

อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

Effect of Processing Parameters on Wall Thickness Distribution and Residual Stress in Stretch Blow Moldings

นางสาวพัชรินทร์ คุณสมบัติ

อาจารย์ที่ปรึกษา: อ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2549-3429, 0-2549-3420, โทรสาร 0-2549-3422, E-mail: fengntk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบดึงยืด (Stretch Blow Molding Process) โดยปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดหลอดพรีฟอร์ม อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ จากกระบวนการเป่าแบบดึงยืดและกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (Extrusion Blow Molding Process) กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งได้แก่ โปรแกรม B-SIM จากผลการทดลองพบว่า ขนาดหลอดพรีฟอร์ม มีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มและความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังที่เกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม B-SIM แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

คำสำคัญ: การกระจายตัวความหนาของผนัง, ความเค้นตกค้าง, กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

Abstract

The effect of processing parameters on the wall thickness distribution and residual stress in stretch blow moldings was investigated in this work. The processing parameters included the size and temperature of preform, and velocity of stretch rod. In addition, the selected experimental results from stretch blow molding and extrusion blow molding processes were also extensively verified against the simulated results obtained from B-SIM. Both simulated and measured results indicated that the size of preform had significant effect on the

wall thickness of blow molding products in comparison with the changes of preform temperature and velocity of stretch rod. Since the analytical results obtained from computer simulation were in good agreement with the experimental results, therefore it can be used as a valuable tool for the prediction of wall thickness during the blow molding process.

Keywords: Wall Thickness Distribution, Residual Stress, Stretch Blow Molding Process

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำ และขวดน้ำอัดลม มีความจำเป็นต้องพัฒนาองค์ความรู้ และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากมีความต้องการของผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป (Injection Blow Molding Process) และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (Extrusion Blow Molding Process) อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์มีความจำเป็นต้องพัฒนาองค์ความรู้ในการหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งในอุตสาหกรรมยังคงใช้การลองผิดลองถูก ส่งผลให้สูญเสียพลังงาน วัสดุคิป์ รวมไปถึงจนถึงเวลาที่ใช้ในการผลิต

งานวิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของผลิตภัณฑ์ และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดหลอดพรีฟอร์ม และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม B-SIM เพื่อเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบแม่พิมพ์ และการกำหนดสภาวะในการผลิตที่เหมาะสมต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นดกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

3. ขอบเขตการศึกษา

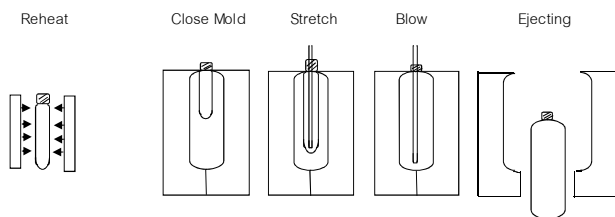
ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเป่าขึ้นรูป แบบดึงยืด ได้แก่ ขนาดหลอดพรีฟอร์ม อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม และความเร็วการเคลื่อนที่ของแกนยืด ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังผลิตภัณฑ์ และความเค้นดกค้างที่เกิดภายในชิ้นงาน

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีร่วมกันระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป และกระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (Single Stage) และแบบสองขั้นตอน (Two Stage) ซึ่งแยกส่วนของกระบวนการผลิตหลอดพรีฟอร์ม และกระบวนการเป่าขึ้นรูปออกจากกันอย่างชัดเจน

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบสองขั้นตอน เริ่มจากฉีดหลอดพรีฟอร์มด้วยกระบวนการฉีด จากนั้นนำหลอดพรีฟอร์มมาให้ความร้อนอีกครั้ง และนำไปเข้าสู่กระบวนการเป่าขึ้นรูป ในส่วนของกระบวนการเป่าขึ้นรูปสามารถเพิ่มขั้นตอนการดึงยืดของหลอดพรีฟอร์มออกในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยช่วงแรกแท่งยืด (Strength Rod) ถูกยืดออกในแนวตั้ง พร้อมกับใช้แรงดันลม เรียกระยะนี้ว่า การให้แรงดันเป่าเริ่มต้น (Pre-blow) และช่วงที่สอง แรงดันในการเป่าถูกเพิ่มขึ้นจนหลอดพรีฟอร์มขยายตัวเต็มแม่พิมพ์ เรียกระยะนี้ว่า การให้แรงดันสุดท้าย (Final-blow) ข้อดีของการยืดตัวในแนวตั้ง ในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความบาง ใส และมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ ทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 1 กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด (บรรเลง, 2553)

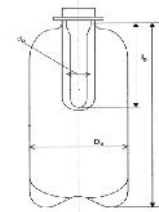
โดยส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์มีการกำหนดอัตราการยืดตัวของหลอดพรีฟอร์มในแนวตั้ง (Axial Direction) และ

อัตราการยืดตัวในแนวรัศมี (Hoop Direction) ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อใช้ในการออกแบบหลอดพรีฟอร์มในกระบวนการผลิต ซึ่งอัตราการยืดตัวในแนวตั้ง ดังแสดงในสมการที่ 1 มีค่าประมาณ 2.00 และอัตราการยืดตัวในแนวรัศมี ดังแสดงในสมการที่ 2 มีค่าประมาณ 4.00

$$ax = L_b/L_p \tag{1}$$

$$rad = D_b/D_p \tag{2}$$

โดยที่	ax	แสดงถึง	อัตราการยืดในแนวตั้ง
	rad	แสดงถึง	อัตราการยืดในแนวรัศมี
	L_b	แสดงถึง	ความยาวของชิ้นงาน
	L_p	แสดงถึง	ความยาวของหลอดพรีฟอร์ม
	D_b	แสดงถึง	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
	D_p	แสดงถึง	เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดพรีฟอร์ม



รูปที่ 2 อัตราการยืดตัวในแนวตั้งและแนวรัศมี (Hugener, 2009)

4.2 กระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

กระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีร่วมกันระหว่างกระบวนการอัดรีด และกระบวนการเป่าขึ้นรูป เริ่มจากอัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวขึ้นรูปที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (Annular Die) ออกมาในลักษณะของท่อกลวงที่เรียกว่า หลอดพรีสัน จากนั้นแม่พิมพ์เคลื่อนที่ไปประกบพรีสัน และให้แรงดันเป่าจนหลอดพรีสันขยายตัวติดแม่พิมพ์ (บรรเลง, 2553)

5. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1. หลอดพรีฟอร์มของขวด PET ขนาด 17 g 20 g และ 34 g
2. เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
3. เครื่องให้ความร้อน
4. เครื่องเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด
5. เครื่องอัดรีด-เป่าขึ้นรูป
6. เครื่องวิเคราะห์ความเค้นดกค้าง

- 7. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน
- 8. โปรแกรม Image Pro Plus
- 9. โปรแกรม Solidworks Version 2010
- 10. โปรแกรม B-SIM Version 2.7 Release 7.00

6. ขั้นตอนการศึกษา

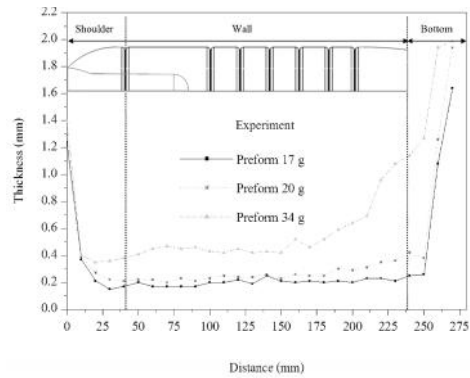
วิธีดำเนินโครงการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการผลิตจริง และการจำลอง เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังที่ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป และวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงเมื่อผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

7. ผลการศึกษา

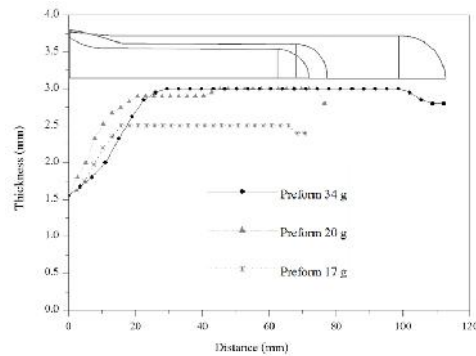
7.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังขวดและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน

ผลการวิเคราะห์และตรวจสอบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืดของหลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g 20 g และ 34 g เมื่อใช้อุณหภูมิในการเป่าขึ้นรูป 80°C และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด 1.92 m/s ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ค่าความหนาผนังมีแนวโน้มลดลงบริเวณคอขวดจนถึงบริเวณไหล่ ขวด หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่ตลอดความยาวของขวด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่บริเวณฐานขวด เมื่อพิจารณาชิ้นงานขนาด 17 g และ 20 g ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ค่าความหนาผนังไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากหลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g และ 20 g มีความยาวและรัศมีใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานขนาด 20 g และ 34 g แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานขนาด 34 g มีความหนาผนังมากกว่าชิ้นงานขนาด 20 g ทั้งนี้ถึงแม้ว่าหลอดพรีฟอร์มมีความหนาผนังที่ใกล้เคียงกัน แต่หลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g มีความยาวรัศมีและขนาดที่มากกว่า ส่งผลให้มีระยะการยืดตัวของหลอดพรีฟอร์มน้อยกว่าทั้งในแนวตั้งและในแนวรัศมี

ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาความเข้มของแท่งสี พบว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g มีความเค้นตกค้างน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากหลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวมากกว่าหลอดพรีฟอร์ม 17 g และ 20 g ทำให้อัตราการยืดตัวของหลอดพรีฟอร์มภายในแม่พิมพ์มีค่าน้อยดังที่กล่าวไว้แล้ว ส่งผลให้มีความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานน้อย



รูปที่ 3 การกระจายตัวความหนาของหลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิในการเป่าขึ้นรูป 80°C และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด 1.92 m/s



รูปที่ 4 การกระจายตัวความหนาผนังของหลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน

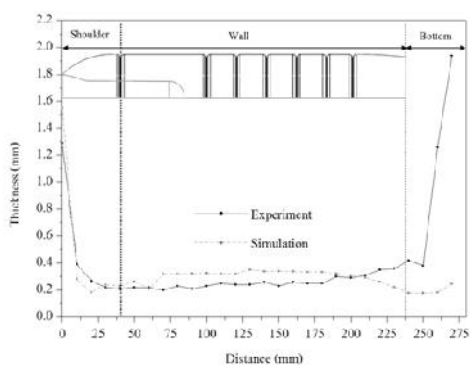


รูปที่ 5 เปรียบเทียบความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานของหลอดพรีฟอร์มขนาด (ก) 17 g (ข) 20 g และ (ค) 34 g

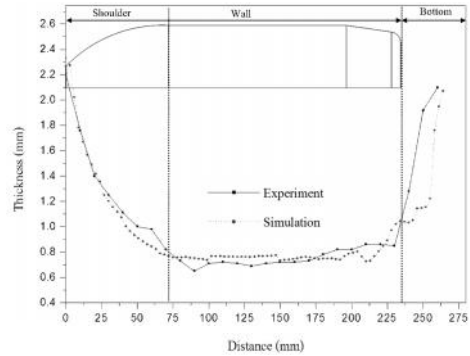
7.2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังขวดที่ได้จากการทดสอบจริง และการจำลอง

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูป เมื่อใช้โปรแกรม B-SIM ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม 80°C ขนาดหลอดพรีฟอร์ม 20 g และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยึดเท่ากับ 1.92 m/s จากการวิเคราะห์ พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องตั้งแต่บริเวณคอขวดถึงไหล่ขวด และตลอดแนวความยาวของขวด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเปรียบเทียบบริเวณฐานขวด แสดงให้เห็นว่า ผลการทดสอบจริงมีความหนาผนังเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม B-SIM ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการผลิตจริง หลอดพรีฟอร์มอยู่ในสถานะคล้ายยาง แต่ในการจำลองของกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัด ใช้แบบจำลอง K-BKZ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสถานะหลอมเหลว ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม B-SIM มีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป ที่อุณหภูมิหลอดพรีสตัน 190°C ขนาด 28 mm ความดัน 1 MPa และผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม B-SIM จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ความหนาผนังตั้งแต่บริเวณคอขวดถึงฐานขวดมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลอง K-BKZ เป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวได้เป็นอย่างดี ซึ่งตรงกับสภาวะในกระบวนการผลิตจริง เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำการจำลองในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปจึงให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังขวดที่ได้จากการทดสอบจริง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้โปรแกรม B-SIM ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัด



รูปที่ 7 เปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังขวดที่ได้จากการทดสอบจริง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้โปรแกรม B-SIM ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

8. สรุปผล

1. เมื่อเพิ่มขนาดของหลอดพรีฟอร์มสูงขึ้น ทำให้ค่าความหนาผนังมีแนวโน้มสูงขึ้น
2. เมื่อหลอดพรีฟอร์มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานลดลง
3. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยึด ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน
4. เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบจริง และการจำลองกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัด พบว่า ผลการจำลองการเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบจริง แต่เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำแล้วที่บริเวณส่วนฐานของขวดให้ผลแตกต่างกับการทดสอบจริง ทำให้ผลการทดสอบจริงและการจำลองไม่สอดคล้องกัน
5. เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบจริง และการจำลองกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป พบว่า ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป มีผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง และมีผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

1. บรรณเลข ศรีนิล. 2553. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 27. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.
2. Hugener, B. 2009. Developing a Low Pressure Blow Molding machine for Demonstration and Production of Plastic Bottle. Master thesis of engineering, Masser University.
3. Levy, S. and Carley, J.F. 1989. Plastics Extrusion Technology Handbook. Industrial Press Inc, New York.