

# ผลกระทบของมุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อคุณภาพ เส้นลวดอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 4043

Effect of die approach angle and drawing speed on the quality  
of 4043 aluminum alloy wire

ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ<sup>1</sup> และ ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ<sup>2\*</sup>

Bhadpiroon Watcharasresomroeng<sup>1</sup> and Natthasak Pornputsiri<sup>2\*</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าแม่พิมพ์และความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อคุณภาพเส้นลวดอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 4043 ซึ่งงานเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ถูกทดลองด้วยการดึงผ่านดายที่มีขนาดมุมไหลเข้าต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 16°, 18° และ 20° อินเสิร์ตดายทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO) และถูกสวมอัดเข้ากับแม่พิมพ์ส่วนนอกทำจากวัสดุเกรด D2 (AISI) โดยการออกแบบกำหนดให้ลักษณะของดายเป็นไปตามมาตรฐาน ISO2084 ค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ศึกษามี 3 ระดับ คือ 0.10, 0.25 และ 0.40 เมตร/วินาที ขณะทำการดึงขึ้นรูปใช้สารหล่อลื่นชนิด Renoform MZA30 เพื่อให้ได้เส้นลวดสำเร็จขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 มิลลิเมตร โดยในการดำเนินการวิจัยจะเป็นลักษณะของการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 3<sup>2</sup> ซึ่งผลการทดลองพบว่าแรงดึงขึ้นรูปแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าแม่พิมพ์แต่แปรผกผันกับความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวด การดึงขึ้นรูปขึ้นงานเริ่มต้นผ่านดายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็กกว่าจะทำให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของเส้นลวดสำเร็จดีกว่าการดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ ในขณะที่การดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรแบบรีตันแดนด์ทำให้เกิดความเค้นตกค้างในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้เส้นลวดสำเร็จมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกับการดึงขึ้นรูปลวดที่ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง

**คำสำคัญ:** กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด, มุมไหลเข้าแม่พิมพ์, ความเร็วในการดึงขึ้นรูป, เส้นลวดอะลูมิเนียม

## Abstract

The purpose of this research is to study the effects of the die approach angle size and the drawing speed on the quality of 4043 aluminum alloy wire. Initial specimens, with a diameter of 2.0 millimeters, were tested by drawing through the dies with 3 different die approach angle sizes: 16°, 18°, and 20°. The insert die was made of tungsten carbide grade K20 (ISO) and inserted into the casing draw made of material graded D2 (AISI). The design defined that the die characteristic conformed to the ISO2084 standard. The drawing speed values studied were in 3 levels: 0.10,

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

<sup>1</sup> Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvamabhum

<sup>2</sup> คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

<sup>2</sup> Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

\* Corresponding author. E-mail: natthasak.por@mutr.ac.th

0.25 and 0.40 meter/second. While forming, Renoform MZA30 lubricant was used to obtain a finished wire diameter of 1.9 millimeters. In the conducting research, it was the application of experimental design by  $3^2$  full factorial experiment. The results showed that the drawing force was proportional to the die approach angle but inversely proportional to the drawing speed. Drawing an initial workpiece through a die with a smaller die approach angle yields a better mean surface roughness of the finished wire than drawing through a die with a large die approach angle. Drawing through a die with a large die approached angle results in redundant plastic deformation which increased residual stress in the wire, thereby increasing the strength of the finished wire, especially for wire drawings that use high drawing speed.

**Keywords:** wire drawing process, die approach angle, drawing speed, aluminum wire

### บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์เส้นลวดได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องด้วยเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งการผลิตเส้นลวดชนิดหน้าตัดกลมหรือลักษณะใด ๆ โดยส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการดึงขึ้นรูปลวด (wire drawing process) เพราะเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูงสามารถใช้กับการผลิตเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (10-20 ไมโครเมตร) ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ (12-15 มิลลิเมตร) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากเส้นลวดถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ทำให้เกิดการแข่งขันเพื่อพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคการผลิตเส้นลวดเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง (Viktor, 2010)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวด วัตถุดิบเริ่มต้นโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่ง (rod) ซึ่งได้จากการกระบวนการรีดขึ้นรูปร้อน (hot rolling) แล้วนำมาดึงขึ้นรูปโดยกระบวนการดึงขึ้นรูปแบบเย็น (cold drawing) ผ่านดายสำหรับการดึงขึ้นรูป (drawing die) ที่มีการเคลือบผิวแข็งเพื่อให้ทนทานต่อการสึกหรอ

และมีการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อควบคุมขนาดและคุณภาพผิว รวมทั้งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นลวดสำเร็จ ทั้งนี้ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดที่มีอัตราส่วนการลดรูปสูงจะส่งผลให้เกิดความร้อนสัมผัสสูง จากแรงเสียดทานบนพื้นผิวสัมผัสระหว่างผิวเส้นลวดและผิวแม่พิมพ์ (Hafis, Ridzuan, Rahayu Mohamed, Farahana, & Syahrullail, 2013) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการดึงขึ้นรูปลวดของ (Haddi, Imad, & Vega, 2001) แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดึงลวดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ สมบัติทางกลของวัตถุดิบ ลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์ (มุมไหลเข้าของดายและความยาวของส่วนการลดขนาด) และเงื่อนไขของกระบวนการดึงขึ้นรูปลวด (ความเร็วในการดึง ชนิดของสารหล่อลื่น และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานบนหน้าสัมผัสของเส้นลวดและแม่พิมพ์) ในระหว่างการดึงขึ้นรูปลวดจะเกิดแรงเสียดทานซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันจากการเปลี่ยนรูปถาวร ส่งผลให้ชิ้นงานที่บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับแรงในการดึงขึ้นรูปโดยขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวลวดและผิวแม่พิมพ์ (El-Domiaty, &

Kassab, 1998) และจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์ (Vega, Haddi, & Imad, 2009b) นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อขนาดของแรงเสียดทานบนพื้นผิวสัมผัสและทำให้ลวดมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ นักวิจัยบางส่วนได้ทำการศึกษาดทดลองและพิสูจน์ให้เห็นว่าอุณหภูมิขณะดึงขึ้นรูปส่งผลต่อสภาพการหล่อลื่น อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ รวมถึงคุณภาพผิวและสมบัติทางกลของเส้นลวดสำเร็จ สาเหตุสำคัญที่ส่งต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเส้นลวดเกิดจากลักษณะรูปร่างของตาย เนื่องจากการดึงขึ้นรูปและอัตราการระบายความร้อนที่ขาดประสิทธิภาพ (Pilarczyk, Markowski, Dyja, & Golis, 2004) นอกจากนี้มีงานวิจัยส่วนหนึ่งศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการหล่อลื่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดที่ได้รับผลกระทบจากการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปโดยวิธีการทดลอง (Suliga, 2017) และในทางทฤษฎี (Celentano et al., 2009) รวมทั้งการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาสถานะความเค้นและปัญหาการหล่อลื่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวด ดัง (Figure 1)

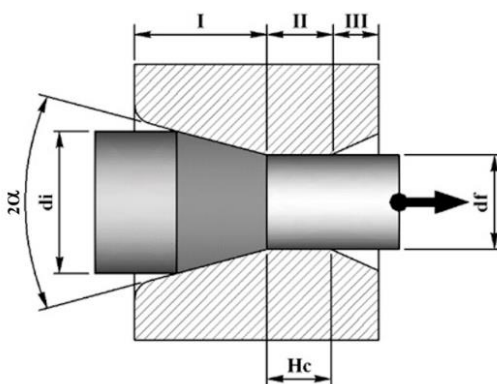


Figure 1 Schematic illustration of the internal longitudinal section structure of the wire die.

รายละเอียดลักษณะของตายเพื่อการดึงขึ้นรูปลวด (Figure 1) ประกอบไปด้วย (I) ส่วนทางเข้า (entrance zone) หรือส่วนการเปลี่ยนรูป (deformation zone) (II) ส่วนการควบคุมขนาด (bearing zone) และ (III) ส่วนทางออก (exit zone) ซึ่งในกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรกับเนื้อวัสดุมากที่สุดบริเวณของมุมไหลเข้าของตาย (die approach angle) ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย มีขนาดมุมลาดเอียงซึ่งจะแทนด้วย  $\alpha$  ทั้งนี้การกำหนดขนาดมุมไหลเข้าที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการดึงขึ้นรูป ทำให้ได้เส้นลวดที่มีขนาดถูกต้อง มีพื้นผิวที่สวยงามและไม่เกิดการฉีกขาดหรือเสียหายระหว่างการดึงขึ้นรูป เนื่องจากขนาดของแรงดึงขึ้นรูปมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นผิวสัมผัสบริเวณมุมไหลเข้าของตายและอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Lin, Hsu, & Keh, 2008) หากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงเกินไปก็จะส่งผลให้เส้นลวดเกิดการฉีกขาดได้ง่าย จากข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวจึงมีนักวิจัยทำการศึกษาดัวแปรข้างต้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากการใช้ลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดึงขึ้นรูปและคุณภาพผิวของเส้นลวดสำเร็จ (Pilarczyk, Markowski, Dyja, & Golis, 2004; Vega, Haddi, & Imad, 2009a; Viktor, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่า การกำหนดค่าความเร็วเพื่อการดึงขึ้นรูป (drawing speed) ยังส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดึงขึ้นรูปและคุณภาพผิวเส้นลวดสำเร็จเช่นเดียวกัน รวมถึงเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเค้นของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลกระทบในการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์และเงื่อนไขของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดึงขึ้นรูปและคุณภาพผิวของเส้นลวดอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 4043 ซึ่งนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นอะลูมิเนียมผสมชนิดที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยทั่วไปจะถูกใช้เป็นตัวเติมสำหรับการเชื่อมขึ้นรูปอะลูมิเนียม ด้วยการออกแบบด้ายให้มีขนาดมุมไหลเข้าต่างกัน 3 ระดับ คือ  $16^\circ$ ,  $18^\circ$  และ  $20^\circ$  และกำหนดค่าความเร็วในการดึงลวดที่ 3 ระดับ คือ 0.10, 0.25 และ 0.40 เมตร/วินาที ใช้สารหล่อลื่นชนิด Renoform MZA30 ช่วยในการดึงขึ้นรูป ทำการเก็บข้อมูลเพื่อการประเมินผลและวิเคราะห์ผลจากขนาดแรงดึงขึ้นรูป ค่าความหยาบผิว และสมบัติทางกลของเส้นลวดสำเร็จ เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ใน

อุตสาหกรรมการผลิตเส้นลวดโลหะและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทางปฏิบัติต่อไป

### การวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปลวด

การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรจากการดึงขึ้นรูปลวดใช้วิธีสมดุลแรงหรือวิธีสแลบ (slab method) โดยการวิเคราะห์จะแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วยย่อยหรือชิ้นบาง ๆ ที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่า 2 เท่าและสมมติให้แต่ละส่วนมีการกระจายของความเค้นในลักษณะของความเค้นระนาบ โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวรวัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอ (homogeneous deformation)
2. ค่าความเสียดทานระหว่างผิวแม่พิมพ์กับผิวลวดคงที่ทุก ๆ จุด
3. ความเค้นภายในเนื้อวัสดุบริเวณการเปลี่ยนรูปถาวรเป็นความเค้นหลัก

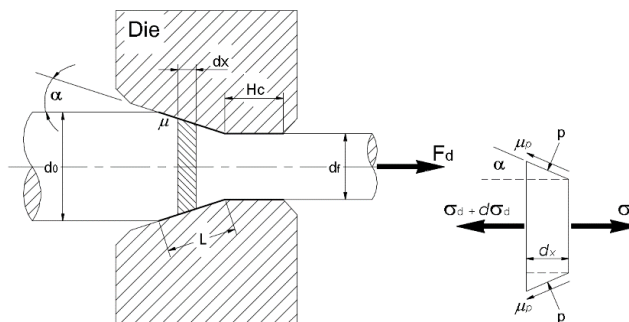


Figure 2 The slab method in the drawing process to calculate the drawing stress.

องค์ประกอบที่สำคัญในกระบวนการดึงลวดดึง (Figure 2) ประกอบไปด้วย  $\alpha$  คือ ขนาดครึ่งของมุมไหลเข้าของด้าย (semi-angle of the drawing die)  $d_0$  คือ ขนาดความโตของเส้นลวดก่อนการ

ดึงขึ้นรูป  $d_f$  คือ ขนาดความโตของเส้นลวดสำเร็จ  $p$  คือ แรงดันที่กระทำต่อเส้นลวด  $L$  คือ ความยาวสัมผัสของส่วนการลดรูป  $H_c$  คือ ระยะความยาวของส่วนควบคุมขนาด (bearing length) และ  $\mu$  ค่า

สัมประสิทธิ์ความเสียหายบนผิวสัมผัสของด้ายและเส้นลวด ซึ่งค่าความเค้นในการดัดขึ้นรูป ( $\sigma_d$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) (Rodríguez-Alabanda et al., 2020)

$$\sigma_d = \sigma_y \cdot \left( \frac{1+B}{B} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_0}{d_f} \right)^{2B} \right] \quad (1)$$

โดยที่

$$B = \mu \cdot \cot \alpha \quad (2)$$

เมื่อ  $\sigma_d$  คือ ค่าความเค้นในการดัดขึ้นรูป  $\sigma_y$  คือ ค่าความเค้นคลากของวัสดุ (yield stress) ซึ่งอาจเขียนอยู่ในเทอมของอัตราการผลิตของพื้นที่หน้าตัด ( $r$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$r = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่  $A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดก่อนการขึ้นรูป และ  $A_f$  คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดหลังการขึ้นรูป ในระหว่างกระบวนการดัดขึ้นรูปวัสดุเส้นลวด จะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความเค้นดึง ส่วนค่าความเครียด ( $\mathcal{E}$ ) จากการดัดลวด สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$\mathcal{E} = \ln \frac{A_0}{A_f} = 2 \cdot \ln \frac{d_0}{d_f} \quad (4)$$

เมื่อ  $\mathcal{E}$  คือ ค่าความเครียดดึง  $d_0$  คือ ขนาดเส้นลวดก่อนการดัดขึ้นรูป และ  $d_f$  คือ ขนาดเส้นลวดหลังการดัดขึ้นรูป

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ( $\mu$ ) ได้จากการวัดค่าแรงในการดัดขึ้นรูปและสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (5) และสมการที่ (6) (Martinez, Qian, Kabayama, & Prisco, 2020)

$$\mu = \frac{\sigma_y \cdot \left( \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_y} + 2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln \frac{r_f}{r_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \right) \cdot \sigma_d}{2 \cdot \left( \left( \frac{H_c}{r_f} \cdot \sigma_d \right) \cdot \left\{ \sigma_y \cdot \left[ (\cot \alpha) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_y} \cdot \ln \frac{r_f}{r_f} \right) \cdot \ln \frac{r_f}{r_f} + \frac{H_c}{r_f} \right] \right\} \right)} \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \frac{\left\{ 1 - (\cos \alpha) \cdot \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11.12}} \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos \alpha} + \sqrt{1 + \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right\}}{\sin^2 \alpha} \quad (6)$$

เมื่อ  $\sigma_y$  คือ ค่าความเค้นครากของวัสดุเส้นลวด  $\sigma_{xb}$  คือ ค่าความเค้นย้อนกลับ และ  $\sigma_d$  คือ ค่าความเค้นในการดัดขึ้นรูปลวด ขณะที่  $r_f$  คือ รัศมี

เส้นลวดเริ่มต้น  $r_f$  คือ รัศมีเส้นลวดสำเร็จ และ  $H_c$  คือ ระยะความยาวส่วนควมคุมขนาด (bearing length) ของด้าย ตามลำดับ

### ขนาดมุมไหลเข้าของตาย

ในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปหลอด วัตถุดิบจะถูกดิ่งให้ไหลตัวผ่านตายดิ่ง (Figure 1) โดยช่วงเริ่มต้นของการขึ้นรูป เส้นหลอดจะถูกดิ่งให้ไหลตัวต่อเนื่องไปตามผนังทรงกรวยของตายหรือมุมตาย ขนาดของเส้นหลอดจะค่อย ๆ ลดลงตามลักษณะของทรงกรวย เส้นหลอดสำเร็จจะมีขนาดเท่ากับส่วนปลายสุดของทรงกรวยและขนาดของส่วนควบคุมขนาด (bearing area) ซึ่งส่วนนี้ จะไม่มีแรงกดหรือความเค้นอัดเกิดขึ้นกับเส้นหลอด เพื่อควบคุมคุณภาพผิวเส้นหลอดและลดแรงเสียดทาน ขณะทำการดิ่งขึ้นรูป สารหล่อลื่นจะถูกเติมเข้าไปในตำแหน่งพื้นที่ผิวโค้งทรงระฆัง (bell radius) ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของเส้นหลอด สารหล่อลื่นจะถูกดิ่งเข้าไปในพื้นที่ของมุมไหลเข้าซึ่งเป็นส่วนของการขึ้นรูปเพื่อลดแรงเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสขณะขึ้นรูป ทั้งนี้ในอุตสาหกรรมการดิ่งขึ้นรูปหลอดโดยทั่วไป จะกำหนดขนาดของมุมไหลเข้าของตาย ( $2\alpha$ ) อยู่ในช่วง  $8^\circ$ - $20^\circ$  (Pomputsir, 2017) ในการดิ่งขึ้นรูปจะต้องให้แรงในการดิ่งเพื่อให้เส้นหลอดเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร และเอาชนะความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของเส้นหลอดและผนังตาย ซึ่งจะก่อให้เกิดพลังงานจากการเปลี่ยนรูปที่สม่ำเสมอและการไหลตัวที่ไม่สม่ำเสมอหรือพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบบริตันแดนต์ (redundant deformation) เกิดขึ้น ค่าพลังงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแม่พิมพ์และรูปร่างของชิ้นงาน ทั้งนี้การเปลี่ยนรูปแบบบริตันแดนต์เป็นผลมาจากความเค้นตกค้างในเส้นหลอดที่เกิดขึ้นระหว่างการดิ่งขึ้นรูป เมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปบริเวณพื้นผิวและส่วนแกนกลางของเส้นหลอดเพิ่มสูงขึ้น

จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความเค้นดิ่งบริเวณพื้นผิวและค่าความเค้นอัดบริเวณแกนกลางของเส้นหลอดในตำแหน่งมุมไหลเข้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นขนาดของการเปลี่ยนรูปแบบบริตันแดนต์จึงขึ้นอยู่กับขนาดมุมไหลเข้าของตายและอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเส้นหลอดเป็นหลัก ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของขนาดมุมตาย เรียกว่า ค่าเดลต้าแฟกเตอร์ ( $\Delta$ ) (Martinez Santos, Kabayama, Guidi, & Silva, 2019) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) ส่วนค่าแฟกเตอร์การเปลี่ยนรูปแบบบริตันแดนต์ (redundant deformation factor,  $\phi$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเดลต้าแฟกเตอร์สามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ (8)

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} [1 + (1-r)^{1/2}]^2 \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\Delta}{6} + 1 \quad (8)$$

จากสมการข้างต้นค่าแฟกเตอร์การเปลี่ยนรูปแบบบริตันแดนต์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าเดลต้าแฟกเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

### วิธีการศึกษา

#### วัสดุการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายและความเร็วในการดิ่งขึ้นรูปหลอดที่ส่งผลต่อแรงดิ่งขึ้นรูป คุณภาพผิวสำเร็จ และสมบัติทางกล ภายหลังการดิ่งขึ้นรูปหลอดอะลูมิเนียมผสมเกรด 4043

ชนิดหน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการดึงเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร ความยาวในช่วงการดึงขึ้นรูปเท่ากับ 90 มิลลิเมตร รายละเอียดสมบัติทางกลของวัสดุเส้นลวดก่อนการดึงขึ้นรูปแสดงดัง (Table 1) องค์ประกอบทางเคมีของเส้นลวดแสดงดัง (Table 2) และค่าความหนืด (viscosity) ของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองจะดำเนินการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ทั้งนี้ค่าความหนืดจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันระหว่างผิวสัมผัส

ซึ่งค่าความหนืดตามระบบเมตริกจะมีหน่วยเรียกเป็นเซนติสโตก (centistoke) โดยผลการทดสอบความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C แสดงดัง (Table 3)

**Table 1** Mechanical properties of 4030 aluminum alloy at room temperature.

| material | YS (MPa) | UTS (MPa) | E (GPa) | TE (%) |
|----------|----------|-----------|---------|--------|
| AA4043   | 70       | 145       | 70      | 22     |

**Table 2** Chemical composition of 4043 aluminum alloy.

|        | Si  | Fe  | Cu  | Mn   | Mg   | Cr    | Zn    | Ti  |
|--------|-----|-----|-----|------|------|-------|-------|-----|
| AA4043 | 4.5 | 0.8 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.001 | 0.001 | 0.2 |

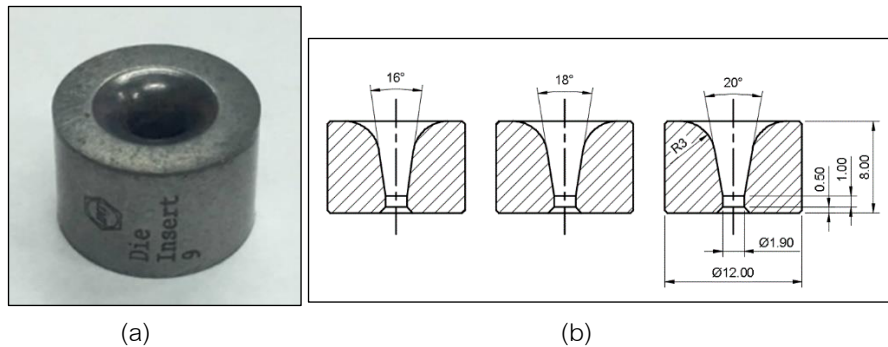
**Table 3** Dynamic viscosity of lubricant for experiment.

| lubricant      | viscosity (cSt) |       | viscosity index |
|----------------|-----------------|-------|-----------------|
|                | 40°C            | 100°C |                 |
| Renoform MZA30 | 141.63          | 12.63 | 76              |

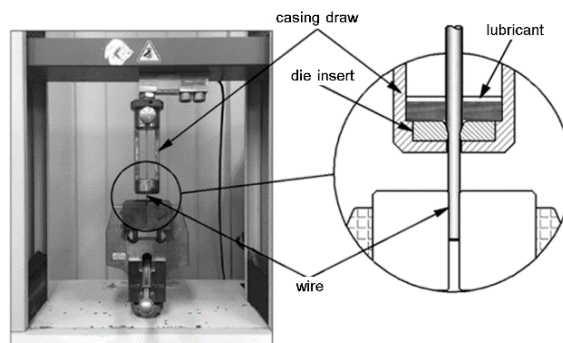
### แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปและข้อกำหนดการทดลอง

ดายที่ใช้ในการทดลองดึงขึ้นรูปถูกออกแบบเพื่อใช้ดึงเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น ( $D_0$ ) เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสำเร็จ ( $D_f$ ) เท่ากับ 1.9 มิลลิเมตร การออกแบบกำหนดให้ลักษณะของดายเป็นไปตามมาตรฐาน ISO2084 (International Standard, 1996) ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดโดยทั่วไป ทั้งนี้ชุดแม่พิมพ์เพื่อทดลองการดึงขึ้นรูปประกอบด้วย ดายอินเสิร์ต (die insert) มีลักษณะดัง (Figure 3a) โดยมีขนาดมุมไหลเข้า ( $2\alpha$ ) 3 ขนาด คือ 16°, 18°

และ 20° ตามลำดับ และจะกำหนดให้ส่วนควบคุมขนาด (bearing length) มีระยะความยาว 1 มิลลิเมตร เท่ากันทุกชิ้น ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบแสดงดัง (Figure 3b) โดยดายอินเสิร์ตทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO) และถูกสวมอัดเข้ากับแม่พิมพ์ส่วนนอก (casing draw) ซึ่งทำจากวัสดุ เกรด SKD11 (JIS) การทดลองทำโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (universal tensile test) ยี่ห้อ Zwick / Z020 (ประเทศเยอรมนี) ขนาด 2 ตัน โดยทำการออกแบบอุปกรณ์จับยึดชุดแม่พิมพ์ดัง (Figure 4)



**Figure 3** Drawing die for the wire pass experiments (a) Die insert and (b) Schematic illustration of the die insert.



**Figure 4** Experimental set-up of the wire drawing test.

ก่อนและหลังการทดลองทำการตรวจสอบขนาดเส้นลวดด้วยดิจิทัลดไมโครมิเตอร์ (digital micrometer) พิกัด 0-25 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo (ประเทศญี่ปุ่น) และตรวจสอบความหยาบผิวด้วยเครื่องมือวัดค่าความหยาบผิว (surface roughness measuring device) รุ่น SURFTEST SJ-410 Series ยี่ห้อ Mitutoyo (ประเทศญี่ปุ่น) สำหรับแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปและความแข็งแรงดึงของเส้นลวดก่อนและหลังการดึงขึ้นรูปใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ ยี่ห้อ Zwick / Z020 ขนาด 2 ตัน ซึ่งผลิตในประเทศเยอรมนีในการวัดค่า ทำการทดลอง

ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้สารหล่อลื่นชนิด Renoform MZA30 มีค่าความหนืดที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 141.63 cSt. ทดลองดึงด้วยความเร็วต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.10, 0.25 และ 0.40 เมตร/วินาที

การศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต้นหรือปัจจัย (factor) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แก่ มุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ที่มีต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง (response) ต่าง ๆ ในกระบวนการดึงขึ้นรูป เช่น ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป ค่าความหยาบผิวของลวดสำเร็จ และค่าความแข็งแรงของลวดสำเร็จ โดยแต่ละปัจจัยที่ศึกษามี 3 ระดับ (level)

ใช้รูปแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial experiment) มีตัวแบบเป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป  $3^2$  ( $3^2$  full factorial experiment) เพื่อศึกษาผลกระทบหลัก (main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหรืออันตรกิริยา (interaction) ที่มีผลตอบสนองต่อค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (arithmetical roughness, Ra) และค่าความแข็งแรงของลวดสำเร็จ โดยภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมีการทดลองซ้ำ (replication) จำนวน 4 ครั้ง การออกแบบการทดลองและการทดสอบทางสถิติในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ (Minitab 2020) ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยลำดับการทดลองจะกำหนดให้มีการสุ่ม (randomization) ตามเมทริกซ์การออกแบบ (design matrix) ที่ได้จากซอฟต์แวร์ทางสถิติ

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เพื่อให้เชื่อมั่นผลการทดสอบทางสถิติของชุดข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ จึงตรวจสอบค่าความ

ผิดพลาดหรือส่วนเหลือ (residual) ของข้อมูลในแต่ละชุดการทดลองด้วยแผนภาพกระจายแบบปกติ (normality probability plot) ของส่วนเหลือแสดงดัง (Figure 5) โดย (a) เป็นชุดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองสำหรับค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป (b) เป็นชุดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองสำหรับค่าความหยาบผิวของลวดสำเร็จ และ (c) เป็นชุดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองสำหรับค่าความแข็งแรงของลวดสำเร็จ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าทั้ง 3 ชุดข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณาความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดรวมถึงความเป็นอิสระต่อกัน (Figure 6) พบว่าข้อมูลแต่ละชุดมีความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอและมีลักษณะของแผนภูมิควบคุมที่ดีจึงนำข้อมูลชุดดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองที่ทำการศึกษาต่อไป

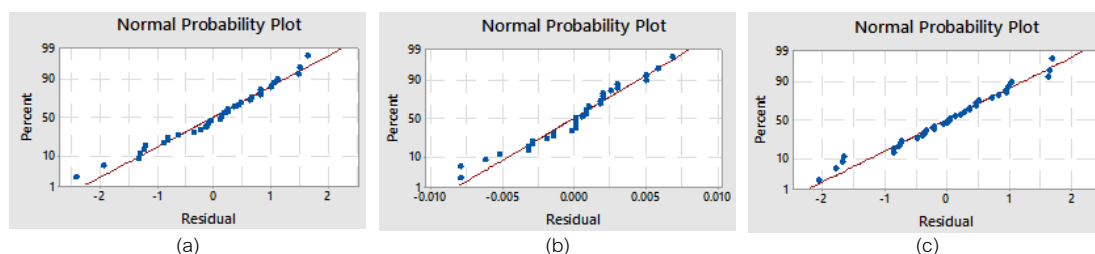


Figure 5 Normal probability plot of residuals for, (a) drawing force, (b) surface roughness, and (c) strength.

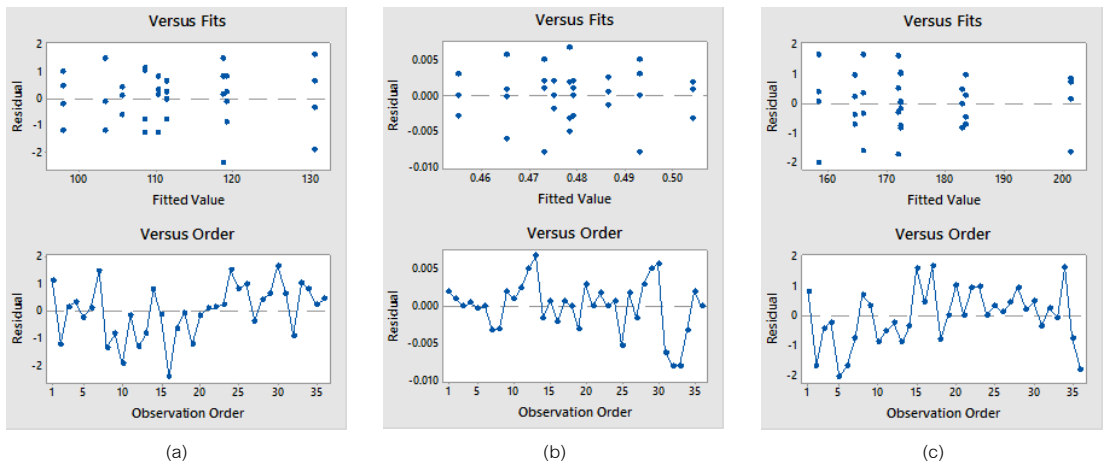


Figure 6 Plot of residuals versus fitted value and observation order for, (a) drawing force, (b) surface roughness, and (c) strength.

(Figure 7) แสดงค่าผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อผลตอบสนองในรูปแบบกราฟพาเรโต (Pareto chart) โดยกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลัก คือ ขนาดมุมไหลเข้าของดาบและความเร็วในการดัดขึ้นรูปนั้นส่งผลต่อ

ผลตอบสนองที่ศึกษา คือ ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และค่าความแข็งแรงของลวดสำเร็จ รวมถึงปัจจัยร่วมระหว่างตัวปัจจัยหลักดังกล่าวก็ส่งผลกับผลตอบสนองที่ศึกษาเช่นกัน

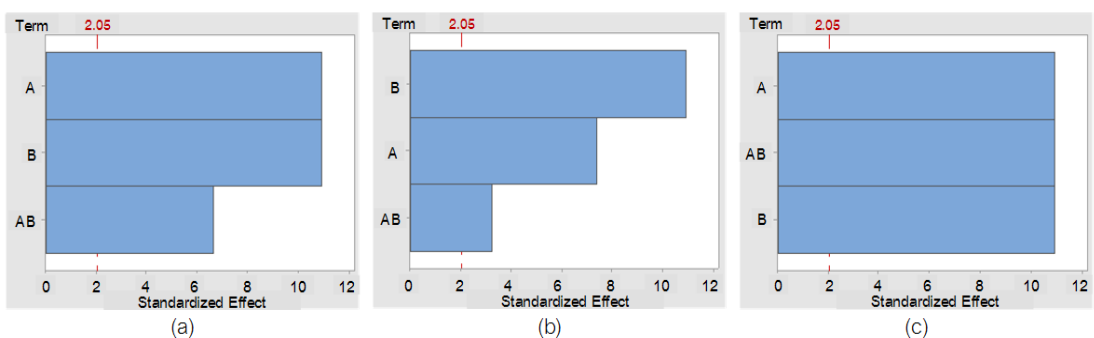
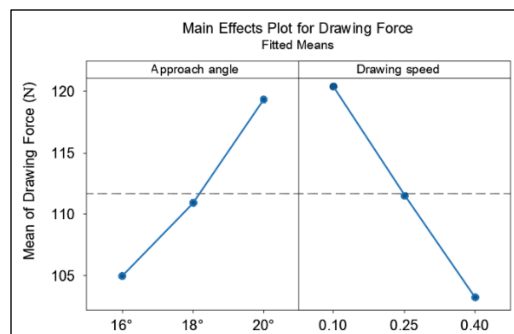


Figure 7 Pareto chart of standardized effects ( $\alpha=0.05$ ), (a) response is drawing force, (b) response is surface roughness and (c) response is strength.

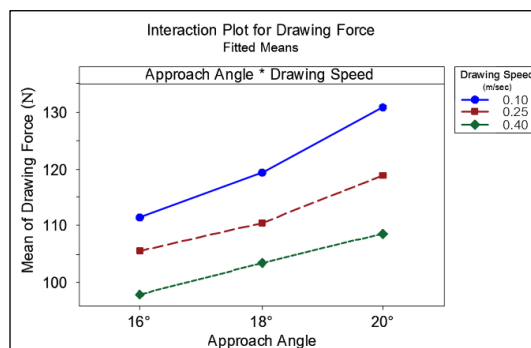
## ผลกระทบของขนาดโหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

(Figure 8a) แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อขนาดของแรงในการดึงขึ้นรูปหลอด โดยแรงที่ต้องใช้ในการดึงขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของมุมโหลเข้าเพิ่มขึ้น จึงอนุมานได้ว่าขนาดของแรงในการดึงขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับขนาดของแฟกเตอร์การขึ้นรูปแบบบริตันแดนซ์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างการดึงขึ้นรูป ดังผลการคำนวณค่าแฟกเตอร์การขึ้นรูปแบบบริตันแดนซ์ ( $\phi$ ) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดมุมโหลเข้าของดายเพิ่มสูงขึ้น (Table 4) ซึ่งเป็นผลกระทบจากการไหลตัวของวัสดุระหว่าง

กระบวนการดึงขึ้นรูป ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Vega, Haddi, & Imad, 2009a) ในขณะที่แรงดึงขึ้นรูปหลอดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (wire drawing stress) จะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการดึงขึ้นรูป (Roger, 2016) และการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น เนื่องจากเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านดายด้วยความเร็วสูงช่วยให้การเกาะติดของสารหล่อลื่นกับเส้นลวดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Kaewtatip, 2001) ส่งผลให้ใช้แรงเพื่การดึงขึ้นรูปหลอดลดลง



(a)



(b)

Figure 8 Main effects and interaction plot for drawing force.

**Table 4** Calculation result of the delta factor ( $\Delta$ ) and the redundant factor ( $\Phi$ ).

| die approach angle ( $2\alpha$ ) | drawing ratio (r) | delta factor ( $\Delta$ ) | redundant deformation factor ( $\Phi$ ) |
|----------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| 16°                              | 0.903             | 20.36                     | 6.497                                   |
| 18°                              | 0.903             | 22.91                     | 7.186                                   |
| 20°                              | 0.903             | 25.45                     | 7.872                                   |

ผลการทดลอง (Figure 8b) แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างขนาดมุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป โดยการดึงขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมตาย 20° ด้วยความเร็วต่ำสุดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ (0.1 เมตร/วินาที) ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงที่สุด และการดึงขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมตาย 16° ด้วยความเร็วสูงสุดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ (0.40 เมตร/วินาที) จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยที่สุด เนื่องจากขนาดของมุมไหลเข้าจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเฉือนรีตันแดนต์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นจากการขึ้นรูปดังสมการที่ (1) และค่าแรงดึงขึ้นรูปจากการทดลองยังมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณค่ารีตันแดนต์แฟกเตอร์ ( $\Phi$ ) ดังสมการที่ (8) เนื่องจากเมื่อขนาดมุมไหลเข้าหรือค่าความลาดเอียงของดายเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เส้นลวดไหลตัวได้ยากและเกิดแรงเฉือนรีตันแดนต์เพิ่มสูงขึ้น (Majzoubi, Fereshteh Saniee, & Aghili, 2008) อีกทั้งขนาดของมุมไหลเข้าที่เพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นบนพื้นผิวสัมผัสมีแนวโน้มลดลง ส่งผลทำให้ต้องใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Siebel (Siebel, & Kobitzsch, 1943) อีกทั้งจากผลการทดลองจะพบว่าการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดเล็ก

จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย จากสมการ (5) โดยจากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ( $\mu$ ) เมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มีขนาดมุมไหลเข้า ( $\alpha$ ) ขนาดเล็กจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำกว่าการดึงขึ้นรูปผ่านดายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ นอกจากนี้ขนาดของแรงดึงที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการไหลตัวของสารหล่อลื่นเข้าสู่พื้นที่การเปลี่ยนรูปได้ดียิ่งขึ้น

### ผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเส้นลวดสำเร็จ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ของเส้นลวดหลังการดึงขึ้นรูปในแนวเส้นรอบวง เพราะจะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงกว่าแนวแกนในทิศทางการดึง และให้รายละเอียดของผิวได้ดีในกรณีเกิดรอยขีดหรือรอยครูด (scratch) บนผิวลวด ในการวัดใช้ระยะตัด-ออฟ (cut-off) ที่ 0.08 มิลลิเมตร เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ในการวัดของเส้นลวดที่มีขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้ระยะตัด-ออฟที่มีความละเอียดสูง

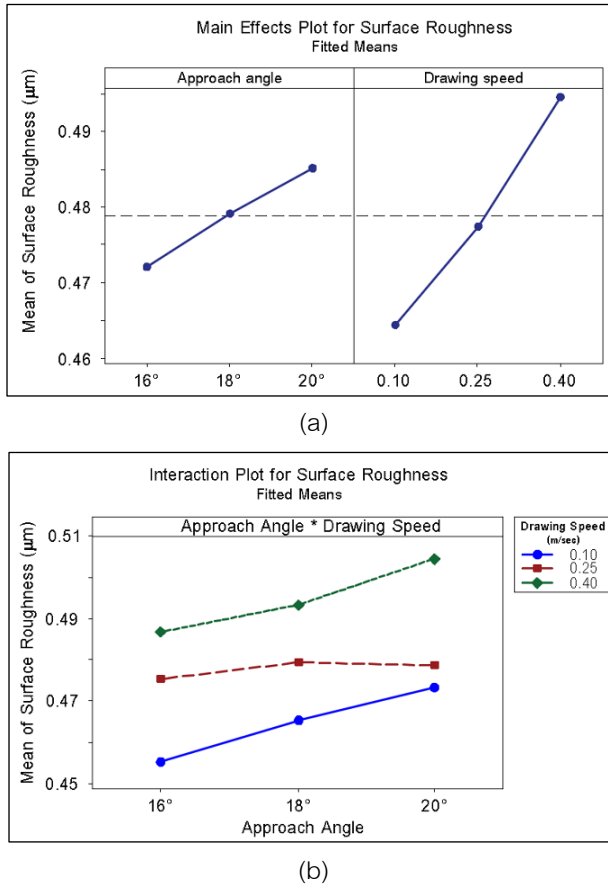


Figure 9 Main effects and interaction plot for surface roughness.

ผลการทดสอบ (Figure 9) แสดงให้เห็นว่า เส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านดายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้าแคบ (narrow angle) ให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการดึงผ่านดายซึ่งมีขนาดมุมทางไหลเข้ากว้าง (wide angle) เนื่องจากการค่อย ๆ ลดลงของขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นลวด ดังนั้นการกำหนดขนาดมุมลาดเอียงให้มีค่าน้อย จะช่วยให้เส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีประสิทธิภาพในการเกาะติดของสารหล่อลื่นที่ดี ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูป เส้นลวดจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (plastic deformation) ในช่วงที่ถูกดึงผ่านพื้นที่ทางไหลเข้า

หรือปากดายรูปทรงกรวย ซึ่งการดึงผ่านดายที่มีขนาดมุมทางไหลเข้าแคบ เส้นลวดจึงมีเวลาในการเปลี่ยนโครงสร้างและถ่ายเทพื้นผิวได้มากกว่า ทำให้เมื่อดึงขึ้นรูปแล้วจะได้เส้นลวดที่มีค่าความหยาบผิวที่ดีกว่าเส้นลวดซึ่งถูกดึงด้วยความเร็วเท่ากันแต่มีมุมทางไหลเข้าของดายที่กว้างกว่า

ในขณะที่ค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งพบว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงด้วยความเร็วที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Suliga (2017); Martinez,

Qian, Kabayama, & Prisco (2020) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นบนพื้นผิวระหว่างเส้นลวดและแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการสัมผัสโดยตรงของพื้นผิว (metal to metal contact) จึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวของเส้นลวดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้น ดังผลการทดลองซึ่งพบว่าเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านดายขนาดมม. 16° โดยใช้ความเร็ว 0.4 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวมากที่สุด และเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านดายขนาดมม. 16° โดยใช้ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด

### ผลกระทบของขนาดมม. 16° และความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของเส้นลวดสำเร็จ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง (ultimate tensile strength; UTS) ของเส้นลวดสำเร็จดัง (Figure 10)

พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดหรือค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ จะแปรผันตามกับขนาดมม. 16° เข้าของดายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวด โดยค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงผ่านดายที่มีมม. 16° เข้าขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดมม. 16° เข้าของดายที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบบริดจ์และค่าความเค้นตกค้างในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการคำนวณค่าเค้นดัดแฟกเตอร์ ( $\Delta$ ) ของสมการที่ (7) ด้วยเหตุผลจากการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรด้วยด้วยระยะเวลาที่สั้น มีเวลาในการจัดเรียงตัวของเกรนน้อย ส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้เนื้อวัสดุเกิดความเครียดสูงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเส้นลวดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cetinarslan (2012) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการดึงขึ้นรูปของเส้นลวดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเส้นลวดสำเร็จเพิ่มสูงขึ้น

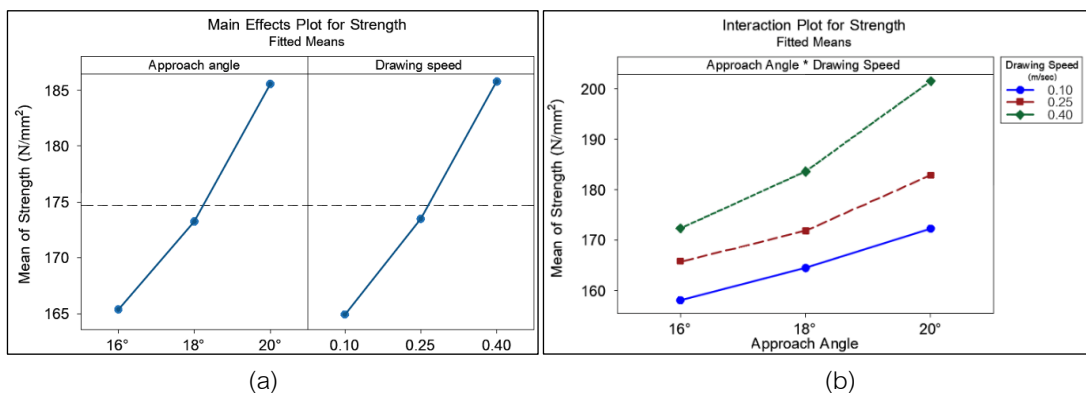


Figure 10 Main effects and interaction plot for strength.

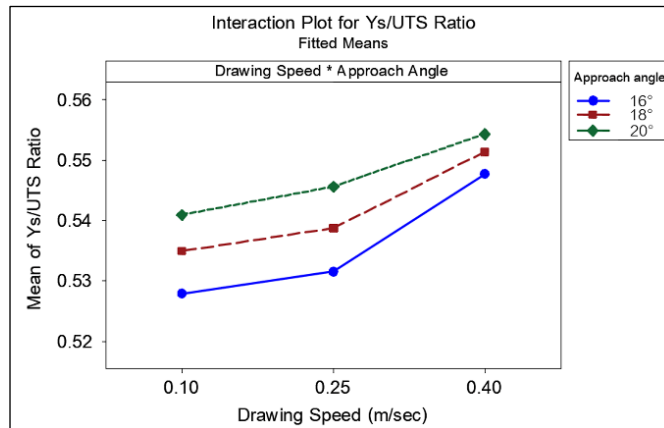


Figure 11 Variations of Ys/UTS ratio as a function of wire drawing speed for the die approach angle.

ความเร็วของการดึงขึ้นรูปเส้นลวดและขนาดมุมตายที่ส่งผลต่อความเครียดจากการเปลี่ยนรูปถาวรสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนความเค้นครากกับความแข็งแรงดึง (YS/UTS) โดยวัสดุที่มีอัตราส่วนดังกล่าวต่ำจะชี้ให้เห็นว่าเป็นวัสดุที่มีช่วงของการเปลี่ยนรูปถาวรที่มากกว่า เมื่อพิจารณา (Figure 11) พบว่าขนาดมุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงลวดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วน YS/UTS ของวัสดุเส้นลวดสำเร็จเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามุมไหลเข้าของตายที่มีขนาดเล็กและถูกดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วต่ำจะทำให้เส้นลวดสำเร็จมีความต่างของค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงมากกว่าที่จะสามารถนำไปดึงขึ้นรูปซ้ำได้ง่ายกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากมีความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุหรือได้รับผลกระทบจากความเครียดตึงน้อยในขณะที่การดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่และใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วน YS/UTS เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเส้นลวดสำเร็จจะได้รับ

ผลกระทบจากค่าความเครียดตึงมากกว่าทำให้การนำไปดึงขึ้นรูปซ้ำทำได้ได้ยากขึ้น

## สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวดอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 4043 สามารถสรุปได้ดังดังนี้

1. แรงดึงขึ้นรูปจะแปรผันตามขนาดของมุมไหลเข้าและแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ขนาดของแรงดึงขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากขนาดของมุมไหลเข้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเฉือนรีดตันแดนต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นลวดถูกดึงผ่านตายด้วยความเร็วสูงทำให้การเกาะติดของหล่อนกับเส้นลวดมีประสิทธิภาพ จึงส่งผลให้ใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปลวดลดลง

2. ค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผกผันกับขนาดมุมไหลเข้าของตายและแปรผันตามค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวด โดยพบว่าเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้าขนาดเล็กจะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่น้อยกว่าการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ เนื่องจากการดึงขึ้นรูปลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าแคบเส้นลวดจะมีเวลาในการเปลี่ยนโครงสร้างและถ่ายเทพื้นผิวได้มากกว่าทำให้ได้เส้นลวดสำเร็จมีค่าความหยาบผิวที่น้อยกว่า ส่วนการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะได้เส้นลวดที่มีค่าความหยาบผิวสูงกว่า เนื่องจากการดึงด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้สารหล่อลื่นเกาะติดเส้นลวดเข้าสู่พื้นที่การเปลี่ยนรูปภายในตายได้มากกว่าและมีความหนาชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นมากกว่า ทำให้การสัมผัสโดยตรงของพื้นผิวเส้นลวดและแม่พิมพ์ (metal to metal contact) เกิดขึ้นน้อยกว่า จึงส่งผลให้เส้นลวดมีค่าความหยาบผิวสูงขึ้น

3. ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดหรือค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ จะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของตายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวด เนื่องจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่จะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบรีตันแคนต์และความเค้นตกค้างในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น และการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้อัตราส่วน YS/UTS หรืออัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นครากและค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของเส้นลวดสำเร็จเพิ่มสูงขึ้น

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

สุวรรณภูมิ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่มีส่วนช่วยในการดำเนินงานและเก็บผลการทดลองทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Celentano, D. J., Palacios, M. A., Rojas, E. L., Cruchaga, M. A., Artigas, A. A., & Monsalve, A. E. (2009). Simulation and experimental validation of multiple step wire drawing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(3), 163-180.
- Cetinarlan, C. S. (2012). A study on influences of some process parameters on cold drawing of ferrous wires. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, 19, 221-228.
- El-Domiaty, A., & Kassab, S. Z. (1998). Temperature rise in wire-drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3), 72-83.
- Haddi, A., Imad, A., & Vega, G. (2001). Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process. *Materials & Design*, 32(8-9), 4310-4315.
- Hafis, S. M., Ridzuan, M. J. M., Rahayu Mohamed, A., Farahana, R. N., & Syahrullail, S. (2013). Minimum quantity lubrication in cold work drawing process: Effects on forming load and surface roughness. *Procedia Engineering*, 68, 639-646.
- International Standard. (1996). *ISO 2804:1996 - Wire, bar or tube drawing dies, Second edition 1996-1 2-1 5*. Geneva: ISO.

- Kaewtatip, P. (2001). A Study on the effect of drawing speed on the performances of wire drawing process. *ME-NETT 15<sup>th</sup> Conferences* (pp. 151-155). Bangkok: Srinakharinwirot University.
- Lin, H. S., Hsu, Y. C., & Keh, C. C. (2008). Inhomogeneous deformation and residual stress in skinpass axisymmetric drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3), 128-132.
- Majzoobi, G. H., Fereshteh Saniee, F., & Aghili, A. (2008). An investigation into the effect of redundant shear deformation in bar drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3), 133-137.
- Martinez, G. A. S., Santos, E. F. d., Kabayama, L. K., Guidi, E. S., & Silva, F. d. A. (2019). Influences of different die bearing geometries on the wire-drawing process. *Metals*, 9(10), 1089.
- Martinez, G. A. S., Qian, W. L., Kabayama, L. K., & Prisco, U. (2020). Effect of process parameters in copper-wire drawing. *Metals*, 10(1), 105.
- Pilarczyk, J. W., Markowski, J., Dyja, H., & Golis, B. (2004). Effect of high-speed drawing on properties of high-carbon steel wires. *Wire Journal International*, 37, 118-123.
- Pornputsiri, N. (2017). Stainless wire drawing process factors affecting on finished wire quality. *RMUTJ Journal Science and Technology*, 10(3), 14-31. (in Thai)
- Rodríguez-Alabanda, O., Molero, E., Tintelecan, M., Guerrero-Vaca, G., Romero, P. E., & Santana Martinez, G. A. (2020). Fine electrolytic tough pitch copper multistage wire drawing pass schedule design by analytical and numerical methods. *Proceedings*, 63(1), 12.
- Roger, N. W. (2016). *Wire technology: Process engineering and metallurgy* (2<sup>nd</sup> ed.). Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.
- Siebel, E., & Kobitzsch, R. (1943). Die Erwärmung des Ziehgutes beim Drahtziehen. *Stahl Und Eisen*, 63(6), 110-113.
- Suliga, M. (2017). The influence of drawing speed on surface topography of high carbon steel wires. *Metalurgija*, 56, 182-184.
- Vega, G., Haddi, A., & Imad, A. (2009a). Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation. *International Journal of Material Forming*, 2, 229-232.
- Vega, G., Haddi, A., & Imad, A. (2009b). Investigation of process parameters effect on the copper wire drawing. *Materials and Design*, 30(8), 3308-3312.
- Viktor, T. (2010). Steel wire production by cold drawing. *Hochschule Anhalt*, 1, 70-83.