชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาของโครงการและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกนับว่าเป็นวัสดุที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก ดังนั้นภาคอุตสาหกรรม การผลิตจึงมีการนำพลาสติกเข้ามาแปรรูปเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น ในทุกๆปี เช่น การนำพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะสำหรับการบรรจุผลิตภัณฑ์ เครื่องดื่ม จึงก่อให้เกิดการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกรูปแบบใหม่ เป็นฝาขึ้นเดียว ไม่มีแหวนรองฝา เป็นการช่วยประหยัดปริมาณพลาสติกที่ใช้งาน อีกทั้งเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีความใส่ใจ ต่อสุขภาพมากขึ้น จึงเป็นที่มาของการพัฒนา การผลิตฝาขวดน้ำพลาสติกจากเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) ความหนาแน่นสูง (HDPE) ชนิด EL-Lene H555J ซึ่งถูกออกแบบเป็นพิเศษให้ผ่านการรับรองด้านประสาทสัมผัส ไร้การกีดกร่อนในสภาพแวดล้อม มีความคงตัวของมิติ มีความเหนียวและทนแรงกระแทกได้ดี มีสารเพิ่มความลื่น สามารถสัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่มโดยตรงได้อย่างปลอดภัย ได้รับการรับรองมาตรฐาน U.S. FDA²¹ จากองค์การอาหาร และยาของสหรัฐอเมริกา และ Standard European Economic Community 2002/72/EC Article 2 ของสหภาพยุโรป [1]

การผลิตฝาขวดน้ำพลาสติก มีวิธีการขึ้นรูปที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด (Injection) เป็นวิธีการที่ทำให้พลาสติกหลอมเหลวแล้วฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์เหล็กที่เย็นด้วยความดันสูง พลาสติกจะแข็งตัวตามรูปทรงในแม่พิมพ์ตามต้องการ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพลาสติกมีหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็น สาเหตุจากเม็ดพลาสติก การเตรียมเม็ดพลาสติกที่ไม่เหมาะสม เช่น การอบไล่ความชื้นที่ไม่สมบูรณ์ สาเหตุจากการ ออกแบบแม่พิมพ์ สาเหตุจากเครื่องฉีดพลาสติกและสาเหตุจากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในการฉีด สาเหตุเหล่านี้ทำให้ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติกเกิดรอยตำหนิที่ทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง ไม่ว่าจะเป็น รอยยุบ (Sink mark) การโก่งตัว (Warpage) การหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage) หรือแม้แต่พลาสติกไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์ ปัญหาเหล่านี้ล้วนแล้วแต่สร้างความสูญเสียในด้านต้นทุน เวลา และพลังงานแก่ผู้ผลิต [2]

จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น กลุ่มผู้วิจัยจึงได้นำโปรแกรม Autodesk Moldflow ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์และจำลองการฉีดขึ้นรูป มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดขึ้นรูปฝาขวดน้ำพลาสติกด้วยเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) ความหนาแน่นสูง (HDPE) ชนิด EL-Lene H555J เพื่อที่จะวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จและสามารถแก้ปัญหาชิ้นงานที่อาจจะเกิดข้อบกพร่องได้ก่อนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเกินความจำเป็น ความล่าช้าในกระบวนการผลิต และสามารถลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังทำให้กระบวนการผลิตชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้โปรแกรมทางด้าน CAD และ CAE กับการฉีดพลาสติกแบบทางวิ่งร้อน
2. เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดกับการฉีดพลาสติก เช่น ฉีดไม่เต็มแบบ, รอยชุป, การโค้งตัวของชิ้นงาน, รอยหดตัวของชิ้นงาน และวิธีการทำการแก้ไขข้อบกพร่องในจุดที่เกิดปัญหา
3. เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขงานฉีดที่เหมาะสม ที่ส่งผลให้งานฉีดพลาสติกมีรูปร่างที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพที่สุด

1.3. ขอบเขตของโครงการ

1. เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการฉีดเป็นชนิดพอลิเอทิลีน เกรด EL-Lene H555J ของบริษัท เอสซีจี พลาสติก จำกัด
2. ปัจจัยที่กำหนดให้ส่งผลต่อการฉีดพลาสติก คือ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีด อัตราอุณหภูมิหล่อเย็น และความเร็วในการฉีด
3. ใช้โปรแกรม Autodesk Moldflow 2010 ในการรันค่าสภาวะเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการฉีดฝาขวดพลาสติก
4. ใช้โปรแกรม Minitab 15 ในการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการฉีดฝาขวดพลาสติก
5. ผลการทดลองใช้สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวและระบบรูวิ่ง มีการทำสมดุลการไหล (Balance Runner)

1.4. ประโยชน์ของโครงการ

1. สามารถนำโปรแกรม Autodesk Moldflow มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหางานฉีดพลาสติก โดยลดวัสดุคุดิบที่ใช้ผลิตลง เนื่องจากการต้องลองผลิตจริง อีกทั้งยังเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนการผลิต
2. สามารถทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม
3. นำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาในงานฉีดพลาสติกที่มีรูปแบบอื่นๆต่อไปในอนาคตได้
4. เพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ฝาขวดน้ำพลาสติกเกลียวให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม จำเป็นต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดพลาสติก ทฤษฎีการไหลของน้ำพลาสติก ตัวแปรการตั้งเครื่องฉีด รูปร่างของน้ำพลาสติก ระบบทางวิ่ง ระบบหล่อเย็น ทฤษฎีการหดตัว ปัญหาที่พบในชิ้นงาน โปรแกรม Autodesk Moldflow วิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) และโปรแกรม Minitab เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานอย่างถูกวิธีและตรงตามความต้องการ นำมาซึ่งความสำเร็จในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

2.1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก

2.1.1. ความเป็นมาของพลาสติก

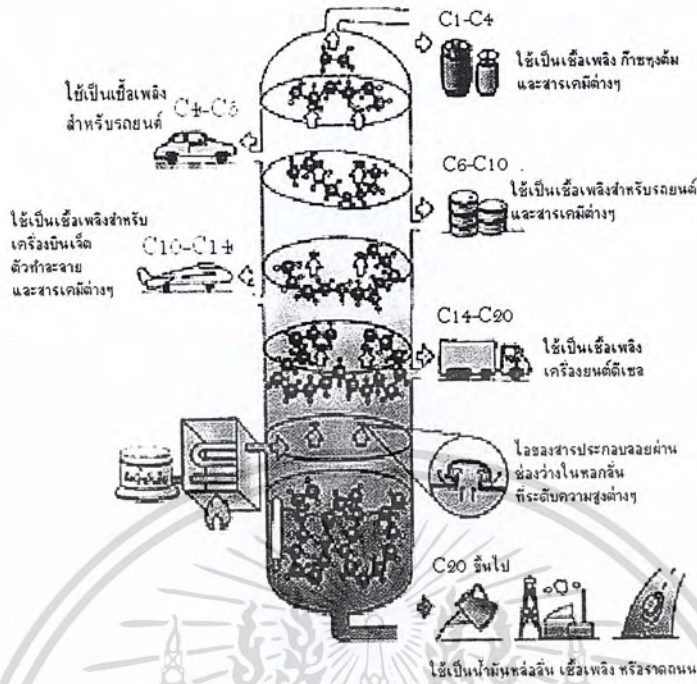
พลาสติกคือ วัสดุสังเคราะห์ที่นำมาใช้ประโยชน์แทนวัสดุธรรมชาติ เช่น เส้นใย ชิ้นส่วนของยานยนต์ ภาชนะต่างๆ พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลต่อกันเป็นสายยาว มีธาตุสำคัญๆคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆเป็นส่วนประกอบย่อยซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น พลาสติกบางชนิดเมื่อเย็นก็จะแข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็จะอ่อนตัว บางชนิดก็แข็งตัวถาวร [3]

สมาคมวิศวกรพลาสติก (SPE) และสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติก (SPI) แห่งสหรัฐอเมริกาได้จำกัดความของพลาสติกไว้ดังนี้ “พลาสติกคือ วัสดุที่ประกอบด้วยสารหลายอย่าง ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงลักษณะอ่อนตัวขณะทำการผลิต ซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อน หรือแรงอัดหรือทั้งสองอย่าง” [4]

2.1.2. กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก [3]

พลาสติกมีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียม น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติได้ผิวดิน การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้สามารถแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่าปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวเกินความต้องการใช้งานอยู่ปริมาณมาก แต่กลับมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายสั้นที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าอยู่น้อย จึงต้องนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกินความต้องการมาผ่านกระบวนการแยกสลายเพื่อตัดความยาวให้สั้นลง ได้เป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น ก๊าซเอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกบางชนิดโดยก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

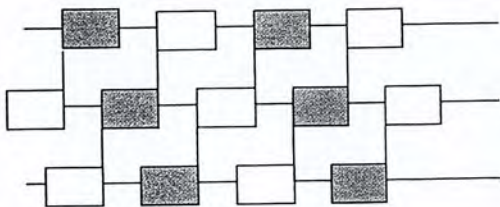


รูปที่ 2.1. การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ [3]

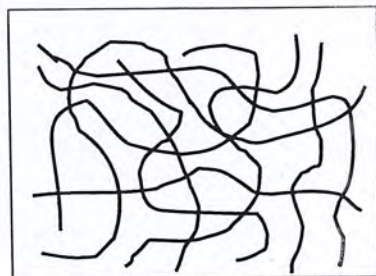
2.1.3. การแบ่งประเภทของพลาสติก [5]

2.1.3.1 **เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)** เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดี เพราะจะหลอมละลายเป็นของเหลวหลังจากถูกความร้อน และกลับสู่สภาพแข็งตัวอีกครั้งเมื่อเย็นตัว ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกประเภทนี้เช่นขวดน้ำ ภาชนะในครัวเรือนที่เป็นพลาสติก เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ชนิด คือ

- 1) แบบมีผลึก (Partial crystalline Thermoplastics หรือ Crystalline) การเรียงตัวของโมเลกุลเป็นระเบียบและอยู่ใกล้ชิดกัน ทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงสูง ทนความร้อนได้ดี แต่เนื้อพลาสติกจะมีความขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้คือ PE, PP, POM, PTFE, PETP
- 2) แบบไม่มีผลึก (Amorphous Thermoplastic) การเรียงตัวของโมเลกุลไม่เป็นระเบียบและอยู่ห่างกัน ทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงที่น้อยกว่า ทนความร้อนได้น้อยกว่า แต่เนื้อพลาสติกจะใสกว่า เมื่อเทียบกับแบบ Crystalline ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้คือ PS, SB, ABS, SA, PMMA, PVC, PC



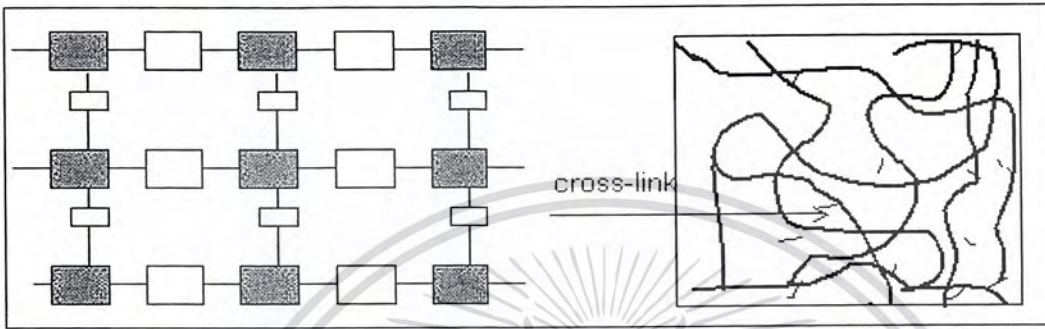
รูปที่ 2.2. โครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่แบบมีผลึก
(Partial Crystalline Thermoplastics) [6]



รูปที่ 2.3. โครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่แบบไม่มีผลึก
(Amorphous Thermoplastic) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) โมเลกุลจะเรียงตัวกันเป็นเส้นและเกาะกันเหมือนตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พลาสติกประเภทนี้จะมีรูปร่างที่ถาวร เมื่อผ่านกรรมวิธีการใช้ความร้อน แรงอัด หรือการหล่อขึ้นรูป จะไม่สามารถนำกลับมาหลอมละลายเพื่อนำมาใช้ใหม่อีกครั้ง ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้คือ Phenomic Melamine Polyester Eposey Resin ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกประเภทนี้เช่น ถ้วยชามเมลามีน



รูปที่ 2.4. โครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) [6]

2.1.3.3. อีลาสโตเมอร์(Elastomer) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติของความแข็ง และการยืด-หดตัวที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอยู่ที่อุณหภูมิห้องจะมีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาจะมีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบบ Amorphous พลาสติกประเภทนี้จะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถ้าผ่านกรรมวิธีการผลิตไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกประเภทนี้เช่น ยางรถยนต์

2.1.1. คุณสมบัติของพลาสติกและการนำไปใช้งาน [5]

พลาสติกมีคุณสมบัติทางโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า High Molecular Weight คือใน 1 โมเลกุลมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่น จึงทำให้ มีคุณสมบัติดังนี้ คือ

- คุณสมบัติทางกายภาพ (Mechanical) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ทึบแสง เบา กันน้ำ หล่ลื่นในตัว ฯลฯ
- คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical) เป็นฉนวน ไฟฟ้า ทนความร้อน
- คุณสมบัติทางเคมี (Chemical) ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่นๆ

สัญลักษณ์ ความหนาแน่น ค่าการหดตัว คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1. คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกบางชนิด [7]

ชนิดพลาสติก	สัญลักษณ์	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าหดตัว (%)	คุณสมบัติ และการนำไปใช้งาน
Acrylonitrile- Butadiene- Styrene	ABS	1.03-1.06	0.4 – 0.9	แข็ง ทนแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนได้ มีความเงาแสงผ่านได้ยาก สามารถเคลือบผิวด้วย กระแสไฟฟ้าได้ ทนต่อน้ำมัน ใช้ทำโทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ
Polyamide (Nylon)	PA	1.02-1.14	-	ทนแรงกระแทกได้ดี ใช้ทำเฟืองจะไม่เกิดเสียง ขณะทำงาน ทำใบพัด ชิ้นส่วนขับเคลื่อน ลูก เบี้ยว ฉนวนหุ้มลวด และสายเคเบิล ชิ้นส่วน รถยนต์ (ดูดซับน้ำได้มาก)
Poly Butyrene- Terephthalate	PBTP	1.31-1.38	1.5 – 2.2	แข็ง ทนต่อการขีดข่วน มีความเสียดทานต่ำ ทำ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เครื่องใช้ภายในบ้านที่ทน ความร้อนสูง สวิตช์ไฟฟ้า ข้อต่อหัวเทียน ชิ้นส่วนที่ต้องการขนาดพอดีและทนต่อการ กระแทก
Polycarbonate	PC	1.19-1.2	0.5 – 0.7	แข็งแรงทนต่อการกระแทกได้แต่ตัดไม่ได้ มี ลักษณะใสใช้ทำส่วนประกอบของไฟส่องทาง เลนส์ต่าง ๆ หมวกนิรภัย หุ้มชิ้นส่วนโลหะ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย
High Density- Polyethylene	HDPE	0.941-0.965	(1.5 – 3) 2–6	มีความหนาแน่นสูง
Low Density- Polyethylene	LDPE	0.91-0.925	1.5 – 5	มีความหนาแน่นต่ำทั้ง HDPE และ LDPE จัดเป็นพลาสติกที่ง่ายต่อการฉีด นิยมใช้ทำ ภาชนะใส่ของเพื่อการขนส่ง เครื่องใช้ภายใน ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า และสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1. คุณสมบัติและการนำไปใช้งานของพลาสติกบางชนิด (ต่อ)

ชนิดพลาสติก	สัญลักษณ์	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าหดตัว (%)	คุณสมบัติ และการนำไปใช้งาน
Polyethylene- Terephthalate	PETP	1.37	1.2 – 2	แข็ง ทนการขีดข่วนได้ดี มีความเสียดทานต่ำใช้ ฉีดที่ทรงแสง หรือชิ้นงานที่ต้องการความ แม่นยำทางแสงมาก ๆ ใช้เป่าขวดขนาดใหญ่กว่า 1-2 ลิตร
Phenol- Formaldehyde	PF	1.4	1.2	มีการคงรูปของขนาดดีมาก ทนความร้อนได้ดี เกรดทั่วไปทนได้ 150 องศา เกรดพิเศษทนได้ถึง 300 องศา
Polymethyl Methacrylate (Acrylic)	PMMA	1.17-1.2	0.1 – 0.4	ทนความร้อนได้พอสมควร ทนต่อสารเคมี Metha Crylate และกรดที่มีความเข้มข้นปาน กลางได้ ใช้ทำ (Acrylic) ภาชนะบรรจุอาหาร อุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำ ในอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลงานที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์ อุปกรณ์ เขียนแบบ เลนส์
Polyoseymethylene Polyformaldehyde	POM	1.41-1.42	1.9 – 2.3	แข็งแรง ใช้ฉีดงานชิ้นส่วนที่มีความแม่นยำมาก เช่น ชิ้นส่วนนาฬิกาข้อมือ อุปกรณ์ควบคุม อุปกรณ์ตั้งเวลา เฟอริไนเจอร์ อุปกรณ์ล็อก ไฟ แช็ค
Polypropylene	PP	0.9-0.91	1 – 2.5	จัดอยู่ในกลุ่มของ Polyolefine มีความคงทนสูง ทนต่อความร้อนได้ ใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้ากระสวยบินค้า
Polystyrene	PS	1.03-1.05	0.4 – 0.7	PS เกรดมาตรฐานจะเปราะจึงเติมสารประกอบ เพื่อแก้ไข PS เกรดที่ทนแรงกระแทก ทนการขีด ขีด ใ้ดีใช้ทำเครื่องเล่นเทป เครื่องครัว ผนังบุ ตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

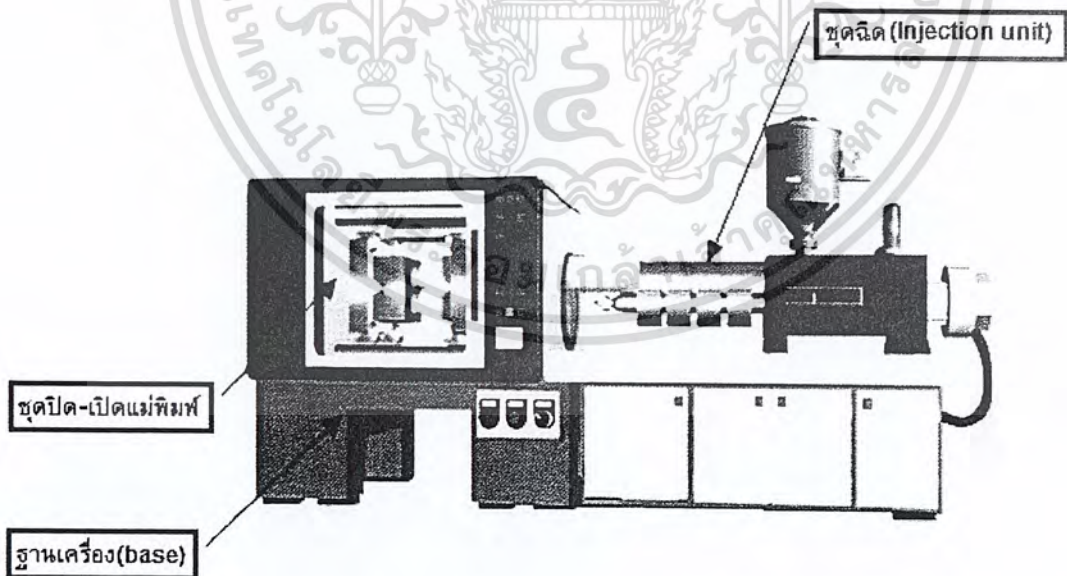
ในอุตสาหกรรมพลาสติกนั้น มีการใช้กระบวนการขึ้นรูปต่างๆอยู่มากมาย ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะกระบวนการฉีดขึ้นรูป หรือ Injection Molding

การฉีดพลาสติกคือ การนำเอาเม็ดพลาสติกป้อนเข้าไปในกรวยเติม เม็ดพลาสติกจะเคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกลูกสูบและได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์จนหลอมละลายอยู่ภายในกระบอกลูกสูบ เม็ดพลาสติกที่หลอมละลายจะถูกสกรูหมุนกวนให้เม็ดพลาสติกผสมกันและดันให้พลาสติกเหลวเคลื่อนผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็ม ปล่อยให้วัสดุเย็นตัวลง หลังจากนั้นเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออกมา

2.2.1. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) [8]

เครื่องฉีดพลาสติกทำงานเป็นรอบกระบวนการ เริ่มจากพลาสติกในรูปผงหรือเม็ดพลาสติกถูกส่งเข้าไปในส่วนป้อนและควบคุมปริมาณก่อนที่จะค่อยๆหลอมเหลวในส่วนที่มีอุณหภูมิต่างๆกัน แล้วจึงฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ ด้วยแรงส่งของลูกสูบหรือเกลียวอัด พลาสติกเหลว(หรือเรียกว่าน้ำพลาสติก)จะไหลเต็มแม่พิมพ์ กลายเป็นพลาสติกแข็งสุดท้ายจึงนำออกจากแม่พิมพ์เป็นชิ้นงานสำเร็จ งานฉีดพลาสติกจะเกี่ยวข้องกับเครื่องฉีด แม่พิมพ์ เม็ดพลาสติก และชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งต้องใช้ความสามารถอย่างมาก ในด้านเทคนิคและอาศัยประสบการณ์สูง เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีความสม่ำเสมอและใช้งานได้ดี

เครื่องฉีดพลาสติกโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนสำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ ชุดฉีด ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ และฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



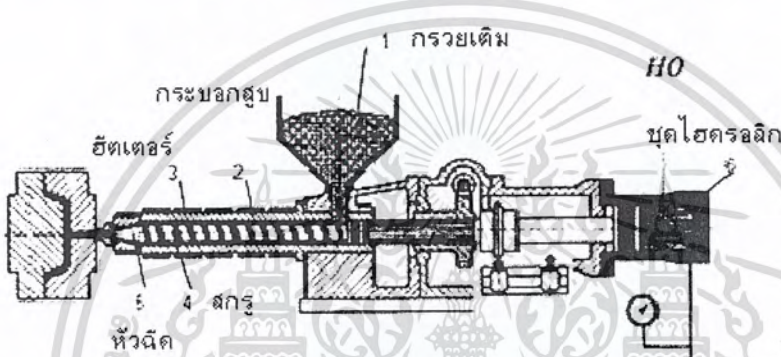
รูปที่ 2.5. ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2. โครงสร้างและการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก [8]

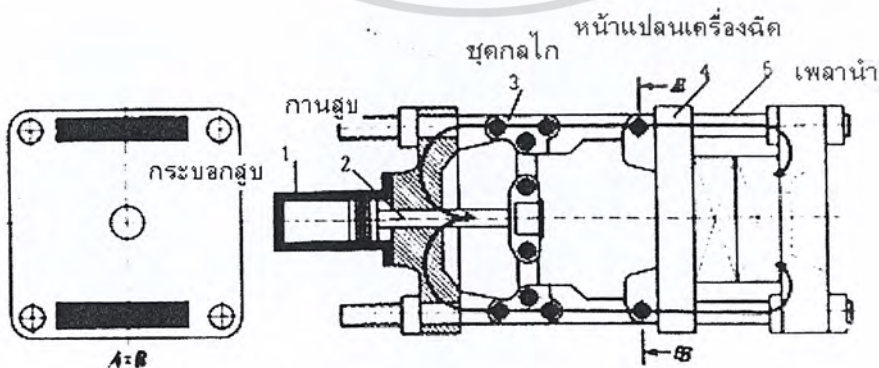
โดยทั่วไปแล้วเครื่องฉีดพลาสติกจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ชุดฉีด ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์และฐาน
คังจะอธิบายต่อไปนี้

2.2.2.1. ชุดฉีด (Injection Unit) การทำงานของชุดหัวฉีด เม็ดพลาสติกที่ในกรวยเติมจะค่อยๆ ไหลลดลงเมื่อสกรูหมุนพา
เม็ดพลาสติกออกไปที่กระบอกสูบ และเม็ดพลาสติกก็จะหลอมละลายในกระบอกสูบ ด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์
(Heater) และจากการเสียดสีกับกระบอกสูบ สกรูจะทำหน้าที่คลุกเคล้าเม็ดพลาสติกที่ละลายแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน
พร้อมกับดันให้พลาสติกพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์และรักษาความดันไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของชุดฉีด [8]

2.2.2.2. ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการยึดแม่พิมพ์ทั้งสองส่วนให้เคลื่อนที่ปิด - เปิด แม่พิมพ์ ใน
จังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก ให้แรงในการปิดแม่พิมพ์ หล่อเย็นชิ้นงานฉีดพลาสติก และปลดชิ้นงานออก
จากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ปกติแม่พิมพ์จะมีสองด้านประกบกัน โดยด้านที่พลาสติกเข้าจะเป็นด้านที่อยู่กับที่
และอีกด้านจะเป็นด้านเคลื่อนที่ ชุดปิด - เปิดแม่พิมพ์ แบ่งออกเป็น 2 ระบบจะทำหน้าที่อัดแม่พิมพ์ให้แน่นเพื่อต้าน
ความดันภายในขณะฉีดพลาสติก



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของชุดปิด - เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) [8]

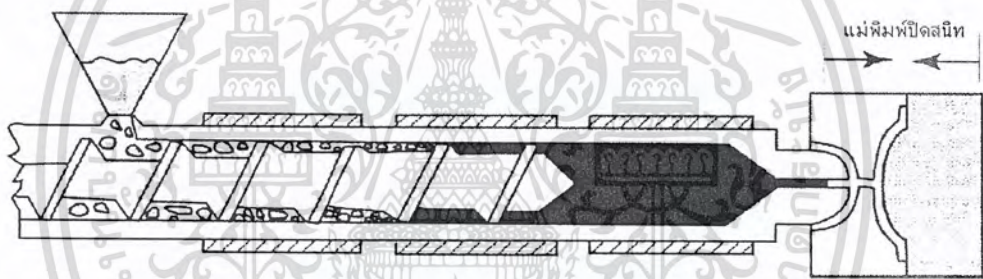
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3. **ฐานเครื่อง (Base)** เป็นส่วนที่ติดตั้งยึดชิ้นส่วน และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่รับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมดในเครื่อง และยังทำหน้าที่เป็นถังน้ำมันไฮดรอลิก โดยส่วนใหญ่แล้วตัวฐานเครื่อง จะทำด้วยเหล็กเหนียว ที่เชื่อมประกอบเข้าเป็นฐานเครื่อง เพื่อความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักมากๆ ได้

2.2.3. ขั้นตอนการฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding [10]

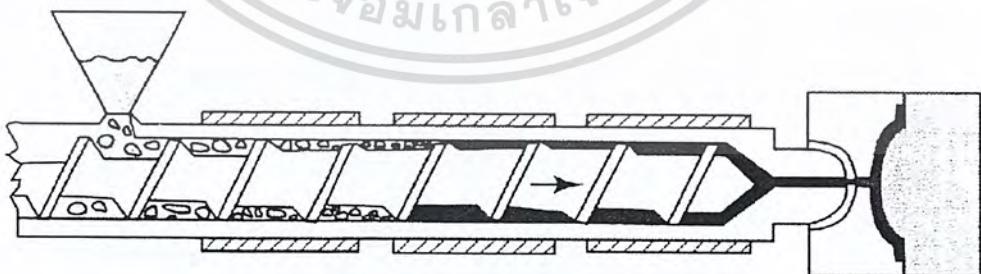
การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกจะมีการทำงานอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แบบไม่เป็นอัตโนมัติ (Manual) แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic) และแบบอัตโนมัติทั้งหมด (Fully-Automatic) จะมีการทำงานเป็นไปตามขั้นตอนของเครื่องฉีด โดยเมื่อครบวงจรการทำงานของเครื่องฉีดแล้ว ก็จะเริ่มวงจรการทำงานใหม่ทันที และทำต่อไปเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องสามารถสรุปขั้นตอนของการฉีดพลาสติกได้ 9 จังหวะ ดังต่อไปนี้

- 1) แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิดและล็อกจนแน่น เพื่อป้องกันการแยกด้วยแรงดันภายในแม่พิมพ์
- 2) ชุดฉีดเคลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์จนกระทั่งชนกับแม่พิมพ์ และค้างไว้ด้วยแรงปิดแม่พิมพ์ที่พอเหมาะ เพื่อป้องกันชุดฉีดถอยหลังกลับ ในขณะที่ทำการฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พลาสติกเหลวที่เตรียมฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ปิดสนิท [11]

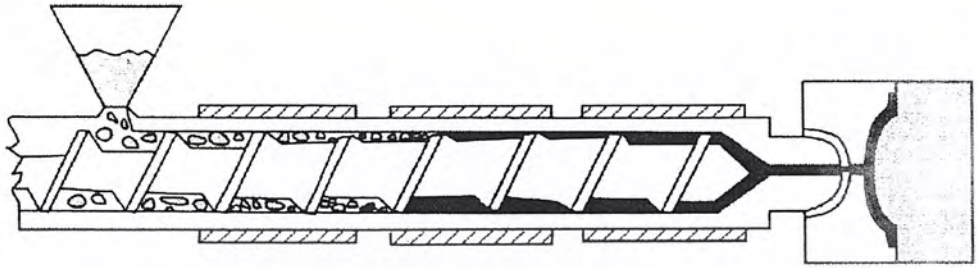
- 3) ฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยสกรูจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ [11]

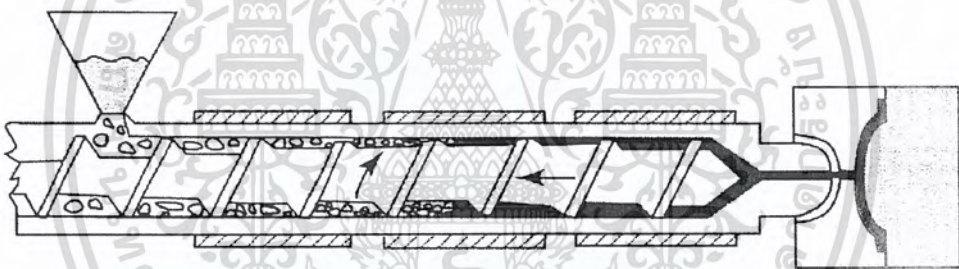
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ย้ำรักษาความดันให้กับพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น และไม่เกิดรอยยุบตัวที่ผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.10



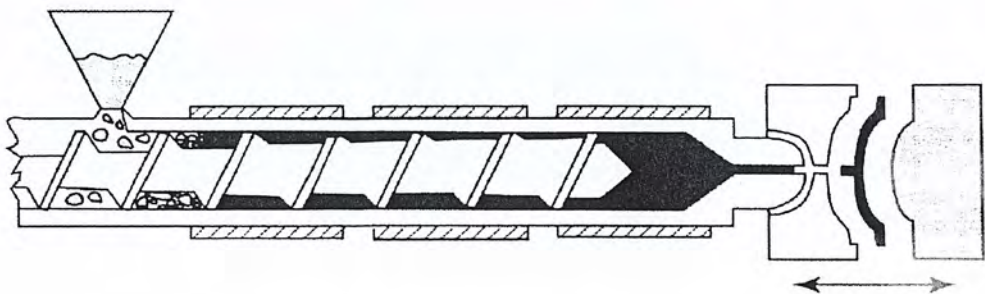
รูปที่ 2.10 ฉีดย้ำเพื่อรักษาความดัน [11]

- 5) หล่อเย็นชิ้นงานฉีดในแม่พิมพ์ โดยที่จังหวะนี้จะมีอิทธิพลมากต่อเวลาการทำงานทั้งวงจร
6) การหลอมและป้อนพลาสติกไปหน้าปลายสกรู เมื่อได้ปริมาณพลาสติกเหลวตามที่ต้องการแล้วเกลียวหนอนจะหยุดหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สกรูยังคงหมุนหลอมพลาสติกเพื่อฉีดเติมเนื้อพลาสติกในส่วนการหดตัว [11]

- 7) ชุดฉีดจะถอยหลังกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิของหัวฉีดลดต่ำลงเกินไป เพราะจะทำให้พลาสติกเหนียวเกินไปและไหลไม่ได้
8) แม่พิมพ์จะเปิดออกหลังจากสิ้นสุดเวลาในการหล่อเย็น
9) ทำการปลดชิ้นงาน เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกสุดแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการพิมพ์เพื่อการศึกษารายงานไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. แม่พิมพ์ (Mold)

ชิ้นงานจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีด ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์และช่างทำแม่พิมพ์จึงมีความสำคัญต่องานนี้ คุณภาพและความเชื่อถือได้ของแม่พิมพ์มีผลต่อความสวยงามของชิ้นงานและต้นทุนการผลิต

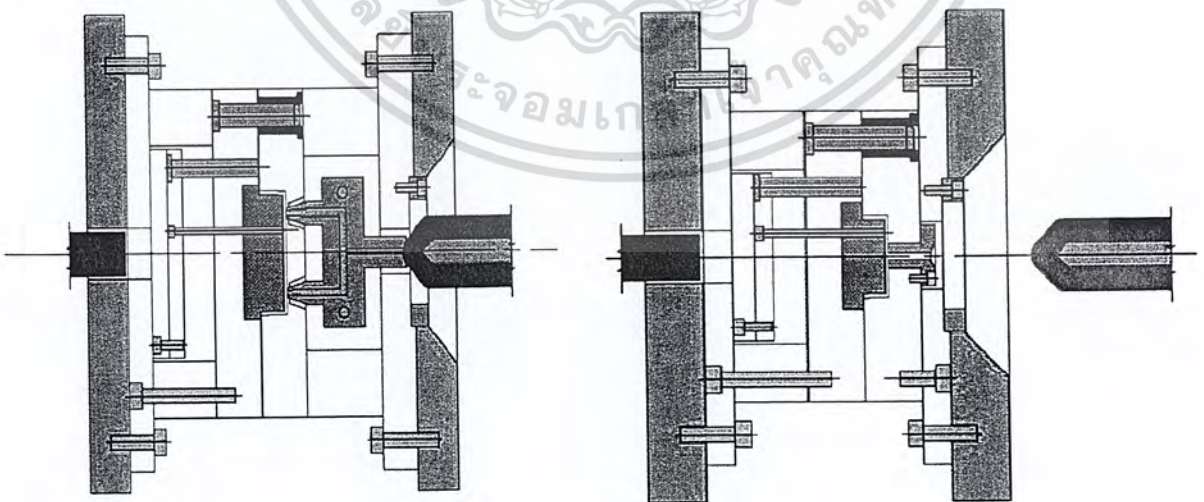
2.3.1. ชนิดของแม่พิมพ์ [12]

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกนั้นมีอยู่หลายชนิด ทำให้ยากแก่การแบ่งแยกชนิดแม่พิมพ์เฉพาะกลุ่ม แม่พิมพ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะสามารถแบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นกลุ่ม โดยจะพิจารณาจากโครงสร้างพื้นฐานของแม่พิมพ์คือ

- ชนิดของรูเข้า (Gate) และระบบทางวิ่ง (Runner)
- ชนิดของการปลดชิ้นงาน
- การมีหรือไม่มี Undercut และ Side Core
- ชนิดของตัวกระทุ้งชิ้นงาน
- ระบบขั้นตอนการเคลื่อนที่ของ

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างพื้นฐานของแม่พิมพ์ สามารถแบ่งแม่พิมพ์ออกเป็นกลุ่มชนิดของแม่พิมพ์ตามโครงสร้างพื้นฐานได้ดังนี้

2.3.1.1. แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two plate mold) จะใช้ในกรณีที่ฉีดชิ้นงานจำนวนน้อย ชิ้นงานมีผนังหนาและบาง แม่พิมพ์แบบนี้จะทำให้เกิดพลาสติกส่วน Spure และ Runner สามารถตัดออกได้หลังจากฉีดเสร็จแล้ว ยกเว้นกรณีที่สามารถใช้รูเข้าได้พอดี สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ แม่พิมพ์สำหรับทางวิ่งร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.13 และแม่พิมพ์สำหรับทางวิ่งเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



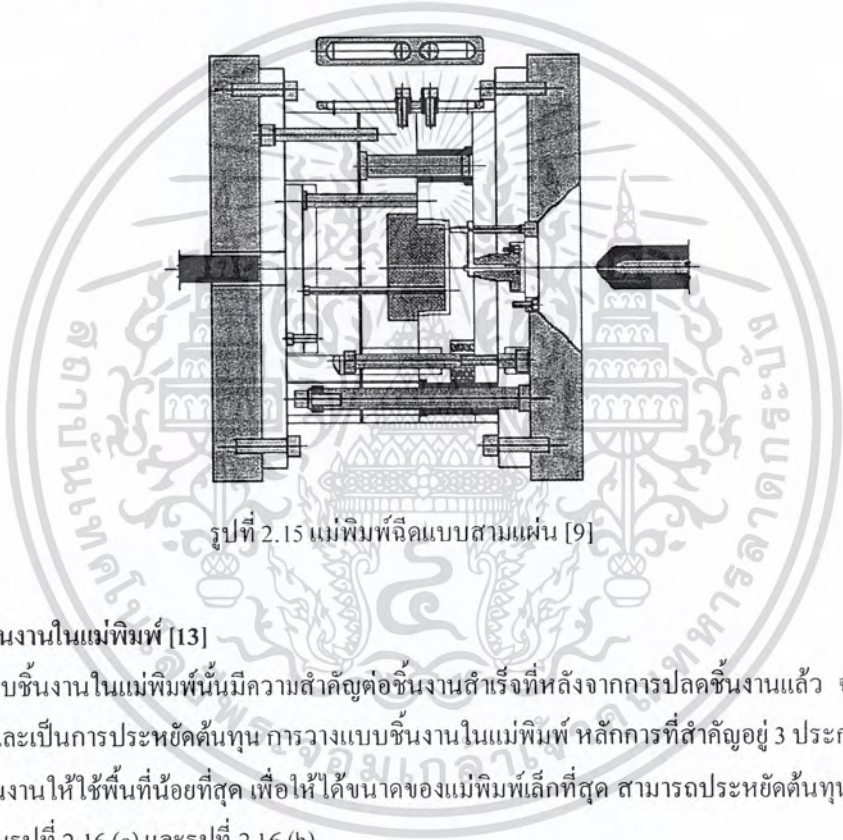
รูปที่ 2.13 แม่พิมพ์ฉีดสองแผ่นแบบ Hot Runner [9] รูปที่ 2.14 แม่พิมพ์ฉีดสองแผ่นแบบ Cold Runner [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2. แม่พิมพ์ฉีดแบบแยกด้านข้าง (Split mold) จะมีตัว Jaw ติดอยู่ที่ส่วนเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์โดยเคลื่อนที่ปิด-เปิดตามชุดปิด-เปิด ของแม่พิมพ์ เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ปลดด้วย Side Core ไม่ได้

2.3.1.3. แม่พิมพ์ฉีดแบบคลายเกลียว (Unscrewing mold) การขึ้นรูปเกลียวจะอาศัยส่วน Core ที่เป็นเกลียวและออกแบบให้มีระบบปลดหรือคลายเกลียวอัตโนมัติ เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีเกลียวใน

2.3.1.4. แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น (Three plate mold) แม่พิมพ์จะเปิดออกในสองระนาบ ส่วนที่อยู่กับที่ของแม่พิมพ์ จะประกอบด้วยแผ่นสองแผ่น แม่พิมพ์แผ่นที่สามมักจะใช้รูเข้าแบบเข็ม ซึ่งจะเห็นรอย Gate เล็กน้อย เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีค้ำบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

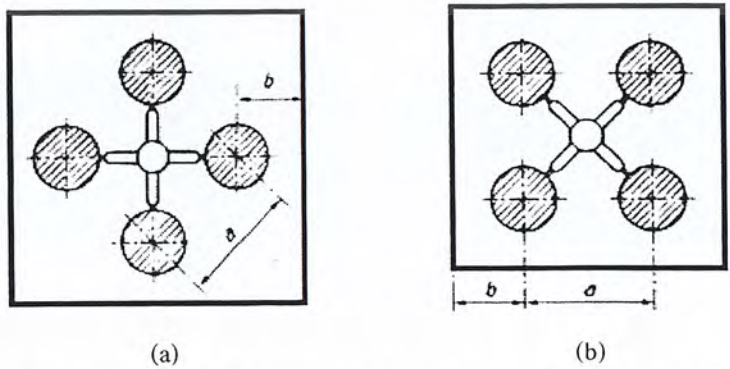


รูปที่ 2.15 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น [9]

2.3.2. การวางแบบชิ้นงานในแม่พิมพ์ [13]

การวางแบบชิ้นงานในแม่พิมพ์นั้นมีความสำคัญต่อชิ้นงานสำเร็จที่หลังจากการปลดชิ้นงานแล้ว จะมีรูปร่างที่สมบูรณ์ มีคุณภาพ และเป็นการประหยัดต้นทุน การวางแบบชิ้นงานในแม่พิมพ์ หลักการที่สำคัญอยู่ 3 ประการ คือ

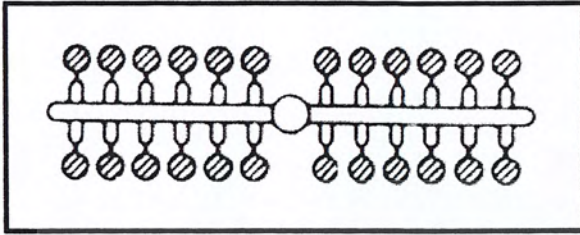
- ต้องวางชิ้นงานให้ใช้พื้นที่น้อยที่สุด เพื่อให้ได้ขนาดของแม่พิมพ์เล็กที่สุด สามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (a) และรูปที่ 2.16 (b)



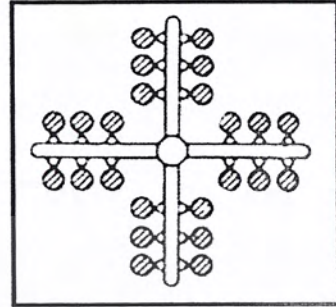
รูปที่ 2.16 (a) และ 2.16 (b) ตัวอย่างการจัดวางหลุมแบบ เพื่อลดขนาดของแม่แบบ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จัดวางระบบทางวิ่ง (Runner) ให้สั้นที่สุด ถ้ารูวิ่งยาวเกินไปจะทำให้ความดันลดในร่องน้ำมันมาก ทำให้พลาสติกเย็นเร็วเกินไป ชิ้นงานที่อยู่ห่างออกไปจะได้รับพลาสติกไม่เต็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a) และ 2.17 (b)



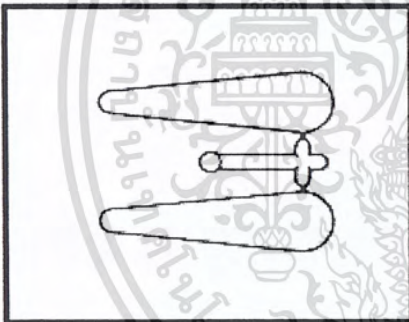
(a)



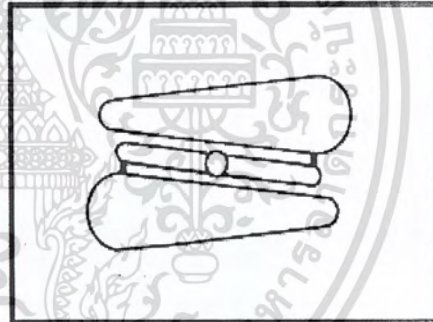
(b)

รูปที่ 2.17 (a) และ 2.17 (b) ตัวอย่างการจัดวางระบบทางวิ่ง [13]

- จัดวางแบบให้ถูกต้อง เพื่อให้แรงบิดแม่พิมพ์สมดุล ถ้าวางชิ้นงานไม่ถูกต้อง มีพื้นที่รับแรงดันมากเกินไปทางใดทางหนึ่ง จะทำให้แม่พิมพ์เสีย พลาสติกเกิดการบิดงอได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (a) และ 2.18 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 2.18 (a) และ 2.18 (b) ตัวอย่างการจัดหลุมชิ้นงานให้สมดุลแรงภายในแบบ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4. วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ (Mold Material) [12]

แม่พิมพ์ที่ดีนั้นจะต้องสามารถทนต่อความร้อน แรงอัดต่างๆ ได้ดี ไม่มีร้าวซึมหรือแตกหัก ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งในการเลือกวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก ต้องพิจารณาชั้นส่วนหลัก 4 กลุ่มคือ

2.3.4.1. ฐานแม่พิมพ์ (Mould Base)

สำหรับชั้นส่วนฐานแม่พิมพ์และชั้นส่วนแม่พิมพ์อื่น ที่ไม่ได้รับความเค้นสูง เช่น แหวนประคอง (Locating ring), ตัวเว้นระยะ (spacer), แผ่นยึดตัวกระทุ้ง (ejector plate) สามารถใช้เหล็กกล้าเกรด DIN ST 37-2 หมายเลขวัสดุ 1.0037 หรือ SAE 1010, AISI 1010 หรือเหล็กเกรดเทียบเท่าที่มีความต้านแรงดึง (Tensile strength) 340-470 นิวตัน/ตร.มม.

อย่างไรก็ตาม สำหรับชั้นส่วนแม่พิมพ์ที่ต้องการคุณภาพสูง ควรใช้เหล็กกล้าเกรด DIN C 45 W หมายเลขวัสดุ 1.1730, DIN CK 60 หมายเลขวัสดุ 1.1221, SAE 1060, JIS S 58 C หรือเกรดที่เทียบเท่า ในการทำแผ่น Cavity หรือแผ่นรอง Core Spacer แผ่นยึดตัวกระทุ้ง และในการใช้งานที่ไม่ต้องการเปลี่ยน Core และ Cavity บ่อยๆ ก็ใช้ทำแผ่น Cavity และ Core ได้

ในบางกรณี โดยเฉพาะบริเวณที่มีการผุกร่อน (Corrosion) มาก เช่น สถานที่ใกล้ทะเล จะใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ทำฐานแม่พิมพ์ จะประหยัดกว่าการใช้ฐานแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าธรรมดา เพราะจะจัดปัญหาเรื่องป้องกันการผุกร่อนและความยากลำบากในการล้างก่อนนำมาใช้ใหม่

2.3.4.2. สลักนำเลื่อน, ปลอกนำเลื่อน (Leader Pin, Leader Pin Bushing)

รวมทั้งส่วนอื่นที่ต้องทนการเสียดสี ควรทำด้วยเหล็กกล้าเกรด DIN 16 Mn Cr 5 หมายเลขวัสดุ 1.7131, SAE/AISI 5115 Angle Pin ทำจาก DIN C 15 หมายเลขวัสดุ 1.0401, SAE/AISI 1015 Spure Bush ทำจาก DIN 40 Cr Mn Mo 5 หมายเลขวัสดุ 1.2312, 60 Mn Si 4 หมายเลขวัสดุ 1.2826, AISI H 10 หรือ H 11, JIS SKD 61

2.3.4.3. Core และ Cavity plate, Core และ Cavity Insert

เหล็กกล้าที่ชุบผิวแข็งหรือไนไตรด์ธรรมดา ใช้ทำแผ่นแม่พิมพ์ Cavity และ Core Insert เนื่องจากตัดปาดผิวได้ง่าย ขัดผิวมันได้ดี และผิวชั้นนอกแข็ง ส่วนเนื้อในเหนียว ทำให้ทนต่อการเสียดสีได้ดี เหล็กกล้าชุบผิวแข็งธรรมดาที่ใช้คือ

- DIN 21 Mn Cr 5 หมายเลขวัสดุ 1.2162 (AISI และ JIS ไม่มีเหล็กเกรดนี้) เป็นเหล็กที่ขัดผิวมันและมีคุณสมบัติตัดปาดผิวได้ดี และยังใช้ทำสลักนำเลื่อนด้วย
- DIN 40 Mn Cr 5 หมายเลขวัสดุ 1.2311 (AISI และ JIS ไม่มีเหล็กเกรดนี้) เป็นเหล็กกล้าที่ชุบแข็งมาแล้ว ขัดผิวมันและ Photo Etching ได้ดี
- DIN 35 CrMo 4 หมายเลขวัสดุ 1.2330 หรือ AISI P20 เหล็กกล้าที่ทนต่อการผุกร่อน (Corrosion Resistant Steel)
- Din X 42 Cr 13 หมายเลขวัสดุ 1.2083, AISI 420 ทนต่อการผุกร่อนได้ดีมาก
- Din X 36 Cr Mo 17 หมายเลขวัสดุ 1.2316 (AISI และ JIS ไม่มีเหล็กเกรดนี้) ทนการผุกร่อนได้ดีกว่า 1.2083 ขัดผิวมันได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- DIN X 40 Cr 13 หมายเลขวัสดุ 1.4034 ใกล้เคียงกับ JIS SUS 420J2 เป็น Martensitic Stainless Steel (ชุบแข็งได้) ทนการสึกหรอนได้ดีมาก ขัดผิวมัน และสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้าชนิดนี้ชุบไนไตรต์ได้ แต่ความทนทานการสึกหรอนจะลดลง ความแข็งที่ผิวประมาณ 1000 HV เหล็กกล้าชุบไนไตรต์พิเศษ (Special Nitriding Steel)
- DIN 34 CrAlMo 5 หมายเลขวัสดุ 1.8507, AISI A355 Cl.c ใกล้เคียงกับ JIS SACM 645 เป็นเหล็กกล้าผสมอลูมิเนียมและชุบไนไตรต์ ทนการสึกหรอ ความแข็งที่ผิวประมาณ 750 HV มักจะใช้ทำเครื่องมือ Extrusion แต่ใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกก็ได้
- DIN 34 CrAlNi 7 หมายเลขวัสดุ 1.8550 เป็นเหล็กกล้าผสมอลูมิเนียมและชุบไนไตรต์ มีความแข็งที่ผิวมากกว่า 1.8507 คือมีความแข็งประมาณ 950 HV การใช้งานเช่นเดียวกับ 1.8507

2.3.4.4. เข็มกระทุ้ง, ปลอกกระทุ้ง (Ejector Pin, Ejector Sleeve)

- DIN X 38 CrMo V 51 หมายเลขวัสดุ 1.2343, AISI H 11, JIS-SKD 6 สำหรับทำเข็มและปลอกกระทุ้ง
- DIN X 40 CrMo V 51 หมายเลขวัสดุ 1.2344, AISI H 13, JIS SKD 61 สำหรับทำเข็มกระทุ้ง
- DIN 100 MnCr W 4 หมายเลขวัสดุ 1.2510, AISI D1 ใกล้เคียงกับ JIS SKD 11 ใช้ทำปลอกกระทุ้ง
- DIN 34 CrAlMo 5 หมายเลขวัสดุ 1.8507, AISI A355 Cl.D ใกล้เคียงกับ JIS SACM 645

2.4. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก [14]

คุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่แตกต่างกันออกไป มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1. อิทธิพลของชนิดพลาสติก

ในงานฉีดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกนั้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Amorphous กับ Semi-crystalline พบว่าเมื่อพลาสติกได้รับความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น คือ ใน Semi-crystalline เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะ ที่ผลึกเริ่มหลอมเหลว (Glass Transition Temperature) ค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้ว ค่าการนำความร้อนของ Semi-crystalline จะค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของผลึก แต่เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวของผลึกแล้ว ค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นทันที ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดผลึกหลอมเหลว และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อสิ้นสุดช่วงผลึกหลอมเหลวค่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว หมายความว่า Semi-crystalline ต้องการความร้อนส่วนหนึ่ง เพื่อช่วยในการหลอมเหลวผลึกนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2. อิทธิพลของการออกแบบ

เนื่องจากการออกแบบชิ้นงานจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยรวมของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการแปรรูป ค่าการไหลของพลาสติก (Flow ability) รวมไปถึงข้อจำกัดในการออกแบบแม่พิมพ์ และการฉีด ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการออกแบบแม่พิมพ์ การออกแบบระบบทางเข้า (Gate) ระบบทางไหลของพลาสติก (Runner) หรือแม้แต่กระทั่งระบบหล่อเย็น (Cooling) ล้วนแล้วแต่มีความสำคัญกับคุณภาพของชิ้นงานทั้งสิ้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบได้แก่ การหดตัว (Shrinkage) ความหนาของชิ้นงาน (Thickness) ความเรียวของชิ้นงาน (Taper) รัศมีระหว่างผิวต่อ (Fillet) ครีบก้น (Rib) ส่วนนูนของชิ้นงาน (Boss) ส่วนที่เป็นคอคอดของชิ้นงาน (Undercut) รอยต่อ (Weld Line) ระบบทางไหลของพลาสติก (Runner) ระบบทางเข้าพลาสติก (Gate) ความแข็งแรงของชิ้นงาน (Strength) และช่องระบายอากาศในชิ้นงาน (Air ventilation) เป็นต้น

2.4.3. อิทธิพลของพารามิเตอร์

ที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อคุณภาพชิ้นงานหากแม่พิมพ์ถูกออกแบบได้ถูกต้อง และเหมาะสมแล้ว ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานก็มีเพียงการปรับตั้งพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งพารามิเตอร์ก็มีหลายค่าด้วยกัน แต่ค่าที่สำคัญได้แก่ ความเร็วในการฉีด ระยะเปลี่ยนความดันฉีดเป็นฉีดช้า เวลาในการรักษาความดันฉีดช้า เวลาในการหล่อเย็น เวลาในการหลอมเหลว และป้อนพลาสติกเหลว อุณหภูมิพลาสติกเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความดันไฮดรอลิก เป็นต้น การปรับตั้งค่าเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากการทดลองฉีดไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามต้องการ ซึ่งทำให้มีการสูญเสียเวลาและต้นทุนในการฉีดเป็นอย่างมาก หากผู้ปรับตั้งมีความรู้และความเข้าใจมากขึ้น ก็จะช่วยให้ออกได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและยังประหยัดเวลาและต้นทุนในการทดลองอีกด้วย

2.5. ทฤษฎีการไหลของน้ำพลาสติก [15]

2.5.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

น้ำพลาสติกที่เกิดจากการหลอมเหลวเม็ดพลาสติก หรือเรียกว่า Melt Plastic นั้น จะแสดงคุณสมบัติเป็นของไหล (Fluid) ซึ่งใกล้เคียงกับของไหลชนิด Pseudo Plastic โดยทางทฤษฎีได้แบ่งของไหลออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1.1. Newtonian Fluid

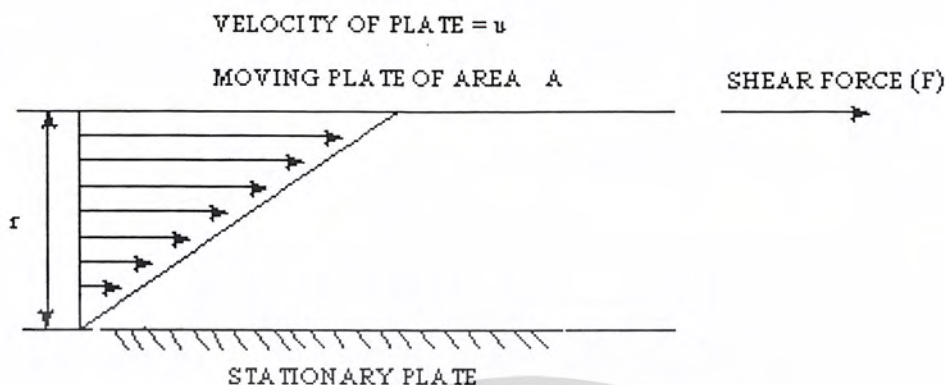
จากแนวความคิดต่างๆไป น้ำและของเหลวจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน จากกฎของ Newtonian Fluid ในการพิจารณาของไหลใช้แผ่นขนาน 2 แผ่น ซึ่งมีพื้นที่กว้างห่างกันเป็นระยะ A ในช่องว่างมีของไหลอยู่ เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำที่แผ่นบนจะเกิด Shear Stress ขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.19 และเช่นเดียวกับของแข็งก็คือ จะเกิด Strain ขึ้นในของไหล นั่นคือมีการเปลี่ยนรูปของของไหล แต่การ Deformation ที่ขึ้นต่างๆ ของไหลจะแปรไปตามความเร็วของของไหลที่ขึ้นต่างๆกัน ดังสมการ 2.1

$$\frac{dy}{dt} = \frac{v}{r} \quad (2.1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเทียบกับเวลา

r คือ ความกว้างของช่องการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่รับทราบซึ่งได้รับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
119346
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19. แผนภาพการไหลตามทฤษฎี Newtonian Fluid [15]

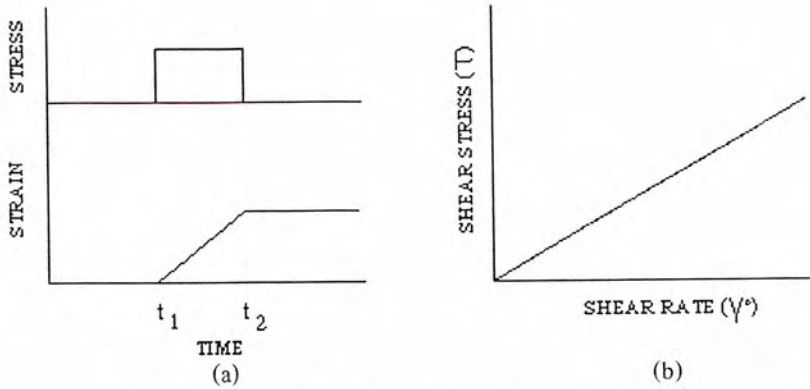
ค่า $\frac{dy}{dt}$ นี้เรียกว่า Shear Rate ซึ่งเขียนเป็น γ' เปรียบได้กับ Shear strain ที่เกิดใน Solid แต่ที่ใช้อัตราการ Deformation ก็เพราะว่า การ Deformation ในของไหลจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จึงไม่อาจกำหนดค่าเป็นค่าสัมบูรณ์ได้ และจากความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Shear strain จะได้ว่า Shear stress เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Shear rate เช่นกัน ดังนั้น Shear stress เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ γ' คือ

$$\tau = \mu \gamma' = \mu \left(\frac{v}{r} \right) \quad (2.2)$$

แต่การเปลี่ยนความเร็วที่ชั้นของไหลจะไม่เป็นแบบเส้นตรงเทียบกับ r ดังนั้น

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dr} \right) \quad (2.3)$$

โดย μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of Viscosity) ของของไหล เมื่อเขียนกราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับเวลา จะได้เช่นเดียวกับของ Solid แต่กราฟระหว่างความเครียด (Strain) หรือ อัตราการเฉือน (Shear rate) กับเวลา (time) จะแตกต่างกัน โดย Strain จะเพิ่มจาก t_1 ไป t_2 ตามเวลาที่มี Shear Stress และเมื่อไม่มี Stress ก็ยังคงมี Strain อยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (a) และ 2.25 (b) ความชันของกราฟ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด μ



รูปที่ 2.20 (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress τ กับ Shear rate $\dot{\gamma}$ [15]

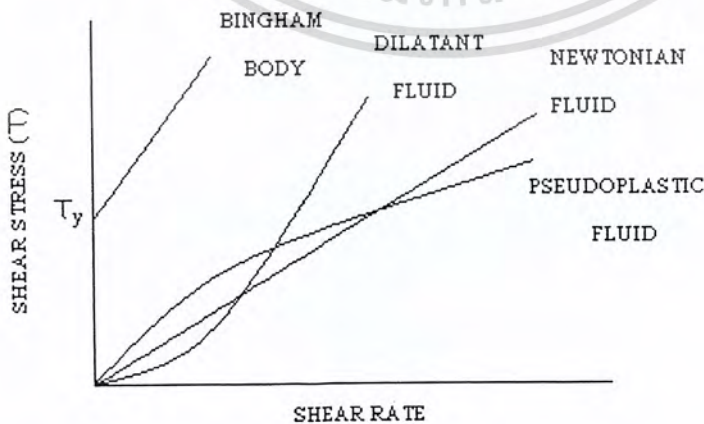
รูปที่ 2.20 (b) การไหล Newtonian เป็นเส้นตรง [15]

2.5.1.2. Non-Newtonian Fluid

สัมประสิทธิ์ความหนืดของ Newtonian Fluid มีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับ Shear Stress และเวลาซึ่งไม่เป็นเช่นนั้นกับวัสดุที่แท้จริงหลายชนิด เช่น พลาสติกหลอมและสารแขวนลอยเข้มข้น จึงต้องมีทฤษฎีที่เหมาะสมเพื่ออธิบายถึงคุณสมบัติของวัสดุเหล่านั้น คือ ทฤษฎี Non-Newtonian Fluid ซึ่งก็เป็นทฤษฎีที่ใกล้เคียงคุณสมบัติที่แท้จริงเท่านั้น ยังไม่มีทฤษฎีที่อธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุได้ถูกต้องสมบูรณ์ ได้มีการจำแนก Non-Newtonian Fluid ออกเป็น 3 ชนิดคือ

- Pseudo Plastic Fluid มีพฤติกรรมใกล้เคียง Melt Plastic
- Dilatants Fluid มีพฤติกรรมใกล้เคียงสารแขวนลอยเข้มข้น
- Bingham Body มีพฤติกรรมใกล้เคียงสารแขวนลอยพวกเยื่อ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของ Melt Plastic ได้ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง Shear Stress และ Shear Rate ของ Newtonian Fluid และ Non-Newtonian Fluid จะได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress และ Shear Rate ของ Newtonian Fluid และ Non-Newtonian Fluid [15]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Skelland ได้สรุปสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของ Pseudo plastic fluid ซึ่งเรียกว่า Power law equation ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ไว้ดังนี้

$$\tau^n = \frac{1}{k} (\dot{\gamma}) = -\frac{1}{k} \left(\frac{dv}{dr} \right) \quad (2.4)$$

โดย n คือ สัมประสิทธิ์ของ Non-Newtonian Fluid

2.5.2. การไหลของน้ำพลาสติกในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [15]

เมื่อน้ำพลาสติกเข้าสู่ Cavity ผิวนอกของพลาสติกจะสัมผัสกับผิวของ Cavity ที่เย็นกว่า จะกลายเป็นพลาสติกแข็งทันที ขณะที่แกนกลางของพลาสติกยังหลอมเหลวอยู่ พลาสติกที่ฉีดตามเข้าไปจะไหลอยู่ในแกนกลางนี้ โดยคั้นพลาสติกที่อยู่บริเวณนั้นให้ไหลต่อไป เกิดเป็นส่วนหน้าของการไหลขึ้นมาใหม่ และผสมกันระหว่างการไหลไปข้างหน้ากับการไหลออกข้างนอก ส่วนที่ไหลออกข้างนอกจะสัมผัสกับผนังของ Cavity แข็งตัวและกลายเป็นทางให้พลาสติกใหม่ที่ไหลเข้ามาตามช่องที่มีผนังเป็นพลาสติกแข็ง

อัตราส่วนเส้นทางการไหล (Flow Path Ratio) เป็นอัตราส่วนของระยะทางการไหลกับความหนาของช่องทางไหล โดยมีข้อกำหนดว่า ถ้า Flow path ratio มากกว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของหน้าตัดแล้ว การไหลของน้ำพลาสติกจะเต็มแม่พิมพ์ ความยาวของการไหลคือระยะทางวัดจากรูเข้า (Gate) ของน้ำพลาสติก ไปถึงจุดที่ห่างที่สุดใน Cavity อัตราส่วนนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับนักออกแบบและช่างฉีดพลาสติกได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า Flow Path Ratio ของการฉีดพลาสติกบางชนิด [15]

Thermoplastic	Flow Path Ratio
ABS	80-100
AMMA	100-150
PA 6	140-340
PA 66	180-350
POM	100-250
PBTB	100-250
PC	30-70
PEK	Up to 200
PE HD	150-200
PE LD	200-300
PPS	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่า Flow Path Ratio ของการฉีดพลาสติกบางชนิด (ต่อ)

Thermoplastic	Flow Path Ratio
PP	150-350
PS	150
PS (toughened)	130
PSU	30-150
PVC (plasticized)	Up to 180
PVC (unplasticized)	60
SAN	140

2.5.3. ความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ความร้อน

การจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกในการวิเคราะห์ หาได้จากข้อมูล PvT ของวัสดุ

2.5.3.1. ค่าการขยายตัวและการอัดตัว

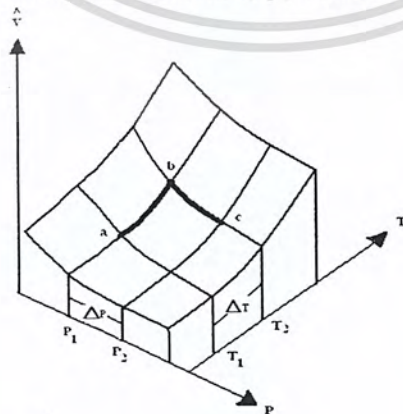
สมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ความดัน P, ปริมาตรจำเพาะ \hat{V} และอุณหภูมิ T สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$f(p, \hat{V}, T) = 0 \quad (2.5)$$

กรณีใช้สองตัวแปร สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{V} = g(p, T) \quad (2.6)$$

กราฟความสัมพันธ์ของข้อมูล จะพิจารณากระบวนการ โดยใช้ PvT ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ PvT ไดอะแกรม [15]

เมื่อ T_1 คืออุณหภูมิของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะความดันคงที่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงที่จุด a และ b การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก T_a เป็น $T_a + \Delta T$ สาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร คือ

$$g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a) \quad (2.7)$$

ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta T} = \frac{g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)}{\Delta T} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta T} = \frac{\bar{V}g(p_a, T_a + \Delta T) - \bar{V}(p_a, T_a)}{\Delta T} \quad (2.9)$$

ΔT เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรชั่วขณะ ใช้แทนได้โดย

$$\left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial T}\right)_p \quad (2.10)$$

ตัวห้อยชี้ให้เห็นถึงความดันคงที่

$$\beta = \frac{1}{\bar{V}} \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial T}\right)_p \quad (2.11)$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของวัสดุ เรียกว่า ค่าการขยายของวัสดุมีหน่วยเป็น (K^{-1}) เมื่อจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันคงที่อุณหภูมิคงที่ จาก b และ c ดังแสดงรูปที่ 2.24 ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยเฉลี่ยเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันกำหนดได้โดย

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta P} = \frac{g(p_a + \Delta p, T_b) - g(p_a, T_b)}{\Delta P} \quad (2.12)$$

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta P} = \frac{\bar{V}g(p_a + \Delta p, T_b) - \bar{V}(p_a, T_b)}{\Delta P} \quad (2.13)$$

ΔP เข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยเฉลี่ย ใช้แทนได้โดย

$$\left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial P}\right)_T \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Isothermal compressibility (K) คือ

$$K = -\frac{1}{\hat{V}} \left(\frac{\partial \hat{V}}{\partial T} \right)_T \quad (2.15)$$

ถ้าเครื่องหมายมีค่าเป็นลบ แสดงว่าปริมาตรจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น มีหน่วยเป็น (m³N⁻¹)

2.5.3.2. ข้อมูล P-vT สำหรับการวิเคราะห์การไหล

ข้อมูล P-vT จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอัดตัว (Packing Phase) แต่อาจจะใช้ในขบวนการเติมเต็ม Filling Phase ก็ได้ ข้อมูลสามารถหาได้จากการทดลองและกราฟที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์การหดตัวและบดอง สำหรับวัสดุ Semi-crystalline ซึ่งข้อมูล P-vT จะเปลี่ยนแปลงและมีอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และดังรูปที่ 2.24

จากกราฟการทดลองจะถูกนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้
ช่วงอุณหภูมิต่ำ

$$\hat{V} = \frac{a_1}{a_4+p} + \frac{a_2T}{a_3+p} + a_5 e^{a_6T - a_7p} \quad (2.16)$$

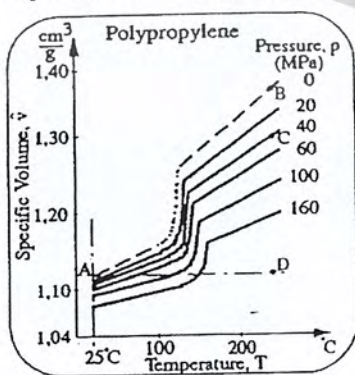
ช่วงอุณหภูมิสูง

$$\hat{V} = \frac{a_1}{a_4+p} + \frac{a_2T}{a_3+p} \quad (2.17)$$

ช่วงการเปลี่ยนแปลง

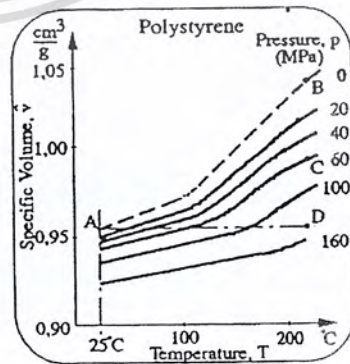
$$p = b_1 + b_2T \quad (2.18)$$

ทั้ง a_i และ b_i คือค่าคงที่หาได้จากการวิเคราะห์



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ P-vT

สำหรับวัสดุเซมิคริสตัลไลน์ [15]



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ P-vT

สำหรับวัสดุอะมอร์ฟัส [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6. พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก [16]

พารามิเตอร์ที่ต้องปรับตั้งค่าสำหรับงานฉีดนั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด จึงต้องมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของแต่ละค่า เพื่อให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากที่สุด พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องฉีดมีดังนี้

2.6.1. อุณหภูมิพลาสติกเหลว (Melt Temperature)

อุณหภูมิพลาสติกเหลว คือ อุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด ตัวแปรที่สำคัญในการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานแต่ละชนิด คือ ชนิดของพลาสติก เนื่องจากหากอุณหภูมิพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลง ก็จะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่นค่าความหนืด (Viscosity) เอนทัลปี (Enthalpy) ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) เป็นต้น โดยค่าอุณหภูมิจะถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตเม็ดพลาสติกชนิดนั้นๆ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นช่วง

2.6.2. อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temperature)

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิกระบอกฉีดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง ส่วนหลัง ซึ่งจะเป็นแผ่นความร้อนที่ติดอยู่กับกระบอกฉีด การตั้งอุณหภูมิกระบอกฉีดจำเป็นต้องปรับให้เหมาะสมกับการทำงาน ซึ่งทั่วไปจะมีการตั้งอุณหภูมิกระบอกฉีดอยู่ 3 แบบ คือ

- แบบอุณหภูมิตดลง (จากหัวฉีด ไปยังกรวยเติมพลาสติก) โดยการตั้งอุณหภูมิแบบนี้จะใช้เมื่อระยะชักของสกรูมีค่าระหว่าง 1.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู
- แบบอุณหภูมิคงที่ โดยที่การตั้งอุณหภูมิกระบอกฉีด แบบนี้จะให้เมื่อระยะชักของสกรูอยู่ระหว่าง 1.5-2 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู
- แบบอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (จากหัวฉีดไปยังกรวยเติมพลาสติก) โดยการตั้งอุณหภูมิแบบนี้จะใช้เมื่อระยะชักสกรูค่าระหว่าง 2-3 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู

2.6.3. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature)

อุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอิทธิพลต่อความดันในแม่พิมพ์เช่นเดียวกับอุณหภูมิพลาสติกเหลว คือระหว่างจังหวะการฉีด ความหนืดของพลาสติกเหลวจะเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีอิทธิพล ไม่มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา มีความหนามากแต่จะมีอิทธิพลมากต่อชิ้นงานบาง และมีระยะทางไหลที่ยาว

2.6.4. อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demold Temperature)

อุณหภูมิปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ สามารถตรวจสอบได้จากตัวควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature Control) หรือจากการวัดอุณหภูมิชิ้นงานหลังจากปลดชิ้นงานจากออกจากแม่พิมพ์ โดยค่านี้ผลต่อชิ้นงานหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยค่านี้มีผลต่อชิ้นงานคือ หากการปลดชิ้นงานเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมากจะทำให้ชิ้นงานที่เย็นตัวนอกแม่พิมพ์เกิดการหดตัว ไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ และยังทำให้ชิ้นงานมีรอยการกระทุ้งที่ผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5. ระยะชักสกรู (Metering Stroke)

ระยะชักสกรู คือ ระยะพลาสติกเหลวหน้าสกรู โดยจะแสดงถึงปริมาณพลาสติกเหลวที่ต้องการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1-3 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู หากค่านี้ไม่ถูกคำนวณให้ถูกต้องก็จะทำให้พลาสติกเหลวที่เข้าสู่ชิ้นงาน ไม่พอดีกับปริมาณที่ต้องการ

2.6.6. เวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลีด (Resident Time)

เวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกลีดนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่พลาสติกเหลวหลอมละลาย หากพลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลีดนานเกินไป จะส่งผลให้พลาสติกเสื่อมสภาพได้ คำแนะนำทั่ว ๆ ไปในการกำหนดเวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลีดจะแนะนำให้ไม่ควรแช่อยู่นานเกิน 10 นาที

2.6.7. ระยะสำรอง (Cushion)

ระยะสำรอง คือ ระยะที่ช่วยป้องกันการกระแทกของหัวฉีดกับแม่พิมพ์ โดยจะต้องตั้งค่านีไว้ภายในกระบอกลีด และยังป้องกันไม่ให้พลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงและการไหลย้อนกลับ เนื่องจากปริมาณพลาสติกเหลวที่อยู่ในระยะสำรองที่เหมาะสมจะสามารถชดเชยการหดตัวของพลาสติกที่ถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ในจังหวะของการฉีดอัดด้วย

2.6.8. ความเร็วรอบสกรู (Screw Speed)

ความเร็วรอบสกรู มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของพลาสติกเหลว ระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติก หากความเร็วรอบสกรูสูง จะทำให้พลาสติกเหลวสูงขึ้น แต่จะทำให้ระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติกเหลวก็จะสั้นลง

2.6.9. ความดันต้านทานการถอยกลับสกรู (Back Pressure)

ความดันต้านทานการถอยกลับสกรู เป็นความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านท้ายของสกรู โดยทั่วไปพลาสติกที่เข้าสู่กระบอกลีดได้สม่ำเสมอหรือไม่นั้น จำเป็นต้องอาศัยความดันต้านทานการถอยกลับของสกรู เพื่อควบคุมระยะเวลาในการหมุนตัวถอยหลังของสกรูเพื่อทำการป้อนพลาสติกเข้าสู่กระบอกลีด ซึ่งหากเพิ่มความดันต้านทานการถอยกลับของสกรูให้มากขึ้น

2.6.10. ระยะเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเติมเป็นฉีดอัด (Change Over)

การเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเติมเป็นจังหวะฉีดอัด คือ เป็นการเติมเนื้อพลาสติกเหลว ปริมาตร 90-95 % เข้าในโพรงแม่พิมพ์ จากนั้นจึงฉีดอัดเพื่อเติมเนื้อพลาสติกเหลวอีก 5-10 % เข้าในโพรงแม่พิมพ์ จากนั้นรักษาความดันอัดจนกว่ารูทางเข้าจะปิด (Gate freeze-off)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.11. ความเร็วฉีด (Injection Speed)

ความเร็วในการฉีด คือ ความเร็วของสกรูที่เคลื่อนที่เพื่อทำหน้าที่ดันพลาสติกเหลวให้ไปอยู่ที่หัวฉีดและเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยมีไฮดรอลิกเป็นตัวขับเคลื่อน ความเร็วฉีดและความดันฉีดจะเป็นสิ่งที่เกิดคู่กัน โดยถ้าใช้ความเร็วฉีดสูงก็จะทำให้ความดันฉีดสูงขึ้นด้วย และถ้าหากใช้ความเร็วฉีดต่ำแล้วความดันฉีดก็จะต่ำลงด้วย ซึ่งความเร็วในการฉีดนี้จะมีผลต่อการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์

2.6.12. ความดันฉีด (Injection Pressure)

ความดันฉีด คือ ความดันที่ทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าสกรูถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งสามารถปรับจากความดันไฮดรอลิก พลาสติกเหลวจะสามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เต็มหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดเช่นกัน ความดันฉีดขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน ความสามารถในการไหลของพลาสติกเหลว และระยะทางการไหลที่ยาวที่สุด

2.6.13. ความดันฉีดย้ำ (Holding Pressure)

การฉีดย้ำเป็นขั้นตอนในการฉีดเมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ไปแล้วประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ความสำคัญของการฉีดย้ำคือ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ไหลย้อนกลับ เนื่องจากในโพรงแม่พิมพ์ที่มีความดันสูงกว่าซึ่งเป็นสาเหตุของการยุบตัวของชิ้นงานเนื่องจากการหดตัวของพลาสติก

2.6.14. เวลาในการฉีดย้ำ (Holding Time)

เวลาในการฉีดย้ำมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ถ้าหากเวลาในการฉีดย้ำน้อยเกินไป จะทำให้ความดันแม่พิมพ์จะไม่คงสภาพนานพอที่จะทำให้พลาสติกเหลวแน่นเต็มแม่พิมพ์ได้ โดยแนะนำให้ใช้เวลาในการฉีดย้ำประมาณ 1-3 วินาที หากใช้เวลานานกว่านี้ก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดตกค้างขึ้นในชิ้นงานได้

2.6.15. แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)

การปิดแม่พิมพ์เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์แยกออกขณะทำการฉีด ดังนั้นแรงที่ใช้ทำการปิดแม่พิมพ์จำเป็นต้องเพียงพอไม่ให้พลาสติกเหลวไหลย้อนออกมาซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดครีบในชิ้นงาน

2.6.16. เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time)

การหล่อเย็นเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการฉีดพลาสติก โดยเฉพาะโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทเทอร์โมพลาสติก เพื่อให้พลาสติกเย็นตัวก่อนที่จะทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เวลาในการหล่อเย็นยังมีผลต่อเวลาในการฉีด หากเวลาในการหล่อเย็นนานเกินไปก็จะทำให้อัตราการผลิตต่ำ หากเวลาในการหล่อเย็นเร็วเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวและบิดเบี้ยวหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

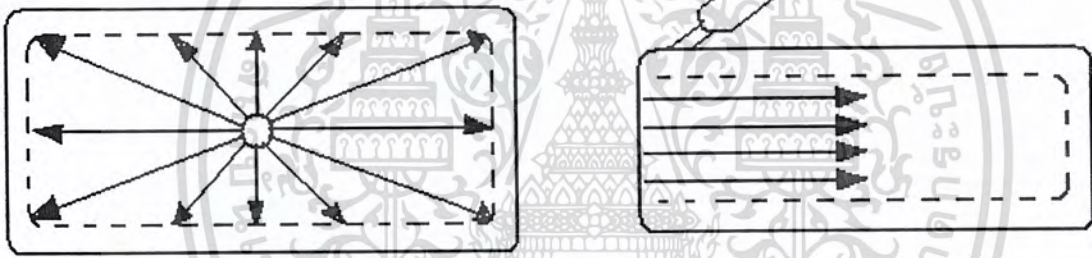
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7. รูเข้า (Gate) [15]

2.7.1. การวางตำแหน่ง Gate

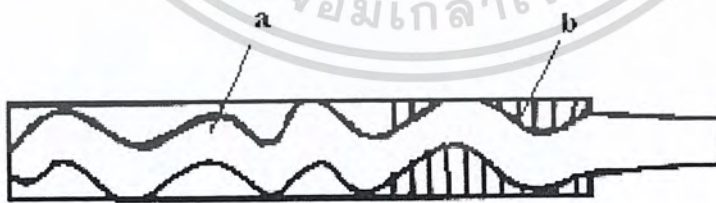
รูปร่างของ Gate คุณลักษณะและแบบที่ต่างกันชนิดและการวางตำแหน่ง Gate บนชิ้นงานฉีดพลาสติก จะต้องกำหนดให้เป็นไปตามความต้องการพื้นฐาน คือ น้ำพลาสติกควรไหลเข้าพิมพ์อย่างรวดเร็ว ด้วยเส้นทางการไหลที่สั้น โดยมีการสูญเสียความร้อนและแรงดันน้อยที่สุด และควรไหลไปถึงปลายทางทุกแห่งของ Cavity ในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความสำคัญต่อแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่พิมพ์ที่มีหลาย Cavity เส้นทางการไหลของน้ำพลาสติกทุก Cavity จะต้องเหมือนกัน

การตัดสินใจในเรื่องชนิดและการวางตำแหน่งของ Gate ทำให้วางแผนได้ว่า ในที่สุดแล้วชิ้นงานที่ต้องการผลิต จะมีแบบ (Drawing) เป็นอย่างไร และยังช่วยตัดสินใจว่า จะใช้แม่พิมพ์ที่มี หนึ่งหรือหลาย Cavity ตำแหน่งของการวางทางเข้าแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ รูปที่ 2.26 Gate เป็นส่วนที่สำคัญ ไม่เฉพาะเพื่อผลิตชิ้นงานโดยปราศจากข้อบกพร่อง แต่ยังมีผลไปถึงการปลดชิ้นงานในขั้นสุดท้าย และการไหลของน้ำพลาสติกเมื่อฉีดพลาสติกเข้าไปแล้วให้เป็นไปอย่างเรียบร้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.25 Gate เข้าตรงกลาง
(Center Spure or Pin Gate) [15]

รูปที่ 2.26 Gate เข้าด้านข้างแบบปกติ
(Normal, Lateral Gate) [15]



รูปที่ 2.27 การไหลเป็นรูไส้กรอก (Sausage) หรือพุ่งเป็นลำ (Jetting) ถ้าน้ำพลาสติกถูกฉีดเข้าไปใน Cavity [15]

- a) การไหลเป็นรูไส้กรอก
- b) การไหลเป็นรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.1. ลักษณะการออกแบบสำหรับแม่พิมพ์ Cavity เดียว

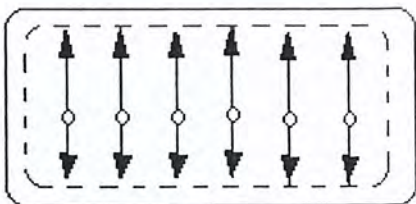
- Sprue Gate หรือ Pin Gate ที่มีช่องที่พลาสติกเตรียมถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ (Ante-chamber)
- ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่โดยใช้ Cold Runner (แม่พิมพ์สามแผ่น) ที่มี Pin Gate เข้าหลายจุด หรือ Film Gate เข้าตรงกลาง รวมทั้งใช้ Hot Runner หรือหุ้มฉนวนที่ Runner ซึ่งต่อกับ Pin Gate หลายจุด และใช้ Sprue Gate
- การฉีดงานรูปท้อโดยใช้ Sprue กับ Runner ที่วางเรียงเป็นรูปดาวและมี Gate เข้าหลายจุด หรือ Runner รูปงานที่มี Film Gate เป็นรูปวงแหวน
- การฉีดชิ้นงานที่เป็นกรอบ (Frame) โดยใช้ Sprue กับ Runner ที่ต่อกับ Film Gate หรือ Tunnel (Submarine) Gate เข้าด้านข้างหลายจุด

2.7.1.2. ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ที่มีหลาย Cavity

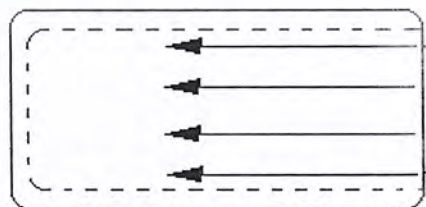
- จาก Sprue ไป Runner และ Gate ด้านข้าง Film Gate หรือ Tunnel Gate
- จาก Spure ไป Cold Runner (แม่พิมพ์สามแผ่น) , Hot Runner หรือ Runner หุ้มฉนวน แล้วไป Pin Gate จุดเดียวหรือหลายจุด แบบนี้จะสามารถใช้งานร่วมกันระหว่าง Hot Runner และ Cold Runner หรือ Runner หุ้มฉนวนกับแท่งให้ความร้อน (Heated Mandrel)

นอกจากนี้ ตำแหน่งและชนิดของ Gate ยังขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการฉีด สำหรับชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมแบน ใช้ Film Gate เข้าด้านข้าง หรือ Pin Gate เข้าหลายจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะได้ผลดีกว่าใช้ Spure Gate หรือ Pin Gate เข้าจุดเดียว โดยเฉพาะกับการฉีดพลาสติก โครงสร้างเป็นระเบียบที่มีการหดตัวขึ้นอยู่กับทิศทาง เพราะการไหลของพลาสติกขนานกันจะควบคุมการหดตัวต่างๆ ได้ดีกว่า การใช้ Pin Gate เข้าหลายจุด และไม่เหมาะสมกับชิ้นงานฉีดพลาสติกที่ต้องการผิวชิ้นงานที่ปราศจากรอยต่อ (Weld line)

แม่พิมพ์สอง Cavity มักจะใช้ Lateral Film Gate ส่วนที่เป็น Runner และ Film Gate จะวางตัวในแนว Parting Line ดังแสดงในรูปที่ 2.29 หากใช้กับแม่พิมพ์ Cavity เดียว การวางตำแหน่ง Cavity จะไม่สมมาตร ซึ่งเป็นสาเหตุให้ถูกดันเปิดอ้าออกในระหว่างการฉีดพลาสติก ในแม่พิมพ์ Cavity เดียวที่ใช้ Hot Runner สามารถออกแบบให้วางตำแหน่งอย่างสมมาตรกับแกนระบอบของเครื่องฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก จึงใช้เครื่องฉีดที่มีแรงประกบไม่มากเกินไป น้ำพลาสติกจะเข้า Lateral Film Gate โดยผ่านทาง Hot Runner แม่พิมพ์ชนิดนี้เป็นแบบที่ใช้กันทั่วไป



รูปที่ 2.28 Pin Gate เข้าหลายจุด [15]



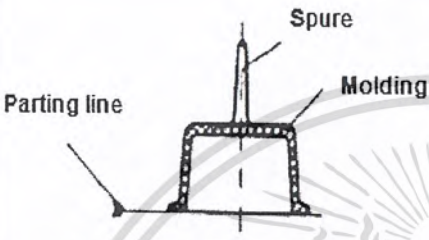
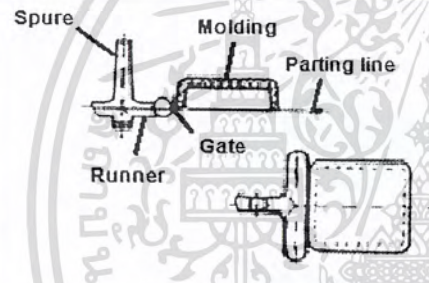
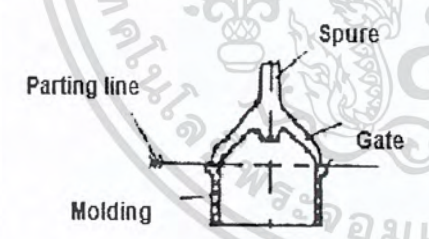
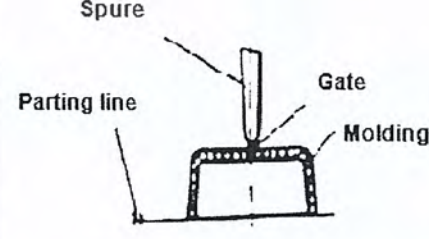
รูปที่ 2.29 Lateral film gate [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1. ชนิดของ Gate [15]

รูเข้า (Gate) ของน้ำพลาสติกนั้นส่งผลหลายประการต่อคุณภาพชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพมากที่สุด ชนิดของรูเข้า (Gate) แบบต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของ Gate ชนิดต่างๆ

ชนิดของ Gate	รูป	ลักษณะเฉพาะ
Spure Gate		การใช้งาน สำหรับพลาสติกที่ไวต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ และมีความหนืดสูง ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและความหนามาก ข้อดี ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพสูงและขนาดแน่นอน ข้อเสีย ต้องตัด Spure และมองเห็นรอย Gate
Lateral film Gate		การใช้งาน สำหรับชิ้นงานที่มีพื้นที่ใหญ่ เช่น แผ่นและถาด ข้อดี ไม่มีรอยต่อ (knit line) ชิ้นงานมีคุณภาพสูงและขนาดแม่นยำ ข้อเสีย ต้องทำงานเพิ่มในการตัด Gate
Disk Gate หรือ Diaphragm Gate		การใช้งาน สำหรับชิ้นงานที่สมมาตรกับแกนที่ขี้น ข้อดี ไม่มีรอยต่อและไม่ทำให้ความแข็งแรงลดลง ข้อเสีย ต้องทำงานเพิ่มในการตัด Gate
Pin Gate (ที่มี Reversed Spure)		การใช้งาน สำหรับชิ้นงานที่ตัด Gate โดยอัตโนมัติ ข้อดี ไม่ต้องทำงานเพิ่มในการตัด Gate ข้อเสีย เหมาะสำหรับพลาสติกที่มีเสถียรภาพทางความร้อน เช่น (PE,PS) มีข้อจำกัดเมื่อใช้กับพลาสติกอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของ Gate ชนิดต่างๆ (ต่อ)

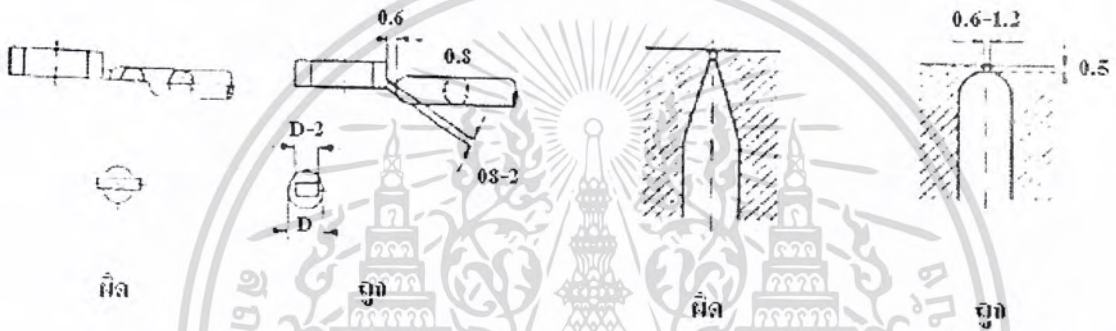
ชนิดของ Gate	รูป	ลักษณะเฉพาะ
Gate ที่ไม่มี runner		<p>การใช้งาน สำหรับชิ้นงานผนังบางและฉีดต่อเนื่องอย่างรวดเร็ว</p> <p>ข้อดี ไม่สูญเสียพลาสติกในส่วนที่เป็น Runner</p> <p>ข้อเสีย เกิดรอยบนชิ้นงานเนื่องจากหัวฉีด</p>
Gate ของ Stack Mould		<p>การใช้งาน ชิ้นงานแบนและมีน้ำหนักเบา ในแม่พิมพ์หลาย Cavity</p> <p>ข้อดี ใช้อัตราการหลอมพลาสติกของเครื่องฉีดได้คุ้มค่ากว่า</p> <p>ข้อเสีย มีปริมาณเศษพลาสติกมากในส่วนที่เป็นระบบ Runner</p>
Ring Gate		<p>การใช้งาน สำหรับชิ้นงานรูปร่างคล้ายปลอกที่ฉีด Core ไว้ทั้งสองด้าน</p> <p>ข้อดี ความหนาสม่ำเสมอตลอดเส้นรอบวง</p> <p>ข้อเสีย มีรอยต่อเล็กน้อย ต้องทำงานเพิ่มในการตัด Gate</p>
Tunnel Gate หรือ Submarine Gate		<p>การใช้งาน เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็กในแม่พิมพ์หลาย Cavity และใช้พลาสติกที่มีความยืดหยุ่น</p> <p>ข้อดี ตัด Gate โดยอัตโนมัติ</p> <p>ข้อเสีย สำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆเท่านั้น เพราะมีการสูญเสียแรงดันสูงมาก</p>
Pin Gate (Three Plate Mould)		<p>การใช้งาน สำหรับแม่พิมพ์หลาย Cavity แบบ Three plate และ Gate เข้าตรงกลาง</p> <p>ข้อดี ตัด Gate โดยอัตโนมัติ</p> <p>ข้อเสีย มีเศษพลาสติกปริมาณมากและแม่พิมพ์มีราคาแพง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2. ขนาดของ Gate [15]

ขนาดหน้าตัดของ Gate จะกำหนดโดยชนิดพลาสติกที่ใช้ และความหนาของผนังชิ้นงานที่ฉีด เมื่อเพิ่มความหนืดของพลาสติก และความหนาผนัง ก็จะต้องขยายขนาดของหน้าตัดของ Gate ออกไปด้วย การให้ Gate เข้าส่วนหน้าตัดที่หนาที่สุดจะดีที่สุด ถ้า Gate ไม่ได้เข้าส่วนนี้ ชิ้นงานจะเกิดโพรงอากาศ (Void) และรอยยุบ (Sink mark) อันเป็นผลมาจากเวลาที่ให้แรงดันตาม (Holding pressure) สิ้นเกินไป เพราะพลาสติกบริเวณ Gate แข็งตัวเร็วเกินไป

ส่วน Land ของ Gate ควรมีความยาวระหว่าง 0.6-0.8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ความกว้างของ Gate ต้องเล็กกว่าช่อง Runner เพื่อป้องกันพลาสติกแข็งจากผิวชิ้นนอกของ Runner ไม่ให้ไหลเข้าไปใน Cavity ความกว้างของ Gate ควรเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Runner อยู่ 2 มิลลิเมตร (D-2 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.31 แสดงแบบของ Runner ที่ถูกต้องในส่วนที่ต่อกับ Gate



รูปที่ 2.30 แบบของรูเข้า (Gate) [15]

รูปที่ 2.31 ปลาย Runner เข้าสู่ Cavity [15]

ชิ้นงานบางชิ้นมีขนาดใหญ่จนต้องฉีดด้วย Gate หลายจุด ซึ่งอาจทำให้เกิด Weld line ถ้าหน้าพลาสติกที่ไหลมารวมกันยังเย็นลง รอย Weld line ก็จะเห็นชัดเจน และมีความแข็งแรงลดลง โดยเฉพาะชิ้นงานที่ฉีดด้วยพลาสติกเสริมใยเพิ่มความแข็งแรง (Fiber-reinforce) กรณีนี้ควรใช้ Gate หลายจุด ควรควบคุมไม่ให้ความแตกต่างของอุณหภูมิหน้าพลาสติกใน Cavity เกินกว่า 20°C ยิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิน้อย ก็ยิ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น และเห็น Weld line จางลง

2.8.2.1. การคำนวณหาความยาว Gate

ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีหลาย Cavity ในแม่พิมพ์เดียวกัน สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การทำให้ Gate นั้นสมดุลกัน เพื่อป้องกันปัญหา การฉีดไม่เต็ม Cavity ทุกตัว ซึ่งจะต้องมีการออกแบบให้สมดุลทุกๆ Cavity

$$\text{Balanced gate value (BGV)} = \frac{SG}{\sqrt{LR \cdot RG}} \quad (2.19)$$

- เมื่อให้ SG = พื้นที่หน้าตัดของ Gate (Section area of gate)
- LR = ความยาวทางวิ่ง (Length of runner)
- RG = ความยาวของ Gate (Length of gate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9. ระบบทางวิ่ง (Runner) [15]

2.9.1. รูปแบบของระบบ Runner

Runner เป็นส่วนที่เชื่อมโยง sprue เข้ากับ Cavity โดยผ่าน Gate เพื่อให้จ่ายพลาสติกเข้าสู่ทุก Cavity ในเวลาเดียวกัน ภายใต้แรงดันเท่ากัน ระบบ Runner สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามระดับอุณหภูมิ

2.9.1.1. ระบบ Runner มาตรฐาน (Standard Runner System)

ช่อง Runner มาตรฐาน ทำได้โดยกัดเจาะแผ่นแม่พิมพ์โดยตรง และไม่มีกีดขวางให้ความร้อน (heat manifold) ดังนั้นอุณหภูมิของระบบ Runner จึงเป็นเช่นเดียวกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ทั้งหมด อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Isothermal runner พลาสติกจะแข็งตัวใน runner หลังจากการฉีดแต่ละครั้งและต้องปลดออกพร้อมกับชิ้นงาน หลังจากการเปิดแม่พิมพ์ ระบบนี้ใช้กับการฉีดเทอร์โมพลาสติกและวัสดุที่ต้องทำปฏิกิริยา เช่น เทอร์โมเซต หรือยาง (Elastomer)

2.9.1.2. ระบบ Hot Runner

ลักษณะของระบบ Hot Runner ในแม่พิมพ์ฉีดเทอร์โมพลาสติกจะต้องติดตั้งท่อให้ความร้อน (Heat Manifold หรือ Heater Cartridge) อุณหภูมิของ Heater คือ $180^{\circ}\text{--}300^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวเทอร์โมพลาสติก จึงเห็นได้ชัดว่า สูงกว่าอุณหภูมิปกติของแม่พิมพ์ ซึ่งอยู่ระหว่าง $20^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{C}$ Manifold หรือ Runner ที่ได้รับความร้อนจะนำน้ำพลาสติกจากหัวฉีดของเครื่องฉีดไปถึง Gate ของ Cavity โดยไม่สูญเสียความร้อน สามารถพิจารณาอย่างง่าย ๆ ว่าเป็นหัวฉีดที่ต่อเข้าไปจนถึง Cavity เทอร์โมพลาสติก ใน Hot Runner จะคงหลอมเหลวอยู่ ซึ่งต่างจาก Runner ธรรมดา จึงไม่ต้องปลดส่วนที่เป็น Runner ออก และยังใช้ในการฉีดครั้งต่อไปได้ ปัญหาเบื้องต้นของระบบ Hot Runner คือ การกั้นส่วนการ Manifold ที่ร้อนกับแม่พิมพ์ที่เย็นกว่า ในกรณีที่ Heater วางอยู่ใน Runner (แบบของ DME) จะต้องออกแบบ Runner ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น เพราะพลาสติกชั้นนอกจะแข็งตัวเป็นฉนวนความร้อนของแกนในซึ่งยังร้อนอยู่

2.9.1.3. ระบบ Cold Runner

เมื่อเทียบกับ Hot Runner ในแม่พิมพ์สำหรับเทอร์โมพลาสติก Cold Runner จะใช้สำหรับวัสดุที่ทำปฏิกิริยากัน เช่น เทอร์โมเซตและยาง ปัญหาของ Cold Runner ในด้านฉนวน จะตรงกันข้ามกับ Hot Runner ในแม่พิมพ์ที่ร้อนประมาณ $160^{\circ}\text{--}180^{\circ}\text{C}$ ต้องรักษาอุณหภูมิของ Runner ไว้ที่ $80^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{C}$ จนวัสดุไม่ทำปฏิกิริยากัน (กลายเป็นของแข็ง) ก่อนเวลาอันควร ใน Runner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2. ลักษณะของ runner [15]

การกำหนดขนาดของ Runner จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งเป็นผลจากรูปร่างของชิ้นงาน ชนิดของพลาสติกที่ใช้ เครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ ปัจจัยทั้งหมดนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบทางวิ่ง

ชิ้นงาน	พลาสติกที่ใช้ในการฉีด
รูปร่าง	ความหนืด
ปริมาตร	องค์ประกอบทางเคมี (โครงสร้างไม่เป็นระเบียบ, เป็นระเบียบ)
ความหนาผนัง	<ul style="list-style-type: none"> - สารที่เติมผสม - เวลาในการแข็งตัว(Freezing time)
คุณภาพที่ต้องการ	<ul style="list-style-type: none"> - ช่วงการอ่อนตัว (Softening range) - อุณหภูมิอ่อนตัว (Softening temperature) - ความไวต่อความร้อน - การหดตัว (Shrinkage)
<ul style="list-style-type: none"> - ด้านขนาด - ด้านแสง - ด้านเชิงกล 	

นอกจากนี้ระบบ Runner ยังต้องทำให้บรรลุวัตถุประสงค์และความต้องการอย่างเพียงพอในด้านคุณภาพและความประหยัด ดังสรุปไว้ดังนี้

1. มีการไหลเข้าเต็ม Cavity โดยมี Weld line น้อยที่สุด
2. มีสิ่งกีดขวางการไหลน้อยที่สุด
3. มีสัดส่วนของน้ำหนักรวมน้อยที่สุด
4. ปลดชิ้นงานได้ง่าย
5. ไม่มีผลกระทบต่อรูปร่าง
6. ความยาวน้อยที่สุด เพื่อให้การสูญเสียแรงดัน อุณหภูมิ และเนื้อพลาสติกน้อยที่สุด
7. ขนาดหน้าตัดต้องทำให้ Runner มีเวลาแข็งตัวมากกว่าชิ้นงาน เพื่อให้มีแรงดันตามจนกว่าชิ้นงานจะแข็งตัว
8. ระบบ runner ควรจะมีผลกระทบต่อรอบเวลาฉีดให้น้อยที่สุดหรือไม่มีผลเลย
9. ให้ Gate เข้าที่ส่วนหน้าตัดหนาที่สุด
10. วางตำแหน่งหรือออกแบบ Gate จนกระทั่งไม่เกิด Jetting

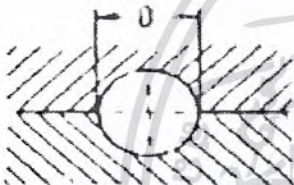
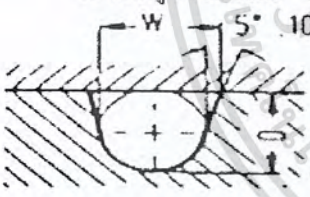
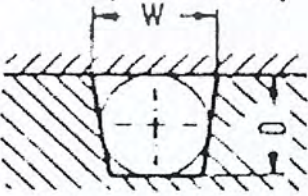
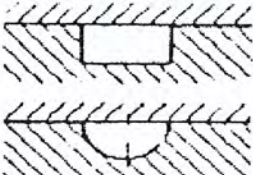
น้ำพลาสติกไหลเข้า Runner ของแม่พิมพ์ที่เย็นกว่าด้วยความเร็วสูง ความร้อนจะถ่ายเทจากพลาสติกส่วนที่ใกล้กับผนัง พลาสติกบริเวณนี้จึงเย็นลงอย่างรวดเร็ว จนเกิดเป็นชั้นของฉนวนกันความร้อน สำหรับพลาสติกที่ไหลตามตรงกลางจะก่อตัวเป็นแกนในของพลาสติกเหลวที่ร้อน ซึ่งพลาสติกจะไหลเข้าสู่ Cavity ได้ ต้องคงแกนในที่ร้อนนี้ไว้ จนกว่าชิ้นงานจะกลายเป็นของแข็งโดยสมบูรณ์ เพื่อให้มีแรงดันตาม (Holding Pressure) อย่างเต็มที่ชดเชยการหดตัว ในระหว่างที่ชิ้นงานกลายเป็นของแข็ง รูปร่างของ Runner จะกำหนดให้เป็นไปตามความต้องการนี้

เอ็กสตรูชันเป็นเอ็กสตรูชันพลาสติกหรือการแข็งขึ้นเพื่อการผลิตชิ้นงาน เมื่อผู้ผู้คิดค้นใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3. การออกแบบ Runner [15]

ด้วยเหตุผลของการประหยัดพลาสติก และจากสภาพการหล่อเย็น อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ควรมีค่าน้อยๆ เห็นได้ชัดว่าขนาดของ Runner จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน แบบของแม่พิมพ์และชนิดของพลาสติกที่ใช้ฉีด ตากหลักทั่วไป เมื่อเพิ่มขนาดของชิ้นงานและความหนาของผนัง ก็ต้องเพิ่มขนาดหน้าตัดของ Runner ด้วย หน้าตัดที่ใหญ่จะทำให้การฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ทำได้ดีขึ้น เพราะมีความต้านทานการไหลที่น้อยกว่า Runner ที่บาง Runner ที่ยาวกว่า (Flow Path ยาวกว่า) ควรใช้พลาสติกที่มีความหนืดต่ำกว่า นอกจากนี้ การผลิตชิ้นงานยังต้องทำอย่างประหยัดที่สุด Runner จะมีผลต่อปริมาณเศษพลาสติกและเวลาในการหล่อเย็น ถ้าทำขนาดหน้าตัดใหญ่เกินไป ไม่เหมาะกับขนาดของชิ้นงาน จึงควรมีการเลือกลักษณะหน้าตัดของ Runner ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ดังแสดงลักษณะของหน้าตัด Runner แบบต่างๆ ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รูปร่างหน้าตัดของระบบทางวิ่ง [15]

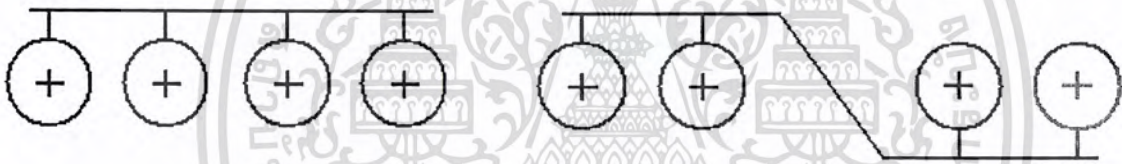
<p>หน้าตัดรูปวงกลม</p>  <p>$D = S_{max} + 1.5s_{run}$</p>	<p>ข้อดี มีพื้นที่ผิวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดหน้าตัด อัตราการเย็นตัวช้าที่สุด การสูญเสียความร้อนและความเสียดทานน้อย แกนกลางของช่องจะแข็งตัวช้ากว่าส่วนอื่น จึงทำให้แรงดันตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ</p> <p>ข้อเสีย การกัดเซาะร่องที่แม่พิมพ์สองด้านทำได้ยากและมีราคาแพง หากใช้ดอกกัดปลายกลมจะกัดได้ช้า</p>
<p>หน้าตัดรูป Parabolic</p>  <p>$W = 1.25-D$</p> <p>$D = S_{max} + 1.5s_{run}$</p>	<p>ข้อดี คล้ายกับหน้าตัดรูปวงกลมการกัดเซาะร่องที่แผ่นแม่พิมพ์เพียงด้านเดียวจะทำได้ง่ายกว่า(มักจะอยู่บนแม่พิมพ์ส่วนที่เคลื่อนที่เพราะปลดง่ายกว่า)</p> <p>ข้อเสีย มีการสูญเสียความร้อนและพลาสติกมากกว่าเมื่อเทียบกับหน้าตัดรูปวงกลม หากใช้ดอกกัดปลายกลมจะกัดได้ช้า</p>
<p>หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู</p>  <p>$w = 1.25-D$</p>	<p>ข้อดี คล้ายกับหน้าตัดรูป Parabolic การกัดเซาะร่องทำได้ง่ายกว่า</p> <p>ข้อเสีย มีการสูญเสียความร้อนและพลาสติกมากกว่าหน้าตัดรูป Parabolic</p>
	<p>หน้าตัดที่ไม่เหมาะสมสำหรับ Runner</p>

2.9.4. การจัดวาง Cavity/Runner (Runner/Cavity Lay-out) [15]

ต้องจัดวาง Cavity แบบที่ง่ายที่สุด ครอบ (Barrel) ของเครื่องฉีดพลาสติก มักจะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นอยู่กับที่ ซึ่งเป็นตำแหน่งของ Spure ด้วย การจัดวาง Cavity ต้องสัมพันธ์กับกึ่งกลางของ Spure เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ คือ

- น้ำพลาสติกไหลเข้าเต็มทุก Cavity พร้อมกันด้วยอุณหภูมิเท่ากัน
- ระยะห่างระหว่าง Cavity ต้องมากพอสำหรับการวางท่อหล่อเย็น และทนแรงดันจากการฉีดพลาสติกได้
- ผลลัพธ์ของแรงกระทำควรอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นแม่พิมพ์

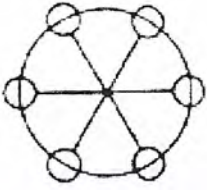
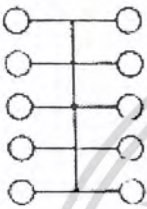
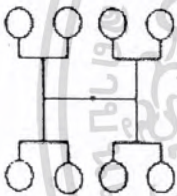
เมื่อออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก สิ่งสำคัญก็คือ ความสมดุลของแรงในแม่พิมพ์ แม่พิมพ์และชุดประกอบของเครื่องฉีด จะรับแรงที่ไม่สม่ำเสมอ ถ้า Cavity อยู่ในตำแหน่งเอียงศูนย์กลางกับ Spure แม่พิมพ์จะถูกแรงดันให้อ้าออกได้ ผลที่ตามมาคือ อาจเกิดครีบลบที่ชิ้นงาน และการแตกหักของ Tie Bar แม่พิมพ์ซึ่งฉีดชิ้นงานแล้วเกิดครีบลบ จะเกิดความเสียหายที่ผิวแบ่ง (Parting Line) จนประกบกันไม่สนิทและเกิดครีบลบอีกหากไม่ปาดผิวใหม่ ดังนั้นกฎข้อที่หนึ่งในการออกแบบคือ ผลลัพธ์ของแรงดันฉีดพลาสติกกับแรงประกบแม่พิมพ์ จะต้องกระทำในแนวกึ่งกลางของ Spure ดังแสดงในรูปที่ 2.32 แสดงการวางตำแหน่งแบบเอียงศูนย์กลางและได้ศูนย์กลางกับ Spure



รูปที่ 2.32 การจัดวาง Cavity/Runner แบบเอียงศูนย์กลางและได้ศูนย์กลาง [15]

ในการจะเลือกระบบทางวิ่งแต่ละแบบนั้น ต้องเลือกให้เหมาะสมกับชิ้นงาน เพราะระบบทางวิ่งแต่ละแบบเหมาะกับลักษณะชิ้นงานต่างกันออกไป ต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสีย ของแต่ละแบบให้ดีเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบการจัดวาง Runner/Cavity แบบต่างๆ [15]

<p>การจัดวางรูปวงกลม</p> 	<p><u>ข้อดี</u> ความยาวการไหลไปทุก Cavity เท่ากัน ผลิตชิ้นงานง่าย โดยเฉพาะชิ้นงานที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์คลายเกลียว</p>	<p><u>ข้อเสีย</u> สามารถจัดวาง Cavity ได้ในจำนวนจำกัด</p>
<p>การจัดวางแบบเรียงแถว</p> 	<p><u>ข้อดี</u> มีเนื้อที่สำหรับวาง Cavity ได้มากกว่าการจัดวางรูปวงกลม</p>	<p><u>ข้อเสีย</u> ความยาวการไหลไปทุก Cavity ไม่เท่ากัน</p>
<p>การจัดวางแบบสมมาตร</p> 	<p><u>ข้อดี</u> ความยาวการไหลไปทุก Cavity เท่ากัน โดยไม่ต้องแก้ไข gate</p>	<p><u>ข้อเสีย</u> ปริมาณของ runner ใหญ่ มีเศษพลาสติก (Scrap) มาก น้ำพลาสติกเย็นเร็ว ซึ่งแก้ไขโดยใช้ hot runner หรือ runner หุ้มฉนวน</p>

2.10. ระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [15]

ระบบหล่อเย็นเป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้ชิ้นงานแข็งตัวและปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ แต่ก็มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น การหดตัวของเนื้อพลาสติก หากมีการใช้อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานได้ จึงต้องมีการศึกษาผลกระทบของระบบหล่อเย็นก่อน

2.10.1. หลักการหล่อเย็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างพลาสติกที่ฉีดชิ้นงานกับแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความประหยัดของแม่พิมพ์ ความร้อนที่น้ำพลาสติกนำเข้ามาในแม่พิมพ์นั้น ต้องระบายออกจากเนื้อพลาสติก จนชิ้นงานมีสถานะอยู่ตัวพอที่จะปลดออกได้ เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้บรรลุถึงสภาวะเช่นนี้ก็คือ เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) ปริมาณความร้อนที่จะนำออกจากชิ้นงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำพลาสติก อุณหภูมิผลิตชิ้นงานและความร้อนจำเพาะของพลาสติกแต่ละชนิด

คุณภาพของชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับความคงที่ของการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละรอบ ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนในแม่พิมพ์ จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการผลิต แม่พิมพ์จะต้องถูกทำให้เย็นหรือร้อน ก็ขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติกที่ใช้ฉีด อุณหภูมิผิวนอกของแม่พิมพ์และสภาพแวดล้อม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2. สารหล่อเย็นและการควบคุมอุณหภูมิของสารหล่อเย็น

ตามปกติจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งอาจจะเป็นน้ำเย็นหรือน้ำร้อนก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติกที่ฉีดและประโยชน์ใช้สอยของชิ้นงาน การควบคุมอุณหภูมิสารหล่อเย็นให้คงที่นั้น สามารถทำได้โดยเครื่องบังคับความร้อนแบบหมุนเวียน (Circulation Thermostat) ซึ่งทำให้อุณหภูมิสารหล่อเย็นมีความสม่ำเสมออยู่ภายในช่วงที่กำหนด และยังช่วยลดเวลาในการเริ่มเดินเครื่องฉีดพลาสติกได้ด้วย เนื่องจากเครื่องนี้จะเปิดวงจรการหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิถึงระดับที่ตั้งไว้แล้วเท่านั้น ลักษณะเช่นนี้ จะลดเวลาในการใช้เครื่องฉีด และจำนวนชิ้นงานที่ฉีดเสียลงได้ การรักษาอุณหภูมิหล่อเย็นให้คงที่อาจทำได้โดยคิดเทอร์โมมิเตอร์ไว้ที่วงจรหล่อเย็น ในกรณีของแม่พิมพ์ที่ใช้งานมากๆ จุดที่ร้อนที่สุดของแม่พิมพ์ (ตรงข้ามกับ Gate)มักจะหล่อเย็นด้วยน้ำเกลือ ส่วนแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิเกิน 90°C ไม่เหมาะที่จะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ควรใช้น้ำมันจะดีกว่า

2.10.3. ระยะห่างระหว่างช่องหล่อเย็นกับ Cavity

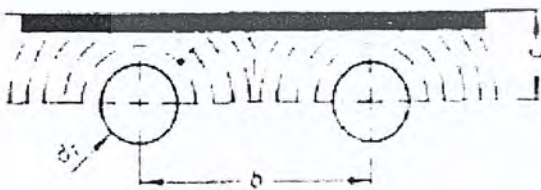
ช่องหล่อเย็นที่มีระยะห่างจาก Cavity มากกว่า จะทำให้ Cavity มีอุณหภูมิสม่ำเสมอและอุณหภูมิผิว Cavity ระหว่างการฉีดจะสูงกว่าด้วย นี่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการลดการผิดรูปของชิ้นงาน ทำให้สมบัติเชิงกล และการไหลเข้าสู่ Cavity ดีขึ้น แต่จะทำให้รอบเวลาฉีดของเครื่องฉีดนานขึ้น หากทำช่องหล่อเย็นใกล้ Cavity มากขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะเร็วขึ้นและรอบเวลาฉีดจะสั้นลง แต่มีข้อเสียคือ ได้ชิ้นงานที่มีขนาดไม่แน่นอนและคุณภาพเชิงกลไม่ดี

2.10.3.1. ระยะห่างระหว่างช่องหล่อเย็นแต่ละช่อง

ถ้าจำเป็นต้องออกแบบให้ระยะห่างระหว่างช่องหล่อเย็นแต่ละช่องกว้างมากแล้ว ก็ต้องเพิ่มระยะห่างจาก Cavity และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น ส่วนที่มีผนังหนากว่า จะถ่ายเทความร้อนมากกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.33 และ ดังรูปที่ 2.34

2.10.3.2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น

ตำแหน่งและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น ควรเป็นไปตาม ตารางที่ 2.7 เพื่อเกิดการหล่อเย็นแบบ Soft Cooling ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของช่องหล่อเย็น และการถ่ายเทความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ดูได้จากระดับเส้นอุณหภูมิ (Isothermal) ดังแสดงในตารางที่ 2.7

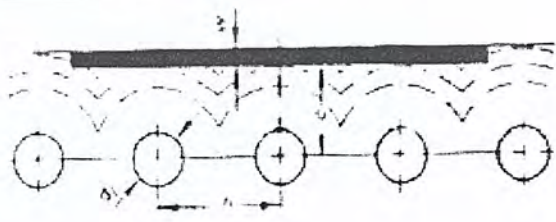


รูปที่ 2.33 การถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอ [15]

b = ระยะห่างมาก

c = ระยะห่างน้อย

d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ทำให้อุณหภูมิ Cavity ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.34 การถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นที่เหมาะสม [15]

ความหนาของชิ้นงาน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น
2 มม.	8-10 มม.
4 มม.	10-12 มม.
6 มม.	12-15 มม.
ระยะห่าง $C=2-3$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น	
ระยะห่าง $b=3$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็น	

ถ้าไม่มีข้อจำกัดเรื่องการออกแบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นควรจะมากกว่า $1/3$ ของระยะห่างระหว่างช่องหล่อเย็นแต่ละช่อง ความต้องการด้านการออกแบบอาจทำให้สภาพการหล่อเย็นแตกต่างจากที่แนะนำไว้

2.11. ผลของการฉีดพลาสติกต่อการหดตัว [15]

การหดตัวคือ ความแตกต่างของขนาดชิ้นงานกับขนาด Cavity การหดตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ฉีดแต่ละชนิด ซึ่งการฉีดพลาสติกสามารถควบคุมการหดตัวได้ โดยควรวัดขนาดของชิ้นงานหลังการปลดจากแม่พิมพ์แล้วประมาณ 24-168 ชั่วโมงส่วนใหญ่จะมีหน่วยเป็น mm/mm in/in หรือเปอร์เซ็นต์

2.11.1. ทฤษฎีการหดตัว (Theory of Shrinkage)

การหดตัวมีสาเหตุมาจากพลาสติกอัดหรือขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบจะมีการหดตัวมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของพลาสติก

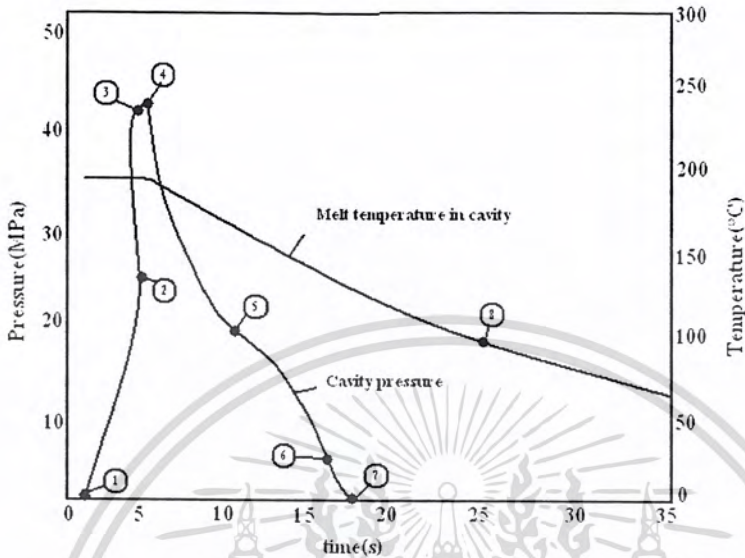
สาเหตุที่ชิ้นงานพลาสติกหดตัวเนื่องจากปริมาตรที่เข้าไปในโพรงนั้นขาดหายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน การชดเชยการหดตัวของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติกสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการชดเชยการหดตัวของพลาสติก ด้วยการอัดพลาสติกเหลวเข้าไปในโพรงด้วยความดันสูง ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อให้พลาสติกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น วิธีนี้จะเหมาะกับชิ้นงานบางและมีความเค้นดกค้ำงน้อย แต่วิธีนี้จะต้องใช้แรงบีบแม่พิมพ์สูง อีกวิธีคือการอัดเนื้อเข้าโพรงแบบด้วยแรงดันปานกลาง อย่างต่อเนื่อง โดยการรักษาระดับความดันฉีดเข้าในแม่พิมพ์ให้คงที่ จะเหมาะสำหรับชิ้นงานที่หนา แต่ข้อเสียจะมีความเค้นดกค้ำงในชิ้นงานมากโดยเฉพาะบริเวณใกล้ตำแหน่งรูเข้า (Gate)

จากดังกล่าวข้างต้น การหดตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ

- อุณหภูมิ ควรมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิปลดชิ้นงานและอุณหภูมิห้อง จะทำให้การหดตัวน้อยลง
- ความดัน ถ้าความดันที่ใช้ในกระบวนการฉีดมีค่าสูงการหดตัวจะน้อย กลับกันถ้าความดันต่ำจะทำให้การหดตัวสูง
- เวลา หากใช้เวลานานในการฉีดนานจะทำให้การหดตัวน้อยลง
- คุณสมบัติของพลาสติก พลาสติกแต่ละชนิดมีค่าการขยายตัวไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิของน้ำพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิของน้ำพลาสติก ในระหว่างที่ไหลเข้า Cavity ของ PS โดยวัดแรงดันที่ใกล้ Gate [15]

2.11.2. ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว (Shrinkage Effects)

การหดตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น

ปัจจัยด้านการฉีดพลาสติก

- แรงดันในการฉีด
- อุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิหลอมเหลว

อัตราการฉีดพลาสติก

- ปัจจัยด้านชิ้นงาน (ปริมาตรของชิ้นงาน)
- ความหนาของผนังชิ้นงาน

ปัจจัยด้านชนิดของพลาสติก

- ชนิดของพลาสติกที่ฉีด
- ระดับของความเป็นระเบียบของโมเลกุลของพลาสติกแต่ละชนิด

หลักโดยทั่วไปคือ ควรตรวจสอบการหดตัวของชิ้นงานที่ฉีดครั้งแรก ควรคำนึงถึงการเผื่อขนาด Core ให้ใหญ่ การเผื่อขนาด Cavity ให้เล็ก และสุดท้ายก็จะต้องเผื่อการหดตัวภายหลังของพลาสติกโครงสร้างเป็นระเบียบด้วย ซึ่งอาจมีค่าประมาณ 10% ของการหดตัวเมื่อปลดชิ้นงาน การหดตัวภายหลังจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิในการฉีดพลาสติกสูงขึ้น โดยเฉพาะอุณหภูมิแม่พิมพ์ เพราะการจัดโครงสร้างให้เป็นระเบียบ (Crystallization) เกือบจะเสร็จสมบูรณ์ในระหว่างการฉีด ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดจะมีค่าการหดตัวแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ค่าการหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด [15]

Material	% Shrinkage
PA 6 (Nylon)	1-1.5
PA 66	1-2
LDPE	1.5-3
HDPE	2-3
PS	0.5-0.7
SAN	0.4-0.6
Acrylic	0.3-0.6
CP	0.5
PC	0.8
POM	2
PVC soft	1-3
ABS	0.4-0.6
PP	1.2-2
PE	1.5-3
CA	0.5
CAB	0.5

2.12. ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีดและวิธีการแก้ไข [15]

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานนั้น ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่ไม่ควรจะมีมากที่สุด ผู้ผลิตจะต้องศึกษาและค้นหาสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานเสียหายโดยจะต้องรู้ว่าชิ้นงานเกิดความบกพร่องที่บริเวณใด มีสาเหตุจากอะไร และควรจะแก้ไขอย่างไร ลักษณะของความบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีดพลาสติกมีดังนี้

2.12.1. รอยพ่น (Jetting)

เกิดขึ้นเนื่องจากพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ตรงส่วนที่หนาโดยผ่านช่องทางเข้าที่มีขนาดเล็กด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการไหลวน (Turbulent Flow) ขึ้น และพลาสติกเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปก่อนจะวิ่งไปได้ไกลเป็นแนวเส้นตรงแทนที่จะวิ่งออกไปพร้อมกันตลอดความกว้างของชิ้นงาน ทำให้พลาสติกเกิดการเย็นตัวไม่พร้อมกันจึงมองเห็นเป็นรอยบนผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแก้ไข

- 1) เพิ่มขนาดของทางเข้า (Gate)
- 2) ลดความเร็วฉีดให้ต่ำลง
- 3) เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลว
- 4) เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น
- 5) แก้ไขขนาดของชิ้นงานให้มีความหนาลดลง

2.12.2. ครีป (Flashing)

ครีปที่ชิ้นงานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ความเร็วในการฉีดสูงเพื่อป้องกันพลาสติกไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) และใช้ความดันอัด (Holding Pressure) สูงเพื่อป้องกันชิ้นงานยุบ (Sink) แรงดันของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์จะสูงมากจนเอาชนะแรงดันต้านแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์แยกออก จนทำให้พลาสติกเหลวไหลออกมาตามรอยประกบแม่พิมพ์ได้ จึงเกิดเป็นครีปที่ขอบของชิ้นงานขึ้น

วิธีแก้ไข

- 1) ลดอุณหภูมิพลาสติกเหลว
- 2) ลดความดันและเวลาในการฉีดอัด
- 3) เพิ่มแรงในการปิดแม่พิมพ์
- 4) ลดความเร็วในการฉีด
- 5) ลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์
- 6) แก้ไขแม่พิมพ์ใหม่

2.12.3. รอยไหม้ (Burn)

รอยไหม้ที่ผิวชิ้นงานจะเกิดขึ้นเนื่องจากอากาศร้อนในแม่พิมพ์ ทำให้การฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ระบายออกม่ายทัน จึงเกิดการอัดตัวทำให้มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นจนเกิดรอยไหม้ขึ้นที่ผิวชิ้นที่ผิวชิ้นงานได้ หรืออาจจะเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างพลาสติกเหลวกับผิวของแม่พิมพ์จนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดรอยไหม้ได้ ซึ่งส่วนมากจะเกิดรอยไหม้ตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลว

วิธีแก้ไข

- 1) ลดอุณหภูมิพลาสติกเหลว
- 2) ลดความเร็วในการฉีด
- 3) ขยายช่องของหัวฉีดให้กว้างยิ่งขึ้น
- 4) เพิ่มขนาดทางเข้าของพลาสติกเหลว
- 5) เพิ่มช่องระบายอากาศให้กับแม่พิมพ์

2.12.4. ชีงงานเกิดรอยแหวง (Short shot)

ชีงงานจะเกิดเป็นรอยแหวงตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าในแม่พิมพ์ช้าพลาสติกจึงเย็นตัวลง ความหนืดจึงเพิ่มมากขึ้นทำให้พลาสติกไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์จนเห็นเป็นรอยแหวง

วิธีแก้ไข

- 1) เพิ่มความดันฉีดให้สูงขึ้น
- 2) เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลว
- 3) เพิ่มอุณหภูมิหัวฉีด
- 4) ทำความสะอาดหัวฉีด
- 5) ปิดวาล์วหัวฉีด
- 6) เพิ่มความเร็วในการฉีด
- 7) เพิ่มความดันด้านการดอยกลับของสกรู
- 8) ขยายช่องหัวฉีดให้กว้างยิ่งขึ้น
- 9) เพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์
- 10) เพิ่มขนาดทางเข้าของพลาสติกเหลว
- 11) เพิ่มช่องระบายอากาศให้กับแม่พิมพ์
- 12) เพิ่มอัตราการป้อนพลาสติก

2.12.5. รอยยุบ (Sink mark)

มีลักษณะเป็นรอยยุบบนผิวชีงงาน โดยเฉพาะตรงส่วนที่หนามากๆ และตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นลักษณะของการหดตัวแบบหนึ่งของชีงงาน โดยเฉพาะชีงงานจากพลาสติกเหลวประเภทที่มีผลึกจะมีโอกาสเกิดการยุบตัวได้มาก

วิธีแก้ไข

- 1) เพิ่มความดันฉีดช้าและเวลาในการฉีดช้า
- 2) เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลวที่หัวฉีด
- 3) ลดความเร็วในการฉีดและความดันด้านการดอยกลับของสกรู
- 4) ขยายช่องของหัวฉีดให้กว้างยิ่งขึ้น
- 5) ลดอุณหภูมิแม่พิมพ์
- 6) เพิ่มขนาดทางเข้าพลาสติกเหลวและเพิ่มอัตราการป้อนพลาสติกเหลว
- 7) ปรับปรุงระบบทางเข้าของพลาสติกเหลวให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.6. ร่องรอยการไหล (Flow mark)

ข้อบกพร่องนี้มีสาเหตุเหมือนกับการเกิดรอยแหง่ง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้กล่าวคือ ถ้าใช้ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไป พลาสติกจะเย็นตัวและไหล ไม่สะดวกทำให้เกิดเป็นคลื่นเหมือนรอยวงปีของต้นไม้

วิธีแก้ไข

- 1) เพิ่มความดันฉีดและความดันด้านการถอยกลับของสกรูให้สูงขึ้น
- 2) เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลวและอุณหภูมิของแม่พิมพ์
- 3) เพิ่มความเร็วในการฉีด
- 4) ขยายช่องหัวฉีดให้กว้างมากขึ้น
- 5) เพิ่มขนาดทางเข้าของพลาสติกเหลวและช่องระบายอากาศให้กับแม่พิมพ์
- 6) อบพลาสติกให้แห้งสนิท

2.12.7. การบิดงอ (Warpage)

การเย็นตัวของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากชิ้นงานมีความหนาแตกต่างกันมากหรือระบบการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ไม่ดี จะทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอขึ้นได้ หรือถ้าชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากันตลอดแต่ใช้ความดันอัดมากหรือนานจนเกินไป จะทำให้มีความเค้นตกค้าง (Residual stress) อยู่ในชิ้นงานมากจนทำให้เกิดการโก่งงอได้เช่นกัน โดยเฉพาะตรงปลายของชิ้นงานหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้ว

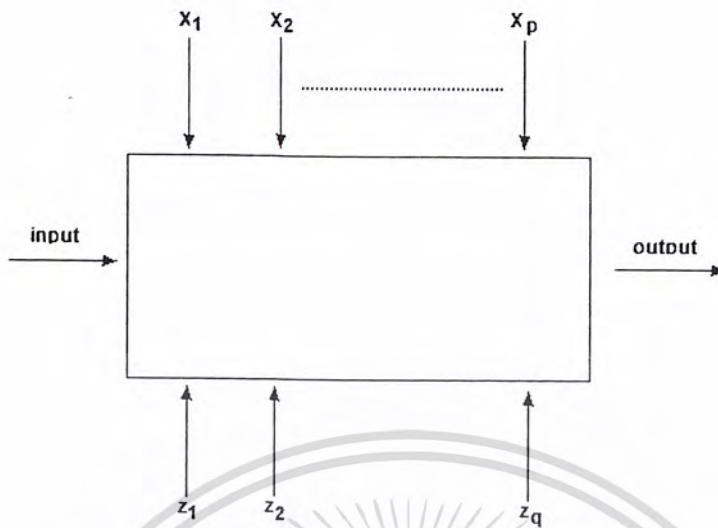
วิธีแก้ไข

- 1) เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลว
- 2) ลดความดันและเวลาในการฉีดอัด
- 3) ลดความเร็วในการฉีด
- 4) เพิ่มความดันด้านการถอยกลับของสกรูและอุณหภูมิแม่พิมพ์
- 5) เพิ่มเวลาในการหล่อเย็นและเวลาในการเปิดแม่พิมพ์

2.13. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [17]

การทดลองสร้างขึ้นด้วยผู้ทดลองที่ต้องการคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการ หรือระบบจะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System) รูปที่ 2.36 แสดงรูปของกระบวนการหรือระบบส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ และเมื่อมีสิ่งอื่นป้อนเข้ามา (Input) สู่วกระบวนการ กระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้มาเป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ [17]

คำจำกัดความ

1. อิทธิพลหรือผล หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีผลต่อตัวแปรตาม
2. ปัจจัย หมายถึง สิ่งที่มีความอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติในตัวผลิตภัณฑ์
3. ระดับของปัจจัย หมายถึง สถานะต่างๆของปัจจัยหนึ่งๆที่กำหนดในการทดลอง
4. ปัจจัยรบกวน หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยๆ และไม่สามารถควบคุมได้

2.13.1. หลักในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อมูลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.13.1.1. การทำซ้ำ คือ การทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อที่จะกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ เพื่อประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2.13.1.2. การทำแบบสุ่ม คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้กันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่าๆกันการทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

- 1) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- 2) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- 3) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Block)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.1.3. การบล็อก คือ การจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็น ต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.13.2. ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูลตลอดการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ดังแสดงดังต่อไปนี้

1) การนิยามปัญหา คือ การระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเชื่อมโยงไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย คือ การใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่ น่าจะมีผลต่อการทดลอง และแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายเป็นการระบุที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

- แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดได้แน่นอน
- แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม ได้กำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน
- แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การรวมของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่จะใช้วัดเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำทั้งความถูกต้องของข้อมูลด้วย

4) การเลือกแบบการทดลอง ต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับที่ใช้ในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็นทั้งนี้ต้องนำความเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

5) การวิเคราะห์ข้อมูล อาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือ กราฟอย่างง่ายที่ใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอต่อโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง

6) สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์จะต้องสรุปผลจากการวิเคราะห์ซึ่งอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟ ตาราง แผนภูมิ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลองเพื่อสรุปผลและควรที่จะมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลองสามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ (i,j)

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ τ เมื่อ τ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

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

$H_1: \tau_i \neq 0$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า

2. การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model) ทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ_τ^2) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับปัจจัยที่เกิดขึ้นมาแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

$H_0: \sigma_\tau^2 = 0$

$H_1: \sigma_\tau^2 > 0$

3. การออกแบบการทดสอบแบบผสม (Mixed Effect Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบคงที่ (Fix Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันอยู่จะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

2.13.3. ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

การเลือกชนิดของแผนการทดลองนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่สุด ควรพึงระลึกไว้เสมอว่า วัตถุประสงค์ของการวางแผนการทดลองคืออะไร ซึ่งชนิดของการออกแบบการทดลอง แบ่งได้งานดังนี้

2.13.3.1. แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว

แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) จะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยเพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบทดลองแบบปัจจัยเดียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยใหญ่ๆ คือ

1. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Complete Randomized Design: CRD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว โดยการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัยมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อยและไม่มีปัจจัยรบกวนโดยการทดลองจะใช้หลักการทำแบบสุ่มและการทำซ้ำ

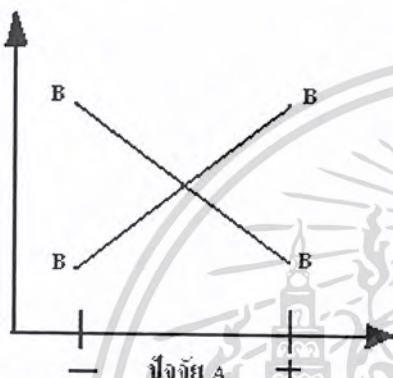
2. การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomized Block Design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองและต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

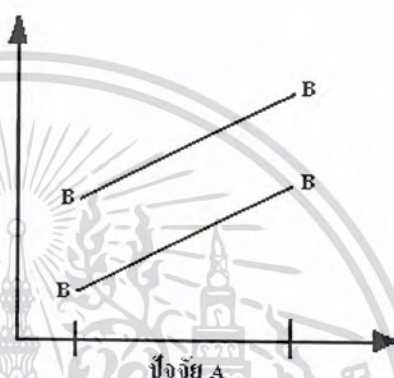
2.13.3.2. แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดสามารถแสดงให้เห็นดังแสดงในรูปที่ 2.37 และดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.37 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน



รูปที่ 2.38 ตัวแปรที่ไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น ในกรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับในการทดลอง 1 เพลกิต (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงประมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เพลกิตที่บริบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14. โปรแกรมทางด้าน CAD /CAM /CAE [16]

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้กลายมาเป็นส่วนหนึ่งในการเพิ่มผลผลิต มีการใช้ประโยชน์ในการช่วยออกแบบ ช่วยในการช่วยผลิต ซึ่งสามารถลดเวลาและประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น

2.14.1 Computer aided design; CAD

องค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบ (Design Tool)
- 2) การสร้างรูปทรงเรขาคณิต (Geometric Modeling)
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ (Computer Graphics)

การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ (CAD) แทนการเขียนด้วยมือนั้น สามารถลดข้อบกพร่องของแบบชิ้นงานจากหลายมือได้ สามารถแก้ไขแบบงานได้ง่ายและเร็วกว่า สามารถช่วยคำนวณหรือวิเคราะห์ได้ง่ายและแม่นยำ

จุดมุ่งหมายของการนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ

- 1) เพื่อลดเวลาในการทำงานแต่ละขั้นตอนลง เป็นการเพิ่มผลผลิต
- 2) เพื่อเพิ่มคุณภาพงาน เพราะคอมพิวเตอร์สามารถคำนวณและวิเคราะห์ได้ถูกต้องและแม่นยำ
- 3) เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดจากการอ่านแบบเขียนมือ
- 4) เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับงานอุตสาหกรรม

2.14.1.1. กระบวนการออกแบบด้วย CAD (CAD Process)

CAD นอกจากจะช่วยในการออกแบบแล้วยังช่วยในการคิดแปลงการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางที่ดีที่สุด โดยใช้ร่วมกับโปรแกรมการวิเคราะห์อื่น ๆ เช่น Finite Element Analysis (FEA) สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) การออกแบบรูปทรงเรขาคณิต (Geometric Modeling) มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ
 - ก. ชุดคำสั่งเกี่ยวกับการสร้างรูปทรงเรขาคณิต
 - ข. ชุดคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการรูปทรง
 - ค. ชุดคำสั่งการเชื่อมโยงส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน
- 2) การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Engineering Analysis) มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ
 - ก. การวิเคราะห์ทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ
 - ข. การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีแรงหรือความร้อนมากระทำ
- 3) การตรวจและประเมินผล (Design Review & Evaluation) เป็นการจำลองการทำงานหรือการประกอบกันของชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบ
- 4) การเขียนแบบอัตโนมัติ (Automated Drafting) จะประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้
 - ก. แบบแยกชิ้นและประกอบภาพ
 - ข. รายละเอียดของแบบสั่งงาน
 - ค. รายละเอียดเกี่ยวกับชื่อชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2. Computer aided manufacturing; CAM

องค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD)
2. ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต (Manufacturing Tools)
3. การเชื่อมต่อระบบเครือข่าย (Network)

CAM อาจแบ่งประเภทตามการประยุกต์ใช้งาน เช่น งานกัด งานกลึง เป็นต้น โดยที่ซอฟต์แวร์ CAD/CAM จะเน้นไปทางงานกัด เนื่องจากเป็นงานกัดได้แบบสองแกนครึ่ง สามแกน และ มากกว่าสามแกน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.14.2.1. ระบบ CNC (Computer Numerical Control)

ระบบ CNC นี้ เป็นการนำไมโครโพรเซสเซอร์ซึ่งพัฒนาขึ้นมาให้สามารถควบคุมเครื่อง NC ได้โดยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 1 เครื่อง จะควบคุมเครื่อง NC ได้ 1 เครื่องโดยตรง ทำให้การใช้งานเครื่อง NC ลดความยุ่งยากลงไปมากในระบบ NC เทคโนโลยีสมัยใหม่แล้วนั้น สามารถตรวจสอบ NC โปรแกรมได้ โดยการดูทางเดินของเครื่องมือ ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์จริงบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และยังสามารถตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการทำงานบนชิ้นงานจริง ๆ ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ในระบบ CAM โดยที่ยังไม่ต้องทำการตัดเฉือนชิ้นงานจริง

2.14.2.2. ระบบ DNC (Direct Numerical Control)

ระบบ DNC นี้ จะเป็นการใช้คอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ 1 เครื่อง ระดับเมนเฟรมส่งการกับเครื่อง NC หลายเครื่อง โดยตรง เป็นการแสดงการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่อง NC

มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูล (Data Exchange Standard) การที่จะทำให้ระบบ CAD/CAM สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างระบบ การแลกเปลี่ยนข้อมูลใน CAD จะใช้มาตรฐาน IGES (Initial Graphics Exchange Specification) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิต เช่น จุด เส้นตรง เส้นโค้งและ FEA Nodes เป็นต้น
2. ข้อมูลเกี่ยวกับการอธิบายประกอบ เช่น ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง
3. ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้าง

2.14.3. Computer Aided Engineering (CAE)

CAE เป็นเหมือนเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวาง ในการพัฒนาและผลิต CAE สามารถเป็นไปได้มากกว่า โปรแกรมช่วยออกแบบทางด้าน Graphic Design ทำงานกระบวนการทางวิศวกรรมหลังจากการออกแบบ และส่งเสริมให้สามารถทำได้โดยอัตโนมัติ เป็นไปได้ที่จะเป็นกุญแจไปสู่การสร้างต้นแบบของผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องทำ Model ในการออกแบบเราสามารถใช่ CAE วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ ความเค้นและการเคลื่อนที่ทางกลไก ในโปรแกรม CAE ระดับสูงจะมีโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ทางด้าน Finite Element ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ทำให้ผู้ออกแบบมีขีดความสามารถในการแก้ไขปัญหา และออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างและทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ระบบ CAE สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ การทำงานในกระบวนการการผลิต โดยวิธีการใหม่เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมได้ด้วยวิธีการของ Simulation ซึ่งสามารถดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อหาการวางผังสายการผลิตหรือการไหลของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิกทำให้มองเห็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไปส่วนรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ชนด้านการค้า การทำงานของกระบวนการผลิตที่เกี่ยวกับการตัดสินใจจากผลที่ออกมาจากขบวนการผลิตจริง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15. โปรแกรม Mold Flow [18]

กระบวนการที่จะใช้ทำการผลิตชิ้นงานออกสู่ตลาดนั้น ต้องใช้กระบวนการออกแบบต้นแบบ ออกแบบแม่พิมพ์ สร้างแม่พิมพ์ และผลิตชิ้นงานออกมา รวมทั้งต้องทำการตลาดด้วย แต่ละขั้นตอนดังกล่าว ทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านเวลา ถ้าเกิดลดเวลาลงได้จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการผลิตออกสู่ตลาดได้มากขึ้น การลดระยะเวลาทำงานลงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับผลตอบแทนที่จะได้รับ ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์จึงตอบสนองความต้องการด้านเวลาและประสิทธิภาพของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

โปรแกรม Mold Flow® เป็นซอฟต์แวร์ที่นำเสนอเทคโนโลยีการจำลองกระบวนการฉีดพลาสติก การวิเคราะห์โปรแกรม องค์ประกอบต่างๆที่เกี่ยวกับการสร้างแม่พิมพ์ ในคอมพิวเตอร์หรือที่เรียกว่า Computer Aided Engineering (CAE) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์ ตรวจสอบคุณภาพ ป้องกันปัญหา และหาความเหมาะสมในการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ให้ได้คุณภาพสูงสุด โดยที่ต้นทุนการผลิตต่ำสุด

2.15.1. Mold Flow® ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- การออกแบบระบบการไหล (Feed System Design)
- เทคโนโลยีการเมช (Meshing Technology)
- การวิเคราะห์ระบบหล่อเย็น (Mold Cooling Simulation)
- การจำลองการฉีดพลาสติก (Plastics Flow Simulation)
- การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงาน (Structure Integrity Simulation)
- การวิเคราะห์การไหลของกระบวนการฉีดพลาสติกอื่นๆ
- การวิเคราะห์ชิ้นงานเทอร์โมเซต (Thermoset Flow Simulation)
- การแสดงผล (Result)

การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกด้วยโปรแกรม Mold Flow® จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบ คือ

1. MFL4 จะใช้ Finite Element สำหรับการคะเนความดัน และทำการจำลองการไหลของพลาสติกล่วงหน้าก่อนที่จะทำโมลด์เบส (Moldbase) ส่วนการคำนวณด้านอุณหภูมิ จะใช้รูปแบบของอัลกอริทึมบน Mold Flow® ซึ่งโปรแกรมนี้จะวิเคราะห์ได้เพียงการเติมเต็มใน โมลด์เท่านั้น

2. MFLP จะใช้ Finite Element สำหรับการคะเนความดัน และทำการจำลองการไหลของพลาสติกล่วงหน้าก่อนที่จะทำโมลด์เบส (Moldase) ส่วนการคำนวณด้านอุณหภูมิ จะใช้ส่วนของสมการ (Finite Difference) ซึ่งโปรแกรมนี้จะวิเคราะห์ได้ในส่วนของ การเติมเต็ม (Filling) และการรวมเป็นเนื้อเดียวของพลาสติก (Packing)

ข้อคำนึงในการออกแบบ

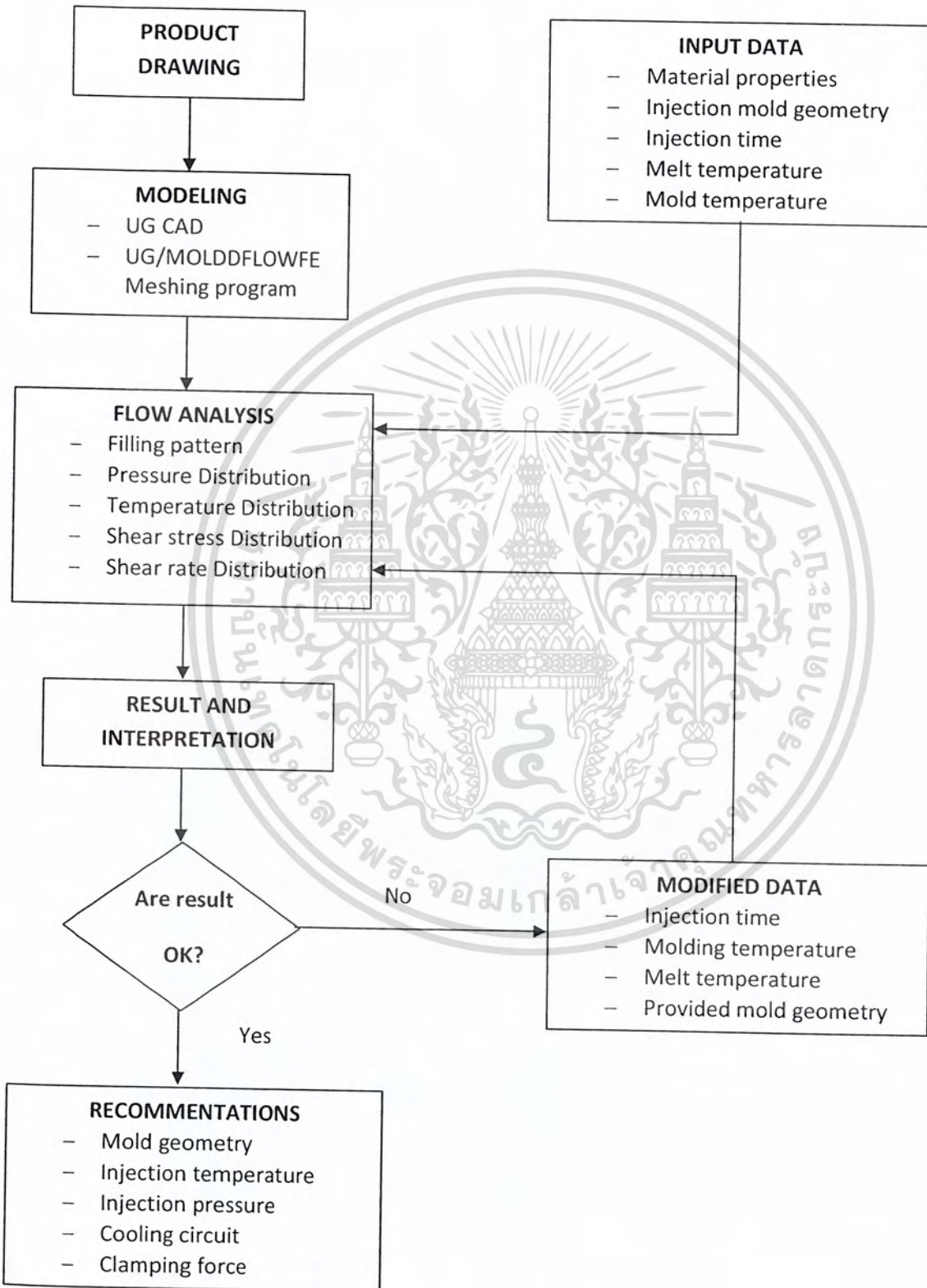
1) การเติมเต็มของโมลด์ (Mold Filling) เป็นส่วนสำคัญมาก จะมีปัญหาที่จะต้องคำนวณคือ จะใช้ความดันเท่าใดในการเติมเต็ม ซึ่งในส่วนนี้ Mold Flow® จะช่วยในการคะเนค่าความดันและการจำลองการฉีด

2) การวิเคราะห์การรวมเป็นเนื้อเดียว (Packing Analysis) โดยในการวิเคราะห์จะใช้ MFLP ซึ่งจะช่วยในงานจริงที่ต้องมีการเปลี่ยนความดันฉีดพลาสติกเพื่อให้การเติมเต็มใน โมลด์มีคุณภาพดีที่สุด

3) การหดตัวของปริมาตร (Volumetric Shrinkage) การวิเคราะห์การหดตัวนี้เอง จะส่งผลต่อการเกิดปัญหาการบิดงอและคุณภาพชิ้นงานที่ค่อยลงโดยทั่วไปจะไม่มีสูตรในการหาการหดพลาสติกที่ดีที่สุดไว้ แต่จะเป็นการเปลี่ยนสถานะเพื่อทดสอบการฉีด ดังนั้นจึงต้องมีความรู้และความสามารถที่ดีในการวินิจฉัยสถานะต่างๆ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Mold Flow® สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.39

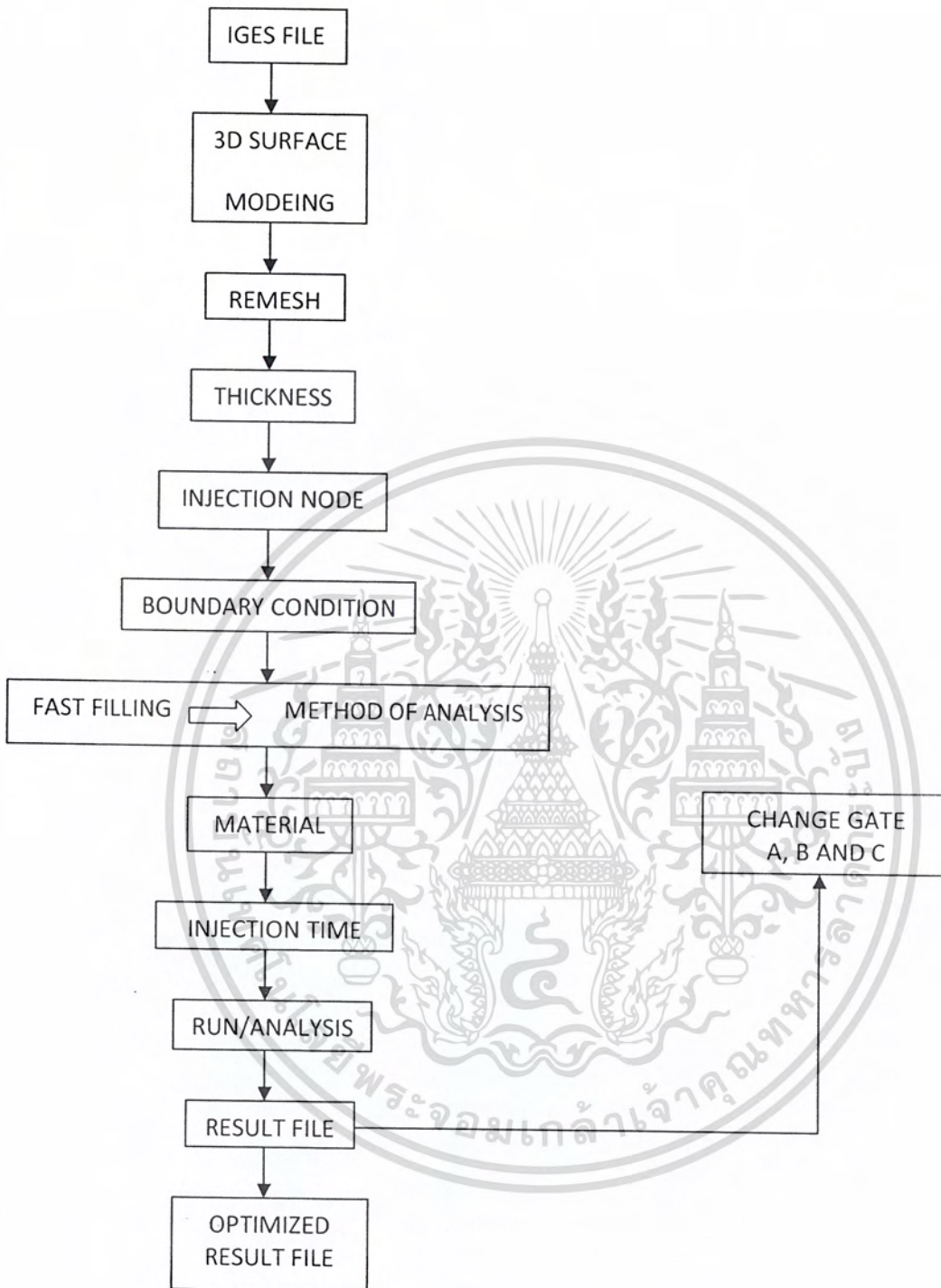


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.39 แผนภาพ (Flow Chart) ขั้นตอนการวิเคราะห์ของโปรแกรม Mold Flow
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2. ขั้นตอนการวิเคราะห์การฉีดพลาสติก

ในการผลิตชิ้นงานต้องเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ทั้งรูปร่าง ขนาด หน้าที่การทำงานที่จำเป็น เพื่อนำไปออกแบบใน CAD (Computer Aided Design) ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนยุ่งยากในการออกแบบ มองเห็นภาพและขนาดจริง ทั้งแบบสองมิติและแบบสามมิติ เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จแล้วก็นำเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์และตรวจสอบว่า ชิ้นงานสามารถทนต่อสภาวะของแรงที่มากระทำจากการใช้งานจริงๆ ได้หรือไม่ เพื่อนำไปสู่การแก้ไขชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์ CAE (Computer Aided Engineering) การวิเคราะห์การฉีดพลาสติกบน Mold Flow® จะเป็นไปตาม Block Diagram แสดงดังรูปที่ 2.40 ซึ่งมีขั้นตอนนี้

1. IGE File เปิดไฟล์ที่ได้สร้าง Midsurface จาก UGII พร้อมทั้งจะนำมาทำการวิเคราะห์บน Mold Flow®
2. 3D Surface Modeling เปลี่ยนโหมด ให้แสดงแต่ 3D Surface Modeling
3. Remesh ทำการสร้าง Node และ Element โดยอัตโนมัติให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์
4. Thickness กำหนดค่าความหนาชิ้นงาน จากที่ได้ทำการออกแบบบน CAD
5. Injection Node จะเป็นเครื่องมือในการกำหนดจุดฉีดพลาสติกเข้าชิ้นงาน
6. Boundary Condition จะเป็นการกำหนดสภาวะขอบเขตของชิ้นงาน
7. Method of Analysis การวิเคราะห์จะใช้วิธี Fast Filling
8. Material คุณสมบัติต่างของพลาสติกได้มาจาก Database ของ Mold Flow®
9. Injection Time สามารถทราบเวลาที่ใช้ในการฉีดตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการฉีดได้
10. Run/Analysis วิเคราะห์ผลการฉีดชิ้นงานที่เวลาต่างๆ เมื่อพลาสติกไหลเข้าแม่แบบ
11. Result File เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์จะได้ข้อมูลรวมต่างๆ เช่น ความดัน อุณหภูมิ รอยเชื่อมประสาน เป็นต้น
12. Change Gate จะให้ตัวแปรต้นเป็นการเปลี่ยนจุดฉีด (Injection Node) และตัวแปรตาม คือ ผลซึ่งได้จากการวิเคราะห์บน Mold Flow®
13. Optimized Result File ทำการเปลี่ยน Injection Node ในลักษณะต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ใหม่ทั้งหมด ก็จะได้ Result File ออกมา



รูปที่ 2.40 Block Diagram ขั้นตอนการวิเคราะห์การฉีดพลาสติกของโปรแกรม Mold Flow®

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.3. ตัวแปรของวัสดุที่ต้องการในโปรแกรม Mold Flow® [19]

1. ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity; W/m/°C) แสดงค่าเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการนำความร้อนของวัสดุในการหลอมเหลว
2. ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat; J/Kg/°C) แสดงค่าเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะในการหลอมเหลววัสดุ
3. ค่าความหนาแน่นของวัสดุหลอมเหลว (Melt Density; kg/m³) แสดงความหนาแน่นของวัสดุหลอมเหลว ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ และมีความสัมพันธ์กับปริมาตรจำเพาะและความร้อนจำเพาะ
4. อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection Temperature; °C) แสดงอุณหภูมิที่ปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณหาเวลาการหล่อเย็นของชิ้นงาน
5. อุณหภูมิที่วัสดุไม่มีการไหล (No Flow Temperature; °C) แสดงอุณหภูมิที่วัสดุไม่มีการไหลซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณการแข็งตัวของชิ้นงาน
6. ความหนืด (Viscosity; Pa·s) ค่าของอุณหภูมิและความเค้นจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืดของวัสดุ และนำค่าความหนืดไปใช้ในการหาความดันที่ต้องใช้ในกระบวนการฉีด
7. ปริมาตรจำเพาะ (PvT Specific Volume; cm³/g) ค่าของอุณหภูมิและความดันจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาตรจำเพาะของวัสดุ และนำค่าที่ได้ไปคำนวณอัตราการไหลของวัสดุหลอมเหลวและน้ำหนักของวัสดุที่ต้องใช้ในการฉีด
8. อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (Melt Temperature; °C) แสดงถึงช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุที่ควรใช้ในกระบวนการฉีด
9. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature; °C) แสดงถึงช่วงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ควรใช้ในกระบวนการฉีด
10. ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress; MPa) แสดงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของวัสดุ ซึ่งในระหว่างกระบวนการฉีดไม่ควรให้ค่าความเค้นเฉือนสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุด
11. ค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Rate; s⁻¹) แสดงค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งในระหว่างกระบวนการฉีดไม่ควรให้ค่าอัตราความเค้นเฉือนมีค่าสูงกว่าค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

จากการทำการทดลองการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) และยังรู้ถึงกรรมวิธีในการทดลอง วัสดุและขั้นตอนต่างๆที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์และวิธีการทดลองได้ดังต่อไปนี้

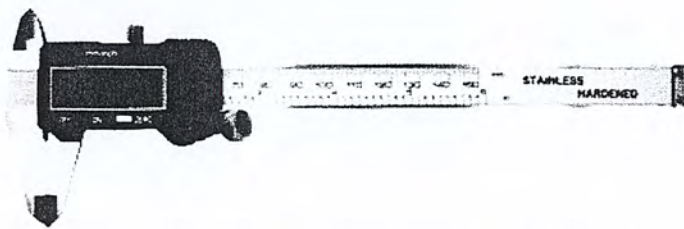
1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. หลักการออกแบบการทดลอง
4. ขั้นตอนการทดลอง

3.1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดสำหรับฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เม็ดพลาสติก โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) ชนิดความหนาแน่นสูง เกรด EL-Lene H555J ของบริษัท เอสซีจี พลาสติก จำกัด

3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ระบบดิจิทัล (Digital Vernier Caliper) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง เป็นเวอร์เนียคาลิปเปอร์ที่มีขนาดความละเอียดถึง 0.02 มิลลิเมตร และมีระยะช่วงความยาวของตัวเวอร์เนียคาลิปเปอร์ที่สามารถใช้วัดขนาดของตัวชิ้นงานฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวได้ ซึ่งเวอร์เนียคาลิปเปอร์ แบบระบบดิจิทัลนี้จะช่วยลดความยุ่งยากในการอ่านค่าและช่วยลดความผิดพลาดในการวัดทำให้ค่าที่วัดได้มีความแม่นยำมากขึ้น

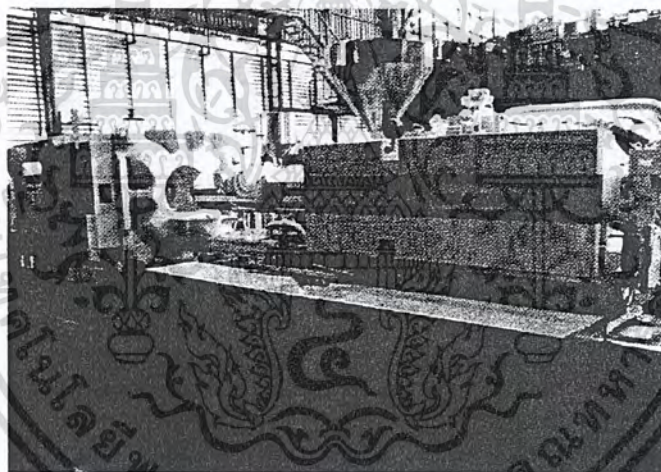


รูปที่ 3.1 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ระบบดิจิทัล [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
3. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยเลือกใช้โปรแกรม Solid Work 2009 ในการเขียนแบบชิ้นงานฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว
4. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์ชิ้นงานพลาสติก (CAE) โดยเลือกใช้โปรแกรม Moldflow Insight 2010 ของบริษัท Moldflow Corporation เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยให้ผู้ออกแบบชิ้นงานพลาสติก สามารถตรวจสอบชิ้นงานที่ออกแบบว่าสามารถผลิตได้หรือไม่ ซึ่งสามารถที่จะจำลองสถานการณ์ และวิเคราะห์การไหลของพลาสติกสำหรับงานฉีด เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย สามารถรับ Solid Model จากซอฟต์แวร์ CAD มาใช้งานได้ทันที
5. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection Molding Machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ผลิตโดยบริษัท MITSUBISHI รุ่น 450 MG ใช้ระบบ Hydraulic ควบคุมการปิด - เปิดของแม่พิมพ์ โดยคุณสมบัติของเครื่องดังนี้

แรงมากสุดในการจับยึด	450 ตัน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูฉีด	80 มิลลิเมตร
ปริมาตรการฉีดสูงสุด	2110 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น 450 MG [21]

3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่จำลองการวิเคราะห์ และทำนายผลการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรม Mold Flow Insight 2010 โดยการทดลองจะทำตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้เตรียมเอาไว้แล้ว และผลที่ได้จากการจำลองการทำนายผลการฉีดขึ้นรูปจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดความบกพร่องของกระบวนการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว ซึ่งก็คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความดันฉีดย้ำ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และความเร็วในการฉีด เนื่องจากว่าปัจจัยที่ใช้ในการศึกษานั้นมีมากกว่า 1 ปัจจัย และอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกนั้นเกิดขึ้นพร้อมๆกัน โดยแต่ละปัจจัยมีผู้ช่วยกันหลายระดับที่ต้องทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 5 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีด้วยกัน 2 ระดับ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิแม่พิมพ์ ประกอบด้วยระดับต่ำเท่ากับ 30 องศาเซลเซียสและระดับสูงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส
- ปัจจัยที่ 2 อุณหภูมิการหลอมเหลว ประกอบด้วยระดับต่ำเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และระดับสูงเท่ากับ 255 องศาเซลเซียส
- ปัจจัยที่ 3 ความดันฉีดเข้า ประกอบด้วยระดับต่ำเท่ากับ 36 และ 8 เมกกะปาสกาล และระดับสูงเท่ากับ 72 และ 15 เมกกะปาสกาล
- ปัจจัยที่ 4 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ประกอบด้วยระดับต่ำเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และระดับสูงเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส
- ปัจจัยที่ 5 ความเร็วในการฉีด ประกอบด้วยระดับต่ำเท่ากับ 8 มิลลิเมตรต่อวินาทีและระดับสูงเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

เมื่อทำการจัดทรีทเม้น (Treatment) ในการทดลอง จะเรียกผลการจัดทรีทเม้นเหล่านี้ว่า Treatment Combination เช่น การทดลองมี 5 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังนั้นจะเรียกว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 2^5 ดังนั้น Combination ทั้งหมดที่ในการทดลองมีทั้งหมด 32 ครั้ง ดังนั้นหลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

3.3.1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา

ศึกษาหาแนวความคิดที่เกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความบกพร่องของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกแบบเกลียวว่าเกิดจากสาเหตุใด ควรทำการแก้ไขอย่างไร

3.3.2. เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต

การเลือกพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้เลือกมาทั้งหมด 5 พารามิเตอร์หรือ 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีดเข้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและความเร็วในการฉีด แล้วทำการกำหนดระดับของพารามิเตอร์ ซึ่งในการกำหนดระดับของพารามิเตอร์นี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ว่าควรจะมีค่าเป็นเท่าไร โดยกำหนดค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากทฤษฎี โดยนำค่าระหว่างที่มาทั้ง 2 นี้ มาทำการเปรียบเทียบกันแล้วเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการทดลอง

3.3.3. เลือกการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยที่ 2 หมายถึงระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ส่วน k หมายถึงจำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองโดยในการทดลองนี้มีด้วยกันทั้งหมด 5 ปัจจัย มีจำนวนการทดลองมีทั้งหมด 32 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4. แผนการทดลอง

การทดลองด้วยการจำลองการวิเคราะห์ และทำนายผลการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวด้วยโปรแกรม Mold Flow Insight 2010 ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้ทำการออกแบบการทดลองไว้แล้ว โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.1 เมื่อทำการทดลองให้ได้จำนวนครั้ง 32 ครั้ง ตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Minitab ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ	สูง
อุณหภูมิแม่พิมพ์	30 °c	60 °c
อุณหภูมิการหลอมเหลว	160 °c	255 °c
ความดันฉีด	36,8 MPa	72,15 MPa
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	25 °c	75 °c
ความเร็วในการฉีด	8 mm/s	20 mm/s

ซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าชิ้นงานจะผ่านหรือไม่ผ่านจะพิจารณาจากขอบเขตของข้อบกพร่องต่อไปนี้

1. ชิ้นงานจะต้องฉีดเต็มแบบ
2. รอยยุบ (Sink Mark) มีค่าอยู่ระหว่าง - 3 % ถึง 3 %
3. การโก่งตัว (Warpage) มีค่าอยู่ระหว่าง -0.25 mm ถึง 0.25 mm ตามแนวแกน X,Y,Z
4. การหดตัว (Shrinkage) มีค่าไม่เกิน 10 %
5. ค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงาน (Residual stress at first) ต้องมีค่าเป็นบวก

ในขั้นตอนการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดความบกพร่องของกระบวนการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวนี้ จะแสดงถึงค่าพารามิเตอร์และระดับขั้นของการออกแบบการทดลอง โดยที่ค่าของพารามิเตอร์จะใช้เครื่องหมายบวก (+) แทนระดับสูง และเครื่องหมายลบ (-) แทนระดับต่ำ โดยแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางบันทึกผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ⁵												
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย					ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น					สรุปผล	
	A	B	C	D	E	ฉีดไม่เต็มแบบ	Sink Mark	Warpage	Shrinkage	Residual stress at first	ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	+	+	+	+	+							
2	+	+	+	+	-							
3	+	+	+	-	+							
4	+	+	+	-	-							
.							
.							
.							
29	-	-	-	+	+							
30	-	-	-	+	-							
31	-	-	-	-	+							
32	-	-	-	-	-							

3.4. ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความบกพร่องของกระบวนการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวจะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อที่จะให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.4.1. ขั้นตอนก่อนการทดลอง

1. คัดเลือกชิ้นงานเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยพบว่าชิ้นงานมีปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้ คือ มีการรั่วซึมบริเวณร่องเกลียวและเกลียวที่ไม่แข็งแรง ส่งผลทำให้เกลียวหวาน และการมีรอยตำหนิต่างๆ เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การฉีดไม่เต็มแบบ รอยยุบ (Sink mark) การโก่งตัวของชิ้นงาน (Warpage) และการหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage)
2. ศึกษาปัญหา ตั้งปัญหาจากทฤษฎี พร้อมทั้งกำหนดวิธีการแก้ปัญหาและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาคือ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด ความดันฉีดเข้า และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
3. ทำการเขียนแบบชิ้นงานฝาเกลียวพลาสติกที่นำมาศึกษา (ฝาเกลียวที่มี 48 โพรงแบบ) ด้วยการโปรแกรม

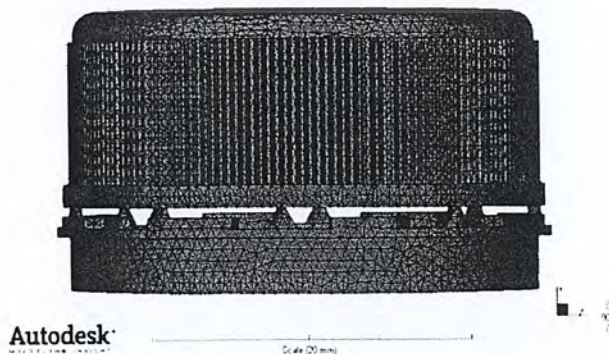
Solid Work 2009 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ระบบดิจิตอลวัดขนาดและลักษณะตามแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กำหนด ซึ่งรูปร่าง (Model) ของชิ้นงานต้นแบบจะเป็นฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวดังแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยฝามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 32.50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงในเท่ากับ 28.50 มิลลิเมตร ตัวฝามีปริมาตรรวมเท่ากับ 2,968.86 ลูกบาศก์มิลลิเมตร หรือประมาณ 3,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังแสดงภาพการเขียนแบบในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม Solid Work 2009 รูปที่ 3.4 ชิ้นงานต้นแบบฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว [1]

4. นำชิ้นงานที่วาดด้วยโปรแกรม Solid Work เสร็จแล้ว ทำการส่งผ่านข้อมูลเพื่อเข้าสู่โปรแกรม Mold Flow Insight 2010 โดยบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ IGES File ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์ที่สามารถส่งข้อมูลที่สร้างไว้เข้าไปยังโปรแกรม Mold Flow Insight 2010 ได้
5. ทำการวิเคราะห์โพรงแบบในส่วนของการเติมเต็ม โดยทำการเมช (Generate Mesh) ในโพรงแบบ (Cavity) ซึ่งโปรแกรม Mold Flow Insight 2010 จะทำการสร้าง Node และ Element ตามเหลี่ยมให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักในการสร้าง Node และ Element แบบ Duo Domain ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ ซึ่งเมื่อทำการ Meshing เสร็จแล้วจะได้ชิ้นงานที่มี Element ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเมช เช่น จำนวนของ Node จำนวนของ Element การทับกันของ Element (Fully Overlapping Element) หรือการตัดกันของ Element (Element Intersections) หรือไม่ โดยสามารถตรวจสอบได้จาก Check Mesh Statistics ดังแสดงในรูป 3.6 เมื่อพบว่าการเมชมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจะต้องทำการแก้ไขเมชให้ถูกต้อง โดยโปรแกรมจะแสดงผลให้ทราบว่าต้องแก้ไขที่ Element ไດบ้างดังรูป 3.7 โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของ Mesh Element (Maximum Aspect Ratio) จะมีค่าสูงสุด ได้ไม่เกิน 6 การตัดกันของ Element ต้องมีค่าเป็น 0 และ Free edges มีค่าเท่ากับ 0

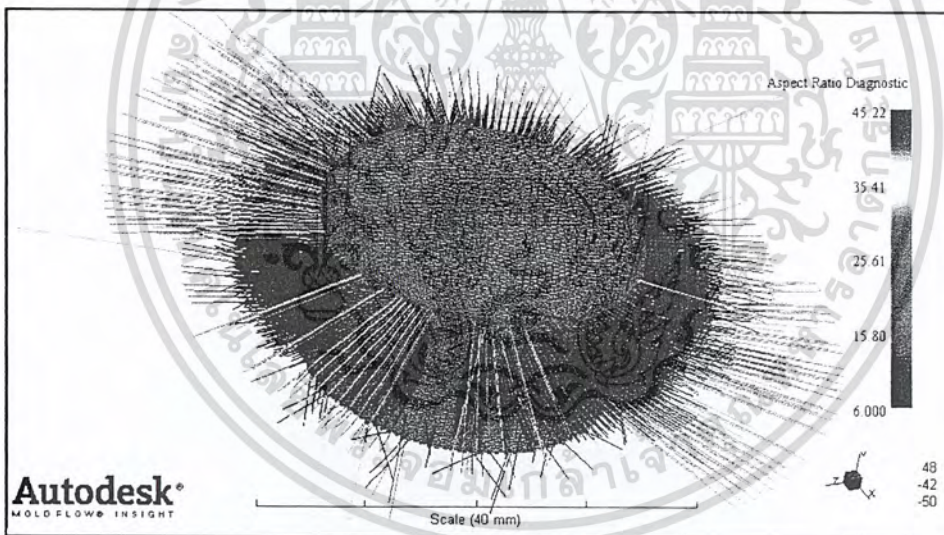


รูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการ Generate Mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mesh Statistics	
Entity counts-----	
Surface triangles	56152
Nodes	28071
Beams	0
Connectivity regions	1
Mesh volume	3.0765 cm ³
Mesh area	56.4369 cm ²
Edge details-----	
Free edges	0
Manifold edges	84228
Non-manifold edges	0
Orientation details-----	
Elements not oriented	3
Intersection details-----	
Element intersections	0
Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio-----	
Minimum aspect ratio	1.155000
Maximum aspect ratio	5.999000
Average aspect ratio	2.465000
Match percentage-----	
Match percentage	70.5%
Reciprocal percentage	64.6%
Close	

รูปที่ 3.6 หน้าต่างการ Check Mesh Statistics



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ต้องแก้ไข Node และ Element

- ทำการเพิ่มข้อมูลคุณสมบัติต่างๆและชนิดของวัสดุลงใน Material Database เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยในที่นี้ ใช้การวิเคราะห์ด้วย เม็ดพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีน (Polyethylene : PE) เกรด EL-Lene H555J ของบริษัท เอส ซีจี พลาสติก จำกัด ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุและรายละเอียดต่างๆแสดงไว้ในตาราง 3.3 สำหรับเกรด EL-Lene H555J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดพลาสติกเกรดEL-Lene H555J

Material Specification	
ชนิดของวัสดุ	polyethylene (PE) HDPE
ชื่อทางการค้า	Eltex B4020N1343
ผู้ผลิต	BP Solvay polyethylene
โครงสร้างของวัสดุ	Thermoplastic
Processing Conditions	
Melt Temperature Minimum	120°C
Melt Temperature Maximum	255°C
Melt Temperature Suggested	188°C
Melt Temperature Absolute	295°C
Mold Temperature Minimum	20°C
Mold Temperature Maximum	60°C
Maximum Shear Stress	0.2MPa
Generic Maximum Shear Rate	40,000 1/s
Mold surface temperature	40°C
Material Specification	
Conductivity	0.25 W/m-c @ T = 180°C
Specific Heat	2600 J/kg-c @ T = 180°C
Melt Density	0.75483 g/cm ³
Ejection Temperature	85°C
Transition Temperature	110°C
Mechanical Properties	
Tensile Strength	-
Tensile Modulus	911MPa
Flexural Strength	-
Izod Impact Strength	-
Shear Modulus	319.4 MPa
Poisson ratio	0.426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ศึกษาเลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ โดยเลือกเหล็กกล้าเครื่องมือ P-20 สำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic Mold Steels) ซึ่งประกอบด้วย Mn 1.0%, Si 0.4%, Cr 1.2%, C 0.4% และ Mo 0.35% เนื่องจากสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง ภายใต้อุณหภูมิสูง ทนการกัดกร่อนจากสารเคมี รับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกได้ดี และยังเหมาะสมสำหรับผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดอีกด้วย ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุทำแม่พิมพ์ P20 ที่อุณหภูมิห้อง

Tensile Strength	1000-1068 N/mm ²
Yield Stress	861-930 N/mm ²
Reduction of Area	45-50%
Elongation	14-17%

8. ทำการออกแบบหาตำแหน่งรูเข้า (Gate Location) ที่เหมาะสมของการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว โดยได้ทำการศึกษาจากทฤษฎีต่างๆ และใช้โปรแกรม Moldflow Insight 2010 ช่วยหาค่าตำแหน่ง Gate ที่เหมาะสมเบื้องต้น ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่ง Gate ที่เหมาะสมนั้นอยู่บริเวณจุดกึ่งกลางด้านบนของฝาขวดพลาสติก แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตำแหน่ง Gate ที่เหมาะสมของการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

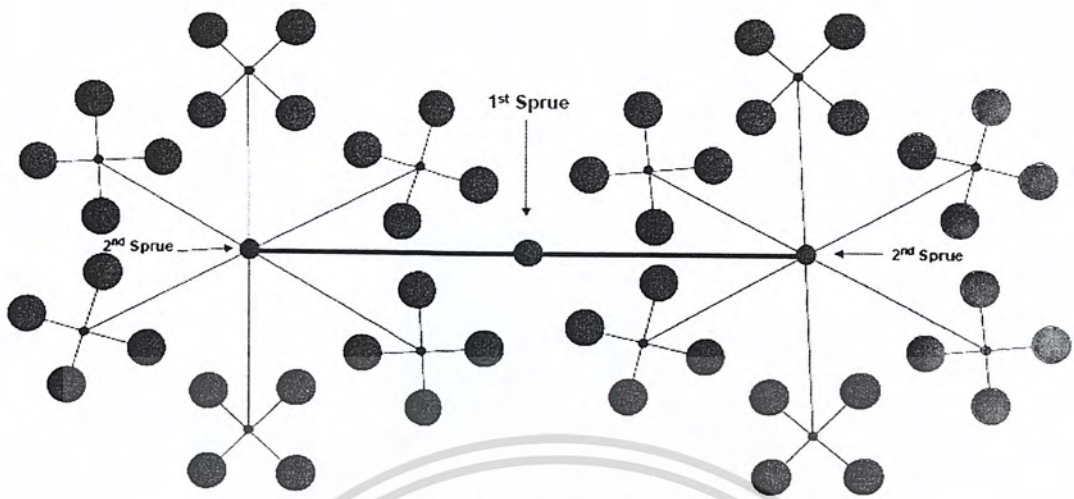
9. ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกขนาดของหัวฉีด (Nozzle) กำหนดใช้หัวฉีดขนาด Ultra 350 รุ่น SCVG ของบริษัท Husky โดยเลือกมาจากปริมาตรของชิ้นงานฉีด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร มีอัตราการไหล สูงสุดเท่ากับ 20 กรัม/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยสมบัติของหัวฉีดเป็นดังนี้
- สามารถฉีดแรงดันสูงถึง 179.3 MPa
 - ความดันสูงสุด 26,000 ปาสกาล
 - ทนอุณหภูมิสูงสุด 375 องศาเซลเซียส
 - รอบการหมุน 250,000 รอบ
 - ทนความกดอากาศต่ำได้ 100 ปาสกาล



รูปที่ 3.9 ลักษณะหัวฉีด (Nozzle) ที่เลือกใช้ [22]

10. การออกแบบรูฉีด (Sprue Design) ในระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก เนื้อพลาสติกจะถูกส่งผ่านออกจากหัวฉีด (Nozzle) ของเครื่องฉีดในสถานะของเหลว และแม่พิมพ์ทางรูฉีด (Sprue) ผ่านทางวิ่ง (Runner) จนถึงภายในคาวิตี และรูฉีดจะออกแบบให้มีลักษณะเรียวยาว
11. ออกแบบระบบทางวิ่ง (Runner System) และสมดุลการไหลภายในโพรงแบบ (Balance Runner) ทำการกำหนด Node ในการฉีดโดยสมมติให้เป็นตำแหน่งของทางเข้าโพรงแบบ และทำการปรับรูปร่างและลักษณะของรูวิ่ง (ฝาเกลียวที่มี 48 โพรงแบบ) โดยพิจารณาตามข้อกำหนดดังนี้
- ให้มีการไหลที่สมดุล (Flow Balance) คือมีการเติมเต็มที่ปลายของแต่ละ โพรงแบบที่เวลาเดียวกัน
 - ให้มีการลดลงของความดัน (Pressure Gradient) ที่แต่ละโพรงแบบมีค่าความดันเท่ากับศูนย์
 - ให้มีค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) ในระหว่างการเติมมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตของวัสดุที่กำหนดใน Material Database
 - ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction Heating) ควรกำหนดให้ต่ำกว่าค่าสูงสุดของวัสดุที่กำหนดใน Material Database
 - ให้เกิดการปิดตัวของทางเข้า (Gate) พอดีเมื่อทำการเติมเต็ม (Thermal Shutoff)
 - ตรวจสอบพฤติกรรมที่จะทำให้เกิดชิ้นงานขาดความแข็งแรง เช่น Sink mark ,Warpage , Shrinkage
 - โดยระบบรูวิ่งที่ใช้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร มีลักษณะดังรูป 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

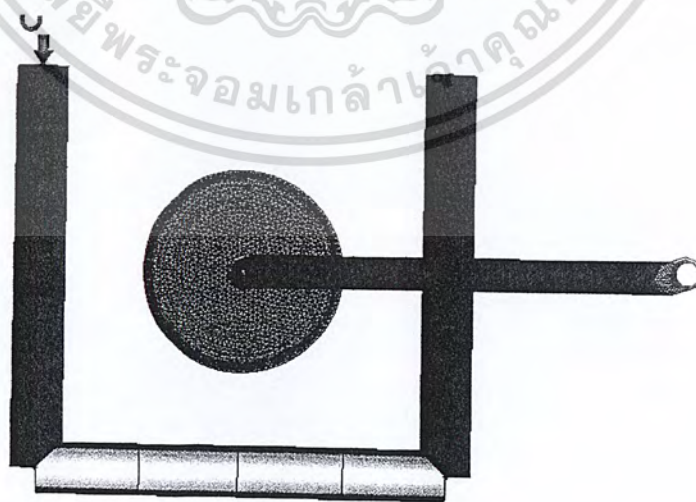


48 cavities mold

● cap

รูปที่ 3.10 ทางวิ่งของชิ้นงานฝาเกลียวพลาสติก

12. ออกแบบระบบการหล่อเย็น (Cooling Systems) การจัดวางระบบการหล่อเย็นจะทำไปพร้อมๆ กับการออกแบบระบบอื่นเพราะถ้าออกแบบระบบการหล่อเย็นที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องวางให้เหมาะสมเพื่อการหล่อเย็นจะได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็น ความยาวและระยะห่างจากผิวท่อจะต้องเหมาะสม ผิวของท่อน้ำหล่อเย็นควรทำให้เรียบพอสมควร เพื่อให้ถ่ายความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.11 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นที่ใช้คือ 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 ระบบน้ำหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2. ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานฝาเกลียวพลาสติกในการวิเคราะห์ชิ้นงาน ฝาเกลียวพลาสติกด้วย ซอฟต์แวร์โปรแกรม Mold Flow Insight 2010 ตามที่ได้ออกแบบการทดลองเอาไว้ เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของพลาสติกขณะทำการจำลองการฉีดชิ้นงานพลาสติก และหาค่าสภาวะของกระบวนการฉีดที่ยอมรับได้ (Molding Window) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน สังเกตผลการทำนายของค่าต่างๆที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้หรือไม่
2. ทำการบันทึกลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองและทำการวิเคราะห์เพื่อสรุปผลลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด จนได้ลักษณะชิ้นงานที่มีคุณภาพดีตามต้องการ

3.4.3. ขั้นตอนหลังการทดลอง

นำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab 15 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ และประเมินความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองเพื่อทำการจำลองการวิเคราะห์และทำนายผลการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 2^5 คือ กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 5 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีด้วยกัน 2 ระดับ จากนั้นจึงดำเนินการทดลองตามวิธีการทดลองที่ได้วางไว้ในบทที่ 3 และทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้จากการทำนายผลการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

4.1. ผลการทดลอง

จากการทดลองตามสถานะของตัวแปรต่างๆ ตามแบบการทดลองจากตารางที่ 3.1 โดยมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 ครั้ง และบันทึกผลของการเกิดข้อบกพร่องในแต่ละการทดลองลงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^5												
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย					ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น					สรุปผล	
	A	B	C	D	E	ฉีดไม่เต็มแบบ	Sink Mark	Warpage	Shrinkage	Residual stress at first	ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	+	+	+	+	+		✓		✓			✓
2	+	+	+	+	-		✓	✓	✓			✓
3	+	+	+	-	+		✓		✓			✓
4	+	+	+	-	-		✓	✓	✓			✓
5	+	+	-	+	+		✓		✓			✓
6	+	+	-	+	-		✓		✓			✓
7	+	+	-	-	+		✓		✓			✓
8	+	+	-	-	-		✓		✓			✓
9	+	-	+	+	+						✓	
10	+	-	+	+	-	✓						✓
11	+	-	+	-	+						✓	
12	+	-	+	-	+	✓						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว (ต่อ)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ⁵												
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย					ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น					สรุปผล	
	A	B	C	D	E	ฉีดไม่เต็มแบบ	Sink Mark	Warpage	Shrinkage	Residual stress at first	ผ่าน	ไม่ผ่าน
13	+	-	-	+	+			✓				✓
14	+	-	-	+	-	✓		✓				✓
15	+	-	-	-	+			✓				✓
16	+	-	-	-	-	✓		✓				✓
17	-	+	+	+	+		✓	✓	✓			✓
18	-	+	+	+	-			✓				✓
19	-	+	+	-	+		✓	✓	✓			✓
20	-	+	+	-	-			✓				✓
21	-	+	-	+	+		✓		✓			✓
22	-	+	-	+	-			✓	✓			✓
23	-	+	-	-	+		✓		✓			✓
24	-	+	-	-	-			✓	✓			✓
25	-	-	+	+	+						✓	
26	-	-	+	+	-	✓						✓
27	-	-	+	-	+						✓	
28	-	-	+	-	-	✓						✓
29	-	-	-	+	+							✓
30	-	-	-	+	-	✓						✓
31	-	-	-	-	+			✓				✓
32	-	-	-	-	-	✓						✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2. การวิเคราะห์ข้อมูลของการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว

จากตารางผลการทดลองการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียว ใช้โปรแกรม Minitab Release 15 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับช่วยคำนวณทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง กลุ่มผู้วิจัยได้กำหนดค่าของผลวิเคราะห์ แปลความหมายต่างๆ เป็นดังนี้

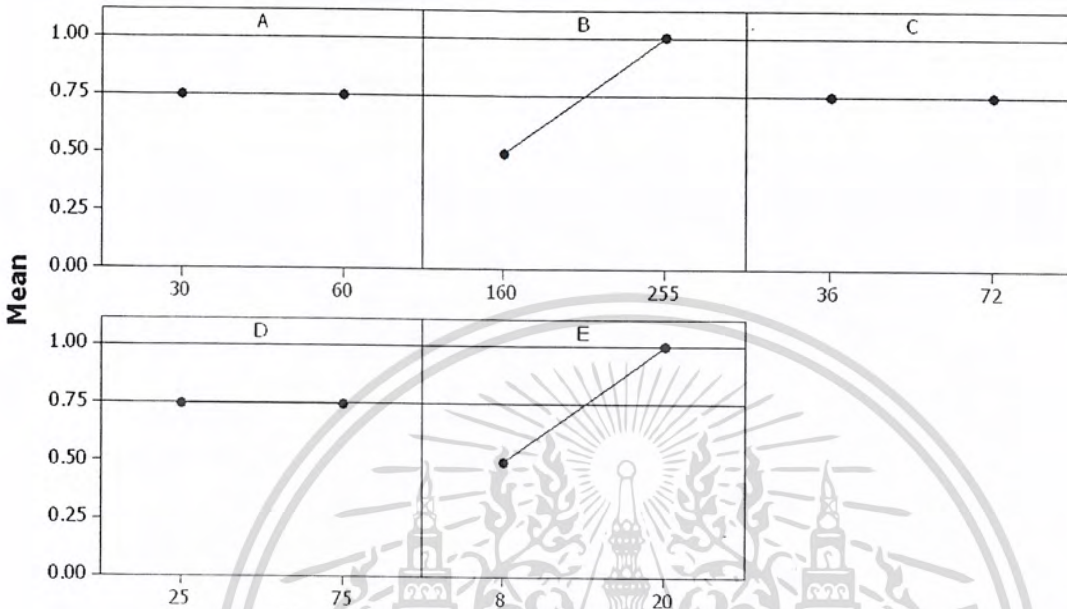
- ตำแหน่งกราฟอยู่ที่ 0 มีความหมายว่า ไม่มีชิ้นงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนด
- ตำแหน่งกราฟอยู่ที่ 0.25 มีความหมายว่า มีชิ้นงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนดร้อยละ 25
- ตำแหน่งกราฟอยู่ที่ 0.50 มีความหมายว่า มีชิ้นงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนดร้อยละ 50
- ตำแหน่งกราฟอยู่ที่ 0.75 มีความหมายว่า มีชิ้นงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนดร้อยละ 75
- ตำแหน่งกราฟอยู่ที่ 1 มีความหมายว่า มีชิ้นงานอยู่ในขอบเขตที่กำหนดทั้งหมด

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab สามารถวิเคราะห์ได้จาก Main Effects Plot และ Interaction Plot for Residual Stress ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.2.1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองโดยใช้ Main Effects Plot

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองโดยใช้ Main Effects Plot ถ้าเส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงมีความชันในเชิงบวก หมายความว่า ตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับการทดลอง ถ้ามีความชันในเชิงลบ หมายความว่า ตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับผลการทดลอง ค่าความชันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน หมายความว่า ตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กับผลการทดลองอย่างมาก ดังนั้นถ้าเส้นเกือบเป็นแนวระดับหรือเป็นแนวระดับ หมายความว่า ตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กับผลการทดลองน้อยมาก โดยผลการทดลองหรือตัวแปรตอบสนองซึ่งในงานวิจัยคือ การฉีดเต็มแบบของชิ้นงาน รอยยวบ (Sink Mark) การโก่งตัว (Warpage) การหดตัว (Shrinkage) และค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงาน (Residual stress at first) ถ้าเส้นกราฟมีความชันในเชิงลบ หมายความว่าตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับการทดลอง ค่าความชันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน หมายความว่าตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กับผลการทดลองอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.1

Main Effects Plot for full short
Data Means

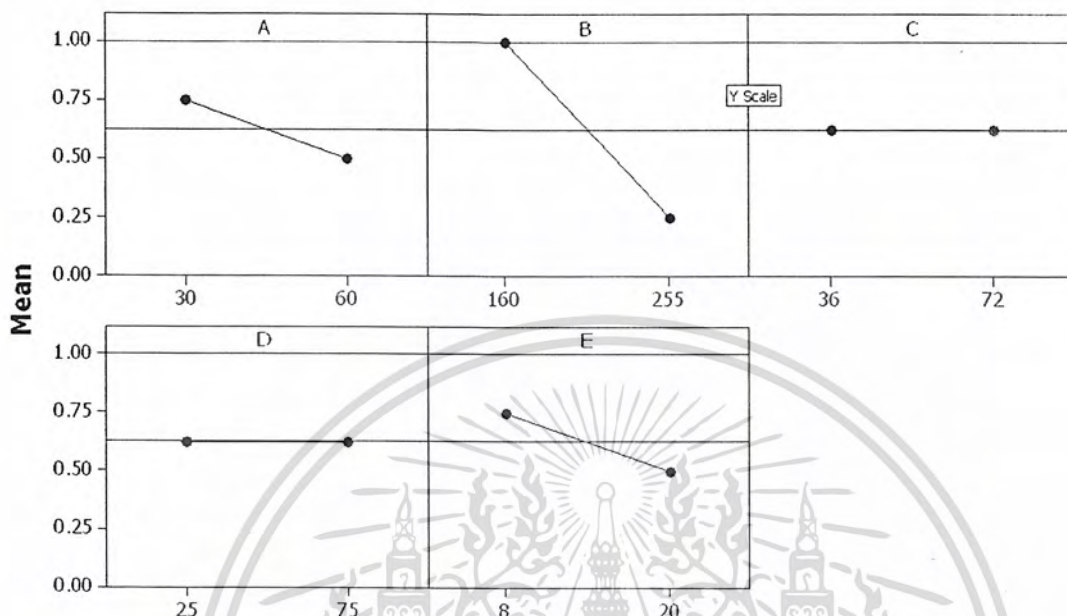


รูปที่ 4.1 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการฉีดชิ้นงานไม่เต็มแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.1 เส้นกราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว (B) และความเร็วในการฉีด (E) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงบวกอย่างชัดเจนกับการฉีดชิ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วในการฉีดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการฉีดชิ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วในการฉีดสูง จะช่วยให้น้ำพลาสติกเหลวฉีดได้เต็มแบบมากขึ้น และจากเส้นกราฟของอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) ความดันฉีด (C) และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (D) เป็นเส้นที่ไม่มี ความชันกับการฉีดชิ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีด และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในขอบเขตที่กำหนดไม่ส่งผลกับการฉีดชิ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

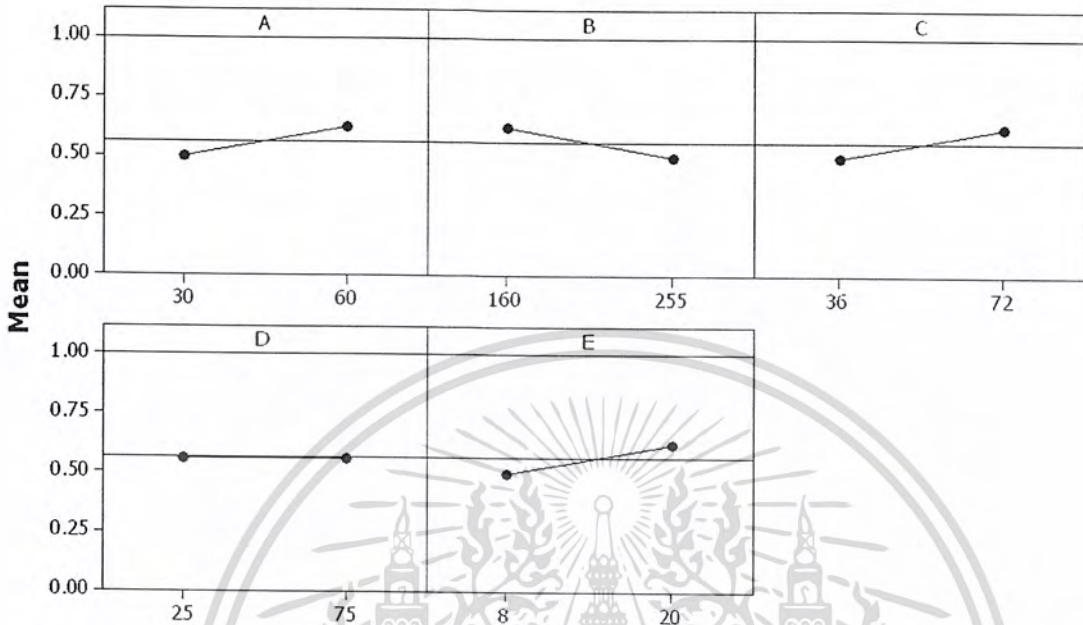
Main Effects Plot for sink mark Data Means



รูปที่ 4.2 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดรอยยุบในชิ้นงาน
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.2 เส้นกราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว (B) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงลบอย่างชัดเจนกับการเกิดรอยยุบในชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการเกิดรอยยุบในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวดำ การเกิดรอยยุบในชิ้นงานจะน้อยลง สำหรับกราฟของอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) และความเร็วในการฉีด (E) มีความชันในเชิงลบ แต่มีนัยสำคัญน้อยกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว และจากเส้นกราฟของความดันฉีด (C) และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (D) เป็นเส้นที่ไม่มี ความชันกับการเกิดรอยยุบของชิ้นงาน หมายความว่า ความดันฉีด และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในขอบเขตที่กำหนดไม่ส่งผลกับการเกิดรอยยุบของชิ้นงาน

Main Effects Plot for warpage Data Means

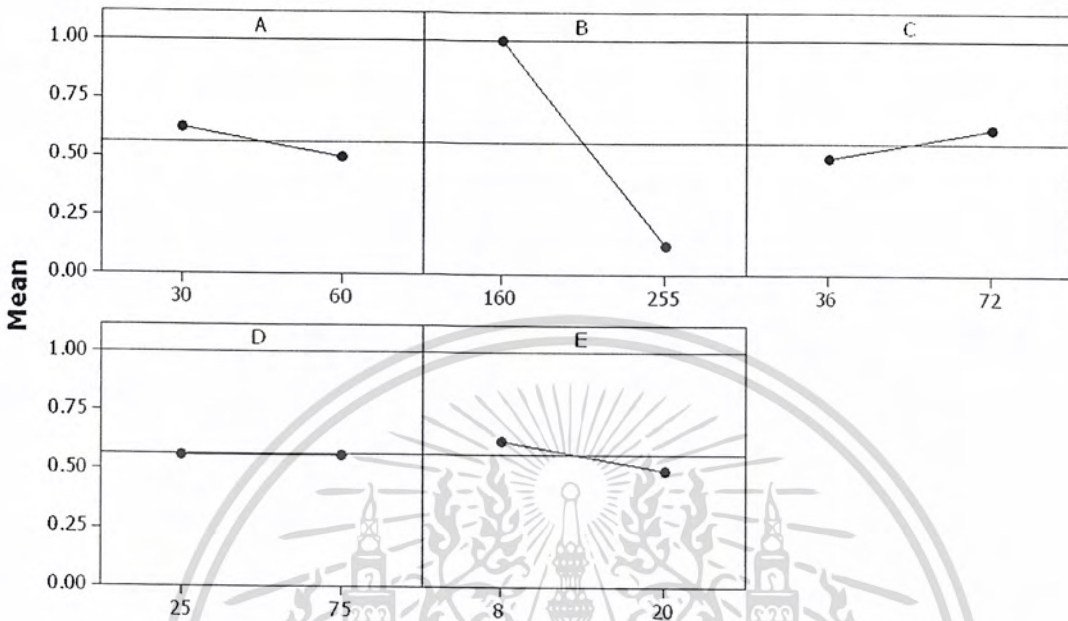


รูปที่ 4.3 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดการ โกงตัวในชิ้นงาน
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.3 เส้นกราฟของเส้นกราฟของอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) ความดันฉีด (C) และความเร็วในการฉีด (E) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงบวกอย่างชัดเจนกับการเกิดการ โกงตัวของชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีดและความเร็วในการฉีดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการเกิดการ โกงตัวของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีดและความเร็วในการฉีดสูง การ โกงตัวของชิ้นงานจะน้อยลง เส้นกราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว (B) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงลบอย่างชัดเจนกับการเกิดการ โกงตัวในชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการเกิดการ โกงตัวในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวลด การเกิดการ โกงตัวในชิ้นงานจะน้อยลง และจากเส้นกราฟของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (D) เป็นเส้นที่ไม่มี ความชันกับการเกิดการ โกงตัวของชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในขอบเขตที่กำหนดไม่ส่งผลกับการเกิดรอยยุบของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main Effects Plot for shrinkage Data Means

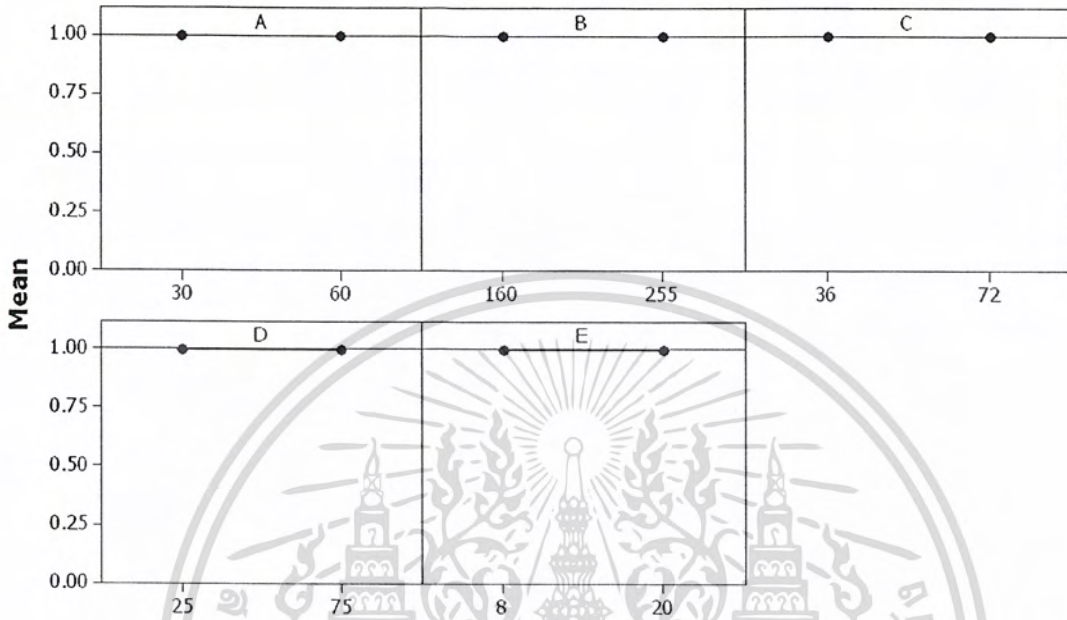


รูปที่ 4.4 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวในชิ้นงาน
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.4 เส้นกราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว (B) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงลบอย่างชัดเจนกับการเกิดการหดตัวในชิ้นงาน หมายความว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการเกิดการหดตัวในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวลดต่ำ การเกิดการหดตัวในชิ้นงานจะน้อยลง สำหรับกราฟของอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) และความเร็วในการฉีด (E) มีความชันในเชิงลบ แต่มีนัยสำคัญน้อยกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว เช่นเดียวกับกราฟของความดันฉีด (C) เป็นเส้นที่มีความชันในเชิงบวกแต่ไม่มากนัก และจากเส้นกราฟของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (D) เป็นเส้นที่ไม่มีความชันกับการเกิดการหดตัวของชิ้นงานหมายความว่า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในขอบเขตที่กำหนดไม่ส่งผลกับการเกิดการหดตัวของชิ้นงาน

Main Effects Plot for residual stress

Data Means

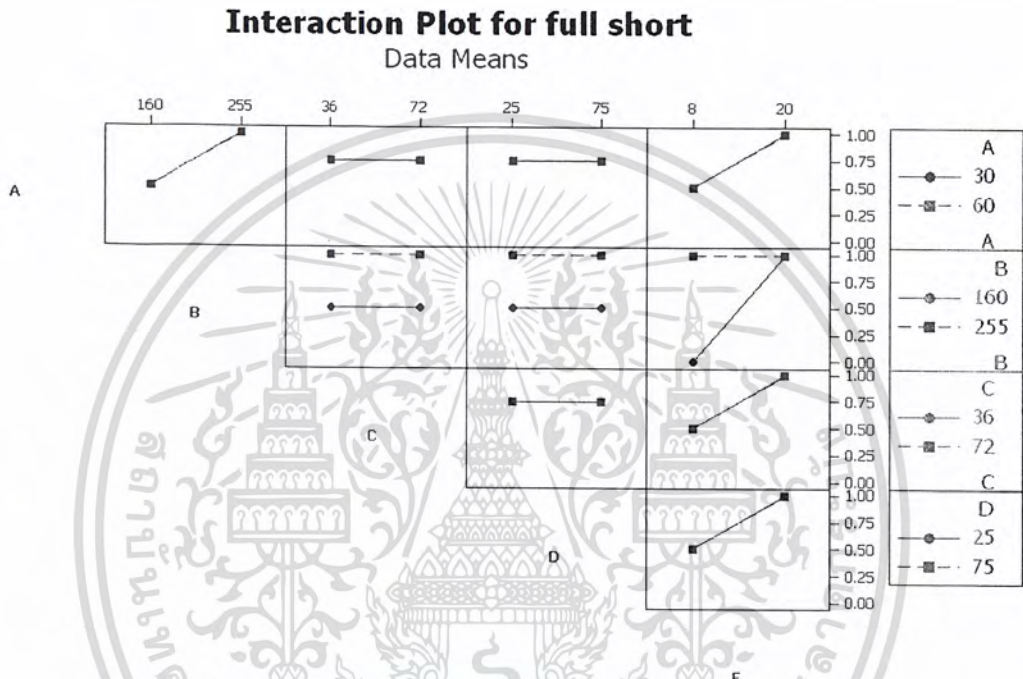


รูปที่ 4.5 Main Effects Plot ของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.5 เส้นกราฟของอุณหภูมิแม่พิมพ์ (A) อุณหภูมิการหลอมเหลว (B) ความดันฉีด (C) อุณหภูมิหล่อเย็น (D) และความเร็วในการฉีด (E) เป็นเส้นที่ไม่มี ความชันกับการเกิด ความเค้นตกค้างในชิ้นงานหมายความว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความดันฉีด อุณหภูมิหล่อเย็น และความเร็วในการฉีดในขอบเขตที่กำหนดไม่ส่งผลกับการเกิด ความเค้นตกค้างในชิ้นงาน

4.2.2. การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรโดยใช้ Interaction Plot

การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรด้วย Interaction Plot เป็นการวิเคราะห์ว่าตัวแปรแต่ละตัวมีอันตรกิริยาระหว่างกันหรือไม่ ถ้าเส้นทึบกับเส้นประตัดกันหมายความว่าตัวแปรทั้งสองมีอันตรกิริยาระหว่างกัน แต่ถ้าเส้นทั้งสองขนานกันหมายความว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน การตัดกันเป็นมุมกว้างและเห็นชัดเจนแสดงว่าตัวแปรมีอันตรกิริยาระหว่างกันมาก



รูปที่ 4.6 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการฉีดขึ้นงาน ไม่เต็มแบบ ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.6 พบว่ามีการเกิด Interaction กันของเส้นทึบและเส้นประอย่างเห็นได้ชัดจำนวน 1 ช่อง ดังนั้นตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน คือ

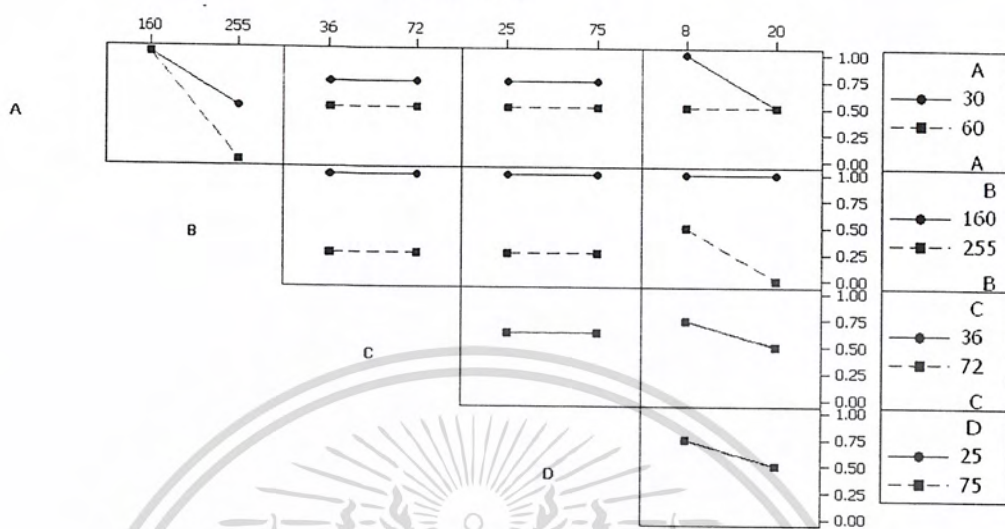
- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วการฉีด (BE)

ตัวอย่างการอ่านค่าตัวแปรระหว่างอุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วการฉีดตำแหน่งซ้ายและขวาของเส้นทึบ แสดงค่าการการฉีดขึ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน ที่ความเร็วในการฉีด 8 มิลลิเมตรต่อวินาที และ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส สำหรับตำแหน่งซ้ายและขวาของเส้นประแสดงค่าการการฉีดขึ้นรูปเต็มแบบของชิ้นงาน ที่ความเร็วในการฉีด 8 มิลลิเมตรต่อวินาที และ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 255 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interaction Plot for sink mark

Data Means



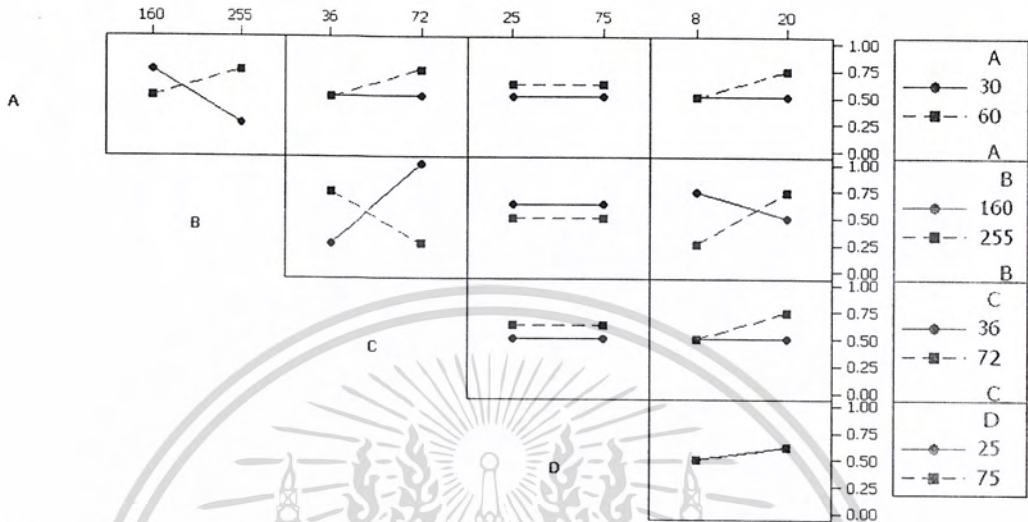
รูปที่ 4.7 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆในการเกิดรอยยุบ
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.7 พบว่ามีการเกิด Interaction กันของเส้นทึบและเส้นประอย่างเห็นได้ชัดจำนวน 1 ช่อง ดังนั้นตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน คือ

- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วในการฉีด (BE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interaction Plot for warpage Data Means



รูปที่ 4.8 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในการเกิดการโค้งตัว
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

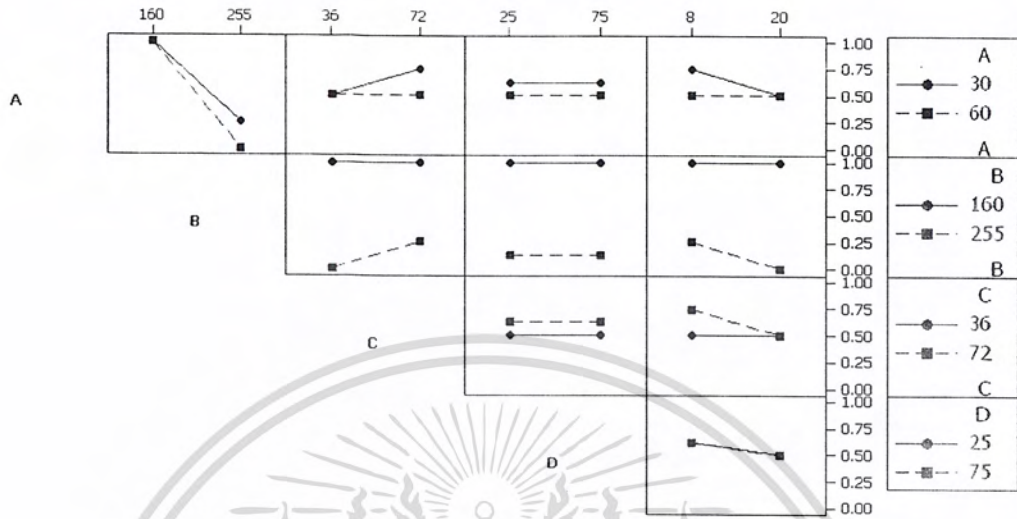
จากรูปที่ 4.8 พบว่ามีการเกิด Interaction กันของเส้นทึบและเส้นประอย่างเห็นได้ชัดจำนวน 3 ช่อง ดังนั้นตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน คือ

- อุณหภูมิแม่พิมพ์และอุณหภูมิการหลอมเหลว (AB)
- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความดันฉีด (BC)
- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วในการฉีด (BE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interaction Plot for shrinkage

Data Means



รูปที่ 4.9 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในการเกิดการหดตัว
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

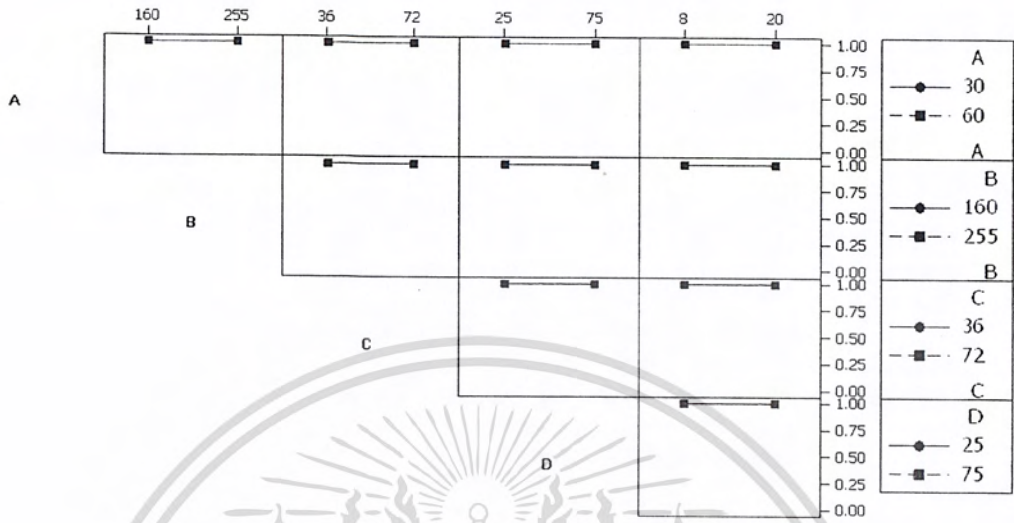
จากรูปที่ 4.9 พบว่ามีการเกิด Interaction กันของเส้นทึบและเส้นประอย่างเห็นได้ชัดจำนวน 2 ช่อง ดังนั้นตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน คือ

- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความดันฉีด (BC)
- อุณหภูมิการหลอมเหลวและความเร็วในการฉีด (BE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interaction Plot for residual stress

Data Means



รูปที่ 4.10 Interaction Plot ระหว่างตัวแปรต่างๆในการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.10 พบว่าไม่มีการตัดกันของเส้นทึบและเส้นประเลย ดังนั้นจึงไม่มีตัวแปรใดที่มีอันตรกิริยาต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการวิเคราะห์ Main Effects Plot

ข้อบกพร่อง \ ปัจจัย	Full Short	Sink mark	Warpage	Shrinkage	Residual Stress
Mold					
30					
60			✓		
Melt					
160		✓	✓	✓	
255	✓				
Speed					
8					
20	✓		✓		
Pack					
36					
72			✓		

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำผลการวิเคราะห์จาก Main Effects Plot และ Interaction Plot ร่วมกัน โดยกำหนดระดับความสำคัญของผลตอบสนอง ดังต่อไปนี้

1. การฉีดเต็มแบบ (Full Short)
2. การโค้งตัว (Warpage)
3. การหดตัว (Shrinkage)
4. รอยยุบ (Sink Mark)
5. ความเค้นตกค้างในชิ้นงาน (Residual Stress at first)

เมื่อทำการวิเคราะห์จาก Main Effects Plot และ Interaction Plot ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที และความดันฉีด 72 เมกกะปาสกาล ซึ่งอุณหภูมินี้หล่อเย็นมีค่าได้ทั้ง 25 องศาเซลเซียสหรือ 75 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องของชิ้นงานภายในขอบเขตที่กำหนด แต่ในความเป็นจริงนั้นการใช้อุณหภูมินี้หล่อเย็นที่ 75 องศาเซลเซียส จะสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่าน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส และสำหรับรอบการผลิตของแต่ละการทดลองนั้นจะอยู่ที่ 9 – 10 วินาที

ดังนั้นจากสรุปผลการทดลองพบว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปฝาขวดน้ำพลาสติกแบบเกลียวที่วิเคราะห์ได้ตรงกับลำดับการทดลองที่ 27 ในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลของการทดลองในลำดับดังกล่าวอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปของการดำเนินงานของโครงการในครั้งนี้ และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อให้เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่นำหัวข้อนี้ไปศึกษาต่อในอนาคตหรือนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงต่อไป

5.1. บทสรุป

ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีทาง CAD/CAM/CAE ได้เข้ามามีบทบาทต่อกระบวนการฉีดพลาสติก ซึ่งเห็นได้จากการทดลองดังกล่าวจะช่วยในการออกแบบ และการวิเคราะห์ชิ้นงานก่อนที่จะทำการผลิตจริง โดยในอดีตจะอาศัยความชำนาญและออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ของช่างฉีดพลาสติก

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^5 หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับสูง ระดับต่ำ ในการศึกษาครั้งนี้มีการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวรวมทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีดอัด อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และความเร็วในการฉีด ทำให้ได้รูปแบบของการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 32 ครั้งเพราะฉะนั้นจำนวนการทดลองเท่ากับ $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ เท่ากับ 32 การทดลอง

Moldflow เป็นซอฟต์แวร์ทางด้าน CAE โดย Moldflow จะใช้วิธี Finite Element ในการคำนวณเพื่อจำลองภาพการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้เทคโนโลยี Dual Domain ซึ่งเป็นการแทนชิ้นงาน 3มิติด้วยโมเดล Mesh ผิวปิดที่สร้างจากผิวนอกของชิ้นงานที่นำเข้ามาจากไฟล์ CAD ทั่วไป ทำให้สามารถวิเคราะห์โมเดลผิวปิดของ CAD ได้โดยตรง ช่วยลดเวลาในการเตรียมโมเดลได้อย่างมาก ผู้ใช้จึงสามารถวิเคราะห์งานได้มากกว่า และสามารถวิเคราะห์งานในเชิงลึกได้มากขึ้น โปรแกรมนี้จะช่วยให้ออกแบบและวิเคราะห์ได้รวดเร็วก่อนที่จะนำไปทำการฉีดจริง จากพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ทำการศึกษาและแก้ไข สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นให้ดีขึ้นได้ จึงกล่าวได้ว่าโปรแกรมMoldflow สามารถหาสถานะเงื่อนไขในการฉีดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการได้ แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการฉีดขึ้นรูปฝาพลาสติกแบบเกลียวได้จริง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแทป หลังจากออกแบบการทดลองและทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ และเก็บรวบรวมข้อมูลของผลการทดลองที่ได้จากแต่ละแบบการทดลอง บันทึกข้อมูลของผลการทดลองในโปรแกรมมินิแทปโดยใช้ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองโดยใช้ Main Effects Plot และการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรด้วย Interaction Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกแบบเกลียว คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันฉีด 72 เมกกะปาสกาล และอุณหภูมินำหล่อเย็นมีค่า 25 องศาเซลเซียส เมื่อตั้งค่าปัจจัยในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกแบบเกลียว ดังกล่าว ชิ้นงานจะไม่ปรากฏปัญหา การฉีดไม่เต็มแบบ การโค้งตัว การหดตัว รอยยุบ และความเค้นตกค้างในชิ้นงาน

ผลจากการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ทาง CAD/CAM/CAE สามารถเป็นแนวทางในการตัดสินใจที่จะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการผลิตชิ้นงานได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซอฟต์แวร์ทาง CAD/CAM/CAE นั้นจะต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญสูง จึงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2. ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกชิ้นงานเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา ควรเลือกชิ้นงานที่เกิดปัญหาจริงในอุตสาหกรรม และกำหนดลักษณะของปัญหาและวิธีแก้ไขให้ชัดเจน
2. เนื่องจากชิ้นงานมีความซับซ้อนจึงไม่สามารถสร้าง Model ในโปรแกรม Moldflow ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ซอฟต์แวร์ด้าน CAD คือ Solidwork สร้าง Model ชิ้นงานขึ้นมาก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ใน โปรแกรม Moldflow
3. การทำการ Meshing หรือการแบ่งกริดเพื่อกำหนด Node และ Element บน Model ชิ้นงานควรใช้ค่า อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวหรือเรียกว่า (Aspect Ratio) ของ Element ชนิด Dual Domain รูปร่างสามเหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 6 เนื่องจากต้องการกำหนดขนาดของ Element ไม่ให้มีความแตกต่างกันมากนักทั้งชิ้นงานเพื่อผลการทำนายที่แม่นยำเพราะเราจะใช้ Node ตรงกลาง Element ในการทำไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาการกระจายตัวของความเค้นและอุณหภูมิ เป็นต้น
4. ก่อนทำการทดลองทุกครั้งควรใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่โปรแกรมต้องการให้ครบ โดยอ้างอิงความเป็นไปได้กับชิ้นงานจริง เพื่อป้องกันความผิดพลาดของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม Moldflow
5. การเลือกวัสดุที่จะใช้ในการทำนายผลจากโปรแกรม ในฐานะข้อมูลควรเลือกให้ตรงกับที่ใช้ในการทดลองจริง หรือให้มีคุณสมบัติของวัสดุที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะคุณสมบัติบางตัวมีผลกับการวิเคราะห์มาก เช่น ค่าความเหนียว ค่าความจุความร้อน ค่าการขยายตัวของวัสดุ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] กานต์ดา บุญเดือน. (2552). เอสซีจี ไซวัน วัตกรรมฝาพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2552.
จาก <http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/it/innovation/20090813/เอสซีจีไซวันวัตกรรมฝาพลาสติก.html>
- [2] Heat and Cool (Steam) Moulding. (2552). Thai - German Institute. สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2552.
จาก <http://www.tgi.or.th/webboard/viewtopic.php?t=247>
- [3] Bioplastic เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. (2552). TICHE: The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2552.
จาก http://www.tiche.org/forum/forum_postpop.asp?AN=1&TID=254&PN=1&FID=3&TPN=1
- [4] กลุ่มโพลิเมอร์: Polymers. (2552). MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING. สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2552.
จาก <http://materiam.blogspot.com/2008/09/polymers.html>
- [5] อรุมา กอสนาน. (2553). พลาสติก. พลาสติกและกระบวนการผลิต. สืบค้นเมื่อ 31 มกราคม 2553.
จาก <http://www.course.eau.ac.th/course/Download/0110215/พลาสติก.doc>
- [6] โพลิเมอร์. (2550). คุณสมบัติของพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 31 มกราคม 2553. จาก
<http://www.industrial.cmru.ac.th/Civil/wechsawan/materials/ch08/ch08.htm>
- [7] ประเภทและคุณสมบัติของพลาสติก. (2553). Material Properties. สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2553.
จาก <http://www.designengineerlife.com/2010/plastic-properties-1/>
- [8] งานฉีดพลาสติก. (2551). ความรู้ทั่วไปงานพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2551.
จาก http://mold.net46.net/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=8
- [9] ส่วนต่างๆของเครื่องฉีด (Injection Molding Machine Units). (2552). องค์ประกอบในงานฉีดพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2553. จาก <http://www.meapim.pr.in.th/webpage/They%20Injection%20Mould/theyIM.html>
- [10] มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร. (2552). GREEN ENERGY NETWORK. สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2553.
จาก http://www.greenenergy.net/tec_High_Efficiency_Machine1.html
- [11] Lokensgard E. Industrial Plastic Theory and Application. 4th ed. Michigan: Ypsilanti.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] MR. SHIRO SUZUKI. (2534). เทคโนโลยีแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการออกแบบเชิงวิเคราะห์. (แปลจาก เอกสารประกอบคำบรรยาย โดย ดร.พศุ โลหารขุน และคณะ). กรุงเทพฯ: ภาพพิมพ์.
- [13] ชาลี ตระการกุล. (2542). การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก 1. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [14] พื้นฐานของเครื่องฉีดพลาสติก. (2550). งานฉีดพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 31 มกราคม 2553. จาก <http://www.plasticmart.co.th/images/1176038014/Intro-injection.pdf>
- [15] MR. KLAUS SCHULZ. (2534). แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก. (แปลจาก Plastic Injection Mould Design and Manufacture โดย วิวัฒน์ ตันติขจร โภสกล, และชัยรัตน์ แก้วด้วง). กรุงเทพฯ: ภาพพิมพ์.
- [16] อรรถพล สุชีวุฒิ. (2545). การประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [17] ภาณุวัฒน์ อำไพจิตต์, วิชัย สารรัตน์, และสุทัส เจลิมญาติ. (2547). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน เอสเคดี 11 ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] วิศิษฐ์ ชัยเทิดเกียรติ, อภิสิทธิ์ หัตถพร, และอุทัย รื่นญาติ. (2545). การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] อภินิษฐ์ สอนตระกูล. (2544). การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายนการหดตัวและการบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] เวอร์เนีย ดิจิตอล (Digital Caliper). (2553). โฮเทลมาร์ท. สืบค้นเมื่อ 1 มิถุนายน 2553. จาก http://www.hotelmarts.co.th/products.aspx?pro_id=253
- [21] เครื่องฉีดพลาสติก. (2553). MACHINERY EMPORIUM(1995) CO.,LTD. สืบค้นเมื่อ 29 มิถุนายน 2553. จาก <http://www.machinery.co.th/index.php?tpid=pro:ME-06-0248&pdn=%E0%A4%C3%D7%E8%CA%B5%D4%A1>
- [22] Ultra 350 Nozzle. (2550). HUSKY. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2553. จาก <http://www.husky.ca/hotrunners.aspx?tabid=754&tmid=753&id=305>

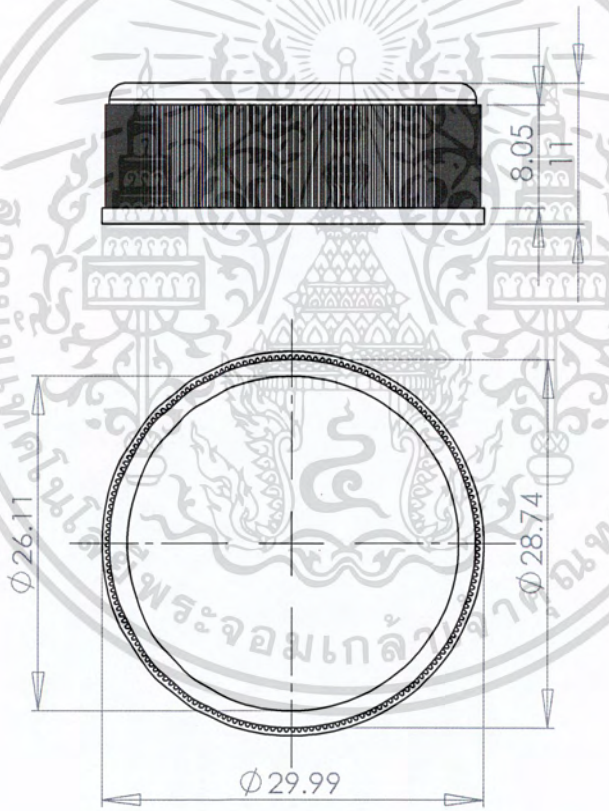
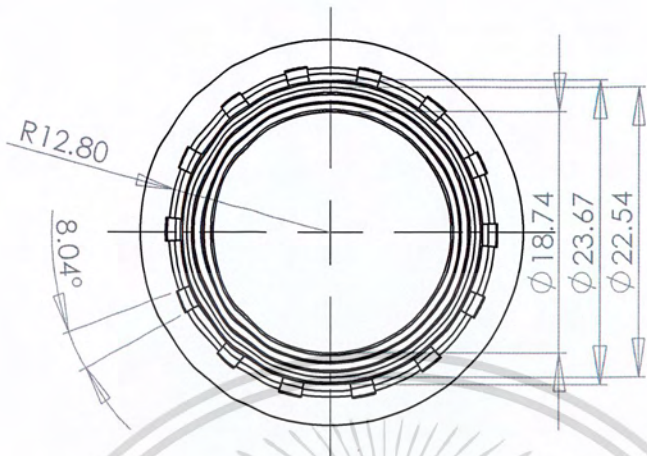
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ขนาดและรูปร่างของฝาขวดพลาสติกแบบเกลียวที่ใช้ในการทดลอง

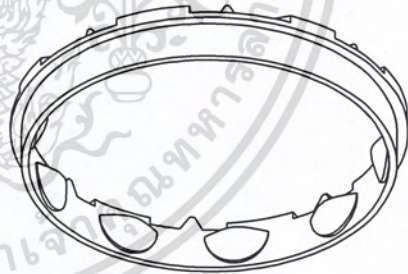
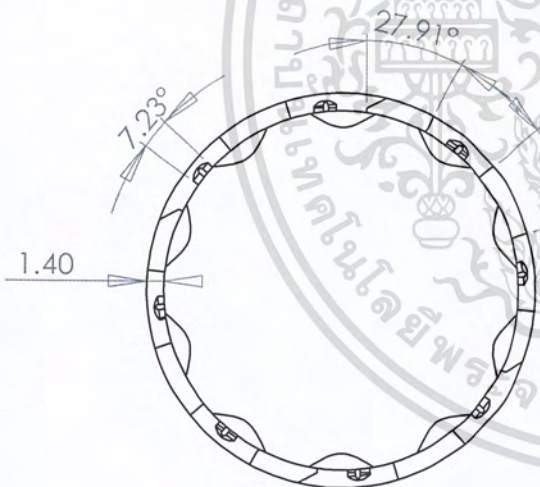
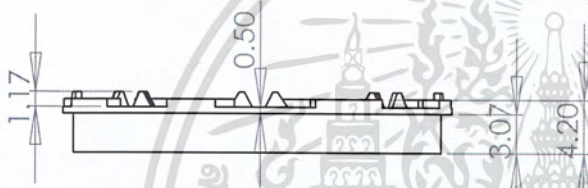
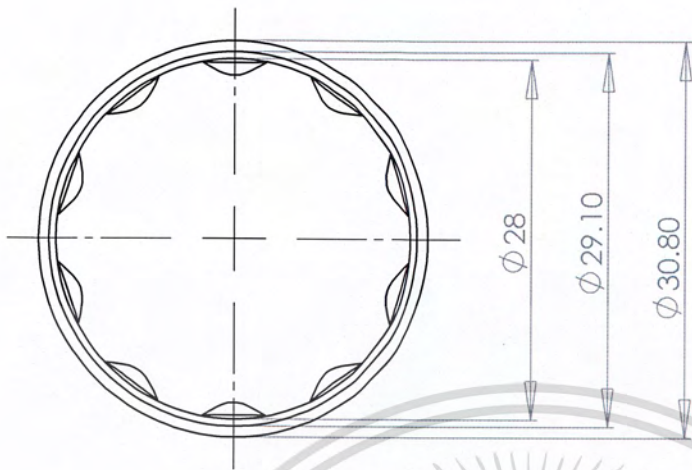
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผก1



		DIMENSIONS ARE IN INCHES		NAME	DATE
		TOLERANCES:		DRAWN	
		FRACTIONAL ±		CHECKED	
		ANGULAR: MACH ± BEND ±		ENG APPR.	
		TWO PLACE DECIMAL ±		MFG APPR.	
		THREE PLACE DECIMAL ±		Q.A.	
		MATERIAL		COMMENTS:	
NEXT ASSY	USED ON	FINISH		SIZE	DWG. NO.
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		A	ผาขวด
				SCALE:1:1	WBGHT:
				REV.	
				SHEET 1 OF 1	

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาก็และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



		DIMENSIONS ARE IN INCHES		NAME	DATE
		TOLERANCES:		DRAWN	
		FRACTIONAL \pm		CHECKED	
		ANGULAR: MACH \pm BEND \pm		ENG APPR.	
		TWO PLACE DECIMAL \pm		MFG APPR.	
		THREE PLACE DECIMAL \pm		Q.A.	
		MATERIAL		COMMENTS:	
NEXT ASSY	USED ON	FINISH			
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		SIZE	DWG. NO.
				A	แหวนรองฟ้า
				SCALE: 1:1	WEIGHT:
				REV.	
				SHEET 1 OF 1	

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EL-Lene™****H555J****Product Description**

EL-Lene H555J is a high density polyethylene resin with good environmental stress cracking resistance, good processing performance, organoleptic property. It is particularly designed for injection molding and extrusion compression molding of screw cap and closure.

Typical Application

- Cap and closure for beverage bottle
 - Stilled and mineral water
 - Juice

Product Characteristics

- Good environmental stress cracking resistance
- With slip agent for good opening torque
- Food contact applicable (complies with U.S FDA 21 CFR 177.1520, Standard European Economic Community 2002/72/EC Article 2)
- Organoleptic certified (TPF method)

Physical Properties

Property	Test Method	Value	Unit
Melt Flow Rate	ASTM D 1238 @ 190 °C, 2.16 kg	1.8	g/10 min
Density	ASTM D 1505	0.956	g/cm ³
Tensile Strength at Yield	ASTM D 638 @ Crosshead speed 50 mm/min	260	kg/cm ²
Tensile Strength at Break	ASTM D 638 @ Crosshead speed 50 mm/min	350	kg/cm ²
Elongation at Break	ASTM D 638 @ Crosshead speed 50 mm/min	1200	%
Flexural Modulus	ASTM D 790	11,000	kg/cm ²
Flexural Strength	ASTM D 790	330	kg/cm ²
Notched Izod Impact	ASTM D 256 @ 23 °C	8	kg.cm/cm
Hardness	ASTM D 2240	54	Shore D
ESCR	ASTM D 1693 @ 50 °C (Condition B, Compression Molded, 10% Igepal)	20	hrs, F ₅₀
Melting Point	ASTM D 2117	131	°C
Vicat Softening Point	ASTM D 1525	128	°C
Brittleness Temperature	ASTM D 746	< - 60	°C
% Shrinkage (2mm) MD	TPE Method	2.52	%
	TPF Method	2.33	%

Note : Conversion factor for changing unit from kg/cm² to MPa is divided by 10.20

Processing Techniques

The actual processing condition depends on each machine type, product size, mold design. Generally, melt temperature should be 200-240 deg.C for injection molding and 150-180 deg.C for extrusion compression molding. The exceed melt temperature than 250 deg.C might effect organoleptic property.

Product Technical Assistance

For technical assistance or further information on this product or any other SCG Chemicals' products contact your SCG Chemicals technical service at the address or telephone number as specified below.

Product Available Form

- Pellet

Product Packaging

- 25 kg loose bag
- 750 kg big bag
- Seabulk container

SCG Plastics Company Limited / SCG Performance Chemicals Company Limited

1 Siam Cement Road, Bangsue, Bangkok, 10800 Thailand.

Tel. +66 2506 4074 Fax +66 2566 5522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EL-Lene™

H555J

Storage

- Store in original container in tidy according to the manual of Handling and Storage from Thai Polyethylene Company Limited/ Thai Polypropylene Company Limited.
- Product(s) should be stored in dry and dust free location at temperature below 50°C and protected from direct sunlight and/or heat, well-ventilated area, away from incompatible materials and food and drink, as this may lead to quality deterioration, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.
- Keep container tightly closed and sealed until ready for use. Containers that have been opened must be carefully resealed and kept upright to prevent leakage. Do not store in unlabelled containers. Use appropriate containment to avoid environmental contamination.
- The storage area should be stable and not be slopped.

Safety

- The product is not classified as a hazardous material.
- Please see our Material Safety Data Sheet for details on various aspects of safety, recovery, and disposal of the products; for more information, contact your SCG Plastics/SCG Performance Chemicals technical service.

Recycling


- The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.
- Please see our Material Safety Data Sheet for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the products; for more information, contact your SCG Plastics/SCG Performance Chemicals technical service.

Related Documents

- The latest version of this document will be available at our website, www.chemicals.scg.co.th, or can be obtained from the SCG Plastics/SCG Performance Chemicals technical service.
- The following related documents are available on request, and represent various aspects on the usability, safety, recovery and disposal of the product.
 - Material Safety Data Sheet
 - Statement on compliance to food contact regulations

Disclaimer

- The product can be used only for the application as specified hereabove.
- To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.
- We make no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.
- It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.
- No liability can be accepted in respect of the use of our products in conjunction with other materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any third party materials.

EL-Lene™ EL-Pro™ EL-Wax™  are registered trademarks of SCG Chemicals, Thailand.

SCG Plastics Company Limited / SCG Performance Chemicals Company Limited

1 Siam Cement Road, Bangsue, Bangkok, 10800 Thailand.

Tel. +66 2586 4874 Fax +66 2586 5522

www.chemicals.scg.co.th

Page 2 of 2

Rev.2 Feb' 09 Valid until next revision

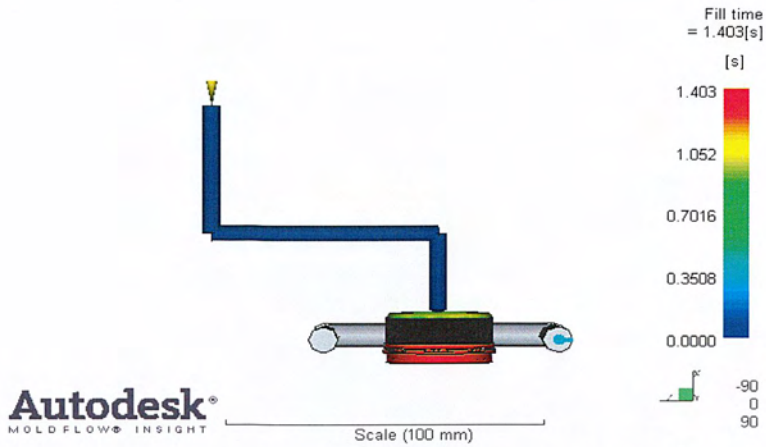
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



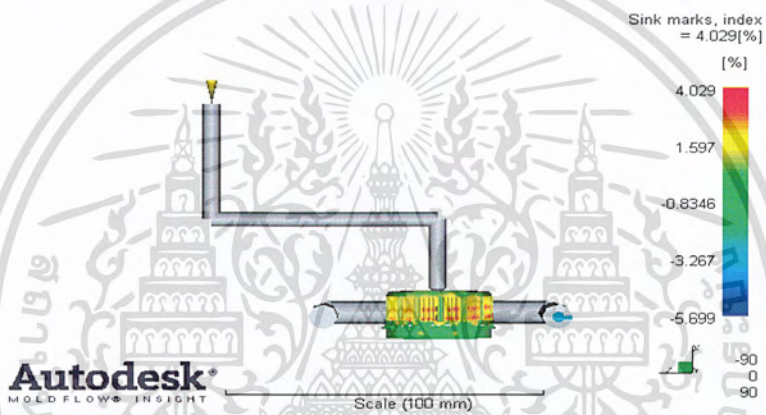
ภาคผนวก ก

ผลการทดลองจากโปรแกรม Moldflow

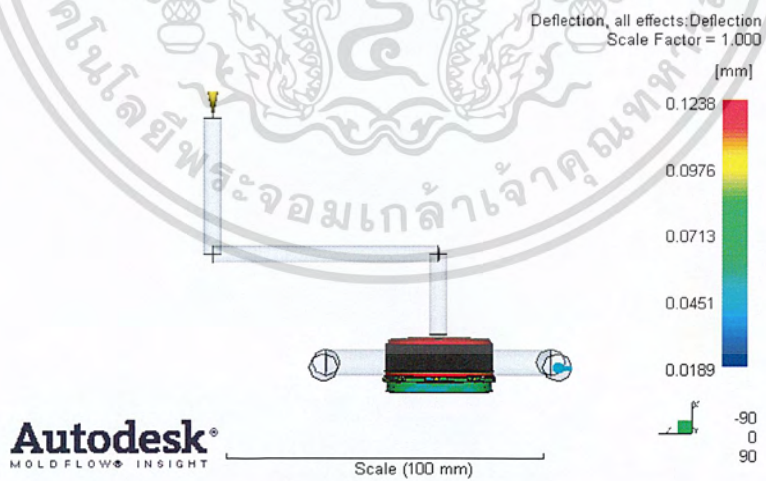
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 1 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 1



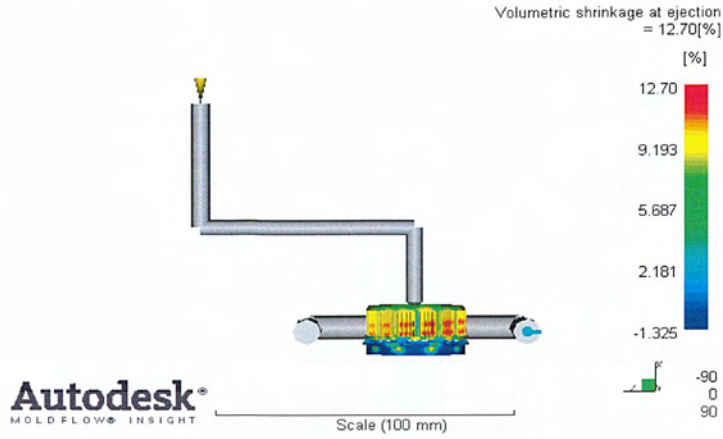
รูปที่ ผค 2 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 1



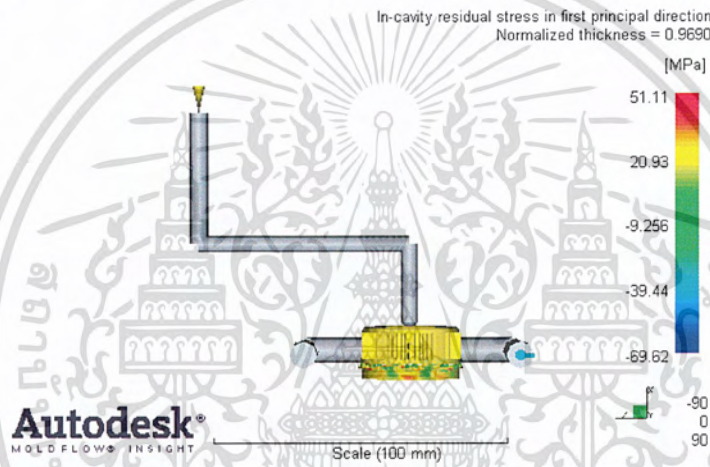
รูปที่ ผค 3 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 1

ผค2

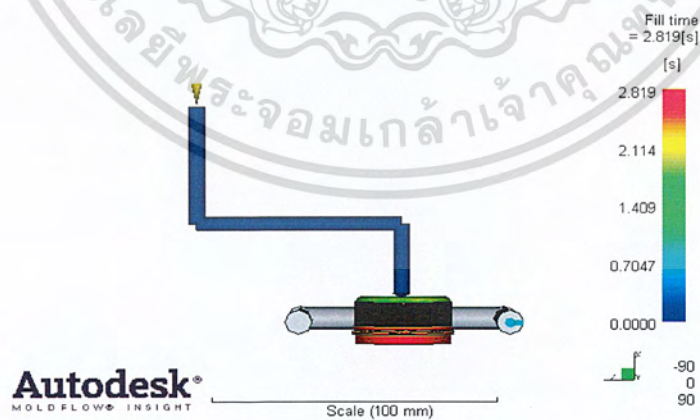
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 4 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานผ่าขวดพลาสติก ครั้งที่ 1



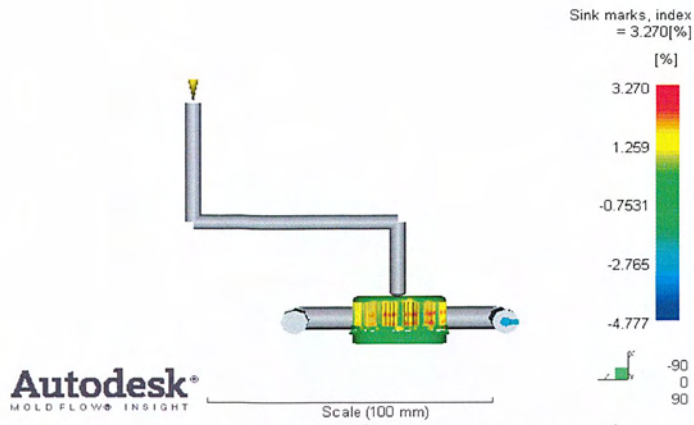
รูปที่ ผค 5 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานผ่าขวดพลาสติก ครั้งที่ 1



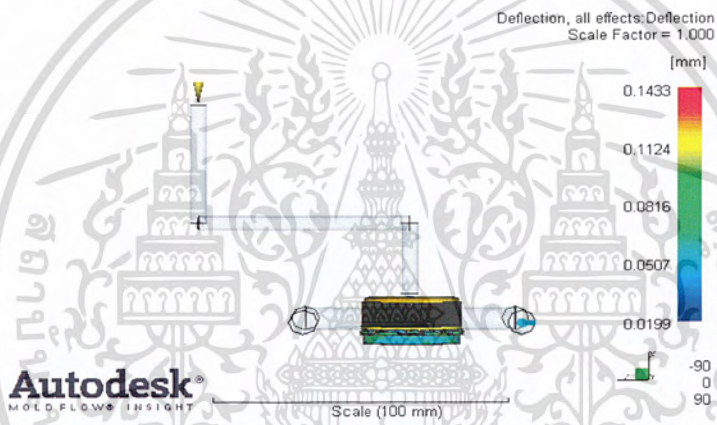
รูปที่ ผค 6 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานผ่าขวดพลาสติก ครั้งที่ 2

ผค3

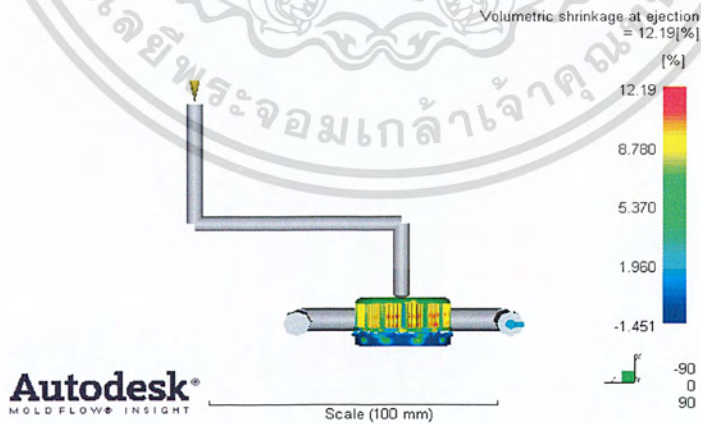
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 7 ผลการทดลองการขุดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 2



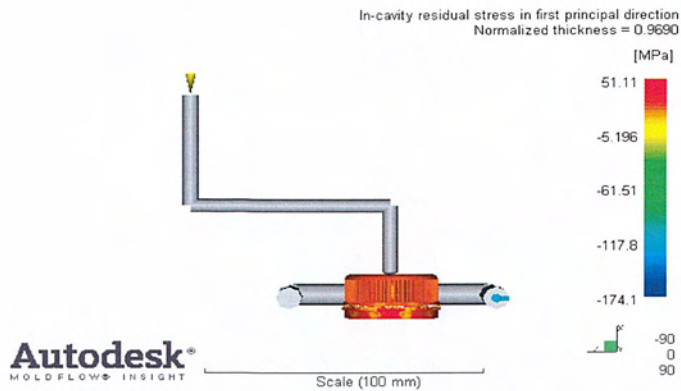
รูปที่ ผค 8 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 2



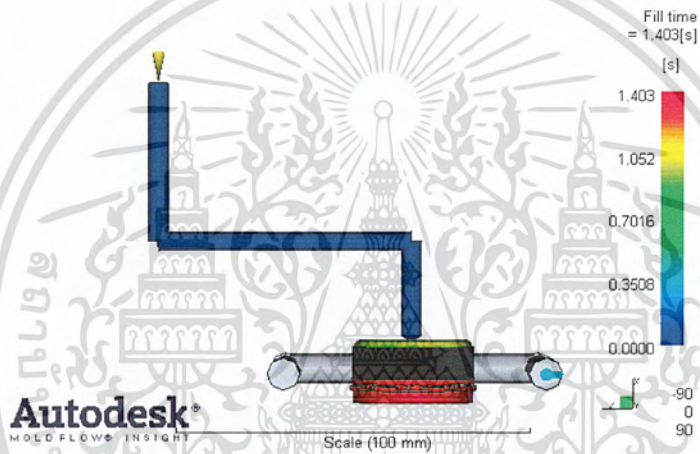
รูปที่ ผค 9 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 2

ผค4

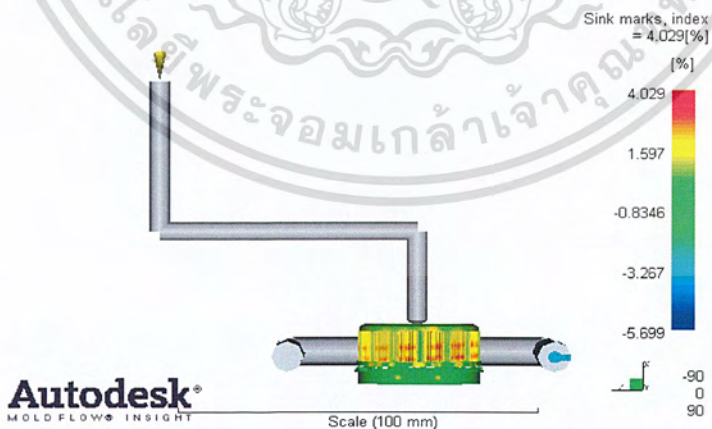
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 10 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 2



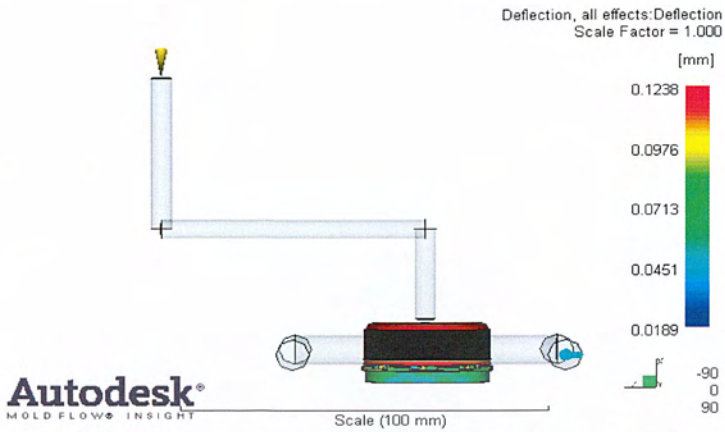
รูปที่ ผค 11 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 3



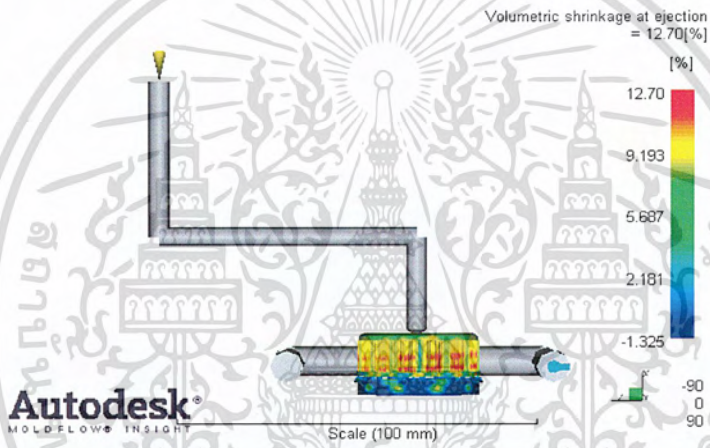
รูปที่ ผค 12 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 3

ผค5

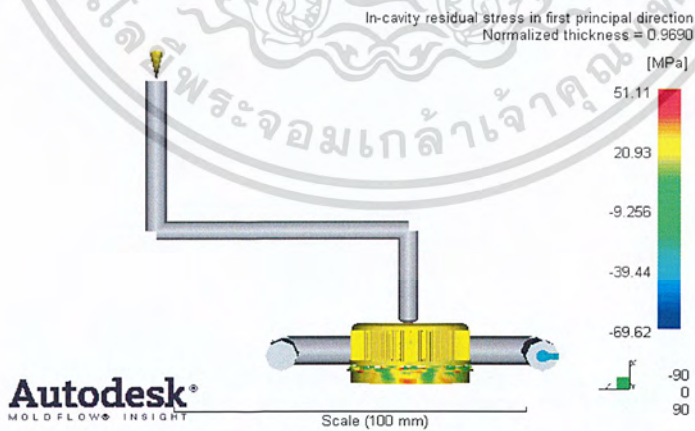
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 13 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 3



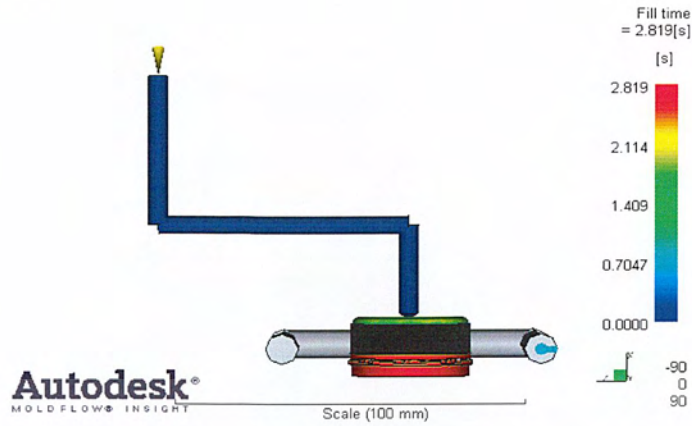
รูปที่ ผค 14 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 3



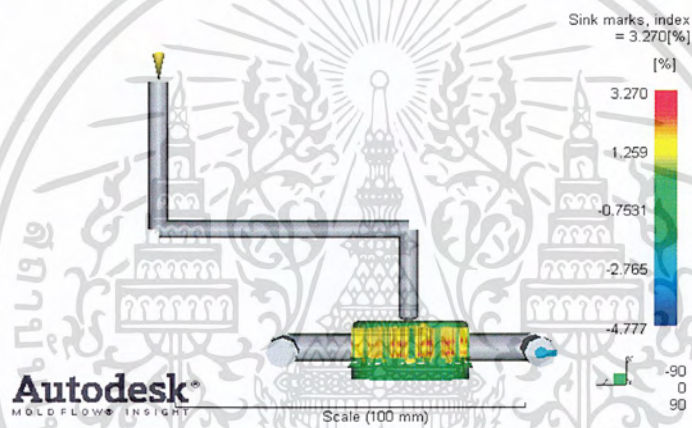
รูปที่ ผค 15 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 3

ผค6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 16 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 4



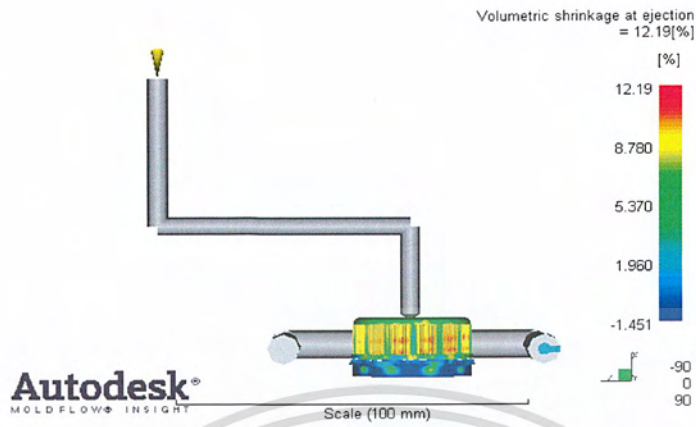
รูปที่ ผค 17 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 4



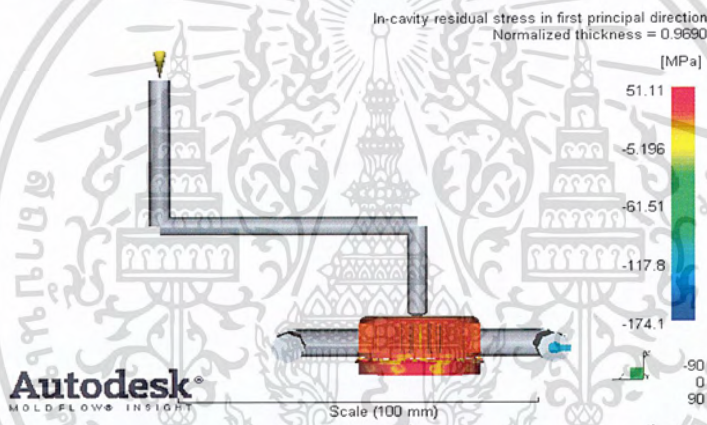
รูปที่ ผค 18 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 4

ผค7

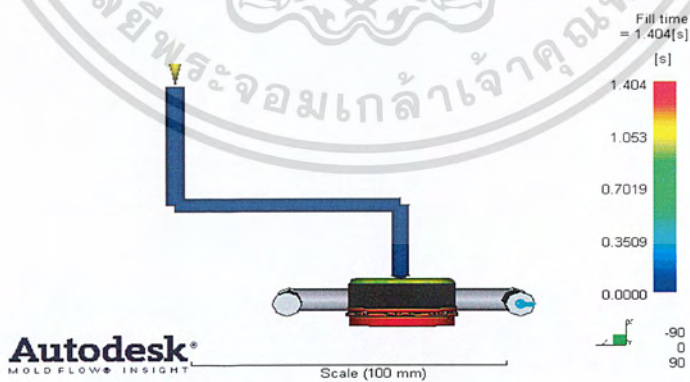
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 19 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 4



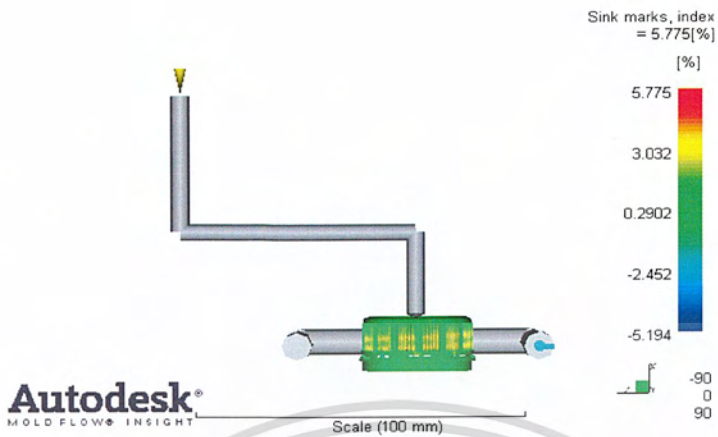
รูปที่ ผค 20 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 4



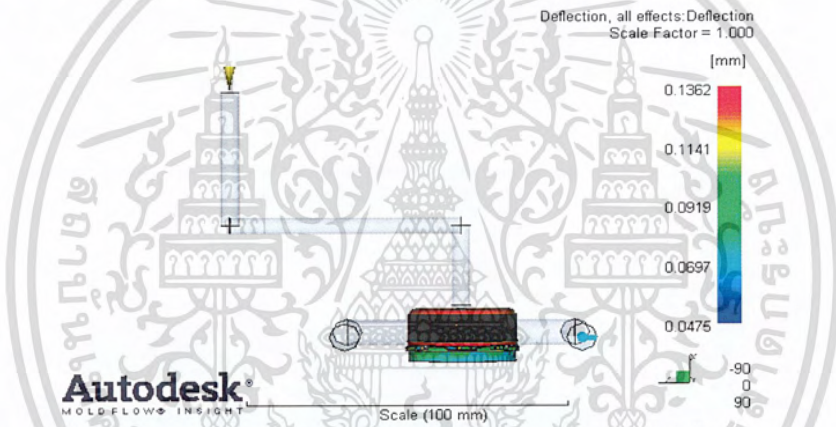
รูปที่ ผค 21 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 5

ผค8

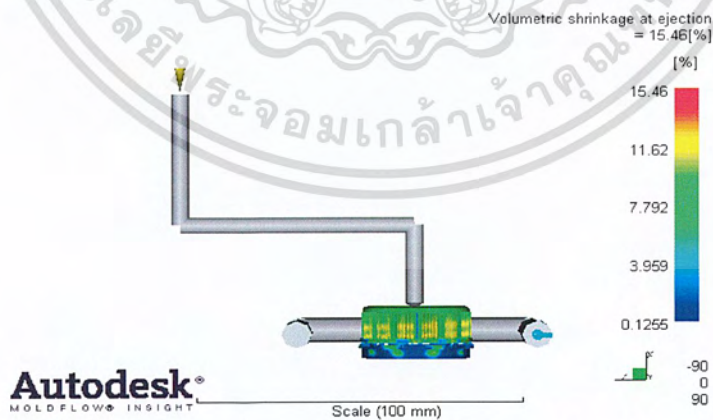
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



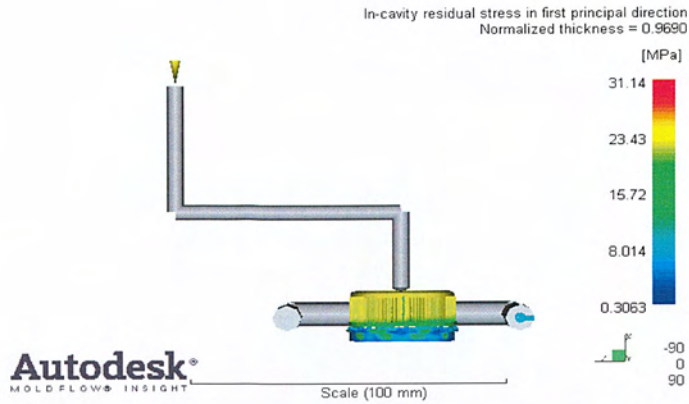
รูปที่ ผค 22 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 5



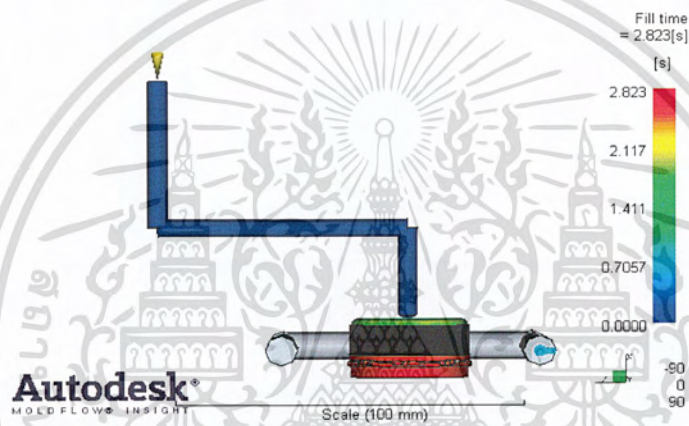
รูปที่ ผค 23 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 5



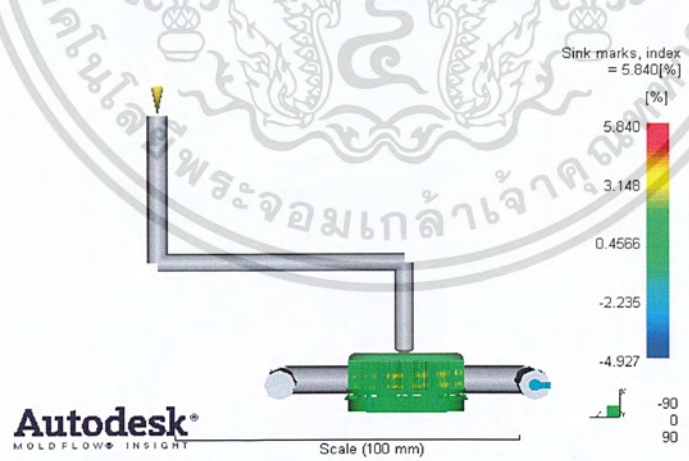
รูปที่ ผค 24 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 5



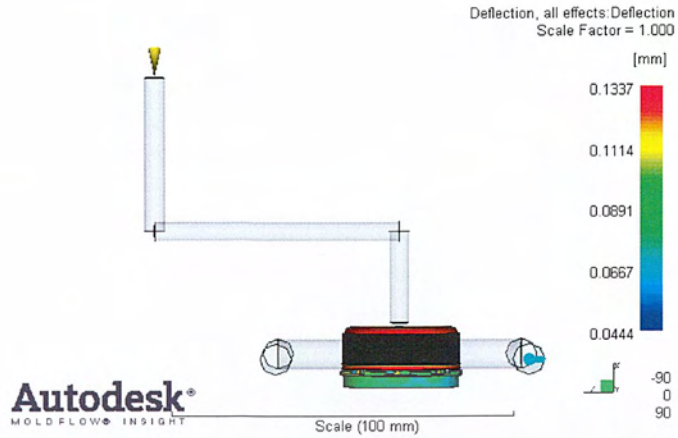
รูปที่ ผค 25 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 5



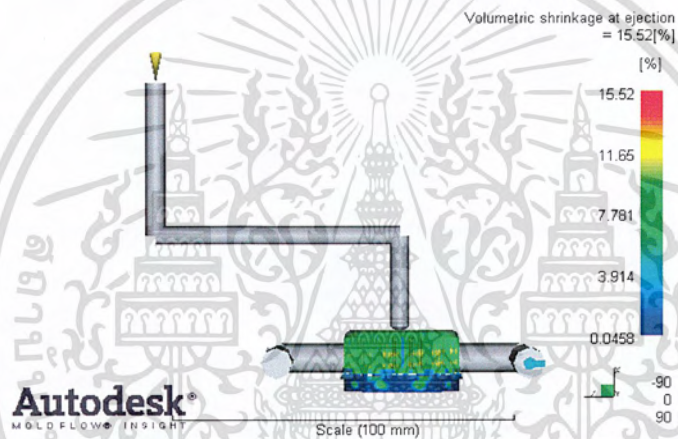
รูปที่ ผค 26 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 6



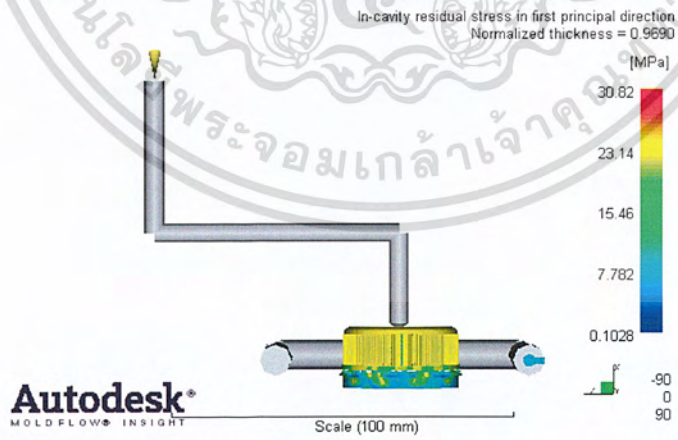
รูปที่ ผค 27 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 6



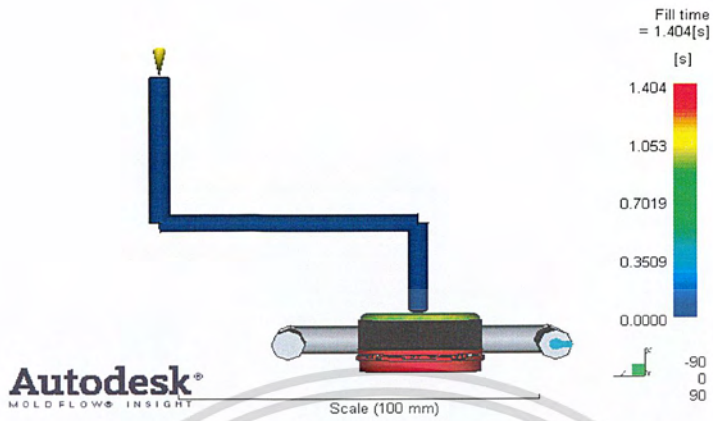
รูปที่ ผค 28 ผลการทดลองการ โค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 6



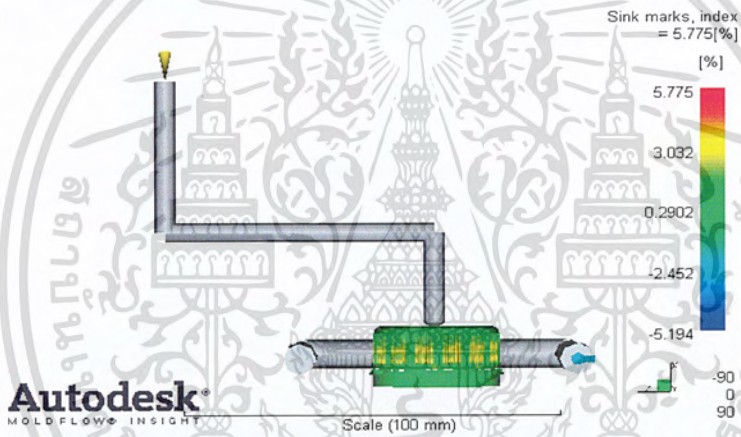
รูปที่ ผค 29 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 6



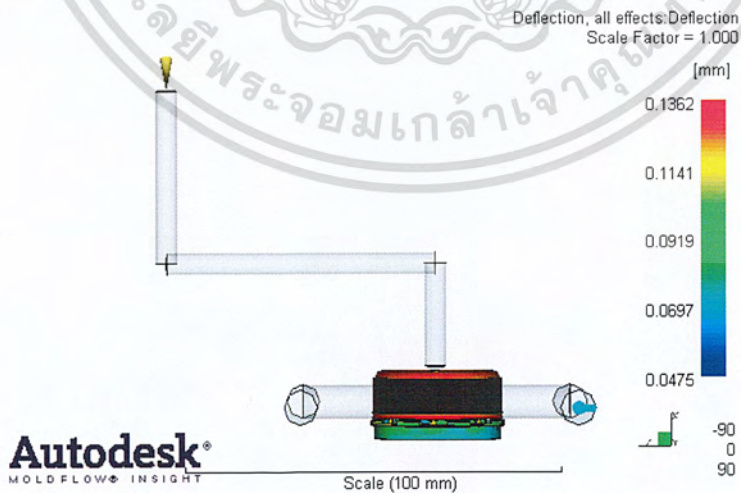
รูปที่ ผค 30 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 6



รูปที่ ผค 31 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 7



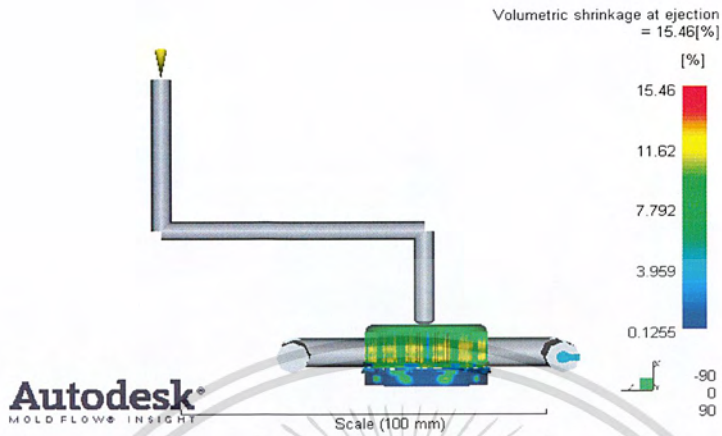
รูปที่ ผค 32 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 7



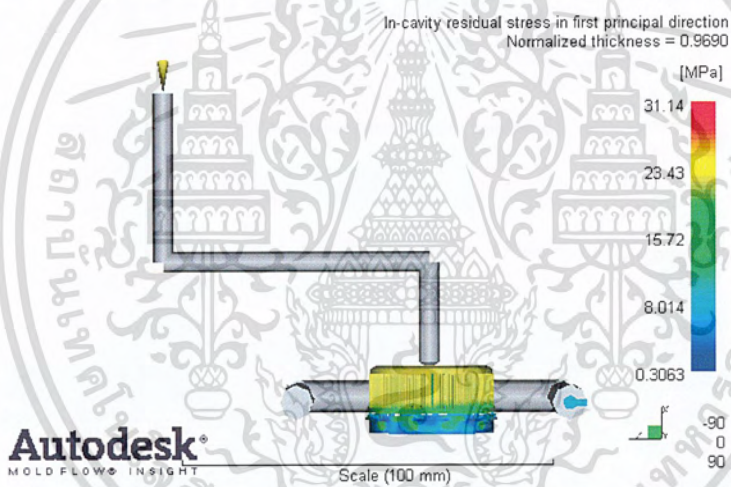
รูปที่ ผค 33 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 7

ผค12

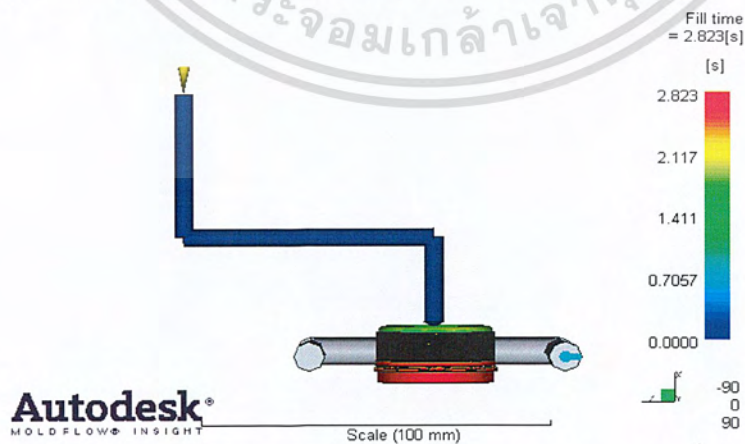
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 34 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 7



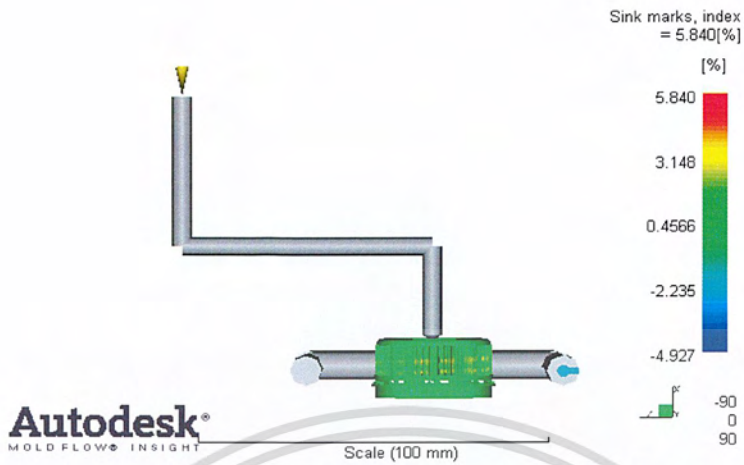
รูปที่ ผค 35 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 7



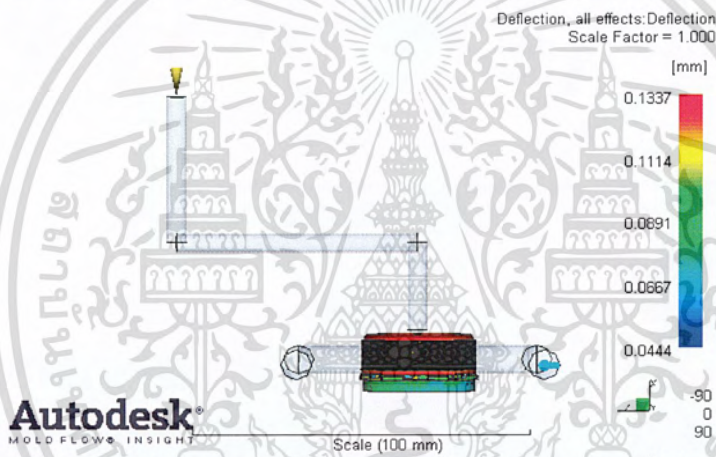
รูปที่ ผค 36 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 8

ผค13

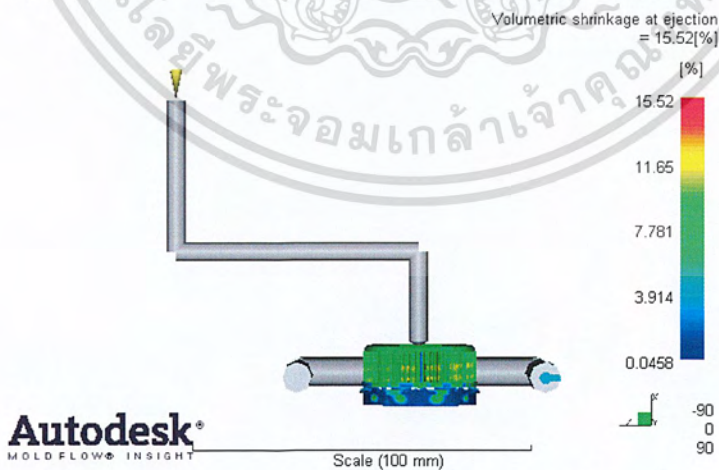
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



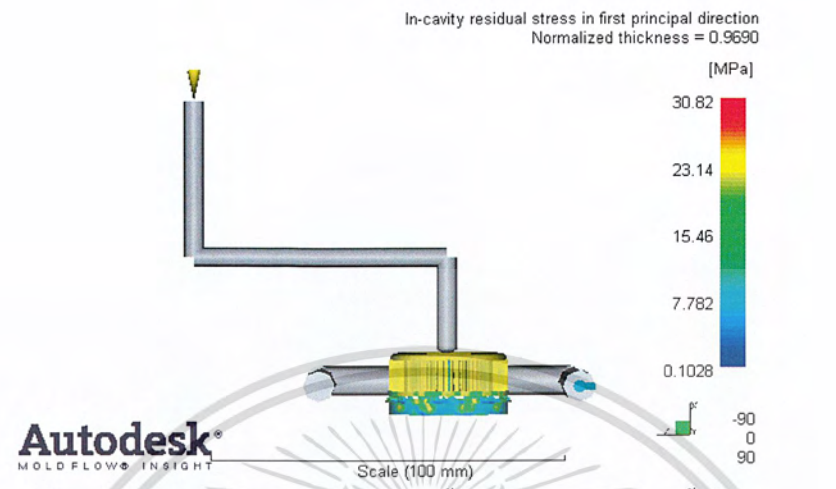
รูปที่ ผค 37 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 8



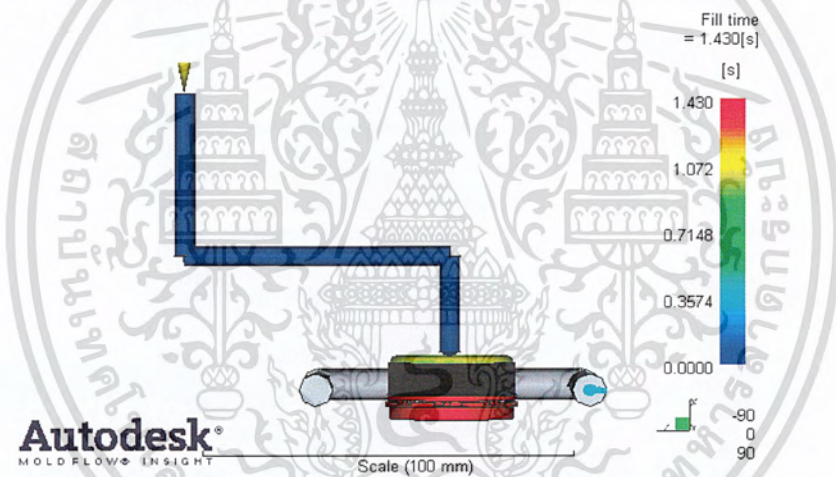
รูปที่ ผค 38 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 8



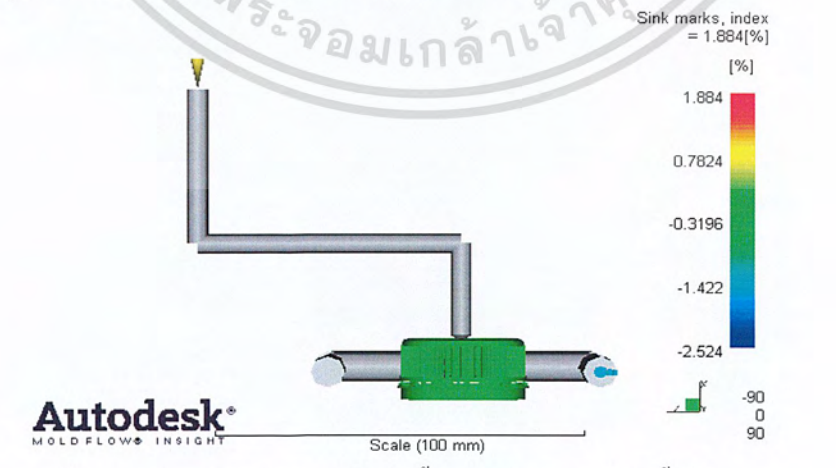
รูปที่ ผค 39 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 8



รูปที่ ผค 40 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 8

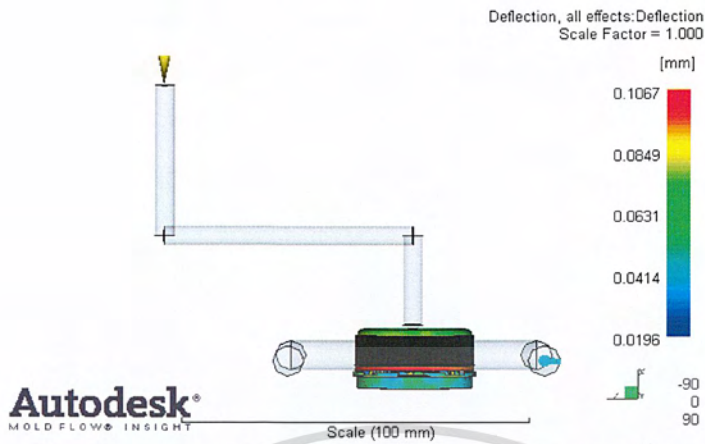


รูปที่ ผค 41 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 9

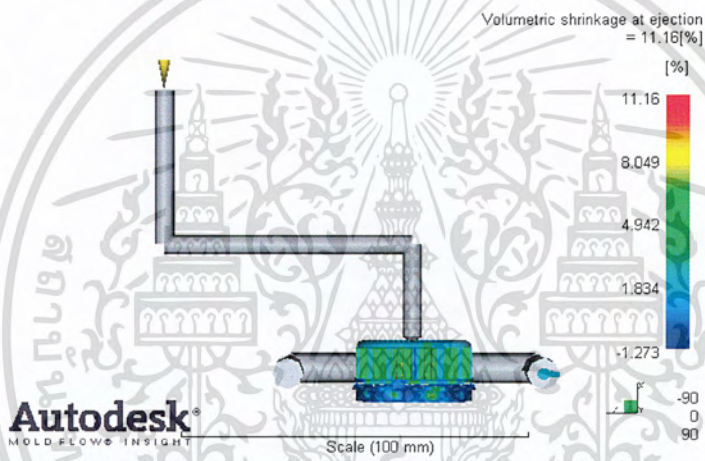


รูปที่ ผค 42 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 9

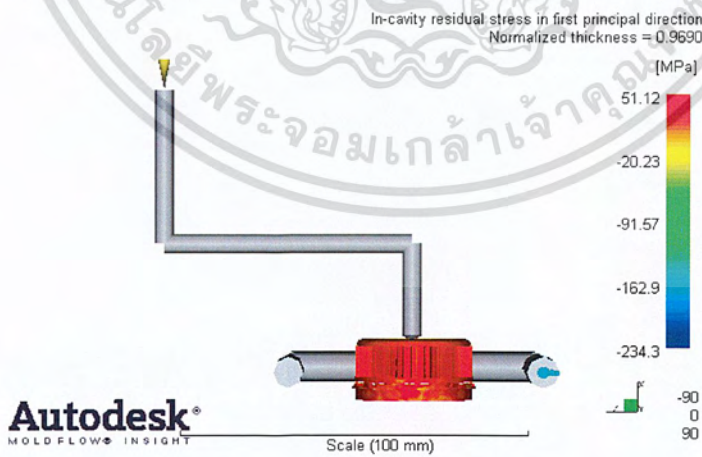
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 43 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 9

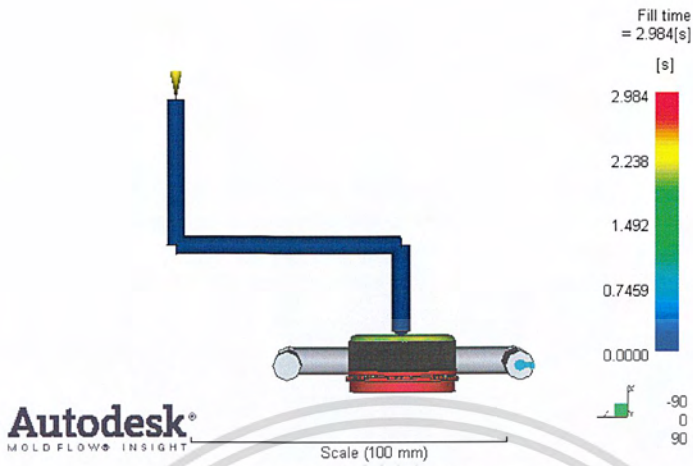


รูปที่ ผค 44 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 9

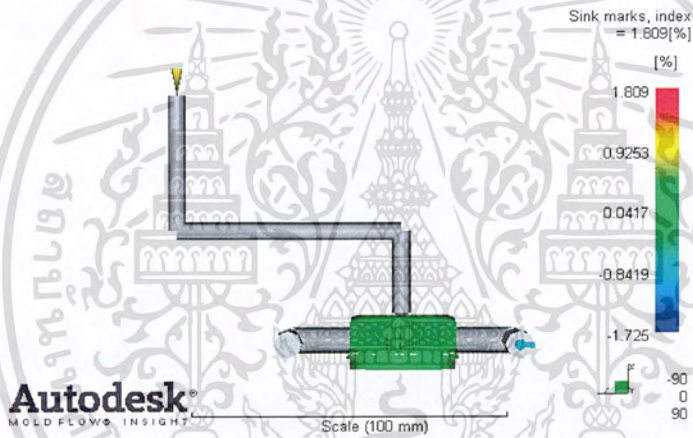


รูปที่ ผค 45 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 9

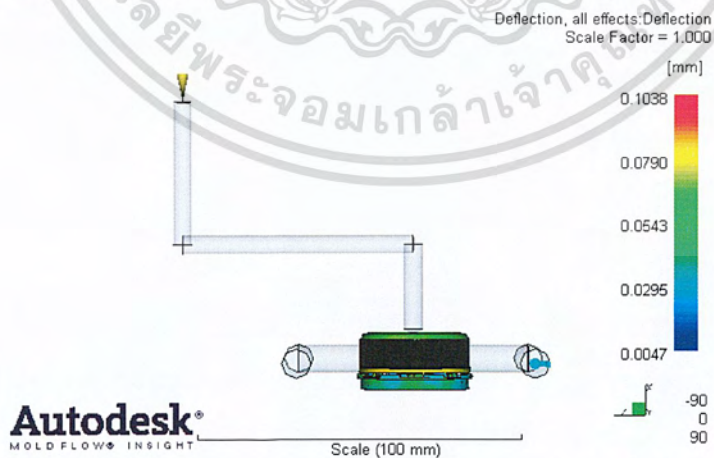
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



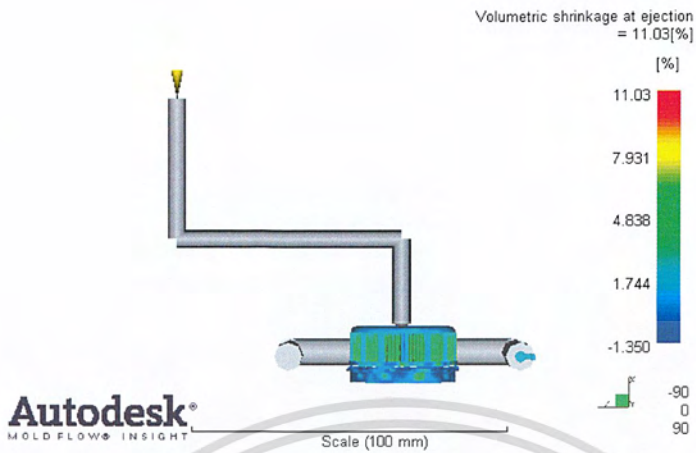
รูปที่ ผค 46 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 10



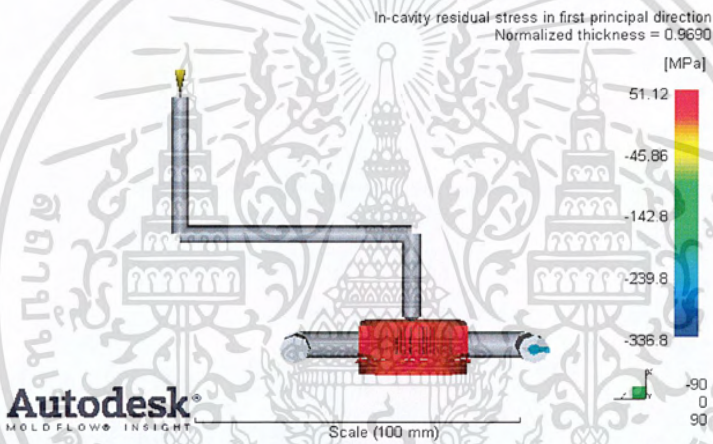
รูปที่ ผค 47 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 10



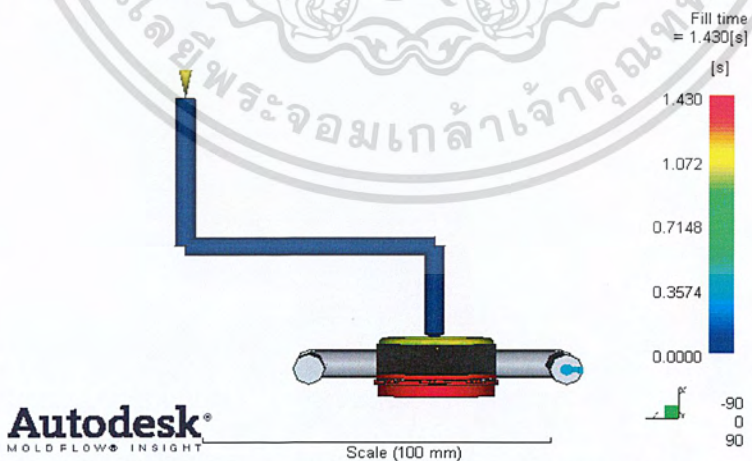
รูปที่ ผค 48 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 10



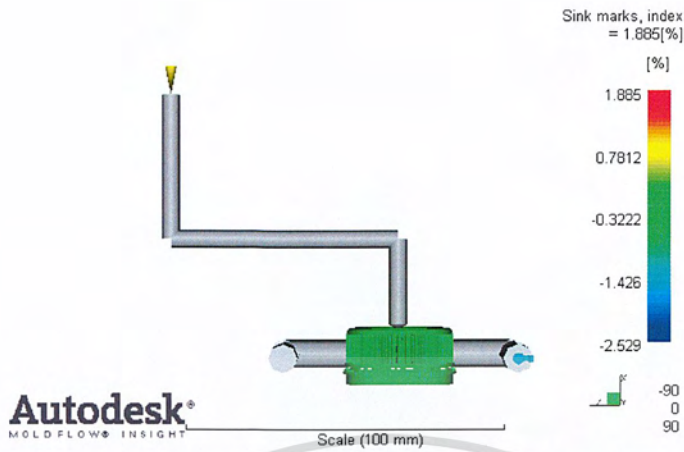
รูปที่ ผค 49 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 10



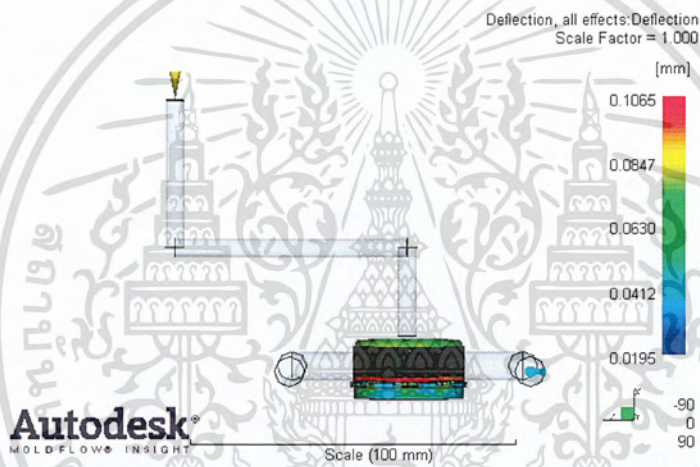
รูปที่ ผค 50 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 10



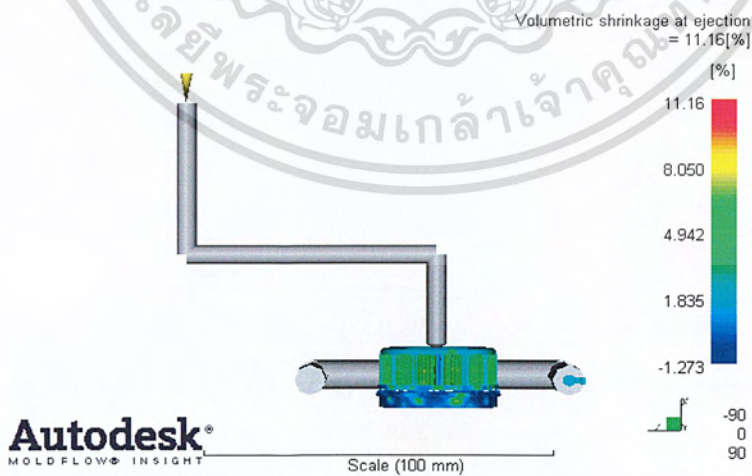
รูปที่ ผค 51 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 11



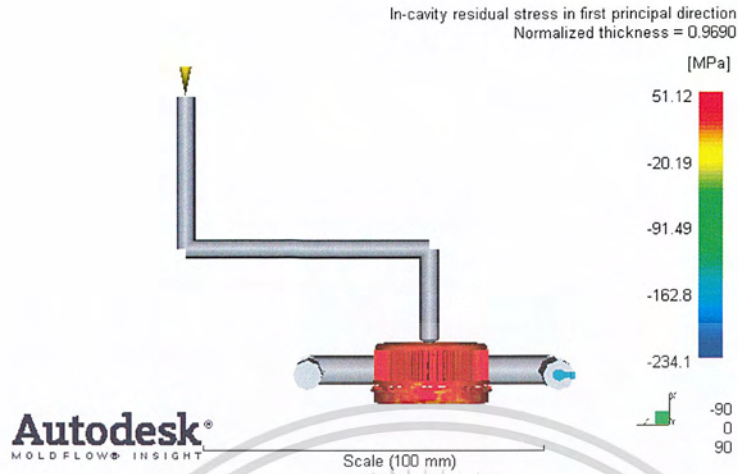
รูปที่ ผค 52 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 11



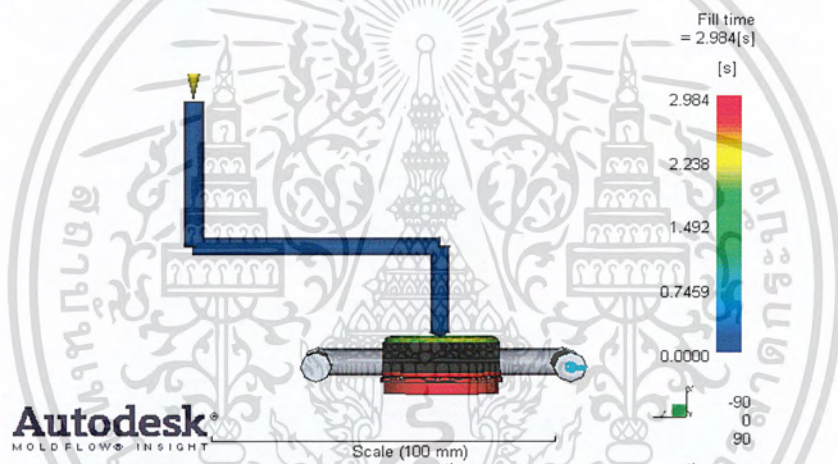
รูปที่ ผค 53 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 11



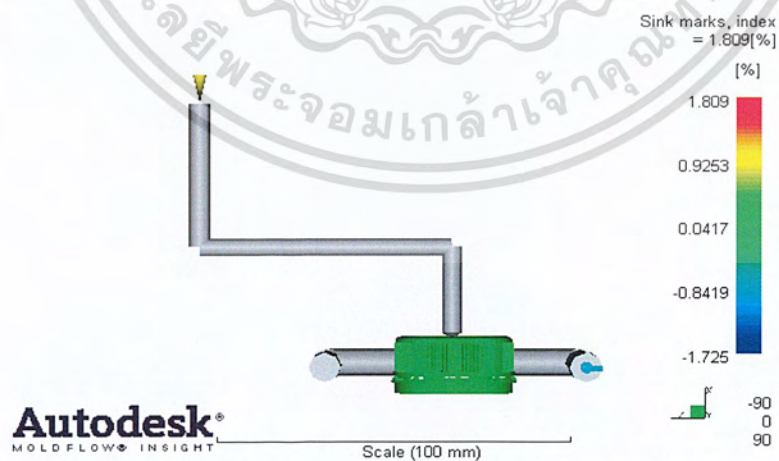
รูปที่ ผค 54 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 11



รูปที่ ผค 55 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 11



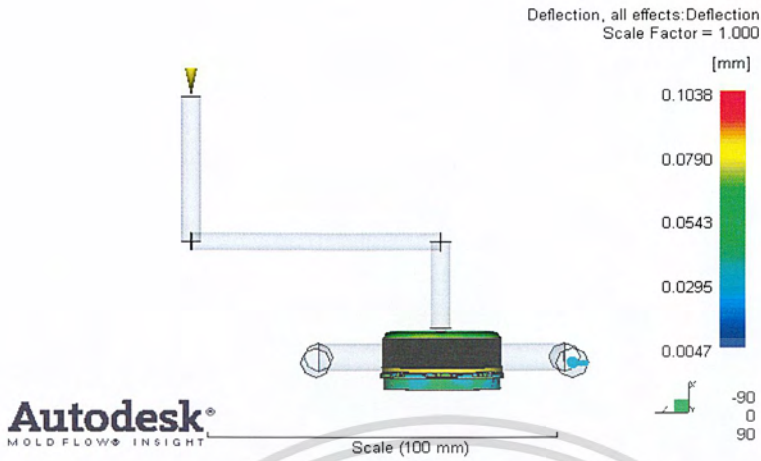
รูปที่ ผค 56 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 12



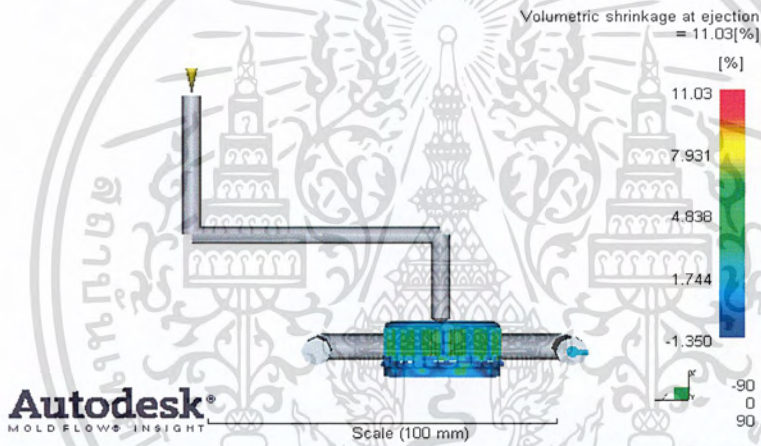
รูปที่ ผค 57 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 12

ผค20

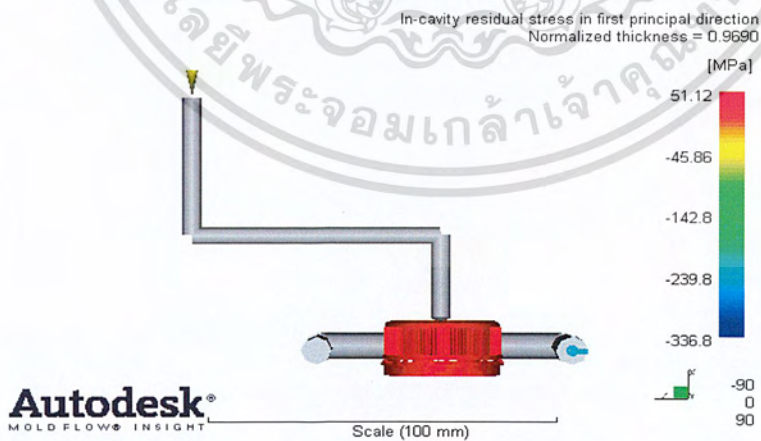
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



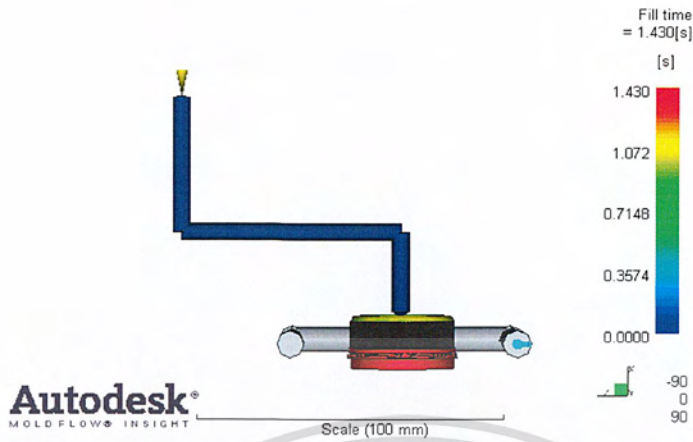
รูปที่ ผค 58 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 12



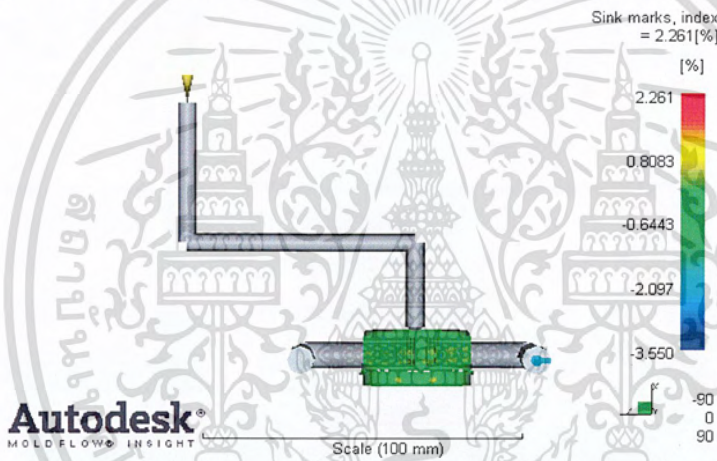
รูปที่ ผค 59 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 12



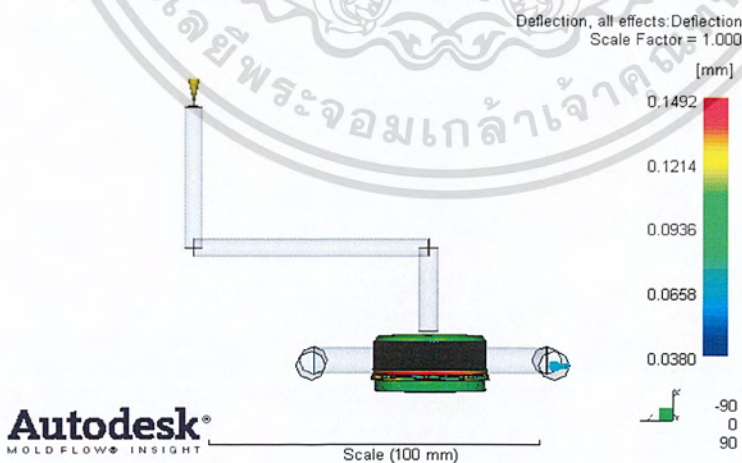
รูปที่ ผค 60 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 12



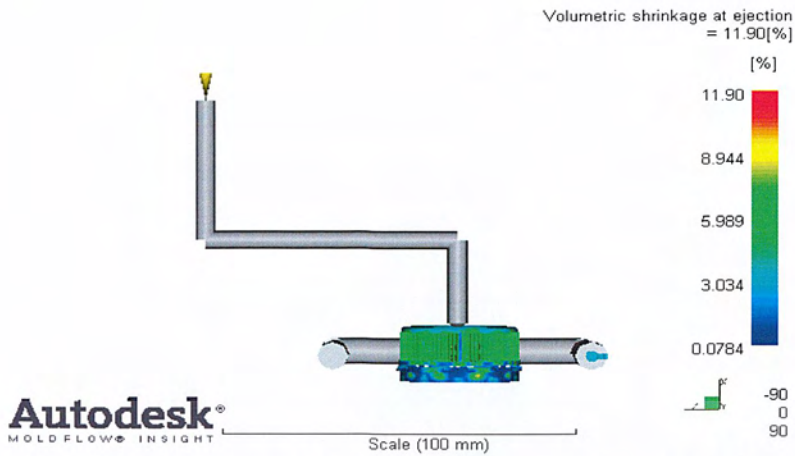
รูปที่ ผค 61 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 13



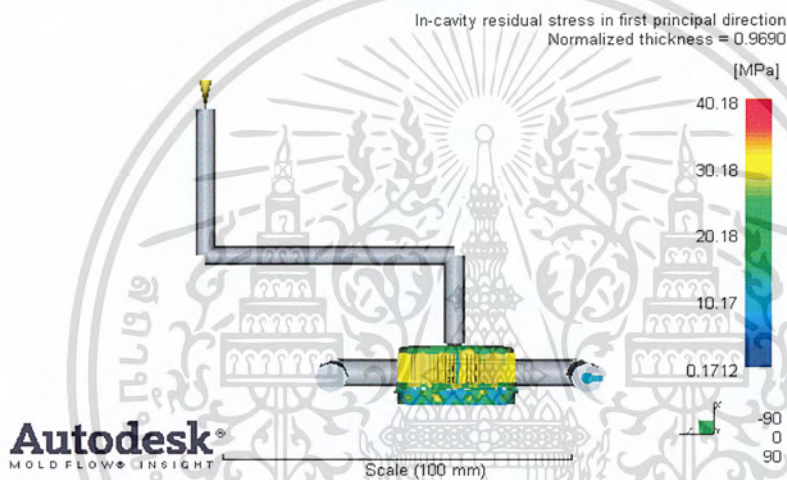
รูปที่ ผค 62 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 13



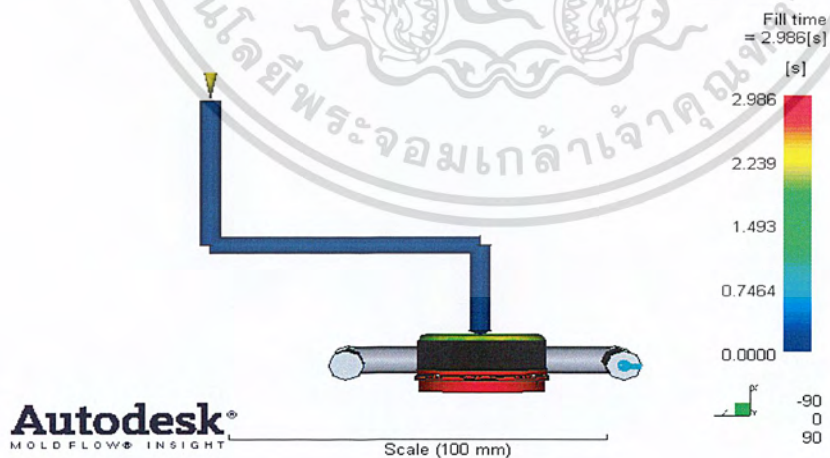
รูปที่ ผค 63 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 13



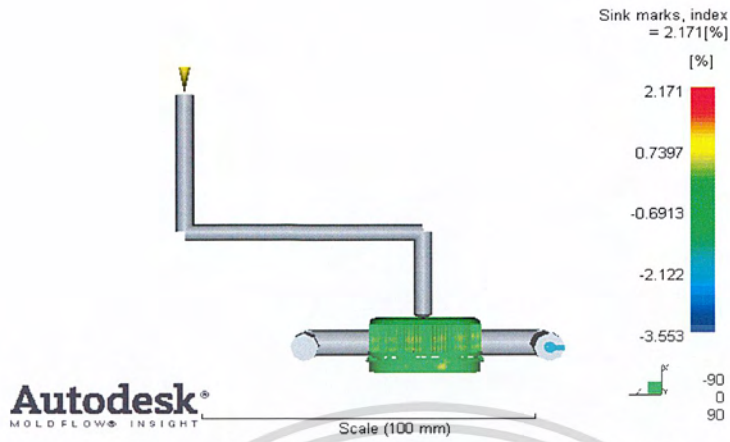
รูปที่ ผค 64 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 13



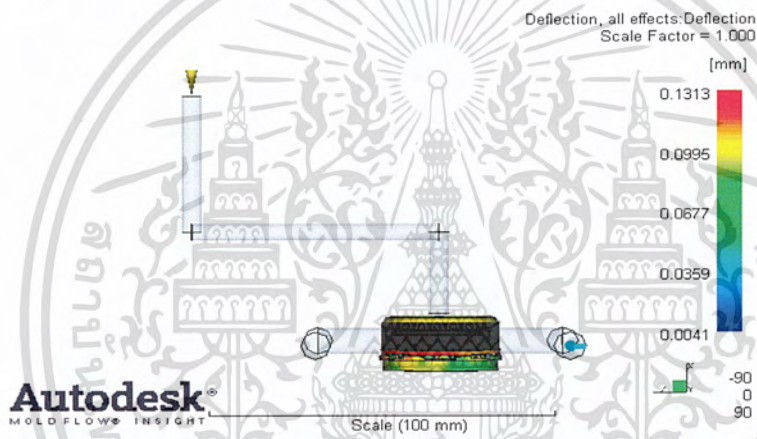
รูปที่ ผค 65 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 13



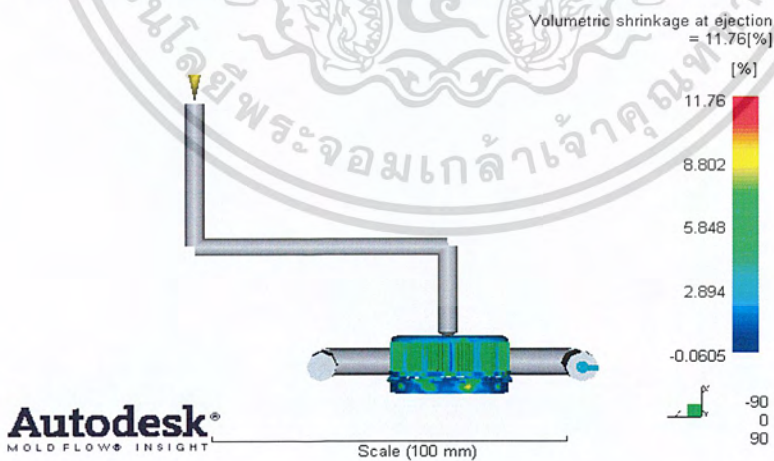
รูปที่ ผค 66 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 14



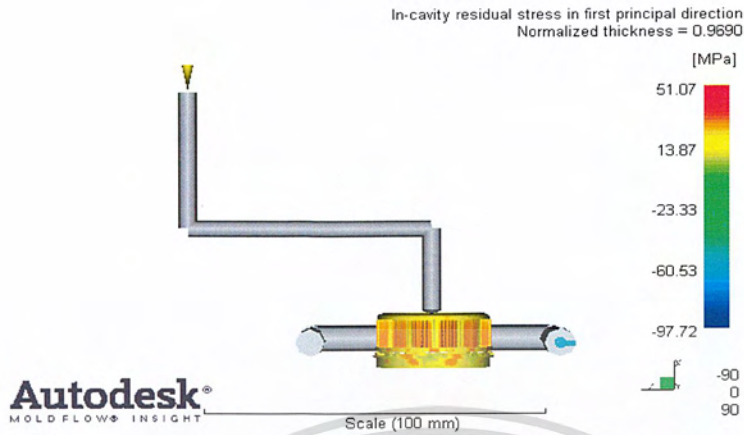
รูปที่ ผค 67 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 14



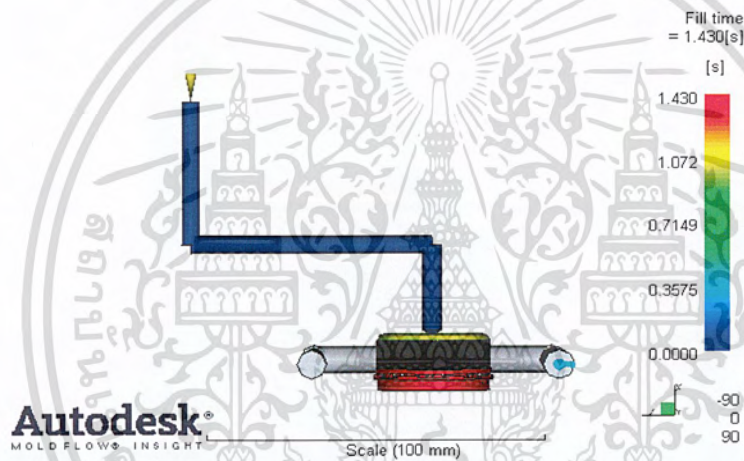
รูปที่ ผค 68 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 14



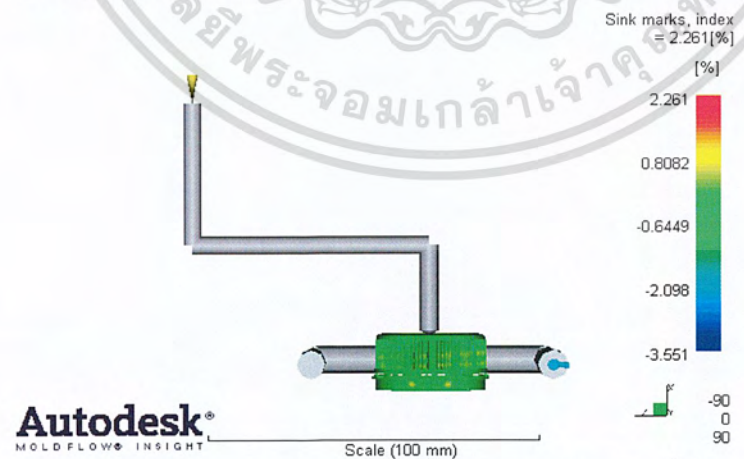
รูปที่ ผค 69 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 14



รูปที่ ผค 70 ผลการทดลองความเค้นดกค้ำในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 14



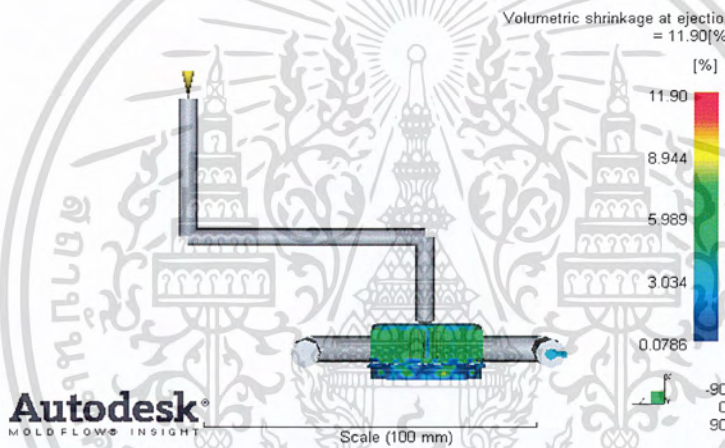
รูปที่ ผค 71 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 15



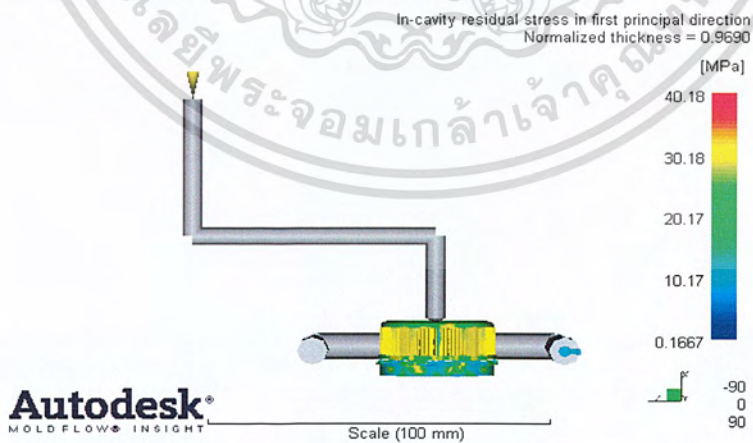
รูปที่ ผค 72 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 15



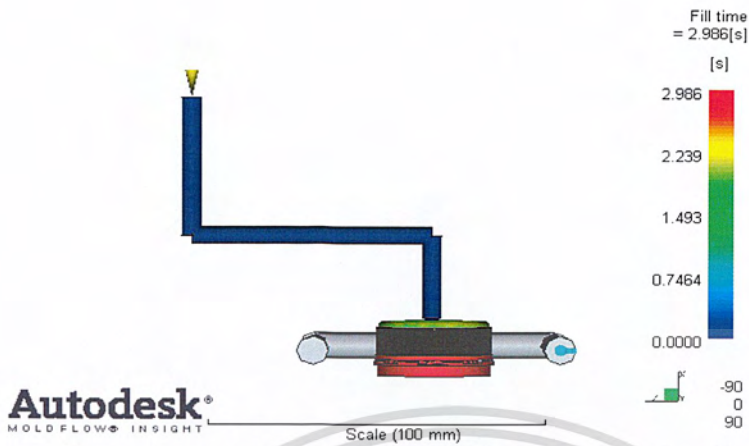
รูปที่ ผค 73 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 15



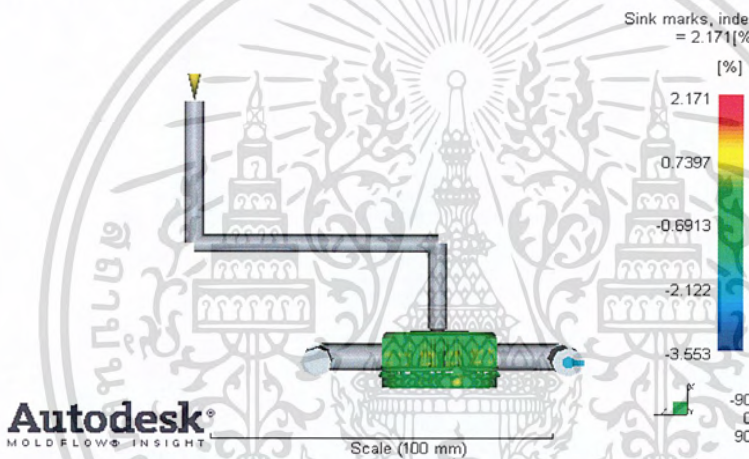
รูปที่ ผค 74 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 15



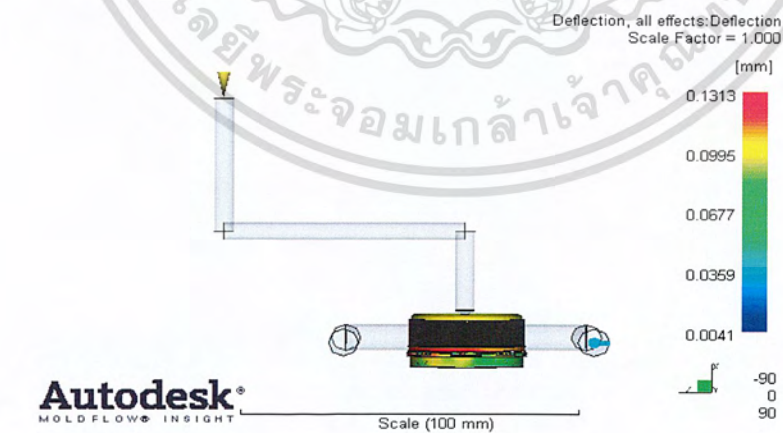
รูปที่ ผค 75 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 15



รูปที่ ผค 76 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 16



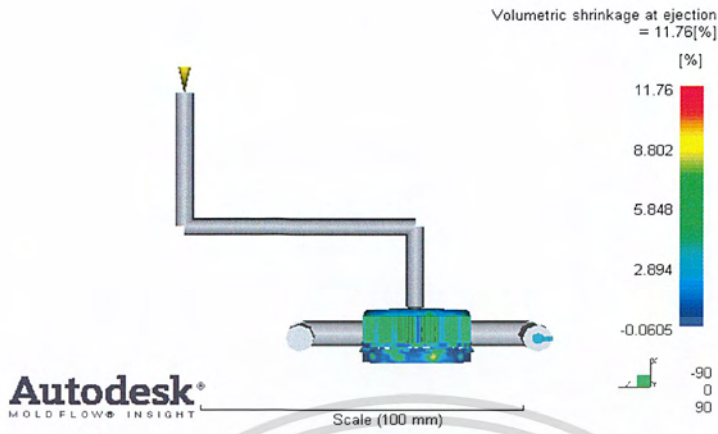
รูปที่ ผค 77 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 16



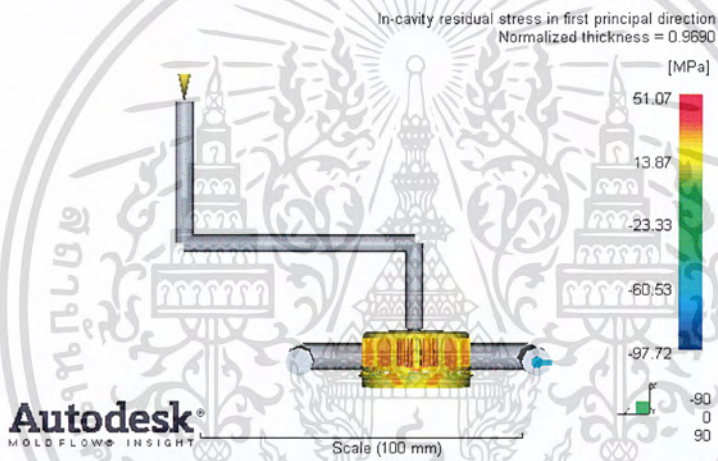
รูปที่ ผค 78 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 16

ผค27

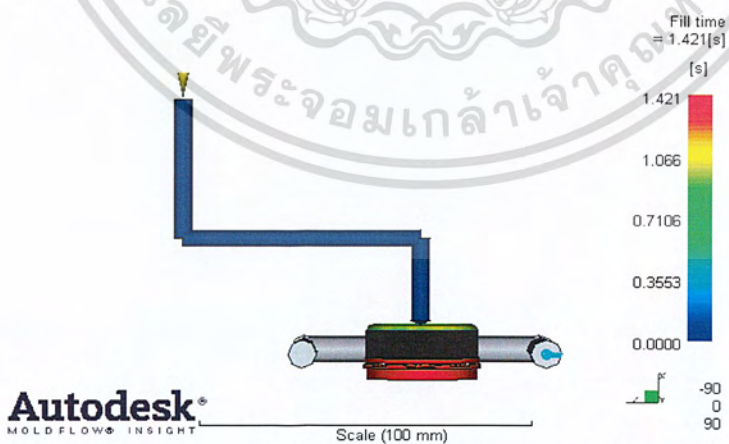
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 79 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 16



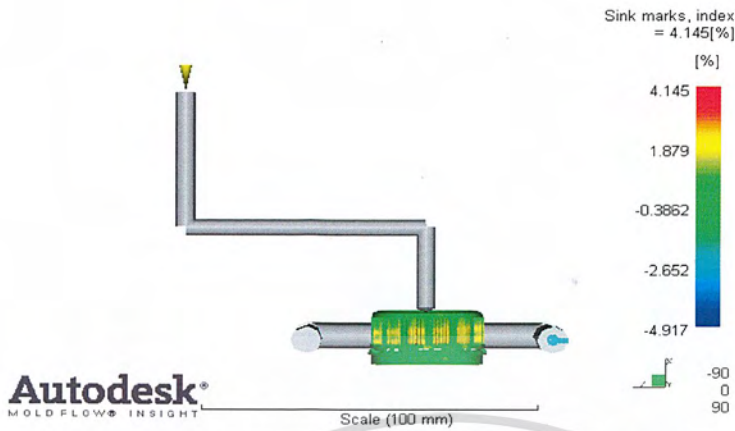
รูปที่ ผค 80 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 16



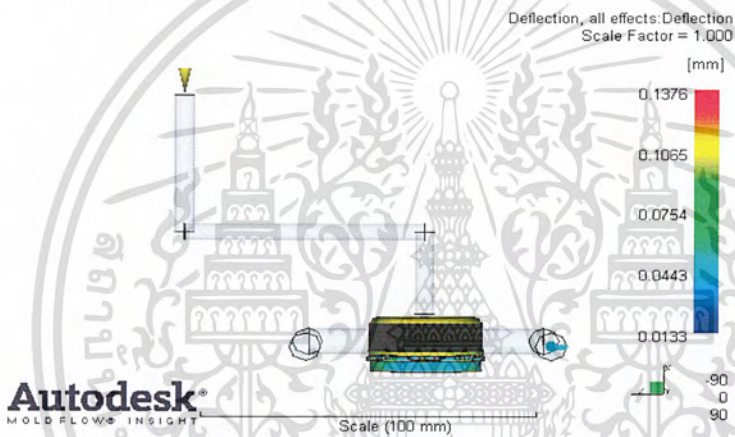
รูปที่ ผค 81 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 17

ผค28

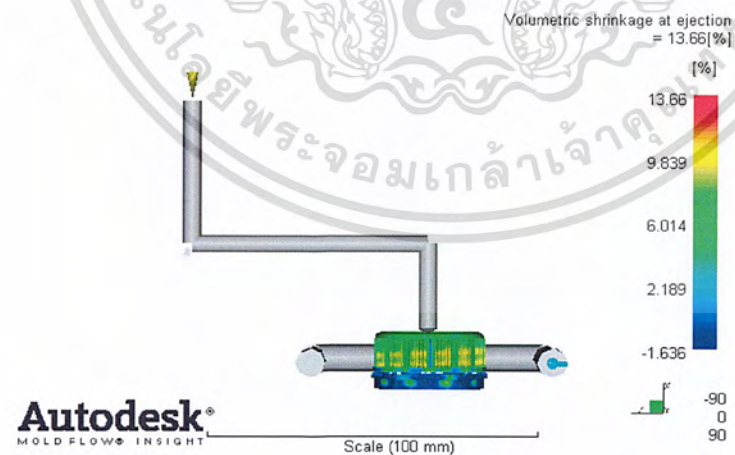
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 82 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 17



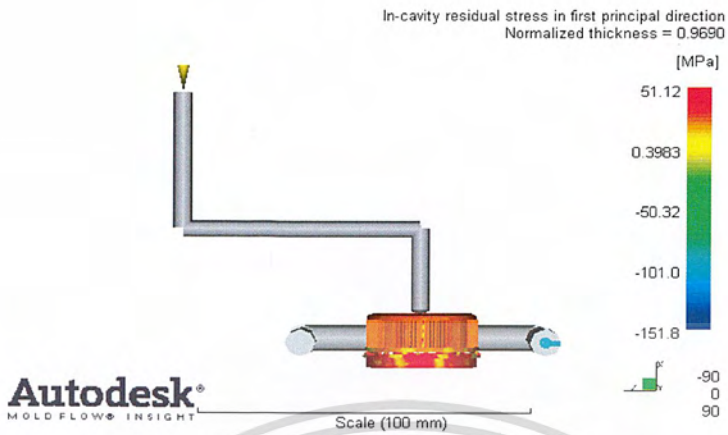
รูปที่ ผค 83 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 17



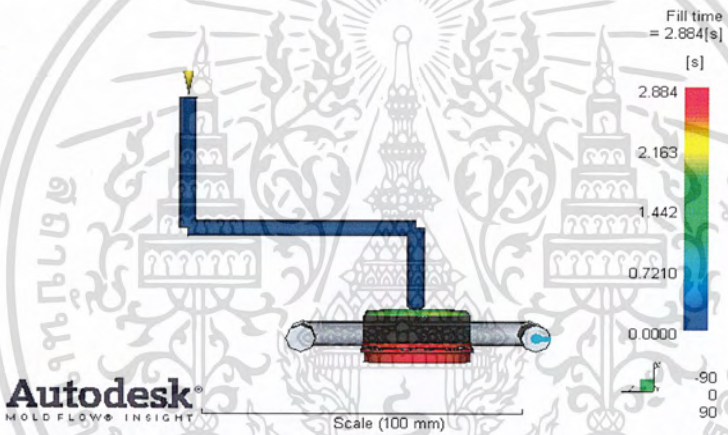
รูปที่ ผค 84 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 17

ผค29

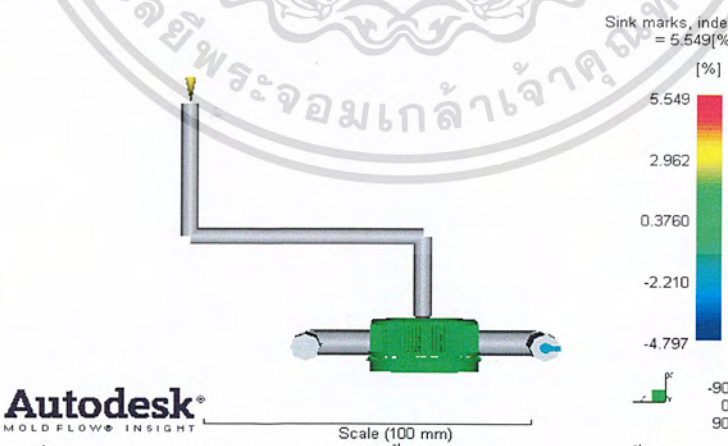
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



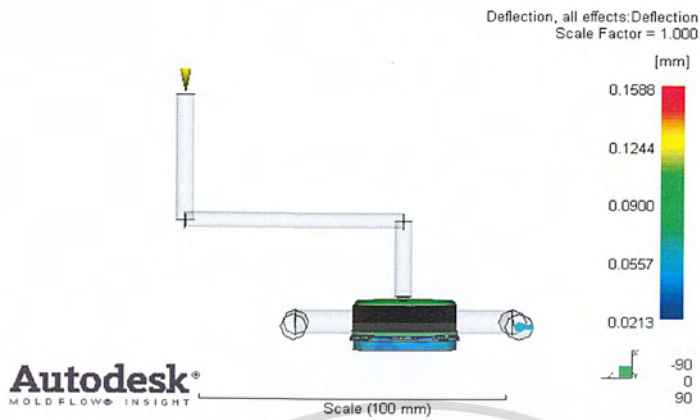
รูปที่ ผค 85 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 17



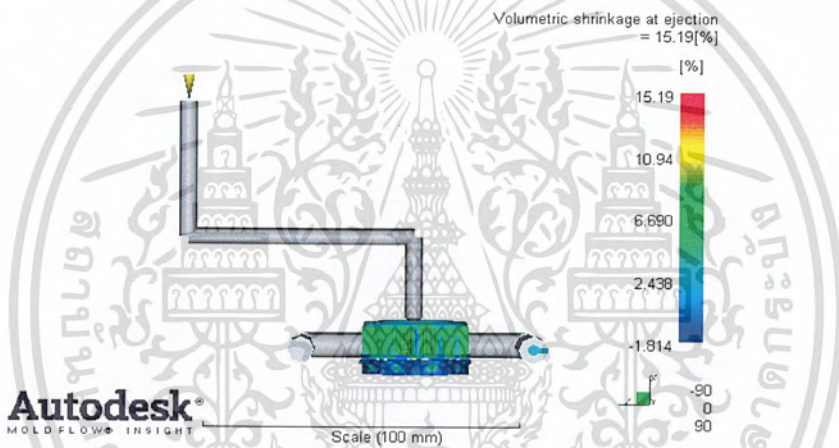
รูปที่ ผค 86 ผลการทดลองการบิดเบี้ยวแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 18



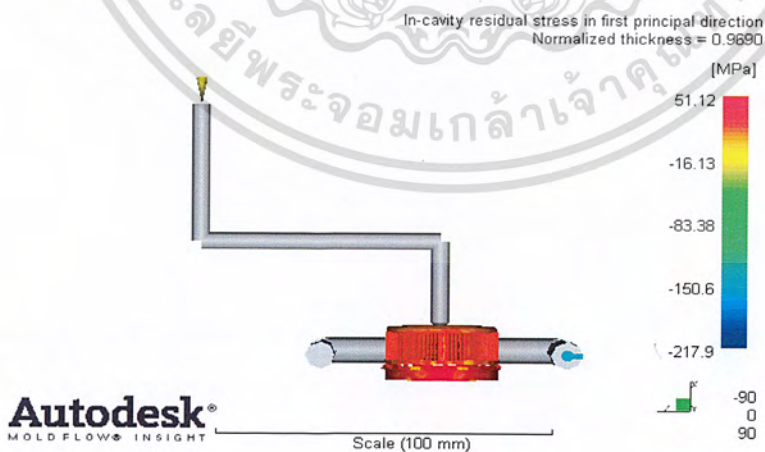
รูปที่ ผค 87 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 18



รูปที่ ผค 88 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 18



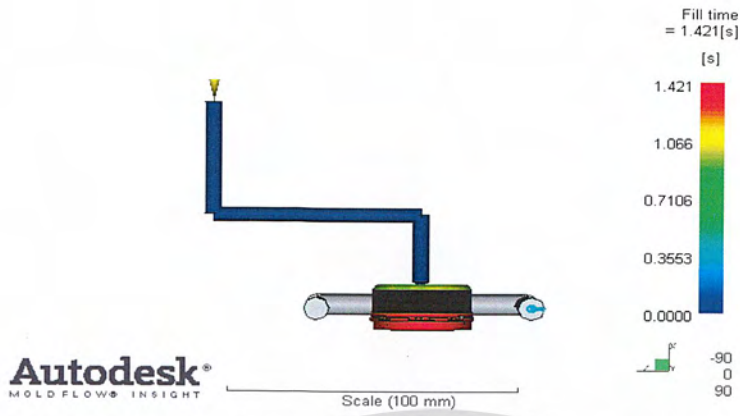
รูปที่ ผค 89 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 18



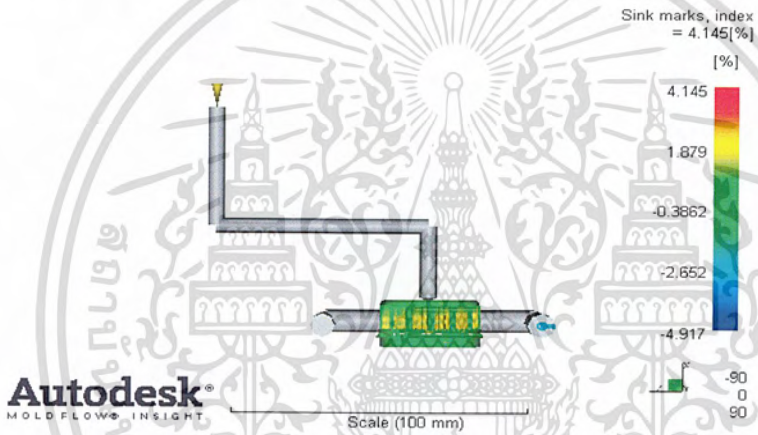
รูปที่ ผค 90 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 18

ผค31

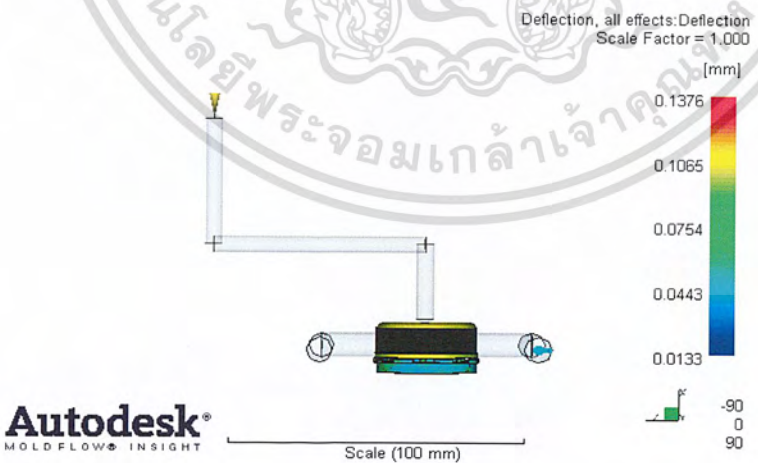
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



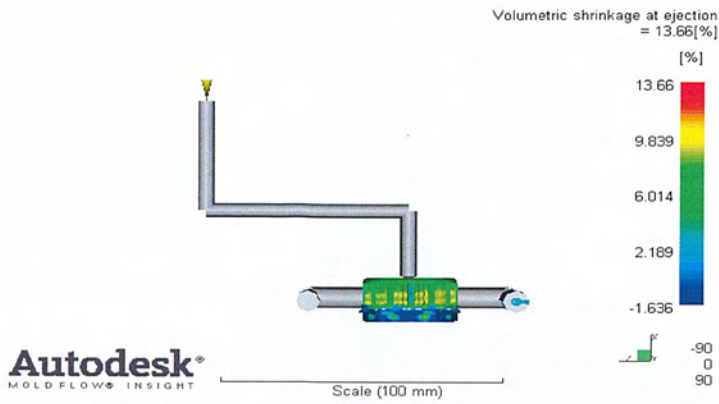
รูปที่ ผค 91 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 19



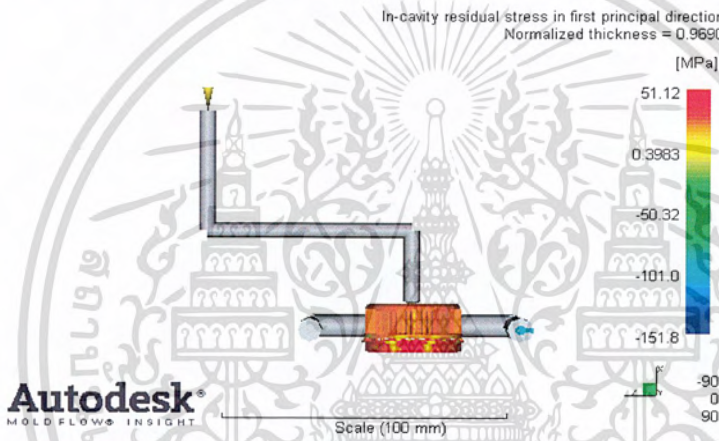
รูปที่ ผค 92 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 19



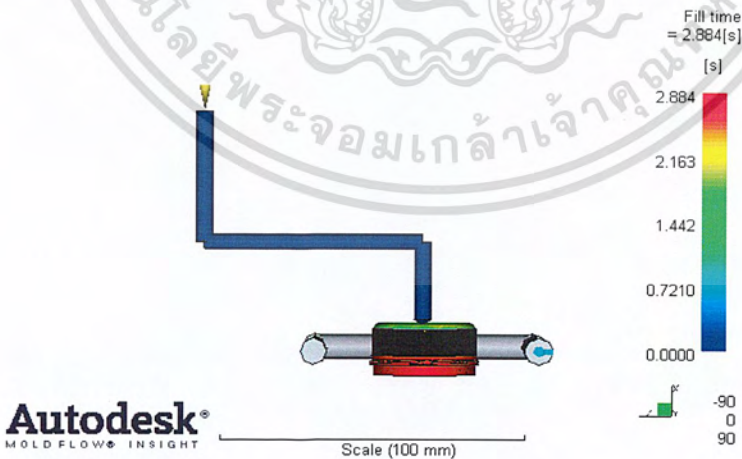
รูปที่ ผค 93 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 19



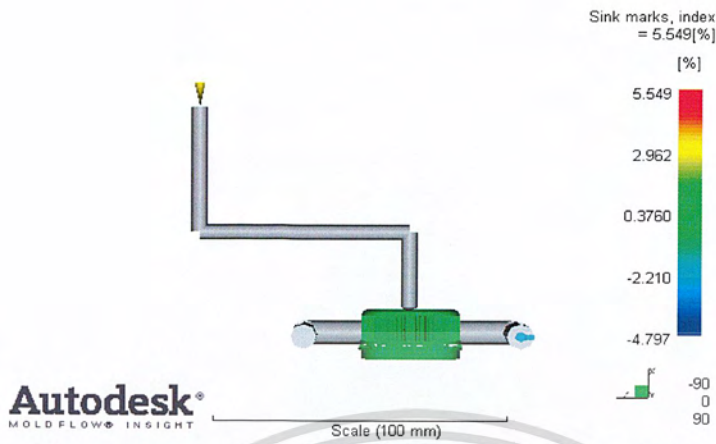
รูปที่ ผค 94 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 19



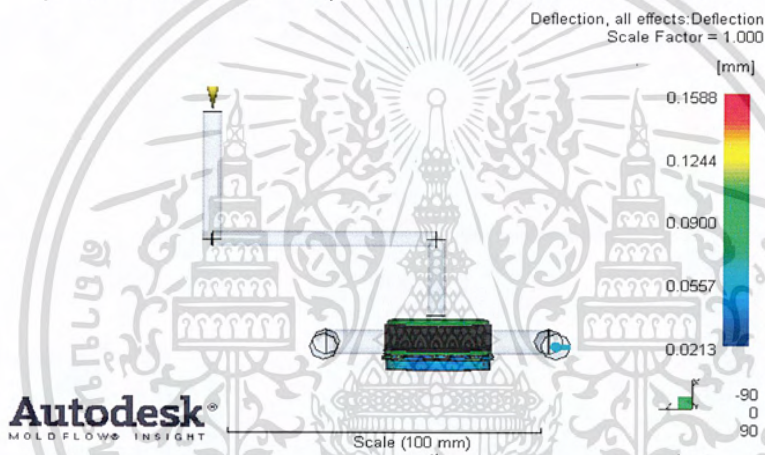
รูปที่ ผค 95 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 19



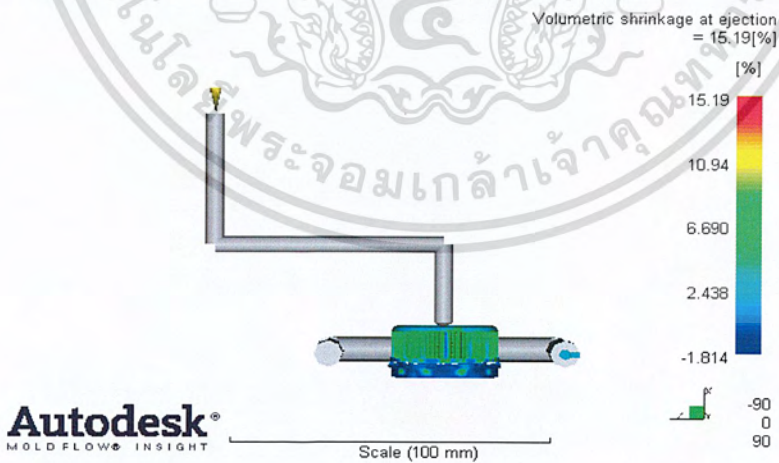
รูปที่ ผค 96 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 20



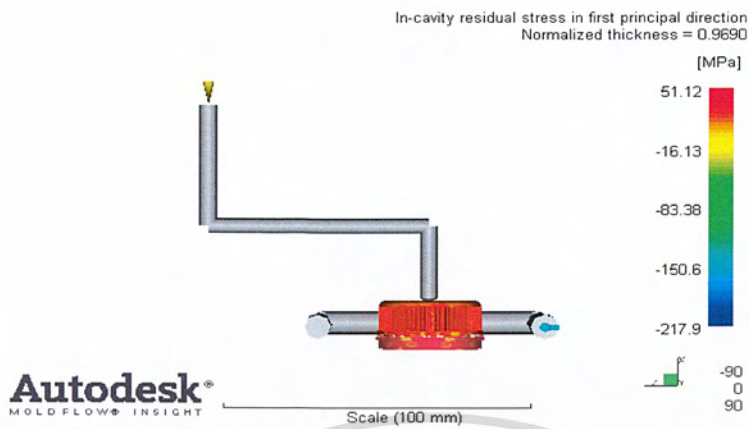
รูปที่ ผค 97 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 20



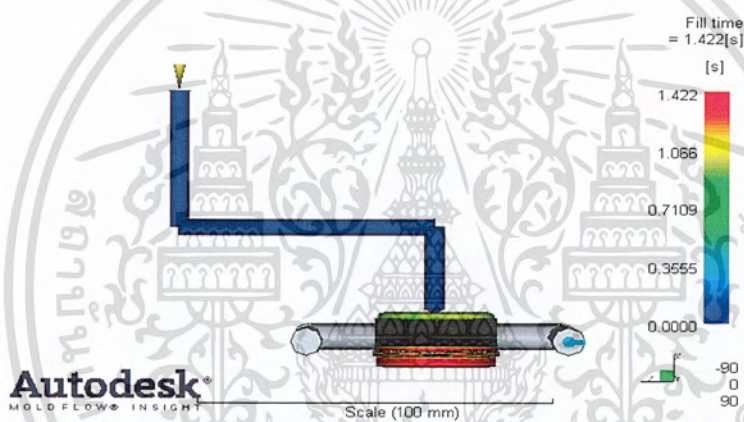
รูปที่ ผค 98 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 20



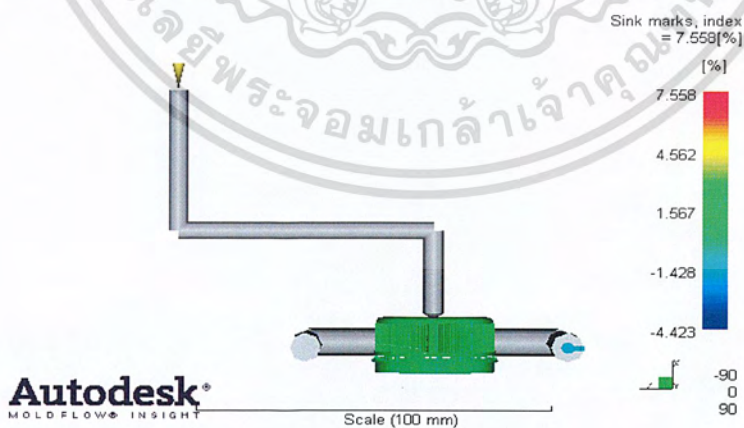
รูปที่ ผค 99 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 20



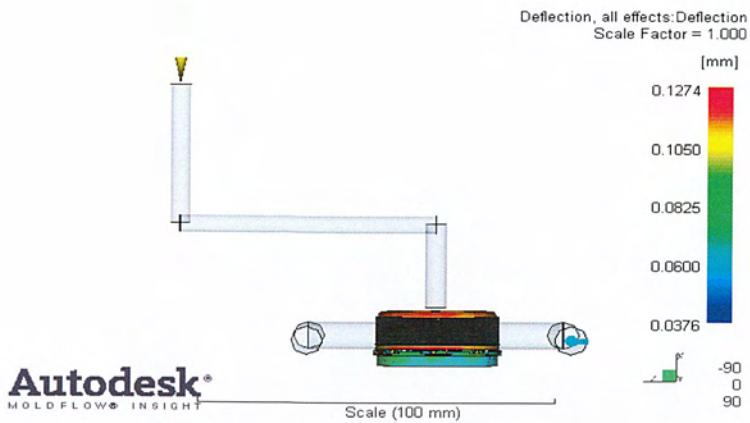
รูปที่ ผค 100 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 20



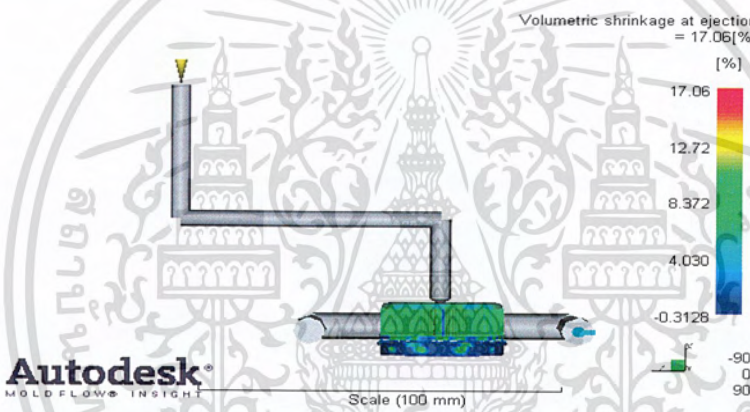
รูปที่ ผค 101 ผลการทดลองการบิดเบี้ยวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 21



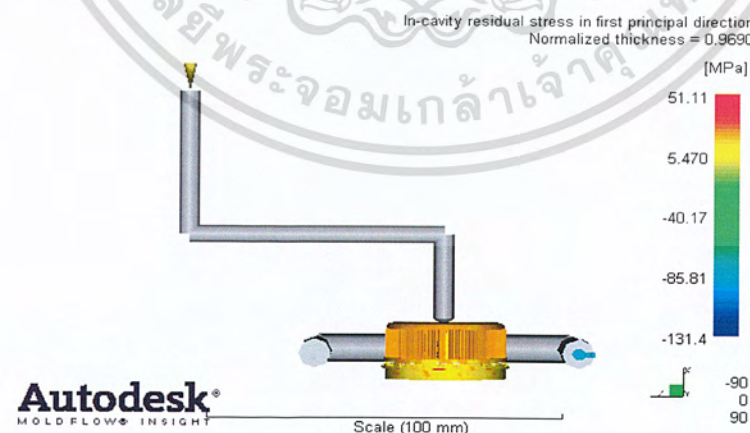
รูปที่ ผค 102 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 21



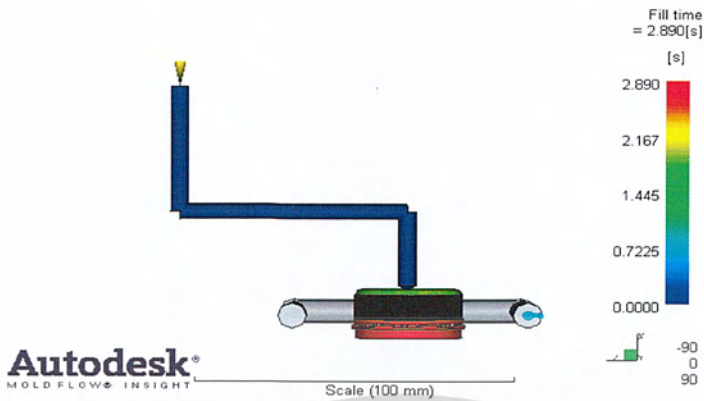
รูปที่ ผค 103 ผลการทดลองการ โค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 21



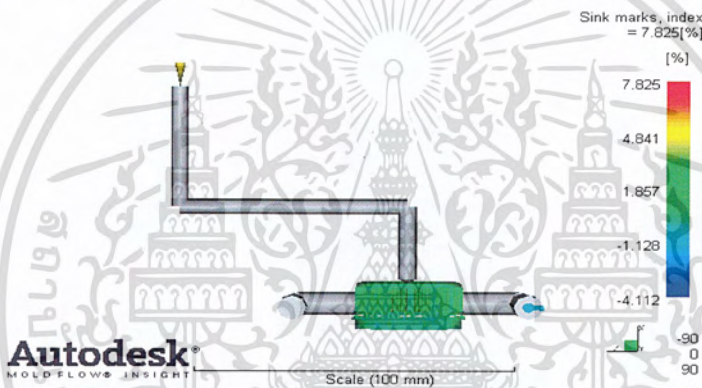
รูปที่ ผค 104 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 21



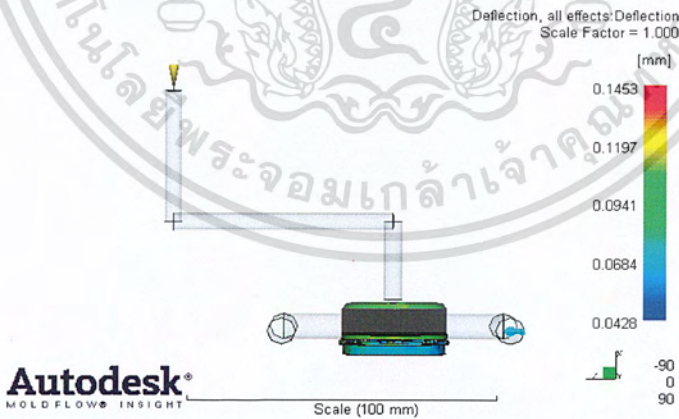
รูปที่ ผค 105 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 21



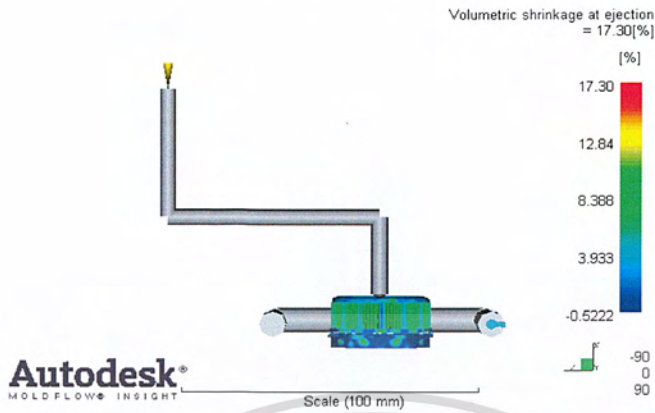
รูปที่ ผค 106 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 22



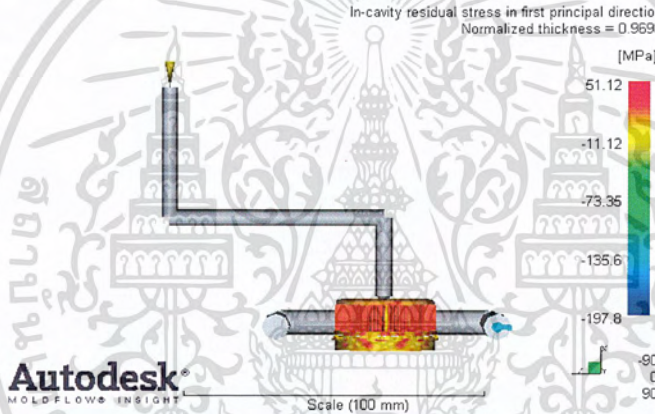
รูปที่ ผค 107 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 22



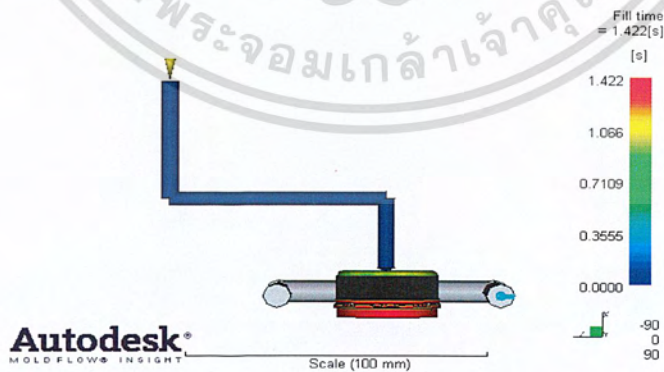
รูปที่ ผค 108 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 22



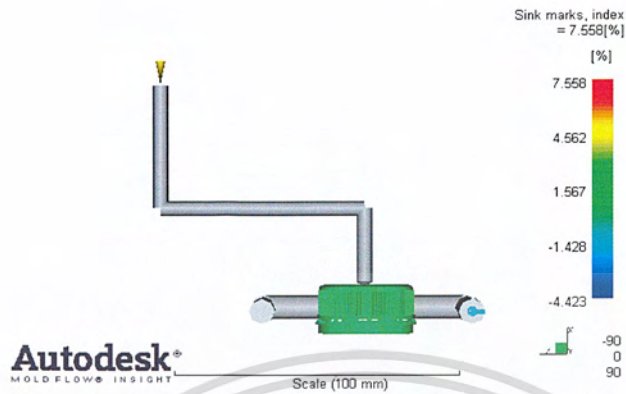
รูปที่ ผค 109 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 22



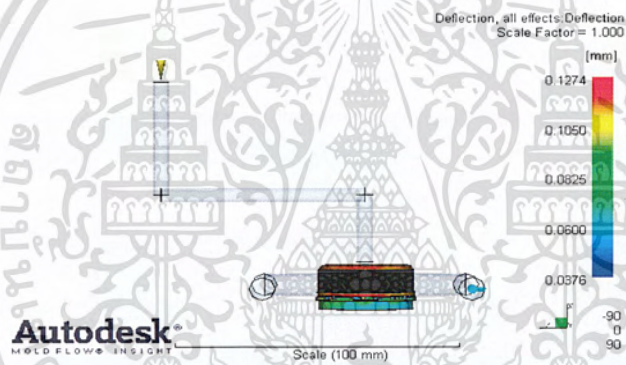
รูปที่ ผค 110 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 22



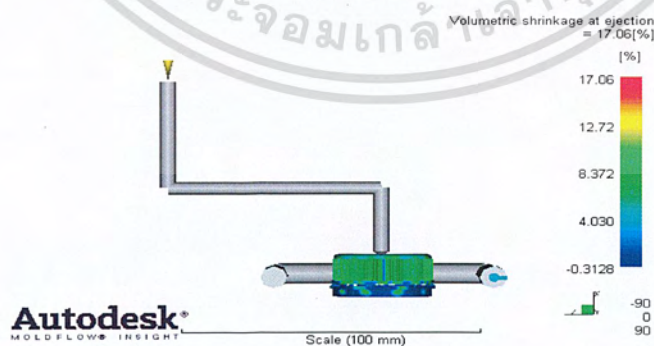
รูปที่ ผค 111 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 23



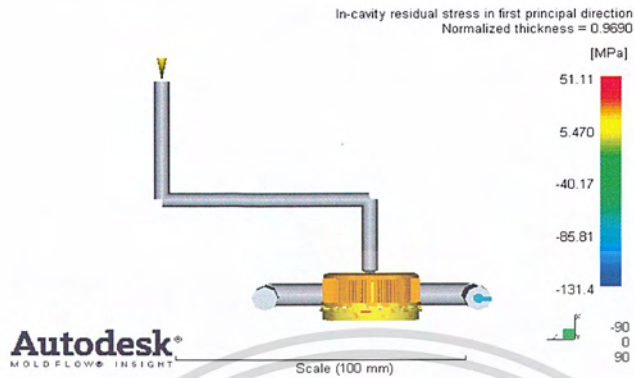
รูปที่ ผค 112 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 23



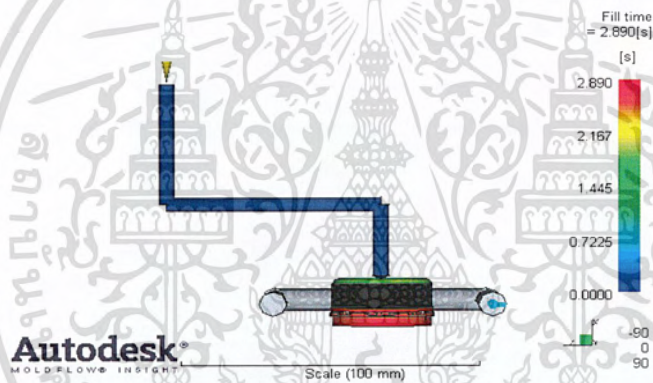
รูปที่ ผค 113 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 23



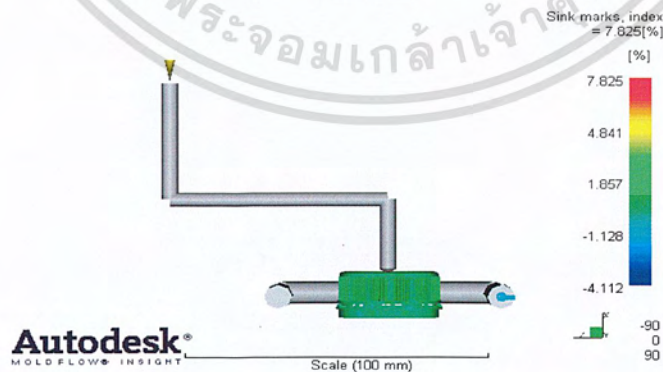
รูปที่ ผค 114 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 23



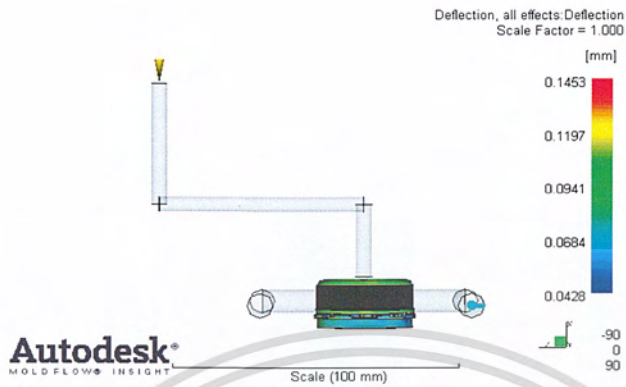
รูปที่ ผค 115 ผลการทดลองความเค้นดก้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 23



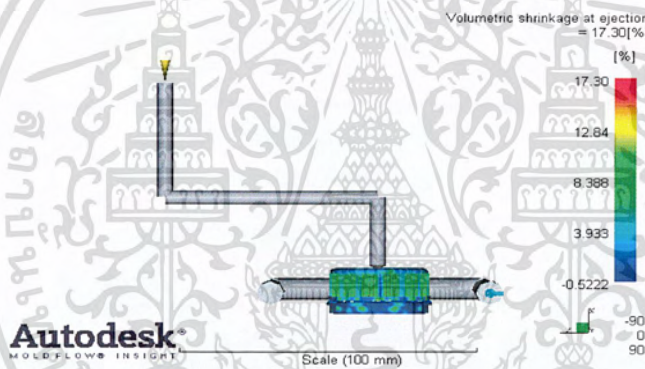
รูปที่ ผค 116 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 24



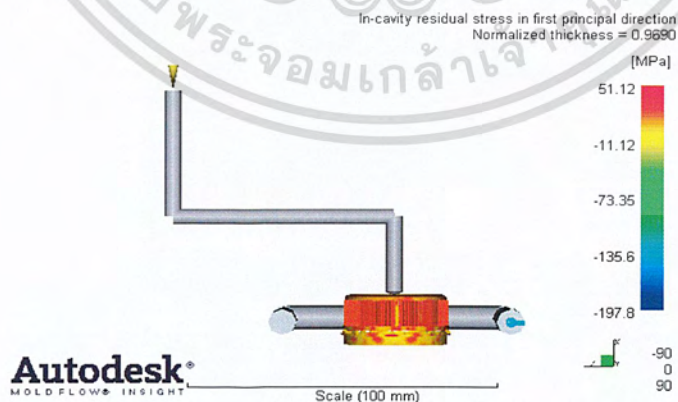
รูปที่ ผค 117 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 24



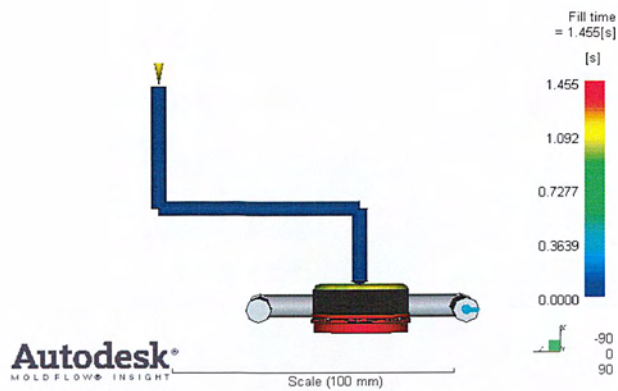
รูปที่ ผค 118 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 24



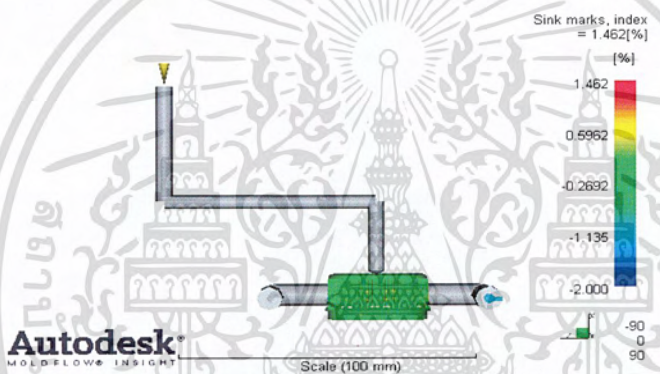
รูปที่ ผค 119 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 24



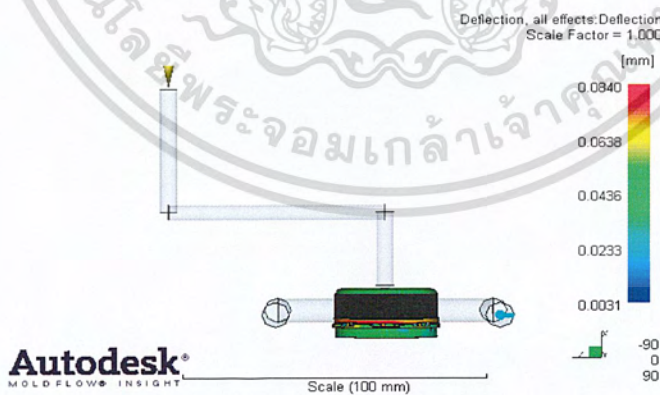
รูปที่ ผค 120 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 24



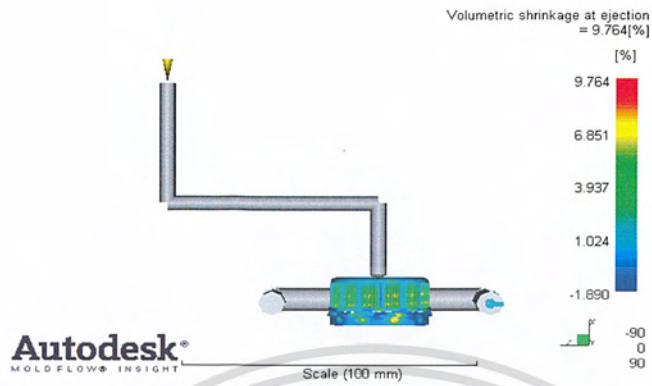
รูปที่ ผค 121 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 25



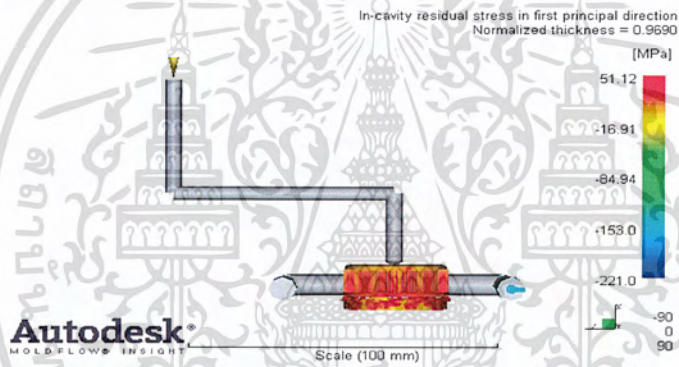
รูปที่ ผค 122 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 25



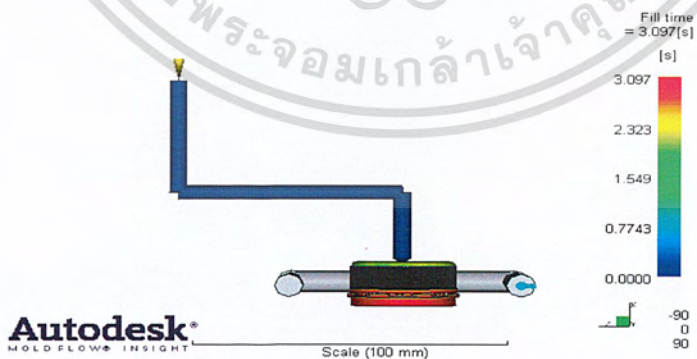
รูปที่ ผค 123 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 25



รูปที่ ผค 124 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 25



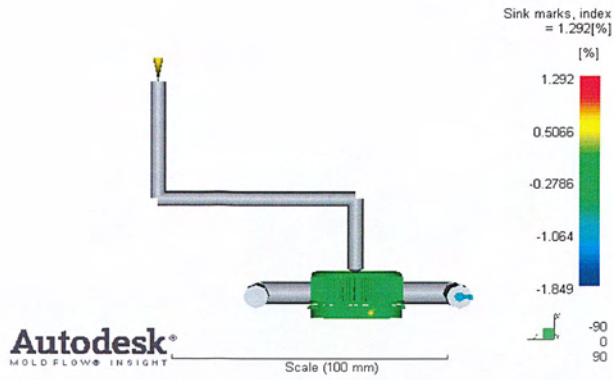
รูปที่ ผค 125 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 25



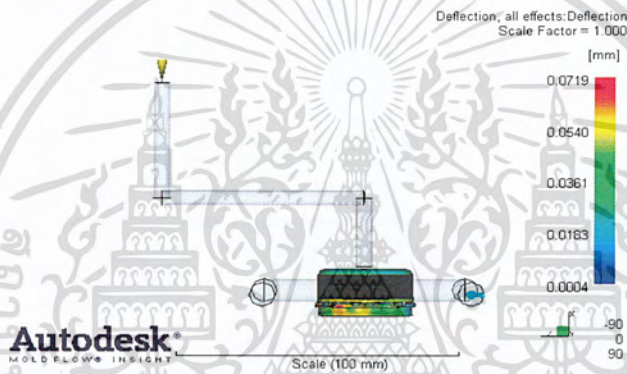
รูปที่ ผค 126 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 26

ผค43

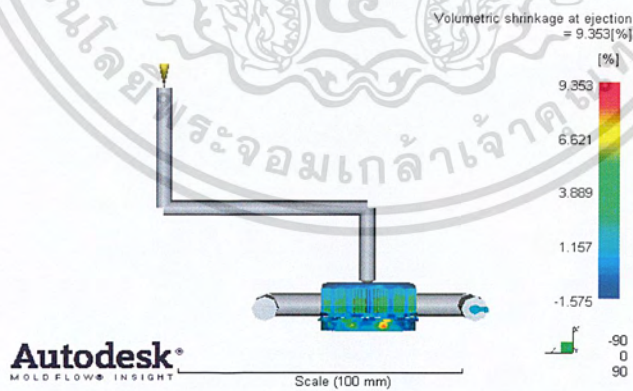
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



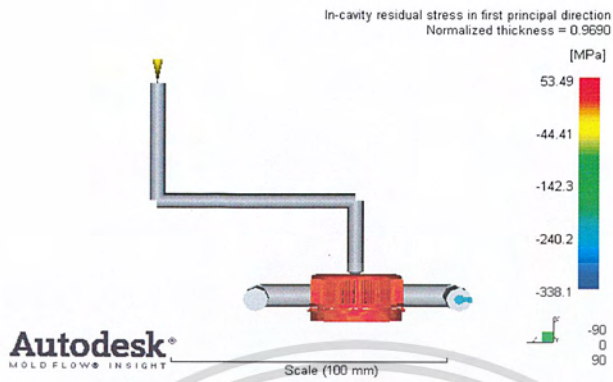
รูปที่ ผค 127 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝ้าขวดพลาสติก ครั้งที่ 26



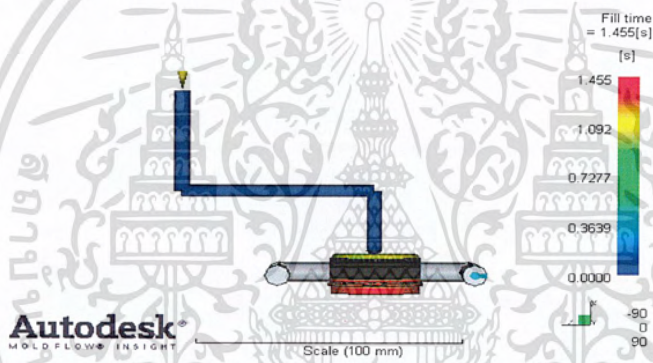
รูปที่ ผค 128 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝ้าขวดพลาสติก ครั้งที่ 26



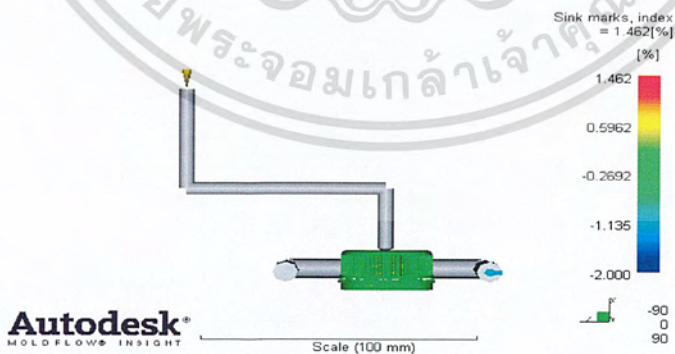
รูปที่ ผค 129 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝ้าขวดพลาสติก ครั้งที่ 26



รูปที่ ผค 130 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 26



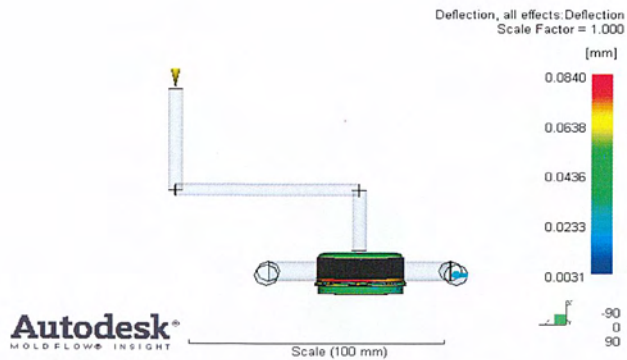
รูปที่ ผค 131 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 27



รูปที่ ผค 132 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 27

ผค45

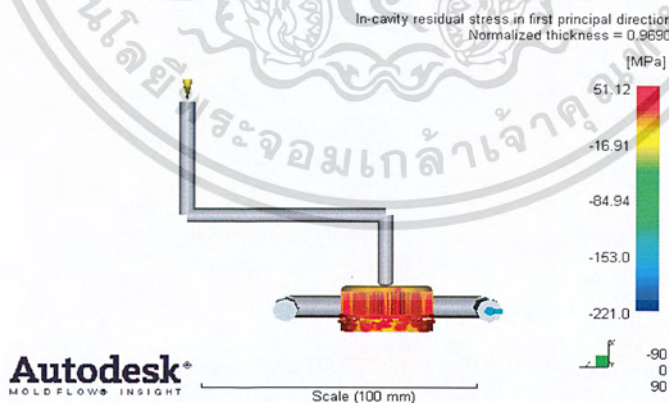
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



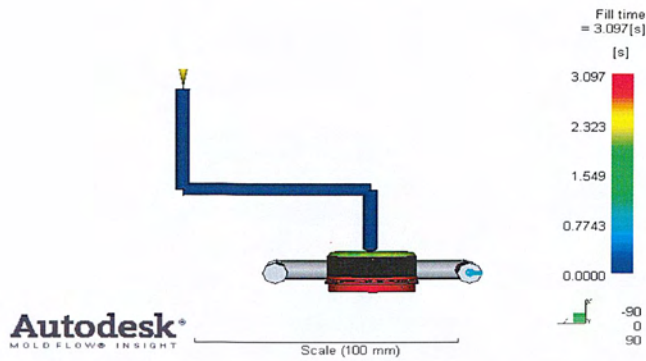
รูปที่ ผค 133 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 27



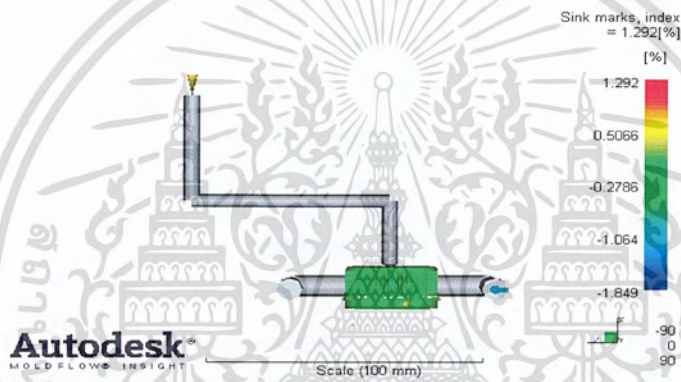
รูปที่ ผค 134 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 27



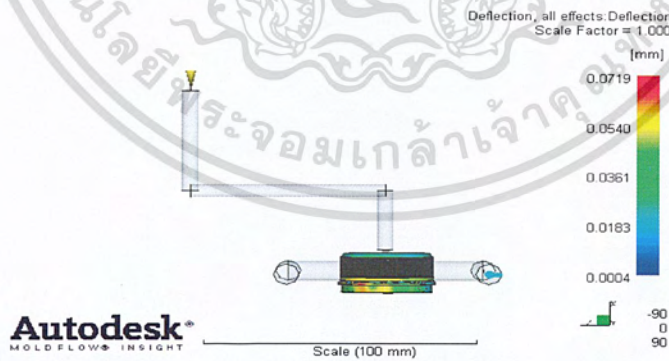
รูปที่ ผค 135 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 27



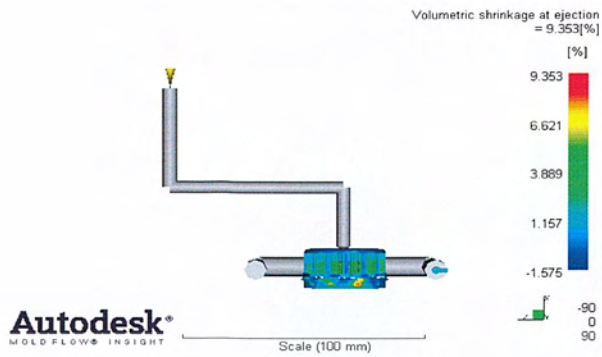
รูปที่ ผค 136 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28



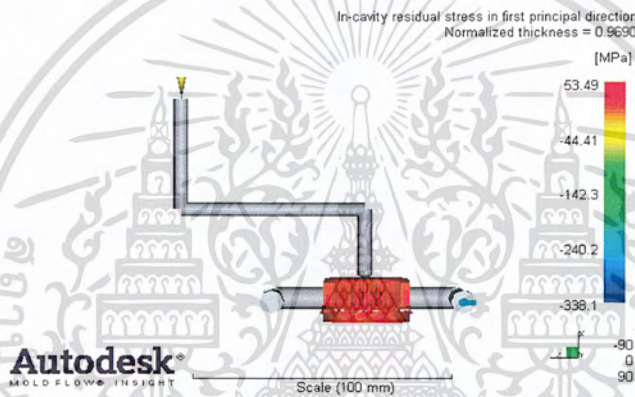
รูปที่ ผค 137 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28



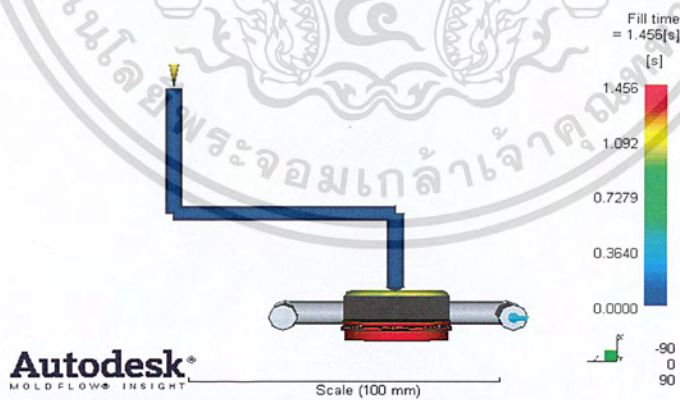
รูปที่ ผค 138 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28



รูปที่ ผค 139 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28



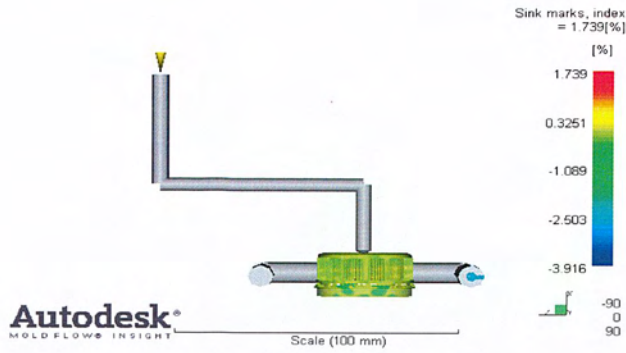
รูปที่ ผค 140 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28



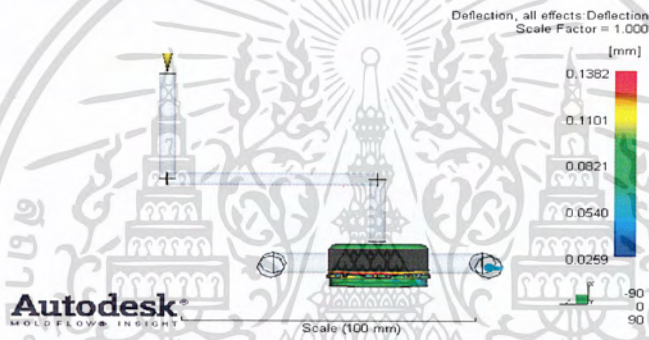
รูปที่ ผค 141 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 28

ผค48

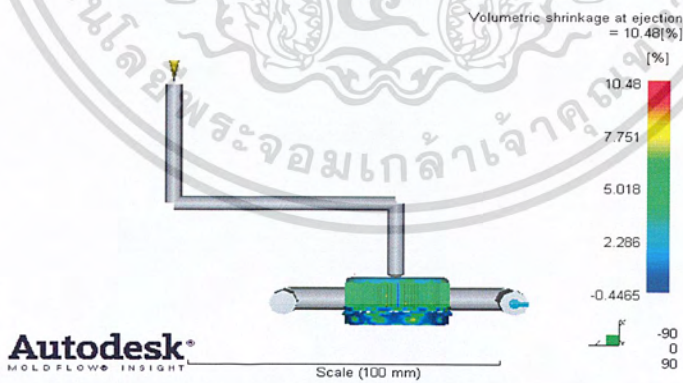
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



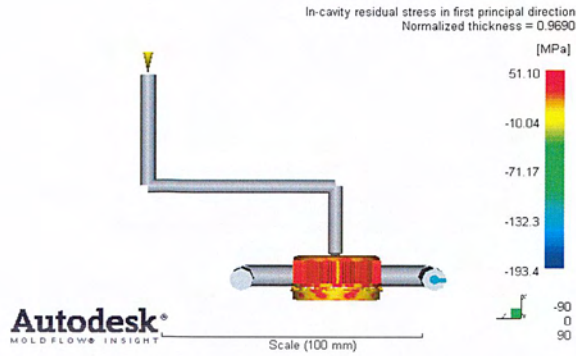
รูปที่ ผค 142 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 29



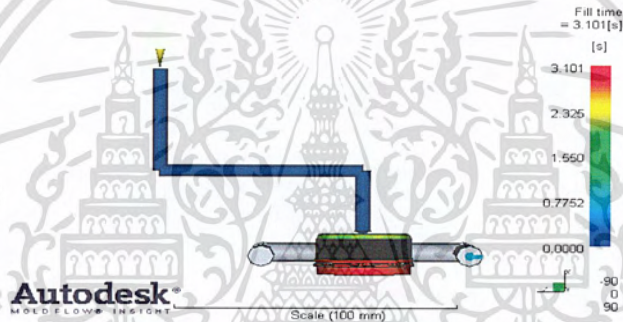
รูปที่ ผค 143 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 29



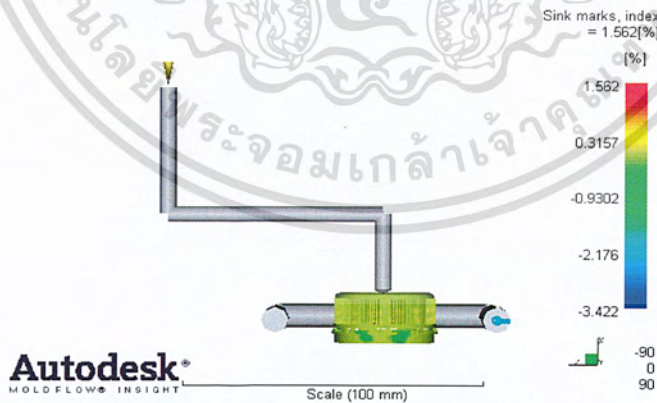
รูปที่ ผค 144 ผลการทดลองการโค้งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 29



รูปที่ ผค 145 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 29



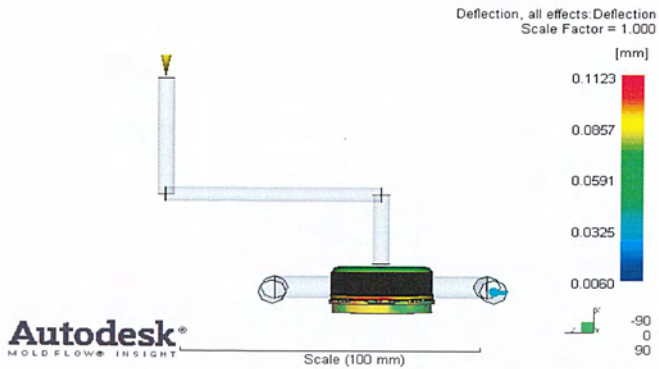
รูปที่ ผค 146 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 30



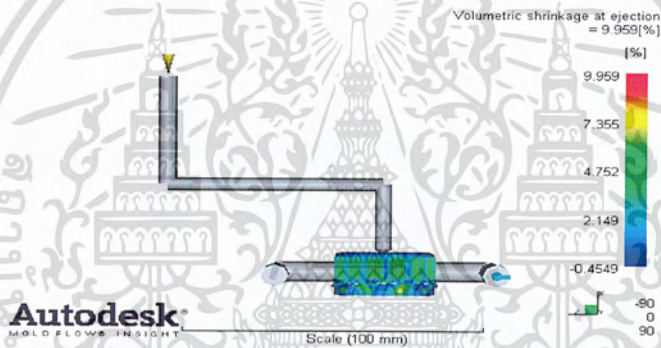
รูปที่ ผค 147 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 30

ผค50

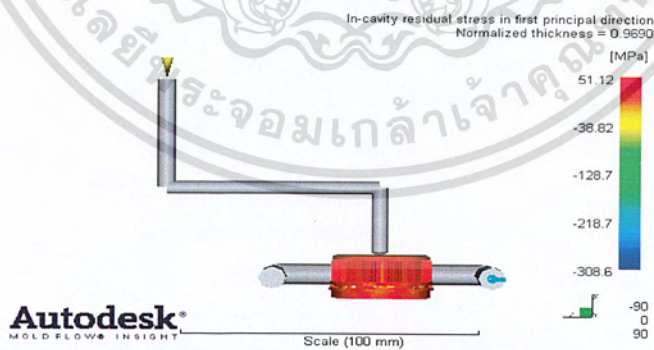
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 148 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 30



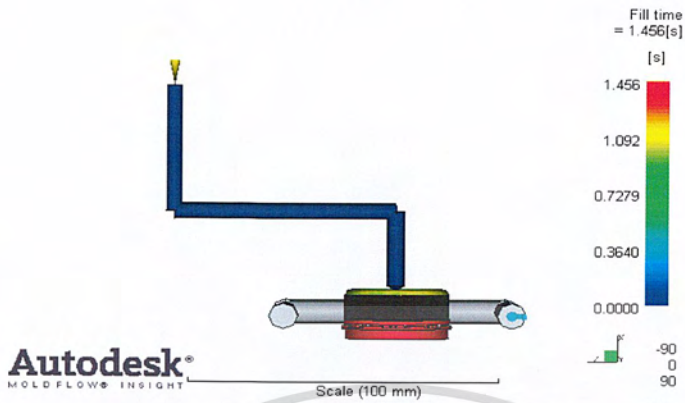
รูปที่ ผค 149 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 30



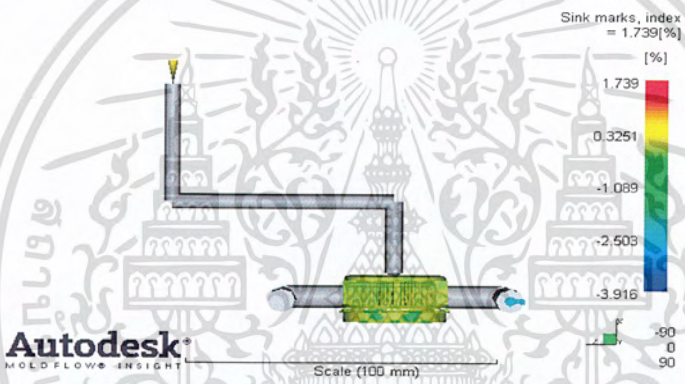
รูปที่ ผค 150 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 30

ผค51

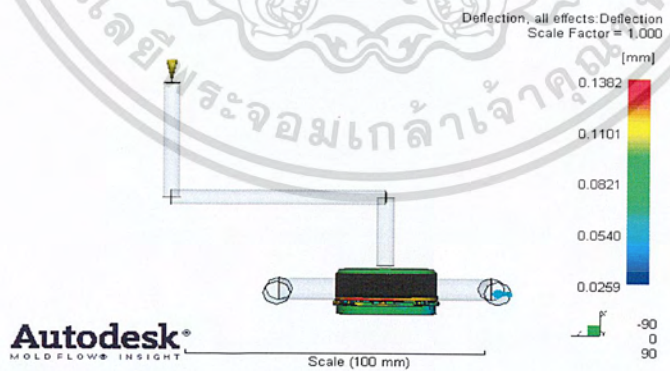
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



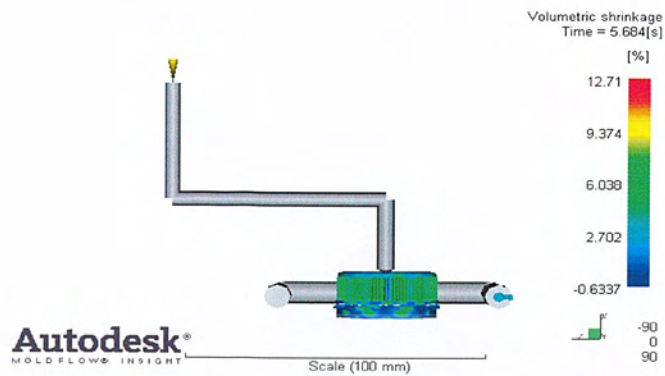
รูปที่ ผค 151 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 31



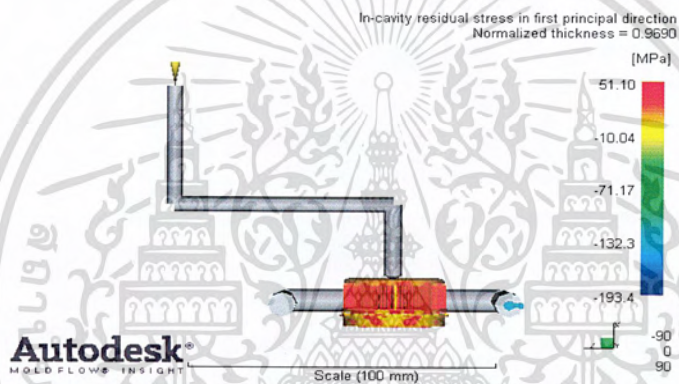
รูปที่ ผค 152 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 31



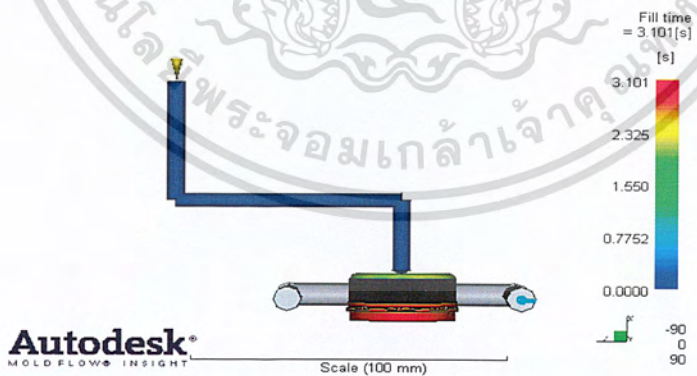
รูปที่ ผค 153 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 31



รูปที่ ผค 154 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 31



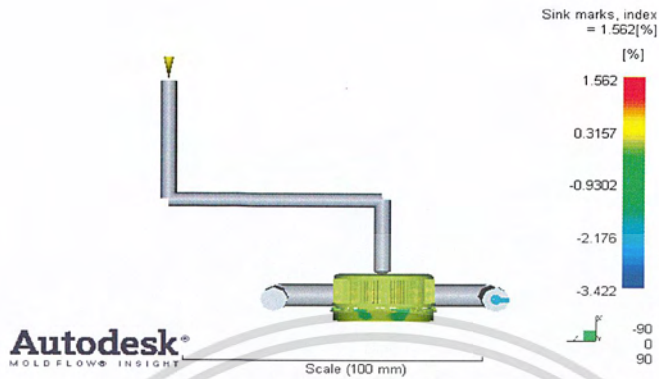
รูปที่ ผค 155 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 31



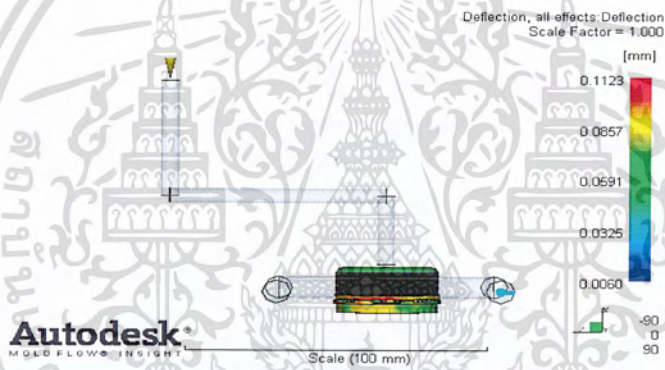
รูปที่ ผค 156 ผลการทดลองการฉีดเต็มแบบของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 32

ผค53

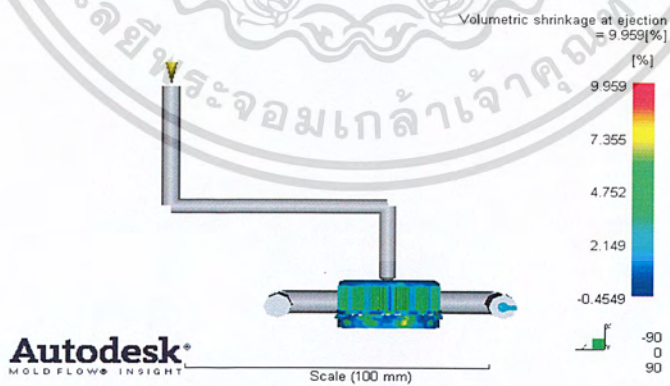
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 157 ผลการทดลองการยุบตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 32



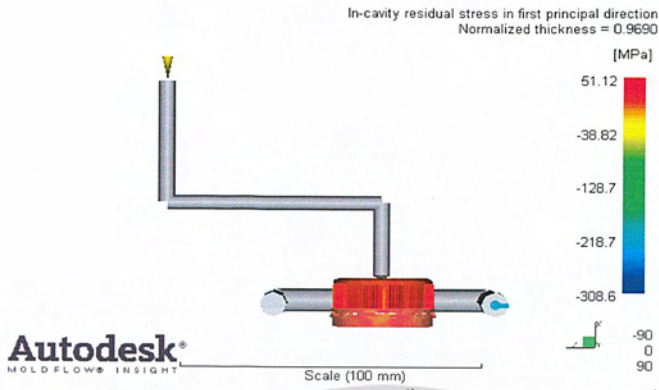
รูปที่ ผค 158 ผลการทดลองการโก่งตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 32



รูปที่ ผค 159 ผลการทดลองการหดตัวของชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 32

ผค54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 160 ผลการทดลองความเค้นตกค้างในชิ้นงานฝาขวดพลาสติก ครั้งที่ 32

