

## การใช้คอมพิวเตอร์จำลองการไหลเพื่อช่วยในการออกแบบ แม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นและฟิล์ม

ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์<sup>1\*</sup> และ สุพัฒน์ อรุณวรติลล<sup>2</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2550 ตอรับเมื่อ 3 ตุลาคม 2551

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ เพื่อใช้สำหรับผลิตพลาสติกแผ่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยการจำลองการไหลบนคอมพิวเตอร์ โดยต้องการให้ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของปากแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วของพอลิเมอร์เหลวภายในแม่พิมพ์อัดรีด นอกจากนั้นขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดและคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นจึงรวมกลุ่มตัวแปรข้างต้นให้เป็นตัวแปรไร้มิติ ทำการทดสอบการไหลภายในแม่พิมพ์ของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดเพาเวอร์ลอร์ โดยจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีอยู่ซึ่งสามารถนำกราฟมาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อได้สะดวกรวดเร็วขึ้น การออกแบบด้วยกราฟสามารถใช้ออกแบบได้ทั้งพลาสติกแผ่นและแผ่นฟิล์มพลาสติก

**คำสำคัญ :** แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ / แผ่นพลาสติก / แม่พิมพ์อัดรีด / การออกแบบแม่พิมพ์

<sup>1\*</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
e-mail : ckw@kmutnb.ac.th

<sup>2</sup> นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

## Computer Simulation of Plastics Sheet and Film to Help Slit Die Design

Chanyut Kolutawong<sup>1</sup> and Supat Arunworradirok<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bang Sue, Bangkok 10800, Thailand

*Received 1 June 2007 ; accepted 3 October 2008*

### Abstract

This research objective is to study a coathanger die for plastics sheet and film manufacturing. To extrude the molten plastics through the die, engineers need to control the constant outlet pressure across the die width to maintain the uniform outlet velocity. The geometrical variations of the die such as the manifold radius, slit height and width affect shear stresses and thus the flow fields in the slit die. In this study, a power law fluid flow in the slit die is simulated by using Fluent, a commercial program. All parameters are described through dimensionless groups, thus one creates dimensionless charts from the relations between the dimensionless parameters helping extrusion die engineers to design a coathanger die for a specific plastics sheet and film.

**Keywords :** Coathanger Die / Plastic Sheet / Slit Die / Die Design

---

\* To whom correspondence should be sent

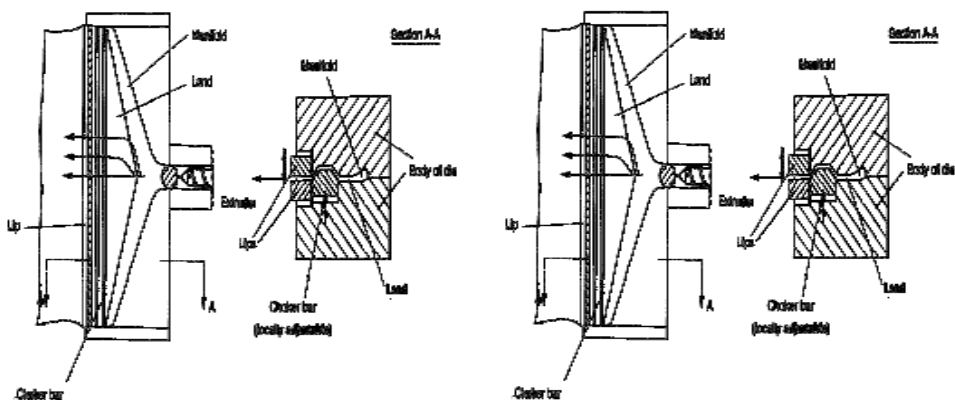
<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering.  
e-mail : ckw@kmutnb.ac.th

<sup>2</sup> Graduate Student, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering.

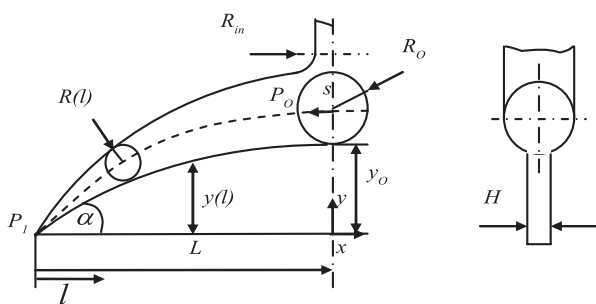
### 1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งนับว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นผู้ประกอบการหลายแห่งจึงมีความคิดริเริ่มที่จะออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเอง โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานและลอกเลียนย่อหรือขยายแบบจากแม่พิมพ์อัดรีดที่สร้างมา

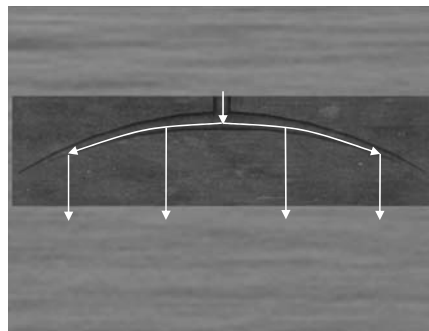
จากต่างประเทศเป็นหลัก แต่แม่พิมพ์ที่ได้ยังไม่สามารถใช้ผลิตพลาสติกแผ่นที่มีคุณภาพสูงได้เนื่องจากผู้ออกแบบไม่ทราบทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดอย่างถ่องแท้ และไม่ทราบต้นเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นชนิดไม้แขวนเสื้อ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นชนิดไม้แขวนเสื้อ [1]



(ก)



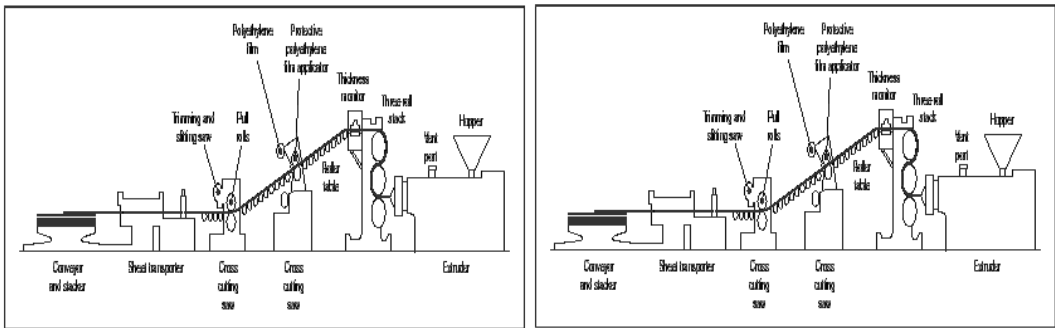
(ข)

รูปที่ 2 (ก) ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด  $R_o$  คือรัศมีของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์  $L$  คือครึ่งหนึ่งของความกว้างปากแม่พิมพ์ และ  $l$  คือระยะทางตามแกน  $x$  โดยวัดจากปลายแม่พิมพ์  $H$  คือความกว้างของช่องทางไหล  $y_o$  คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ [1, 2] (ข) ทิศทางการไหลของวัสดุพอลิเมอร์เหลวภายในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

### 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ (1) เครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งเป็นส่วนเริ่มต้นของกระบวนการผลิตโดยจะเป็นตัวกำหนดกำลังการผลิต (2) แม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [1, 2] และ (3) ระบบลูกกลิ้งที่ใช้รีดปรับขนาดความหนาแผ่นพลาสติกเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งพอลิเมอร์เหลวให้ทั่วถึงตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดัน เพื่อให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนความหนาของแผ่นพลาสติกนั้นจะถูกกำหนดโดยขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die lips)



รูปที่ 3 รูปแสดงกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น [1]

หลักสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นคือต้องการให้ลักษณะการไหลของวัสดุพอลิเมอร์เหลว (Polymer melt) ภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีความเร็วและความดันคงที่ตลอดแนวความกว้างของปากแม่พิมพ์ และอุณหภูมิจะต้องสม่ำเสมอด้วย ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์อัดรีดมีคุณภาพดีเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในหนังสือของ Michaeli [1, 2] เขียนวิจารณ์งานของ Wortberg และ Kirchner ซึ่งเสนอแนวทางการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้สมมติฐานดังนี้คือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) (2) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible) (4) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมการไหลทั้งบริเวณทางออกและขอบของพอลิเมอร์เหลว (No end and edge effects) (5) ไม่คิดผลกระทบของวิสโคอีลาสติก (No viscoelastic effect) (6) ไม่มีกรไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No slip condition) และ (7) ใช้กับ

วัสดุพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมตามสมการเพาเวอร์ลอว์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ Wortberg และ Kirchner ใช้ค่าตัวแทนความหนืด (Representative viscosity,  $\eta$ ) อธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) ซึ่งจากสมมติฐานที่กำหนดให้ตัวแทนอัตราความเครียดเฉือน (Representative shear rate,  $\dot{\gamma}$ ) มีค่าคงที่ตลอดท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ทำให้ตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล (Representative viscosity in manifold,  $\eta_m$ ) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหล และตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล (Representative viscosity in slit,  $\eta_s$ ) คงที่ตลอดช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด คือรัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  และความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ณ ตำแหน่งต่างๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด (รูปที่ 2ก) ที่จะทำได้ ค่าความเร็วและความดันคงที่ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด

Wortberg และ Kirchner [1, 2] เสนอสมมติฐานที่ ให้ตัวแทนอัตราเฉือนในท่อทางไหล ( $\bar{\gamma}_R$ ) คงที่ตลอดช่วง ความยาวของท่อทางไหล ทำให้สามารถที่จะกำหนดรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  ได้คือ

$$R(l) = R_o \left( \frac{l}{L} \right)^{1/3} \quad (1)$$

โดย  $R_o$  คือรัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์  $L$  คือครึ่งหนึ่งของความกว้างปากแม่พิมพ์ และ  $l$  คือระยะทางตามแกน  $x$  โดยวัดจากปลายแม่พิมพ์ (รูปที่ 2ก) และความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดได้จากผลรวมของความดันตกคร่อมในท่อทางไหลและความดันตกคร่อมในช่องทางไหล นั่นคือ

$$\Delta P(l) = \frac{8 \cdot \dot{V}_o \cdot \bar{\eta}_R}{\pi \cdot L} \int_0^l \frac{l}{R^4(l)} dl + \frac{12 \cdot \bar{\eta}_S \cdot \dot{V}_o}{L \cdot H^3} y(l) \quad (2)$$

โดย  $H$  คือความกว้างของช่องทางไหล ดังแสดงในรูปที่ 2,  $\dot{V}_o$  คืออัตราการไหลของพอลิเมอร์เหลวผ่านเครื่องขึ้นของแม่พิมพ์ และจากสมมติฐานที่ต้องการให้ความดันตกคร่อมตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่  $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial l} = 0$  ทำให้หาความสัมพันธ์ความยาวของช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดได้คือ

$$y(l) = y_o \left( \frac{l}{L} \right)^{2/3} \quad (3)$$

โดย  $y_o$  คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์

$$y_o = \frac{\bar{\eta}_R}{\bar{\eta}_S} \frac{H^3 B^2}{R_o^4 4\pi} \quad (4)$$

และ  $B$  คือความกว้างปากแม่พิมพ์

$$B = 2 \cdot L \quad (5)$$

สมการที่ (1) และ (3) เป็นสมการที่ใช้สำหรับกำหนดรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดจะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการที่จะออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดนั้นผู้ออกแบบต้องทราบค่ารัศมี  $R(l)$

และความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ณ ตำแหน่ง  $l$  ใดๆ ของแม่พิมพ์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด  $R_o$  และความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด  $y_o$  ในการกำหนดค่าดังกล่าวได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและเสนอถึงวิธีการกำหนดค่าอยู่หลายวิธี เช่น Wortberg และ Kirchner ได้เสนอวิธีการกำหนดค่าขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4 การตรวจสอบการออกแบบสามารถทำได้โดย ตรวจสอบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแม่พิมพ์นั่นคือแทน  $l = L$  ในสมการที่ (2) จะได้

$$\Delta P = \frac{12 \dot{V}_o \bar{\eta}_S y_o}{L H^3} \quad (6)$$

ซึ่งค่าความดันตกคร่อม ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงการใช้งานของเครื่องอัดรีดพลาสติกนั้น และทำการตรวจสอบเวลาที่วัสดุไหลอยู่ในแม่พิมพ์ (Residential time) ได้จาก

$$t = \frac{L H y_o}{\dot{V}_o} < t_D \quad (7)$$

โดยเวลาที่พอลิเมอร์เหลวไหลอยู่ในแม่พิมพ์จะต้องอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสื่อมคุณภาพลง (Degradation time,  $t_D$ ) จากรูปที่ 4 จะพบว่าขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ของ Wortberg และ Kirchner นั้นค่อนข้างจะยุ่งยากในการกำหนดค่าเริ่มต้นของรัศมีที่กึ่งกลางแม่พิมพ์ ( $R_o$ )

นอกจากนั้น Michaeli [1, 2] ยังเขียนนิเวศงานของ Görmar ซึ่งคำนวณค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์  $R_o$  จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหล  $\dot{V}_o$  ค่าความดันตกคร่อม  $\Delta P$  ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{4 \dot{V}_o}{\pi R_o^3 C} = \frac{1}{3} \frac{\Delta P}{A} \frac{R_o}{L} \varphi \left( \frac{1}{3} \frac{\Delta P}{A} \frac{R_o}{L} \right) \quad (8)$$

$$\frac{6 \dot{V}_o}{H^2 C L} = \frac{1}{2} \frac{H}{y_o} \frac{\Delta P}{A} \psi \left( \frac{1}{2} \frac{H}{y_o} \frac{\Delta P}{A} \right) \quad (9)$$

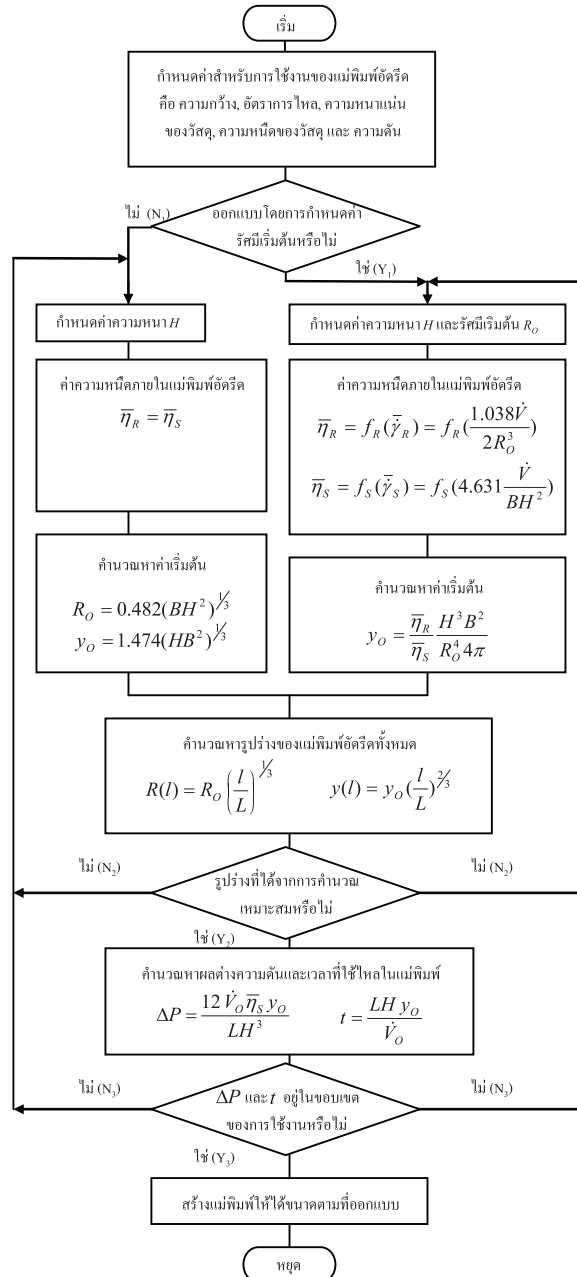
โดยที่ฟังก์ชัน  $\varphi(u)$  ในสมการที่ (8) และ  $\psi(r)$  ในสมการที่ (9) เขียนอยู่ในรูปของผลรวมของไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน

$$\varphi(u) = \frac{8}{u^2} \left[ \frac{1}{2} \cosh u - \frac{1}{u} \sinh u + \frac{1}{u^2} (\cosh u - 1) \right] \quad (10)$$

$$\psi(r) = \frac{3}{r^2} \left[ \cosh r - \frac{1}{r} \sinh r \right] \quad (11)$$

ค่า  $A$  และ  $C$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถหาได้โดยใช้วิธีการทาบเส้น (Curve fitting) ระหว่างเส้นโค้งแสดงการไหลที่ได้จากการทดลองกับสมการกึ่งทฤษฎี (Constitutive equation) ของ Prandtl-Eyring,

$$\dot{\gamma} = C \sinh \left( \frac{\tau}{A} \right) \quad (12)$$



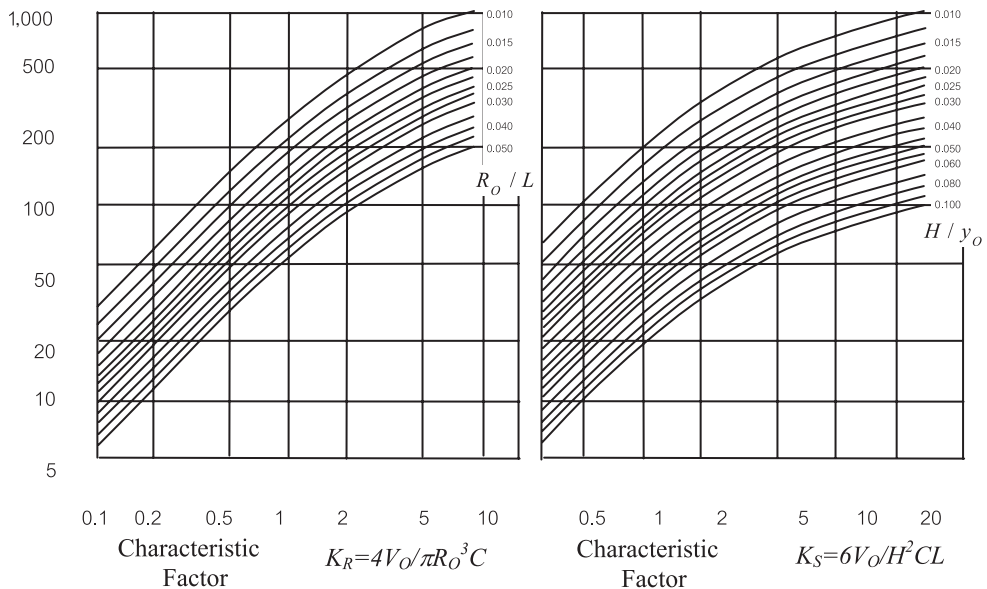
รูปที่ 4 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเลื้อยของ Wortberg และ Kirchner [1]

จากสมการที่ 8 และ 9 ซึ่ง Görmar ได้หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ และนำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยนำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจากกราฟเมื่อผู้ออกแบบทราบค่าอัตราการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด  $V_o$  ค่าความสูงของช่องทางไหล  $H$  ค่าความกว้างของช่องทางไหล  $2L$  ค่าคงที่  $A$  และ  $C$  ที่ได้จากการทาบเส้น และกำหนดค่ารัศมีของท่อทางไหล บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์  $R_o$  ทำให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะหาค่า  $\Delta P$  และค่า  $y_o$  เพื่อใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นได้ แต่เนื่องจากค่า  $A$  และ  $C$  ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของพลาสติกเหลว หาได้จากสมการไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน ดังนั้นแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีนี้ จะใช้ได้ดีกับวัสดุที่มีพฤติกรรมระหว่างอัตราความเครียดเฉือน ( $\gamma$ ) และความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) ตามสมการของ Prandtl-Eyring เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติผู้ผลิตพลาสติกและโรงงานอุตสาหกรรมจะกำหนด

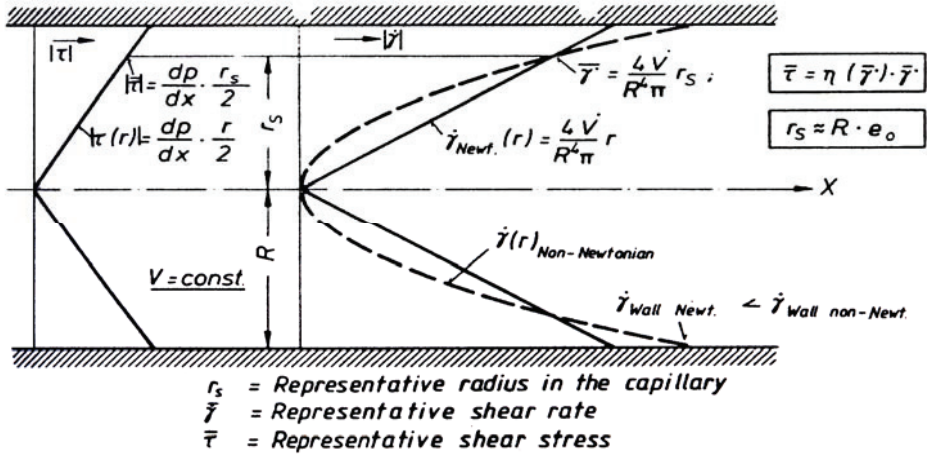
คุณสมบัติความหนืดของพอลิเมอร์เหลวด้วยค่าคงที่  $n$  และ  $k$  ของสมการเพาเวอร์ลอว์

ชาญยุทธ และคณะ [3-4] เสนอวิธีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นจากกราฟสำหรับพลาสติกชนิดเพาเวอร์ลอว์ การออกแบบแม่พิมพ์ชนิดไม่แขวนเส้นของชาญยุทธและคณะ จะใช้สมการที่ (1) ในการหาค่ารัศมีท่อทางไหลและสมการที่ (3) ในการหาค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ บริเวณความกว้างต่างๆ ซึ่งในสมการทั้งสองจะต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหลและค่าความยาว  $y_o$  บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์โดยที่ค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์สามารถหาได้จากสมการที่ (4) ซึ่งจะพบว่าผู้ออกแบบต้องทราบค่าคงที่ (2) ตัว คือ ค่าตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล ( $\bar{\eta}_R$ ) และค่าตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล ( $\bar{\eta}_S$ ) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 6

Characteristic Factor  $\Delta P/A$



รูปที่ 5 กราฟใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดของ Görmar [1]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราความเครียดเฉือนของวัสดุนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียน [2]

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าการไหลภายในท่อทางไหล (หรือในช่องทางไหลถ้าเป็นหน้าตัดเหลี่ยม) จะพบบริเวณที่ค่าอัตราความเครียดเฉือนของวัสดุนิวทอนเนียน ( $\dot{\gamma}_{Newt.}$ ) และนอนนิวทอนเนียน ( $\dot{\gamma}_{non-Newt.}$ ) ตัดกันซึ่งก็คือบริเวณที่อัตราความเครียดเฉือนเท่ากัน (มีค่ารัศมีเท่ากับ  $r_s$ ) ดังนั้นที่บริเวณจุดตัดดังกล่าวก็จะมีค่าความหนืดเท่ากันด้วย ซึ่งผู้ออกแบบสามารถแทนค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอนเนียน ด้วยค่าคงที่ที่ตำแหน่งค่าอัตราความเครียดเฉือนเท่ากันได้ จะเรียกค่านี้อีกว่าค่าตัวแทนความหนืด (Representative viscosity,  $\bar{\eta}$ ) ส่วนตารางที่ 1 แสดงอัตราความเครียดเฉือนในช่องทางไหลและช่องทางไหลของวัสดุ

นิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหนังสือเกี่ยวกับพลาสติกและพอลิเมอร์ทั่วไป [5-7] จากตารางที่ 1 ที่อัตราความเครียดเฉือนเท่ากันสำหรับวัสดุนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียน เราจะได้ระยะ  $r_s$  สำหรับช่องทางไหลคือ

$$r_s = R_0 \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{1}{n} + 3 \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} \tag{13}$$

และระยะ  $y_s$  สำหรับช่องทางไหลคือ

$$y_s = \frac{H}{2} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{n} + 2 \right) \right]^{\frac{n}{n-1}} \tag{14}$$

ตารางที่ 1 อัตราความเครียดเฉือนในช่องทางไหลและช่องทางไหลของวัสดุนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์ [1, 8]

รูปทรง (Geometry)	Newtonian ( $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$ )	Non-Newtonian ( $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$ )
ทรงกลม (Circle)	$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot \bar{v}_z \cdot r}{R^2} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r}{\pi \cdot R^4}$	$\dot{\gamma} = \left( \frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R^3} \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$
ทรงเหลี่ยม (Rectangular slit)	$\dot{\gamma} = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y}{B \cdot H^3}$	$\dot{\gamma} = \left( \frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left( \frac{2y}{H} \right)^{\frac{1}{n}}$



สำหรับวัสดุอนนิวทอเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์จะหาค่าความหนืดได้จากความสัมพันธ์

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (15)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency index) และ  $n$  คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law index) จากสมการที่ (15) พบว่าในการหาค่าความหนืดของของไหลจะต้องทราบค่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง  $r_s$  และ  $y_s$  ที่ต้องการ ซึ่งเมื่อนำค่าอัตราความเครียดเฉือนของวัสดุอนนิวทอเนียนที่เกิดขึ้นในช่องทางไหลตามตารางที่ 1 ณ ตำแหน่ง  $r_s$  (สมการที่ 13) แทนค่าในสมการที่ (15) จะได้

$$\bar{\eta}_R = \frac{k}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3\right)^n \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3}\right)^{n-1} \quad (16)$$

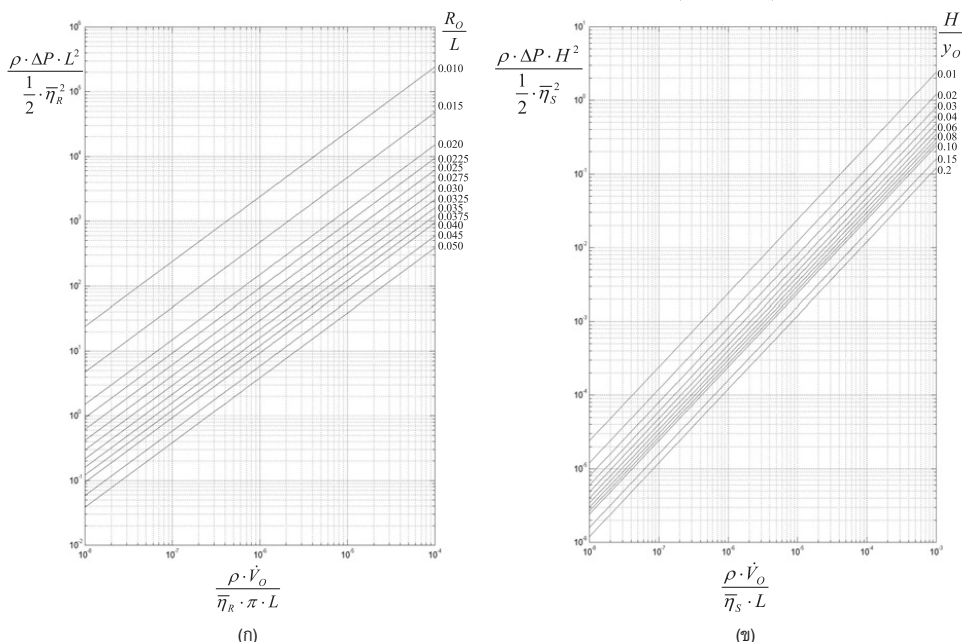
ค่าตัวแทนความหนืดที่ได้จากสมการที่ (16) จะเป็นค่าคงที่ของวัสดุอนนิวทอเนียนชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งจาก

$$\Delta P = \left\{ \frac{12 \dot{V}_o \bar{\eta}_R L^{1/3}}{\pi R_o^4} \left( L^{2/3} - l^{2/3} \right) \right\} + \left\{ \left( \frac{12 \bar{\eta}_s \dot{V}_o}{L H^3} \right) \left( y_o \left( \frac{l}{L} \right)^{2/3} \right) \right\} \quad (18)$$

ข้อสมมติฐานที่กำหนดให้ค่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นภายในช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ ทำให้สามารถที่จะนำค่าตัวแทนความหนืดซึ่งเป็นค่าคงที่นี้ไปใช้แทนค่าความหนืดของวัสดุอนนิวทอเนียนในช่องทางไหลได้ในทำนองเดียวกันสำหรับบริเวณช่องทางไหลจะได้ค่าตัวแทนความหนืดคือ

$$\bar{\eta}_s = \frac{k}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2\right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}\right)^{n-1} \quad (17)$$

ดังนั้นสามารถที่จะหาค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางของแม่พิมพ์  $y_o$  ได้จากการนำค่า  $\bar{\eta}_R$  และ  $\bar{\eta}_s$  ที่ได้จากสมการที่ (16) และ (17) กลับไปแทนในสมการที่ (4) และสามารถหาค่าความยาวของแม่พิมพ์  $y(l)$  ณ บริเวณความกว้าง  $l$  ต่างๆ ได้จากสมการที่ (3) เมื่อนำค่ารัศมี  $R(l)$  ที่ได้จากสมการที่ 1 และค่าความยาวของแม่พิมพ์  $y(l)$  จากสมการที่ (3) แทนลงในสมการที่ (2) และทำการอินทิเกรตสมการ จากนั้นทำการจัดรูปใหม่จะได้



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

(ก) ค่า  $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L}$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-4}$

(ข) ค่า  $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_s \cdot L}$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-3}$  [4, 12]

สมการที่ (18) เป็นสมการที่ใช้สำหรับการหาความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด  $\Delta P$  ณ ตำแหน่ง  $l$  ใดๆ ซึ่งความดันตกคร่อมที่ได้จะมีค่าเท่ากับผลของความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด และผู้ออกแบบสามารถตรวจสอบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อได้จากค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์จากสมการที่ (18) (หรือจากสมการที่ 6 ก็ได้) โดยค่าที่คำนวณได้จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตการใช้งานของเครื่องอัดรีด  $\Delta P_{\min} < \Delta P < \Delta P_{\max}$  โดย  $\Delta P_{\max}$  และ  $\Delta P_{\min}$  เป็นความดันสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องอัดรีด ซึ่งถ้าผลการคำนวณที่ได้ออกมาอยู่นอกช่วงขอบเขตการใช้งานก็จะต้องทำการออกแบบใหม่ โดยการปรับค่าตัวแปร  $R_o$  ถ้าความดันตกคร่อมที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า  $\Delta P_{\max}$  ผู้ออกแบบสามารถที่จะลดค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า  $R_o$  ในทางกลับกันถ้าความดันตกคร่อมที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า  $\Delta P_{\min}$  ผู้ออกแบบสามารถที่จะเพิ่มค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นได้ โดยการลดค่า  $R_o$  ซึ่งการปรับตัวแปร  $R_o$  จะมีผลทำให้ค่า  $y_o$  เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปร  $R_o$  จะต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมในการใช้งานของค่า  $y_o$  และเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ในแม่พิมพ์ จากสมการที่ (7) ด้วย (รูปที่ 8)

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ [9-11] เพื่อใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อนั้น จะวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ ที่ใช้หาค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ (สมการที่ 18) และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ชาญยุทธและคณะทำการจัดรูปตัวแปรให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\left( \frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right) = \psi_R \left( \left( \frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right), \left( \frac{R_o}{L} \right) \right) \quad (19)$$

$$\left( \frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_S^2} \right) = \psi_S \left( \left( \frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_S \cdot L} \right), \left( \frac{H}{y_o} \right) \right) \quad (20)$$

เมื่อนำสมการที่ (18) มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการที่ (19) และ (20) ชาญยุทธและคณะสามารถที่จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ออกแบบ

แม่พิมพ์ได้ดังรูปที่ 7 รูปที่ 8 แสดงแนวทางใหม่ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อโดยใช้กราฟในรูปที่ 7 โดยขั้นตอนการออกแบบจะสะดวกและง่ายกว่าวิธีการอื่นๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ สามารถหาได้จากวิทยานิพนธ์ของสุพัฒน์ อรุณวรตติก [12] จากที่กล่าวมาทั้งหมดพบว่า ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ของชาญยุทธและคณะจะง่ายและสะดวก แต่กราฟในรูปที่ 7 ซึ่งได้มาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (18) จะมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่คือควรใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับแผ่นฟิล์มพลาสติกเท่านั้น ( $H/y_o \ll 1$ ) ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้การจำลองการไหลบนคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างกราฟทดแทนรูปที่ 7 เพื่อใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์ม

### 3. การวิเคราะห์การไหล

#### 3.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรม Fluent

เนื่องจากการเก็บข้อมูลโดยตรงจากการทดลองจริงจะต้องสร้างแม่พิมพ์อัดรีดจำนวนมาก เพื่อให้มีข้อมูลมากเพียงพอที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติดังในรูปที่ 7 ซึ่งจะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงมาก แต่ถ้าใช้การจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการวิเคราะห์ที่ได้ ส่วนโปรแกรม Fluent ที่เลือกใช้สำหรับการวิเคราะห์ เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถที่จะกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ได้ดังนี้ (1) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ (2) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบไม่อัดตัวหรือการไหลแบบอัดตัว (3) จำนวนการไหลได้ทั้งแบบสถานะคงตัว (Steady-state) และไม่คงตัว (Transient) (4) จำนวนการไหลได้ทั้งชนิดราบเรียบ (Laminar) และปั่นป่วน (Turbulent) (5) จำนวนการไหลได้ทั้งของไหลประเภทนิวทอนเนียนและนอนนิวทอนเนียน [13] ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถของโปรแกรม Fluent ครอบคลุมสมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

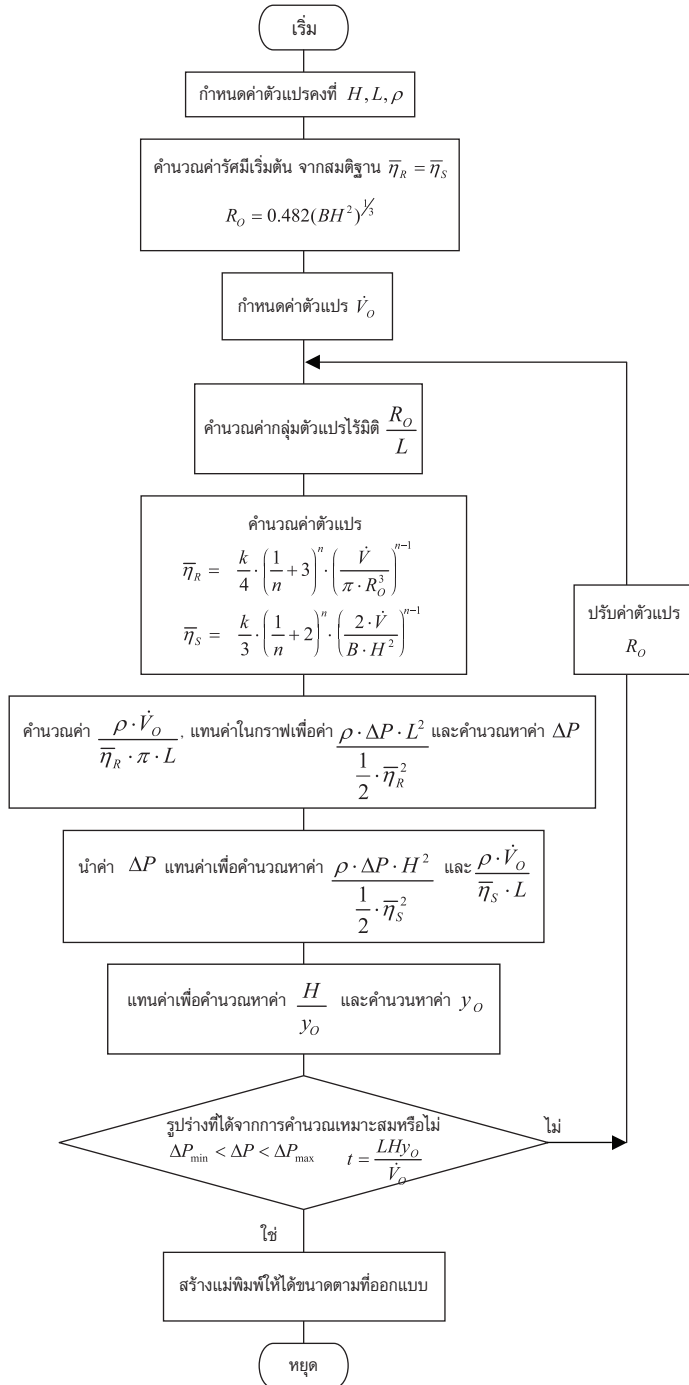
##### 3.1.1 สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณ

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equations)

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (21)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equations)

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\int pI \cdot d\vec{A} + \int \vec{F} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (22)$$



รูปที่ 8 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น [4, 12]

โดยที่ค่า  $\rho$  คือค่าของความหนาแน่นของวัสดุ,  $v$  คือเวกเตอร์ความเร็ว,  $\bar{A}$  คือเวกเตอร์แสดงพื้นที่หน้าตัดที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล,  $I$  คือเมตริกซ์เอกลักษณะ,  $\bar{\tau}$  คือค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน (Shear stress),  $V$  คือปริมาตรควบคุม,  $\bar{F}$  คือเวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับปริมาตรควบคุม โดยมีสมการกึ่งทฤษฎีสำหรับของไหลนิวทอนเนียนชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Newtonian fluids) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน ( $\bar{\tau}$ ) และเทนเซอร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Rate of deformation tensor,  $\bar{D}$ ) คือ

$$\bar{\tau} = \mu \bar{D} \tag{23}$$

โดย  $\mu$  คือความหนืดของวัสดุนิวทอนเนียนซึ่งเป็นค่าคงที่ส่วนค่าสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของ  $\bar{D}$  กำหนดโดย

$$D_{ij} = \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), i, j = 1, 2, 3 \tag{24}$$

โดย  $u_i$  คือ ความเร็วตามแนวแกน  $i$ ,  $u_j$  คือ ความเร็วตามแนวแกน  $j$ ,  $x_i$  คือ ระยะทางตามแนวแกน  $i$ ,  $x_j$  คือ ระยะทางตามแนวแกน  $j$ , และสำหรับของไหลนอนนิวทอนเนียน ค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน เขียนอยู่ในรูปของความหนืด ( $\eta$ ) ได้ดังนี้

$$\bar{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \bar{D} \tag{25}$$

ในโปรแกรม Fluent ค่าของ  $\eta$  ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของอัตราความเค้นเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) โดยอัตราความเค้นเฉือนมีความสัมพันธ์กับค่าของ Second invariants ของ  $\bar{D}$  ดังนี้

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\bar{D}:\bar{D})} \tag{26}$$

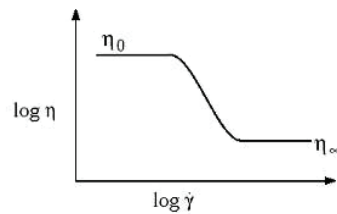
โปรแกรม Fluent ได้เตรียมรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราเค้นเฉือนไว้ 4 รูปแบบคือ Power law และ Carreau model สำหรับวัสดุนอนนิวทอนเนียนแบบ Pseudo plastics, Cross model, และ Heschel-

Bulkley model สำหรับวัสดุนอนนิวทอนเนียนแบบ Bingham plastics ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้สมการเพาเวอร์ลอว์ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)}e^{(T_0/T)} \tag{27}$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency index)  $n$  คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power law index),  $T_0$  คืออุณหภูมิอ้างอิง (273 K),  $T$  คืออุณหภูมิของวัสดุ และในโปรแกรมยังสามารถที่จะกำหนดขอบเขตของค่าความหนืดที่อัตราความเค้นต่ำ ( $\eta_0$ ) และค่าความหนืดที่อัตราความเค้นสูง ( $\eta_\infty$ ) ได้ดังนี้

$$\eta_\infty < \eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)}e^{(T_0/T)} < \eta_0 \tag{28}$$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราความเค้นเฉือน [13]

โดยรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (28) คุณสมบัติของวัสดุถูกกำหนดได้ด้วยค่า  $n$  กล่าวคือ  $n = 1$  เป็นค่าความหนืดของวัสดุนิวทอนเนียน,  $n > 1$  เป็นค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอนเนียนแบบ Shear thickening (Dilatant fluids), และ  $n < 1$  เป็นค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอนเนียนแบบ Shear thinning (Pseudo plastics) โดยถ้าต้องการจำลองการไหลแบบอุณหภูมิคงที่จะกำหนดค่า  $T_0 = 0$  ซึ่งการคำนวณสมการความต่อเนื่อง สมการการเคลื่อนที่ และสมการกึ่งทฤษฎีในโปรแกรม Fluent จะใช้การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งแบ่งแยกหน่วยย่อยและคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์โวลุ่ม (Finite volume)

### 3.1.2 วิธีไฟไนท์โวลุ่ม (Finite volume)

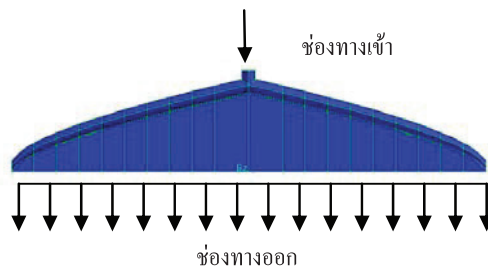
วิธีไฟไนท์โวลุ่มจะแบ่งขอบเขตของบริเวณที่ต้องการหาคำตอบให้เป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) ขนาดเล็กๆ โดยปริมาตรควบคุมย่อยเหล่านั้นจะต้องประพฤติตัวเป็นไปตามสมการอนุรักษ์ (Conservation equation) ที่อยู่ในรูปของการอินทิเกรต (Integral form) ในสมการที่ (21) และสมการที่ (22) โดยจะใช้จุดศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละปริมาตรควบคุมขนาดเล็กๆ เหล่านั้นเป็นตัวแทนเพื่อคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการอนุรักษ์ ซึ่งเป็นค่าที่อินเทอร์โพลเลท (Interpolate) มาจากพื้นผิวของปริมาตรควบคุม

วิธีไฟไนท์โวลุ่มสามารถที่จะใช้งานกับการแบ่งโครงสร้างของรูปร่างตาข่าย (Mesh) ได้ทุกชนิด ดังนั้นจึงสามารถใช้งานได้กับงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และเนื่องจากวิธีนี้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและง่ายต่อการเขียนโปรแกรมดังนั้นจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้หมู่วิศวกรที่จะนำไปใช้งาน [14]

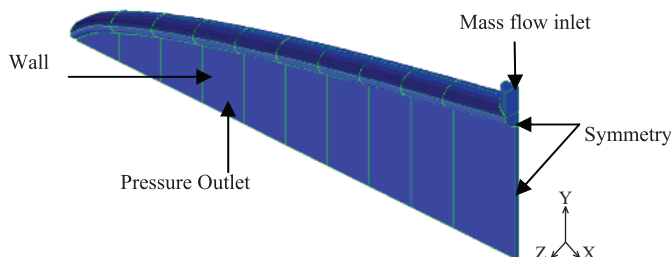
### 3.2 แบบจำลองที่ใช้ทดสอบการไหล

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการไหลในงานวิจัยชิ้นนี้ จะสร้างขึ้นจากรูปร่างของพลาสติกที่ไหลอยู่ในแม่พิมพ์อัดรีด โดยรูปร่างของแบบจำลองจะสร้างให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ตามสมการที่ (1) และ (3) ตามลำดับ ตัวอย่างของรูปร่างของแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 10

เนื่องจากรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อมีความสมมาตรใน 2 ระนาบ (รูปที่ 11) ตามทิศทางการไหล (ระนาบ XY และ YZ) และไม่สมมาตรในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ระนาบ XZ) ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจะสร้างแค่เพียง 1/4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด เพื่อลดจำนวน Mesh ที่ใช้ในการคำนวณทำให้สามารถทำการคำนวณได้อย่างรวดเร็ว



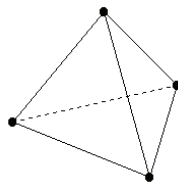
รูปที่ 10 รูปร่างของช่องทางไหลในแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการจำลองการไหล



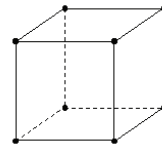
รูปที่ 11 ภาพแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในโปรแกรม Fluent

ในที่นี้จะใช้โปรแกรม Gambit version 2.0 สำหรับสร้างแบบจำลองและ Mesh เพื่อใช้สำหรับจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent เนื่องจากโปรแกรม Gambit เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการสร้าง Mesh ได้ดีและสามารถนำแบบจำลองจากโปรแกรม Gambit เข้าสู่โปรแกรม Fluent ได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการแก้ไขอีก ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการสร้างแบบจำลองทั้งสิ้น 25 แบบจำลอง โดยขนาดของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สร้างแบบจำลอง จะแสดงในตารางที่ 2

การสร้าง Mesh ที่จะใช้กับแบบจำลองนั้น จะเลือกใช้ Mesh 2 ชนิด คือ ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ดังในรูปที่ 12ก และ ทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral) ดังในรูปที่ 12ข ทรงเหลี่ยมสี่หน้า เป็นรูปทรงที่มีด้านแต่ละด้านเป็นรูปสามเหลี่ยม และมีด้านประกอบทั้งสิ้นสี่ด้าน รูปทรงนี้เหมาะกับรูปร่างทรงกระบอก ทรงกลม และรูปร่างชิ้นงานที่มีผิวโค้ง ส่วนทรงเหลี่ยมหกหน้า เป็นรูปทรงที่มีด้านแต่ละด้านเป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีด้านประกอบทั้งสิ้นหกด้าน ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยม



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 Mesh (ก) ชนิดทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) (ข) ชนิดทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral)

ตารางที่ 2 ขนาดแบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสร้างกราฟ (ก) ความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ  $\frac{R_o}{L}$  (ข) ความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติ  $\frac{H}{y_o}$

(ก)

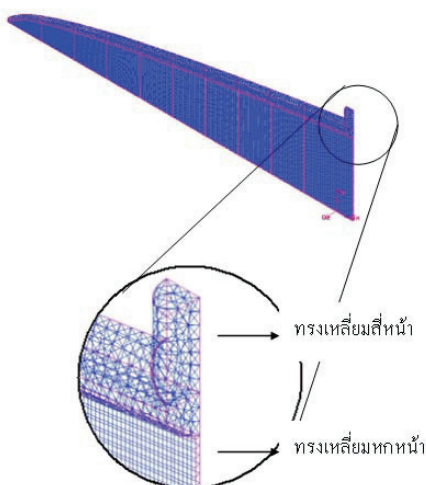
(ข)

$\frac{R_o}{L}$	H (m.)	L (m.)	$R_o$ (m.)	$y_o$ (m.)	จำนวนอิเลเมนต์
0.0100	0.005	1	0.0100	1.3661	110189
0.0150	0.005	1	0.0150	0.4608	38752
0.0200	0.005	1	0.0200	0.2132	36205
0.0225	0.005	1	0.0225	0.1555	39146
0.0250	0.005	1	0.0250	0.1172	44317
0.0275	0.005	1	0.0275	0.0908	49252
0.0300	0.005	1	0.0300	0.0719	56431
0.0325	0.005	1	0.0325	0.0580	65630
0.0350	0.005	1	0.0350	0.0476	74910
0.0375	0.005	1	0.0375	0.0395	84020
0.0400	0.005	1	0.0400	0.0333	93902
0.0450	0.005	1	0.0450	0.0243	117670
0.0500	0.005	1	0.0500	0.0183	142887

$\frac{H}{y_o}$	H (m.)	L (m.)	$R_o$ (m.)	$y_o$ (m.)	จำนวนอิเลเมนต์
0.01	0.01071	1	0.02	1.0717	93238
0.02	0.00576	1	0.02	0.2877	39703
0.03	0.00401	1	0.02	0.1335	32102
0.04	0.00310	1	0.02	0.0774	29797
0.05	0.00254	1	0.02	0.0507	28429
0.06	0.00216	1	0.02	0.0360	27486
0.07	0.00188	1	0.02	0.0268	27004
0.08	0.00167	1	0.02	0.0208	26650
0.09	0.00150	1	0.02	0.0166	26319
0.10	0.00137	1	0.02	0.0137	26374
0.15	0.00095	1	0.02	0.0063	25733
0.20	0.00074	1	0.02	0.0037	25913

เนื่องจากการกำหนด Mesh ที่ดีจะต้องสร้างให้พื้นผิวของปริมาตรของ Mesh นั้นตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังนั้นในบริเวณช่องทางไหลที่มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมตรงๆ จึงเลือกใช้ Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมหกหน้า และในบริเวณท่อทางไหลซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลมเรียวยาวทำให้ไม่สะดวก

ในการกำหนดให้ Mesh บริเวณนี้มีรูปแบบเป็นทรงเหลี่ยมหกหน้า ดังนั้นเราจึงกำหนดให้ใช้ Mesh ชนิดทรงเหลี่ยมสี่หน้าแทน ซึ่งจะสามารถกำหนดได้ง่ายกว่า ลักษณะของ Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดจะแสดงอยู่ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ลักษณะของ Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด

ขนาดของ Mesh ที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดจะถูกกำหนดให้มีค่าประมาณ  $0.1D_o$  โดย  $D_o$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางไหลที่กึ่งกลางแม่พิมพ์ ( $D_o = 2R_o$ ) การกำหนดให้ Mesh มีขนาดเล็กกว่านี้จะทำให้แบบจำลองนี้มีจำนวน Mesh ที่มากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้ Mesh ขนาดเล็กกว่านี้ จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ Mesh ขนาด  $0.1D_o$  ในการสร้างแบบจำลองนี้จะทำให้ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องในเวลาที่ยรวดเร็ว จากผลของการกำหนดขนาดของ Mesh ให้มีค่าเท่ากับ  $0.1D_o$  ทำให้จำนวนของอิลิเมนต์ (Element) จะมีจำนวนแตกต่างกันไปบ้าง ซึ่งจำนวนของอิลิเมนต์ในแต่ละแบบจำลองนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

### 3.3 ค่าขอบและค่าเริ่มต้น

เมื่อได้แบบจำลองตามต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือทำการกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ให้กับแบบจำลอง โดยกำหนดให้บริเวณทางเข้าควบคุมด้วยปริมาณอัตราการไหลของมวล ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ค่าอัตราการไหลเพื่อทำการจำลองการไหลทั้งสิ้น 10 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 3 บริเวณทางออกของแม่พิมพ์กำหนดเงื่อนไขขอบให้มีค่าความดันคงที่เท่ากับ 0 ปาสคาล ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณนี้จะสร้างแค่เพียง 1/4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขให้ระนาบ XY และ YZ เป็นระนาบที่มีความสมมาตร เงื่อนไขขอบเขตสุดท้ายที่กำหนดคือการกำหนดให้พื้นผิวที่เหลืออยู่เป็นผนังที่ไม่มีมีการถ่ายเทความร้อนเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดที่กำหนดให้กับแบบจำลองของแม่พิมพ์อัดรีดตามที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 11

ขั้นตอนสุดท้ายก่อนเริ่มทำการคำนวณคือ การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ (Initial condition) ซึ่งจะเป็นการกำหนดค่าให้กับทุก Mesh เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับแทนค่าในการคำนวณ โดยสามารถที่จะกำหนด

ให้ค่าของ Mesh มีค่าเท่ากับเท่าใดก็ได้ ซึ่งถ้าสามารถกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่จะได้จากการคำนวณก็จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง เนื่องจากจะใช้อรอบการคำนวณน้อยลงนั่นเอง

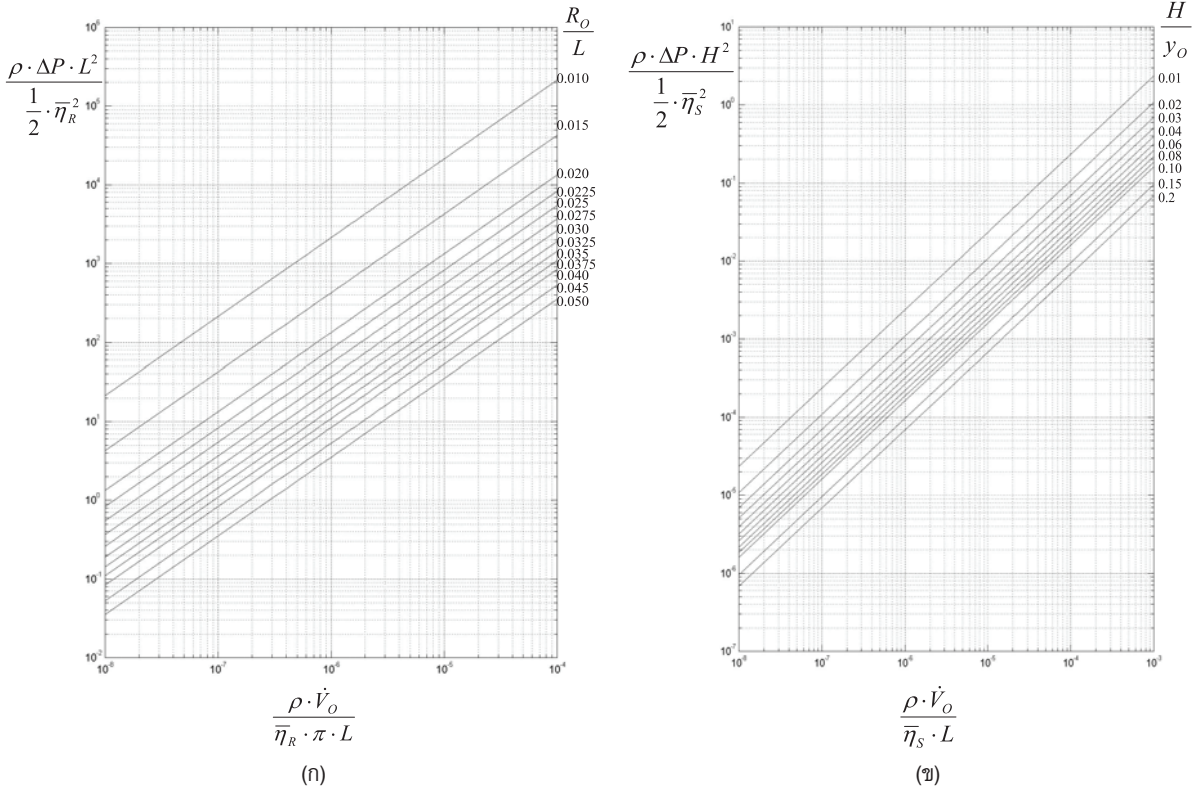
**ตารางที่ 3** อัตราการไหลบริเวณทางเข้าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการไหล

การจำลองการไหลครั้งที่ $i$	Mass flow rate (Kg/s)
1	0.001389
2	0.002778
3	0.004167
4	0.005556
5	0.006944
6	0.008333
7	0.009722
8	0.011111
9	0.012500
10	0.013889

เมื่อกำหนดค่าทุกอย่างตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้แล้ว จึงเริ่มขั้นตอนการจำลองการไหล และเมื่อคำนวณจนได้ผลลัพธ์แล้วตรวจสอบผลการคำนวณโดยดูจากค่า  $\Delta P$

จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณหาค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติและทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลเป็นขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งแสดงกราฟในรูปที่ 14





**รูปที่ 14** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จาก Fluent

(ก) ค่า  $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_R \cdot \pi \cdot L}$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-4}$

(ข) ค่า  $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\eta_s \cdot L}$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-3}$

รูปที่ 15 แสดงผลการจำลองการไหลของพลาสติกชนิด HDPE ที่ 453 K ซึ่งมีค่าความหนาแน่น  $950 \text{ kg/m}^3$ , ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี  $k = 6190 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2$  และดัชนีชี้กำลัง  $n = 0.56$  [15-16] ในแม่พิมพ์อัดรีดที่มีขนาดรัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด  $R_o = 25$  มม. ระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างปากแม่พิมพ์  $L = 1$  ม. และความกว้างของช่องทางไหล  $H = 5$  มม. ที่สร้างจากขั้นตอนในรูปที่ 8 ในภาพแสดงความดันตกคร่อมที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์

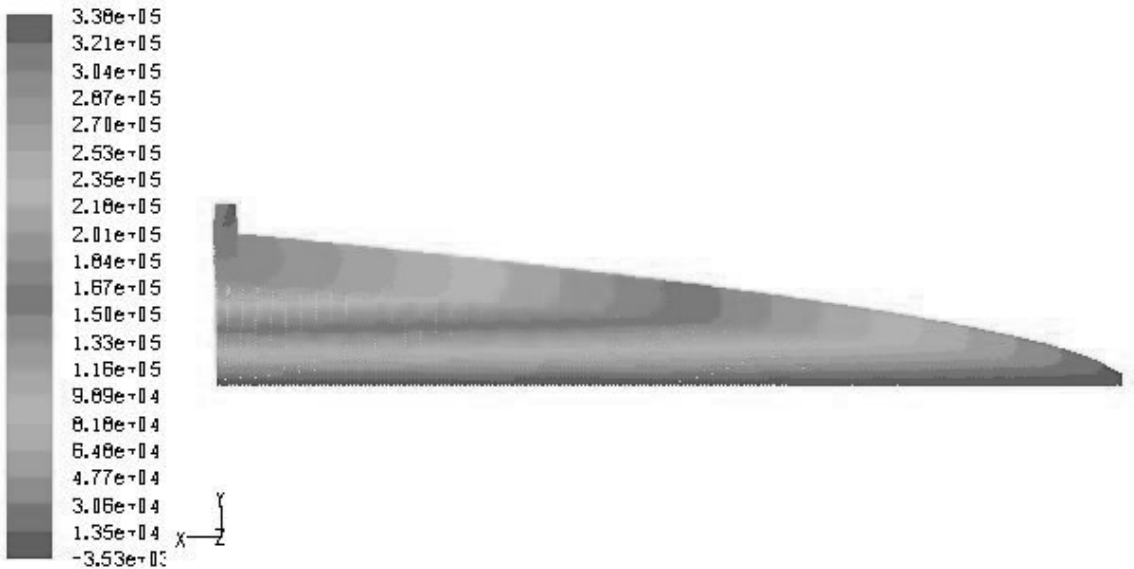
#### 4. วิเคราะห์ผล

เนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดจะต้องมีการตรวจสอบความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ ) ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ทุกครั้ง ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเปรียบเทียบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดจากการใช้กราฟในรูป 7 ซึ่งได้จากสมการที่ (18) กับกราฟในรูปที่ 14 ซึ่งได้จากการจำลองการไหลจาก Fluent การเปรียบเทียบจะคำนวณออกมาให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Percent error) ซึ่งจะมีค่าคือ

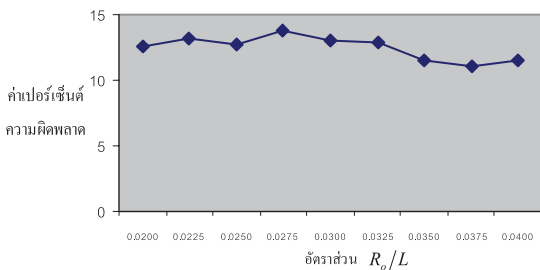
$$\text{Percent Error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta P_{\text{Fluent},i} - \Delta P_{\text{Calculation},i}}{\Delta P_{\text{Fluent},i}} \right| \cdot 100\% \quad (29)$$

โดยที่  $\Delta P_{Fluent,i}$  คือค่าความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่เกิดจากอัตราไหลในการจำลองการไหลครั้งที่  $i$  (ในตารางที่ 3) ที่ได้จากโปรแกรม Fluent  $\Delta P_{Calculation,i}$  คือค่าความ

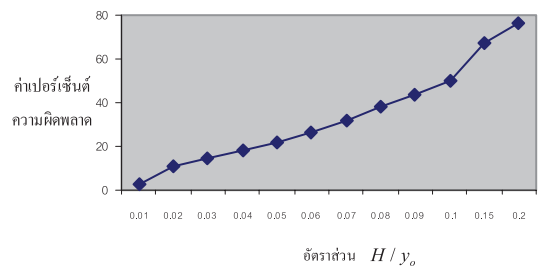
ดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่เกิดจากอัตราไหลครั้งที่  $i$  ที่ได้จากสมการที่ (18)



รูปที่ 15 ผลการจำลองการไหลจากแม่พิมพ์ที่สร้างจากขั้นตอนในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นความดันตกคร่อมที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ณ บริเวณทางออก



(ก)



(ข)

รูปที่ 16 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างความดันตกคร่อมที่ได้จากการจำลองการไหล

- (ก)  $\Delta P_{Fluent,i}$  และความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากสมการที่ (18)  $\Delta P_{Calculation,i}$  ที่อัตราส่วน  $\frac{R_o}{L}$  ต่างๆ
- (ข)  $\Delta P_{Fluent,i}$  และความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากสมการที่ (18)  $\Delta P_{Calculation,i}$  ที่อัตราส่วน  $\frac{H}{y_o}$  ต่างๆ

จากรูป 16ก พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดที่อัตราส่วน  $\frac{R_o}{L}$  ค่าต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยประมาณ 13% แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน  $\frac{H}{y_o}$  (รูปที่ 16ข) พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความผิดพลาดก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณและการใช้ค่าตัวแทนความหนืด  $\eta_{R(x)}$  และ  $\eta_{S(x)}$  คงที่ แต่ในกรณีที่ใช้โปรแกรม Fluent การคำนวณจะกำหนดให้มีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นถ้าต้องการใช้งานกราฟในรูปที่ 7 ที่ระดับความผิดพลาดไม่เกิน 20% จะต้องใช้งานที่ค่า  $\frac{H}{y_o}$  ไม่เกิน 0.04 นอกจากนี้การออกแบบด้วยกราฟรูปที่ 14 จะให้รูปทรงที่ใกล้เคียงกับการออกแบบด้วยกราฟของ Görmar ในรูปที่ 6 ที่อัตราความความเครียดเฉือนเดียวกัน

## 5. สรุปผลวิจัยและข้อเสนอนะ

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกแผ่นชนิดไม้แขวนเสื้อ ควรจะต้องทราบขนาดของเครื่องอัดรีดเพื่อใช้กำหนดค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดจากการศึกษาจะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตกคร่อม คือค่าของรัศมีของท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด  $R_o$  ซึ่งสามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ได้คือ เมื่อรัศมีของท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดและความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลง จากกราฟรูปที่ 7 ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (18) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าการออกแบบโดยใช้กราฟรูปที่ 7 จะใช้ได้ดีกับการออกแบบแม่พิมพ์ผลิตฟิล์มพลาสติก ( $H/y_o \ll 1$ ) โดยมีค่าแนะนำที่  $H/y_o < 0.04$  ซึ่งจะทำให้การออกแบบมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 20% แต่การออกแบบโดยใช้กราฟรูปที่ 14 สามารถให้ค่าที่แม่นยำกว่า ดังนั้นจึงใช้ได้กับการออกแบบแม่พิมพ์ผลิตพลาสติกแผ่นและฟิล์ม

งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อผู้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด โดยไม่ต้องออกแบบลองผิดลองถูกอีกต่อไป แต่เพื่อให้ผลการวิจัยสมบูรณ์จึงควรจะมีการเปรียบเทียบกับการใช้งานแม่พิมพ์อัดรีดจริงที่ถูกรออกแบบจากวิธีการที่เสนอแนะในงานวิจัยชิ้นนี้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Walter Michaeli 1992, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hanser Publishers, New York.
2. Walter Michaeli, 1984, *Extrusion Dies Design and Engineering Computations*, Hanser Publishers, New York.
3. Arunworradirok, S. and Kolutawong, C. 2005, "Conceptual Design of Coathanger Die for Plastic or Elastomer Sheet Extrudate", *The 19<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, October 19-21, Phuket, Thailand, AMM004.
4. Kolutawong, C. and Arunworradirok, S. 2005 "A Novel Concept to Design Coathanger Slit Dies for Plastic Sheet Manufacturing", *J. of KMITNB*, Vol. 15, No. 4, pp. 39-46.
5. J.-F. Agassant, P. Arenas, J.-Ph. Sergent, P.J. Carreau, 1991, *Polymer Processing Principles and Modeling*, Hanser Publishers, New York.
6. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, 1960, *Transport Phenomena*, John Wiley & Son, New York.
7. R. Byron Bird, Robert C. Armstrong, Ole Hassager, 1987, *Dynamics of Polymeric Liquids: Volume 1 : Fluid Mechanics*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Son, New York.
8. Baird, D.G. and Collias, D.I. 1998, *Polymer Processing: Principles and Design*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Son.

9. Ronald L. Panton, 1984, *Incompressible Flow, A Wiley-Interscience Publication*, John Wiley & Son.
10. Merle C. Potter and David C. Wiggert, 2002, *Mechanic of Fluids*, Prentice-Hall, Inc.
11. Rolf H. Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann and E.M. Gates, 1999, *Fluid Flow: A First Course in Fluid Mechanics*, Prentice-Hall, Inc.
12. Arunworradirok, S., 2004 *Parameter Analysis for Designing a Coathanger Die*, Master Thesis, Dept. of Mech. Engr., King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
13. *Fluent User Manual*, 2001 Fluent Inc.
14. Joel H. Ferziger, and Milovan Peric, 1999, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Germany.
15. Z. Tadmor and C. G. Gogos, 1979, *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Son, New York, pp. 694-695.
16. Z. Tadmor and C. G. Gogos, 2006, *Principles of Polymer Processing*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Son, New York, pp. 889-913.