

## การศึกษาการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงด้วยวิธีไฟน์วอลุ่ม The Study of the Temperature Distribution in Rotational Molding Process by Finite Volume Method

ณัฐพล ศรีช่วงโชติ<sup>1\*</sup> ศิริประภา ดีประดิษฐ์<sup>2</sup> และ พงศธร รักซ้อน<sup>3</sup>  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา<sup>1\*,2,3</sup>

Nutthapol Srichuangchote<sup>1\*</sup> Siraprapha Deepradit<sup>2</sup> and Pongthorn Ruksorn<sup>3</sup>  
Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University<sup>1\*,2,3</sup>  
E-mail : nutthapol\_tech\_006@hotmail.com<sup>1\*</sup>, p\_siradit@gmail.com<sup>2</sup>,  
pongthornruksorn@gmail.com<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการขึ้นรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาต้นทุนในการผลิตที่ต่ำเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่น ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาและนำเทคโนโลยี มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อศึกษาถึงการกระจายความร้อนด้วยวิธีไฟน์วอลุ่ม โดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องหมุนเหวี่ยง ผลการวิจัยพบว่า การกระจายความร้อนในเครื่องหมุนเหวี่ยงไม่ทั่วถึง ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่เป็นบางส่วน ซึ่งเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาการทำงานของกระบวนการหมุนเหวี่ยงให้มีการกระจายความร้อนภายในที่ดีกว่าเดิม

**คำสำคัญ :** กระบวนการหมุนเหวี่ยง การจำลองสถานการณ์ การขึ้นรูป

### Abstract

The rotational molding process is the plastic forming method that extensively uses in thermoplastic group. This process is low cost when comparing with others. Currently, industrial sector is developed and applied technology in production process. The objective of this research was to apply ANSYS Fluent simulation for studying the temperature distribution by Finite Volume Method. The three dimensions of rotational molding are simulated. The result showed that the temperature distribution was intermittent that affected defect on product. So, this result is used to improve the rotational molding process for providing a better internal temperature distribution.

**Keywords:** Rotational molding process, Simulation, Forming

### 1. บทนำ (Introduction)

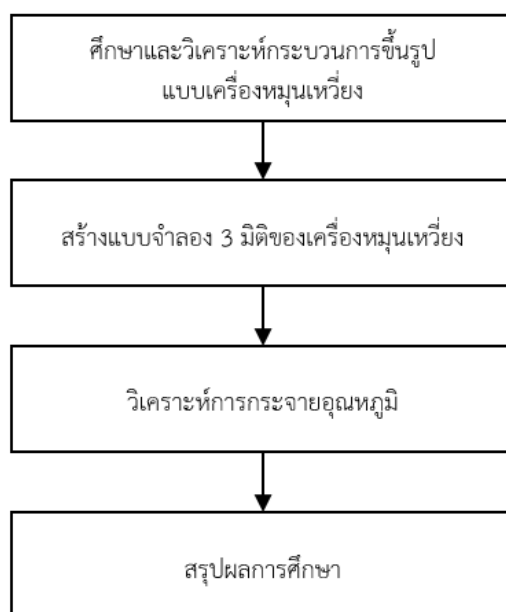
กระบวนการหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการขึ้นรูปที่มีบทบาทต่ออุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความต้องการในการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ที่สูงขึ้นตลอดมา ซึ่งลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้คือ มีต้นทุนในการผลิตต่ำ แม่พิมพ์ขึ้นรูปมีราคาถูก ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิตน้อย รวมทั้งมีขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ [1] หลักการทำงานของเครื่องขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงจะอาศัยแรงเหวี่ยงจากการหมุนของแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน ในลักษณะสองแกน เพื่อให้เกิดการกลิ้งไปมาของวัสดุภายในแม่พิมพ์ (Tumbling) อิทธิพลจากการหมุนและการส่งผ่านความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเคลือบติดของพอลิเมอร์เป็นชั้นๆ รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันติดตามรูปร่างของแม่พิมพ์จนกว่าวัสดุดิบจะหลอมหมด โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ในการควบคุมการผลิต คือ เวลา

อุณหภูมิ และความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์ [2] ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถหาได้จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริงซ้ำหลายๆ ครั้ง จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม จึงส่งผลให้สิ้นเปลืองวัตถุดิบ มีต้นทุนการผลิตเพิ่มมากขึ้น และเสียเวลา

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาและนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในระบบการผลิต เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยวิธีที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน คือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) ที่สามารถจะนำเสนอค่าของตัวแปรต่างๆ ด้วยรูปภาพเสมือนจริง มีความสวยงามและง่ายต่อการใช้งานโดยอาศัยหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ที่มีความแม่นยำและสามารถประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] ซึ่งงานวิจัยของ ชานนท์ ได้ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์และจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะการไหล อุณหภูมิ ความดันและเวลาในการไหลเข้าแม่พิมพ์ในระบบการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด (Injection Molding) [4] นอกจากนี้ เกียรติฟ้า และ อัญชิสา ได้ศึกษาการวางมุมของหัวเตาเผาโดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์และออกแบบมุมที่เหมาะสม จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้โปรแกรม ANSYS ช่วยในการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการต่างๆ เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะนอกจากจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ ยังสามารถลดต้นทุนในการทดลองผลิตจริงอีกด้วย [3]

## 2. วิธีกรวิธีวิจัย (Methodology)

การศึกษากการกระจายความร้อนในระบบการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการศึกษาแบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการทดลองตามลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผังการไหลของวิธีวิจัย

### 2.1 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง

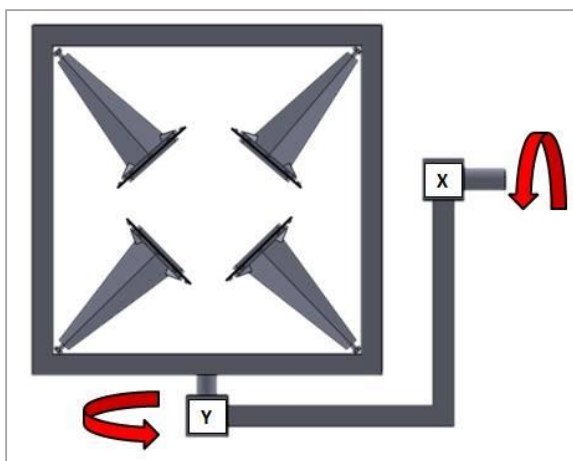
ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ของกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะเป็นการพาความร้อน ซึ่งแหล่งกำเนิดความร้อนอาจจะอยู่ในรูปของแสงอินฟราเรด ของเหลวร้อน เปลวไฟ และอากาศร้อน โดยจะเป็นการให้ความร้อนแก่ด้านนอกของแม่พิมพ์ โดยทั่วไปอุณหภูมิ ที่ใช้ในการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 220 °C ถึง 400 °C ในขณะเดียวกันก็จะทำการหมุนเหวี่ยงแบบสองแกน เพื่อให้เกิดการกลิ้งไปมาของวัสดุภายในแม่พิมพ์ (Tumbling) ความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์มีค่าน้อยกว่า 20 รอบต่อนาที เมื่อแม่พิมพ์ได้รับความร้อนจากผิวภายนอกก็จะส่งผ่านความร้อนเข้าไปภายในแม่พิมพ์จนทำให้พลาสติกเริ่มเกิดการหลอมเหลวจนมีความสามารถในการเหนียวติด (Tackiness) ซึ่งจะทำให้พลาสติกบางส่วนถูกเคลือบติดที่บริเวณผิวด้านในของแม่พิมพ์เป็นชั้นบาง ๆ พลาสติกส่วนอื่น ๆ จะถูกเหวี่ยงหลุด

ออกไปจากอิทธิพลของการหมุนแบบกลิ้งไปมา เมื่อให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังพลาสติกชั้นแรกที่เคยอบติดแม่พิมพ์จนทำให้มีความร้อนมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลือบพลาสติกในชั้นถัดไป อิทธิพลจากการหมุนเหวี่ยงและการส่งผ่านความร้อนอย่างต่อเนื่องจึงทำให้เกิดการเคลือบติดของพลาสติกเป็นชั้น ๆ รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ฉาบติดตามรูปร่างของแม่พิมพ์จนกว่าพลาสติกหลอมจะหมด [2]

ผู้วิจัยทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์รูปทรงกรวย โดยใช้การขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงยี่ห้อ BAIPAI รุ่น RMM 2012 ดังรูปที่ 2 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 220 - 240 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 12 นาที [5] และใช้แม่พิมพ์กรวยจรรยา จำนวน 4 แม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3

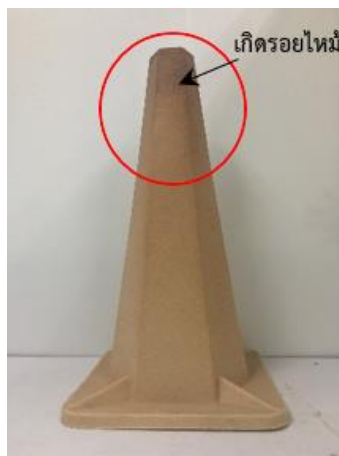


รูปที่ 2 เครื่องขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง



รูปที่ 3 แม่พิมพ์รูปทรงกรวยจรรยา

จากการขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงพบว่าชิ้นงานที่เกิดขึ้นได้เกิดรอยไหม้เป็นบางส่วนตรงบริเวณปลายโคน สีของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4

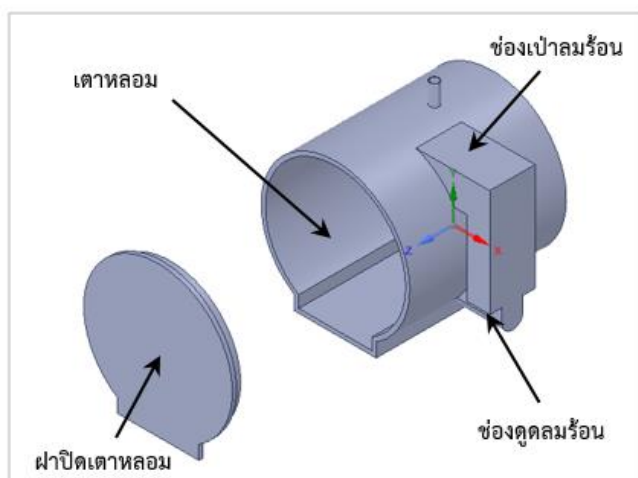


รูปที่ 4 ชิ้นงานกรวยจราจร

## 2.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent

### 2.2.1 แบบจำลอง 3 มิติ

ผู้วิจัยสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ BAIPAI รุ่น RMM 2012 ซึ่งเป็นเครื่องของสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ลักษณะของเครื่องเป็นทรงกระบอก วางตัวในแนวนอน โดยมีส่วนประกอบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง

### 2.2.2 วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)

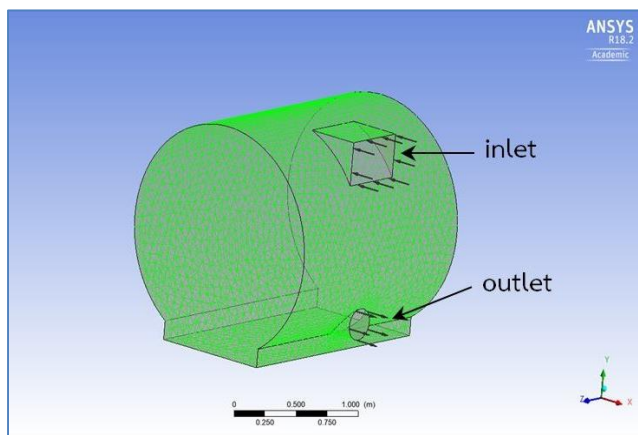
ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) เป็นวิธีการในการลดรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของพีชคณิตเพื่อให้สามารถหาค่าอย่างง่าย การสร้างสมการมีลักษณะคล้ายกับระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) หรือระเบียบวิธีการผลต่าง (Finite Difference Method: FDM) ไฟไนต์วอลุ่มจะอ้างอิงถึงพื้นที่ผิวที่อยู่รอบๆ จุดต่อ (Node Point) การคำนวณเป็นการปริพันธ์ (Integral) สมการอนุพันธ์ที่ประกอบไปด้วยค่าเวกเตอร์ของสมการพื้นผิวแต่ละพื้นผิว ความได้เปรียบของระเบียบวิธีการนี้คือสามารถใช้ได้ดีในแบบจำลองที่มีการแบ่งเอลิเมนต์ที่ไม่เป็นระเบียบ (Unstructured Meshes) ในการแก้

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ปัญหาพื้นฐานคือการสร้างสมการที่สามารถประมาณค่าสมการที่กำลังสนใจศึกษาแต่มีความแน่นอนทางตัวเลข ซึ่งความคลาดเคลื่อนในข้อมูลนำเข้า (Input) และการคำนวณระหว่างกลางจะไม่ถูกรวมเข้าไปและส่งผลให้ข้อมูลส่งออก (Output) ไร้ความหมาย ซึ่งวิธีการนั้นมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน (Complex Domains) เมื่อขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ในช่วงปฏิกิริยาไหลที่ขอบเขตมีการเคลื่อนที่หรือเมื่อผลเฉลยที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดขอบเขต หรือเมื่อผลลัพธ์ไม่มีความราบเรียบ [6]

### 2.2.3 โปรแกรม ANSYS Fluent

โปรแกรม ANSYS เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยโปรแกรมมีความแม่นยำในการประมวลผล และมีเทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่ทรงประสิทธิภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ทุกศาสตร์ ทางด้านวิศวกรรมทั้ง ด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) รวมถึงด้านที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) นอกจากนี้โปรแกรม ANSYS ยังสามารถวิเคราะห์ทุกศาสตร์ร่วมกันได้โดยไม่มีข้อจำกัด ทำให้เป็นโปรแกรมที่นิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม [7]

เมื่อผู้วิจัยสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จากนั้นนำมาวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของเครื่องหมวนเหวี่ยง โดยในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ของกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะเป็นการพาความร้อน ซึ่งแหล่งกำเนิดความร้อนอาจจะอยู่ในรูปของแสงอินฟราเรด ของเหลวร้อน เปลวไฟ และอากาศร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดปัจจัยนำเข้า Boundary condition ของช่องทางเข้าลมร้อน (Inlet) และช่องทางออกลมร้อน (Outlet) โดยกำหนดให้ความเร็วลมในการพาความร้อนมีค่าเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมจริงภายในเครื่องที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเร็วลม (Anemometer) และกำหนดขนาด Mesh ในการประมวลผลของโปรแกรมแบบอัตโนมัติ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกำหนดช่องทางเข้าและออกลมของแบบจำลอง 3 มิติ

## 3. ผลการวิจัย (Results)

### 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลอง ใช้การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิจริงที่ได้จากการวัดด้วย Data logger และอุณหภูมิที่ได้จากโปรแกรม ANSYS โดยกำหนดช่วงความเชื่อมั่นที่ยอมรับ 95% หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 [8]

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากโปรแกรม ANSYS กับระบบจริง มีขั้นตอน คือ หาค่าความแตกต่าง ( $d_j$ ) ค่าเฉลี่ยของรอบระยะเวลาการให้บริการ ของระบบจริง ( $Z_{ij}$ ) และแบบจำลอง ( $W_{ij}$ )

ค่าความแตกต่าง  $d_j = Z_{ij} - W_{ij}$  มีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย  $\mu_d$  และความแปรปรวน  $\sigma_d^2$  โดย  
การตั้งสมมติฐานในช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังนี้

สมมติฐานหลัก  $H_0 : \mu_d = 0$

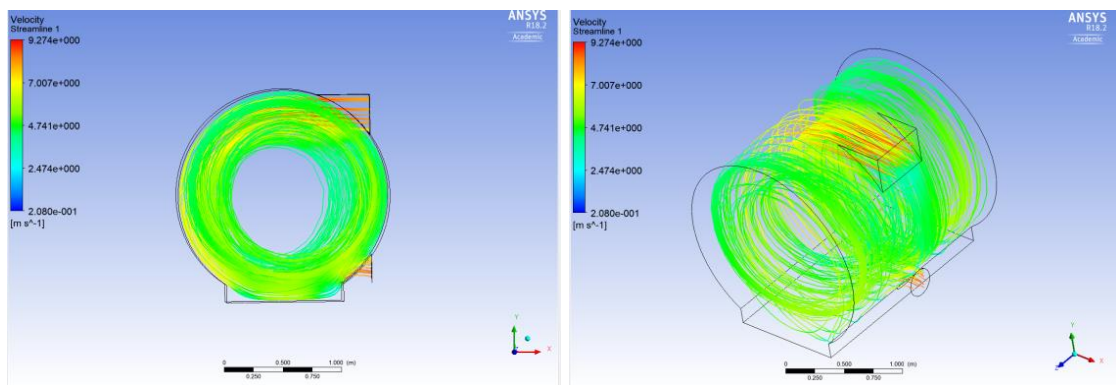
สมมติฐานรอง  $H_1 : \mu_d \neq 0$

จากนั้นหาค่า  $t_0$  โดยนำมาทดสอบกับค่า  $t$ วิกฤติ โดยจะปฏิเสธสมมติฐานหลักถ้า  $|t_0| > t_{\alpha/2, K-1}$

ผลการทดสอบพบว่า  $|t_0| = 1.09$  และ  $t_{0.05/2, 5-1} = 2.20$  ซึ่ง  $|t_0| < t_{\alpha/2, K-1}$  เพราะฉะนั้นไม่สามารถปฏิเสธ  
สมมติฐานหลักได้ สรุปได้ว่าข้อมูลของแบบจำลองและระบบจริงไม่มีความแตกต่างกัน จึงสามารถใช้แบบจำลอง  
จากโปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ได้

### 3.2 ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง

จากการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่มโดยใช้  
โปรแกรม ANSYS Fluent จากรูปที่ 7 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยมีลมเป็นตัวพาความร้อน ด้วยความเร็ว  
8 เมตรต่อวินาที จากช่องทางเข้าไปยังช่องทางออกภายในเครื่องหมุนเหวี่ยงจะเห็นได้ว่าลมร้อนมีการเคลื่อนที่ด้วย  
ความเร็วหมุนเวียนในชั้นผนังทรงกระบอกของเครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กจะอยู่  
บริเวณตรงกลางเครื่อง ทำให้ส่งผลต่อการได้รับความร้อนของชิ้นงานภายในที่ไม่สม่ำเสมอ โดยส่วนหัวของกรวยอยู่  
ใกล้กับบริเวณที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิหนาแน่นกว่าบริเวณด้านในทำให้ส่วนหัวของกรวยมีสีเข้มกว่าส่วนอื่นๆ  
และถ้าเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการหมุนเหวี่ยงอาจทำให้ส่วนหัวของกรวยเกิดรอยไหม้ได้



(a) มุมมอง Front

(b) มุมมอง Isometric

รูปที่ 7 ความเร็วลมและลักษณะการกระจายตัวของลมร้อนในกระบวนการหมุนเหวี่ยง

### 4. การอภิปรายผลหรือการวิจารณ์และสรุป (Discussion and Conclusion)

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานโดยอาศัยหลักการพาความร้อนไปยังแม่พิมพ์เพื่อให้ผง  
พลาสติกละลายและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งหากการกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องหมุนเหวี่ยงไม่ทั่วถึงจะส่งผลให้  
เกิดความไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานที่ขึ้นรูป เมื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่มโดยใช้โปรแกรม  
ANSYS Fluent พบว่า การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ สามารถใช้เป็น  
แนวทางในการระบุตำแหน่งของแม่พิมพ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งงานวิจัยถัดไปเพื่อให้  
การวิเคราะห์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป โดยพิจารณาในส่วนของการขึ้นรูป  
คือ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วในการหมุนของแกนเพลลา



## 5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สิริพร โรจนนันท อภิรัฐ โกสิตานนท์ และสุรศิษฐ์ โรจนนันท. อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อ แบบหมุนเหวี่ยงที่มีผลต่อการหดตัวของสังกะสีผสม. วารสารงานวิจัยและพัฒนา มจร. 2554; 34(3) : 217-229
- [2] จักรวธ วงศ์ศักดิ์. การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูป แบบหมุน. [ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2557.
- [3] เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต และอัญชิสา ยี่สุนแซม. การศึกษาการวางมุมเหมาะสมของหัวเผาที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาปูนขาวโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. วารสารงานวิจัย มช. 2554; 16(3) : 225 – 239.
- [4] ชานนท์ แสงมณี. ฐานข้อมูลสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ที่ผลิตในประเทศไทยเพื่อจำลองบนโปรแกรมสำเร็จรูป [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม : มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2555.
- [5] ณัฐพล ศรีช่วงโชติ. พอลิเอทิลีนคอมโพสิตจากเส้นใยป่านครนารายณ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง. [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน; 2559.
- [6] ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561]. เข้าถึงได้จาก : [https:// simulationspace.blogspot.com/2013/07/finite-volume-analysis-fva.html](https://simulationspace.blogspot.com/2013/07/finite-volume-analysis-fva.html)
- [7] โปรแกรม ANSYS Fluent [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 1 มีนาคม 2561]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.ecc.eng.kmutnb.ac.th/wordpress/index.php/2016/12/08/software-ansys-20161208/>
- [8] Banks, J., J.S. Carson, B.C. Nelson and D.M. Nicol. Discrete-Event System Simulation. 4th ed. London : Pearson Education; 2005.