การจำลองสถานการณ์การอัดรีดยางคอมพาวด์แผ่นผ่านแม่พิมพ์

สุทธินันท์ ลีวุฒินันท์[1] ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์[2]* และ วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์เชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ของการอัดรีดยางคอมพาวด์ให้เป็นแผ่นผ่านแม่พิมพ์กับการทดสอบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ซึ่งในที่นี้วัสดุยางคอมพาวด์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแต่ยังไม่ถึงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้ยางสุก การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของการอัดรีดยางคอมพาวด์จะใช้แบบจำลอง 3 มิติ ที่อุณหภูมิ 79°C, 87°C และ 94°C โดยพิจารณาให้ยางคอมพาวด์มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าความดันที่เกิดภายในแม่พิมพ์อัดรีด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันเทียบกับการจำลองการอัดรีดมีค่าความแตกต่างกันไม่เกิน 26% หลังจากปรับปรุงแบบจำลองแล้ว

คำสำคัญ: แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ ของไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ การออกแบบแม่พิมพ์ ทดสอบแม่พิมพ์อัดรีด

[1] นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3] อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8315 อีเมล: ckw@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 29 ตุลาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 25 มิถุนายน 2557

Numerical Simulations of Rubber Compounds Extruded in a Slit Die

Suthinan Leewuthinan[1] Chanyut Kolitawong[2]* and Wiboon Lertwimolnun[3]

Abstract

The objective of this paper was to experimentally compare a coat hanger die designed for extrusion of rubber sheet compounds at 79°C, 87°C, and 94°C using computer simulations. In this research, by using a commercial computer program, we assumed that the rubber compound behaved like a Herschel-Bulkley fluid in 3D numerical simulations. The calculated results revealed comparable pressures at the pressure transducer locations with less than 26% difference for the improved simulation models.

Keywords: Coat Hanger Die, Herschel-Bulkley Fluid, Die Design for Rubber, Extrusion Die Experiment

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

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

3 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. 8315, E-mail: ckw@kmutnb.ac.th

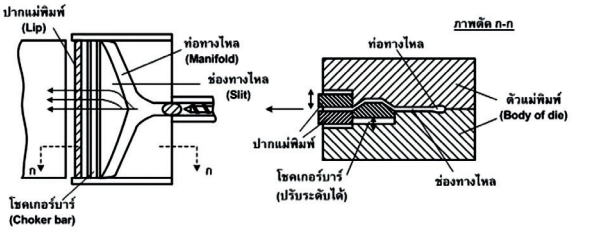
Received 29 October 2012; Accepted 25 June 2014

1. บทนำ

แม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้ลักษณะเป็นแผ่นที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 รูปแบบ คือ แม่พิมพ์รูปตัวที (T Dies) แม่พิมพ์รูปหางปลา (Fishtail Dies) และแม่พิมพ์ชนิดไม้แขวนเสื้อ (Coat-hanger Dies) แม่พิมพ์อัดรีดพลาสติกและยางคอมพาวด์แผ่นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือท่อทางไหล (Manifold) และช่องทางไหล (Slit) ท่อทางไหลทำหน้าที่ส่งวัสดุหลอมเหลวให้ทั่วถึงตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ส่วนช่องทางไหลจะทำหน้าที่ปรับแรงดันเพื่อทำให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแม่พิมพ์ ในกรณีที่ท่อทางไหลไม่สามารถกระจายวัสดุหลอมเหลวได้อย่างทั่วถึง เราอาจจะติดตั้งโชคเกอร์บาร์ (Choker Bar) เพื่อช่วยทำให้การกระจายตัวของวัสดุหลอมเหลวในแม่พิมพ์สม่ำเสมอขึ้น โดยเราสามารถปรับอัตราการไหลของวัสดุหลอมเหลวที่ไหลผ่านโชคเกอร์บาร์ได้ในตำแหน่งที่ต้องการ ความหนาของผลิตภัณฑ์แผ่นจะถูกกำหนดโดยขนาดความหนาของปากแม่พิมพ์ (Die Lips)

แม่พิมพ์อัดรีดรูปตัวที และแม่พิมพ์อัดรีดรูปหางปลานั้นเป็นแม่พิมพ์อัดรีดที่ออกแบบและผลิตได้ง่ายแต่จะมีข้อเสียคือ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราความเครียดเฉือน (Shear Rate) ตามแนวท่อทางไหลอย่างมาก ทำให้ความดันภายในท่อทางไหลบริเวณปลายท่อสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ ก่อให้เกิดการไหลของวัสดุบริเวณกลางแม่พิมพ์อัดรีดสูงกว่าบริเวณขอบทั้ง 2 ข้างของแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ (ดูรูปที่ 1) จะมีอัตราเค้นเฉือนภายในท่อทางไหลคงที่ ทำให้การไหลของพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่ดีกว่าแม่พิมพ์อัดรีดรูปตัวที และแม่พิมพ์อัดรีดรูปหางปลา [1]

ที่ผ่านมานักวิจัยออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโดยการวิเคราะห์หาตัวแปรไร้มิติของกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการหาสมการพื้นฐานของรูปร่างแม่พิมพ์ และทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ซึ่งได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ [2] กับการจำลองการอัดรีดในคอมพิวเตอร์ [3],[4] แต่ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเพาเวอร์ลอว์ [5] แต่ก็มีผู้ที่ศึกษาของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ (Herschel-Bulkley Fluid) เช่น สุทธินันท์ และคณะ [6]-[8] ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้กับยางคอมพาวด์ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ แต่ก็ยังไม่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบ ในขณะที่ Nagashima และคณะ [9] ได้ศึกษาการออกแบบช่องแม่พิมพ์ (Slot Die) ซึ่งให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ ให้ได้อัตราการไหลเท่ากันตลอดความกว้างแม่พิมพ์ เพื่อใช้สำหรับงานเคลือบผิวชิ้นงาน และในหนังสือของ Michaeli [1] กับงานเขียนของ White ในหนังสือของ Mark และคณะ [10] ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) มีพฤติกรรมการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ ซึ่ง Michaeli ได้ศึกษาวิเคราะห์หาค่าตัวแทนการไหลในท่อทางไหล กับในช่องทางไหลของการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดสำหรับผลิตยางแผ่นแต่ก็ไม่ได้กล่าวถึงการคำนวณรูปร่างและขนาดของแม่พิมพ์อัดรีด ซึ่งแน่นอนว่าการไหลของยางคอมพาวด์บางส่วนได้รับผลมาจากรูปทรงของสกรูและการตั้งค่าของเครื่องอัดรีด [11] และผลของการไหลผ่านแม่พิมพ์ย่อมส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางคอมพาวด์บวมพอง (Die Swell) หลังจากไหลผ่านออกมาจากแม่พิมพ์แล้ว [12],[13] เช่นกัน



รูปที่ 1 รูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อเปรียบเทียบกับการจำลองการอัดรีดด้วยคอมพิวเตอร์ของวัสดุยางคอมพาวด์ ที่อุณหภูมิ 79°C, 87°C และ 94°C โดยให้วัสดุมีพฤติกรรมการไหลแบบ

เฮอร์เชลบัล์กเลย์ เนื่องจากพฤติกรรมดังกล่าวเหมาะสมกับวัสดุยางคอมพาวด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางแผ่น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการกำกับการไหล

การไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์จะอธิบายได้ด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) [14], [15]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{v}) = 0 \qquad (1)$$

และสมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \bullet (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \bullet \underline{\underline{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \qquad (2)$$

โดย ρ คือค่าความหนาแน่นของวัสดุ $\underline{v}$ คือเวกเตอร์ความเร็วของวัสดุในแม่พิมพ์ $\underline{\underline{\tau}}$ คือค่าเทนเซอร์ของความเค้นเฉือน (Shear Stress) $\underline{F}$ คือเวกเตอร์ของแรงที่กระทำภายนอก โดยสมการแสดงพฤติกรรมของไหลเมื่อมีแรงกระทำให้ของไหลเปลี่ยนจากสภาวะเดิม (Constitutive Equation) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ [16],[17]

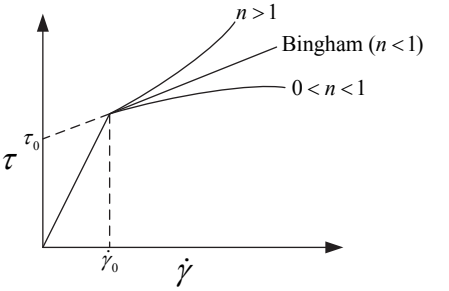
$$\underline{\underline{\tau}} = \underline{\underline{\tau}}_0 + \eta \underline{\underline{\dot{\gamma}}} \qquad (3)$$

โดยที่ η คือค่าความหนืดของของไหลแบบนอน-นิวทอเนียน (Non-newtonian Fluids) $\underline{\underline{\tau}}_0$ คือเทนเซอร์ความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield Stress Tensor) และ

$$\underline{\underline{\dot{\gamma}}} = (\nabla \underline{v}) + (\nabla \underline{v})^T \qquad (4)$$

คือค่าเทนเซอร์ของอัตราความเครียด โดยสมการที่ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในปริมาณที่มีแต่ขนาด ไม่มีทิศทาง (Scalar Quantity) ได้คือ [1]

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \text{เมื่อ } \tau \geq \tau_0 \qquad (5)$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและค่าอัตราความเครียดเฉือน

$$\dot{\gamma} = 0 \qquad \text{เมื่อ } \tau \leq \tau_0 \qquad (6)$$

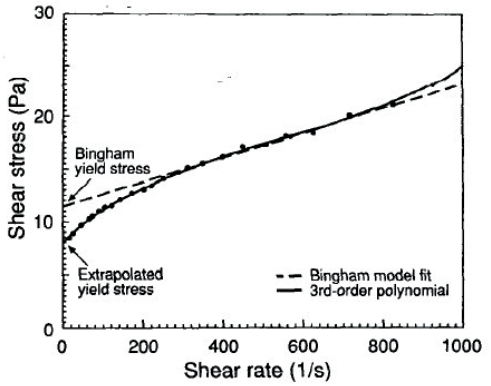
เมื่อ k คือค่าดัชนีคอนซิสเทนซี่ (Consistency Index) n คือค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law Index) $\boldsymbol{\tau_0}$ คือค่าคงที่ความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield Stress) และสเกลาของอัตราความเครียด $\dot{\gamma}$ เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่อันดับที่ 2 ของเทนเซอร์ของอัตราความเครียด (Second invariant of $\underline{\underline{\dot{\gamma}}}$)

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\underline{\underline{\dot{\gamma}}} : \underline{\underline{\dot{\gamma}}}\right)} \qquad (7)$$

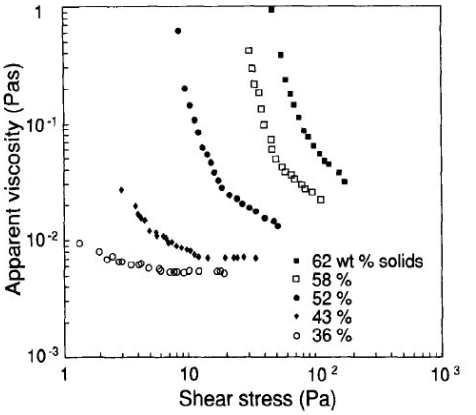
โดยการคิดคำนวณใน Fluent V.6.3 [18] ที่อัตราเฉือนต่ำๆ ($\dot{\gamma} < \tau_0/\mu_0$) ความหนืดมีพฤติกรรมเป็นดั่งของแข็งกล่าวคือมีค่าความหนืดเริ่มต้นที่มาก (Yielding Viscosity, μ_0) ในหลักการแล้วเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้นจนมีค่าความเค้นเกินค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น τ_0 ความหนืดจึงจะมีพฤติกรรมการไหลตามกำลังของค่า n นั่นคือ

$$\eta = \frac{\tau_0 + k\left[\dot{\gamma}^n - (\tau_0/\mu_0)^n\right]}{\dot{\gamma}} \qquad (8)$$

โดยรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (8) เมื่อคุณสมบัติของวัสดุกำหนดด้วยค่า n คือ $n = 1$ ค่าความหนืดวัสดุแบบบิงแฮม (Bingham Fluid) $n > 1$ ค่าความหนืดวัสดุแบบ Shear Thickening และ $n < 1$ ค่าความหนืดวัสดุแบบ Shear Thinning



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความเครียดเฉือนกับค่าความเค้นเฉือน [20]



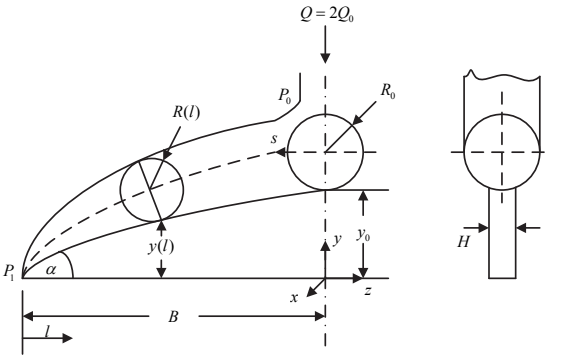
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความหนืดปรากฏ [20]

2.2 ความเค้นเฉือนเริ่มต้น

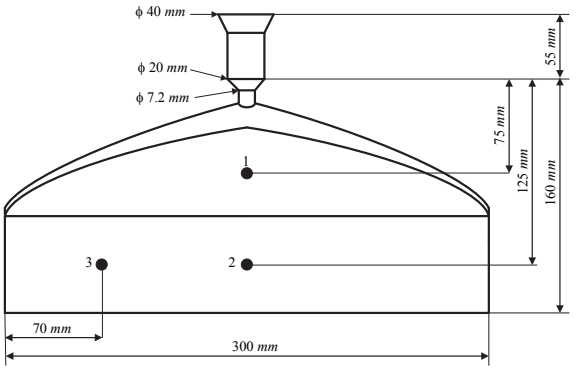
เนื่องจากสมการการไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์นั้นเป็นสมการที่มีตัวแปร 3 ตัว คือค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (Yield Stress, τ_0) ค่าดัชนีคอนซิสเทนซี่ (Consistency Index, k) และค่าดัชนีชี้กำลัง (Power-law Index, n) ซึ่งได้มีผู้ศึกษาวิจัยทำการหาค่าความเค้นเริ่มต้น เช่น Kim, S. [19] กับผลงานของ Nguyen และคณะ [20] ได้กล่าวถึงวิธีทางอ้อม (Indirect Method) ในการหาค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น โดยใช้การประมาณค่าความเค้นเฉือนจากผลการทดลองที่อัตราความเครียดเฉือนเป็นศูนย์ และบางทีอาจจะหาโดยใช้ Extrapolation จากกราฟ หรือจากการคำนวณ หรือการทาบเส้นกราฟ (Fit Curve) จากรูปแบบการไหลของของไหลชนิดต่างๆ (Rheological Model) ที่มีค่าตัวแปรความเค้นเฉือนเริ่มต้นอยู่ในรูปแบบของไหลต่างๆ เหล่านั้นโดยได้แสดงการหาจากรูปแบบของไหลที่มีพฤติกรรมแบบบิงแฮม (Bingham) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่ง Nguyen และคณะ [20] ได้กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity) กับค่าความเค้นเฉือนที่ขอบเขตความเค้นเฉือนต่ำๆ ค่าความหนืดปรากฏมีแนวโน้มที่จะไม่สิ้นสุด (Infinity) ดังรูปที่ 4

3. การทดสอบแม่พิมพ์อัดรีด

ขนาดและรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่ง Arunworradirok และ Kolitawong [21]-[23] ได้ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับของไหลชนิดเพาเวอร์ลอว์โดยประยุกต์สมการการออกแบบของ Wortberg และ Kirchner ซึ่งแสดงในหนังสือของ Michaeli ต่อมา สุทธินันท์ และชาญยุทธ [24] ได้ปรับปรุงสำหรับการอัดรีดสำหรับของไหลแบบเฮอร์เชลบัล์กเลย์ โดยคิดว่ารูปทรงของแม่พิมพ์อัดรีดมีความสมดุลทางด้านซ้ายและขวา (Symmetry) ทำให้สามารถพิจารณารูปร่างเพียงแค่ครึ่งซีกของแม่พิมพ์ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของของไหลทั้งหมดเท่ากับ Q และอัตราการไหลครึ่งหนึ่งของของไหลเท่ากับ Q_0 ซึ่งอัตราการไหลในท่อทางไหล (Q_R) คือ



รูปที่ 5 รูปร่างและตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ



รูปที่ 6 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดความดันที่แม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อ

$$Q_R(l) = \frac{l}{B} Q_0 \tag{9}$$

และอัตราการไหลในช่องทางไหล (Q_S) คือ

$$Q_S = Q_0 \tag{10}$$

จากสมมติฐานที่ให้ตัวแทนความเครียดเฉือนในท่อทางไหลคงที่ทำให้รูปร่างของการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีท่อทางไหล $R(l)$ คือ

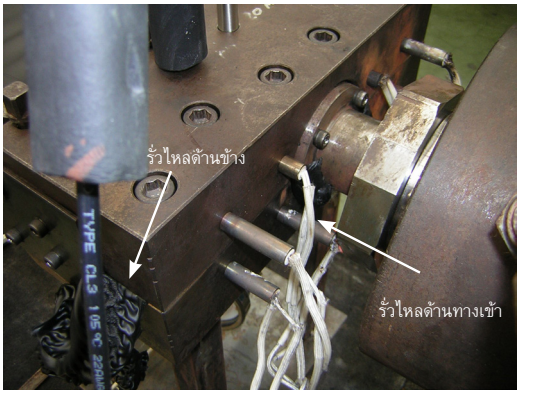
$$R(l) = R_0 \left(\frac{l}{B} \right)^{1/3} \tag{11}$$

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

$$y(l) = y_0 \left(\frac{l}{B} \right)^{2/3} \tag{12}$$

โดยที่ y_0 คือความยาวของช่องทางไหลบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์อัดรีด ในที่นี้แม่พิมพ์มีขนาดความหนา $H = 0.001\ m.$ และความกว้างครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์

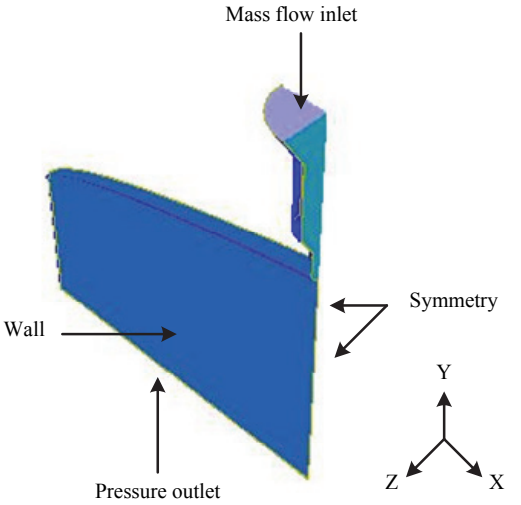
(ก)



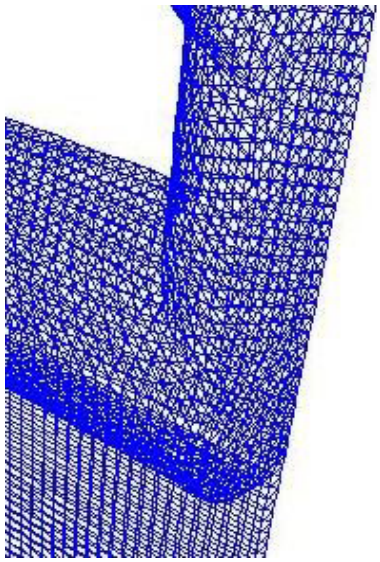
(ข)

รูปที่ 7 (ก) การทดสอบแม่พิมพ์อัดรีดและ (ข) การรั่วไหลของยางออกทางด้านข้างและทางเข้าของแม่พิมพ์

$B = 0.15\ m.$ มีค่ารัศมีท่อทางไหลที่บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ $R_0 = 4.1\ mm.$ และได้ติดตั้งเครื่องมือวัดความดัน (Pressure Transducer) ในตำแหน่งดังรูปที่ 6 โดยทดสอบแม่พิมพ์อัดรีดยางคอมพาวด์แผ่นที่ยังไม่สุก ที่อุณหภูมิวัสดุเท่ากับ 79°C, 87°C และ 94°C ที่อัตราการผลิตเท่ากับ 15.22 *g/s*, 15.27 *g/s* และ 15.47 *g/s* ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการทดสอบอัดรีดยางแผ่นได้แสดงดังรูปที่ 7 โดยในขณะที่ทำการทดสอบอัดรีดมียางคอมพาวด์บางส่วนรั่วไหลออกจากแม่พิมพ์บริเวณทางเข้าและด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และ 7 (ข) ส่วนผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบอัดรีดแสดงในตารางที่ 2-4 ภายหลังการทดสอบ



รูปที่ 8 รูปร่างของแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ทดสอบการไหลที่ไม่มีการรั่วไหลของวัสดุ



รูปที่ 9 Mesh ที่กำหนดในแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีด

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบแม่พิมพ์ดูพบว่าวัสดุที่ไหลออกด้านข้างเกิดจากการยึดแผ่นเหล็กด้านข้างแม่พิมพ์ไม่แน่นหนาพอ ส่วนบริเวณทางเข้าก็มีช่องระหว่างหน้าประกบแม่พิมพ์ด้านบนและด้านล่าง

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรคุณสมบัติของวัสดุยางคอมพาวด์ที่อุณหภูมิ 79°C, 87°C และ 94°C

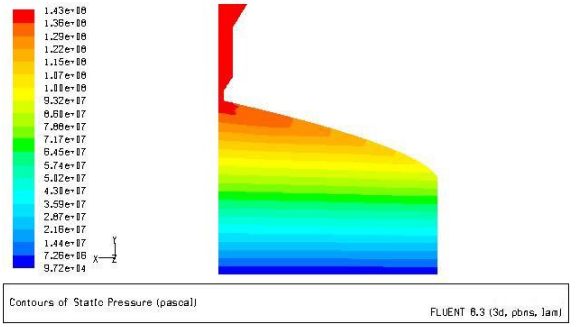
T (°C)	τ_0 (Pa)	k ($Pa \cdot s$)^n	n
79	17,800	126,340	0.2360
87	8,700	126,340	0.2300
94	6,900	126,340	0.2210

4. การจำลองการอัดรีดแม่พิมพ์อัดรีด

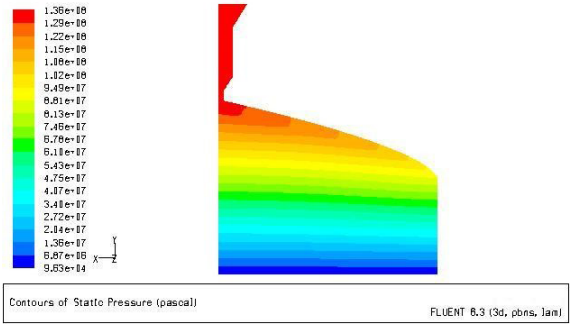
แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการไหลในงานวิจัยนี้จะสร้างขึ้นจากรูปร่างของแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในการอัดรีดวัสดุยางคอมพาวด์ชนิด B (มีส่วนประกอบ EPDM 32% Carbon 10% แป้ง (Powder) 48% และอื่น 10%) ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองการอัดรีดที่อุณหภูมิ 79°C, 87°C และ 94°C แสดงในตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ ρ = 1287 kg/m^3 และเลือกใช้ค่า $\mu_0 = 1.0 \times 10^6\ Pa \cdot s$ ซึ่งสูงกว่าค่า k ของวัสดุประมาณ 10 เท่าเพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของวัสดุยางที่วัดได้ โดยรูปร่างของแบบจำลองแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้การทดสอบการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 8

เนื่องจากรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีดมีความสมมาตรใน 2 ระนาบ (ระนาบ XY และ YZ) ดังนั้นในการสร้างแบบ จำลองก็จะสร้างแค่เพียง 1 ใน 4 ของรูปร่างแม่พิมพ์อัดรีด ในที่นี้ได้สร้างแบบจำลองโดยเลือกใช้ Mesh 2 ชนิด คือทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) และทรงเหลี่ยมหกหน้า (Hexahedral) โดยขนาดของ Mesh จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.0005 m. เท่ากันทั้งสองชนิด และมีจำนวน Mesh เท่ากับ 473,941 Element ดังแสดงในรูปที่ 9

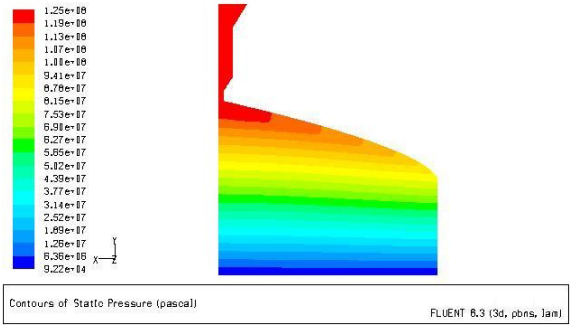
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ให้กับแบบจำลอง โดยกำหนดให้อัตราการไหลของมวลที่ทางเข้าเท่ากับอัตราการผลิตที่ 15.22 g/s, 15.27 g/s และ 15.47 g/s ที่อุณหภูมิวัสดุเท่ากับ 79°C, 87°C และ 94°C และบริเวณทางออกกำหนดให้มีค่าความดันคงที่เท่ากับ 0 Pa (ความดันบรรยากาศ) และกำหนดให้พื้นผิวที่เหลืออยู่เป็นผนังที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวมานั้นแสดงในรูปที่ 8 เมื่อกำหนดค่าทุกอย่าง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 10 ค่าความดันภายในแม่พิมพ์อัดรีดที่*ไม่มี*การรั่วไหลของยางคอมพาวด์ (ก) 79°C (ข) 87°C และ (ค) 94°C

เรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มการจำลองการอัดรีดในแต่ละอุณหภูมิ ค่าความดันในแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 10 และตรวจสอบผลการคำนวณโดยดูจากค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดความดันดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความดันในแม่พิมพ์อัดรีดระหว่างการทดสอบกับการจำลองการอัดรีดที่อุณหภูมิ 79°C

ตำแหน่งที่	การทดลอง (*MPa*)	*มีการรั่วไหล*		*ไม่มีการรั่วไหล*	
		โปรแกรม (*MPa*)	%Error	โปรแกรม (*MPa*)	%Error
1	9.29	10.48	12.81	105.71	1037.9
2	6.46	4.93	23.68	48.70	653.9
3	6.89	5.54	19.59	50.36	630.9

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความดันในแม่พิมพ์อัดรีดระหว่างการทดสอบกับการจำลองการอัดรีดที่อุณหภูมิ 87°C

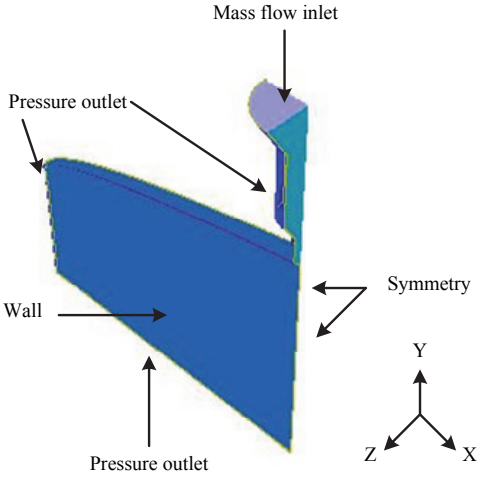
ตำแหน่งที่	การทดลอง (*MPa*)	*มีการรั่วไหล*		*ไม่มีการรั่วไหล*	
		โปรแกรม (*MPa*)	%Error	โปรแกรม (*MPa*)	%Error
1	8.50	10.22	20.24	100.24	1079.3
2	6.10	4.89	19.84	46.07	655.9
3	6.69	5.79	13.45	48.32	622.3

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าความดันในแม่พิมพ์อัดรีดระหว่างการทดสอบกับการจำลองการอัดรีดที่อุณหภูมิ 94°C

ตำแหน่งที่	การทดลอง (*MPa*)	*มีการรั่วไหล*		*ไม่มีการรั่วไหล*	
		โปรแกรม (*MPa*)	%Error	โปรแกรม (*MPa*)	%Error
1	8.00	9.15	14.38	95.06	1088.3
2	5.79	4.33	25.22	43.77	656.0
3	6.23	4.83	22.47	46.26	642.5

6. ผลที่ได้จากการจำลองการอัดรีด

ผลการจำลองสถานการณ์อัดรีดที่ได้จากสมมุติฐานที่แม่พิมพ์อัดรีดไม่มีการรั่วไหลมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงมากเนื่องจากในการทดสอบจริงมีการรั่วไหลของวัสดุยางออกจากแม่พิมพ์ที่ด้านทางเข้าและด้านข้างดังแสดง



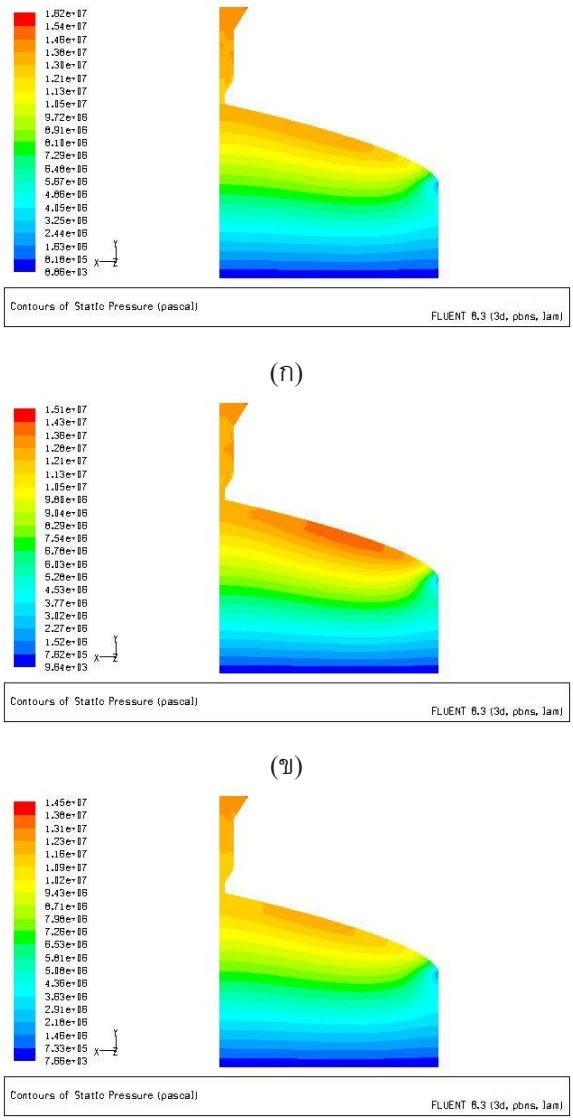
รูปที่ 11 รูปร่างของแบบจำลอง และเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ทดสอบการไหลที่มีการรั่วไหลของวัสดุ

ในรูปที่ 7 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการจำลองการอัดรีดใหม่ โดยกำหนดให้มีการรั่วไหลที่ด้านข้างเท่ากับ 0.5 mm^2 และที่ทางเข้าเท่ากับ 0.24 mm^2 เนื่องจากในการสร้างแบบจำลองการอัดรีดมีความสมมาตรในระนาบ XY ดังนั้นจึงกำหนดให้จุดรั่วไหลของการจำลองการอัดรีดเท่ากับ 0.25 mm^2 และ 0.12 mm^2 ตามลำดับ โดยเงื่อนไขขอบเขตจะแสดงในรูปที่ 11 โดยผลค่าความดันในแม่พิมพ์ที่มีการรั่วไหลของวัสดุแสดงในรูปที่ 12 และแสดงผลในตารางที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าเส้นแสดงเฉดสีของความดันในแม่พิมพ์ที่มีการรั่วไหล (รูปที่ 12) จะบิดเบี้ยวในขณะที่เส้นเฉดสีของความดันในแม่พิมพ์ที่ไม่มีการรั่วไหล (รูปที่ 10) จะเป็นเส้นตรงในแนวระนาบ

ค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) ในการจำลองสถานะการณ์อัดรีดเปรียบเทียบกับการทดสอบหาได้จาก

$$\%Error = \left| \frac{\Delta P_{Exp} - \Delta P_{Sim}}{\Delta P_{Exp}} \right| \cdot 100\% \qquad (13)$$

โดยที่ ΔP_{Exp} คือค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน ΔP_{Sim} คือค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันในการจำลองการอัดรีด



รูปที่ 12 ค่าความดันภายในแม่พิมพ์อัดรีดที่มีการรั่วไหลของยางคอมพาวด์ (ก) 79°C (ข) 87°C และ (ค) 94°C

7. สรุป

ในการทดสอบแม่พิมพ์อัดรีดชนิดไม้แขวนเสื้อเพื่อผลิตยางแผ่นเปรียบเทียบกับการจำลองการอัดรีดโดยใช้โปรแกรมนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 26%

หลังจากที่ปรับปรุงแบบจำลองสถาณการณ์ให้มีการรั่วไหลของวัสดุเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการกำหนดให้วัสดุมีอุณหภูมิคงที่และขนาดของจุดรั่วไหลของวัสดุอาจจะไม่ตรงกับการทดสอบจริงนัก ดังนั้นในอนาคตถ้าสามารถสร้างขนาดแม่พิมพ์อัดรีดไม่ให้มีการรั่วไหลและทำการจำลองโดยให้ค่าอุณหภูมิของวัสดุไม่คงที่ เช่น มีการให้ฟลักส์ของความร้อนแบบเส้น (Line Heat Sources) ให้สอดคล้องกับแท่งให้ความร้อนที่ใช้จริง แทนการสมมุติว่าแม่พิมพ์ควบคุมอุณหภูมิคงที่เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการอัดรีดก็จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และน่าจะมีการทดสอบสมบัติของวัสดุบริเวณผนังว่ามีการลื่นไหลด้วยหรือไม่

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่สัญญา RDG5050107 ที่สนับสนุนทุนวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย ที่ทดสอบหาค่าสมบัติของวัสดุ และบริษัท แวดด้าแพด จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบแม่พิมพ์อัดรีด

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, New York: Hanser Publishers, 1992.

[2] C. Kolitawong and S. Arunworradirok, "A Novel Concept to Design Coathanger Slit Dies for Plastic Sheet Manufacturing," *J. of KMITNB*, vol.15, pp.39-46, 2005.

[3] S. Arunworradirok and C. Kolitawong, "Computer Simulation of Plastics Film Casting for Coathanger Die Design," *IE Newwork Conference 2007*, Phuket, Thailand, 2007.

[4] C. Kolitawong 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.

[5] Supat Arunworradirok, "Parameter Analysis for Designing a Coathanger Die," Master Thesis, Dept. of Mech. Eng., King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2004.

[6] S. Leewuthinan, C. Kolitawong, and W. Lertwimolnun, "Coat Hanger Die Analysis for Elastomer Sheet Extrusion," *The 23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Changmai, Thailand, 2009.

[7] S. Leewuthinan, "Flow Analysis for Designing Coat Hanger Die for Rubber Sheets," Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2009.

[8] S. Leewuthinan, C. Kolitawong, and W. Lertwimolnun, "Effects of Manifold Shapes in a Slit Die," *The Journal of Industrial Technology*, KMUTNB, vol. 10, no. 1, January-April 2014 (in Thai).

[9] 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.

[10] J. E. Mark, B. Erman, and F. R. Eirich, *Science and Technology of RUBBER*, United States: Elsevier Academic Press, pp. 237, 2005.

[11] W. Lertwimolnun and B. Vergnes, "Influence of Screw Profile and Extrusion Conditions on the Microstructure of Polypropylene/Organoclay Nanocomposites," *Polymer Engineering and Science*, pp. 2100-2109, 2007.

[12] P. Subthema, C. Kolitawong, and W. Lertwimolnun, "Viscoelastic Material Constants for Rubber Tire

Compounds," *Journal of Technical Education Development*, vol.84, no.4, pp. 78-83, 2012.

[13] Pornthep 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.

[14] J.-F. Agassant et al., *Polymer Processing Principles and Modeling*, New York: Hanser Publishers, 1991.

[15] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, New York: John Wiley & Sons. 1960.

[16] R. Byron, Bird, Robert C. Armstrong, and Ole Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids*, vol. 1, 2nd Eds., New York: John Wiley & Sons, 1987.

[17] G. Donald Baird and I. Dimitris Collias, *Polymer Processing Principles and Design*, New York: Butterworth-Heinemann, 1995.

[18] *Fluent 6.3 User's Guide*, Fluent Inc., Centerra Resource Park, Lebanon, NH., 2006, pp. 8-35 to 8-41.

[19] S. Kim, "A Study of Non-Newtonian Viscosity and Yield Stress of Blood in a Scanning Capillary-Tube Rheometer," Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Drexel University, 2002.

[20] Q. D. Nguyen and D. V Boger, "Measuring the Flow Properties of Yield Stress Fluids," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol.24, pp. 47-88, 1992.

[21] S. Arunworradirok and C. Kolitawong "Conceptual Design of Coathanger Die for Plastic or Elastomer Sheet Extrudate," *The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Phuket, Thailand, 2005.

[22] S. Arunworradirok and C. Kolitawong "A Novel Scheme for Designing Coat-Hanger Slit Dies," *Commemorative International Conference on the Occasion of the 4th Cycle Celebration of KMUTT (SDSE 2008)*, Bangkok, Thailand, 2009, pp. 735-742.

[23] S. Arunworradirok and C. Kolitawong, "A slit die design for casting plastics sheets," *International Journal of Applied Science and Technology* (Previously AIJSTPME), vol.3(1), pp. 35-45, 2010.

[24] S. Leewuthinan, C. Kolitawong and W. Lertwimolnun, "A Slit Die Design for Herschel-Bulkley Fluid," *J. of KMUTNB*, vol. 24, no. 2, pp. 287-297, May-August 2014 (in Thai).