

## การศึกษาวิธีการฉีดขึ้นรูปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมสารพอง

ปิยนุช คำฝอย<sup>1</sup> สุรศิษฐ์ โจรนนันต์<sup>2\*</sup> และ สิริพร โจรนนันต์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการฉีดขึ้นรูปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมสารพองด้วยเครื่องฉีดพลาสติกแบบเกลียวสกรู โดยไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม เพื่อประหยัดการใช้วัสดุและลดการยุบตัวของชิ้นงาน ในการทดลองใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรด H6007JU ผสมสารพองในสภาพของแข็งชนิด Super-cell ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก กำหนดวิธีการฉีด 3 วิธี ได้แก่ การฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ำ (Without Packing Pressure) การฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้ำ (With Packing Pressure) และการฉีดแบบปล่อยไหล โดยใช้แรงดันฉีดต่ำ (Low Pressure) จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบการฉีดทั้ง 3 วิธี วัดความหนาแน่นของชิ้นงาน และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ

ชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทดสอบแรงกระแทก ทดสอบแรงดึง และตรวจสอบการยุบตัว ผลการทดลองพบว่าวิธีการฉีดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมสารพองโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ำให้ผลดีที่สุดในแง่ของความหนาแน่นต่ำสุดและความสามารถในการรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ดีที่สุดผลการทดลองสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาชิ้นงานที่มีปัญหายุบตัวและชิ้นงานที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบา สิ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดวิธีการในการฉีดงานพลาสติกที่มีการเติมสารพองต่อไป

**คำสำคัญ:** การฉีดขึ้นรูป พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สารพอง สมบัติทางกล

<sup>1</sup> นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2470-9216 อีเมล: surasit.roj@kmutt.ac.th



## The Study of Injection Molding Method for High Density Polyethylene Mixed with Chemical Foaming Agent

Piyanuch Khumphoi<sup>1</sup> Surasit Rojananan<sup>2\*</sup> and Siriporn Rojananan<sup>3</sup>

### Abstract

The objective of this work is to study an injection molding method for high density polyethylene (HDPE) mixed with a chemical foaming agent (CFA) by using reciprocating-screw injection without special equipment for saving materials and reducing sink mark on specimen. In the experiment, there are three methods for injection such as injection without packing-pressure, injection with packing-pressure and injection with low injection pressure. Specimens of each injection methods were weighted to make comparison. Densities of specimens were carried out for three positions. Microstructures were

characterized by SEM. Impact and tensile testing were examined. Sink marks were investigated. The result indicated that the method of injection without packing pressure is the best in terms of the lowest density and impact resistance. These experiments can be applied to eliminate sink mark problem on part and used for a lightweight part. The result of this research could be adopted useful in plastic injection with filling CFA.

**Keywords:** Injection Molding Method, High Density Polyethylene, Chemical Foaming Agent, Mechanical Properties

<sup>1</sup> Student, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

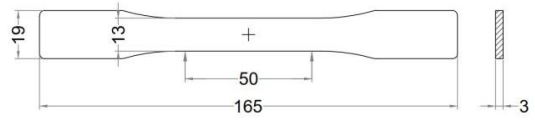
<sup>3</sup> Assistant Professor, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

\* Corresponding Author, Tel. 0-2470-9216, E-mail: surasit.roj@kmutt.ac.th

## 1. บทนำ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายด้วยคุณสมบัติที่มีความทนทานต่อสารเคมี มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระแทกไม่แตกร้าวง่าย และมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีการหดตัวสูง ทำให้สามารถปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย [1] และเนื่องจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ประสบปัญหาการยุบตัว (Sink Mark) สูงเช่นเดียวกันในขั้นตอนการผลิตจึงมีการชดเชยปริมาณมากขึ้น ทำให้ต้องใช้วัสดุในการผลิตปริมาณมากถึงกระนั้นในบางครั้งก็ไม่สามารถแก้ปัญหาการยุบตัวได้ทั้งหมด สารพองเป็นสารเติมแต่งประเภทหนึ่งที่มีการนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต เป็นสารที่ผสมลงในพอลิเมอร์และเมื่อได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิจุดหนึ่งจะสลายตัวเป็นแก๊สแทรกอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์พองตัวขึ้นสามารถลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ลงแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาการยุบตัวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้ [2]

จากงานวิจัยของ Bledzki และ Faruk [3] พบว่าชนิดของสารพองมีผลต่อสมบัติเชิงกลเพียงเล็กน้อย แต่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของโฟมเซลล์จากการศึกษาของ Yuan และ Turng [4] โดยวิธีการฉีดพลาสติกแบบไมโครเซลล์พบว่าพอลิเอไมด์ 6 (Polyamide 6, PA-6) นาโนคอมโพสิตที่มีการกำหนดส่วนผสมและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดี Xin และคณะ [5] ได้ทดลองฉีดขึ้นรูปพอลิพรอพิลีนผสมผงยางรถ (Polypropylene/Waste Ground Rubber Tire, PP/WGRT) ทำให้ทราบว่าปริมาณการผสมสารพองมากขึ้นมีผลให้ค่าความหนาแน่นของรูพรุนมากขึ้น แต่ขนาดของโฟมเซลล์เล็กลง จากงานวิจัยของ Huang และ Wang [6] พบว่าความเร็วในการฉีดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นส่วนที่ไม่เกิดโฟม (Unfoam Skin Regions) ลดลง นอกจากนี้ Hwang และ Ke [7] ได้ทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเฟืองและเพลลา (Gear Shaft) พบว่าการฉีดขึ้นรูปแบบไมโครเซลล์ ชิ้นงานมีความ



รูปที่ 1 รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดลอง

เสถียรด้านขนาดดีกว่าการฉีดขึ้นรูปแบบที่ใช้กันทั่วไป แต่ความทนต่อแรงดึงน้อยกว่า งานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ใช้วิธีการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานแบบไมโครเซลล์ ซึ่งมีการใช้ SCF (Super Critical Fluid) ที่เป็น CO<sub>2</sub> หรือ N<sub>2</sub> ผสมกับพอลิเมอร์หลอมเหลวและฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งวิธีการนี้ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้ากับเครื่องฉีดทำให้ต้นทุนสูง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงใช้แนวคิดในการนำสารพองในสภาพของแข็งเป็นเม็ดนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกแล้วนำไปฉีดขึ้นรูปเพื่อผลิตชิ้นงานที่มีโครงสร้างโฟมเซลล์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการในการฉีดขึ้นรูปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมสารพอง โดยใช้เครื่องฉีดที่ใช้กันทั่วไปไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติม ซึ่งการผสมสารพองจะช่วยลดการใช้เนื้อพลาสติกลงและสามารถแก้ปัญหาการยุบตัวของชิ้นงานโดยเฉพาะบริเวณที่คريبและสันพลาสติกติดกัน

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์

เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบ Reciprocating (Single-state) Screw Machine ที่มีการใช้งานทั่วไป ยี่ห้อ ENGEL รุ่น ES 200/50 HL ขนาดแรงบิดแม่พิมพ์ 500 กิโลนิวตัน พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรด H6007JU ผลิตโดยบริษัท เอส ซี จี เคมีคอลส์ จำกัด (มหาชน) และสารพองในสภาพของแข็ง ชนิด Super-cell ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท เอ เอฟ ซุปเปอร์เซลล์ จำกัด (ประเทศไทย) ปริมาณผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานที่ทดลองฉีดมีรูปร่างเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (Dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM D638-10 มีความหนา 3 มิลลิเมตร ความยาวระยะเกก 50 มิลลิเมตร ความกว้าง 13 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1

## 2.2 วิธีการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

ในการทดลองได้ฉีดชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารพองโดยใช้วิธีการฉีดปกติเพื่อใช้เป็นชิ้นงานเปรียบเทียบและฉีดชิ้นงานผสมสารพองร้อยละ 2 ใช้วิธีการฉีดที่แตกต่างกัน 3 วิธีคือ การฉีดโดยใช้ความดันฉีดต่ำ การฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดต่ำ และการฉีดแบบปล่อยไหล โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดแต่ละวิธีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดแต่ละวิธีการ

Injection method	Injection speed (mm/sec)	Injection pressure (bar)	Packing pressure (bar)	Packing time (s)	Cooling time (s)
Conventional method	100	120	10	5	20
Without packing pressure	100	120	0	0	25
With packing pressure	100	120	10	5	20
Low pressure	100	60	0	0	25

หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าใช้ตั้งเครื่อง (Setting) และความเร็วฉีดที่ระบุเป็นความเร็วของกระบอกฉีด (Plunger Speed)

วิธีการฉีดแบบปล่อยไหล เป็นการฉีดโดยใช้แรงดันฉีดต่ำ 60 บาร์ ทำการฉีดพลาสติกเกือบเต็มโพรงแบบแล้วปล่อยให้พอลิเมอร์ หลอมเหลวไหลโดยแรงดันจากก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารพองในเนื้อพอลิเมอร์ โดยกำหนดขนาด Shot Size ที่พอลิเมอร์ไหลเข้าเต็มแบบพอดี

อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิบริเวณหัวฉีด 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่กระบอกฉีด โซนที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 190, 200 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และวิธีการเย็นตัวปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์ตามเวลาเย็นตัวของแต่ละวิธีแล้วปลดชิ้นงานออกมา

## 2.3 การทดสอบ

ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองได้นำไปชั่งน้ำหนัก หาค่าความหนาแน่น ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบแรง

กระแทก ทดสอบแรงดึง และการยุบตัวของชิ้นงานโดยมีรายละเอียดดังนี้

ชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งความละเอียดตศนิยม ตำแหน่งที่ 4 ของกรีม Sartorius รุ่น CP224S การวัดความหนาแน่น ทดสอบด้วยชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่น และเครื่องชั่งผลิตโดยบริษัท METTLER TOLEDO รุ่น AB204-S ซึ่งคำนวณค่าความหนาแน่นได้จากสมการที่ 1 [8]

$$\rho = \frac{A}{A-B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (1)$$

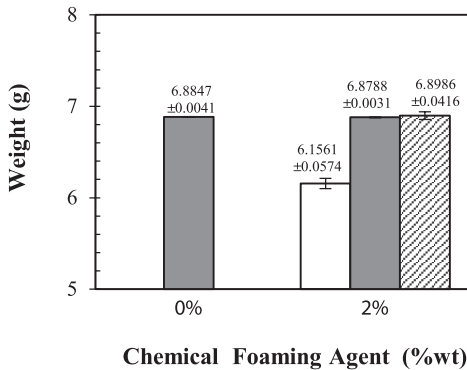
โดย  $\rho$  คือความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $A$  คือน้ำหนักชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)  
 $B$  คือน้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำกลั่น (กรัม)  
 $\rho_0$  คือความหนาแน่นของน้ำกลั่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $\rho_L$  คือค่าความหนาแน่นของอากาศ (0.0012 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

โครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy, SEM) JOEL รุ่น JSM 6610LV ความสามารถในการรับแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10 แบบ Izod ด้วยเครื่องทดสอบ Yasuda Seiki Seisakusho No. 9347 ความต้านทานแรงดึง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ด้วยเครื่องทดสอบวัสดุเอกประสงค์ (Universal Testing Machine) LLOYD รุ่น LR 50K ตรวจสอบการยุบตัวของชิ้นงานด้วยวิธีการ Visual วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพูนโดยโปรแกรม ImageJ [9]

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 น้ำหนัก

ผลการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่ไม่ผสมสารพองฉีดโดยใช้ความดันฉีดต่ำ 10 บาร์ และชิ้นงานที่ผสมสารพองฉีดทั้ง 3 วิธี แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารพองมีน้ำหนักเฉลี่ย 6.8847 กรัม ชิ้นงานผสมสารพองที่ได้จากวิธีการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดต่ำมีน้ำหนักเฉลี่ยต่ำที่สุด



□ ไม่ใช้ความดันฉีดย้า ■ ใช้ความดันฉีดย้า ▨ การฉีดแบบปล่อยไหล  
รูปที่ 2 น้ำหนักเฉลี่ยชิ้นงานที่ผสมและไม่ผสมสารพองจากชิ้นงานจำนวน 20 ชิ้น

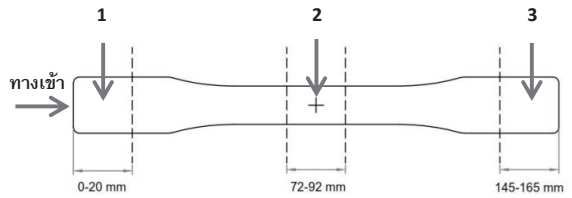
มีค่าเฉลี่ย 6.1561 กรัม ส่วนชิ้นงานผสมสารพองฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้าและฉีดแบบปล่อยไหลมีน้ำหนักใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ผสมสารพองแสดงให้เห็นว่าการผสมสารพองช่วยลดน้ำหนักชิ้นงานได้ 0.7286 กรัม คิดเป็นร้อยละ 10.58

### 3.2 ความหนาแน่น

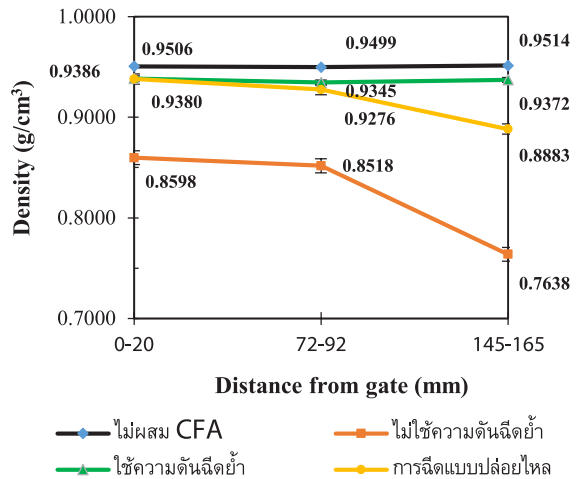
การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานที่ฉีดได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนกว้าง 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 คือ ส่วนที่ 1 ชิ้นงานห่างจากทางเข้าในช่วง 0 - 20 มิลลิเมตร ส่วนที่ 2 ชิ้นงานตรงกลางห่างจากทางเข้าช่วง 72 - 92 มิลลิเมตร และส่วนที่ 3 ส่วนปลายด้านที่พอลิเมอร์ไหลเข้าหลังสุดห่างจากทางเข้าช่วง 145 - 165 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานที่ฉีดด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธีและส่วนที่นำไปทดสอบแตกต่างกัน 3 ส่วน แสดงในรูปที่ 4

พบว่าชิ้นงานที่ผสมสารพองฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ามีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดทั้ง 3 ส่วน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฉีดอื่น โดยส่วนที่ 1 และ 2 มีค่าความหนาแน่นมากกว่าส่วนที่ 3 เนื่องจากส่วนที่ 1 และ 2 มีปริมาณรูพรุนน้อยกว่า (จะกล่าวต่อไป) ซึ่งเป็นผลจากการได้รับแรงดันขณะฉีดที่มากกว่าเพราะอยู่ระยะใกล้ทางเข้ามากกว่า [10] และการฉีดแบบปล่อยไหลให้ผลไปในทิศทางเดียวกับ



รูปที่ 3 ส่วนของชิ้นงานที่ทดสอบความหนาแน่นและโครงสร้างจุลภาค ส่วนที่ 1, 2 และ 3

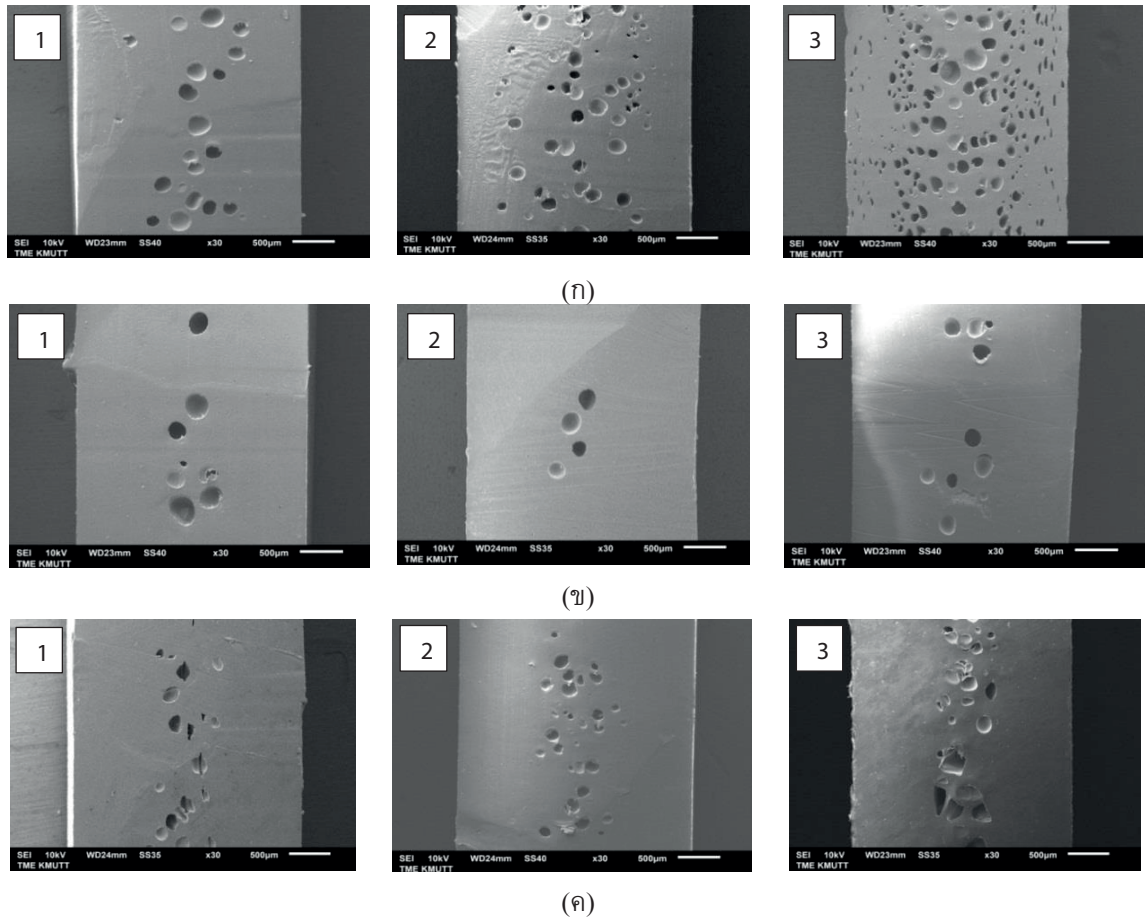


รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน 3 ส่วนที่มีการผสมสารพองและไม่ผสมสารพอง จากการเฉลี่ยชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น

การฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้าแต่มีค่าความหนาแน่นมากกว่าเนื่องจากความเร็วในการฉีดทำให้พอลิเมอร์บริเวณผิวที่สัมผัสกับแม่พิมพ์เย็นตัวก่อน [11] แล้วฟอร์มตัวเป็นชั้นผิวที่ไม่มีฟองอากาศที่หนามากกว่าทำให้จำกัดบริเวณที่จะเกิดรูพรุนได้เฉพาะตรงกลาง การฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้าในกรณีที่ไม่ผสมสารพองมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่ากรณีที่ไม่ผสมสารพองทั้ง 3 ส่วนของชิ้นงาน ทั้งนี้เป็นผลจากการเติมสารพองในพอลิโอสที่เพิ่มความหนาแน่นสูงทำให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในเนื้อของชิ้นงาน

### 3.3 โครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจาก



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคหน้าตัดชิ้นงานส่วนที่ 1-3 โดยวิธีการฉีด (ก) ไม่ใช้ความดันฉีดย้า (ข) ใช้ความดันฉีดย้าและ (ค) แบบปล่อยไหล

การฉีดทั้ง 3 วิธีได้ตัดชิ้นงานตามขวางแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ามีรูพรุนมากที่สุด ดังรูปที่ 5(1-3ก) โดยส่วนที่ 1 และ 2 มีรูพรุนน้อยกว่าส่วนที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นเนื่องจากส่วนที่ 1 และ 2 ได้รับแรงดันมากกว่าส่วนที่ 3 [10] ทำให้อิสระในการขยายตัวของฟองอากาศถูกบีบจำกัดไว้ แต่ส่วนที่ 3 ได้รับแรงดันน้อยกว่าทำให้ฟองอากาศสามารถขยายตัวได้อย่างเต็มที่ แต่เนื่องด้วยเป็นบริเวณที่เกิดฟองอากาศหนาแน่นทำให้มีการเบียดตัวกันเอง รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและบาง รูพรุนมีรูปร่างเรียวยาวเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ 1 และ 2

ส่วนวิธีการฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้า การเกิดรูพรุนของทั้ง 3 ส่วนใกล้เคียงกันดังรูปที่ 5(1-3ข) ทั้งนี้มีการให้แรงดันอย่างต่อเนื่องภายหลังฉีดเต็มแบบทำให้แรงดันที่ได้รับทั้ง 3 ส่วน มีขนาดใกล้เคียงกันบีบอัดฟองอากาศที่จะขยายตัวทำให้เกิดรูพรุนน้อย

การเกิดรูพรุนของชิ้นงานที่ฉีดแบบปล่อยไหล คล้ายคลึงกับการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้า กล่าวคือ ส่วนที่ 1 และ 2 มีการเกิดรูพรุนใกล้เคียงกัน และส่วนที่ 3 เกิดรูพรุนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าการฉีดแบบปล่อยไหลมีปริมาณรูพรุนที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการฉีดด้วยแรงดันต่ำทำให้พอลิเมอร์ไหลเข้าโพรงแบบช้า

พอลิเมอร์มีโอกาเซียนตัวสูงทำให้ส่วนที่เป็นผิวติดกับผนังแม่พิมพ์หนากว่าดังรูปที่ 5(3ค) ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Huang และ Wang [6] ซึ่งได้ทดลองฉีดขึ้นรูปพอลิสไตรีนด้วยไมโครเซลล์ลูลาร์พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ใช้ความเร็วในการฉีดสูงมีผลให้ส่วนผิวที่ไม่มีรูพรุนบางลง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใกล้ๆ กับส่วนผิวมีขนาดเล็กกว่าบริเวณตรงกลางชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาแน่นของชิ้นงานในตำแหน่งที่ห่างจากทางเข้ามีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณที่ใกล้ทางเข้าซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ใช้วิธีการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ำ ดังรูปที่ 5(3ก)

ตารางที่ 2 ขนาดรูพรุนของชิ้นงานจากการฉีด 3 วิธี

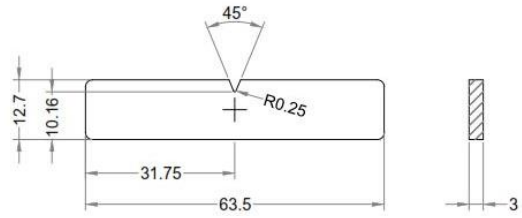
Injection method	Ø Min. (µm)	Ø Max. (µm)	Quantity	Ø Average (µm)
Without packing pressure	30	283	190	114
With packing pressure	80	307	22	193
Low pressure	38	296	72	133

หมายเหตุ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวระนาบ

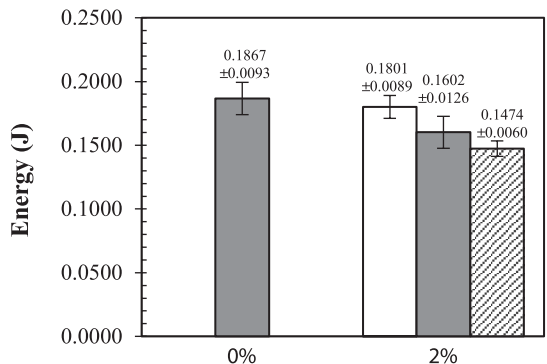
### 3.4 ความสามารถในการรับแรงกระแทก

ชิ้นงานทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทกมีมิติ ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ดังรูปที่ 6

จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีต่างกัน 3 วิธี เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่สารพองแสดงในรูปที่ 7 พบว่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ไม่มีการผสมสารพองสูงที่สุด เนื่องจากมีการใช้ความดันฉีดย้ำทำให้เนื้อพอลิเมอร์มีความแน่นสูงจึงรับแรงกระแทกได้ดี ชิ้นงานที่รับแรงกระแทกได้ดี รองลงไปเป็นชิ้นงานผสมสารพองที่ฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ำ จากการทดลองของ Chen และคณะ [12] พบว่าความหนาของผิว ขนาดของเซลล์และโครงสร้างเซลล์มีผลต่อสมบัติทางกล ซึ่งเป็นผลจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดสอดคล้องกับผลของการทดลองดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 6 มิติชิ้นงานสำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก

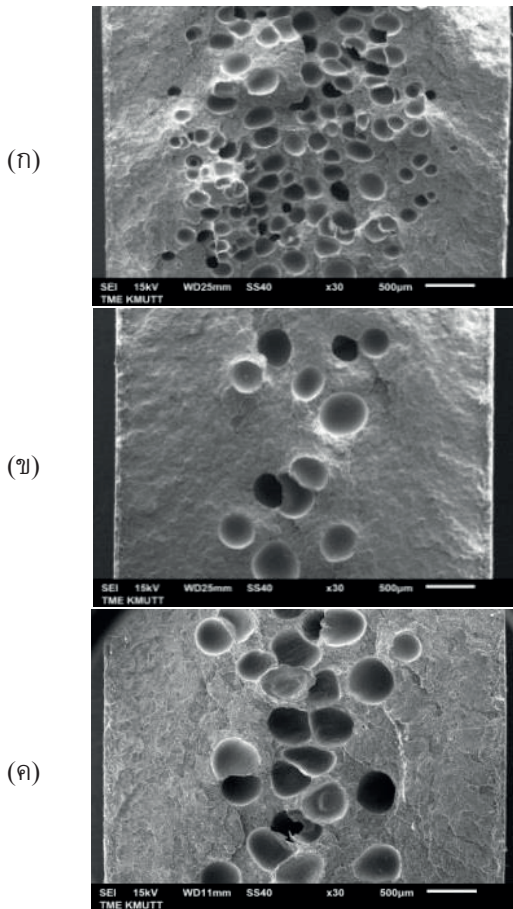


Chemical Foaming Agent (%wt)

□ ไม่ใช้ความดันฉีดย้ำ ■ ใช้ความดันฉีดย้ำ ▨ การฉีดแบบปล่อยไหล

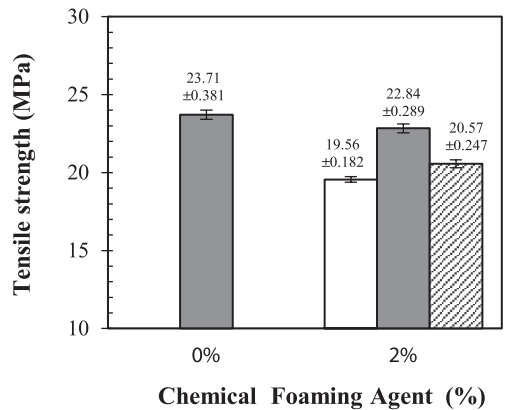
รูปที่ 7 ความสามารถในการรับแรงกระแทกเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีการผสมและไม่ผสมสารพองเฉลี่ยจากชิ้นงานจำนวน 15 ชิ้น

รูปที่ 8 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานบริเวณแตกหักหลังทดสอบความสามารถรับแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้ำมีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 239 ไมโครเมตร กระจายตัวอยู่เป็นบริเวณกว้างกลางชิ้นความหนาดังรูปที่ 8(ก) ซึ่งโครงสร้างรูพรุนจะทำให้ดูดซับแรงกระแทกได้ดีจึงมีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุด ชิ้นงานจากวิธีการฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้ำมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 367 ไมโครเมตร กระจายอยู่เป็นบริเวณแคบๆ ในแนวกึ่งกลางความหนาดังรูปที่ 8(ข) เนื้อพอลิเมอร์ถูกอัดตัวในจังหวะฉีดย้ำทำให้มีความหนาแน่นสูงกว่าซึ่งควรจะสามารถรับแรงกระแทกได้ดีแต่เนื่องจาก



**รูปที่ 8** ภาพตัดขวางชิ้นงานทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยวิธี (ก) การฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้า (ข) การฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้า และ (ค) การฉีดแบบปล่อยไหล

มีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่บริเวณแคบๆ กลางชิ้นงาน มีปริมาณไม่มากนักและมีขนาดใหญ่จึงกลายเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานทำให้ความสามารถในการรับแรงลดน้อยลงกว่าวิธีการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้า ส่วนวิธีการฉีดแบบปล่อยไหลเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 430 ไมโครเมตร กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างกึ่งกลางความหนาประกอบกับเนื้อพอลิเมอร์ไม่ได้ถูกอัดตัว ดังรูปที่ 8(ค) ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกต่ำที่สุดในทั้ง 3 วิธีที่ใช้ฉีด

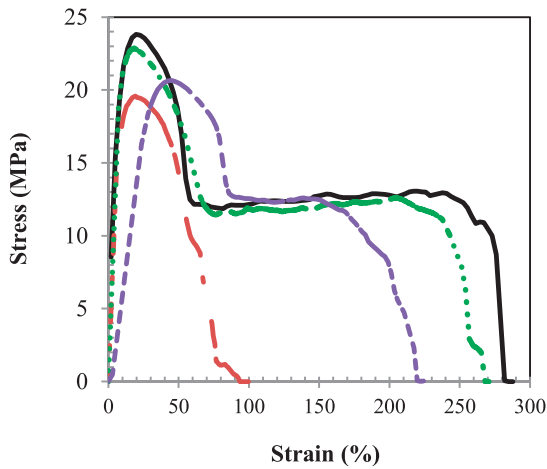


□ ไม่ใช้ความดันฉีดย้า ■ ใช้ความดันฉีดย้า ▨ การฉีดแบบปล่อยไหล  
**รูปที่ 9** ความต้านแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผสมและไม่ผสมสารพองจากการฉีด 3 วิธี เฉลี่ยจากชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น

### 3.5 ความต้านแรงดึงสูงสุด

การเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมสารพองและชิ้นงานที่ผสมสารพอง จากการฉีดทั้ง 3 วิธี แสดงในรูปที่ 9 ชิ้นงานที่ไม่ผสมสารพอง มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 23.71 เมกะพาสคัล ชิ้นงานที่มีการผสมสารพองที่ฉีดโดยใช้ความดันฉีดย้ามีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 22.84 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ผสมสารพอง เนื่องจากโครงสร้างมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อย (ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในรูปที่ 5 ข-2) ทำให้มีส่วนที่เป็นเนื้อพอลิเมอร์มาก ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึงมีพื้นที่มากส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี สำหรับชิ้นงานจากการฉีดแบบปล่อยไหลและฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้า มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 20.57 และ 19.56 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ผลการทดสอบแรงดึงทำให้เห็นได้ว่าความต้านแรงดึงต่างกันไม่มากนักซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการเกิดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อขนาดพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึง ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hwang และ Ke [7] ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) แสดงดังรูปที่ 10





รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของชิ้นงานที่ผสมและไม่ผสมสารพองจากวิธีการฉีด 3 วิธี

— ไม่ผสม CFA      ······ ใช้ความดันฉีดย้า  
 ······ ใช้ความดันฉีดย้า      - - - - - ไม่ใช้ความดันฉีดย้า  
 - - - - - ไม่ใช้ความดันฉีดย้า      - - - - - แบบปล่อยไหล



รูปที่ 11 ชิ้นงานไม่ผสมสารพอง ไม่ใช้ความดันฉีดย้า

### 3.6 การยุบตัวของชิ้นงาน

จากการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ผสมสารพองและผสมสารพอง พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีการผสมสารพองฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดย้าเกิดการยุบตัวแสดงดังรูปที่ 11 แต่เมื่อมีการใช้ความดันฉีดย้าชิ้นงานที่ได้ไม่เกิดการยุบตัวดังรูปที่ 12 เมื่อทดลองฉีดชิ้นงานที่มีการผสมสารพองด้วยวิธีการฉีดโดยทั้งใช้ความดันฉีดย้าและไม่ใช้ความดันฉีดย้า พบว่าชิ้นงานไม่เกิดการยุบตัว ตัวอย่างชิ้นงานผสมสารพองกรณีไม่ใช้ความดันฉีดย้าแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 ชิ้นงานไม่ผสมสารพอง ใช้ความดันฉีดย้า



รูปที่ 13 ชิ้นงานผสมสารพอง ไม่ใช้ความดันฉีดย้า

### 3.7 อภิปรายผล

จากการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทั้ง 3 วิธี ทำให้ทราบได้ว่าวิธีการฉีดที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีการผสมสารพอง นั้นจะต้องฉีดอย่างรวดเร็ว (วิธีการที่ 1) ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กมากที่สุด ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่นและน้ำหนักของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักลดลงร้อยละ 10.58 เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมสารพอง เป็นการฉีดโดยใช้แรงดันและความเร็วในการฉีดสูงแต่ไม่มีการใช้ความดันฉีดย้าทำให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากกระจัดเป็นบริเวณกว้างกลางชิ้นความหนาส่งผลให้ น้ำหนักลดลงอีกทั้งให้ผลของความต้านทานแรงกระแทกที่ดีที่สุดจากทั้ง 3 วิธีการที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานผสมสารพอง แต่มีความต้านทานแรงดึงลดลง ทำให้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับ

นำไปใช้ขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการรับแรงดึงสูง นอกจากนี้ การผสมสารพองจะช่วยลดปัญหาการยุบตัวของชิ้นงานลงได้

#### 4. สรุป

1. การฉีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนกระจายภายในที่รูปร่างสมบูรณ์ต้องฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดต่ำ ซึ่งแตกต่างจากการฉีดขึ้นรูปโดยทั่วไปที่ต้องใช้ความดันฉีดต่ำจึงได้งานที่สมบูรณ์

2. การฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดต่ำทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานต่ำ กล่าวคือน้ำหนักของชิ้นงานลดลงซึ่งเป็นข้อดี โครงสร้างมีรูพรุนจำนวนมากที่สุด รูพรุนมีขนาดเล็ก มีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ดี แต่ความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ฉีดโดยใช้ความดันฉีดต่ำและแบบปล่อยไหล ผิวชิ้นงานบริเวณที่ไม่มีรูพรุนบางที่สุด

3. การฉีดโดยใช้ความดันฉีดต่ำ โครงสร้างมีปริมาณรูพรุนน้อย รูพรุนมีขนาดใหญ่ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าการฉีดโดยไม่ใช้ความดันฉีดต่ำ แต่มีความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาหมายเลข MRG555E106 และบริษัทเอเอฟซูเปอร์เซลล์ จำกัด ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. - อุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื้อหาในบทความนี้เป็นความเห็นของผู้รับทุน ผู้ให้ทุนไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Rajamangala University of Technology. (2012, Nov. 16). *HDPE*. [Online]. Available: <http://www.electron.rmutphysics.com/chemistry-glossary/>. (in Thai)

[2] N. LeMaster, "How to Mold & Extrude Using Chemical Foaming Agents," *Plastics Technology* 57, pp. 27-29, 2011.

[3] A.K. Bledzki and O. Faruk, "Injection Moulded microcellular wood fibre-polypropylene composite," *Composite Part A* 37, pp.1358-1367, 2006.

[4] M. Yuan and L.S. Turng, "Microstructure and mechanical properties of microcellular injection molded polyamide-6 nanocomposites," *Polymer* 46, pp. 7273-7292, 2005.

[5] Z.X. Xin, Z.X. Zhang, K. Pal, J.U. Byeon, S.H. Lee, and J.K Kim, "Study of microcellular injection-molded polypropylene/waste ground rubber tire powder blend," *Materials and design* 31, pp. 589-593, 2010.

[6] H.X. Huang and J.K Wang, "Equipment development and experimental investigation on the cellular structure of microcellular injection molded parts," *Polymer Testing* 27, pp. 513-519, 2009.

[7] S.S. Hwang and Z.S. Ke, "The dimensional stability of a microcellular injection molded gear shaft," *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, pp. 263-275, 2008.

[8] Mettler-Toledo GmbH 2004. (2013, Jan. 20). *Operating instructions: Density Determination kit for Excellence XP/XS precision balances*. [Online]. Available: [http://us.mt.com/dam/mt\\_ext\\_files/Editorial/Generic/6/XP-XS\\_Precision\\_Density\\_determination\\_kit\\_BA\\_Editorial-Generic\\_1094557869341\\_files/xp-xs-density-ba-117807\\_32.pdf](http://us.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/6/XP-XS_Precision_Density_determination_kit_BA_Editorial-Generic_1094557869341_files/xp-xs-density-ba-117807_32.pdf).

[9] ImageJ 2004. (2013, June. 26). *ImageJ Image Processing Analysis in Java*. [Online]. Available:



- imagej.nih. /ij/index.html.
- [10] S.T. Lee and D. Scholz, "Polymeric foams," *Technology and Development in Regulation Process and Products*, pp. 121-122, 2008.
- [11] V. Goodship and J.C. Love, "Multi-Material Injection Moulding," *Rapra Review Reports*, vol.13, pp. 5-6, 2002.
- [12] S.C. Chen, W.H. Liao, and R.D. Chien, "Structure and mechanical properties of polystyrene foams made through microcellular injection molding via control mechanisms of gas counter pressure and mold temperature," *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 1125-1131, 2012.