

หลักการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับผลิตพลาสติกหรือยางแผ่น

Conceptual Design of Coathanger Die for Plastic or Elastomer Sheet Extrudate

สุพัฒน์ อรุณวรดิษฐ์* และ ชานยุต โกลิตะวงษ์**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร. 02913-2500 ต่อ 8303 โทรสาร 02586-9541 E-mail: Supat_mme@Yahoo.com*, ckw@kmitnb.ac.th**

Supat Arunworraditok* and Chanyut Kolitawong**

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

Tel: 0-2913-2500 ext 8303 Fax: 0-2586-9541 E-mail: Supat_mme@Yahoo.com*, ckw@kmitnb.ac.th**

บทคัดย่อ

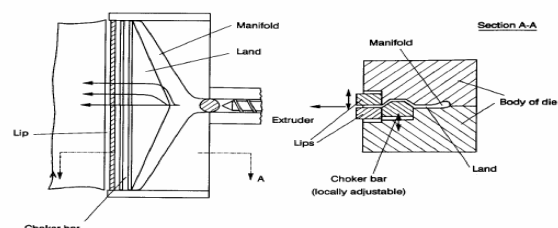
งานวิจัยนี้ จะศึกษาถึงการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ เพื่อใช้สำหรับผลิตพลาสติกหรือยางแผ่นที่ยังไม่สุก (Uncured rubber sheet) ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการให้ผลรวมของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของปากแม่พิมพ์ เนื่องจากองค์ประกอบในการผลิตพลาสติกหรือยางแผ่นที่เกี่ยวข้องนั้นมีอยู่หลายตัว เช่น ผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ความเร็วของของไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด ขนาดของแม่พิมพ์อัดรีด และคุณสมบัติของวัสดุ ทำให้การที่จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านั้นอย่างอิสระเป็นไปได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเราจึงทำให้ตัวแปรข้างต้นเป็นตัวแปรไร้มิติ และทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้กำหนดขึ้น ซึ่งกราฟที่ได้มานี้สามารถที่จะนำมาช่วยในการออกแบบ แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ได้ด้วยความสะดวกรวดเร็วขึ้น และผลการออกแบบที่ได้จากการใช้กราฟที่สร้างขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการออกแบบของ Görmar จะพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

Abstract

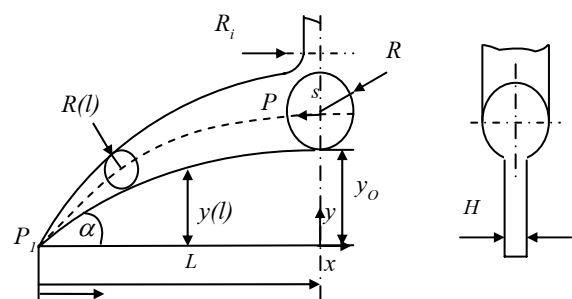
This research aims to conduct analytical formulation to study a plastic or elastomer coathanger die by controlling the uniform outlet pressure across the die width to maintain the uniform outlet velocity. The geometrical variations such as the manifold radius, slit height and width which affect power-law fluid flow in the coathanger die are investigated. All calculated parameters are described through the dimensionless analysis. Thus one creates dimensionless charts from the relations between dimensionless groups helping extrusion die engineers to design a plastic or uncured rubber sheet. The die shape designed from the charts is in agreement with Görmar's design.

1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นและยางแผ่นที่ยังไม่สุกที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จำเป็นที่จะต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งนับว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นผู้ประกอบการหลายแห่งจึงมีความคิดริเริ่มที่จะออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเอง โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานในการออกแบบเป็นหลัก แต่ผลที่ได้ไม่มีความแน่นอนเพราะไม่ทราบถึงต้นเหตุของปัญหาอย่างแท้จริง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงทำให้เราสนใจที่จะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกหรือยางแผ่นชนิดไม้แขวนเสื้อ (ภาพที่ 1) โดยที่หลักสำคัญที่ใช้สำหรับการออกแบบคือต้องการที่จะออกแบบรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด ที่สามารถจะทำให้ลักษณะการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ มีคุณสมบัติคงที่ตลอดแนวความกว้างของปากแม่พิมพ์ ซึ่งจะส่งผลถึงกันที่ไดจากแม่พิมพ์อัดรีดมีคุณภาพดีเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน



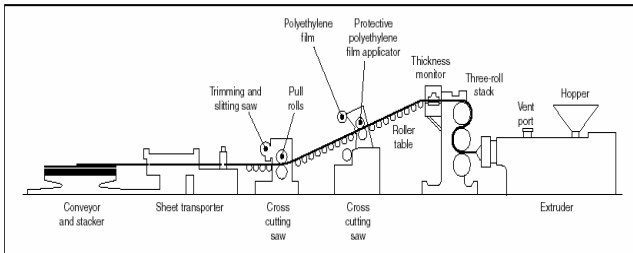
ภาพที่ 1 รูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกและยางแผ่นชนิดไม้แขวนเสื้อ



ภาพที่ 2 รูปร่างและตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

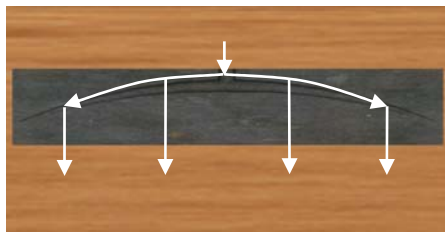
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตพลาสติกหรือยางแผ่น ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งคือเครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งเป็นส่วนเริ่มต้นของกระบวนการผลิตโดยจะเป็นตัวกำหนดค่าการไหล ส่วนที่สองคือแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [1-2] และส่วนสุดท้ายคือระบบลูกกลิ้งที่ใช้รีดปรับขนาดความหนาแผ่นพลาสติกหรือยางเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 รูปแสดงกระบวนการผลิตพลาสติกและยางแผ่น

จากภาพที่ 1 และภาพที่ 2 แสดงแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกหรือยางแผ่นซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งพอลิเมอร์เหลวให้ทั่วถึงตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดัน เพื่อให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ (ดูภาพที่ 4) ส่วนความหนาของแผ่นพลาสติกหรือยางนั้นจะถูกกำหนดโดย ขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die Lips)



ภาพที่ 4 รูปแสดงทิศทางการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกหรือยางแผ่น ชนิดไม้แขวนเสื้อนั้น สิ่งสำคัญก็คืออัตราการไหลของพอลิเมอร์เหลวที่ออกมาจากปากแม่พิมพ์อัดรีด จะต้องมีความเท่ากันตลอดช่วงความกว้างของปากแม่พิมพ์ รวมทั้งความดันและอุณหภูมิจะต้องสม่ำเสมอด้วย Wortberg และ Kirchner[1-2] เสนอแนวทางการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยใช้สมมติฐานคือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) (2) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible) (4) ไม่เกิดผลกระทบจากพฤติกรรมการไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก (5) ไม่เกิดผลกระทบของวิสโคอีลาสติก (No viscoelastic effect) (6) ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No slip condition) และ (7) ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์

ที่มีพฤติกรรมตามสมการเพาเวอร์ลอว์ โดย Wortberg และ Kirchner ใช้ค่าตัวแทนความหนืด (Representative Viscosity, $\bar{\eta}$) อธิบายพฤติกรรม การไหลของวัสดุชนิดนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

ซึ่งจากสมมติฐานที่กำหนดให้ตัวแทนอัตราเค้นเฉือน (Representative Shear Rate, $\dot{\gamma}$) มีค่าคงที่ตลอดช่วงท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ทำให้ตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล (Representative Viscosity in Manifold, $\bar{\eta}_R$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหล และตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล (Representative Viscosity in Slit, $\bar{\eta}_S$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของแม่พิมพ์อัดรีด ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด คือรัศมีของท่อทางไหล $R(I)$ และความยาวของช่องทางไหล $y(I)$ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด (ดูภาพที่ 2) ที่จะทำให้ได้ค่าความเร็วและความดันที่ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด

จากสมมติฐานที่ให้ ตัวแทนอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหล ($\dot{\gamma}_R$) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหล ทำให้สามารถที่จะกำหนดรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล $R(I)$ ได้คือ

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

โดย R_o คือรัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ L คือความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์ และ I คือระยะทางตามแกน x โดยวัดจากปลายแม่พิมพ์ (ดูภาพที่ 2) และความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด คือ

$$\Delta P(I) = \frac{8 \cdot \dot{V}_o \cdot \bar{\eta}_R}{\pi \cdot L} \int_0^L \frac{1}{R^4(s)} ds + \frac{12 \cdot \bar{\eta}_S \cdot \dot{V}_o}{L \cdot H^3} y(I) \quad (2)$$

โดย H คือความกว้างของช่องทางไหล (Slit) y_o คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ $\dot{V}_o$ คืออัตราการไหลของพอลิเมอร์เหลวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ $\dot{V}(I)$ คืออัตราการไหล ณ ตำแหน่ง I ใดๆ ของแม่พิมพ์ และจากสมมติฐานที่ต้องการให้ผลต่างของความดันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ $\frac{\partial(\Delta P)}{\partial I} = 0$ ทำให้หาความสัมพันธ์ความยาวของช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดได้คือ

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

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

$$\text{และ} \quad B = 2 \cdot L \quad (5)$$

สมการที่ 1 และสมการที่ 3 เป็นสมการที่ใช้สำหรับกำหนดรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดจะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการที่จะออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดนั้นเราต้องทราบค่ารัศมี $R(I)$ และความยาวของช่องทางไหล $y(I)$ ณ ตำแหน่ง I ใดๆ ของแม่พิมพ์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด R_o และความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด y_o ในการกำหนดค่าดังกล่าวได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและเสนอถึงวิธีการหาค่าอยู่หลายวิธี เช่น Wortberg และ Kirchner ได้เสนอวิธีการกำหนดค่าขึ้นมาดังแสดงภาพที่ 5 การตรวจสอบการออกแบบ

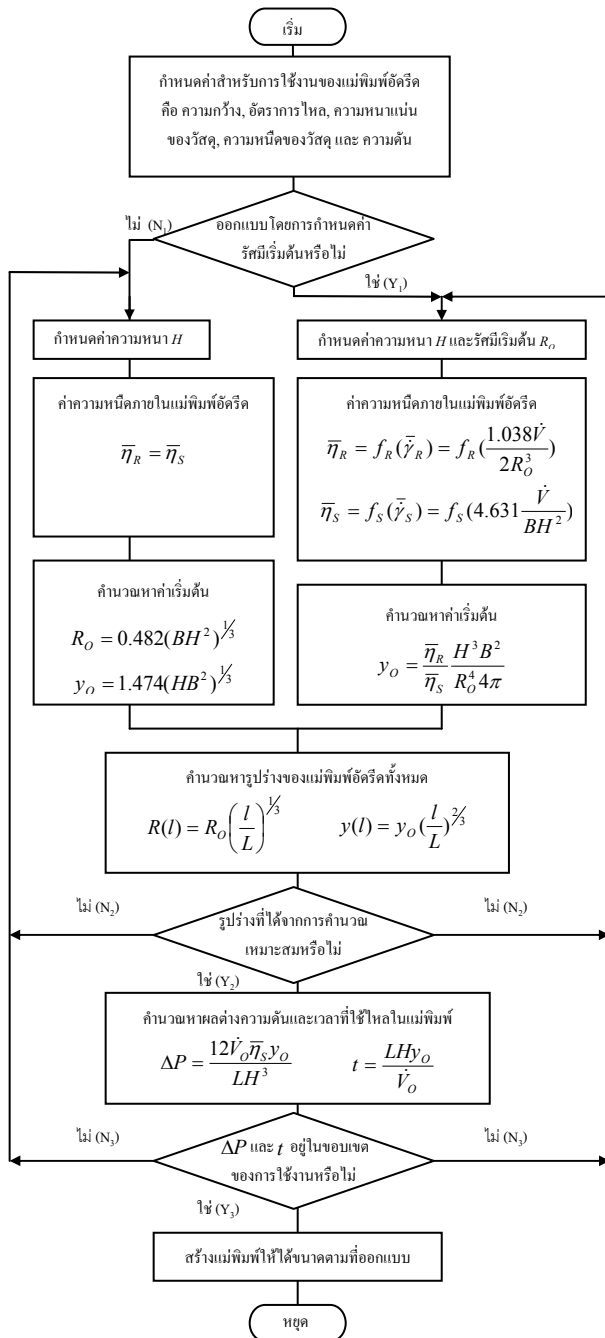
สามารถทำได้โดย ตรวจสอบค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแม่พิมพ์นั่นคือแทน $l = L$ ในสมการที่ 2 จะได้

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

ซึ่งค่าผลต่างความดันตกคร่อม ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงการใช้งานของเครื่องอัดรีดพลาสติกหรืออย่างนั้น และทำการตรวจสอบเวลาที่วัสดุไหลอยู่ในแม่พิมพ์(Residential Time) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$t = \frac{LHy_o}{\dot{V}_o} < t_d \quad (7)$$

โดยที่ค่าเวลาที่พอลิเมอร์เหลวไหลอยู่ในแม่พิมพ์ จะต้องอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสื่อมคุณภาพลง (Degradation Time, t_d)



ภาพที่ 5 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเสื้อของ Wortberg และ Kirchner

วิธีการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดอีกวิธี คือ วิธีของ Görmär [2] ซึ่งคำนวณค่า ปริมาตรของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ R_o จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหล $\dot{V}_o$ ค่าความดันตกคร่อม ΔP ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

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

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

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

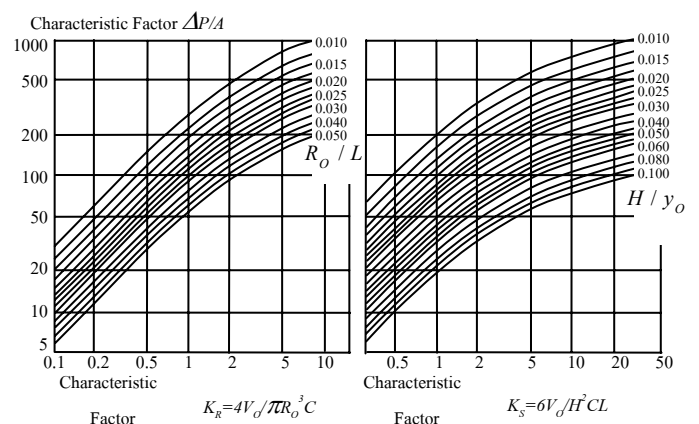
$$\varphi(u) = \frac{8}{u^2} \left[\frac{1}{2} \cosh u - \frac{1}{u} \sinh u + \frac{1}{u^2} (\cosh u - 1) \right] \quad (10)$$

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

ค่า A และ C เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้โดยใช้วิธีการทาบเส้น (Curve Fitting) ระหว่างเส้นโค้งแสดงการไหลที่ได้จากการทดลองกับสมการกึ่งทฤษฎี (Constitutive Equation) ของ Prandtl-Eyring,

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

จากสมการที่ 8 และ 9 ซึ่ง Görmär ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ และนำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งนำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนกราฟดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งจากกราฟเมื่อเราทราบค่าอัตราการไหลภายในแม่พิมพ์อัดรีด $\dot{V}_o$ ค่าความหนาของแม่พิมพ์ H ค่าความกว้างของแม่พิมพ์ L ค่าคงที่ A และ C ที่ได้จากการทาบเส้น และทำการกำหนดค่าปริมาตรของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ R_o สามารถที่จะหาค่า ΔP และค่า y_o เพื่อใช้สำหรับออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเสื้อได้ แต่เนื่องจากค่า A และ C ซึ่งเป็นค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของพลาสติกเหลว ได้จากสมการไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน ดังนั้นแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีนี้ จะใช้ได้กับวัสดุที่มีพฤติกรรมระหว่าง อัตราเค้นเฉือนและความเค้นเฉือนตามสมการของ Prandtl-Eyring เท่านั้น



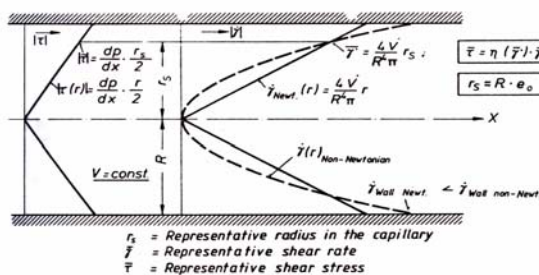
ภาพที่ 6 กราฟใช้สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดของ Görmär

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ สามารถหาได้จากวิทยานิพนธ์ของ สุพัฒน์ [3] จากที่กล่าวมาทั้งหมดพบว่า ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ นั้นค่อนข้างจะยุ่งยากยกเว้นงานวิจัยของ Görmar ซึ่งใช้กราฟ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่คือ ผู้ผลิตพลาสติกจะกำหนดคุณสมบัติของความหนืดด้วยค่าคงที่ n และ k ของสมการเพาเวอร์ลอว์ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกในการหาค่าคงที่ A และ C ซึ่งได้จากสมการกึ่งทฤษฎีของ Prandtl-Eyring โดยวิธีการทางเส้นเท่านั้น ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยวิธีของ Görmar จะเหมาะสมกับวัสดุพอลิเมอร์ที่ไหลตามสมการกึ่งทฤษฎีดังกล่าวเท่านั้น

3. การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

วัตถุประสงค์ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ คือ ต้องการให้ ผลรวมของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ เพื่อที่จะทำให้การกระจายความเร็วของพอลิเมอร์เหลวที่ออกมาจากปากแม่พิมพ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ โดยสมมติฐานในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดในงานวิจัยชิ้นนี้คือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) (2) การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible) (4) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมกรการไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก (5) ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No slip condition) และ (6) ใช้กับพลาสติกที่มีพฤติกรรมตามสมการเพาเวอร์ลอว์ ดังนั้นเราจะไม่คิดผลกระทบของวิสโคอีลาสติก (No viscoelastic effect) โดยกำหนดให้ค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลและช่องทางไหล เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแทนอัตราเค้นเฉือนที่บริเวณท่อทางไหล และช่องทางไหลภายในแม่พิมพ์ตามลำดับ ($\bar{\eta}_R = f(\bar{\dot{\gamma}}_R), \bar{\eta}_S = f(\bar{\dot{\gamma}}_S)$)

การออกแบบแม่พิมพ์ชนิดไม้แขวนเสื้อนั้น จะใช้สมการที่ 1 ในการหาค่ารัศมีท่อทางไหลและสมการที่ 3 ในการหาค่าความยาวของแม่พิมพ์ ณ บริเวณความกว้างต่าง ๆ ซึ่งในสมการทั้งสองจะต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหล R_o และค่าความยาว y_o บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ โดยที่ค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์สามารถหาได้จากสมการที่ 4 ซึ่งจะพบว่าเราต้องทราบค่าคงที่ 2 ตัว คือ ค่าตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล ($\bar{\eta}_R$) และ ค่าตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล ($\bar{\eta}_S$) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนิวทอนและนอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์

Geometry	Newtonian ($\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$)	Non-Newtonian ($\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$)
Circle	$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot \bar{v}_z \cdot r}{R^2} = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot r}{\pi \cdot R^4}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3}$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \frac{\dot{V}}{\pi \cdot R^3} \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{\left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3}$
Rectangular Slit	$\dot{\gamma} = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot y}{B \cdot H^3}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{n} + 2\right) \cdot \frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \left(\frac{2y}{H}\right)^{\frac{1}{n}}$ $\dot{\gamma}_w = \frac{2 \left(\frac{1}{n} + 2\right) \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}$

ตารางที่ 1 แสดงอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหลและช่องทางไหลของ

วัสดุนิวทอนและนอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์ [4-6]

จากภาพที่ 7 แสดงการไหลภายในท่อทางไหล(หรือในช่องทางไหลถ้าเป็นหน้าตัดเหลี่ยม) จะพบว่าบริเวณที่ค่าอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนิวทอน ($\dot{\gamma}_{Newt}$) และนอนนิวทอน ($\dot{\gamma}_{non-Newt}$) ตัดกันซึ่งก็คือบริเวณที่อัตราเค้นเฉือนเท่ากัน (มีค่ารัศมีเท่ากับ r_s) ดังนั้นที่บริเวณจุดตัดกันดังกล่าวก็จะมีค่าความหนืดเท่ากันด้วย ซึ่งเราสามารถแทนค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอน ด้วยค่าคงที่ที่ตำแหน่งค่าอัตราเค้นเฉือนเท่ากันได้ เราจะเรียกค่าตัวแทนนี้ว่าค่าตัวแทนความหนืด (Representative Viscosity, $\bar{\eta}$) ส่วนตารางที่ 1 แสดงอัตราเค้นเฉือนในท่อทางไหลและช่องทางไหลของวัสดุนิวทอนและนอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหนังสือเกี่ยวกับพลาสติกและพอลิเมอร์ทั่วไป [4-6]

วัสดุนอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์จะหาค่าความหนืดได้จากความสัมพันธ์

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (13)$$

เมื่อ k คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency index) และ n คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law index) จากสมการที่ 13 พบว่าในการหาค่าความหนืดของของไหลจะต้องทราบค่าอัตราเค้นเฉือน ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งเมื่อนำค่าอัตราเค้นเฉือนของวัสดุนอนนิวทอนที่เกิดขึ้นในท่อทางไหลตามตารางที่ 1 แทนค่าในสมการที่ 13 จะได้

$$\bar{\eta}_R = \frac{k}{4} \cdot \left(\frac{1}{n} + 3\right)^n \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\pi \cdot R_o^3}\right)^{n-1} \quad (14)$$

ค่าตัวแทนความหนืดที่ได้จากสมการที่ 14 จะเป็นค่าของวัสดุนอนนิวทอนชนิดเพาเวอร์ลอว์ แต่จากข้อสมมติฐานที่กำหนดให้ค่าอัตราเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่ ทำให้เราสามารถที่จะนำค่าตัวแทนความหนืดซึ่งเป็นค่าคงที่นี้ ไปใช้แทนค่าความหนืดของวัสดุนอนนิวทอนในท่อทางไหลได้ ในทำนองเดียวกันสำหรับบริเวณช่องทางไหลจะได้ค่าตัวแทนความหนืดคือ

$$\bar{\eta}_S = \frac{k}{3} \cdot \left(\frac{1}{n} + 2\right)^n \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2}\right)^{n-1} \quad (15)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าความยาวบริเวณกึ่งกลางของแม่พิมพ์ y_o ได้จากการนำค่า $\bar{\eta}_R, \bar{\eta}_S$ ที่ได้จากสมการที่ 14 และสมการที่ 15 กลับไปแทนในสมการที่ 4 และสามารถหาค่าความยาวของแม่พิมพ์ $y(l)$ ณ บริเวณความกว้าง l ต่าง ๆ ได้จากสมการที่ 3 เมื่อนำค่ารัศมี $R(l)$ ที่ได้จากสมการที่ 1 และค่าความยาวของแม่พิมพ์ $y(l)$ จากสมการที่ 3 แทนลงในสมการที่ 2 และทำการอินทิเกรตสมการจากนั้นทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$\Delta P = \left\{ \frac{12\dot{V}_o \bar{\eta}_R L^{1/3}}{\pi R_o^4} \left(L^{2/3} - l^{2/3} \right) \right\} + \left\{ \left(\frac{12\bar{\eta}_S \dot{V}_o}{L H^3} \right) \left(y_o \left(\frac{l}{L} \right)^{2/3} \right) \right\} \quad (16)$$

สมการที่ 16 เป็นสมการที่ใช้สำหรับการหาผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ΔP ณ ตำแหน่ง l ใดๆ ซึ่งผลต่างความดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับผลต่างความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด และเราสามารถตรวจสอบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นได้จากค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์นี้ (สมการที่ 16) โดยค่าที่คำนวณได้ จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตการใช้งานของเครื่องอัดรีด $\Delta P_{\min} < \Delta P < \Delta P_{\max}$ ซึ่งถ้าผลการคำนวณที่ได้ออกมาอยู่นอกช่วงขอบเขตการใช้งานจะต้องทำการออกแบบใหม่ โดยการปรับค่าตัวแปร R_o

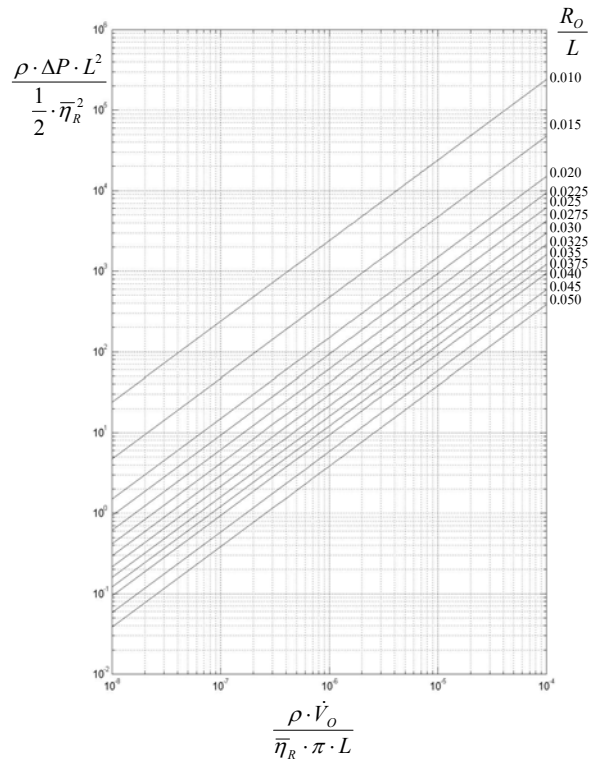
ถ้าผลต่างความดันที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า $\Delta P_{\max}$ เราสามารถที่จะลดค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า R_o ในทางกลับกันถ้าผลต่างดันที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า $\Delta P_{\min}$ เราสามารถที่จะเพิ่มค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นได้ โดยการลดค่า R_o ซึ่งการปรับตัวแปร R_o จะมีผลทำให้ค่า y_o เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปร R_o จะต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมในการใช้งานของค่า y_o และเวลาที่พลาสติกไหลอยู่ในแม่พิมพ์ (Residential time) จากสมการที่ 7 ด้วย

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ [7-9] เพื่อใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นนั้น จะวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ ที่ใช้หาค่าผลต่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ (สมการที่ 16) และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จะทำการจัดรูปตัวแปรใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติจะจัดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot L^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_R^2} \right) = \psi_R \left(\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_R \cdot \pi \cdot L} \right), \left(\frac{R_o}{L} \right) \right) \quad (17)$$

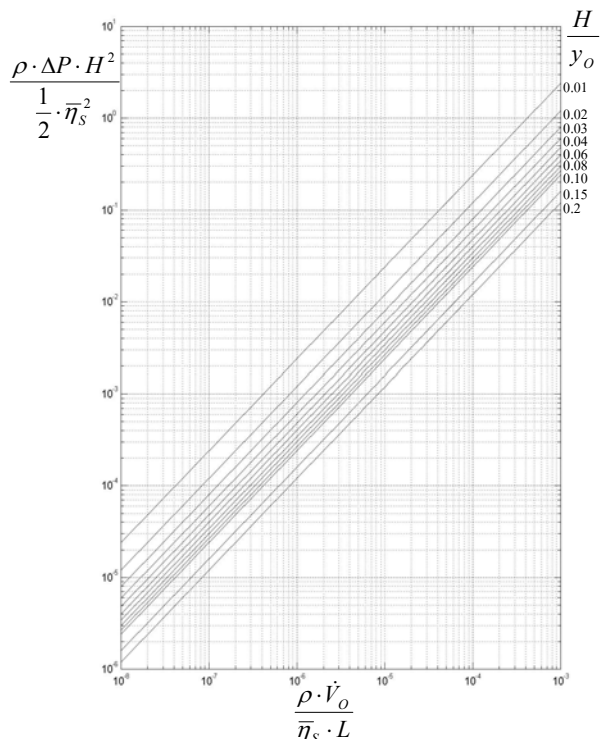
$$\left(\frac{\rho \cdot \Delta P \cdot H^2}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\eta}_S^2} \right) = \psi_S \left(\left(\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_S \cdot L} \right), \left(\frac{H}{y_o} \right) \right) \quad (18)$$

เมื่อนำสมการที่ 16 มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการที่ 17 และสมการที่ 18 สามารถที่จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ออกแบบแม่พิมพ์ได้ดังภาพที่ 8 และภาพที่ 9 โดยในที่นี้จะใช้คุณสมบัติของพลาสติก HDPE ที่ 453 K ซึ่งมีค่า ความหนาแน่น 950 kg/m^3 , ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี $k = 6190 \text{ N} \cdot \text{s}^n / \text{m}^2$ และดัชนีชี้กำลัง $n = 0.56$ ในการแทนค่าสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ



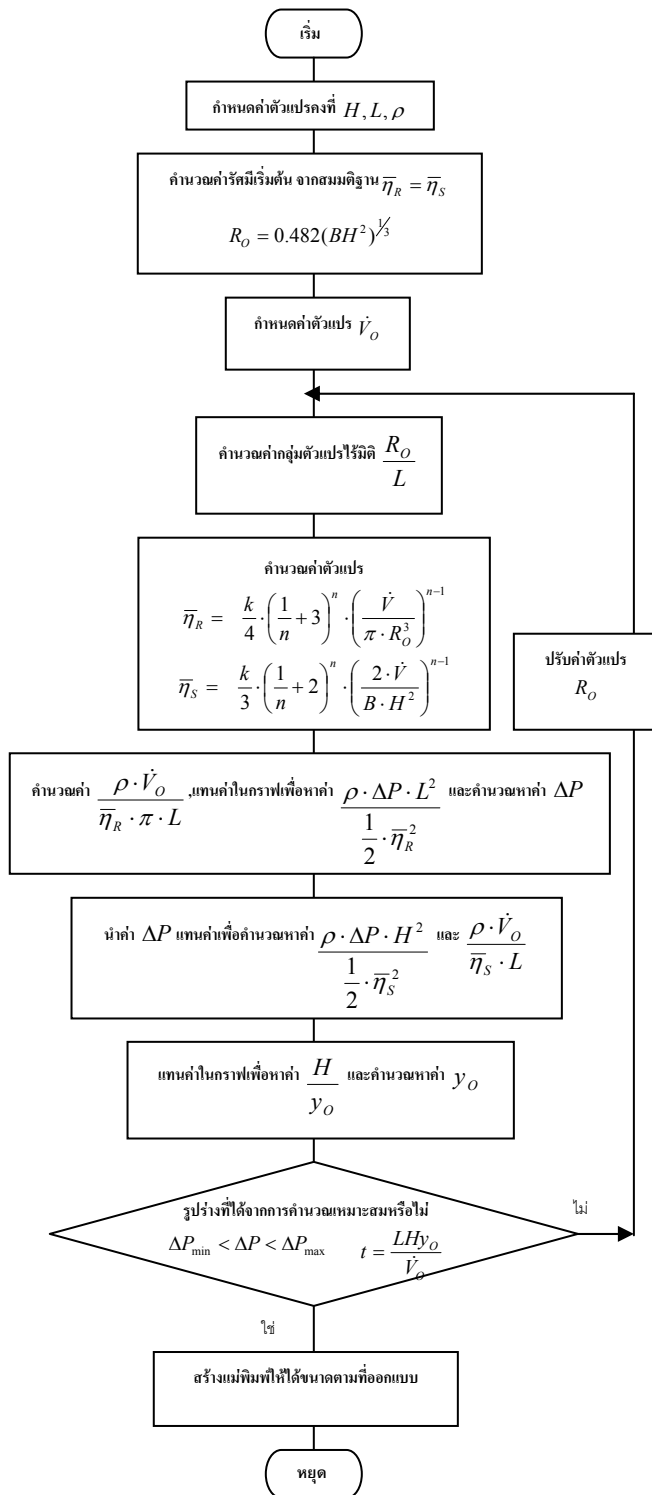
ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จาก

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



ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จาก

การคำนวณค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_o}{\bar{\eta}_S \cdot L}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3}



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น
โดยใช้แผนภาพที่ 8 และ 9

แผนภาพที่ 10 แสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้นโดยใช้กราฟในภาพที่ 8 และภาพที่ 9 โดยขั้นตอนการออกแบบจะคล้ายคลึงกับการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้การคำนวณจากสมการ

4. สรุปผลวิจัย

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกหรือยางแผ่นชนิดไม่แขวนเส้น ค่าที่ใช้ในการตรวจสอบการออกแบบก็คือ ค่าของผลต่างความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด ค่าความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์และเวลาที่พอลิเมอร์เหลวไหลภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรดังกล่าวกับตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว คือค่าของรัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด R_O ซึ่งสามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ได้คือ เมื่อรัศมีของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดและความยาวของช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าลดลง เนื่องจากแผนภาพที่ 8 และแผนภาพที่ 9 เขียนอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ เราจึงสามารถนำแผนภาพดังกล่าวไปใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดได้กับวัสดุอนินวทอเนียนทุกชนิดที่มีค่า $\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\eta_R \cdot \pi \cdot L}$ อยู่ระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-4} และ $\frac{\rho \cdot \dot{V}_O}{\eta_S \cdot L}$ ระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-3} ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมอัดรีดพลาสติกหรือยางแผ่นทั่วไป

เอกสารอ้างอิง

1. Walter Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hanser Publishers, New York (1992).
2. Walter Michaeli, *Extrusion Dies Design and Engineering Computations*, Hanser Publishers, New York (1984).
3. สุวัฒน์ อรุณวรดิศ, การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกชนิดไม่แขวนเส้น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2547).
4. J.-F. Agassant, P. Arenas, J.-Ph. Sergent, P.J. Carreau, *Polymer Processing Principles and Modeling*, Hanser Publishers, New York (1991).
5. R. Byron Bird, Warren e. Stewart, Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, John Wiley&son, New York (1960).
6. R. Byron Bird, Robert C. Armstrong, Ole Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids: Volume 1 Fluid Mechanics*, 2nd Ed., John Wiley&son, New York (1987).
7. Ronald L.Panton, *Incompressible flow*, A Wiley-Interscience publication, John Wiley&son (1984).
8. Merle C.Potter and David C. Wiggert, *Mechanic of fluids*, Prentice-Hall, Inc. (2002).
9. Rolf H. Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann and E.M. Gates, *Fluid Flow A firstcourse in fluid mechanics*, Prentice-Hall, Inc. (1999).