

## ผลของรูปทรงท่อทางไหลในแม่พิมพ์อัดรีดยางแผ่น

สุทธินันท์ สิวณินันท์ ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์\* และ วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้นักวิศวกรรมมีความเข้าใจในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเส้นสำหรับผลิตยางคอมพาวด์แผ่น ซึ่งในที่นี้พิจารณาวัสดุยางที่ยังไม่สุก ให้มีพฤติกรรมการไหลแบบเทอร์เชลบลักโดยได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดให้มีค่าความดันตกคร่อม และค่าความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์สม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ โดยได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ท่อทางไหลมีรูปร่างทรงกลม และทำการศึกษาเปรียบเทียบรูปร่างของท่อทางไหลอีก 2 รูปแบบ คือ ทรงหยดน้ำ และทรงหกเหลี่ยม ที่มีค่า Hydraulic diameter ( $D_h$ ) เท่ากัน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำลองการไหล ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ชนิดของรูปร่างท่อทางไหลและการปรับเปลี่ยนมุมระหว่างท่อทางไหลกับช่องทางไหล มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมน้อยมากโดยมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 6% และรูปทรงกลมให้ค่าการกระจายตัวของความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดได้ดีที่สุดซึ่งไม่เกิน 12% ส่วนรูปทรงหยดน้ำ 24% และรูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าการกระจายตัวของความเร็วที่ทางออกมากที่สุดที่ 30%

**คำสำคัญ :** แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเส้น, ของไหลแบบเทอร์เชลบลัก, การออกแบบแม่พิมพ์

---

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: ckw@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 25 เมษายน 2556 ตอบรับเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2557

## Effects of Manifold Shapes in Slit Dies

Suthinan Leewuthinan, Chanyut Kolutawong\* and Wiboon Lertwimolnun

### Abstract

The objective of this research is to help engineers design a coat hanger die for elastomer sheet extrusion of Herschel-Bulkley fluid. In this study, a coat hanger die that has manifolds in circular, teardrop and hexagon shapes are studied and analyzed numerically. Pressure gradients and exit velocities of the coat hanger dies are monitored along the width of the dies. Moreover, the calculated results of the load effects (i.e., pressure, and exit velocity) of the circular manifold at the same hydraulic diameter ( $D_h$ ) are compared with those two proposed manifold shapes-teardrop and hexagon - using a computer simulation program. From the results, the shape and the angle of the manifold of the coat hanger die affect the pressure gradient less than 6%, while the circular manifold shape has the best exit velocity difference at 12% or less. The teardrop manifold shape gives 24% velocity difference and the hexahedron's gives 30% velocity difference.

**Keywords :** Coat hanger die, Herschel-Bulkley fluid, Die Design

---

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

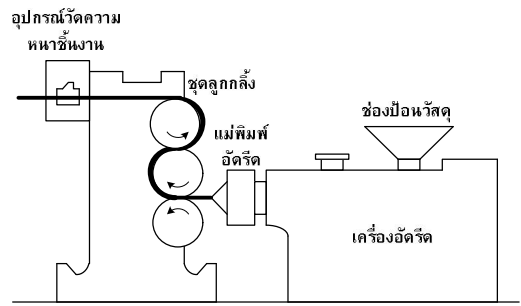
\* Corresponding author, E-mail: ckw@kmutnb.ac.th Received 25 April 2013, Accepted 25 February 2014

## 1. บทนำ

กระบวนการผลิตยางคอมพาวด์แผ่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ประกอบด้วยเครื่องอัดรีด แม่พิมพ์อัดรีด และลูกกลิ้ง ตามรูปที่ 1 โดยหน้าที่หลักของแม่พิมพ์อัดรีดคือ ให้การไหลของของเหลวกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสมการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ นั้นเริ่มแรกได้วิเคราะห์การไหลของของเหลวโดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ในช่องทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) โดยในแต่ละช่วงจะคิดการไหลไปในทิศทางเดียว (ดูรูปที่ 2 แล 3) โดยการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดมีทั้งใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (Analytical method) และ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) สำหรับของไหลนอนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) หลากหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น Chung และ Lohkamp [1] ทำการศึกษาออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ให้ของเหลวมีพฤติกรรมแบบเพาเวอร์ลอว์ (Power-law fluid) และอุณหภูมิของเหลวคงที่ โดยออกแบบของไหลที่อยู่ภายในแม่พิมพ์มีความดันตกคร่อมอยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 ถึง 5,000 psi และได้สร้างกราฟระหว่างขนาดช่องทางไหลกับมุมช่องทางไหลเพื่อให้ง่ายต่อผู้ที่ต้องการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด Matsubara [2] ได้จัดสิทธิบัตรสมการ การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับพอลิเมอร์ชนิดเพาเวอร์ลอว์ โดยมีอัตราการไหลคงที่และช่วงเวลาของพอลิเมอร์ที่อยู่ในแม่พิมพ์สม่ำเสมอ และหาส่วนโค้งของช่องทางไหล และรัศมีของช่องทางไหล ซึ่งความหนาของช่องทางไหลเป็นฟังก์ชันของรัศมีช่องทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ ช่วงเวลาที่ของไหลอยู่ในแม่พิมพ์ ค่าดัชนีเพาเวอร์ลอว์ และความกว้างของแม่พิมพ์ ทำให้มีข้อกำหนดจำกัดคือไม่สามารถที่จะกำหนดความหนาของช่องทางไหลได้ Winter และ Fritz [3] ได้ออกแบบ

ช่องทางไหลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยกำหนดให้การกระจายตัวอัตราการไหลและความเค้นเฉือนที่ผนังมีความสม่ำเสมอ ในแม่พิมพ์ แต่รูปร่างของช่องทางไหลนั้นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเหมาะสมกับช่องทางไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความหนามีค่ามากกว่า 1 มากๆ และก็ยังมีการออกแบบซึ่งสรุปโดย Michaeli [4] และต่อมา T.-J. Liu, L.-D. Liu และ Tsou [5] ได้คำนวณหาสมการการออกแบบแม่พิมพ์โดยให้การไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบต่างๆ คือ เพาเวอร์ลอว์, เอลลิส (Ellis) และบิงแฮม (Bingham fluid) และแสดงตัวอย่างในการออกแบบแม่พิมพ์ โดยหาขนาดของช่องทางไหลกับความยาวของช่องทางไหลตามพฤติกรรมการไหลดังกล่าว ซึ่งต่อมาได้มีผู้วิจัยได้ออกแบบจำลองการไหลแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) สำหรับของไหลชนิดเพาเวอร์ลอว์ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด โดย Na และ Lee [6] ได้ออกแบบแม่พิมพ์ให้มีขนาดของช่องทางไหลและส่วนโค้งของช่องทางไหลของแม่พิมพ์ให้เหมาะสมที่สุด (Optimal design) ทำให้ได้ค่าอัตราการไหลคงที่สม่ำเสมอตลอดความกว้างแม่พิมพ์ ในขณะที่ Smith และ Wang [7] ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบ เพาเวอร์ลอว์, คาร์เรว-ยาสุดา (Carreau-Yasuda), เอลลิส, ครอส (Cross) และ บิงแฮม ซึ่งใช้วิธีการคำนวณหารูปร่างช่องทางไหลที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ได้อัตราการไหลคงที่สม่ำเสมอตลอดความกว้างแม่พิมพ์ แต่รูปร่างของช่องทางไหลนั้นมีรูปร่างไม่แน่นอนทำให้การสร้างแม่พิมพ์นั้นทำได้ยาก Kolitawong และ Arunworradirok [8-13] ได้ออกแบบแม่พิมพ์โดยประยุกต์สมการการออกแบบของ Wortberg และ Kirchner โดยวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติของกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องระหว่างตัวแปรและ

สมการพื้นฐานของรูปร่างแม่พิมพ์ และทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ [14-15] ซึ่งได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ กับ การจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ แต่ใช้เฉพาะกับของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยให้ของไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ ซึ่งส่วนใหญ่นั้นกำหนดให้ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์หลอมเหลว แต่ก็มีผู้ที่ศึกษาของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ (Herschel-Bulkley fluid) คือ Nagashima, Hasegawa และ Narumi [16] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์แผ่น (Slot die) ซึ่งให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ ให้ได้อัตราการไหลเท่ากันตลอดความกว้างแม่พิมพ์ เพื่อใช้สำหรับงานเคลือบผิวชิ้นงาน [17] และในหนังสือของ Michaeli [4] กับงานเขียนของ White ในหนังสือของ Mark, Erman และ Eirich [18] ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุยางคอมพาวด์ (Rubber compound) มีพฤติกรรมการไหลแบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ ในขณะที่ Subthema และพรรคพวกศึกษาความเป็นวิสโคอีลาสติคของยาง [19-20] ซึ่ง Michaeli ได้ศึกษาวิเคราะห์หาค่าตัวแทนการไหลในท่อทางไหลกับในช่องทางไหล ของการไหลแบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับผลิตยางแผ่น แต่ไม่ได้กล่าวถึงการคำนวณรูปร่างขนาดของแม่พิมพ์อัดรีด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ที่จะทำการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แฉวนเสื่อ โดยให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ เนื่องจากพฤติกรรมดังกล่าวเหมาะสมกับวัสดุยางคอมพาวด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางแผ่น



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตยางแผ่น

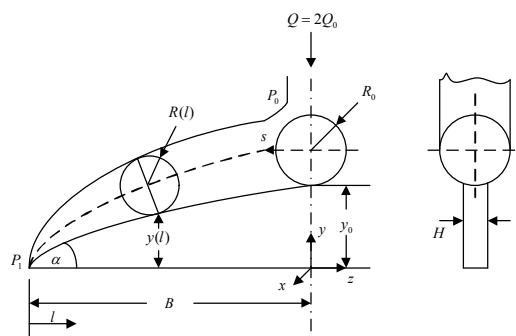
## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมการแสดงพฤติกรรมการไหล (Constitutive equation) แบบเซอร์เชลบัล็กเลย์ (Herschel-Bulkley fluid) [14, 21] คือ

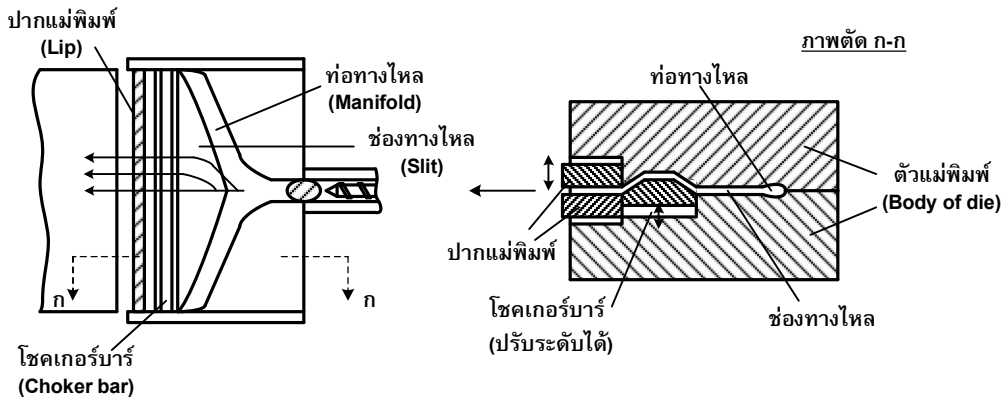
$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \text{เมื่อ } \tau \geq \tau_0 \quad (1)$$

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

เมื่อ  $k$  คือ ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency index)  $n$  คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law index) และ  $\tau_0$  คือค่าคงที่ความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield stress)



รูปที่ 2 รูปร่าง และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แฉวนเสื่อ



รูปที่ 3 รูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเส้น

แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งของเหลวให้ทั่วถึงกันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดันเพื่อให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ [14] ส่วนความหนาของพลาสติกแผ่นหรือยางแผ่นนั้นจะถูกกำหนดโดยขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die lip) ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด คือ ต้องให้ผลรวมของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดรีดมีค่าคงที่เท่ากับตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ โดยใช้สมมติฐานคือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) (2) การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Fluid) (4) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมกรไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก (5) ไม่มีกรไหลเคลื่อนที่บริเวณผนัง (No Slip Condition at Wall)

Michaeli [4] กล่าวว่า Wortberg และ Kirchner ใช้ค่าตัวแทนความหนืด (Representative Viscosity,  $\bar{\eta}$ ) อธิบายพฤติกรรมกรไหลของวัสดุอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และกำหนดตัวแทนความเครียดเฉือน (Representative Shear Rate,  $\bar{\dot{\gamma}}$ ) 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 ที่จะทำให้ได้ค่าความดันคงที่ตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด โดยรูปร่างและตัวแปรของแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 3 โดยเราพิจารณารูปร่างครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ ให้อัตราการไหลของกรไหลทั้งหมดเท่ากับ  $Q$  และอัตราการไหลครึ่งหนึ่งของกรไหลเท่ากับ  $Q_0$  ซึ่งอัตราการไหลในท่อทางไหล ( $Q_R$ ) คือ

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

และอัตราการไหลในช่องทางไหล ( $Q_S$ ) คือ

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

จากสมมติฐานที่ให้ตัวแทนความเครียดเฉือนในช่องทางไหลคงที่ทำให้สามารถที่จะกำหนดรูปร่างของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีช่องทางไหล  $R(l)$  คือ

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

โดย  $R_0$  คือรัศมีของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์  $B$  คือความกว้างครึ่งหนึ่งของปากแม่พิมพ์ และ  $l$  คือระยะทางตามแกน  $z$  โดยวัดจากปลายแม่พิมพ์ และความสัมพันธ์ความยาวของช่องทางไหลของแม่พิมพ์อัดรีด  $y(l)$  คือ

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

โดยที่  $y_0$  คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด

### 3. การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด

#### 3.1 สมมุติฐานและขอบเขต

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ ให้ค่าผลต่างความดันที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด เพื่อที่จะให้การกระจายตัวความเร็วของไหล ที่ออกจากปากแม่พิมพ์มีความสม่ำเสมอ สมมุติฐานในการออกแบบ ในงานวิจัยนี้คือ (1) อุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการไหล (Isothermal) (2) การไหลเป็น

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) (3) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible) (4) ไม่คิดผลกระทบจากพฤติกรรมการไหลทั้งบริเวณทางเข้าและทางออก (5) ไม่มีการไหลเลื่อนที่บริเวณผนัง (No slip condition) และ (6) ใช้กับของเหลวที่มีพฤติกรรมตามสมการเซอร์เชลล์บ์คเคิลย์

#### 3.2 สมการที่ใช้จำลองการไหลแม่พิมพ์อัดรีด

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

และสมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

โดยที่ค่า  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของวัสดุ,  $\vec{v}$  คือเวกเตอร์ความเร็ว,  $\underline{\underline{\tau}}$  คือค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน (Shear stress),  $\vec{F}$  คือเวกเตอร์ของแรงที่กระทำภายนอก โดยที่มีสมการสำหรับของไหลชนิดเซอร์เชลล์บ์คเคิลย์ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน ( $\underline{\underline{\tau}}$ ) และเทนเซอร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Rate of deformation tensor,  $\underline{\underline{\dot{\gamma}}}$ ) กับค่าของความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield stress,  $\tau_0$ ) คือ

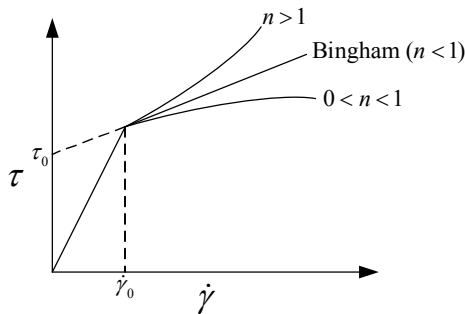
$$\underline{\underline{\tau}} = \underline{\underline{\tau}}_0 + \eta \underline{\underline{\dot{\gamma}}} \quad (9)$$

ตัวประกอบใน  $\underline{\underline{\dot{\gamma}}}$  กำหนดโดย

$$\dot{\gamma}_{ij} = \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

$v_i$  คือความเร็วตามแนวแกน  $i$ ,  $v_j$  คือความเร็วตามแนวแกน  $j$ ,  $x_i$  คือระยะทางตามแนวแกน  $i$ ,  $x_j$  คือระยะทางตามแนวแกน  $j$  ซึ่งในโปรแกรม Fluent [22] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด กับค่าอัตราความเครียดเฉือนชนิดสมการเฮร์เชลบลักเลย์ ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$\eta = \frac{\tau_0 + k \left[ \dot{\gamma}^n - (\tau_0/\mu_0)^n \right]}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

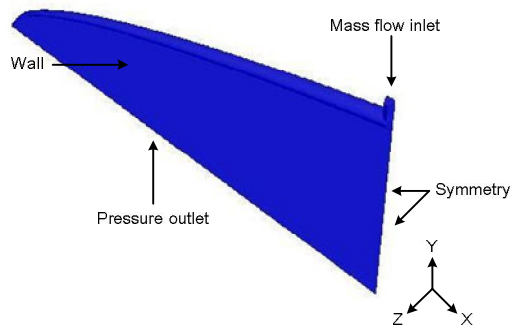


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและค่าอัตราความเครียดเฉือน

โดย  $\mu_0$  คือค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนต่ำ (Yielding viscosity) โดยรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (11) เมื่อคุณสมบัติของวัสดุกำหนดด้วยค่า  $n$  คือ  $n=1$  ค่าความหนืดวัสดุแบบบิงแฮม (Bingham fluid),  $n > 1$  ค่าความหนืดวัสดุแบบ Shear thickening และ  $n < 1$  ค่าความหนืดวัสดุแบบ Shear thinning โดยจำลองการไหลในโปรแกรม ซึ่งจะคำนวณสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพฤติกรรมของวัสดุในโปรแกรม Fluent จะใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนท์โวลุ่ม (Finite volume) โดยตัวโปรแกรม Fluent ที่กำหนดพฤติกรรมการไหลแบบเฮร์เชลบลักเลย์นี้ได้ถูกทดสอบเทียบกับผลการทดลองในเอกสารอ้างอิง [15]

### 3.3 สมบัติของวัสดุ

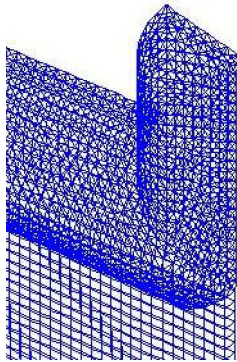
แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการไหลในงานวิจัยนี้จะสร้างขึ้นจากรูปร่างของวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A (Rubber compound) (มีส่วนประกอบ NR กับ SBR 65.4% Carbon 32.2% และอื่นๆ 2.4%) ที่ไหลอยู่ในแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเส้น [24] โดยรูปร่างของแบบจำลองจะสร้างให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล  $R(l)$  และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางไหล  $y(l)$  ตามสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุ [15] และรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการจำลองการไหลมีค่าคือ  $\rho = 1120 \text{ kg/m}^3$ ,  $k = 8,6440 \text{ Ns}^n/\text{m}^2$ ,  $n = 0.2854$ ,  $\mu_0 = 1,000,000 \text{ Pa.s}$ ,  $\tau_0 = 15,600 \text{ Pa}$ ,  $\tau_0/\tau_w = 0.068$ ,  $H = 0.0025 \text{ m}$ . และ  $B = 0.5 \text{ m}$ . จะได้  $R_0 = 8.82 \text{ mm}$ . และ  $y_0 = 202.74 \text{ mm}$ . โดยรูปร่างของแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้การทดสอบการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 5



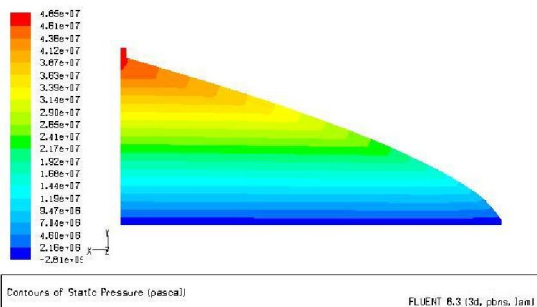
รูปที่ 5 แสดงรูปร่างของแบบจำลอง และเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ทดสอบการไหล

### 3.4 การแบ่งเอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขต

เนื่องจากรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดมีความสมมาตรใน 2 ระนาบ (ระนาบ XY และ YZ) ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองก็จะสร้างแค่เพียง 1 ใน 4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด ในที่นี่ได้สร้างแบบจำลองโดยเลือกใช้ Mesh 2 ชนิด คือ ทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) และทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral) โดยขนาดของ Mesh จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.00125 m. เท่ากันทั้งสองชนิด และมีจำนวน Mesh เท่ากับ 189,623 Element ดังแสดงในรูปที่ 6

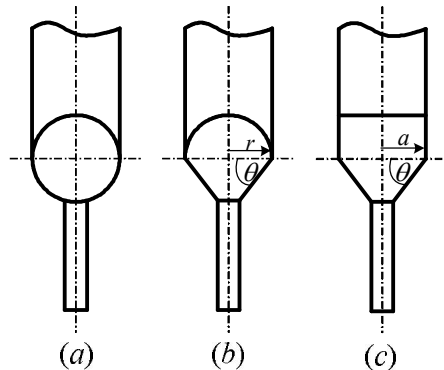


รูปที่ 6 แสดง Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด



รูปที่ 7 แสดงค่าความดันที่เกิดภายในแม่พิมพ์อัดรีดของวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด A

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ให้กับแบบจำลอง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของมวลที่ทางเข้า เท่ากับ  $0.006944 \text{ kg/s}$  บริเวณทางออก กำหนดให้มีค่าความดันคงที่เท่ากับ  $0 \text{ Pa}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความดันบรรยากาศ เนื่องจากการสร้างแบบจำลองเพียง 1/4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด จึงกำหนดให้ระนาบ XY และ YZ เป็นระนาบที่มีความสมมาตรและกำหนดให้พื้นผิวที่เหลื่ออยู่เป็นผนังที่ไม่มี การถ่ายเทความร้อน ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวมานั้นแสดงในรูปที่ 5 เมื่อกำหนดค่าทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มการจำลองการไหล ตรวจสอบผลการคำนวณโดยดูจากค่า  $\Delta P$  และค่าความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 8 แสดงรูปทรงท่อทางไหล (a) ทรงกลม (b) ทรงหอยคนน้ำ (c) ทรงหกเหลี่ยม

### 3.5 ขนาดและรูปร่างท่อทางไหล

การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด โดยทั่วไปจะออกแบบท่อทางไหลเป็นแบบทรงกลม แต่ในความเป็นจริงนั้นอาจจะพบท่อทางไหลที่มีรูปทรงชนิดอื่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงรูปทรงหอยคนน้ำ และรูปทรงหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยจะใช้สมการ Hydraulic diameter ( $D_h$ ) [4]



$$D_h = 4 \frac{A}{U} \tag{12}$$

โดย  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของรูปทรง,  $U$  คือความยาวเส้นรอบรูป ซึ่งจะคำนวณหาขนาดรูปร่างทั้ง 2 ชนิดที่มุมระหว่างท่อทางไหลกับช่องทางไหล ( $\theta$ ) เท่ากับ  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  โดยค่า  $D_h$  ของรูปทรงกลม รูปทรงหยดน้ำ และรูปทรงหกเหลี่ยม คือสมการที่ (13) ถึง (15) ตามลำดับ

$$D_h = 2r \tag{13}$$

$$D_h = \frac{2\pi r^2 + (4r^2/\tan\theta)}{\pi r + (2r/\sin\theta)} \tag{14}$$

$$D_h = \frac{8a^2 + (4a^2/\tan\theta)}{4a + (2a/\sin\theta)} \tag{15}$$

โดยที่  $r$  คือรัศมีของท่อทางไหล,  $a$  คือความหนาของท่อทางไหล,  $\theta$  คือมุมระหว่างท่อทางไหลกับช่องทางไหล ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบการไหลของท่อทางไหลที่มีขนาด  $D_h$  ที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่นการคำนวณหาขนาดรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งค่า  $D_h$  ของทรงกลมเท่ากับ  $17.64 \text{ mm}$ . และแทนค่า  $D_h$  ลงในสมการรูปทรงหยดน้ำ และกำหนดมุมในท่อทางไหลเท่ากับ  $45^\circ$  ลงในสมการ

ที่ (14) จะได้  $r = 10.24 \text{ mm}$ . ซึ่งเป็นขนาดรัศมีท่อทางไหลที่กึ่งกลางแม่พิมพ์ โดยได้แสดงค่าตัวแปรรูปทรงท่อทางไหลในแบบต่างๆ ในตารางที่ 1 โดยรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีด ให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีของท่อทางไหล  $R(I)$  และมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องทางไหล  $y(I)$  ตามสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ขั้นตอนต่อไปคือกำหนดการจำลองการไหลเหมือนกับท่อทางไหลรูปทรงกลมทุกขั้นตอน โดยผลจากการคำนวณค่า  $\Delta P$  ที่ได้ จากท่อทางไหลรูปทรงต่างๆ แสดงในรูปที่ 9 และ 10 และตารางที่ 2 โดยค่าความเร็วของไหลที่ทางออกของแม่พิมพ์อัดรีด แสดงในรูปที่ 11 และ ตารางที่ 3

**ตารางที่ 1** ตัวแปรรูปทรงท่อทางไหลในแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับท่อทางไหลทรงกลมที่  $r_0 = 8.82 \text{ mm}$ .

มุมระหว่างท่อทางไหลกับช่องทางไหล ( $\theta$ )	รัศมีท่อทางไหลแม่พิมพ์ทรงหยดน้ำ ( $r_0, \text{mm.}$ )	ความหนาท่อทางไหลทรงหกเหลี่ยม ( $a_0, \text{mm.}$ )
30	9.54	9.46
45	10.24	10.04
60	11.19	10.80

**ตารางที่ 2** แสดงค่าความดันตกคร่อมในแม่พิมพ์อัดรีดรูปร่างท่อทางไหลในแบบต่างๆ

รูปทรงกลม	รูปทรงหยดน้ำ			รูปทรงหกเหลี่ยม			
	มุม $30^\circ$	มุม $45^\circ$	มุม $60^\circ$	มุม $30^\circ$	มุม $45^\circ$	มุม $60^\circ$	
Pressure (MPa)	47.92	46.48	47.31	47.33	45.35	46.05	46.05
%pError		3.01%	1.27%	1.23%	5.36%	3.90%	3.90%

**ตารางที่ 3** แสดงค่าความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดรูปร่างท่อทางไหลในแบบต่างๆ

Exit velocity (mm/s)	รูปทรงกลม	รูปทรงหยดน้ำ			รูปทรงหกเหลี่ยม		
		มุม 30°	มุม 45°	มุม 60°	มุม 30°	มุม 45°	มุม 60°
$v_{center}$	9.17	7.93	8.56	8.65	7.26	7.84	7.98
%vError	11.1%	23.2%	17.1%	16.2%	29.7%	24.1%	22.7%

ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความดัน (% pError) หาได้จากสมการที่ (16)

$$\% pError = \left| \frac{\Delta P_{circular} - \Delta P_{other}}{\Delta P_{circular}} \right| \times 100\% \quad (16)$$

เมื่อ  $\Delta P_{circular}$  คือ ความดันตกคร่อมของรูปทรงกลม,  $\Delta P_{other}$  คือ ความดันตกคร่อมของรูปทรงหยดน้ำ หรือ ทรงหกเหลี่ยม

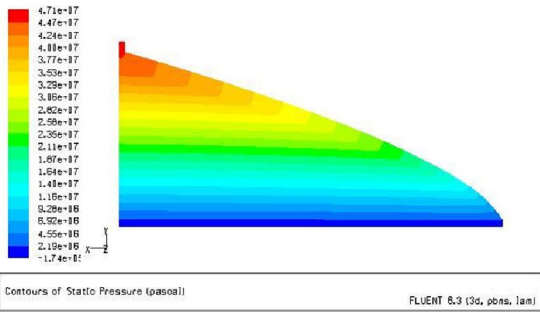
รูปที่ 11 แสดงค่าความเร็วที่ทางออกของแต่ละรูปร่างของท่อทางไหล มีค่าความเร็วที่เท่ากัน ( $v_{reference}$ ) คือ 10.32 mm/s อยู่ที่ตำแหน่ง 0.33 เมตร จากกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด โดยใช้เป็นค่าความเร็วอ้างอิง เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เทียบกับค่าความเร็วที่จุดกึ่งกลางแม่พิมพ์ ( $v_{center}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 3 และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็ว (%vError) หาได้จากสมการที่ (17)

$$\%vError = \left| \frac{v_{reference} - v_{center}}{v_{reference}} \right| \times 100\% \quad (17)$$

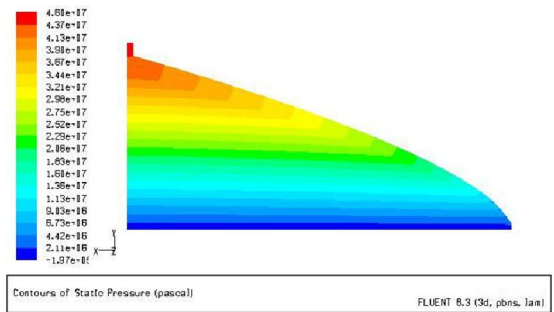
#### 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้จะพบว่า รูปร่างของท่อทางไหลที่มี Hydraulic diameter ( $D_h$ ) เดียวกันจะมีผลต่อค่าความดันตกคร่อมน้อยมากโดยการปรับเปลี่ยนรูปร่างทำให้มีค่าแตกต่างความดันไม่เกิน 6% แต่มุมภายในท่อทางไหลทำให้ความเร็วภายในแม่พิมพ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

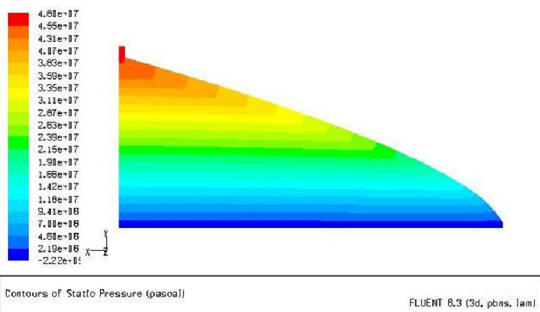
รูปร่างทรงกลมให้ค่าการกระจายตัวความเร็วที่ทางออกของแม่พิมพ์อัดรีดได้ดีที่สุดซึ่งไม่เกิน 12% ส่วนรูปร่างทรงหยดน้ำ 24% และรูปร่างหกเหลี่ยมมีค่าการกระจายตัวความเร็วที่ทางออกมากที่สุดที่ 30% เพราะฉะนั้นอาจจะใช้การติดตั้งโชกเกอร์บาร์ (Choker bar) เพื่อช่วยให้ของไหลมีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์อัดรีด [23] ส่วนมุมระหว่างท่อทางไหลกับช่องทางไหลก็มีส่วนทำให้การไหลออกจากท่อทางไหลได้ยากหรือง่ายเช่นกัน มุมที่ลาดมาก ๆ เช่น มุมที่ 60° จะทำให้การไหลดีกว่ามุม 45° และมุม 30° ตามลำดับ เนื่องจากวิธีการออกแบบที่เสนอไปแล้วนั้น เป็นผลที่ได้จากการจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในอนาคตถ้าสามารถสร้างขนาดแม่พิมพ์อัดรีดให้เท่ากับการจำลองการไหล และทำการทดสอบเพื่อที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหล ก็จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น



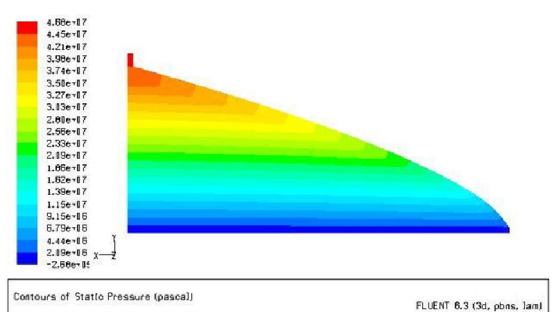
(ก)



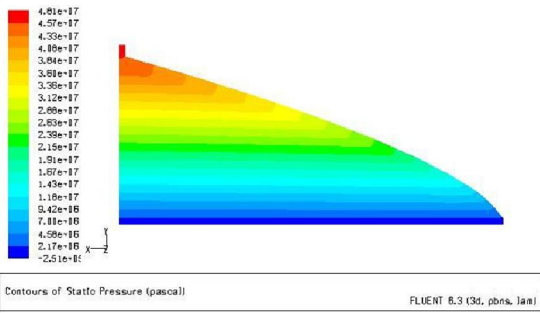
(ข)



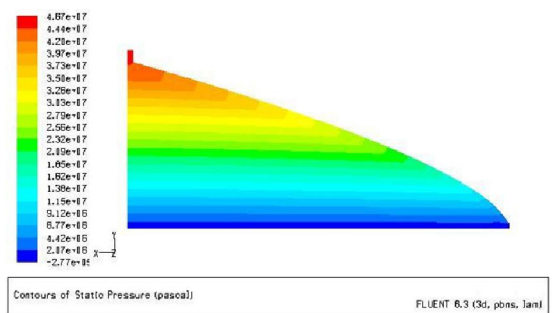
(ค)



(ง)



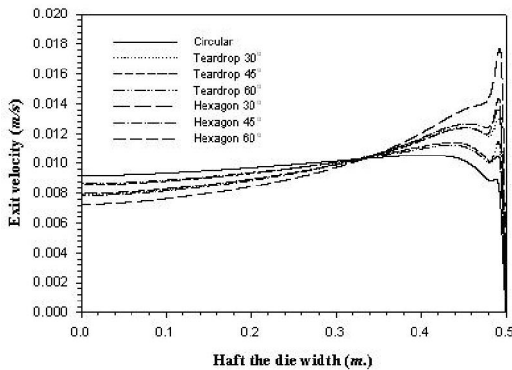
(ฉ)



(ช)

รูปที่ 9 แสดงค่าความดันในแม่พิมพ์อัดรีด ที่มีท่อทางไหลรูปทรงหยดน้ำ (ก) มุม 30° (ข) มุม 45° และ (ค) มุม 60°

รูปที่ 10 แสดงค่าความดันในแม่พิมพ์อัดรีด ที่มีท่อทางไหลรูปทรงหกเหลี่ยม (ก) มุม 30° (ข) มุม 45° และ (ค) มุม 60°



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทางออกแม่พิมพ์อัครีต รูปปร่างท่อทางไหลในแบบต่างๆ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการวิจัยแห่งชาติ : ยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ (RDG5050107) ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ที่ทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ และบริษัทคีส โตน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] C.I. Chung and D.T. Lohkamp, “Designing coat-hanger dies by power-law approximation”, *Modern Plastics* 3, 1976, pp. 52-55.

[2] Y. Matsubara, “Coat hanger die”, United States Patent, 4285655, August 1981.

[3] H. H. Winter and H. G. Fritz, “Design of dies for the extrusion of sheets and annular parisons: the distribution problem”, *Polymer Engineering & Science* 26, 1986, pp. 543-553.

[4] W. Michaeli “Extrusion dies for plastics and rubber”, Hanser Publishers, New York, 1992.

[5] T.J. Liu, L.D. Liu and J.D. Tsou, “A unified lubrication approach for the design of a coat-hanger die”, *Polymer Engineering & Science* 34, 1994, pp. 541-550.

[6] S. Y. Na and T. Lee, “Parametric study in design of coat-hanger die”, *The Korean Journal of Rheology* 10, 1998, pp.38-43.

[7] D. E. Smith and Q. Wang, “Optimization-based design of polymer sheeting dies using generalized Newtonian fluid models”, *Polymer Engineering & Science* 45, 2005, pp.953-965.

[8] C. Kolutawong and S. Arunworradirok, “A novel concept to design coathanger slit dies for plastic sheet manufacturing”, *The Journal of King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok* 15, 2005, pp. 39-46. (in Thai)

[9] S. Arunworradirok and C. Kolutawong, “Conceptual Design of Coathanger Die for plastic or elastomer sheet extrudate”, *The 19<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Phuket, Thailand, 2005, AMM004. (in Thai)

[10] S. Arunworradirok and C. Kolutawong. “Computer simulation of plastics film casting for coathanger die design”, *IE Network Conference 2007*, Phuket, Thailand. (in Thai)

- [11] S. Arunworradirok, "Parameter analysis for designing a coathanger die", Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2004. (in Thai)
- [12] S. Arunworradirok, and C. Kolutawong, "A slit die design for casting plastics sheets", Asian International Journal of Science in Production and Manufacturing Engineering 3 (1), 2010, pp. 35-45.
- [13] C. Kolutawong and S. Arunworradirok, "Computer simulation of plastics sheet and film to help slit die Design", KMUTT Research and Development 32 (1), 2009, pp. 3-22. (in Thai)
- [14] S. Leewuthinan, C. Kolutawong and W. Lertwimolnun, "Coat hanger die analysis for elastomer sheet extrusion", The 23<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai, Thailand, 2009. (in Thai)
- [15] S. Leewuthinan, "Flow analysis for designing coat hanger die for rubber sheets", Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2009. (in Thai)
- [16] M. Nagashima, T. Hasegawa and T. Narumi, "Flow behavior of Herschel-Bulkley fluid in a slot die", Journal of the Society of Rheology, Japan 34, 2006, pp. 213-221.
- [17] F. Hensen, "Plastics extrusion technology", 2<sup>nd</sup> Eds., Hanser Publishers, New York, 1997, p. 195.
- [18] J. E. Mark, B. Erman and F. R. Eirich, "Science and technology of rubber", Elsevier Academic Press, United States, 2005, pp. 237.
- [19] P. Subthema, C. Kolutawong, and W. Lertwimolnun, "Viscoelastic material constants for rubber tire compounds", Journal of Technical Education Development 84 (4), 2012, pp. 78-83. (in Thai)
- [20] P. Subthema, "Study of swell behavior of rubber melt flow through die", Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai)
- [21] R. Byron Bird, Warren e. Stewart, Edwin N. Lightfoot, "Transport phenomen", John Wiley & Son, New York, 1960.
- [22] Fluent 6.3 User's Guide, Fluent Inc., Centerra Resource Park, Lebanon, NH., 2006, pp. 8-35 to 8-41.
- [23] C. Rauwendaal, "Polymer Extrusion (4<sup>th</sup> Eds.)", Hanser Publishers, Munich, 2001, p. 549.
- [24] S. Leewuthinan, C. Kolutawong, and W. Lertwimolnun, "A Slit Die Design for Herschel-Bulkley Fluid", The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok 24 (2), 2014. (in Thai)