

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดฝาเกลียวพลาสติกประเภท  
วัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อลดปัญหาการหดตัว: กรณีศึกษา  
OPTIMAL FACTOR ANALYSIS IN THE INJECTION PROCESS OF  
HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC SCREW CAPS TO REDUCE  
SHRINKAGE PROBLEMS: A CASE STUDY

ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง<sup>1\*</sup> และ อดิเรก ชัยนาวกุล<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่  
จังหวัดเชียงใหม่ 50300,

<sup>1</sup>supasit.m@rmutl.ac.th, <sup>2</sup>adirake@rmutl.ac.th

Supasit Manokruang<sup>1</sup> and Adirake Chainawakul<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Lecturer, Tools and Die Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang Chiang Mai 50300, Thailand

<sup>1</sup>supasit.m@rmutl.ac.th, <sup>2</sup>adirake@rmutl.ac.th

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกมีบทบาทที่สำคัญกับอุตสาหกรรมทั้งภายในและภายนอกของประเทศ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งสำคัญของการผลิตโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีการประกอบเข้าด้วยกัน (Assembly) ปัญหาของผลิตภัณฑ์ที่เกิดมีหลากหลายสาเหตุ การหดตัว (Shrinkage) เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยงานวิจัยนี้เป็นการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำพลาสติกประเภทวัสดุไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High-Density Polyethylene : HDPE) ซึ่งการหดตัวของชิ้นงานส่งผลต่อการประกอบระหว่างฝาเกลียวขวดน้ำกับขวดน้ำ งานวิจัยนี้จึงใช้หลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การหดตัวของชิ้นงาน คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Tw), และอุณหภูมิหล่อเย็น (Tc) ทำการทดลอง  $8+1 = 9$  การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ซ้ำ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ ( $\alpha$ ) 95% รวมทั้งหมด 18 การทดลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ อยู่ที่ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) เท่ากับ 190 °C อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Tw)

เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิหล่อเย็น ( $T_c$ ) เท่ากับ  $45^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าการหดตัวน้อยที่สุดคือ 1.39% และพบว่าปริมาณของเสียลดลงเหลือ 12.08% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการนำทฤษฎีหลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เข้ามาช่วยหาปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการหดตัวนั้นส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งนี้ยังพบว่าสามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิตลง

**คำสำคัญ:** ปัจจัยที่ส่งผล, พื้นผิวตอบสนอง, การหดตัว, โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

### ABSTRACT

Nowadays, the plastics industry plays an essential role in the country's internal and external industries. Especially assembled products, product quality is an essential aspect of production. There are various product problems. Shrinkage is an inevitable problem with plastic products. This research is to determine the factors that affect the shrinkage of the screw cap of the plastic bottle made of High-Density Polyethylene (HDPE) material, where the shrinkage of the workpiece affects the assembly between the screw cap of the water bottle and the water bottle. Therefore, Response Surface Methodology (RSM) experimental design principles was used to determine the factor affecting the shrinkage of the workpiece, namely the melt temperature of plastic ( $T_m$ ), mold temperature ( $T_w$ ), and cooling temperature ( $T_c$ ). The 9 (8+1) experiments were performed with 2 replications at a confidence level of ( $\alpha$ ) 95 %. A total of 18 experiments found that the significant relevant factor affecting the shrinkage of the bottle cap specimens was the melting temperature of plastic ( $T_m$ ) of  $190^{\circ}\text{C}$ , the mold temperature ( $T_w$ ) of  $60^{\circ}\text{C}$  and cooling temperature ( $T_c$ ) is  $45^{\circ}\text{C}$ , with a minimum shrinkage of 1.39% and can be found that defects decreasing were 12.08%. Therefore, it can be concluded that applying the Responsive Surface Method (RSM) experimental design principles to help determine the appropriate factor that transmits the minimal shrinkage effect affects the quality and reduce production costs of the bottle cap.

**KEYWORDS:** Factor; Response surface; Shrinkage; High-Density Polyethylene

### 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนมากเกิดขึ้นจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เนื่องจากให้อัตราการผลิตได้ปริมาณมาก และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างดี [1, 2]

การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติกจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและลดต้นทุนการผลิตเป็นเป้าหมายหลัก แต่สิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ที่เกิดกับผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น การหดตัว (Shrinkage) [2-4] การเกิดรอยพ่น (Jetting) [5] การเกิดครีบ (Flashing) [6-8] การเกิดรอยไหม้ (Burn mark) [7, 8] การเกิดรอยแห้ว (Shot shot) [8] การเกิดรอยยุบ (Sink mark) [7-9] รอยเชื่อมชน (Weld line) [7] และการเกิดการโก่งงอ (Warping) [7, 8, 10] เป็นต้น ซึ่งแต่ละข้อบกพร่องมีสาเหตุการเกิดที่แต่ต่างกัน โดยงานวิจัยนี้เน้นไปที่ข้อบกพร่องการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำด้วยวัสดุ วัสดุไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High-Density Polyethylene: HDPE) [2] เนื่องจากเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการประกอบเข้ากับขวดน้ำ ที่ไม่สามารถประกอบเข้าด้วยกันได้ เมื่อเกิดการหดตัว ขนาดของฝาเกลียวขวดน้ำไม่ตรงตามที่แบบกำหนด [4] จึงเป็นที่มาของการหาสาเหตุการเกิดปัญหานี้ ทั้งนี้การหดตัว (Shrinkage) มีสาเหตุหลักเกิดจากการออกแบบแม่พิมพ์ ชนิดวัสดุ และพารามิเตอร์ของการฉีด เมื่อพิจารณาสาเหตุข้างต้น พารามิเตอร์ของการฉีด เป็นสาเหตุที่ส่งผลโดยตรงกับคุณภาพฝาเกลียวขวดน้ำโดยพารามิเตอร์ของการฉีดประกอบไปด้วย อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ( $T_m$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์ ( $T_w$ ) และอุณหภูมิการหล่อเย็น ( $T_c$ ) [11]

ดังนั้น จึงนำแนวคิดออกแบบหลักการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) [12] เข้ามาช่วยหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ เพื่อลดปัญหาที่เกิดข้อบกพร่องของการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดให้ดีขึ้นด้วย

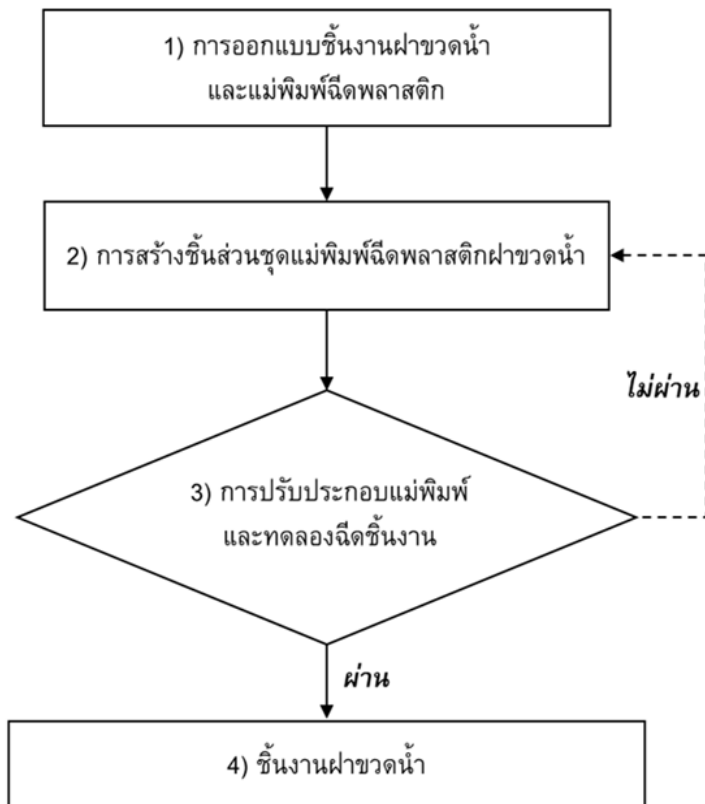
## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุฝาเกลียวขวดน้ำ ไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High density polyethylene: HDPE)

พลาสติกชนิดไฮเดนซิติโพลีเอทิลีน (High density polyethylene: HDPE) จัดอยู่ในกลุ่ม Semi crystalline โครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (Branching) และมีการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง เป็นพลาสติกที่มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง ยืดหยุ่นได้ดี และที่สำคัญ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความเหนียว แต่ทนความร้อนได้ไม่มากนัก ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (Chemical) เป็นฉนวนไฟฟ้า และการหดตัวสูง [2-4] เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ โดยสมบัติของวัสดุที่ควรคำนึงถึง คือ หนาแน่นของวัสดุ  $0.96\text{ g/cm}^3$  อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยหลัก โดยมีพารามิเตอร์ของวัสดุ HDPE อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature,  $T_m$ ) อยู่ที่  $190\text{-}240\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature,  $T_w$ ) อยู่ที่  $30\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13]

## 2.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฝากลีวยวดน้ำ

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกฝากลีวยวดน้ำ โดยเริ่มจากการออกแบบชิ้นงานฝากลีวยวดน้ำและแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer aided design: CAD) [14] จากนั้นผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer aided manufacturing: CAM) [15] การปรับประกอบชุดแม่พิมพ์ฝากลีวยวดน้ำ การทดลองการฉีดชิ้นงานฝากลีวยวดน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการปรับตั้งพารามิเตอร์การฉีด คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ( $T_m$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์ ( $T_w$ ) และอุณหภูมิการหล่อเย็น ( $T_c$ ) และได้รับชิ้นงานฝากลีวยวดน้ำตามที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฝากลีวยวดน้ำ

## 2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีผลต่อกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) [16] เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใน การตรวจสอบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หลาย ๆ

ปัจจัยของ (Factor) ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆในแต่ละครั้งได้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อิทธิพลหลัก (Main effect) และ อิทธิพลร่วม (Interaction effect) [17] โดยมีงานวิจัยดังต่อไปนี้ กล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติก ABS โดยการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเข้ามาช่วย มีปัจจัยที่ได้ทำการศึกษา ทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการฉีด แรงดันฉีด ระยะการเปลี่ยนแปลงฉีดอัดย้า เวลาฉีดย้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น จากผลการจำลองกระบวนการฉีดพบว่าปัจจัยที่ส่งผลอิทธิพลต่อการเสียรูปของชิ้นงาน ได้แก่ เวลาหล่อเย็น อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก เวลาฉีดย้า และอัตราการฉีด ทำให้งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีด เพื่อลดต้นทุนและเวลาการผลิตได้อย่างเหมาะสม

## 2.4 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM)

วิธีการรวบรวมนำเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา ในปัญหาผิวตอบสนองส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้จะใช้ ดังแสดงสมการที่ 1 [18]

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Oliaei, et al [19] กล่าวถึงการหาการหดตัว และการบิดตัวของชิ้นงานขึ้นพลาสติกที่เหมาะสม โดยใช้การออกแบบการทดลอง Taguchi ANOVA และ Artificial neural Network เข้ามาวิเคราะห์ปัญหา 5 ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิหล่อเย็น เวลาฉีดย้า แรงดันฉีดย้า อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิในการหลอมเหลว สามารถสรุปอิทธิพลที่มีผลต่อการหดตัว และการบิดตัวของชิ้นงานขึ้นพลาสติก สรุปความสัมพันธ์ของปัจจัย อุณหภูมิหล่อเย็น เวลาฉีดย้า และอุณหภูมิในการหลอมเหลว ของวัสดุ Polylactic acid / Polyurethane (PLA-TPU)

Wang, et al [20] กล่าวถึงระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบระบบหล่อเย็น ร้อน และเย็น โดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) หาอุณหภูมิที่เหมาะสมบริเวณคาร์วิตซ์ของแม่พิมพ์ เพื่อให้เกิดความเค้นต่อชิ้นงานน้อยที่สุด และเปรียบเทียบกับกรจำลองด้วยระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

Ruennareenard [21] การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นเพลทยัดติดกระดูกจากวัสดุประสมของไฮดรอกซีอะปะไทต์ และแก้วชีวภาพ โดยใช้แนวทางในการศึกษาการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนกลาง โดยมีปัจจัยที่

สำคัญในการขึ้นรูป คือ ส่วนผสมของแก้วชีวภาพ ความดันในการอัดขึ้นรูป และเวลาในการอัดขึ้นรูป เพื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน และลดเวลาในการผลิต

Sudsawat [22] ศึกษาพารามิเตอร์ของการฉีดพลาสติกที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานของการโก่งงอ (Warpage) และการหดตัว (Shrinkage) การออกแบบการทดลองด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Respond surface method: RSM) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์การฉีด คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) อัตราการไหลของวัสดุ (Flow rate) แรงดันฉีด (Injection pressure) เวลาฉีดย้า (Packing time) แรงดันฉีดย้า (Packing pressure) และเวลาการหล่อเย็น (Cooling time) ผลการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) และเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องด้านการโก่งงอ (Warpage) และการหดตัว (Shrinkage)

### 3. วิธีการทดลอง

จากที่ได้กล่าวในส่วนข้างต้นถึงสาเหตุที่ส่งผลโดยตรงกับคุณภาพฝาเกลียวขวดน้ำ โดยพารามิเตอร์ของการฉีดประกอบไปด้วย อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ( $T_m$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์ ( $T_w$ ) และอุณหภูมิการหล่อเย็น ( $T_c$ ) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้ทำให้เกิดปัญหาการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำจึงเป็นที่มาในการกำหนดปัจจัยการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

#### 3.1 การกำหนดปัจจัยการทดลอง

เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำวัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) จึงกำหนดปัจจัยการทดลองออกเป็น 3 ปัจจัย และ 2 ระดับ โดยกำหนดให้ response (Y) คือ การหดตัวของชิ้นงานฉีด (Shrinkage) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด (Minimize) การทดลองในการฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับการทดลองในการฉีดขึ้นรูปฝาเกลียวขวดน้ำ [13]

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับ (°C)	
		ต่ำ	สูง
อุณหภูมิหลอมเหลวของ HDPE	$T_m$	190	240
อุณหภูมิแม่พิมพ์	$T_w$	30	60
อุณหภูมิหล่อเย็น	$T_c$	25	45

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ ส่วนประสมกลาง (Central composite design: CCD) [23] โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ออกเป็น 3 ปัจจัย และระดับ 2 การทดลองที่จุดกึ่งกลางจำนวน 1 จุด ดังนั้นมีจำนวนการทดลอง เท่ากับ  $8+1 = 9$  การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ซ้ำ ดังนั้นการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง และค่าความเชื่อมั่นที่ ( $\alpha$ ) 95 % แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองด้วยผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง

ครั้งที่	Tm (°C)	Tw (°C)	Tc (°C)
1	190	60	45
2	190	60	45
3	240	60	45
4	240	30	45
5	190	60	25
6	215	45	35
7	240	30	25
8	240	60	45
9	190	30	45
10	190	60	25
11	190	30	45
12	240	30	25
13	240	60	25
14	190	30	25
15	240	60	25
16	190	30	25
17	240	30	45
18	215	45	35

### 3.2 เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ทดสอบชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

เครื่องฉีดพลาสติก (Plastic injection machine) ที่สำหรับการทดสอบ รุ่น HYF-1000 แสดงดังรูปที่ 2 และรายละเอียดของเครื่องฉีดพลาสติก แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 2 เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น HYF-1000

ตารางที่ 3 รายละเอียดของเครื่องฉีดพลาสติก รุ่น HYF-1000

รายการ	ลักษณะ	หน่วย
ระบบฉีด	Ø สกรู	35 mm
	ปริมาตรชิ้นงานสูงสุด	160 cm <sup>3</sup>
	แรงดันฉีด	1,835 kg/cm <sup>2</sup>
	อัตราการฉีด	90 cm <sup>3</sup> /s
	ความเร็วรอบ	0-200 rpm
ระบบยึดแม่พิมพ์	ขนาดแม่พิมพ์	360 x 315 mm
	กำลังยึดแม่พิมพ์สูงสุด	100 t
	ระยะเปิดแม่พิมพ์สูงสุด	305 mm

### 3.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติกชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

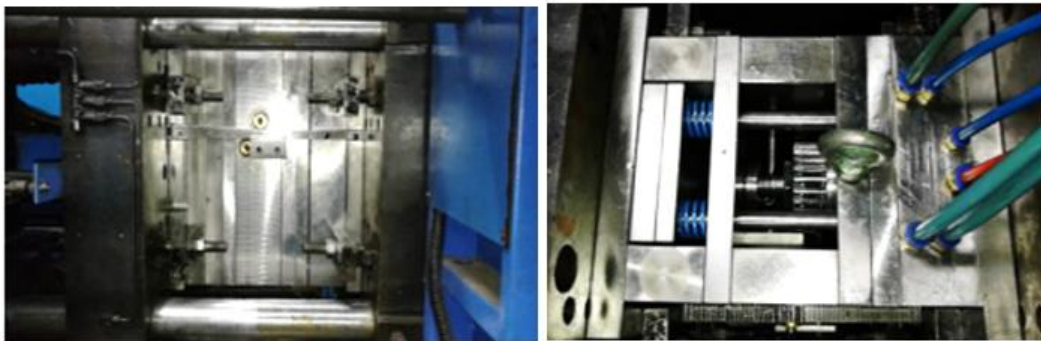
พารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก HYF-1000 ปรับตั้งค่าคือ แรงดันฉีด แรงบิดแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น แสดงดังตารางที่ 4



#### ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก (คงที่)

รายการ	ค่า	หน่วย
แรงดันฉีด	64.83	kg/cm <sup>2</sup>
แรงปิดแม่พิมพ์	68	t
เวลาหล่อเย็น	18.59	s

และทำการทดลองในการฉีดชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยแสดงการติดตั้งแม่พิมพ์ฝาเกลียวขวดน้ำกับเครื่องฉีดพลาสติก HYF-1000 แสดงดังรูปที่ 3



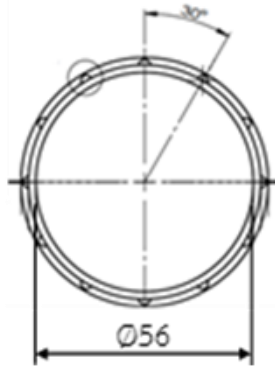
ด้านหน้าเครื่องฉีด

ด้านบนเครื่องฉีด

รูปที่ 3 ทดลองในการฉีดชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ

#### 3.4 ตำแหน่งจุดตรวจสอบ

ตำแหน่งจุดตรวจสอบชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำบริเวณภายในฝาขวดขนาด Ø56 mm เป็นจุดที่สำคัญเพราะมีการประกอบเข้ากับฝาเกลียวขวดน้ำ ดังนั้นจุดที่สำคัญในการตรวจสอบในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 4



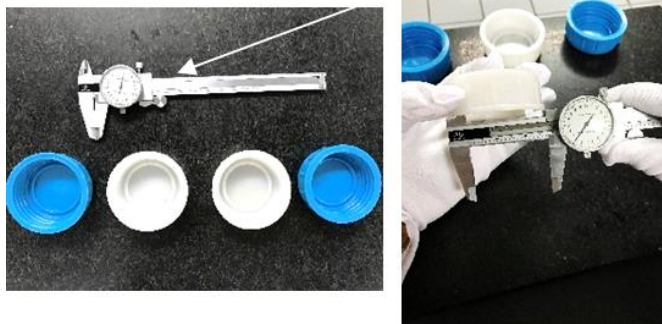
รูปที่ 4 ตำแหน่งจุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด  $\varnothing 56$  mm ฝาเกลียวใน

#### 4. ผลการดำเนินงาน

##### 4.1 การตรวจสอบชิ้นงาน

ผลการตรวจสอบชิ้นงานหลังจากการทดลองฉีดตามตารางที่ 3 โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ที่ความละเอียด 0.02 mm สำหรับการตรวจสอบขนาดของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ จุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด  $\varnothing 56$  mm โดยเกณฑ์ในการพิจารณาหากชิ้นงานมีขนาดโตกว่าหรือหดตัวลงน้อยกว่าขนาดที่ออกแบบ ( $\varnothing 56$  mm) ถือว่าชิ้นงานไม่ได้ขนาดซึ่งส่งผลกระทบต่อประกอบต่อไป รูปที่ 5 แสดงการตรวจวัดขนาดฝาเกลียว

เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 0.02 mm



รูปที่ 5 ตำแหน่งจุดตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด  $\varnothing 56$  mm ฝาเกลียวใน

##### 4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง

ผลวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของระดับการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยใช้โปรแกรม Minitab® 21.4.1 (64-bit) บน Microsoft Window 11-64 bit AMD Ryzen 7 ดังแสดงรูปที่ 6

**Fatorial Regresssion: Total Stress Displacment vs Melt temp., Mold temp. and Cooling temp. Analysis of variance**

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.273892	0.039127	12.180000	0.000
Linear	3	0.245437	0.081812	25.470000	0.000
Melt temp. (Tm)	1	0.215760	0.215760	67.170000	0.000
Mold temp. (Tw)	1	0.006724	0.006724	2.090000	0.179
Cooling temp. (Tc)	1	0.022952	0.022952	7.140000	0.023
2-Way interactions	3	0.028014	0.009338	2.910000	0.088
Melt temp. (Tm) * Melt temp. (Tw)	1	0.011130	0.011130	3.460000	0.092
Melt temp. (Tm) * Cooling temp. (Tc)	1	0.010404	0.010404	3.240000	0.102
Mold temp. (Tw) * Cooling temp. (Tc)	1	0.006480	0.006480	2.020000	0.186
3-Way interactions	1	0.000441	0.000441	0.140000	0.719
Melt temp. (Tm) * Mold temp. (Tw) * Cooling temp. (Tc)	1	0.000441	0.000441	0.140000	0.719
Error	10	0.032124	0.003212		
Curvature	1	0.001995	0.001995		0.460
Pure reeor	9	0.030128	0.003348		
Total	17	0.306016			

**Model summary**

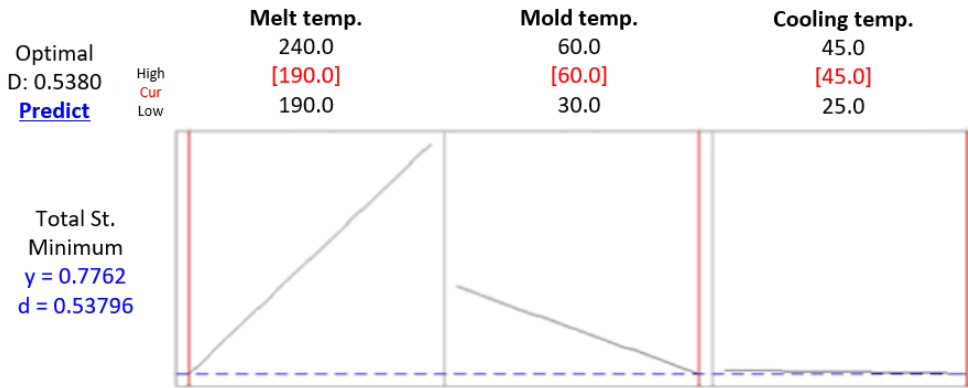
S	R-sq	R-sq (adj.)	R-sq(predX)
0.0566777	89.50%	82.15%	60.18%

## รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของระยการหดตัวของชิ้นงาน ฝาเกลียวขวดน้ำ

จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยมี 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha = 0.05$ ) ปัจจัย คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) และอุณหภูมิการหล่อเย็น (Tc) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวแสดงผลการหดตัวของฝาเกลียวขวดน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) ของการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำมีค่าเท่ากับ 89.50 % เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า Adjusted R-Square (82.15%) มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้พบว่าค่า R-Square Predicted มีค่าเท่ากับ 60.81% ซึ่งน้อยกว่าค่า R-Square ดั้งนั้นขนาดของข้อมูลถือว่าเป็นปกติ จึงซึ่งสามารถแสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้

### 4.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัย

ค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดพลาสติกแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Tm) เท่ากับ 190 °C, (Tw) เท่ากับ 60 °C และอุณหภูมิการหล่อเย็น (Tc) เท่ากับ 45 °C และมีค่าการทำนายการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ (Predicted Responses) ที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.39% จากขนาดที่ออกแบบ ค่าทำนายผลตอบของการหดตัว (Y) อยู่ที่ 0.7762 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) = 0.53796 ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัย

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก (Melt temperature:  $T_m$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature:  $T_w$ ) และอุณหภูมิหล่อเย็น (Cooling temperature:  $T_c$ ) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการหดตัวของชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ เมื่อทำการศึกษาพบว่า ปัญหาการปรับตั้งก่อนการฉีดนั้นมีช่วงการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ซึ่งส่งผลให้เพิ่มเวลา กระบวนการทำงาน และต้นทุนการผลิตจึงได้นำทฤษฎีการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เข้ามาช่วยออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย และระดับ 2 ระดับ ทดลองที่จุดกึ่งกลางจำนวน 1 จุด เท่ากับการทดลอง  $8+1 = 9$  การทดลอง และทดลองจำนวน 2 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง เมื่อทำการตรวจวัดและตรวจสอบบริเวณจุดตรวจสอบพบว่า มีการหดตัวของชิ้นงานที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.39% โดยที่ใช้ปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ต้องปรับมีค่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ( $T_m$ ) เท่ากับ  $190^\circ\text{C}$  อุณหภูมิแม่พิมพ์ ( $T_w$ ) เท่ากับ  $60^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิการหล่อเย็น ( $T_c$ ) เท่ากับ  $45^\circ\text{C}$  เหมาะสมที่สุดในการฉีดชิ้นงานฝาเกลียวขวดน้ำ โดยลดปริมาณของเสียลงเหลือ 29 ชิ้น คิดเป็น 12.08% จากเดิมในกระบวนการผลิต 240 ชิ้น/ชั่วโมง (8 ชั่วโมง/วัน จำนวนชิ้นงาน 2 ชิ้น/รอบการผลิต และ 1 รอบการผลิต เท่ากับ 25 วินาที) พบว่าเกิดของเสียขึ้นถึง 67 ชิ้น คิดเป็น 27.92% ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตค่อนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ต่องานฉีดชิ้นงานพลาสติกในด้านการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมที่ช่วยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เห็นจากจำนวนของเสียที่ลดลง

## References

- [1] Phathom H, Jakkapan K. Design of experiment (DOE) to reduce waste in plastic injection process of automotive parts. *Kasem Bundit engineering journal* 2013;3:73-95. (In Thai)
- [2] Phrasang K. The study of shrinkage percentage HDPE based on the ATSM D955 standard test method. *RMUTP Research Journal Special Issue The 5th Rajamangala University of Technology National Conference 2013*:642-51. (In Thai)
- [3] Nagahanumaiah, Ravi B. Effects of injection molding parameters on shrinkage and weight of plastic part produced by DMLS mold. *Rapid prototyping journal* 2009;15(3): 179-86.
- [4] Kurt M, Kaynak Y, Kamber OS, Mutlu B, Bakir B, Koklu U. Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. *The international journal of advanced manufacturing technology* 2010;46:571-78.
- [5] Tosello G, Costa F. High precision validation of micro injection molding process simulations. *Journal of manufacturing processes* 2019;48:236-48.
- [6] Chacinski T, Sutowski P. Common defect injection molding of plastic products and their influence on product quality. *Journal of mechanical and energy engineering* 2012;5(45):7-14.
- [7] Li J, Liu W, Xia X, Zhou H, Jing L, Peng X, et al. Reducing the burn marks on injection-molded parts by external gas-assisted injection molding. *Polymers* 2021;13:4087.
- [8] Mansur A, Alim M, Sunaryo. Plastic injection quality controlling using the lean six sigma and FMEA method. *Materials science and engineering* 2016;105:012006.
- [9] Gruber DP, Berger G, Pacher G, Friesenbichler W. Novel approach to the measurement of the visual perceptibility of sink marks on injection molding parts. *Polymer Testing* 2011;30(6):651-6.
- [10] Berihun EA, Bogale TM. Parameter optimization of PET plastic preform bottles in injection molding process using grey-based Taguchi method. *Advances in materials science and engineering* 2022:4416602.
- [11] Yemenici O, Ardagnhey A. An analysis of cooling time in plastic injection moulding with influence of inlet temperature of cooling fluid. *International journal of mechanical and production engineering* 2016;4(6):76-9.

- [12] Ch'ng SQ, Nasir SM, Fathullah M, Norman NZ, Hazwan MHM. Warpage analysis on thick shell part using response surface methodology (RSM) to optimize parameter setting in injection molding process. AIP conference proceedings 2018; 2030(1):020167.
- [13] Karel R, Martin Z. Analysis of temperature influence on injection molding process. Proceeding in Manufacturing Systems 2016;11(2):95-100.
- [14] Hott ME, Megerian CA, Beane R, Bonassar L. Fabrication of tissue engineered tympanic membrane patches using computer-aided design and injection molding. The Laryngoscope 2004;114(7):1290-5.
- [15] Wang J, Yang W. Differential injection molding method and equipment for micro-plastic products. Polymeric materials science and engineering 2012;28(7):83-6.
- [16] Jaya H, Zulkepli N, Omar M. Optimization of injection Moulding process via design of experiment (DOE) method based. Archives of Metallurgy and Materials 2022; 67(2):719-27.
- [17] Jitaree A. Design of experiment for analyzing factors affecting to varied deformation in the simulation of ABS plastic injection molding process [Master thesis]. Pathum Thani, Thailand: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2012. (In Thai)
- [18] Park HS, Dang XP. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. Procedia Manufacturing 2017;10:48-59.
- [19] Oliaei E, Heidari BS, Davachi SM, Bahrami M, Davoodi S. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using Taguchi, ANOVA and artificial neural network methods. Journal of Materials Science & Technology 2016;32(8):710-20.
- [20] Wang G, Zhao G, Huiping L, Guan Y. Research on optimization design of the heating/cooling channels for rapid heat cycle molding based on response surface methodology and constrained particle swarm optimization. Expert Systems with Applications 2011;38:6705-19.
- [21] Ruennareenard J. Appropriate parameters of bone fixation plate forming from hydroxyapatite and bioactive glass composite [Master thesis]. Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University; 2014. (In Thai)
- [22] Sudsawat S. Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with genetic algorithm and firefly algorithm techniques. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences 2017;24:228-38.

- [23] Raymond HM, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 4<sup>th</sup> ed. New jersey: John Wiley & Sons; 2016.

#### ประวัติผู้เขียนบทความ



**ดร.ศุภสิทธิ์ มะโนเครื่อง** ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: supasit.m@rmutl.ac.th

งานวิจัย: Plastic mold design, Product design, Additive Manufacturing, Wire and Additive Manufacturing



**ดร.อดิเรก ชัยหวกุล** ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมแม่พิมพ์และเครื่องมือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: adirake@rmutl.ac.th

งานวิจัย: Plastic mold design, Machining Error, Design of Experiments (DoE)

---

#### Article History:

Received: March 31, 2023

Revised: August 16, 2023

Accepted: August 23, 2023