

## การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับของไหลแบบเฮอร์เซลบัลกเลย์

สุทธินันท์ ลีวุฒินันท์<sup>1</sup> ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์<sup>2\*</sup> และ วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อสำหรับผลิตยางคอมปาวด์แผ่น ซึ่งในที่นี้พิจารณาวัสดุที่ยังไม่สุก ให้มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เซลบัลกเลย์ โดยออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดให้มีความดันตกคร่อม และค่าความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์สม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ซึ่งได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ท่อทางไหลมีรูปร่างทรงกลม

โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ และทำการเปรียบเทียบจำลองการไหลแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับยางคอมปาวด์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าความดันตกคร่อมที่เกิดภายในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าแตกต่างไม่เกิน 7%

**คำสำคัญ:** แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ของไหลแบบเฮอร์เซลบัลกเลย์ การออกแบบแม่พิมพ์

- <sup>1</sup> นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
  - <sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
  - <sup>3</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- \* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8303 อีเมล: ckw@kmutnb.ac.th



## A Slit Die Design for Herschel-Bulkley Fluid

Suthinan Leewuthinan<sup>1</sup> Chanyut Kolutawong<sup>2\*</sup> and Wiboon Lertwimolnun<sup>3</sup>

### Abstract

The objective of this paper was to design a coat hanger die for an elastomer sheet extrusion by using Herschel-Bulkley fluid to represent the flow behavior of the elastomer. In this study, the coat hanger die with a manifold in a circular shape as considered. Additionally, the pressure gradient and exit velocity of the coat hanger die was uniformly controlled for the entire width of the coat hanger die. Moreover,

the calculating results of the pressure gradients were compared with those using the numerical method with a commercial software. According to the pressure gradient comparison, the proposed design method agreed with the computer simulation within 7%.

**Keywords:** Coat Hanger Die, Herschel-Bulkley Fluid, Die Design

<sup>1</sup> Student, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

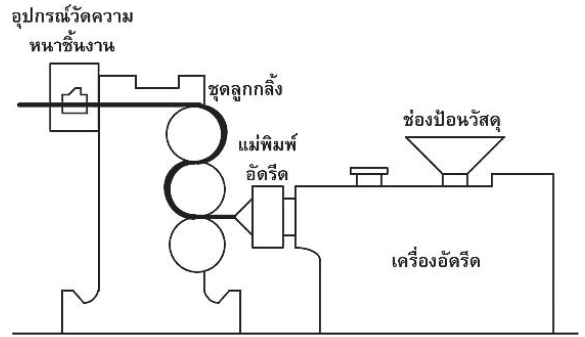
<sup>3</sup> Lecturer, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

\* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8303, E-mail: ckw@kmutnb.ac.th

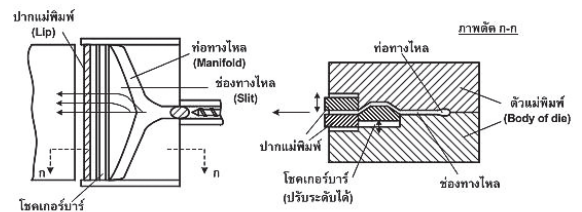
## 1. บทนำ

กระบวนการผลิตยางแผ่นที่ยังไม่สุกที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ประกอบด้วยเครื่องอัดรีด แม่พิมพ์อัดรีด และลูกกลิ้ง ตามรูปที่ 1 โดยหน้าที่หลักของแม่พิมพ์อัดรีดคือให้การไหลของยางคอมปาวด์ที่ถูกให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดแม่พิมพ์อัดรีด [1] ซึ่งแน่นอนว่าการไหลของยางคอมปาวด์บางส่วนได้รับผลมาจากรูปทรงของสกรูและการตั้งค่าของเครื่องอัดรีด [2] และผลของการไหลผ่านแม่พิมพ์ย่อมส่งผลต่อเนื้อทำให้ยางคอมปาวด์บวมพอง (Die Swell) หลังจากไหลผ่านออกมาจากแม่พิมพ์แล้ว [3], [4]

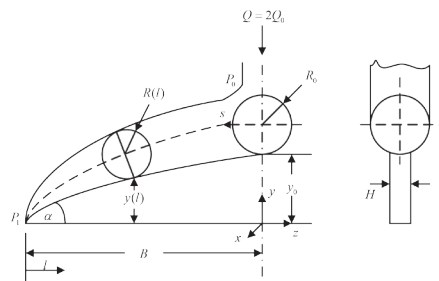
การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แฉวนเสื่อนั้นสามารถวิเคราะห์การไหลของของไหลโดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ในท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) โดยในแต่ละช่วงจะคิดการไหลไปในทิศทางเดียว (ดูรูปที่ 2 และ 3) โดยการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดมีทั้งใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Analytical Method) และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับของไหลนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) ยกตัวอย่างเช่น Chung และ Lohkamp [5] ทำการศึกษาออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ให้ของเหลวมีพฤติกรรมแบบเพาเวอร์ลอว์ (Power-law Fluid) และอุณหภูมิของเหลวคงที่ โดยออกแบบของไหลที่อยู่ภายในแม่พิมพ์มีค่าความดันตกคร่อมอยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 ถึง 5,000 psi และได้สร้างกราฟระหว่างขนาดท่อทางไหลกับมุมท่อทางไหล เพื่อให้ง่ายต่อผู้ที่จะต้องการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด Matsubara [6] ได้จัดสิทธิบัตรสมการการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับพอลิเมอร์ชนิดเพาเวอร์ลอว์ โดยมีอัตราการไหลคงที่และช่วงเวลาของพอลิเมอร์ที่อยู่ในแม่พิมพ์สม่ำเสมอ และหาส่วนโค้งของท่อทางไหล และรัศมีของท่อทางไหล ซึ่งความหนาของช่องทางไหลเป็นฟังก์ชันของรัศมีท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ ช่วงเวลาที่ของไหลอยู่ในแม่พิมพ์ ค่าดัชนีเพาเวอร์ลอว์ และความกว้างของแม่พิมพ์ ทำให้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถที่จะกำหนดความหนาของช่องทางไหลได้ Winter และ Fritz [7]



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตยางแผ่น



รูปที่ 2 รูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แฉวนเสื่อ



รูปที่ 3 รูปร่างและตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แฉวนเสื่อ

ได้ออกแบบท่อทางไหลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยกำหนดให้การกระจายตัวอัตราการไหลและความเค้นเฉือนที่ผนังมีความสม่ำเสมอในแม่พิมพ์ แต่รูปร่างของท่อทางไหลนั้นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเหมาะกับท่อทางไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความหนาที่มีค่ามากกว่า 1 มากๆ นอกจากนี้แล้วยังมีสมการการออกแบบซึ่งสรุปโดย Michaeli [8] อีกหลากหลายรูปแบบ

งานวิจัยที่ควรกล่าวถึง เช่น งานวิจัยของ T. Liu, L. Liu และ Tsou [9] ได้คำนวณหาสมการการออกแบบแม่พิมพ์

โดยให้การไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์เอลลิส (Ellis) และบิงแฮม (Bingham Fluid) และแสดงตัวอย่างในการออกแบบแม่พิมพ์ โดยหาขนาดของท่อทางไหลกับความยาวของช่องทางไหลตามพฤติกรรมการไหลดังกล่าว ต่อมาได้มีผู้วิจัยออกแบบจำลองการไหลแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับของไหลชนิดเพาเวอร์ลอว์ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ยกตัวอย่างเช่น Na และ Lee [10] ได้ออกแบบแม่พิมพ์ให้มีขนาดของท่อทางไหลและส่วนโค้งของท่อทางไหลของแม่พิมพ์ให้เหมาะสมที่สุด (Optimal Design) ทำให้ได้ค่าอัตราการไหลคงที่สม่ำเสมอตลอดความกว้างแม่พิมพ์ ในขณะที่ Smith และ Wang [11] ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ คาร์รัว-ยาสุดา (Carreau-Yasuda) เอลลิสครอส (Cross) และบิงแฮม ซึ่งใช้วิธีการคำนวณหารูปปร่างท่อทางไหลที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ได้อัตราการไหลคงที่สม่ำเสมอตลอดความกว้างแม่พิมพ์ แต่รูปปร่างของท่อทางไหลนั้นมีรูปปร่างไม่แน่นอนทำให้การสร้างแม่พิมพ์ทำได้ยาก Arunworradirok และ Kolutawong [12]-[14] ได้ออกแบบแม่พิมพ์โดยประยุกต์สมการการออกแบบของ Wortberg และ Kirchner ซึ่งแสดงในหนังสือของ Michaeli [8] โดยวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติของกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องระหว่างตัวแปรและสมการพื้นฐานของรูปปร่างแม่พิมพ์ และทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ซึ่งได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ [15] กับการจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ [16], [17] แต่ใช้เฉพาะกับของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ [18] จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยให้ของไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์เป็นส่วนมาก แต่ก็มีผู้ที่ศึกษาของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอ์เชลบัลคเลย์ (Herschel-Bulkley Fluid) [19] เช่น Nagashima, Hasegawa และ Narumi [20] ได้ศึกษาการออกแบบช่องแม่พิมพ์ (Slot Die) ซึ่งให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอ์เชลบัลคเลย์ ให้ได้อัตรา

การไหลเท่ากันตลอดความกว้างแม่พิมพ์ เพื่อใช้สำหรับงานเคลือบผิวชิ้นงาน

ในหนังสือของ Michaeli [8] กับงานเขียนของ White ในหนังสือของ Mark, Erman และ Eirich [21] ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอ์เชลบัลคเลย์ ซึ่ง Michaeli ได้ศึกษาวิเคราะห์หาค่าตัวแทนการไหลในท่อทางไหลกับในช่องทางไหล ของการไหลแบบเฮอ์เชลบัลคเลย์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับผลิตยางคอมพาวด์แผ่นเช่นกัน แต่ไม่ได้กล่าวถึงการคำนวณรูปร่างขนาดของแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ โดยให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอ์เชลบัลคเลย์ เนื่องจากพฤติกรรมดังกล่าวเหมาะสมกับวัสดุยางคอมพาวด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางแผ่น

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมการแสดงพฤติกรรมการไหล (Constitutive Equation) แบบเฮอ์เชลบัลคเลย์ [8] คือ

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \text{เมื่อ } \tau \geq \tau_0 \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{เมื่อ } \tau \leq \tau_0 \quad (2)$$

เมื่อ  $k$  คือค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency Index)  $n$  คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law Index) และ  $\tau_0$  คือค่าของความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield Stress)

แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งของเหลวให้ทั่วถึงกันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดัน เพื่อให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ [8] ส่วนความหนาของพลาสติกแผ่น หรือยางแผ่นนั้นจะถูกกำหนดโดยขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die Lip)

ในหนังสือของ Michaeli [8] ได้กล่าวถึงงานของ Wortberg และ Kirchner ไว้ว่าใช้ค่าตัวแทนความหนืด (Representative Viscosity,  $\bar{\eta}$ ) อธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและกำหนดตัวแทนความเครียดเฉือน (Representative Shear Rate,  $\bar{\gamma}$ ) มีค่าคงที่ตลอดช่วงท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ทำให้ตัวแทนความหนืดในท่อทางไหล (Representative Viscosity in Manifold,  $\bar{\eta}_R$ ) คงที่ตลอดช่วงความยาวของท่อทางไหลและตัวแทนความหนืดในช่องทางไหล (Representative Viscosity in Slit,  $\bar{\eta}_S$ ) คงที่ตลอดช่วงความยาวของแม่พิมพ์อัดรีด ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดต้องทราบค่ารัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  และความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ณ ตำแหน่งต่างๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด ที่จะให้ได้ค่าความดันคงที่ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด โดยรูปร่างและตัวแปรของแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 3 โดยเราพิจารณารูปร่างครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ให้อัตราการไหลของของไหลทั้งหมดเท่ากับ  $Q$  และอัตราการไหลครึ่งหนึ่งของของไหลเท่ากับ  $Q_0$  ซึ่งอัตราการไหลในท่อทางไหล

$$Q_R(l) = \frac{l}{B} Q_0 \quad (3)$$

เมื่อ  $B$  คือความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์ และ  $l$  คือระยะทางตามแกน  $z$  โดยวัดจากปลายแม่พิมพ์ และอัตราการไหลในช่องทางไหล ( $Q_S$ ) คือ

$$Q_S = Q_0 \quad (4)$$

จากสมมติฐานที่ให้ตัวแทนความเครียดเฉือนในท่อทางไหลคงที่ทำให้สามารถที่จะกำหนดรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีท่อทางไหล

$$R(l) = R_0 \left( \frac{l}{B} \right)^{1/3} \quad (5)$$

โดย  $R_0$  คือรัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์

และความสัมพันธ์ความยาวของช่องทางไหลตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด

$$y(l) = y_0 \left( \frac{l}{B} \right)^{2/3} \quad (6)$$

โดยที่  $y_0$  คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

### 3. การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือให้ค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่เท่ากับตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อที่จะให้การกระจายตัวความเร็วของของไหลที่ออกจากปากแม่พิมพ์มีความสม่ำเสมอ สมมติฐานในการออกแบบ ในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมกรไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No Slip Condition) และ ใช้กับของเหลวที่มีพฤติกรรมตามสมการเซอร์เชลบีล็กเลย์ โดยสมการที่ใช้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด [22], [23] ได้แก่สมการตัวแทนความหนืด

$$\bar{\eta}_R = \frac{k}{4} \left( \frac{K'}{(K^*)^n} \right) \left( \frac{Q_0}{\pi R_0^2} \right)^{(n-1)} \quad (7)$$

และ

$$\bar{\eta}_S = k \left( \frac{K''}{(K^{**})^n} \right) \left( \frac{1}{3} \left( \frac{n+1}{n} \right) \right)^n \left( \frac{6Q_0}{BH^2} \right)^{n-1} \quad (8)$$

โดยที่ค่าคงที่ตัวแปร  $K'$ ,  $K''$ ,  $K^*$  และ  $K^{**}$  แสดงในตารางที่ 1 โดยมีสมการค่ารัศมีของท่อทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์

$$R_0 = \left\{ \frac{\left( \frac{2BH^2}{3\pi} \right) \left( \frac{K'}{(4K^*)^n} \right)^{\frac{1}{n-1}}}{\left( \frac{1}{3} \left( \frac{n+1}{n} \right) \right)^{\frac{n}{n-1}} \left( \frac{K''}{(K^{**})^n} \right)^{\frac{1}{n-1}}} \right\} \quad (9)$$

และสมการค่าความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลาง  
แม่พิมพ์อัดรีด

$$y_0 = \frac{\bar{\eta}_R H^3 B^2 K''}{\bar{\eta}_S \pi R_0^4 K'} \quad (10)$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปร  $K'$ ,  $K''$ ,  $K^*$  และ  $K^{**}$

$K' = \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right)$
$K'' = \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{2} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^3 \right)$
$K^* = \left[ \begin{aligned} &\left( \frac{n}{n+1} \right) \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^2 \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{n+1}} + \\ &\left( \frac{2n}{2n+1} \right) \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right) \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{n+2}} + \\ &\left( \frac{n}{3n+1} \right) \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{n+3}} \end{aligned} \right]$
$K^{**} = \left[ \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{n+1}} - \left( \frac{n}{2n+1} \right) \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{n+2}} \right]$

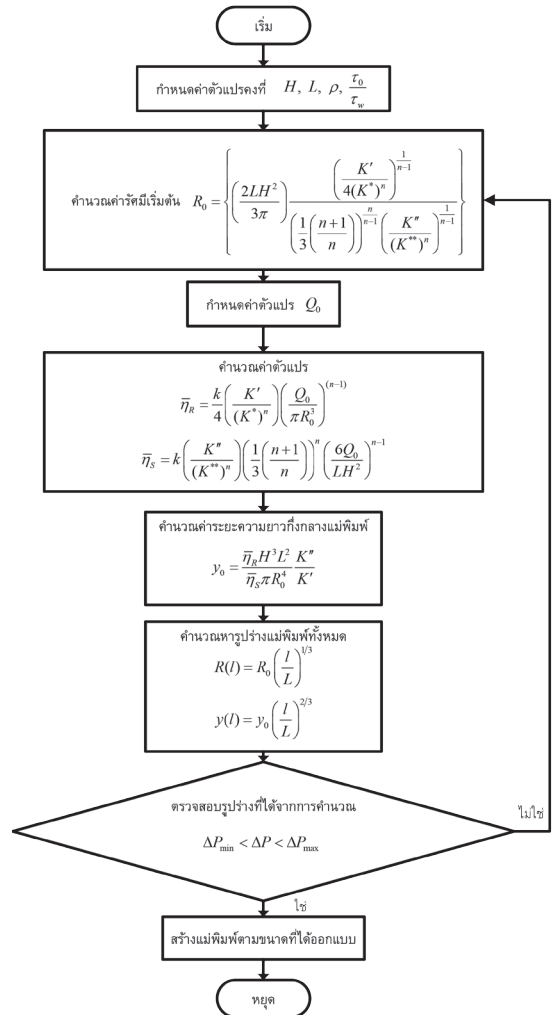
การตรวจสอบการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด สามารถ  
ทำได้โดยตรวจสอบความเหมาะสมของรูปร่างที่ได้  
จากการออกแบบ เมื่อได้รูปร่างของแม่พิมพ์ที่เหมาะสม  
ตามต้องการแล้ว ก็จะทำการศึกษาตรวจสอบค่าผลต่างความดัน  
ตกคร่อมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางภายในแม่พิมพ์

$$\Delta P = \frac{12 Q_0 \bar{\eta}_S y_0}{B H^3 K''} \quad (11)$$

ตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุยางคอมพาวด์  
ชนิด A และชนิด B ที่อุณหภูมิ 80°C

ชนิด	$\tau_0$ (Pa)	$k$ (Pa·s <sup>n</sup> )	$n$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
A	15,600	86,440	0.2854	1.120
B	16,700	119,300	0.2011	1.287

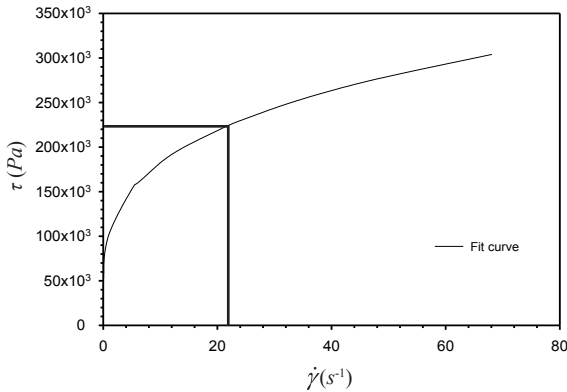
สมการการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่แสดงในขั้นต้น  
นั้นสามารถที่จะดูที่มาจาก S. Leewuthinan [22], [23]  
ซึ่งจะสามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด  
ชนิดไม่แขวนเส้นได้ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวน  
เส้นโดยใช้การคำนวณ

#### 4. การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

สมบัติของวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A (มีส่วนประกอบ  
NR กับ SBR 65.4% Carbon 32.2% และอื่นๆ 2.4%)  
หาได้จากการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาบิล  
ลารีและแบบแผ่นประกบดังแสดงในตารางที่ 2 ในที่นี้  
จะทำการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อผลิตยางแผ่น ขนาด  
ความกว้าง (2B) เท่ากับ 1 เมตร ความหนา (H) เท่ากับ  
2.5 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีอัตราการผลิต (m) เท่ากับ  
100 kg/hr ซึ่งจะคำนวณหาอัตราการไหลคือ



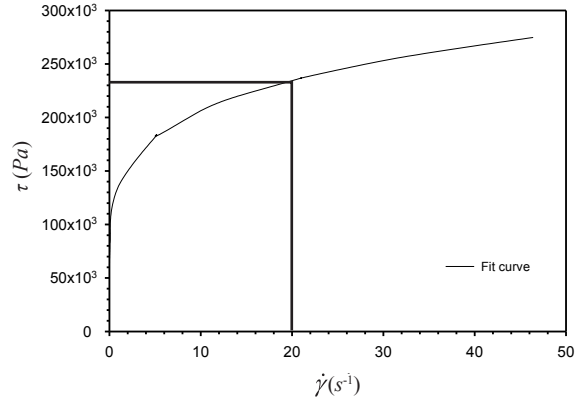
**รูปที่ 5** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับ  $\dot{\gamma}$  ของยางคอมพาวด์ชนิด A ที่อุณหภูมิ 80°C

$$Q_0 = \frac{1}{2} \frac{\dot{m}}{\rho} = 12.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (12)$$

ค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ( $\tau_w$ ) หาจากค่าอัตราความเค้นเฉือนที่ผนังจากสมการ

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q_0}{BH^2} \quad (13)$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (13) จะได้  $\dot{\gamma}_w = 23.808 \text{ s}^{-1}$  นำค่าที่ได้ไปหาค่าความเค้นเฉือนที่ผนังจากกราฟรูปที่ 5 ซึ่งจะได้ค่า  $\tau_w \cong 230 \times 10^3 \text{ Pa}$  โดยหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นกับความเค้นเฉือนที่ผนัง ( $\frac{\tau_0}{\tau_w}$ ) ได้เท่ากับ 0.068 เมื่อได้ค่าตัวแปรที่จะใช้ในการคำนวณออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเริ่มต้นทำการคำนวณหาค่ารัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด ซึ่งมีค่าตัวแปรจากตารางที่ 1 คือ  $K' = 0.9093, K'' = 0.8982, K^* = 0.1148$  และ  $K^{**} = 0.6049$  นำไปแทนค่าในสมการที่ (9) ซึ่งในการคำนวณครั้งแรกจะได้รูปร่างแม่พิมพ์ที่มีค่าตัวแทนความหนืดของทั้งท่อทางไหลและช่องทางไหลที่เท่ากัน ทำให้ได้ค่าขนาดรัศมีท่อทางไหลของแม่พิมพ์คือ  $R_0 = 0.82 \text{ mm}$  จากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแทนความหนืดของท่อทางไหลและช่องทางไหลโดยใช้สมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ



**รูปที่ 6** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  กับ  $\dot{\gamma}$  ของยางคอมพาวด์ชนิด B ที่อุณหภูมิ 80°C

ซึ่งจะได้ค่า  $\bar{\eta}_R = 10.455 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  และ  $\bar{\eta}_S = 10.455 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  และหาค่าระยะความยาวกึ่งกลางของแม่พิมพ์อัดรีดจากสมการที่ (10) ได้  $y_0 = 20274 \times 10^{-3} \text{ m}$  จากสมการที่ (5) จะได้รับรัศมีของท่อทางไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ ของแม่พิมพ์อัดรีด

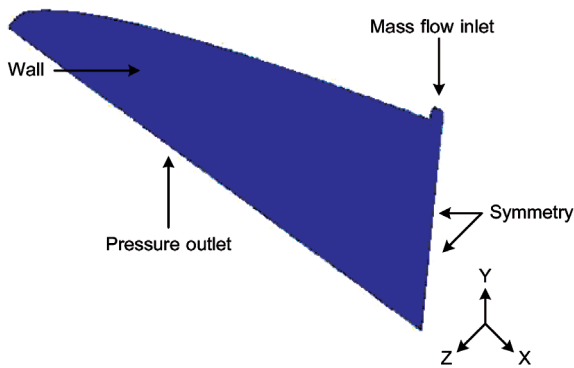
$$R(l) = (8.82 \times 10^{-3} \text{ m}) \times \left( \frac{l}{0.5 \text{ m}} \right)^{1/3}$$

จากสมการที่ (6) จะได้ค่าระยะความยาวของช่องทางไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ ของแม่พิมพ์อัดรีดคือ

$$y(l) = (202.74 \times 10^{-3} \text{ m}) \left( \frac{l}{0.5 \text{ m}} \right)^{2/3}$$

จากนั้นก็ทำการคำนวณหาค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีด โดยทำการแทนค่าลงในสมการที่ (11) จะได้ค่า  $\Delta P^d = 44.61 \text{ MPa}$  และแม่พิมพ์ดังกล่าวถ้าจะนำไปใช้กับยางคอมพาวด์ชนิด B (ที่มีส่วนประกอบหลักของ EPDM 32% Carbon 10% แป้ง (Powder) 48% และอื่น 10%) ด้วยการคำนวณตามรูปที่ 4 จะได้ค่า  $Q_0 = 10.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  และมี  $\dot{\gamma}_w = 20.736 \text{ s}^{-1}$  ทำให้อ่านกราฟในรูปที่ 6 ได้ค่า  $\tau_w \cong 236 \times 10^3 \text{ Pa}$  โดยหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นกับความเค้นเฉือนที่ผนัง ( $\frac{\tau_0}{\tau_w}$ ) ได้เท่ากับ 0.071 ค่าพารามิเตอร์  $K' = 0.9053,$





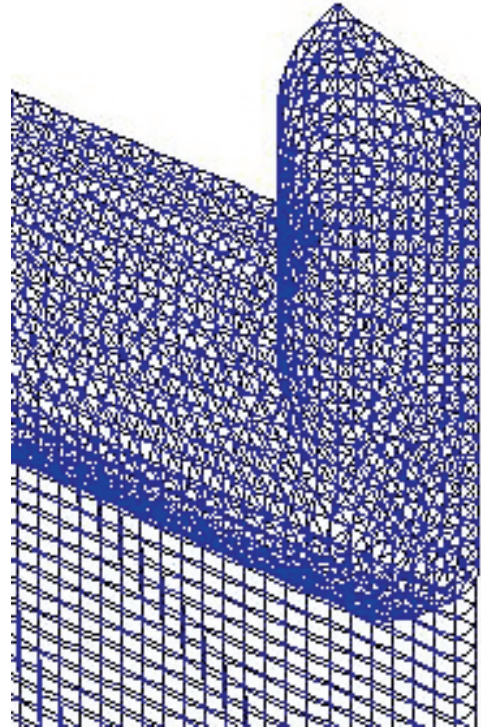
รูปที่ 7 รูปร่างของแบบจำลอง และเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ทดสอบการไหล

$K'' = 0.8937$ ,  $K^* = 0.0825$  และ  $K^{**} = 0.5583$  และค่าตัวแทนความหนืดของช่องทางไหล  $\bar{\eta}_R = 12.316 \times 10^3 Pa \cdot s$  และ  $\bar{\eta}_S = 12.223 \times 10^3 Pa \cdot s$  ทำการแทนค่าลงในสมการที่ (11) จะได้ค่า  $\Delta P^B = 45.97 MPa$

### 5. แบบจำลองที่ใช้ทดสอบการไหล

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการไหลในงานวิจัยนี้จะสร้างขึ้นจากรูปร่างของวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A และชนิด B ที่ไหลอยู่ในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แขวนเส้น โดยรูปร่างของแบบจำลองจะสร้างให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ตามสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบลักเลย์ ณ ที่อุณหภูมิ  $80^\circ C$  และรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการจำลองการไหลมีค่าคือ  $H = 0.0025 m$ . และ  $B = 0.5 m$ . จากหัวข้อที่ 4 จะได้  $R_0 = 8.82 m$ . และ  $y_0 = 202.74 mm$ . โดยรูปร่างของแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้การทดสอบการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 7

เนื่องจากรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดมีความสมมาตรใน 2 ระนาบ (ระนาบ XY และ YZ) ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองก็จะสร้างแค่เพียง 1 ใน 4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด ในที่นี้ได้สร้างแบบจำลองโดยเลือกใช้ Mesh 2 ชนิด คือ

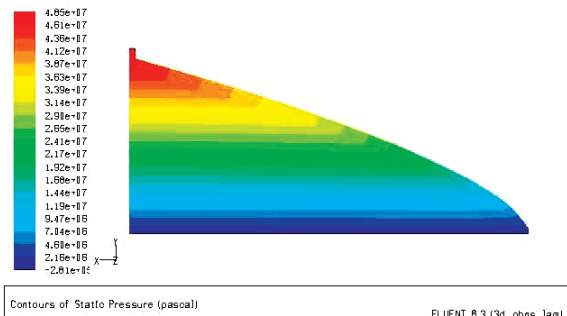


รูปที่ 8 Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด

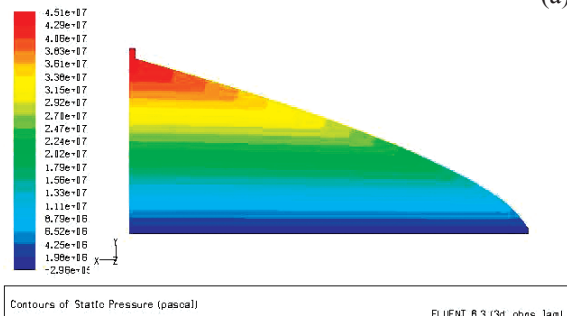
ทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) และทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral) โดยขนาดของ Mesh จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $0.00125 m$ . เท่ากันทั้งสองชนิด และมีจำนวน Mesh เท่ากับ 189,623 Element ดังแสดงในรูปที่ 8

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ให้กับแบบจำลอง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของมวลที่ทางเข้า เท่ากับ  $0.006944 kg/s$  บริเวณทางออกกำหนดให้มีค่าความดันคงที่เท่ากับ  $0 Pa$  ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ เนื่องจากการสร้างแบบจำลองเพียง 1/4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด จึงกำหนดให้ระนาบ XY และ YZ เป็นระนาบที่มีความสมมาตรและกำหนดให้พื้นผิวที่ไหลอยู่เป็นผนังที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวมานั้นแสดงในรูปที่ 7 เมื่อกำหนดค่าทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มการจำลองการไหล ตรวจสอบผลการคำนวณโดยดูจากค่า  $\Delta P$  และค่าความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ





(a)



(b)

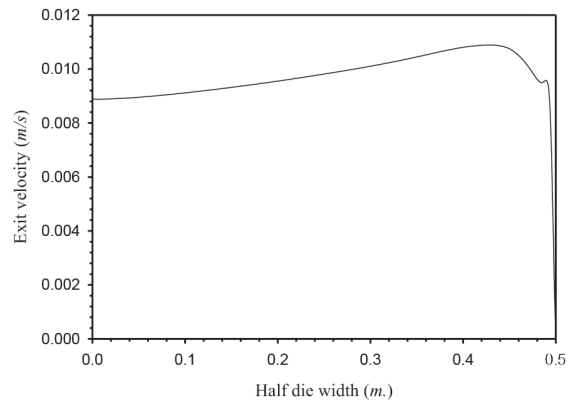
**รูปที่ 9** ค่าความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์อัดรีดของ  
(a) วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A  $\Delta P_{Flu}^A = 47.92 MPa$   
(b) วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด B  $\Delta P_{Flu}^B = 44.69 MPa$

### 6. ผลที่ได้จากการจำลองการไหล

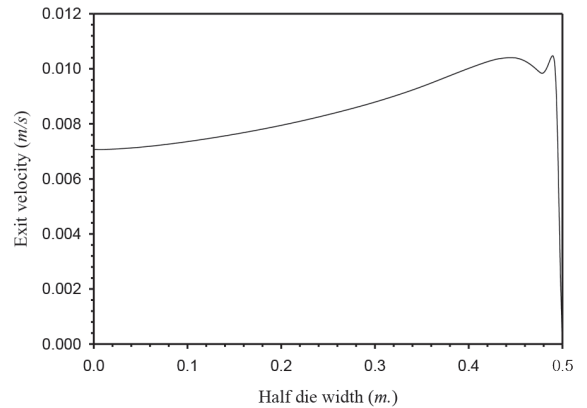
เนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด จะต้องมีการตรวจสอบ  $\Delta P$  ของแม่พิมพ์ทุกครั้ง ดังนั้นเราสามารถเปรียบเทียบผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดทั้งวิธีการคำนวณ และที่ได้จากโปรแกรม Fluent V. 6.3 [24] โดยใช้ค่าผลลัพธ์ค่าความดันตกคร่อมที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนจะคำนวณออกมาให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error)

$$\%Error = \left| \frac{\Delta P_{Cal} - \Delta P_{Flu}}{\Delta P_{Cal}} \right| \cdot 100\% \quad (14)$$

โดยที่  $\Delta P_{Cal}$  คือค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากสมการที่ (11)  $\Delta P_{Flu}$  คือค่าผลต่างความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากโปรแกรม Fluent ซึ่งค่า  $\Delta P_{Cal} = \Delta P^A = 44.91 MPa$  (จากหัวข้อที่ 4) และจากรูปที่ 9 (a)



(a)



(b)

**รูปที่ 10** ความเร็วเฉลี่ยของที่ทางออกของแม่พิมพ์อัดรีด  
(a) วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A (b) วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด B

ค่าความดันพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชิลบัสกัลเลียจากโปรแกรม Fluent  $\Delta P_{Flu}^A = 47.92 MPa$  ซึ่งเป็นแทนค่าลงในสมการที่ (14) จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแม่พิมพ์ที่ใช้วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A เท่ากับ 6.70% ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแม่พิมพ์ที่ใช้วัสดุยางคอมพาวด์ชนิด B มีค่าเท่ากับ 2.78% ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่สูงมากนัก

### 7. สรุป

ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม่แววนเส้นเพื่อผลิตยางแผ่น สามารถวิเคราะห์คำนวณทางคณิตศาสตร์ได้

จากขั้นตอนในรูปที่ 4 โดยกำหนดให้ยางคอมพาวด์ที่ยังไม่สุกมีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอริเชลบีล็กเลย์ และได้จำลองการไหลแบบ 3 มิติ ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมภายในแม่พิมพ์อัดรีด มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 7% และเนื่องจากวิธีที่นำเสนอในการออกแบบเป็นผลที่ได้จากการจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ดังนั้นในอนาคตถ้าสามารถสร้างขนาดแม่พิมพ์อัดรีดให้เท่ากับการจำลองการไหล และทำการทดสอบเพื่อที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลก็จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

## 8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ที่ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ และบริษัท ดีสโตน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุยางคอมพาวด์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. M. Kostic and L. G. Reifschneider, "Design of Extrusion Dies," *Encyclopedia of Chemical Processing*, 2006, pp. 633-649.
- [2] W. Lertwimolnun and B. Vergnes, "Influence of Screw Profile and Extrusion Conditions on the Microstructure of Polypropylene/Organoclay Nanocomposites," *Polym. Eng. Sci.*, pp. 2100-2109, 2007.
- [3] P. Subthema, C. Kolutawong, and W. Lertwimolnun, "Viscoelastic Material Constants for Rubber Tire Compounds," *Journal of Technical Education Development*, vol.84, no.4, pp. 78-83, 2012.
- [4] Pornthep Subthema, "Study of Swell Behavior of Rubber Melt Flow Through Die," MS Thesis,

Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2012.

- [5] C. I. Chung and D. T. Lohkamp, "Designing Coat-hanger Dies by Power-law Approximation," *Modern Plastics*, vol.3, March 1976, pp. 52-55, 1976.
- [6] Yutaka Matsubara, *Coat Hanger Die*, United States Patent, 4285655, August 1981.
- [7] H. H. Winter and H. G. Fritz, "Design of Dies for the Extrusion of Sheets and Annular Parisons: The Distribution Problem," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 26, pp. 543-553, April 1986.
- [8] Walter Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, New York: Hanser Publishers, 1992.
- [9] T.-J. Liu, L.-D. Liu, and J.-D. Tsou, "A Unified Lubrication Approach for the Design of a Coat-Hanger Die," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 34, pp. 541-550, 1994.
- [10] Su Yeon Na and Tai-yong Lee, "Parametric Study in Design of Coat-Hanger Die," *The Korean Journal of Rheology*, vol. 10, pp. 38-43, 1998.
- [11] Douglas E. Smith and Qi Wang, "Optimization-Based Design of Polymer Sheeting Dies Using Generalized Newtonian Fluid Models," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 45, pp. 953-965, 2005.
- [12] S. Arunworradirok and C. Kolutawong, "Conceptual Design of Coathanger Die for Plastic or Elastomer Sheet Extrudate," in *The 19<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Phuket, Thailand, 2005.
- [13] S. Arunworradirok and C. Kolutawong, "A Novel Scheme for Designing Coat-Hanger Slit Dies," in *Commemorative International Conference on the Occasion of the 4th Cycle Celebration of KMUTT*, Bangkok, Thailand, 2009, pp. 735-742.
- [14] S. Arunworradirok and C. Kolutawong, "A slit die



- design for casting plastics sheets,” *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology* (Previously AIJSTPME), vol.3, no.1, pp. 35-45, 2010.
- [15] C. Kolutawong and S. Arunworradirok, “A Novel Concept to Design Coathanger Slit Dies for Plastic Sheet Manufacturing,” *The Journal of King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 15, pp.39-46, 2005.
- [16] S. Arunworradirok and C. Kolutawong, “Computer Simulation of Plastics Film Casting for Coathanger Die Design,” in *IE Newwork Conference 2007*, Phuket, Thailand, 2007.
- [17] C. Kolutawong and S. Arunworradirok, “Computer Simulation of Plastics Sheet and Film to Help Slit Die Design,” *KMUTT Research and Development*, vol.32, no.1, pp.3-22, 2009.
- [18] Supat Arunworradirok, “Parameter Analysis for Designing a Coathanger Die,” MS Thesis, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, Thailand, 2004.
- [19] S.Leewuthinan, C.Kolutawong and W.Lertwimolnun, “Effects of Manifold Shapes in a Slit Die,” *The Journal of Industrial Technology*, KMUTNB, vol. 10, no. 1, 2013. (in print)
- [20] M. Nagashima, T. Hasegawa, and T. Narumi, “Flow Behavior of Herschel-Bulkley Fluid in a Slot Die,” *Journal of the Society of Rheology, Japan*, vol. 34, pp. 213-221, 2006.
- [21] J. E. Mark, B. Erman, and F. R. Eirich, *Science and Technology of RUBBER*, Elsevier Academic Press, United States, 2005, pp. 237.
- [22] S.Leewuthinan, C.Kolutawong and W.Lertwimolnun, “Coat Hanger Die Analysis for Elastomer Sheet Extrusion,” in *The 23<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Changmai, Thailand, 2009.
- [23] Suthinan Leewuthinan, “Flow Analysis for Designing Coat Hanger Die for Rubber Sheets,” MS Thesis, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, Thailand, 2009.
- [24] *Fluent User Manual V.6.3*, Fluent Inc. 2006.