การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19
19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดสงขลา

การศึกษาการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด

Study on the Volumetric Shrinkage of Injection Molded Plastic Product

สุภกิจ ขาวเนตร* วิชิต บัวแก้ว ไพศาล นาผล

โครงการความร่วมมือทางวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
กับ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โทรศัพท์ (662) 664 1000 ต่อ 2065 โทรสาร (6637) 322 609 E-mail: suphakij@swu.ac.th*

Subhakij Khaownetr* Vichit Buakaew Paisarn Naphon

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
and Academy Jointed Graduated Program, Department of Mechanical Engineering, Chulachomklao Royal Military, Thailand.
Tel: (662) 664 1000 ext. 2065 Fax: (6637) 322 609 Email: suphakij@swu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอการศึกษาทั้งการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ และวิธีทดลองเกี่ยวกับการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นพิมพ์ส้อม (fork) ทำจากวัสดุ S45C ขนาด 250x200x200 มิลลิเมตร ใช้เม็ดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ โพลิโพรพิลีน (PP) BASELL POLYOLEFINS เกรด MOPLEN HP500N และ โพลิสไตรีน (PS) MITSUBISHI CHEMICAL เกรด DIAREX HIPS H350 เป็นวัตถุดิบในการฉีด ใช้เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 220 S ซึ่งมีค่าการฉีดต่อครั้งโดยน้ำหนักสูงสุด (Maximum shot capacity) 12 กรัม แรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด (Maximum clamping force) 150 กิโลนิวตัน ในการวิเคราะห์ได้ทำการศึกษาในช่วงการย้ำ (Packing) โดยศึกษาถึงผลของความดันย้ำ (Holding Pressure) และ เวลาย้ำ (Holding Times) เท่ากับ 100-500 บาร์ และ 0-10.5 วินาที ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อเข้าสู่ช่วงการย้ำ (Packing) การเพิ่มความดันย้ำ (Holding Pressure) และ เวลาย้ำ (Holding Times) ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงเกิดการยุบตัว (Sink mark) น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์และวิธีทดลอง พบว่าทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: การหดตัวเชิงปริมาตร, การยุบตัว, การย้ำ, ความดันย้ำ, เวลาย้ำ

Abstract

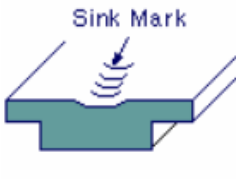
In this research, the experiment and calculation by finite element method on the shrinkage of the injection molded plastic product are presented. The essentiality of mold used in the experiment is S45C material, folk in geometry and outer dimension of 250x200x200 mm. Polypropylene: BASELL Polyolefins, MOPLEN HP500N grade and Polystyrene: MITSUBISHI CHEMICAL, DIAREX HIPS H350 grade are used as working fluids. The injection molding machine is ARBURG model ALLROUNDER 220S with the maximum shot capacity and maximum clamping force of 12 grams and 150kN, respectively. In the analysis, the packing process is considered. The test runs are performed at holding pressure and holding time ranging between 100 and 500 bar, and between 0 and 10.5 second, respectively. It is found that the volumetric shrinkage tends to decrease as the holding pressure and holding time increase. This results in the sink mark also decrease. The results obtained from the experiment and those from the finite element method are reasonable agreement.

Keywords: Volumetric Shrinkage, Sink Mark, Packing, Holding Pressure, Holding Times

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดที่มีคุณภาพดีนั้นบ่งบอกถึง ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองต่อข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งมีคุณสมบัติครบถ้วนตามประโยชน์ใช้สอย การหดตัวเชิงปริมาตร

(Volumetric Shrinkage) ก็เป็นปัญหาหนึ่งที่มักพบในผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพลดลง ทั้งนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิหลอมละลายสู่อุณหภูมิภายนอกมีผลทำให้เกิดการบิดงอ รอยยุบ ขนาดเล็กลง โพรงอากาศภายใน อีกทั้งความหนาของผนังและการย้ำไม่เพียงพอ ยังเป็นสาเหตุสนับสนุนให้มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1 แสดงการยุบตัวของผลิตภัณฑ์

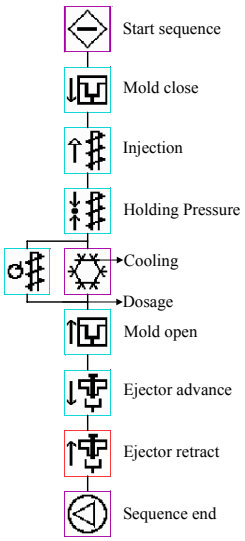
Du-Soon Choi, Yong-Tack Im (2000) [1] ศึกษาการทำนายการหดตัวและการบิดงอสำหรับพิจารณาความเค้นตกค้าง(Residual stress) โดยการจำลองกระบวนการฉีด ความแม่นยำในการทำนายการหดตัวและการบิดงอในชิ้นงานฉีด จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง P.Posttawa, J. Koszkul (In Press) [2] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงหดตัวและเชิงน้ำหนักในชิ้นงานฉีด พิจารณาตามช่วงของกระบวนการฉีด โดยประเมินผลการทดลองจากกระบวนการฉีดของชิ้นงาน ค่าที่ได้จากการทดลองแสดงว่าการควบคุมค่าการหดตัวควรให้ความสำคัญกับความดันในการปิดแม่พิมพ์ควบคู่ไปกับพารามิเตอร์อื่นๆ ในกระบวนการผลิต Haihong Xu, John Wysocki, David Kazmer (In Press) [3] ศึกษาการหดตัวของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปทางความร้อน โดยสร้างซอฟแวร์สำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อใช้ทำนายค่าการหดตัวสำหรับกระบวนการขึ้นรูปทางความร้อน รวมทั้งกระบวนการผลิตอื่นๆ การวิเคราะห์จะพิจารณาจากทฤษฎีทางความร้อน สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์ (2545) [4] ศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาตัวแปรและปัญหาที่ทำให้เกิดรอยประสาน (Weld line) และ รอยยุบ (Sink mark) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลว ที่เงื่อนไขต่างๆกัน

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการบิดงอและการหดตัวของผลิตภัณฑ์ แต่ยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหดตัวเชิงปริมาตรมากนัก โดยเฉพาะการศึกษาการหดตัวจากชิ้นงานจริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาในประเด็นดังกล่าว โดยทำการคำนวณหาค่าการหดตัวของชิ้นงานบนสมมุติฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

1. เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 220 S
2. แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกพิมพ์ส้อม S45C ขนาด 250x200x200 mm
3. เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) และ โพลิสไตรีน (PS)

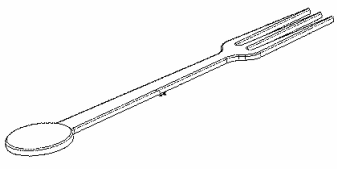


รูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นของกระบวนการฉีดพลาสติก

2.2 วิธีการทดลอง

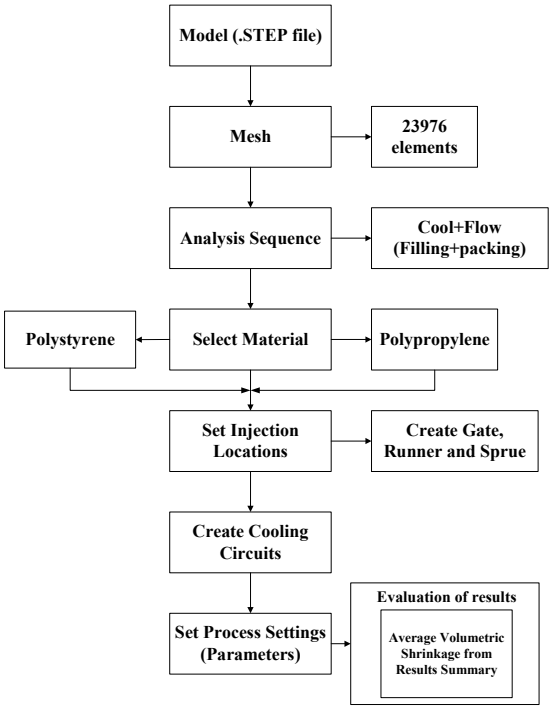
1. อบเม็ดโพลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 90°C และโพลิสไตรีนที่ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำไปใส่ในถังกรวย (Hopper) โดยทำการทดลองแยกกัน
3. ตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆโดยเริ่มจากตั้งค่าอุณหภูมิหลอมละลายพลาสติกที่ 240°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40°C
4. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในช่วงการฉีด (Filling) ได้แก่ ความดันฉีด 500 bar อัตราการฉีด 5 ccm/s โดยใช้เวลาฉีด 3 s ในการสลับจากความดันฉีดเป็นความดันย้ำ
5. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในช่วงการย้ำ (Packing) โดยปรับค่าความดันย้ำในช่วง 100-500 bar และใช้เวลาย้ำในช่วง 0-10.5 s
6. ในช่วงหล่อเย็น (Cooling) ที่มีวงจรเป็นรูปตัวยู 2 channel ขนานกัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 6 mm ตั้งค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 20°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 6.75 l/min และเวลาหล่อเย็น 15 s
7. ทดลองฉีดผลิตภัณฑ์เพื่ออุ่นแม่พิมพ์จนกระทั่งแม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 40°C จึงเริ่มทำการฉีดจริงโดยตั้งรอบการทำงานเท่ากับ 10 cycles
8. เก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 48 hr นำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งมีความละเอียด 0.001 mg
9. บันทึกผลการทดลอง

3. วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิลิเมนต์



รูปที่ 3 แสดง Model 3 มิติ

1. สร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ส้อมรูปทรงสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks 2004
2. บันทึกแฟ้มเป็น STEP file (.STEP)
3. นำแฟ้มแบบจำลองจากโปรแกรม Solidwork 2004 (.STEP) มา Import ในโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0
4. สร้าง Mesh สามเหลี่ยมแบบ Fusion พร้อมตั้งค่า Global edge length เท่ากับ 0.99 mm. มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 17.4
5. Generate Mesh แล้วพบว่าชิ้นงานทั้งชิ้นประกอบด้วย 23976 elements
6. ตั้งลำดับขั้นการวิเคราะห์เป็น Cool+Flow (Cooling, Filling+packing)
7. เลือกเม็ดพลาสติกให้ตรงกับการทดลอง
8. สร้างขนาดและตำแหน่งของรูเข้า (gate) เท่ากับ 2x2x1 mm รูวิ่ง (runner) แบบครึ่งวงกลมที่มี ∅ เท่ากับ 6 mm หนา 3 mm และ sprue มี ∅ เริ่มต้นเท่ากับ 6.5 mm ∅ สิ้นสุดเท่ากับ 3 mm มีความยาว 56 mm
9. สร้างวงจรน้ำหล่อเย็น
10. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในการจำลองกระบวนการฉีด
11. ทำการวิเคราะห์
12. บันทึกผลการวิเคราะห์ Average Volumetric Shrinkage (at ejection)

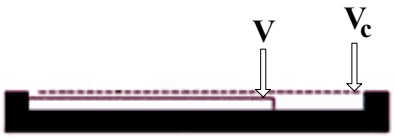


รูปที่ 4 แสดงลำดับสภาวะการทำงานของโปรแกรม Moldflow

โปรแกรม Moldflow จะวิเคราะห์งานฉีดพลาสติกโดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลคุณสมบัติทางด้านไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Analysis) บนเงื่อนไขการฉีด เช่น Injection pressure, Injection rate, Mold temperature และ Melt temperature นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับ Molding Window Analysis ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมและวิธีการพิจารณาการแปลผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการ Cool+Flow (Fill + Pack)

4. ผลและวิเคราะห์ผล

จากวิธีทดลองและวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ สามารถบอกได้ว่า เมื่อทำการทดลองในหนึ่งรอบการทำงาน (Cycle time) ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 33.5 วินาที ต่อผลการทดลองหนึ่งตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พบว่าใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 8000 วินาที เมื่อนำผลการทดลองไปชั่งน้ำหนักหลังจากปลดชิ้นงาน 48 ชั่วโมงแล้วพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 3.2267 และ 2.6732 กรัม ตามลำดับ จากรูปที่ 5 แสดงการหดตัวหลังจากปลดชิ้นงานแล้ว



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการหดตัวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 5 จะได้

$$S_V = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c} \quad (1)$$

V_C ปริมาตรของคาวิตี้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ
V ปริมาตรของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

ผลิตภัณฑ์เริ่มหดตัวและมีขนาดเล็กกว่าคาวิตี้ เมื่อความดันในคาวิตี้ลดลงหลังจาก Gate ปิด ในสภาวะนี้ความดันย้ำไม่สามารถที่จะเติมพลาสติกเข้าไปในคาวิตี้ได้อีกและความดันโดยทั่วไปจะเท่ากับความดันบรรยากาศแต่ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (G) สามารถคำนวณได้จาก

$$G = \frac{V_c}{V_{p=1}} \quad (2)$$

เมื่อทิ้งผลิตภัณฑ์ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ (ความดันบรรยากาศ) การลดลงของอุณหภูมินี้จะทำให้มีการหดตัวมากขึ้นโดยน้ำหนักเท่าเดิม ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ในสมการที่ 2 นี้จะเท่ากับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิบรรยากาศในสมการที่ 3

$$G = \frac{V}{V_{Ta}} \qquad (3)$$

จากสมการที่ 2 และ 3 สามารถคำนวณอัตราส่วนปริมาตรได้

$$\frac{V}{V_c} = \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \qquad (4)$$

ดังนั้นสมการที่ 1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

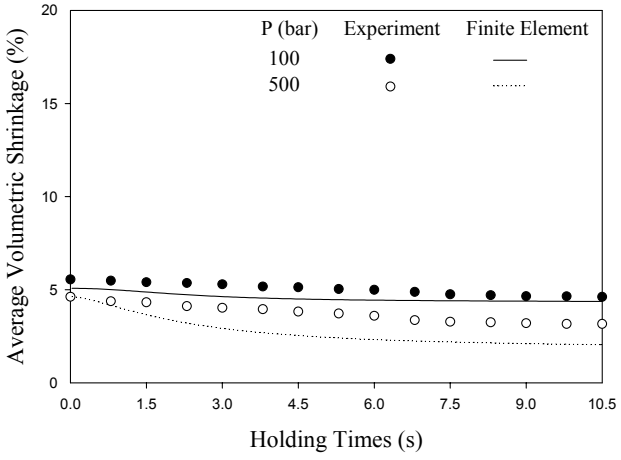
$$S_v = 1 - \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \qquad (5)$$

$V_{p=1}$ คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ (อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ)

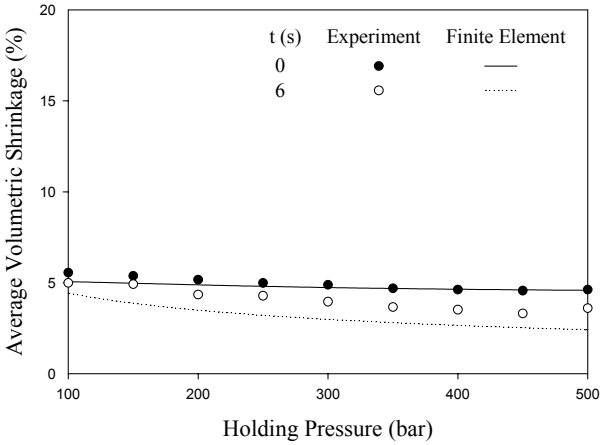
V_{Ta} คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศ

จากสมการที่ 1 ใช้ในการคำนวณหาค่า Average Volumetric Shrinkage ของผลิตภัณฑ์ และกำหนดให้อุณหภูมิหลอมละลายคงที่ (240^{o}C) ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกกับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ถูกปลดออกมาจากแม่พิมพ์นาน 48 ชั่วโมงมีค่าเท่ากัน ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0 แสดงได้ดังนี้

1. โพลิสไตรีน (Polystyrene)

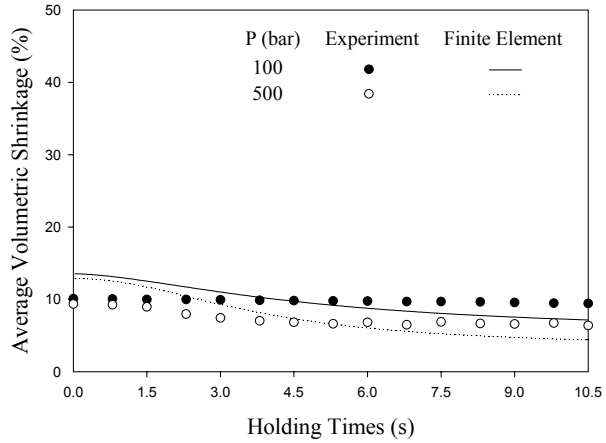


รูปที่ 6 เปรียบเทียบความดันย้ำ

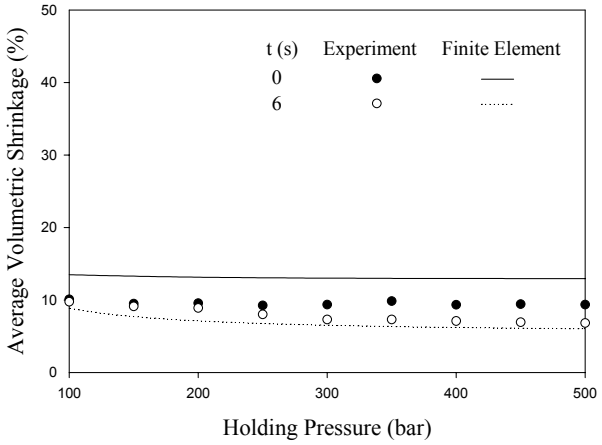


รูปที่ 7 เปรียบเทียบเวลาย้ำ

2. โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความดันย้ำ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบเวลาย้ำ

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0 พบว่าพลาสติกขณะเหลวและเริ่มแข็งตัวจะมีปริมาตรไม่เท่ากัน เนื่องจากขณะเย็นตัวโมเลกุลของพลาสติกจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ให้เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งก็คือการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้น ปริมาณของพลาสติกแข็งจะน้อยกว่าปริมาตรของพลาสติกเหลว ปริมาณและลักษณะการตกผลึกจะขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดพลาสติก สามารถวิเคราะห์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (Average Volumetric Shrinkage) ความดันย้ำ (Holding Pressure) และ เวลาย้ำ (Holding Times) ภายใต้ช่วงการย้ำ (Packing) ได้ดังนี้

เมื่อเพิ่มความดันย้ำ พบว่าโพลิสไตรีนเป็นโพลิเมอร์ชนิดโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) และโพลิโพรพิลีนเป็นโพลิเมอร์ชนิดโครงสร้างเป็นผลึกบางส่วน (Semi-Crystalline) นั้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง ทั้งวิธีทดลองและวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เนื่องจากความดันย้ำที่ใช้นี้จะอยู่ในช่วงของเวลาย้ำ เมื่อความดันย้ำเพิ่มขึ้นเนื้อพลาสติกเหลวที่ยังไม่แข็งตัวจะถูกอัดเข้าแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาตรของชิ้นงานเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับปริมาตรของคาวิตี้ (Cavity) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาตรมีค่าน้อยลง

เมื่อเพิ่มเวลาย้ำ พบว่าโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดนั้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงทั้งสองวิธี เนื่องจากในช่วงเวลานี้สกรูจะอัดค้างไว้ด้วยความดันย้ำ เพื่อชดเชยพลาสติกที่จะหดตัว ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่นานเพียงพอที่ gate จะปิดคือชิ้นงานเริ่มแข็งตัวและไม่สามารถอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปได้อีก

5. สรุป

ช่วงการย้ำเป็นช่วงที่มีความสำคัญมากช่วงหนึ่งในกระบวนการฉีดพลาสติก เมื่อความดันและเวลาย้ำเพิ่มขึ้น พบว่าผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักมากขึ้นและไม่เกิดรอยยุบ แสดงว่าช่วงการย้ำมีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรของโพลิโพรพิลีนมีค่ามากกว่าโพลิสไตรีนในสภาวะเดียวกัน และพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error) เฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนมีค่า 22.15 % โพลิสไตรีนมีค่า 18.5 %

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. สถาพร ชาตาคม รองผู้อำนวยการฝ่ายวิชาการ สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ License โปรแกรม Moldflow Plastic Insight 4.0 ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Du-Soon Choi and Yong-Taek Im, 2000 “Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding” Published by Elsevier Science Ltd. pp. 655-665

[2] P.Posttawa, J. Koszkul (In Press) “Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions” Published by Elsevier Science Ltd.

[3] Haihong Xu, John Wysocki, David Kazmer (In Press) “SHRINKAGE STUDY OF THERMOFORMED PARTS” Published by Elsevier Science Ltd.

[4] สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์, 2545 “การศึกษาการแก้ไขปัญหาของการเกิด Weld line และ Sink mark ในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[5] Gastrow, 1983 “Injection Molds” Hanser Publishers; Munich, Vienna, New York.

[6] W. Michaeli, H. Kaufmann, H. Greif, G. Kretzschmar and R. Bertuleit, 1995 “Training in Injection Molding” Hanser Publishers; Munich, Vienna, New York.