



## การตรวจวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด Extrudate Swell Measurement of Polymer Melt in Extrusion Process

นเรศ อินดีะวงศ์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

การตรวจวัดการบวมตัว (Extrudate Swell) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความสำคัญในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด (Extrusion Process) ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณภาพและขนาดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ภายหลังถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป (Die) โดยทั่วไปการวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ การวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปทรงกลม (Circular Die) การวัดการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน (Annular Die) และวิธีการชั่งน้ำหนัก (Weighing Method) ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการวัดขนาดพอลิเมอร์เพื่อคำนวณอัตราการบวมตัว (Extrudate Swell Ratio) ประกอบด้วย 2 เทคนิคการวัดคือ การวัดแบบสัมผัสโดยตรง (Direct Contact) และการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง (Indirect Contact) นอกจากนี้ในบทความยังได้นำเสนอเทคนิคใหม่ที่สามารถวัดอัตราการบวมตัวตามแนวรัศมี (Radial Extrudate Swell Ratio) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบทรงกลม โดยองค์ความรู้ที่ได้สามารถพัฒนาไปสู่การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตแบบอัดรีดร่วม (Co-extrusion Process) ต่อไป

**คำสำคัญ:** พอลิเมอร์หลอมเหลว การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว หัวขึ้นรูป กระบวนการผลิตแบบอัดรีด

### Abstract

Measurement of extrudate swell of melted polymer is very important for extrusion process. This is because it is an important factor in the final control of quality and size of polymer product after compression on die. Generally, measurement of polymer's extrudate swell can be divided into 3 types: measurement of extrudate swell on circular die; measurement of extrudate swell on annular die; and measurement of extrudate swell by weighing method. There are 2 techniques used to measure polymer size in order to calculate extrudate swell ratio: measurement by direct contact and measurement by indirect contact. Moreover, this article also presents a new technique which is used for radial extrudate swell ratio of melted polymer on circular die. The presented body of knowledge can be used for control of product quality in the co-extrusion process.

**Keyword:** Polymer Melt, Extrudate Swell, Die, Extrusion Process

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคพายัพ โทรศัพท์ 0-5389-2462 E-mail: naret\_i@yahoo.com

## 1. บทนำ

การบวมตัวของพอลิเมอร์ (Extrudate Swell) คือปรากฏการณ์ที่พื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์ พอลิเมอร์ มีขนาดใหญ่กว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูป (Die) ภายหลังจากอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป การอธิบายปรากฏการณ์การบวมตัวภายหลังจากอัดรีดจากหัวขึ้นรูปนี้ สามารถแบ่งได้เป็นทฤษฎีหลักๆ คือทฤษฎีพลังงานสะสมแบบอีลาสติก และทฤษฎีการพัฒนาของรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรม การบวมตัวของพอลิเมอร์โดยทั่วไปมาจากสภาวะที่ใช้ ในการผลิตเป็นหลักเช่น อุณหภูมิในการผลิตพอลิเมอร์ แรงที่ใช้ในการอัดรีดพอลิเมอร์ผ่านหัวขึ้นรูป และความเร็ว ที่ในการอัดรีด หากปัจจัยใดเกิดการเปลี่ยนแปลงย่อม ส่งผลต่อการบวมตัวหรือขนาดของชิ้นงานโดยตรง ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว และการวัดการบวมตัว ของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิตจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณภาพหรือขนาดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ นั้นเอง [1]

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยในเรื่องพฤติกรรมการบวมตัว ของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นการนำเสนอเทคนิคใหม่ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดให้มีค่าถูกต้องมากขึ้น รวมทั้งสามารถ วัดได้ในเวลาจริง (Real Time) ขณะทำการผลิตได้ อีกด้วย สำหรับในบทความนี้นอกจากจะได้นำเสนอ หลักการ วิธีการ และเทคนิคการวัดปริมาณการบวมตัว ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ แล้ว ยังจะได้นำเสนอเทคนิคใหม่ ที่สามารถวัดปริมาณการบวมตัวตามแนวรัศมี (Radial Extrudate Swell) [2] ของพอลิเมอร์ในหัวขึ้นรูป แบบทรงกลม ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้สามารถพัฒนาไปสู่ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต แบบอัดรีดร่วม (Co-extrusion Process) ต่อไป

## 2. ทฤษฎีเบื้องต้นของการวัด

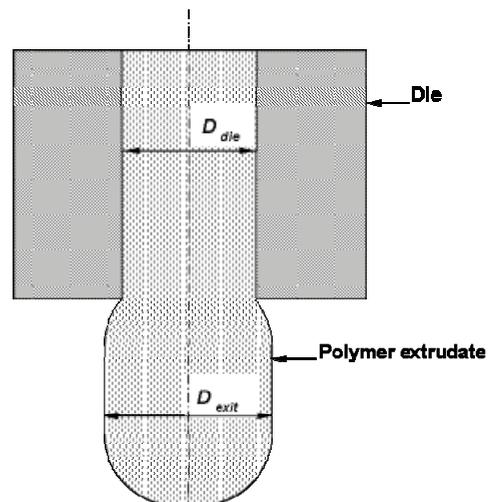
หลักการวัดปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ ภายหลังจากอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปคือ การวัดอัตราส่วน ระหว่างพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์กับขนาดพื้นที่

หน้าตัดของหัวขึ้นรูป หรือหากผลิตภัณฑ์มีผิวไม่เรียบ ซึ่งยากแก่การวัดขนาด สามารถตรวจวัดปริมาณ การบวมตัวด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักได้เช่นกัน โดยทั่วไป สามารถแบ่งรูปแบบการวัดปริมาณการบวมตัวได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ

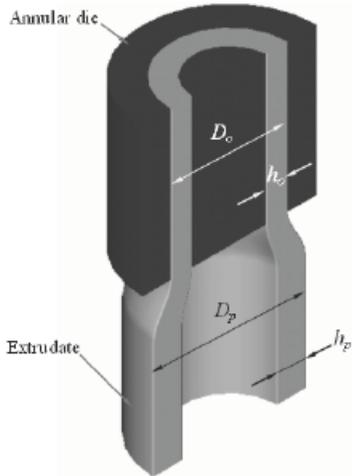
### 2.1. การวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบกลม (Circular Die)

การวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปทรงกลม เป็นรูปแบบการวัดที่เป็นพื้นฐาน โดยสามารถคำนวณ ปริมาณการบวมตัวได้ตามสมการที่ 1 จากอัตราส่วน ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีด ออกมาจากหัวขึ้นรูป ( $D_{exit}$ ) เทียบกับขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป ( $D_{die}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่าง เช่น เมื่อพอลิเมอร์ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm เกิดการบวมตัว ภายหลังจากไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเท่ากับ 6.5 mm ดังนั้นค่าอัตราส่วนการบวมตัว เท่ากับ  $6.5/5 = 1.3$  ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วยของการวัด แต่อย่างไรก็ตาม [3]

$$\text{Extrudate swell ratio} = \frac{D_{exit}}{D_{die}} \quad (1)$$



รูปที่ 1 การวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบกลม



รูปที่ 2 แสดง Dimension ของการวัดอัตราการบวมตัวแบบโดยรวม และการบวมตัวด้านความหนา

## 2.2. การวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน (Annular Die)

การคำนวณปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือปริมาณการบวมตัวโดยรวม (Diameter Swell) และ ปริมาณการบวมตัวด้านความหนา (Thickness Swell) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งอัตราส่วนการบวมตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยที่  $D_p$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ Extrudate  $D_o$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป  $h_p$  คือขนาดความหนาของพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป  $h_o$  คือขนาดความหนาของช่องการไหลในหัวขึ้นรูป [1], [3] สำหรับหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนนี้นิยมใช้กันมากในงานผลิตท่อพลาสติก งานเป่าขึ้นรูปถุงพลาสติก และงานเป่าขึ้นภาชนะบรรจุพลาสติก ซึ่งการเข้าใจพฤติกรรมของการบวมตัวของพอลิเมอร์ข้างต้น จะช่วยให้สามารถควบคุมความหนาของพอลิเมอร์หลังจากไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปให้สม่ำเสมอเท่ากันตามแนวรัศมี เพื่อให้ได้ขนาดความหนาของชิ้นงานสุดท้ายที่ถูกต้องในที่สุด

$$\text{Diameter Swell} = \frac{D_p}{D_o} \quad (2)$$

$$\text{Thickness Swell} = \frac{h_p}{h_o} \quad (3)$$

## 2.3. การวัดปริมาณการบวมตัวด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Weighing Method)

วิธีการนี้เหมาะกับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผิวไม่สมมาตรกันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ในกรณีของหัวขึ้นรูปที่มีหน้าตัดไม่เป็นทรงกลม เช่น ชิ้นงานรูปวงรี เป็นต้น) ไม่สม่ำเสมอ โดยทำการชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวในช่วงความยาวคงที่ จากพอลิเมอร์ถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป โดยปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4. โดยที่  $L$  คือระยะความยาวตัด (m)  $W_{ext}$  คือน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหัวขึ้นรูป ณ ระยะตัด (g)  $\rho$  คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Density) ณ อุณหภูมิทดสอบ ( $\text{g/cm}^3$ ) โดยที่ค่า Melt Density สามารถหาได้จากการทดลองที่อุณหภูมิการผลิตจริงโดยประยุกต์ใช้เครื่องมือทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) [3], [4] และ  $R$  คือขนาดรัศมีของหัวขึ้นรูป (m)

$$B = \frac{W_{ext}}{\rho (\pi R^2 L)} \quad (4)$$

## 3. เทคนิคการวัด

เทคนิคที่ใช้การวัดปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคคือการวัดแบบสัมผัสโดยตรง (Direct Contact) การวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง (Indirect Contact) ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

### 3.1. การวัดแบบสัมผัสโดยตรง

การวัดแบบสัมผัสโดยตรงเป็นวิธีอย่างง่าย โดยการตัดพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีดไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูป จากนั้นทำการวัดขนาดของพอลิเมอร์ดังกล่าวด้วยเครื่องมือวัดละเอียดที่ต้องสัมผัสกับตัวพอลิเมอร์โดยตรงเช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์ ขนาดของพอลิเมอร์ที่วัดได้นำไปคำนวณ หาปริมาณการบวมตัวตามสมการที่ 1 ในกรณีของหัวขึ้นรูปแบบกลม และสมการที่ 2 ในกรณีของ

หัวขึ้นรูปแบบวงแหวน อย่างไรก็ตามการวัดแบบโดยตรงมักประสบปัญหาความผิดพลาดอันเนื่องมาจาก อิทธิพลของการย่อตัวเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Draw-down Effect) ซึ่งมีข้อควรปฏิบัติในการวัดดังต่อไปนี้ [1]

- ในกรณีของพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดในแนวตั้ง การตรวจวัดโดยตรงเหมาะสม ณ อัตราเงื่อนไขต่ำ ซึ่งส่วนมากทำในเครื่องมือทดสอบการไหล คาปิลารีรีโอมิเตอร์

- ในกรณีพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดในแนวอน การตรวจวัดโดยตรงเหมาะสม ณ อัตราเงื่อนไขสูง เช่น ในกระบวนการผลิตท่อ หรือโปรไฟล์ต่างๆ

- ในกรณีที่ต้องการลดแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีผลต่อขนาดของพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป ทำได้โดยการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ไหลลงสู่ข้างของเหลว (อ่างน้ำมันร้อน) ที่มีความหนาแน่นและอุณหภูมิเท่ากับ ความหนาแน่นและอุณหภูมิของพอลิเมอร์ วิธีนี้มีข้อเสียคือเป็นการยากที่จะหาของเหลวที่มีความหนาแน่นเท่ากับพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลที่อุณหภูมิการทดสอบต่างๆ

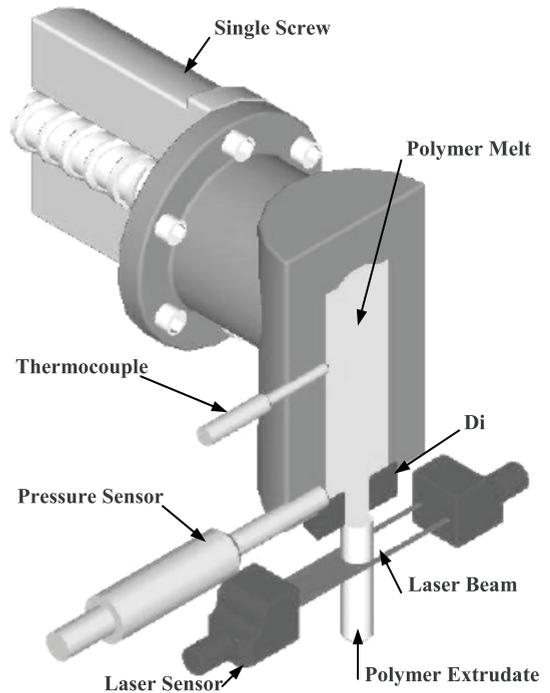
- ทำการควยเย็นอย่างทันที (Quenching) ขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปด้วยไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากในทางปฏิบัติ

### 3.2 การวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง

การวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรงเป็นวิธีที่เครื่องมือวัดไม่สัมผัสกับพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป หลักการคือการติดตั้งอุปกรณ์วัดขนาดระยะไกลเพื่อวัดขนาดของพอลิเมอร์หลอมเหลวในทันทีที่ไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูป และค่าการวัดที่ได้เป็นแบบตามเวลาจริง (Real Time) ในระหว่างทำการผลิตจริง โดยรูปแบบการวัดที่ใช้งานในปัจจุบันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

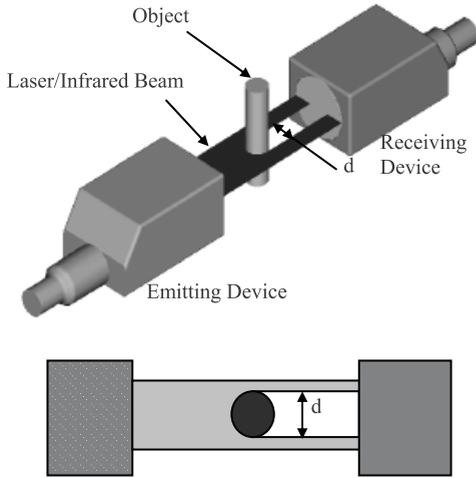
#### 3.2.1 การวัดด้วยเซนเซอร์แบบแสง

เครื่องมือวัดแบบแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เลเซอร์เซนเซอร์และอินฟราเรดเซนเซอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้



รูปที่ 3 หลักการตรวจวัดด้วยเลเซอร์เซนเซอร์ และอินฟราเรดเซนเซอร์ ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

ผลการวัดที่แม่นยำและถูกต้อง ส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการควบคุมการผลิตและการวัดในห้องทดลองพอลิเมอร์ โดยหลักการคือติดตั้งเซนเซอร์ดังกล่าวบริเวณทางออกหัวขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อวัดขนาดพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป ค่าขนาดของชิ้นงานที่ได้จากการวัดจะถูกบันทึกตามเวลาจริงจากนั้นสามารถนำไปคำนวณอัตราการบวมตัวได้ตามสมการที่ 1 เช่นกัน สำหรับหลักการการทำงานของเลเซอร์เซนเซอร์และอินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 4 คือเซนเซอร์ดังกล่าวประกอบด้วยตัวส่ง (Emitting Device) ทำหน้าที่กำเนิดแสงและกระจายแสงไปยังวัตถุที่ต้องการตรวจวัด ส่วนที่สองคือตัวรับ (Receiving Device) เมื่อแสงที่มีปริมาณคงที่และเดินทางเป็นเส้นตรงถูกส่งออกจากตัวส่งไปกระทบกับวัตถุที่ต้องการวัด จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังตัวรับปริมาณ

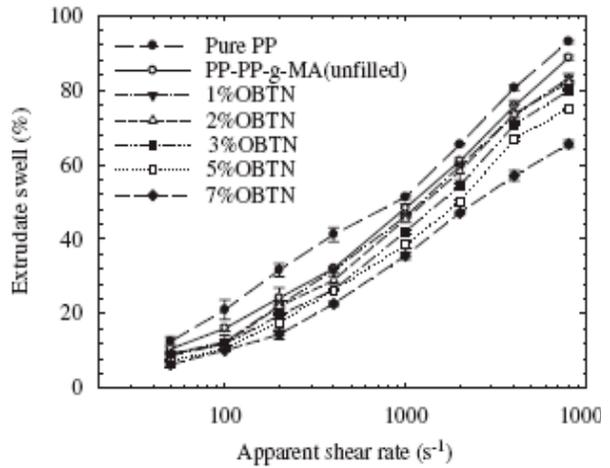


รูปที่ 4 หลักการของเลเซอร์เซนเซอร์และอินฟราเรดเซนเซอร์

แสงที่หายไปจากการถูกบังด้วยวัตถุที่ต้องการวัดจะถูกนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณแสงเริ่มต้นจากตัวส่งซึ่งปริมาณแสงที่หายไปนั้น คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวัตถุ (d) นั่นเอง ส่วนผลการวัดที่ได้จะรายงานผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมต่อระยะเวลาจริง โดยอาจอยู่ในรูปของอัตราเฉือนที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการอัดรีดอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากการตรวจวัดอัตราการบวมตัวของวัสดุพอลิโพรพิลีนผสมระดับนาโน (Polypropylene Nanocomposites) ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับสารเชื่อมประสานพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์ (Polypropylene-g-maleic Anhydride Copolymer) และสารอินทรีย์เบนโดไนท์ (Organobentonite) ที่ส่วนผสมต่างๆ ด้วยเลเซอร์เซนเซอร์ [5]

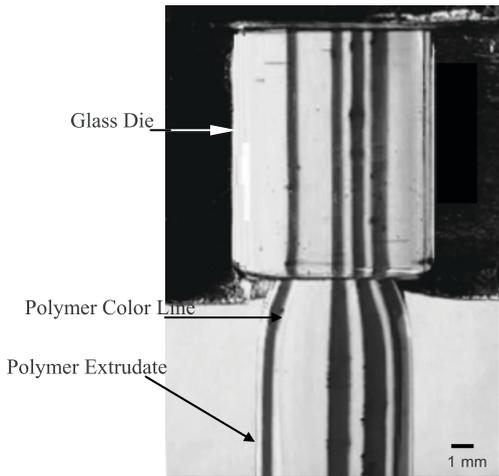
### 3.2.2 การวัดโดยใช้กล้องบันทึกภาพ

การบันทึกภาพขณะทำการผลิตจริงเป็นวิธีการตรวจวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากสามารถตรวจสอบหรือสังเกตสภาพผิวของชิ้นงานพอลิเมอร์ได้ในเวลาเดียวกันสำหรับหลักการตรวจวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์ด้วย



รูปที่ 5 ผลการวัดอัตราการบวมตัวของวัสดุพอลิโพรพิลีนผสมระดับนาโน [5]

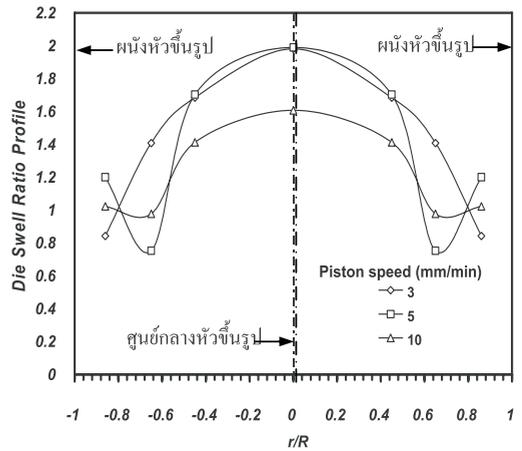
วิธีนี้โดยการติดตั้งกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวและเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงบริเวณที่พอลิเมอร์ไหลออกจากหัวขึ้นรูปเพื่อบันทึกภาพ พอลิเมอร์ตลอดระยะเวลาของการอัดรีด สัญญาณภาพที่ได้สามารถบันทึกลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำข้อมูลภาพดังกล่าวมาวิเคราะห์และวัดขนาดเพื่อหาอัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer) ข้อดีของการการวัดอัตราการบวมตัวด้วยวิธีการบันทึกภาพคือสามารถเก็บบันทึกข้อมูลการทดลองไว้ได้อย่างครบถ้วนทั้งในด้านรูปแบบของพื้นผิวชิ้นงาน ขนาด และสีของชิ้นงาน รวมทั้งยังใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตเดิมหรือข้อมูลการผลิตของพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย นอกจากนี้การใช้กล้องและเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงทำให้สามารถเพิ่มขีดความสามารถในตรวจวัดอัตราการบวมตัวได้ละเอียดมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ N-T. Intawong และ N. Sombatsompop [2] ที่ได้ศึกษาการบวมตัวเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 6 เป็นการถ่ายภาพพอลิเมอร์เส้นสีที่ไหลอยู่ภายในหัวขึ้นรูปแบบแก้ว โดยภาพถ่ายที่ได้มีความละเอียดชัดเจน และสามารถวัดขนาดเพื่อหาอัตราการบวมตัว



**รูปที่ 6** การศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพ [2]

ของพอลิเมอร์ดังกล่าวได้อย่างแม่นยำดังแสดงในรูปที่ 7 เป็นผลการวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี (Extrudate Swell Ratio Profile) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูปทรงกลมของพอลิสไตรีนหลอมเหลวที่ตรวจวัดจากข้อมูลภาพที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพให้อยู่ในรูปของข้อมูลตัวเลขเชิงปริมาณ ซึ่งโดยรวมพบว่าบริเวณส่วนกลางของช่องการไหลมีค่าสูงสุดและมีค่าลดลงจนถึงผนังของหัวขึ้นรูปในทุกๆ ความเร็วในการอัดรีด

ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในหัวขึ้นรูป จากรูปแบบการไหลแบบเฉือน (Shear Flow) เป็นรูปแบบการไหลแบบความเร็วเท่ากันโดยตลอด (Plug Flow) [6] โดยระหว่างที่พอลิเมอร์หลอมเหลว ไหลอยู่ในหัวขึ้นรูป จะมีความเร็วต่ำสุดที่ผนังและสูงสุดบริเวณส่วนกลางของช่องการไหล หลังจากที่พอลิเมอร์ไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปจะมีการปรับรูปแบบการไหล จากรูปแบบการไหลแบบเฉือนไปเป็นการไหลแบบความเร็วเท่ากันโดยตลอด ดังนั้น พอลิเมอร์บริเวณส่วนกลางของช่องการไหลมีการลดความเร็วลงเพื่อปรับรูปพอลิเมอร์



**รูปที่ 7** การบวมตัวตามแนวรัศมีของพอลิสไตรีนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพให้อยู่ในรูปของข้อมูลตัวเลขเชิงปริมาณ [2]

บริเวณผนังของหัวขึ้นรูปให้ไหลออกจากหัวขึ้นรูปด้วยความเร็วเท่ากัน การลดความเร็วของพอลิเมอร์บริเวณส่วนกลางนี้เองทำให้เกิดการเพิ่มรวมตัวกันของพอลิเมอร์มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ จึงมีผลทำให้บริเวณส่วนกลางมีอัตราการบวมตัวมากกว่าบริเวณผนังของหัวขึ้นรูปนั่นเอง [2] ความรู้ดังกล่าวสามารถนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตแบบอัดรีดรวมในลักษณะของการกำหนดปริมาณของเนื้อวัสดุแต่ละชั้นในชิ้นงาน และควบคุมความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น

#### 4. สรุป

การวัดปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ การวัดอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูป ซึ่งมีรูปแบบการวัดพื้นฐาน 3 รูปแบบคือการวัดปริมาณการบวมตัวในหัวขึ้นรูปทรงกลม การวัดการบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน และวิธีการชั่งน้ำหนัก ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการวัดขนาดพอลิเมอร์เพื่อคำนวณอัตราการบวมตัวประกอบด้วย 2 เทคนิคการวัดคือการวัดแบบสัมผัสโดยตรง และการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Brydson, *Flow Properties of Polymer Melts*, 2<sup>nd</sup>ed., London: Gorge Godwin, 1981.
- [2] N-T. Intawong, and N. Sombatsompop, "A Parallel Co-extrusion Technique for Simultaneous Measurements of Radial Extrudate Swell and Velocity Profiles of a Polymer Melt in a Capillary Rheometer," *Polymer Engineering and Science*, vol. 44, pp.1960-1969, 2004 .
- [3] N. Sombatsompop, "*Polymer Rheology and Applications*," KMUTT, Bangkok, 2003.
- [4] N. Sombatsompop, and N. O-Charoen, "Experimental Studies on Extrudate Swell Behaviour of PS and LLDPE Melts in Single and Dual Capillary Dies," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 87, pp. 1713-1722, 2003.
- [5] N. Muksing, M. Nithitanakul, B.P.Grady, and R. Magaraphan, "Melt Rheology and Extrudate Swell of Organobentonite-filled Polypropylene Nanocomposites," *Polymer Testing*, vol. 27, pp. 470-479, 2008.
- [6] นเรศ อินตะวงค์, "พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 3, หน้า 449-454, 1 กันยายน 2552.