การแก้ไขปัญหาการยุบตัวและการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกโดยใช้แก๊สช่วย

นาย ต่อ ฉวานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2652-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE PROBLEM SOLVING FOR SINK MARK AND WARPAGE OF PRODUCT WITH GAS ASSIST INJECTION MOLDING PROCESS

Mr. Tor Chawanon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2652-6

481574

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ไขปัญหาการยุบตัวและการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกโดยใช้แก๊สช่วย
โดย	นาย ต่อ ฉวานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มล. ศุภกนก ทองใหญ่)

ต่อ ฉวานนท์ : การแก้ไขปัญหาการยุบตัวและการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกโดยใช้แก๊สช่วย (THE PROBLEM SOLVING FOR SINK MARK AND WARPAGE OF PRODUCT WITH GAS ASSIST INJECTION MOLDING PROCESS) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร. อุรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ดร. วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์, 156 หน้า, ISBN: 974-53-2652-6

การผลิตชิ้นงานให้ได้คุณภาพที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างอาทิเช่น การออกแบบลักษณะของชิ้นงานเพื่อสามารถผ่านมาตรฐานการทดสอบต่างๆที่กำหนด, การเลือกใช้วัสดุและกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมาะสม ปัจจุบันการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีข้อดีคือได้ชิ้นงานที่มีขนาดตามที่ต้องการ, ชิ้นงานมีคุณภาพและประหยัดต้นทุนการผลิต แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนามากๆ จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก่อให้เกิดการยุบตัวและการโก่งตัวของชิ้นงาน (Sink Mark and Warpage)

จากที่ผ่านมาทางบริษัทฯ ประสบปัญหาจากการผลิตชิ้นงานที่จับมือภายในรถยนต์ (Hand Grip) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีความหนามากก่อให้เกิดการยุบตัวบริเวณชิ้นงานขึ้น, การปรับตั้งค่าสภาวะต่างๆ ของเครื่องฉีดกระทำได้ยากส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นเหตุจูงใจที่จะนำเทคโนโลยีการฉีดพลาสติกโดยใช้แก๊สช่วย (Gas-Assist Injection Process) เข้ามาแก้ไขปัญหาดังกล่าว

การวิจัยครั้งนี้ได้จำลองชิ้นงานที่จับมือภายในรถยนต์ (Hand Grip) มาใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาถึงสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการยุบตัวและการโก่งตัวของชิ้นงาน (Sink Mark and Warpage) ดังนี้ อุณหภูมิพลาสติกหลอม (Melt Temperature), ปริมาณพลาสติกหลอม (Shot Size), เวลาหน่วง (Delay time), เวลาการฉีดแก๊ส (Gas time), เวลาการรักษาความดันแก๊ส (Gas Hold time), แรงดันแก๊ส (Gas Pressure) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) จากผลของสภาวะดังกล่าวนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือปริมาตรของแก๊ส (Gas Volume), ความหนาตกค้างของชิ้นงาน (Residual Wall Thickness), ค่าการโก่งตัวและยุบตัวของชิ้นงาน (Warpage and Sink Mark) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการโก่งตัวและการยุบตัวของชิ้นงานมีผลจากการถ่ายเทความร้อนภายในแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม อีกทั้งจากการออกแบบชิ้นงานที่ไม่ถูกต้อง

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต	ต่อ ฉวานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2548	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

4571419621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: SINK MARK AND WARPAGE

TOR CHAWANON : THE PROBLEM SOLVING FOR SINK MARK AND WARPAGE OF PRODUCT WITH GAS ASSIST INJECTION MOLDING PROCESS. THESIS ADVISOR : URA PARNCHAROEN, ASSOC.PROF. Dr., THESIS COADVISOR : WUTTIPONG RUNGSEESANTIVANON, Dr., 156 PAGES. ISBN: 974-53-2652-6

To produce a good qualitative product depends upon many factors such as the design of its characteristics to meet the assigned standards and the selectivity of materials and procedures of the appropriate Injection Process. At present injection by an injection procedure is popular as its outstanding advantages are that the product's size will meet the producer's requirement, the product will be in a good quality, and the produced capital will be saved. However, Injection process which is very thick will have an effect towards its quality and cause sink mark and warpage.

In the past, the company has been faced with the problems concerning the production of hand grip which has been very thick and therefore has caused sink mark around. Also, the difficulty in adjusting the injector's conditions has been considered a problem and this has undoubtedly increased the produced capital. Accordingly, Gas-Assist Injection Process is perceived as a good way to solve all the problems.

This research has imitated the model of hand grip for this experiment to study about the conditions affecting to sink mark and warpage. The conditions as stated are as follows: melt temperature, shot size, delay time, gas time, gas hold time, gas pressure, and mold temperature. The result of the conditions can be analyzed to find out their relationships of gas volume, residual wall thickness, and warpage and sink mark. The analysis shows that sink mark and warpage have been affected from the inappropriate heat interchange and from the designing of the product.

Department..... Chemical Engineering	Student's.....
Field of study..... Chemical Engineering	Advisor's.....
Academic year..... 2548	Co-advisor's.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. อุรา ปานเจริญ และ ดร. วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาตรวจสอบความถูกต้อง ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพิ่มเติม

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องฉีดพลาสติกโดยใช้แก๊สช่วยในการวิจัยครั้งนี้ และขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1
   1.1 มูลเหตุจูงใจ 1
   1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 1
   1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 1
   1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 2
2. การหดตัวและการโก่งตัวของชิ้นงาน (Shrinkage and Warpage) 3
   2.1 ความรู้เบื้องต้นการหดตัวและการโก่งตัว (Shrinkage and Warpage) 3
      2.1.1 การหดตัวและการโก่งตัวของชิ้นงาน 3
      2.1.2 การหดตัวและสภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงาน 3
      2.1.3 การฉีดและการอัดแน่นพลาสติกหลอมเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold Filling and Packing) 4
      2.1.4 แรงดันและเวลามีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน 5
         2.1.4.1 การหดตัวใกล้ช่องทางเข้าแม่พิมพ์ (Shrinkage near the Gate) 5
         2.1.4.2 การหดตัวที่ตำแหน่งสิ้นสุดการไหลของพลาสติกหลอม 5
      2.1.5 การไหลของพลาสติกหลอมที่ความร้อนไม่คงที่ 5
   2.2 ปัจจัยพื้นฐานของการหดตัวและการโก่งตัวของชิ้นงาน 6
      2.2.1 สาเหตุของการหดตัว 6
         2.2.1.1 การหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage) 6
            2.2.1.1.1 แรงดันการฉีดพลาสติกหลอม (Pressure) 6
            2.2.1.1.2 คุณสมบัติความเป็นผลึกของพลาสติก (Crystallinity) 8
         2.2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงเส้นและเชิงปริมาตร 8
            2.2.1.2.1 การผ่อนคลายความเค้น (Stress Relaxation) 8

บทที่ หน้า

2.2.1.2.2 ทิศทางการไหล (Orientation) 9
2.2.1.3 สรุป 10
2.2.2 สาเหตุที่ก่อให้เกิดการโก่งตัวของชิ้นงาน 11
2.2.2.1 ผลจากทิศทางการไหล 11
2.2.2.2 ผลจากพื้นที่การหดตัว 11
2.2.2.3 ผลจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 12
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลและพื้นที่การหดตัวต่อการโก่งตัว 12
2.3 การออกแบบชิ้นงาน 14
2.3.1 การเลือกใช้วัสดุ 14
2.3.2 ความหนาของชิ้นงาน 15
2.3.2.1 พลาสติกที่มีโครงสร้างผลึก 15
2.3.2.2 พลาสติกที่มีโครงสร้างอสัญฐาน 15
2.3.2.3 การใช้ความหนาควบคุมการหดตัวของชิ้นงานใกล้กับทางเข้าของพลาสติกหลอม 16
2.3.2.4 การใช้ความหนาควบคุมการหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงการไหลและพื้นที่การหดตัว 16
2.3.3 ตำแหน่งทางเข้าและขนาดทางวิ่งพลาสติกหลอม 17
2.3.4 สภาวะของแม่พิมพ์ (Molding Condition) 19
2.3.4.1 กฎเกณฑ์การออกแบบสำหรับการหดตัวเชิงปริมาตร 19
2.3.4.2 การหดตัวเชิงปริมาตรที่คงที่และยอมรับได้ 20
2.3.4.3 รอยยุบตัวน้อยที่สุด (Minimizing Sink Mark) 20
2.3.4.4 อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) 20
2.3.4.5 ผลของสภาวะแม่พิมพ์ต่อทิศทางการไหลของพลาสติกหลอม 20
2.3.4.6 อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) 21
2.3.4.7 การรักษาความดัน (Holding Pressure) 21
2.3.5 ผังทางวิ่งระบบหล่อเย็น 21
3. ความรู้เบื้องต้นของกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 23
3.1 ประวัติและพัฒนาการของกระบวนการ 23
3.2 กระบวนการฉีดเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน 24
3.3 เทคนิคของกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 30
3.3.1 เทคนิคแบบฉีดพลาสติกหลอมไม่เต็มแม่พิมพ์ 30
3.3.1.1 กระบวนการฉีดแก๊สแบบทั่วไป 30
3.3.1.1.1 กระบวนการให้แก๊สเข้าที่หัวฉีดติดกับเครื่องฉีด 30

บทที่ หน้า

3.3.1.1.2 กระบวนการให้แก๊สเข้าที่ช่องลำเลียง 31
3.3.1.1.3 กระบวนการให้แก๊สผ่านเข้าแม่พิมพ์โดยตรง 32
3.3.1.2 กระบวนการฉีดแก๊สแบบพิเศษ 32
3.3.1.2.1 กระบวนการฉีดไหลล้นแม่พิมพ์ 32
3.3.1.2.2 กระบวนการฉีดไหลย้อนกลับ 34
3.3.1.2.3 กระบวนการฉีดโดยผลักดันแกน 35
3.3.2 เทคนิคแบบฉีดพลาสติกหลอมเต็มแม่พิมพ์ 36
3.4 การควบคุมการฉีดแก๊ส 37
3.4.1 กระบวนการควบคุมด้วยแรงดัน 37
3.4.2 กระบวนการควบคุมด้วยปริมาตร 37
3.5 เครื่องมือและปกรณ์สำหรับกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 38
3.5.1 เครื่องฉีดพลาสติก 38
3.5.2 ชุดสร้างความดันสำหรับแก๊ส 38
3.5.2.1 ระบบการควบคุมโดยปริมาตร 39
3.5.2.2 ระบบชุดสร้างความดันอย่างต่อเนื่อง 39
3.5.3 การควบคุมความดันแก๊ส 40
3.5.3.1 หน่วยย่อย (Module) ควบคุมความดันแก๊ส 40
3.5.3.1.1 หน่วยย่อยควบคุมที่อยู่กับที่ 40
3.5.3.1.2 หน่วยย่อยควบคุมที่เคลื่อนที่ได้ 40
3.5.3.2 ชุดควบคุมด้วยระบบมือถือ 41
3.5.4 ชนิดของหัวฉีดแก๊ส 41
3.5.4.1 ผ่านหัวฉีดพลาสติกหลอม 42
3.5.4.2 ผ่านระบบช่องลำเลียง 44
3.5.5 ชุดดึงแก๊สออก 45
3.5.6 ระบบช่องลำเลียงร้อน 45
3.6 แก๊สที่ใช้สำหรับกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 45
3.7 พลาสติกที่จะใช้กับกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 46
3.8 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย 47
3.9 ข้อจำกัดในการออกแบบ (Design Consideration) 48
3.10 การประยุกต์ใช้งาน 51
3.11 การพัฒนาและความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นงาน 53

บทที่ หน้า

4. การทดลอง 56
4.1 พลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน (Materials) 56
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ (Instruments) 56
4.3 สภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงาน (Injection Condition) 58
4.3.1 สภาวะของเครื่องฉีดพลาสติก 58
4.3.2 สภาวะแวดล้อมอ้างอิงในการขึ้นรูปชิ้นงาน 59
4.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน (Injection Molding) 59
4.5 การหาค่าคุณสมบัติของชิ้นงาน (GAIM Measuring Method) 59
4.5.1 การวัดปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน (Gas Volume) 60
4.5.2 การวัดการโก่งตัวของชิ้นงาน (Warpage Deformation) 61
4.5.3 การวัดความหนาตกค้างและการยุบตัวของชิ้นงาน
(Residual Wall Thickness and Sink Mark) 61
5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 64
5.1 การวัดปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 64
5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอม 64
5.1.2 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอม 65
5.1.3 อิทธิพลของเวลาหน่วง 66
5.1.4 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊ส 67
5.1.5 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดัน 68
5.1.6 อิทธิพลของแรงดันแก๊ส 70
5.1.7 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ 70
5.2 การวัดความหนาตกค้างของชิ้นงาน 71
5.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอม 72
5.2.2 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอม 73
5.2.3 อิทธิพลของเวลาหน่วง 74
5.2.4 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊ส 75
5.2.5 อิทธิพลของเวลารักษาความดัน 76
5.2.6 อิทธิพลของแรงดันแก๊ส 78
5.2.7 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ 78
5.3 การวัดปริมาณการยุบตัว 79
5.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอม 79
5.3.2 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอม 83

บทที่ หน้า

5.3.3 อิทธิพลของเวลาหน่วง 86
5.3.4 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊ส 89
5.3.5 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดัน 92
5.3.6 อิทธิพลของแรงดันแก๊ส 98
5.3.7 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ 101
5.4 การวัดค่าการโก่งตัวของชิ้นงาน 104
5.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอม 104
5.4.2 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอม 106
5.4.3 อิทธิพลของการหน่วงเวลา 107
5.4.4 อิทธิพลของเวลาในการฉีดแก๊ส 109
5.4.5 อิทธิพลของเวลาการรักษาแรงดันแก๊ส 110
5.4.6 อิทธิพลของความดันแก๊ส 112
5.4.7 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ 113
6. สรุปผลการวิจัย 115
6.1 ปริมาตรของแก๊สภายในชิ้นงาน 115
6.2 ความหนาตกค้างของชิ้นงาน 115
6.3 ปริมาณการยุบตัวของชิ้นงาน 116
6.4 การโก่งตัวของชิ้นงาน 116
6.5 สภาวะอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด 117
6.6 แนวทางงานวิจัยที่น่าดำเนินงานต่อ 118
รายการอ้างอิง 119
ภาคผนวก 121
ภาคผนวก ก. รายละเอียดสิทธิบัตรของ Ernst Friederich 122
ภาคผนวก ข. คุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกในงานวิจัย 128
ภาคผนวก ฃ. สภาวะต่างๆ ในการทดลอง 130
ภาคผนวก ค. ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 135
ภาคผนวก ค. ภาพตัดขวางที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่สภาวะเปลี่ยนแปลงไป 150
ภาคผนวก ฆ. วิธีการใช้โปรแกรมการวัดค่าต่างๆ 152
ฆ.1 การวัดค่าการโก่งตัวของชิ้นงาน (Warpage) 152
ฆ.2 การวัดค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน (RWT) และการยุบตัวของชิ้นงาน (Sink Mark) 153
ฆ.3 การแปลงหน่วย 155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 156

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการ GAIM	46
4.1	แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัย	56
ฆ.1	แสดงสภาวะต่างๆ ในการตั้งค่าเครื่องฉีด	131
ฆ.2	แสดงสภาวะของการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดลอง	133
ค.1	แสดงค่าปริมาตรของแก๊สที่ได้จากการทดลอง	136
ค.2	แสดงค่าความหนาตกค้าง (RWT) ที่ได้จากการทดลอง	140
ค.3	แสดงค่าการยุบตัว (Sink Mark) ที่ได้จากการทดลอง	143
ค.4	แสดงค่าการโก่งตัว (Warpage) ที่ได้จากการทดลอง	146

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะต่างๆ ต่อการหดตัวของชิ้นงาน	3
2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแรม (Ram) และแรงดัน	4
2.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน, ปริมาตร และอุณหภูมิ	7
2.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิของพลาสติกอสัญฐานและพลาสติกที่มีผลึก	7
2.5	แสดงทิศทางการหดตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์	9
2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและทิศทางการไหลของพลาสติกหลอม	10
2.7	แสดงผลจากพื้นที่การหดตัว (Area Shrinkage)	11
2.8	แสดงการโก่งตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	12
2.9	แสดงการโก่งตัวของแผ่นดิสก์ชนิดโดมและอานม้า	13
2.10	แสดงแผนภาพแสดงปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติก	14
2.11	แสดงการควบคุมการโก่งตัวของชิ้นงานด้วยความหนา	17
2.12	แสดงตำแหน่งทางเข้า (Gate) และการไหลจากจุดศูนย์กลาง (Centroids)	18
2.13	แสดงการออกแบบระบบหล่อเย็น	21
3.1	แสดงกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วยของนาย Ernst Friendrich	24
3.2	แสดงการไหลของแก๊สผ่านพลาสติกหลอม	25
3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาตกค้างของชิ้นงานและระยะทางการไหลของแก๊ส	25
3.4	อิทธิผลของความแตกต่างของความหนืดของพลาสติกหลอมและของแก๊ส	26
3.5	กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน	27
3.6	แสดงการฉีดแก๊สหลายช่องทาง	28
3.7	แสดงแม่พิมพ์ที่มีหลายชิ้นงานต่อเข้ากับหัวฉีดแก๊สหลายช่องทาง	29
3.8	แสดงกระบวนการ HELGA	29
3.9	แสดงการฉีดแก๊สผ่านหัวฉีดที่ติดกับเครื่องฉีด	31
3.10	แสดงการฉีดแก๊สผ่านระบบช่องลำเลียงพลาสติกหลอม	31
3.11	แสดงการฉีดแก๊สเข้าสู่ช่องแม่พิมพ์โดยตรง	32
3.12	กระบวนกรฉีดไหลล้นแม่พิมพ์ (Overflow Cavity Process)	33
3.13	แสดงรอยคลื่นบนชิ้นงาน (Switch Over mark)	33
3.14	แสดงการยุบตัวของชิ้นงาน (Sink Mark)	33
3.15	กระบวนการฉีดไหล้อนกลับ (Melt – Pushback Process)	35
3.16	กระบวนการฉีดโดยผลักดันแกน (Core–Pull Process)	36

รูปที่ หน้า

3.17	กระบวนการฉีดพลาสติกหลอมเต็มแม่พิมพ์ (Full-Shot Molding)	36
3.18	กระบวนการควบคุมแก๊สด้วยแรงดัน (Gas Pressure-Control Process)	37
3.19	กระบวนการควบคุมแก๊สด้วยปริมาตร (Gas Volume-Control Process)	38
3.20	แสดงเครื่องฉีดสำหรับกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย	38
3.21	เครื่องมือควบคุมแรงดันโดยปริมาตร (Volume–Controlled)	39
3.22	ชุดสร้างความดันแก๊ส (Compressor)	39
3.23	หน่วยย่อยควบคุมความดันแก๊สที่อยู่กับที่	40
3.24	หน่วยย่อยควบคุมความดันแก๊สที่เคลื่อนที่ได้	41
3.25	ชุดควบคุมด้วยระบบมือถือ	41
3.26	แสดงตำแหน่งการติดตั้งของหัวฉีดแก๊สบริเวณหัวฉีดพลาสติกหลอม	42
3.27	หัวฉีดแบบเปิด	42
3.28	หัวฉีดแบบปิด	43
3.29	ลักษณะทางวิ่ง (Runner) ของกระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วย	43
3.30	หัวฉีดที่ฉีดเข้าแม่พิมพ์แบบอยู่นิ่งสำหรับการฉีดแก๊สผ่านก้านแยกไหลหรือเข้าแม่พิมพ์โดยตรง	44
3.31	แสดงการไหลของพลาสติกหลอมที่มาบรรจบกัน (Weld line)	49
3.32	แสดงปรากฏการณ์แยกไหลคล้ายนิ้วมือ (Gas Fingering)	49
3.33	แสดงการไหลของแก๊สผ่านบริเวณมุมของชิ้นงาน	50
3.34	แสดงผลของการใช้กระบวนการฉีดโดยใช้แก๊สช่วยที่บริเวณโครงค้ำ	51
3.35	แสดงตัวอย่างชิ้นงานรูปแท่ง	52
3.36	แสดงด้านล่างของโต๊ะที่ใช้ในสวน (Garden table)	52
3.37	แสดงกระบวนการ External Gas Molding	54
3.38	แสดงชิ้นงานจากกระบวนการฉีดโดยใช้น้ำช่วย	55
4.1	แสดงเครื่องฉีดแก๊สที่ใช้ในการทดลอง	57
4.2	แสดงชุดฉีดแก๊สที่ใช้ในการทดลอง	57
4.3	แสดงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง	58
4.4	แสดงชุดควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง	58
4.5	เครื่องมือวัดปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน	60
4.6	แสดงตำแหน่งและจุดวัดต่างๆ ของการโก่งตัวของชิ้นงาน	61
4.7	แสดงตำแหน่งการตัดของชิ้นงาน	62
4.8	แสดงวิธีการวัดค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน	62
4.9	ลักษณะการวัดการยุบตัวของชิ้นงาน	63

รูปที่ หน้า

5.1 อิทธิพลอุณหภูมิของพลาสติกหลอมต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 65
5.2 อิทธิพลปริมาณของพลาสติกหลอมต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 66
5.3 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 67
5.4 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 68
5.5 รูปแบบการควบคุมความดันของการฉีดด้วยแก๊ส (Pressure Controlled Gas Injection) 68
5.6 รูปแบบความดันที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ 69
5.7 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 69
5.8 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 70
5.9 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อปริมาตรแก๊สภายในชิ้นงาน 71
5.10 แสดงตำแหน่งการวัดความหนาตกค้างของชิ้นงาน (RWT) 72
5.11 แสดงตำแหน่งความหนาที่ทำการวัดค่า 72
5.12 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 73
5.13 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 74
5.14 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 75
5.15 แสดงร่องรอยการไหลของพลาสติกหลอม 75
5.16 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 76
5.17 อิทธิพลของเวลารักษาความดันของแก๊สต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 77
5.18 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 78
5.19 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อความหนาตกค้างของชิ้นงาน 79
5.20 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 80
5.21 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 81
5.22 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 82
5.23 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 83
5.24 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 84
5.25 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 85
5.26 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 86
5.27 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 87
5.28 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 88
5.29 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 89
5.30 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 90
5.31 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 91
5.32 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 92

รูปที่ หน้า

5.33 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 93
5.34 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน (แรงดัน 100 บาร์) 94
5.35 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 96
5.36 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน (แรงดัน 150 บาร์) 97
5.37 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 98
5.38 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 99
5.39 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 100
5.40 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อการยุบตัวของชิ้นงาน 101
5.41 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อค่าการยุบตัวของชิ้นงานที่หน้าตัดต่างๆ 102
5.42 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อค่าความหนาตกค้างของชิ้นงาน 103
5.43 แสดงความหนาตกค้างของชิ้นงาน (RWT) ที่ตำแหน่งการตัด 2 และ 4 105
5.44 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 105
5.45 อิทธิพลของอุณหภูมิพลาสติกหลอมต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 106
5.46 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 107
5.47 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกหลอมต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 107
5.48 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 108
5.49 อิทธิพลของเวลาหน่วงต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 108
5.50 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 109
5.51 อิทธิพลของเวลาการฉีดแก๊สต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 109
5.52 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน (แรงดันแก๊ส 100 บาร์) 110
5.53 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 (แรงดัน 100บาร์) 111
5.54 อิทธิพลของเวลารักษาแรงดันแก๊สต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 (แรงดัน 150บาร์) 112
5.55 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 113
5.56 อิทธิพลของแรงดันแก๊สต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 113
5.57 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อการโก่งตัวของชิ้นงาน 114
5.58 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อความหนาตกค้าง (RWT) ที่ตำแหน่งวัด 2 และ4 114
ข.1 แสดงคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติก 129
ค.1 แสดงภาพตัดขวางที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานที่สภาวะเปลี่ยนแปลงไป 151
ฆ.1 แสดงภาพจากการสแกนชิ้นงาน 152
ฆ.2 แสดงการสร้างเส้นอ้างอิง 153

รูปที่ หน้า

ฆ.3 แสดงตำแหน่งการวัดการโก่งตัวของชิ้นงาน..... 153
ฆ.4 แสดงภาพสแกนจากการตัดชิ้นงาน..... 154
ฆ.5 แสดงเส้นอ้างอิงในการวัดค่า..... 154
ฆ.6 แสดงตำแหน่งการวัดค่าความหนาตกค้างและการยุบตัว..... 155