

# แนวทางแก้ไขการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

## Troubleshooting of defect formation in injection-moulded thermoplastic tensile specimens by optical microscopy technique

จริยาวดี ศิริจันทร์<sup>1\*</sup>  
Jariyavadee Sirichantra<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

โพรงอากาศและรอยพุพองในชิ้นทดสอบรูปดัมเบลสำหรับทดสอบความต้านทานแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมักเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ในการศึกษาครั้งนี้พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงถูกคัดเลือกให้เป็นตัวอย่างสำหรับใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของข้อบกพร่องทั้งสองประเภทดังกล่าวที่มีต่อสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึง: แรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวเมื่อขาด ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงของทั้งสองวัสดุพบว่าค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่มีข้อบกพร่องมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีข้อบกพร่องอยู่ที่ประมาณ 2% และสำหรับค่าการยืดตัวเมื่อขาดของทั้งสองวัสดุพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่มีข้อบกพร่องมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีข้อบกพร่องอย่างมีนัยสำคัญประมาณ 80% นอกจากนี้การสำรวจภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบของทั้งสองวัสดุบริเวณที่มีข้อบกพร่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิโพรพิลีนมีข้อบกพร่องประเภทโพรงอากาศและสำหรับชิ้นทดสอบของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีข้อบกพร่องประเภทรอยพุพอง จากข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวของชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงของทั้งสองวัสดุที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปนี้ได้

### Abstract

Voids and blisters often appear in a dumbbell-shaped tensile specimens fabricated by thermoplastic injection molding process. In this study, polypropylene and high density polyethylene were selected to investigate the effects of these defects on tensile properties; i.e., maximum load, tensile strength and elongation at break. From the results of tensile properties for both materials, it was found that the maximum load and tensile strength of specimens without defects were higher than those with defects approximately 2%. As for the elongation at break for both materials, specimens without defects provided final length greater than those with defects significantly (approximately 80%). In addition, the cross-sectional area was observed by an optical microscope, showing that polypropylene specimens contained voids where those of polyethylene had blister defects. This information was then employed to determine the troubleshooting of defect formation in the polymeric specimens fabricated via injection molding.

**คำสำคัญ :** Keywords : Blister, Defect, Polyethylene, Polypropylene, Void

<sup>1</sup>กรมวิทยาศาสตร์บริการ

\*Corresponding author E-mail address : Jariyavadee@dss.go.th

## 1. บทนำ (Introduction)

ในช่วงทศวรรษนี้การใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกทั่วโลกมีแนวโน้มการเติบโตมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุพลาสติกเพื่อใช้สำหรับเป็นสิ่งบรรจุภัณฑ์ทั่วโลกมีมากกว่า 35% ของการอุปโภคทั้งหมดของพลาสติกด้านอื่น ๆ จากข้อมูลสถิติของการใช้พลาสติกแต่ละชนิดทั่วโลกในช่วงระยะปี ค.ศ. 2004-2010 รายงานว่าอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (Annual Average Growth Rate, %AAGR) ของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) มีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีเป็นอันดับสองและสามตามลำดับ และมีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นแบบต่อเนื่อง (1)

ในปัจจุบันกรมวิทยาศาสตร์บริการ โครงการฟิลิกส์และวิศวกรรม สามารถให้บริการขึ้นรูปขึ้นทดสอบความต้านแรงดึงด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกแก่ภาคอุตสาหกรรมสำหรับตัวอย่างที่เป็นเม็ดพลาสติกเพื่อการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงนี้ได้ อย่างไรก็ตามพบว่าขึ้นทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีลักษณะข้อบกพร่องแบบฟองอากาศบริเวณภายในและผิวของขึ้นทดสอบเป็นจำนวนมาก เห็นว่าข้อบกพร่องดังกล่าวอาจจะมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงสูงสุด ความต้านแรงดึง และการยึดตัวเมื่อขาด ซึ่งทำให้มีความคลาดเคลื่อนต่อการรายงานผลการทดสอบสมบัติดังกล่าว จึงมีความจำเป็นในการศึกษาหาสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน จากข้อมูลงานวิจัยอื่นๆ ได้รวบรวมข้อบกพร่องที่พบมากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีดังนี้ ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (short shots) รอยยุบ (sink marks) ครีป (flash) รอยเชื่อมประสาน (weld lines) รอยพ่น (jetting) รอยพุพอง (blister) โพรงอากาศ (voids/bubbles) รอยประกายเงิน (silvery streaks) รอยไหม้ (burnt streaks) การแยกตัวออก (delamination) การปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงาน (contamination) รอยฝ้าบริเวณใกล้ทางเข้า (blush marks) ชิ้นงานหดตัว (shrinkage) ชิ้นงานบิดเบี้ยว (warpage) เป็นต้น (2,3-4) และข้อบกพร่องเหล่านี้สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องวัด

เรียบผิว (Surface contouring machine) (4) หรือการถ่ายภาพรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ (Computed tomography scanning, CT scanning) (5-6) บทความวิชาการฉบับนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้เทคนิคการสำรวจภาคตัดขวางของขึ้นทดสอบบริเวณที่เกิดฟองอากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) เทคนิคนี้จะสามารถทำให้ทราบถึงลักษณะและตำแหน่งของการเกิดฟองอากาศในขึ้นทดสอบเพื่อเป็นแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นของขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental procedures)

### 2.1 วัตถุประสงค์

2.1.1 เม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) ได้รับการอนุเคราะห์จาก Chakkolphan Ltd., Part และเม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด

### 2.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ

2.2.1 เครื่องมือทดสอบความต้านแรงดึง Instron 4466/H1950 ขนาด load-cell 10 กิโลนิวตัน

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) รุ่น Olympus BX60M

2.2.3 ดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์

### 2.3 วิธีดำเนินการ

2.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึง

2.3.1.1 เม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบความต้านแรงดึงที่มีขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638-10 แบบ Type IV ที่มีความเหมาะสมสำหรับขึ้นทดสอบที่มีความหนาไม่เกิน 4 มิลลิเมตร (7) ได้ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกันหลักๆ คือ ขึ้นทดสอบที่ไม่มีและมีส่วนข้อบกพร่อง เม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนได้ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยช่วงอุณหภูมิ 190-200 องศาเซลเซียส และเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยช่วงอุณหภูมิ 210-220 องศาเซลเซียส

2.3.1.2 วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่มีและไม่มีข้อบกพร่องของแต่ละวัสดุเป็นจำนวน 10 ชิ้นในแต่ละกลุ่มและแต่ละประเภทของวัสดุ โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์สำหรับวัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบในช่วงระยะของ gauge length โดยวัดจำนวนทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2.3.1.3 ทำการทดสอบความต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึง Instron 4466/H1950 ด้วยขนาดของ load-cell 10 กิโลนิวตัน โดยใช้วิธีการทดสอบความต้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638-10 Standard test method for tensile properties of plastics โดยตั้งระยะของ gauge length เท่ากับ 25 มิลลิเมตรและระยะของปากจับเท่ากับ 65 มิลลิเมตร และความเร็วในการเคลื่อนที่ของปากจับของเครื่องทดสอบเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

2.3.1.4 บันทึกผลการทดสอบค่าแรงดึงสูงสุด ความต้านแรงดึง และการยืดตัวเมื่อขาด

2.3.2 การสำรวจข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศและรอยพุพองของชิ้นทดสอบ

2.3.2.1 นำชิ้นทดสอบความต้านแรงดึงที่มีข้อบกพร่องของแต่ละวัสดุมาตัดแบบภาคตัด

ขวางในช่วงบริเวณที่มีพองอากาศด้วยใบมีดที่มีความแหลมคม ชิ้นทดสอบที่ใช้สำหรับสำรวจข้อบกพร่องดังกล่าวมีขนาดความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร ความกว้างประมาณ 6 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

2.3.2.2 ทำการสำรวจลักษณะและตำแหน่งการเกิดของข้อบกพร่องพองอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบของวัสดุแต่ละชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Olympus BX60M ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า บันทึกภาพที่ละส่วนจนกระทั่งได้ภาพที่ครบสมบูรณ์และนำภาพที่ได้ที่ละส่วนมาประกอบในลักษณะการต่อแบบจิ๊กซอว์ (jigsaw) ให้เป็นภาพที่ครบสมบูรณ์

### 3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

ผลการทดสอบทางเชิงกลของวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่มีและมีข้อบกพร่องภายในชิ้นทดสอบประกอบด้วย ค่าแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านแรงดึงและค่าการยืดตัวเมื่อขาดซึ่งแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของตัวอย่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่มีและมีข้อบกพร่องภายในชิ้นทดสอบ

สมบัติเชิงกล	พอลิโพรพิลีน		พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	
	ไม่มีข้อบกพร่อง	มีข้อบกพร่อง	ไม่มีข้อบกพร่อง	มีข้อบกพร่อง
แรงดึงสูงสุด, นิวตัน	707.64±7.75	693.51±11.43	531.17±6.40	523.77±6.84
ความต้านแรงดึง, เมกะพาสคัล	37.83±0.54	36.87±0.45	28.10±0.28	27.38±0.35
การยืดตัวเมื่อขาด, ร้อยละ	100.02±4.43	21.96±7.24	156.40±7.86	30.24±10.25

จากการเปรียบเทียบค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีและมีข้อบกพร่องของชิ้นทดสอบพบว่าค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่ไม่มีข้อบกพร่องมีค่าสูงกว่าที่มีข้อบกพร่องอยู่ที่ประมาณ 2% และสำหรับการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาดของตัวอย่างวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีและมีข้อบกพร่องพบว่าทั้งค่าความต้านแรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาดของ

ตัวอย่างที่ไม่มีข้อบกพร่องมีค่าสูงกว่าที่มีข้อบกพร่องอยู่ที่ประมาณ 2.5% และ 78% และจากการเปรียบเทียบค่าแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านแรงดึง และค่าการยืดตัวเมื่อขาดของตัวอย่างวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่มีและมีข้อบกพร่องของชิ้นทดสอบพบว่าค่าแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านแรงดึง และค่าการยืดตัวเมื่อขาดของชิ้นทดสอบที่ไม่มีข้อบกพร่องมีค่าสูงกว่าที่มีข้อ

บกพร่องอยู่ที่ประมาณ 1.4% , 2.5% และ 81% ตามลำดับ ผลจากการสำรวจข้อบกพร่องของชั้นทดสอบ ภาพภาคตัดขวางของชั้นทดสอบวัสดุพอลิ โพรพิลีนและ วัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ถูกแสดงในภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากผลการสำรวจภาคตัดขวางของ ชั้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Olympus BX60M ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า ทำให้ทราบลักษณะ และตำแหน่งของข้อบกพร่องในชั้นทดสอบความต้าน แรงดึงที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้ โดยลักษณะข้อ บกพร่องที่บริเวณชั้นแกนกลางของตัวอย่างวัสดุพอลิโพร พิลีนเป็นการเกิดโพรงอากาศ (ภาพที่ 1) และลักษณะ ข้อบกพร่องบริเวณผิวของตัวอย่างวัสดุพอลิเอทิลีนความ หนาแน่นสูงเป็นการเกิดรอยฟุพอง (ภาพที่ 2) ความ สัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและข้อบกพร่องของชั้น ทดสอบทั้งสองประเภทพบว่า แรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง ประมาณ 2% ความต้านแรงดึงมีค่าลดลงประมาณ 2.5% และการยืดตัวเมื่อขาดมีค่าลดลงประมาณ 80% ข้อ บกพร่องทั้งสองประเภทของวัสดุเทอร์โมพลาสติกมีผล ต่อสมบัติทางกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการยืดตัวเมื่อขาด มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เพราะข้อบกพร่องทั้งสอง ประเภทอาจเป็นสาเหตุของการฉีกขาดของชั้นทดสอบ ซึ่งข้อบกพร่องทั้งสองกรณีนี้มีแนวทางแก้ไขที่แตกต่าง กันดังนี้

ข้อบกพร่องประเภทโพรงอากาศมีลักษณะการ เกิดช่องว่างหรือโพรงอากาศที่เป็นสุญญากาศที่บริเวณ ชั้นแกนกลางของชิ้นงานโดยมีสาเหตุของการเกิดโพรง อากาศภายในชิ้นงานเนื่องมาจากการหดตัวของชั้นแกน กลางภายในชิ้นงาน (Core layer) ในช่วงระยะเวลาของ การเย็นตัวลงที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งถ้าหากบริเวณ ชั้นผิวของชิ้นงานที่แข็งตัว (Solidified skin layer/frozen layer) มีความหนามาก จะทำให้พลาสติกหลอมเหลวที่ บริเวณชั้นแกนกลางไม่สามารถหดตัวได้ จึงส่งผลให้เกิด โพรงอากาศในชิ้นงาน แนวทางแก้ไขข้อบกพร่องประเภท นี้สามารถทำได้โดยการปรับตั้งค่าที่เครื่องฉีดพลาสติก ดังนี้

- เพิ่มครูชั่น (Cushion) หรือเพิ่มความดันคังคัง หรือเพิ่มเวลาที่ให้ความดันคังคังเพราะจะช่วย

ลดขอบปริมาตรในระหว่างการเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ฉีด

- เพิ่มอุณหภูมิสำหรับการฉีดเพื่อการหลอมเหลว ของพลาสติกได้มากขึ้น หรือเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ฉีดหรือเพิ่มความเร็วในการฉีดก็ได้ ส่งผลให้มีอัตราการ ไหลเพิ่มขึ้นทำให้พลาสติกไหลเข้าได้เต็มแม่พิมพ์ดีขึ้น

- เพิ่ม Back pressure เพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้ กับเนื้อพลาสติกที่หลอมเหลว (Melt density) ถ้าหากมี การเกิดฟองอากาศภายในเนื้อของพลาสติกหลอมเหลว ก่อนที่จะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ฉีด

- เพิ่มระยะเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน ขณะที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ฉีด (2)

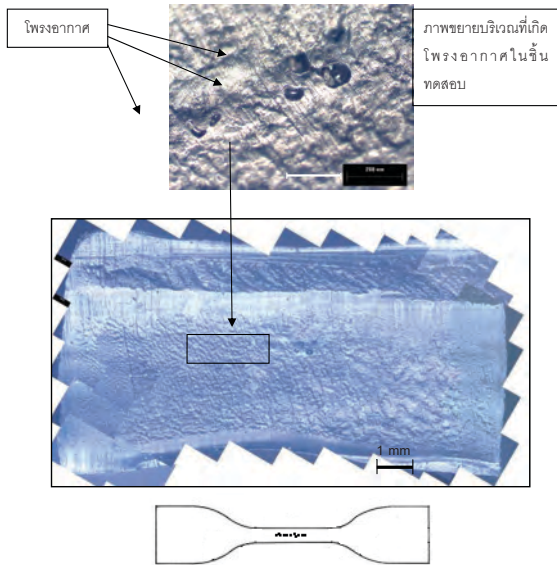
สำหรับข้อบกพร่องประเภทรอยฟุพองมีลักษณะ เป็นฟองอากาศอยู่บริเวณบนผิวหรือใต้ผิวของชิ้นงาน โดยมีสาเหตุหลักของการเกิดรอยฟุพองนี้เนื่องมาจาก การที่อากาศที่อาจมาจากการสลายตัวของความชื้น ภายในเม็ดพลาสติกนั้น ไม่สามารถออกจากแม่พิมพ์ ฉีดได้ทันในช่วงระยะเวลาขณะที่ฉีดขึ้นรูป แนวทางแก้ไข ข้อบกพร่องประเภทนี้สามารถทำได้โดยการปรับตั้งค่าที่ เครื่องฉีดพลาสติกดังนี้

- หากสาเหตุการเกิดรอยฟุพองนั้นมาจากการ เสื่อมสภาพของพลาสติกหลอมเหลว ให้ใช้วิธีการลด อุณหภูมิในการฉีด หรือลดความเร็วรอบของการหมุนสกรู

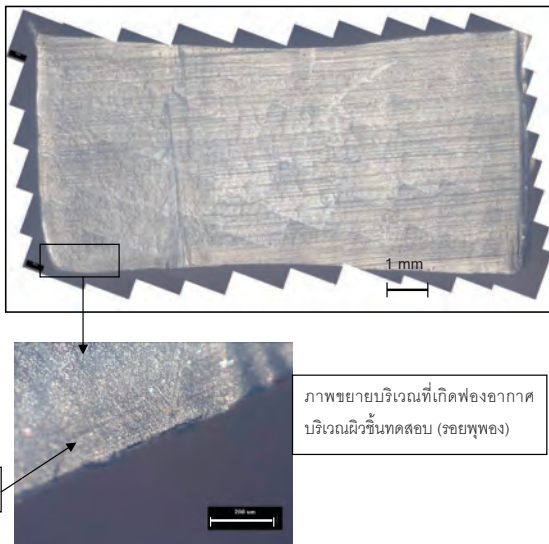
- หากการเกิดรอยฟุพองนั้นมาจากอากาศที่เกิด ขึ้นภายในกระบอกลด ให้ใช้วิธีการเพิ่ม Back pressure หรือใช้วิธีการลดระยะหรือปริมาตรในการทำ Suck back (หมายถึงวิธีการดึงสกรูถอยหลังกลับหลังจากที่ทำการ เตรียมเนื้อพลาสติกหลอมเหลวแล้ว ในการทำวิธีนี้ก็เพื่อ เป็นการป้องกันการไหลของพลาสติกหลอมเหลวออกมา ทางหัวฉีดนั่นเอง โดยที่เรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า Drooling (8) หรือทำการลดความเร็วรอบของการหมุนของสกรู หรือทำการลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีด (2)

ข้อมูลแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ และแบบรอยฟุพองที่เกิดขึ้นในชั้นทดสอบความต้านแรง ดึงของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแสงจะช่วยพัฒนาวิธีการเตรียมตัวอย่างของชิ้น ทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่

ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปให้ดียิ่งขึ้นและจะส่งผลให้การทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1 ภาพภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบวัสดุโพลีโพรพิลีนที่พบพรองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นแกนกลางของชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 2 ภาพภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่พบฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ

#### 4. สรุป (Conclusion)

จากผลการสำรวจภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบวัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Olympus BX60M กำลังขยาย 100 เท่าทำให้ได้รับการยืนยันว่าชิ้นทดสอบวัสดุพอลิโพรพิลีนเกิดพรองอากาศและชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกิดรอยฟุพองในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งทำให้ทราบไปถึงแนวทางแก้ไขในกระบวนการฉีดขึ้นรูปอย่างถูกต้องการนั้นเอง และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านแรงดึงสูงสุด ความต้านแรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาดยืนยันได้ว่าการเกิดพรองอากาศในชิ้นทดสอบวัสดุพอลิโพรพิลีนและการเกิดรอยฟุพองในชิ้นวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีผลให้สมบัติเชิงกลทั้งสามประเภทมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีผลต่อการยืดตัวเมื่อขาดอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอกล่าวคำขอบคุณมา ณ ที่นี้ให้แก่ นว.ชพ. ดนัย กิจชัยบุญกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำสำหรับการใช้เครื่องมือจุลทรรศน์แบบแสง และให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือนี้ด้วย

#### 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- (1) CENTRAL INSTITUTE OF PLASTICS ENGINEERING AND TECHNOLOGY. Plastics industry-statistics [Online]. (viewed 7 January 2012). Available from: [http://cipet.gov.in/plastics\\_statistics.html](http://cipet.gov.in/plastics_statistics.html).
- (2) สมเจตน์ พัทธพันธ์. ข้อบกพร่องในงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป: สาเหตุและแนวทางการแก้ไข. วิศวกรรมสาร มก., 2552, 22(69), 91-104.
- (3) Viewmold. Injection molding defects [Online]. (viewed 23 May 2014). Available from: <http://www.viewmold.com/Injection%20Mold%20Management/Injection%20molding%20defects.html>.

(4) ชัยยา ฉุยฉาย. การออกแบบการทดลองแก้ไข ปัญหาการฉีดงานพลาสติกในงานผลิต ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2552.

(5) Industrial computed tomography (Online). (viewed 23 May 2014). Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial\\_CT\\_scanning](http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_CT_scanning).

(6) Plastics Technology (Online). September 2008, (viewed 23 May 2014). Industrial CT scanning speeds mold qualification. Available from: <http://www.ptonline.com/articles/industrial-ct-scanning-speeds-mold-qualification>.

(7) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of plastics. D638-2010. In Annual book of ASTM standard : Plastics. Vol. 08.01. West Conshohocken : ASTM, 2010, pp.50-65.

(8) MICHAELI, W., et al. Training in injection molding. Munich : Hanser Publishers, 1995.