

การเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปในกระบวนการดึงลวดอลูมิเนียมผสม เกรด AA5052

Comparative on the Effect of Wire Drawing Condition for Wire Drawing Process of Aluminum Alloy AA5052

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*} พิสิต เมืองน้อย¹ เฉลิมพล คล้ายนิล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอบางพลี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Natthasak Pornputsiri^{1*} Phisith Muangnoy¹ Chalermopol Klynil¹

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Phetchaseam road, Nongkeha, Hua-Hin, Prachubkhirkhan, 77110

*Corresponding author Email: natthasak.por@rmutr.ac.th

(Received: 3 March 2023 / Accepted: 13 December 2023 / Published: 26 December 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ซึ่งประกอบไปด้วยขนาดมุมตาย ชนิดสารหล่อลื่น และความเร็วในการดึงขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อแรงดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ โดยดำเนินการดึงขึ้นรูปทำจากวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) มีขนาดมุมไหลเข้าต่างกัน 3 ระดับ คือ 16°, 18° และ 20° เส้นลวดก่อนการดึงขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มม. ทำการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 10 โดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่างกันจำนวน 3 ชนิด และถูกดึงด้วยความเร็ว 3 ระดับ ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองจาก แรงดึงขึ้นรูป ค่าความหยาบผิว และความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ผลการทดลองพบว่าการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° ด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที โดยใช้สารหล่อลื่น DN Press Draw40 ได้เส้นลวดสำเร็จที่มีพื้นที่ผิวดีที่สุด โดยการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่และใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปและให้เส้นลวดสำเร็จที่มีความแข็งแรงมากกว่าจากผลของการเปลี่ยนรูปแบบบริดจ์แดนซ์ ส่วนการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดเล็กและใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง จะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าและเส้นลวดสำเร็จมีความแข็งแรงดึงน้อยกว่า ส่วนผลกระทบของสารหล่อลื่นพบว่า การดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำจะใช้แรงดึงในการขึ้นรูปสูงกว่า ได้เส้นลวดสำเร็จซึ่งมีค่าความหยาบผิวและค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ: กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด มุมไหลเข้าแม่พิมพ์ สารหล่อลื่น ความเร็วในการดึงลวด เส้นลวดอลูมิเนียม

Abstract

The aim of this research was to comparative study on the effect of the aluminum alloy grade 5052 wire drawing conditions, which consisted of die approach angle, lubricant type and wire drawing speed, that affects to the wire drawing force and the finished wire quality. The wire drawing dies are made of tungsten carbide grade K20 (ISO Code). There are 3 different size of die approach angles: 16°, 18° and 20°. The aluminium wire before drawing has a diameter of 2.0 mm., wire drawing with a cross-sectional reduction

ratio of 10%, used of 3 different viscosity lubricants and 3 drawing velocity. Experiment and analyze on the drawing force, surface roughness and tensile strength of the finished wire. The experiment results showed that wire drawing by a die with an approach angle of 16° at a drawing velocity of 0.1 m/s and using lubricant DN Press Draw40 grade gave the best wire surface finish. The drawing by a large die approach angle and uses a low velocity speed Will use the higher drawing force and provide a stronger wire. Which is caused by the effect of redundance deformation. As for wire drawing through a small die approach angle size and a high drawing velocity, use the lower drawing force, the finished wire has less strength. As for the effects of lubricants, it is found that the wire drawing by the lubricants with low viscosity will use a higher drawing force. Finish wire, which has lower a surface roughness and tensile strength.

Keywords: wire drawing process, die approach angle, lubricant, drawing velocity, aluminium wire

1. บทนำ

กระบวนการดึงขึ้นรูปลวด (Wire drawing process) ถูกใช้เพื่อการผลิตเส้นลวดที่มีสมบัติทางกลและคุณภาพผิวที่ดีตามข้อกำหนด ดังนั้นผู้ผลิตหรือผู้ออกแบบกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปเป็นอย่างดี ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ลักษณะรูปร่างของตายสมบัติทางกลของวัสดุ ชนิดสารหล่อลื่น และความเร็วในการดึงขึ้นรูป เป็นต้น ทั้งนี้เงื่อนไขการขึ้นรูปดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จและอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์

การผลิตเส้นลวดให้ได้ขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรงและมีคุณภาพผิวที่ดี ผู้ผลิตจะต้องมีพื้นฐานและประสบการณ์ในการออกแบบแม่พิมพ์เป็นอย่างดี ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ส่วนที่มักถูกมองข้ามและขาดการคำนึงถึงคือการกำหนดรายละเอียดของลักษณะรูปร่างภายในของตาย [1,2] เนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวรของเส้นลวดจะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของตายซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านภายในและส่งผลกระทบต่อแรงในการดึงขึ้นรูป อีกทั้งในขณะที่ขึ้นรูปจะส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดและตายมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกิดเป็นพลังงานความร้อนจากผลของความเครียดในการเปลี่ยนรูปและความเสียดทานที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสัมผัส [3,4] ซึ่งค่าความร้อนบนชั้นผิวของเส้นลวดจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความเร็วในการดึงขึ้นรูป โดยส่วนของการเปลี่ยนรูปถาวรขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รูปทรงกรวยหรือเรียกว่ามุมไหลเข้าของตาย (Die approach angle) ดังนั้นการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าที่เหมาะสม จะช่วยให้เส้นลวดเกิดการเปลี่ยนรูปที่สม่ำเสมอและลดการเปลี่ยนรูปแบบชั่วคราว ทั้งนี้หากกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าคงที่ ขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับขนาดมุมตายและอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นหลัก นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูปพฤติกรรมของการเชื่อมเย็บที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเส้นลวดและแม่พิมพ์ จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการแตกหักเสียหายและส่งผลกระทบต่อการใช้งานของเส้นลวด [1, 5] Dixit และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ขนาดมุมตาย สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงดึงย้อนกลับ พบว่าเมื่ออัตราการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นหรือขนาดของมุมตายลดลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มลดลงและเส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วในการดึงขึ้นรูป (Drawing velocity) ยังส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดึงขึ้นรูปและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ [7] เนื่องจากเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเค้นของเส้นลวดขณะทำการดึงขึ้นรูป

ทั้งนี้ชนิดของสารหล่อลื่นและวิธีการหล่อลื่นยังเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปและคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จ ที่ผ่านมามีนักวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดไว้อย่างหลากหลาย เช่น Byon และคณะ [8] ได้ทำการตรวจสอบผลกระทบของวิธีการหล่อลื่นในรูปแบบการเคลือบผิวแบบต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อแรงดึงขึ้นรูป โดยเลือกใช้สารหล่อลื่นชนิดผง 2 ชนิดซึ่งมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันและทดสอบการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนการขึ้นรูปที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ พบว่าสารหล่อลื่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลให้ได้

เส้นลวดที่มีคุณภาพผิวที่ดีกว่าและใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด Dhaher [9] ได้ทำการศึกษาส่วนผสมในน้ำมันที่ส่งผลต่อความสามารถในการหล่อขึ้นรูป ซึ่งพบว่าสารหล่อขึ้นรูปที่มีส่วนผสมของแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 50 โซเดียมสเตียเรตร้อยละ 45 และ แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ซึ่งอุตสาหกรรมการดึงลวดให้การยอมรับเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทั้งนี้ Hillery และ McCabe [10] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการดึงลวดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหล่อขึ้นรูปและแรงในการดึงขึ้นรูป พบว่าการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อขึ้นรูปลดลงและใช้แรงในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น Hafis และคณะ [11] ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารหล่อขึ้นรูปที่ส่งผลต่อแรงดึงลวดและความหนาผิวเส้นลวดสำเร็จ พบว่าปริมาณสารหล่อขึ้นรูปช่วยในการลดแรงเสียดทานระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะในรูปแบบต่างๆ Saied และคณะ [12] ทำการศึกษาการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดโลหะ พบว่าการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปที่ดีจะช่วยลดแรงในการขึ้นรูปและขึ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวเป็นการมุ่งเน้นศึกษาลักษณะการไหลตัวของสารหล่อขึ้นรูปเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถบ่งบอกคุณสมบัติของสารหล่อขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีคุณภาพได้ งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปเส้นลวดซึ่งประกอบไปด้วย เงื่อนไขในการออกแบบแม่พิมพ์ ความเร็วในการดึงลวด และชนิดของสารหล่อขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดึงขึ้นรูปและคุณภาพของเส้นลวดสำเร็จ โดยจะพิจารณาจากแรงในการดึงขึ้นรูป คุณภาพผิวเส้นลวด และความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ เพื่อกำหนดค่าความสัมพันธ์ของขนาดมุมไหลเข้าของตาย ความเร็วในการดึงลวด และชนิดของสารหล่อขึ้นรูปที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นลวดโลหะและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานปฏิบัติต่อไป

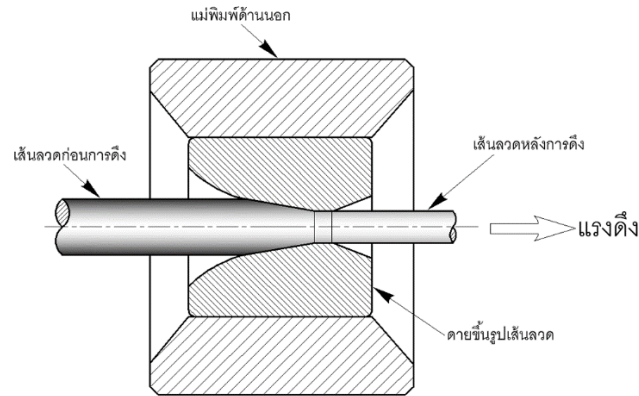
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการดึงลวด (Wire drawing process) เป็นกรรมวิธีในการลดขนาดหรือเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด โดยการใช้แรงดึงที่ส่วนปลายของเส้นลวดให้ไหลตัวผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ลักษณะและขนาดของเส้นลวดที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับรูหรือช่องว่างของตายสำหรับขึ้นรูปเส้นลวดดังรูปที่ 1 ขณะดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะเกิดแรงกระทำหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วยแรงเพื่อการขึ้นรูปวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal deformation force) แรงเฉือน (Shearing force) หรือแรงเฉือนรีดันแดนท์ (Redundant shearing force) และแรงเสียดทาน (Friction force) บนพื้นผิวสัมผัส ดังนั้นในการคำนวณหาค่าแรงเพื่อการดึงขึ้นรูปจึงต้องพิจารณาจากแรงกระทำทั้ง 3 ส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีของไซเบล (Siebel's method) ดังสมการที่ (1) [13]

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (1)$$

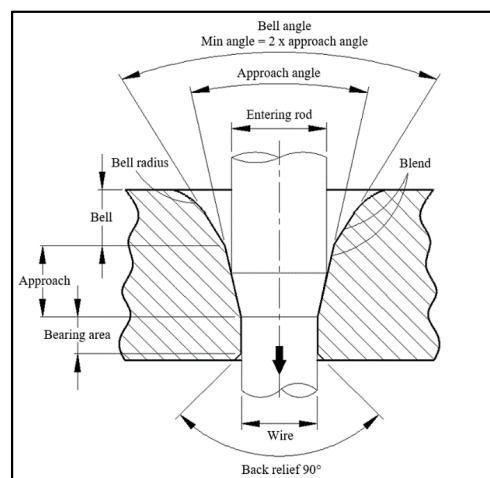
เมื่อ $F_{D,tot}$ คือ แรงดึงขึ้นรูปรวม, $F_{id,D}$ คือ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ, $F_{FR,S}$ คือ แรงเสียดทาน และ F_{sh} คือ แรงเฉือนรีดันแดนท์



รูปที่ 1 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ทฤษฎีการสมดุลทางแรงในการวิเคราะห์แรงกระทำขณะขึ้นรูป เพื่อการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขกระบวนการดึงลวดที่เหมาะสม เนื่องจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและความเสียหายที่อาจเกิดกับเส้นลวด [14] ตามหลักการของการขึ้นรูป ค่าความเค้นของเส้นลวดที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปจะต้องไม่มากกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเส้นลวดหรือวัตถุดิบเริ่มต้น เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกหักหรือการเปลี่ยนรูปที่ไม่สม่ำเสมอ ในทางปฏิบัติจะจำกัดค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Drawing stress) ไว้ไม่เกิน 60% ของค่าความเค้นไหล (Flow stress) วัสดุเส้นลวด [15]

2.1.2 มุมไหลเข้า (Approach angle) ในกระบวนการดึงขึ้นรูป เส้นลวดจะถูกดึงให้ไหลตัวผ่านดายซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยในช่วงเริ่มต้นวัตถุดิบจะถูกดึงให้ไหลตัวต่อเนื่องไปตามผนังทรงกรวยของดายซึ่งเรียกว่ามุมไหลเข้า (Approach angle) ขนาดของเส้นลวดวัตถุดิบจะค่อยๆ ลดลงตามลักษณะของพื้นผิวทรงกรวย โดยเส้นลวดสำเร็จจะมีขนาดเท่ากับส่วนปลายสุดของทรงกรวยและส่วนควบคุมขนาด (Bearing area) ซึ่งส่วนนี้จะไม่มีความเค้นหรือความเค้นอัดเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อการควบคุมคุณภาพพื้นผิวเส้นลวดและลดแรงเสียดทานขณะทำการดึงขึ้นรูป สารหล่อลื่นจะถูกเติมเข้าไปในตำแหน่งพื้นที่ผิวโค้งทรงระฆัง (Bell radius) ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของเส้นลวด โดยสารหล่อลื่นจะถูกดึงเข้าไปในพื้นที่ของมุมไหลเข้าทรงกรวยซึ่งเป็นส่วนของการขึ้นรูปเพื่อลดแรงเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสขณะขึ้นรูป ทั้งนี้ในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยทั่วไปจะกำหนดขนาดของมุมไหลเข้าของดาย (2α) อยู่ในช่วง $8^\circ - 20^\circ$



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของดายดึงขึ้นรูปเส้นลวด [14]

2.1.3 อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดหรืออัตราการขึ้นรูปเส้นลวด (Wire drawing ratio) อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวดซึ่งในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดได้กำหนดอัตราการลดรูปในแต่ละขั้นตอนไว้ไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากมุมไหลเข้าของด้าย (Approach angle) และอัตราการดึงขึ้นรูป (Drawing ratio) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวด อุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดสมัยใหม่จึงได้รวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าและอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม เรียกว่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ซึ่งค่าที่เหมาะสมถูกกำหนดไว้ในช่วง 1.5 – 3 หากค่าเดลต้าแฟกเตอร์สูงกว่าช่วงที่กำหนดจะชี้ให้เห็นว่าเป็นลักษณะของการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่ำและมีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่เกินไป หากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ต่ำกว่าช่วงที่กำหนด จะเป็นลักษณะการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดสูงและมีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก [14] ซึ่งค่าคงที่เดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

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

เมื่อ α คือขนาดครึ่งของมุมไหลเข้า (Approach semi-angle) และ r คือ อัตราการดึงขึ้นรูป คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$r = 1 - \frac{A_1}{A_0} \quad (3)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น และ A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดสำเร็จ

2.1.4 ผลกระทบของแรงเสียดทาน (Effect of friction) ในการออกแบบแม่พิมพ์ดึงลวดหากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ต่ำกว่าช่วงที่กำหนด จะชี้ให้เห็นว่ามีแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวเส้นลวดและพื้นผิวดायมากเกินไป และหากเดลต้าแฟกเตอร์มีค่าสูงกว่าช่วงที่กำหนดแสดงว่าเส้นลวดจะได้รับแรงรีดดันแดนท์หรือค่าความเครียดถาวรเกิดขึ้นมากเกินไป ซึ่งพิจารณาได้จากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเส้นลวด โดยแรงรีดดันแดนท์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าเดลต้าแฟกเตอร์สูงขึ้น ส่วนแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นสูงหากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ลดลง จากผลกระทบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าเดลต้าแฟกเตอร์ระดับปานกลางหรืออยู่ในช่วงที่เสนอแนะจึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด [14]

2.1.5 งานรีดดันแดนท์ของการขึ้นรูป (Redundant work of deformation) การเปลี่ยนรูปรีดดันแดนท์จะเกิดขึ้นในระหว่างการดึงขึ้นรูปจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ แสดงให้เห็นในรูปของแฟกเตอร์งานรีดดันแดนท์ (Φ) หรืออัตราส่วนของงานจากการเปลี่ยนรูปถาวรโดยรวมและงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดซึ่งแฟกเตอร์งานรีดดันแดนท์ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (4) [14]

$$\Phi \approx \left(\frac{\Delta}{6}\right) + 1 \quad (4)$$

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 วัสดุการทดลอง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 5052 โดยจะประเมินผลจากแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด ค่าความหยาบผิว และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งรายละเอียดสมบัติทางกลของวัสดุสืบเส้นลวดจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ISO 6892-1:2009 แสดงดังตารางที่ 1 โดยก่อนการทดลองจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดความโตเส้นลวดด้วยดิจิตอลไมโครมิเตอร์ (Digital Micrometer) 0-25 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ตรวจสอบและบันทึกค่าความหยาบผิวของเส้นลวดเริ่มต้นและพื้นผิวดायด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface roughness

measuring device) โดยรายละเอียดของวัสดุเริ่มต้น แม่พิมพ์ดึงลวด และเงื่อนไขการทดสอบการดึงขึ้นรูปเส้นลวด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเส้นลวดอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA5052

Material	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Modulus of elasticity; E (GPa)	Total Elongation (%)
AA5052	193	228	70.3	18

ตารางที่ 2 รายละเอียดของวัสดุเส้นลวด, แม่พิมพ์ดึงลวด และเงื่อนไขการดึงขึ้นรูป

รายการ	รายละเอียด	หมายเหตุ
ชนิดของวัสดุ	AA5052	
ขนาดความโตและความยาว	Ø 2 มม. ความยาว 90 มม.	ค่าความยาวเฉพาะส่วนที่มีการขึ้นรูป
ความหยาบผิวเฉลี่ยของเส้นลวดเริ่มต้น	Ra = 0.1823 µm.	ทำการวัดในแนวเส้นรอบวงเส้นลวด
ความหยาบผิวเฉลี่ยผิวตาย	Ra = 0.0823 µm.	
ขนาดมุมไหลเข้าของตาย (2α)	16°, 18° และ 20°	
ความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด	0.1, 0.25, และ 0.4 เมตร/วินาที	
ชนิดสารหล่อลื่น	DN Press Draw 40, ISO CUT 570-A และ RENOFORM MZA30	ตรวจสอบค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C

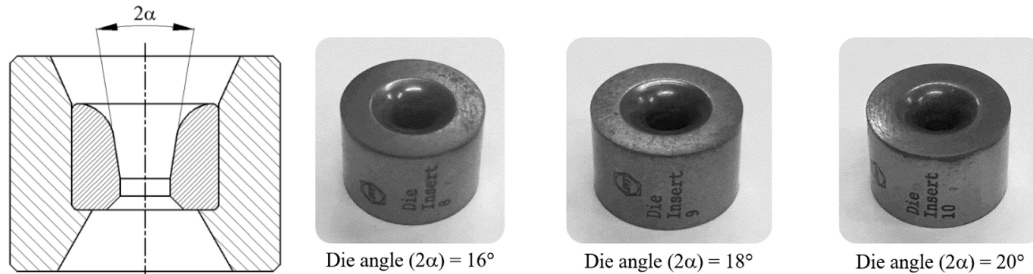
2.2.2 สารหล่อลื่น ในการทดลองเลือกใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิด ซึ่งมีค่าความหนืดต่างกัน ซึ่งได้จากการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 [16] ที่อุณหภูมิที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดชั้นฟิล์มระหว่างผิวสัมผัส โดยค่าความหนืดตามระบบเมตริกจะมีหน่วยเรียกเป็น เซนติสโตก (Centistoke), (cSt) ซึ่งผลการทดสอบค่าความหนืดสารหล่อลื่นในการทดลองทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

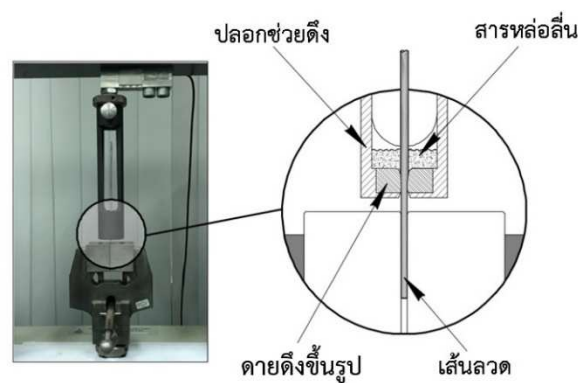
ชนิดสารหล่อลื่น	ค่าความหนืด (cSt)		ดัชนีความหนืด
	40°C	100°C	
DN Press Draw 40	20.01	4.136	108
ISO CUT 570-A	45.62	6.206	75
RENOFORM MZA30	141.63	12.63	76

2.2.3 แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดและข้อกำหนดการทดลอง การทดลองนี้ใช้แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดตามมาตรฐาน W103 ดายสำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด (Wire drawing die) ทำมาจากทังสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) ถูกเคลือบผิวแข็งด้วย TiC โดยกรรมวิธี CVD Coating ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีขนาดมุมไหลเข้า (2α) ที่ 3 ขนาด คือ 16°, 18° และ 20° ตามลำดับ กำหนดอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด 10% ซึ่งลักษณะและรายละเอียดของดายดึง

ขึ้นรูปเส้นลวดแสดงดังรูปที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำอุปกรณ์จับยึดชุดตายหรือบล็อกช่วยดึงเพื่อติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test ยี่ห้อ Zwick / Z2020) ขนาด 2 ตัน และทำการทดสอบการดึงลวดที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 0.1, 0.25, และ 0.4 เมตร/วินาที ขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปสารหล่อลื่นจะถูกเติมลงในบล็อกช่วยดึงที่ตำแหน่งด้านหน้ามุมไหลเข้าของตายดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะและรายละเอียดของตายดึงขึ้นรูปเส้นลวด



รูปที่ 4 การติดตั้งชุดทดสอบการดึงขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการเติมสารหล่อลื่น

เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผลและได้ข้อมูลที่มีความเชื่อถือทางสถิติภายใต้ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จึงกำหนดให้มีการทดลองซ้ำจำนวน 6 ตัวอย่าง ในแต่ละข้อกำหนดและเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการทดสอบและบันทึกผลการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย

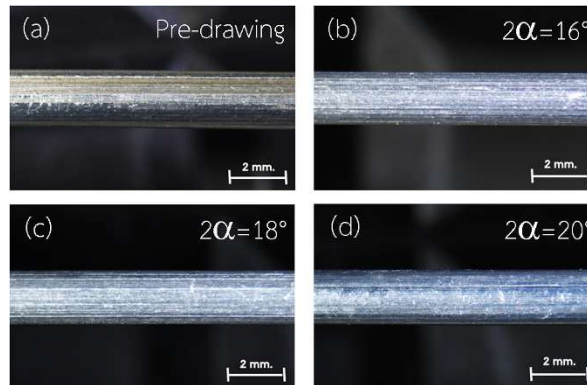
1. ขนาดแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด จากเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Zwick / Z2020 ขนาด 2 ตัน
2. ลักษณะพื้นผิวของเส้นลวดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Stereo Macroscopic)
3. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ของผิวเส้นลวดหลังการดึงขึ้นรูป ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเป็นค่าความสูงเฉลี่ยจากเส้นกึ่งกลางของรอยสูงต่ำบนพื้นผิวเส้นลวด
4. ค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดลองดึงขึ้นรูปเส้นลวดอลูมิเนียม พบว่าขนาดมุมไหลเข้าของตาย ความเร็วดึงลวด และชนิดสารหล่อลื่นส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งผลการทดลองประกอบไปด้วย

3.1 ลักษณะพื้นผิวเส้นลวดสำเร็จ

จากผลการดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด สามารถดึงขึ้นรูปลวดได้สำเร็จและการดึงลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะได้เส้นลวดมีความหยาบผิวสูง ในขณะที่การดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดมุม สามารถดึงลวดได้สำเร็จและได้เส้นลวดซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 5

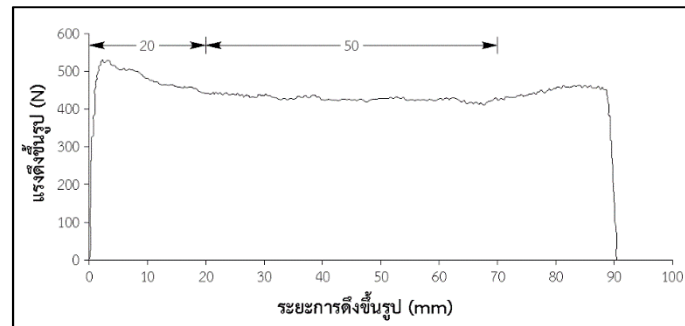


รูปที่ 5 ลักษณะเส้นลวด (a) ก่อนการดึงขึ้นรูป และเส้นลวดจากการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุม (b) $2\alpha=16^\circ$ (c) $2\alpha=18^\circ$ และ (d) $2\alpha=20^\circ$

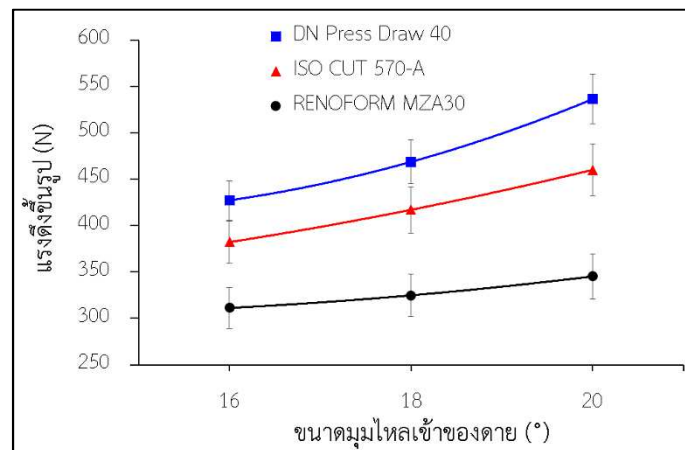
จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะของพื้นผิวเส้นลวด ก่อนและหลังการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่น DN Press Draw 40 ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร/วินาที ผ่านตายที่มีขนาดมุมต่างกัน โดยรูปที่ 5 (a) แสดงลักษณะของพื้นผิววัตถุดิบเส้นลวดก่อนการดึงขึ้นรูป ส่วนรูปที่ 6 (b) เป็นลักษณะพื้นผิวเส้นลวดสำเร็จจากการดึงผ่านตายที่มีขนาดมุม 16° ซึ่งพบว่าเส้นลวดมีความหยาบผิวสูงเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มขึ้นที่ 18° และ 20° จะส่งผลให้ความหยาบผิวของเส้นลวดลดลงดังรูปที่ 6 (c) และ (d) เนื่องจากเมื่อมุมไหลเข้าของตายทำมุมกับทิศทางการไหลของเส้นลวดมากขึ้น จะเกิดผลกระทบจากแรงเฉือนรูดันแดนที่สูงซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นต่ำลง ก่อให้เกิดการสัมผัสโดยตรงของพื้นผิวโลหะ (Metal to metal contact) ส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีความหยาบผิวต่ำลง (ผิวเรียบขึ้น) สอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเส้นลวด เนื่องจากเส้นลวดที่ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนรูดันแดนที่สูงและมีความเสียดทานบริเวณพื้นผิวสัมผัสสูงด้วยนั้น จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับทฤษฎีคุณภาพพื้นผิวในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด [17]

3.2 แรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด

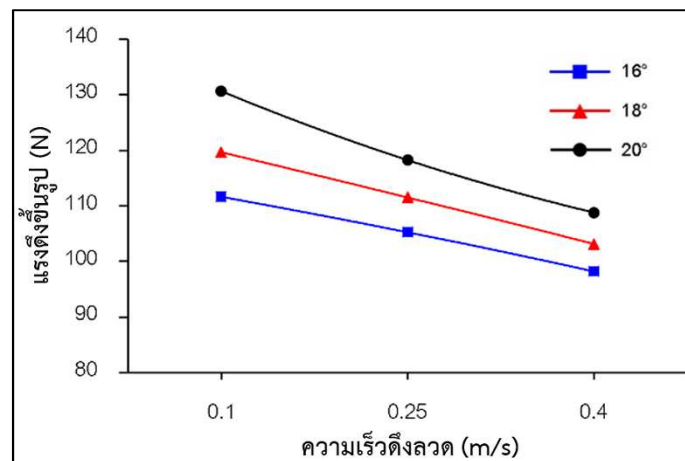
ผลการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมต่างกันพบว่า ตัวอย่างแรงในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° โดยใช้สารหล่อลื่นชนิด DN Press Draw 40 แสดงในรูปที่ 6 ส่วนการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดอื่นจะมีลักษณะของกราฟที่คล้ายกัน ซึ่งระยะการดึงลวดทั้งหมดที่นำมาพิจารณาแรงในการดึงลวดคือระยะ 90 มม. ซึ่งเริ่มวัดจากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงระยะ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดึงเกิดขึ้นสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงที่เส้นลวดเริ่มถูกดึงเข้ามาในแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วทำให้มีลักษณะของการกระแทกเกิดขึ้น จากนั้นในช่วง 50 มม. ต่อมาจะเห็นได้ว่าช่วงนี้จะเป็นระยะที่แรงดึงมีแนวโน้มคงที่มากที่สุดในทุกสารหล่อลื่นจึงเลือกใช้เพื่อนำมาหาเป็นค่าเฉลี่ยของแรงในการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า ด้วยความเร็ว และใช้ชนิดของสารหล่อลื่นที่แตกต่างกันซึ่งในช่วงท้ายของการดึงขึ้นรูปจะพบว่าแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการโค้งงอของปลายเส้นลวดจากผลการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ไม่เท่ากันจึงส่งผลให้แรงดึงในช่วงปลายเส้นลวดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายขนาดมุมไหลเข้า 16° และใช้สารหล่อลื่นชนิด DN Press Draw 40



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด



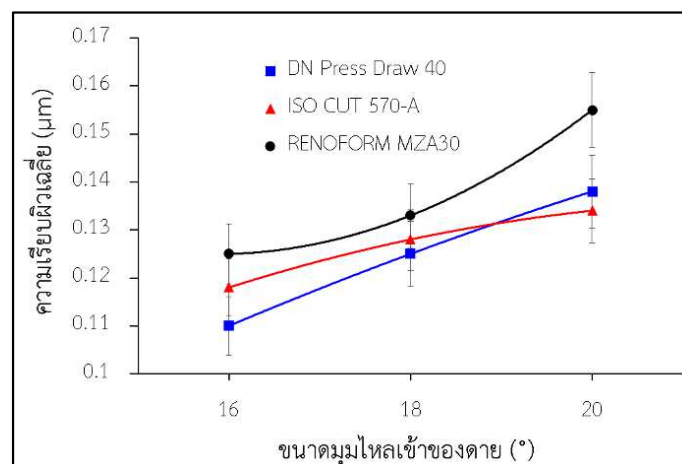
รูปที่ 8 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ผลการวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตายที่มีขนาดมุม ค่าความเร็วในการดึงลวด และใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ พบว่าขนาดแรงดึงขึ้นรูปจะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของมุมตาย ดังรูปที่ 7 กล่าวคือขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมตายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดของมุมตายส่งผลโดยตรงต่อแรงเฉือนรีดดันตันตัน ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงขึ้นรูปในสมการที่ 1 และค่าแรงดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณค่ารีดดันตันตันแฟกเตอร์ (Φ) ดังสมการที่ 4 เนื่องจากเมื่อขนาดมุมไหลเข้าหรือค่าความลาดเอียงของตายมากขึ้นจะ

ส่งผลให้เส้นลวดไหลตัวได้ยากและแรงเฉือนรีตันแดนท์เพิ่มสูงขึ้น [18] อีกทั้งขนาดของมุมตายที่เพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสมีแนวโน้มลดลง [19] จึงส่งผลทำให้ต้องใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Siebel [13] ส่วนผลกระทบของสารหล่อลื่น พบว่าขนาดขนาดของแรงดึงจะแปรผกผันกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น กล่าวคือขนาดของแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าทำการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงขึ้น เนื่องจากชนิดและค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวเส้นลวดและผิวแม่พิมพ์ขณะทำการดึงขึ้นรูปเท่านั้น ส่วนรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Wire drawing stress) จะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของการดึงขึ้นรูป [2] อีกทั้งการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น เนื่องจากเส้นลวดถูกดึงผ่านตายด้วยความเร็วสูงส่งผลให้การเกาะติดของหล่อลื่นกับเส้นลวดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงส่งผลให้ใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปเส้นลวดลดลง

3.3 ค่าความหยาบผิวเส้นลวดสำเร็จ

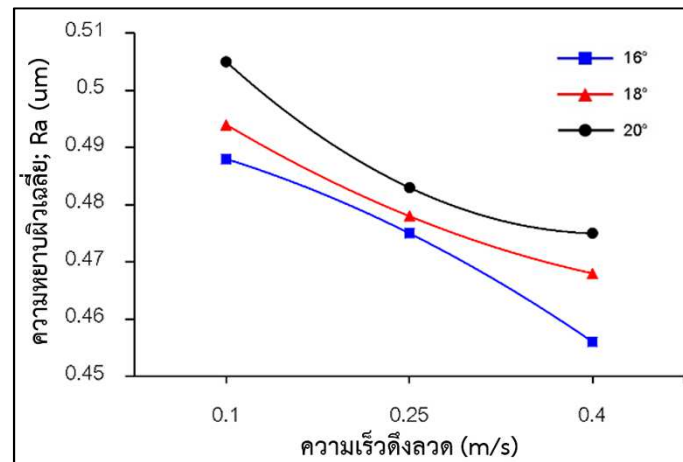
เส้นลวดสำเร็จที่ได้จากกระบวนการดึงขึ้นรูป จะถูกนำไปวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ในแนวเส้นรอบวง ซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับทิศทางการขึ้นรูป ทำให้ได้รายละเอียดของผิวเส้นลวดโดยรวมได้ดีกว่าโดยเฉพาะหากเกิดการขูดขีดบริเวณผิวลวด โดยผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวลวดแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเส้นลวด

จากผลการทดลองรูปที่ 9 พบว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นลวดวัตถุดิบก่อนการดึงขึ้นรูป และค่าความหยาบผิวที่วัดได้ยังมีความสอดคล้องกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เส้นลวดสำเร็จมีค่าความหยาบผิวสูงขึ้น โดยสารหล่อลื่น DN Press Draw 40 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำสุดจะให้เส้นลวดที่มีผิวเรียบที่สุด เนื่องจากสารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดน้อยจะส่งผลให้ฟิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความหนาน้อยเช่นกัน [18,19] จึงทำให้เกิดกลไกการถ่ายผิว จากการสัมผัสโดยตรง (Metal to metal contact) ระหว่างผิวเส้นลวดและพื้นผิวดาย อีกทั้งยังพบว่าเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้าแคบ (Narrow angle) จะมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำกว่าการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมทางไหลเข้าขนาดใหญ่ (Wide angle) เนื่องจากการค่อย ๆ ลดลงของขนาดของเส้นลวด จากการกำหนดขนาดมุมลาดเอียงน้อยจะส่งผลให้เส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีพื้นผิวสัมผัสในส่วนการขึ้นรูปของเส้นลวดและพื้นผิวดายมากกว่า ดังรายละเอียดผลการทดลองซึ่งพบว่าพื้นผิวเส้นลวดที่

ถูกดึงผ่านตายขนาดมุม 16° จะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด (เรียบที่สุด) และเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านตายขนาดมุม 20° จะมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสูงที่สุด (หยาบที่สุด)

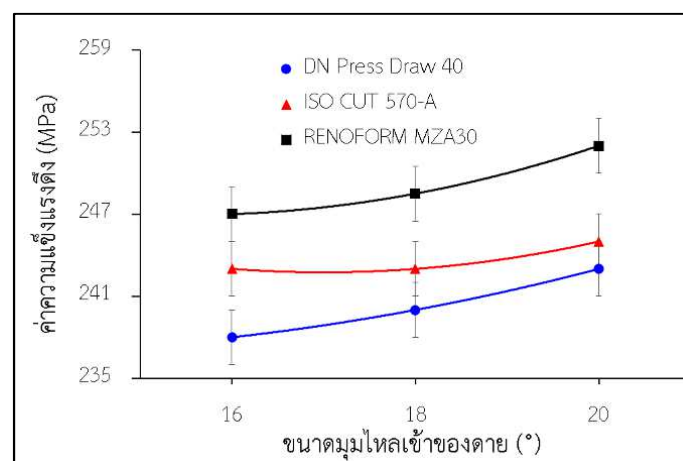


รูปที่ 10 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวเส้นลวด

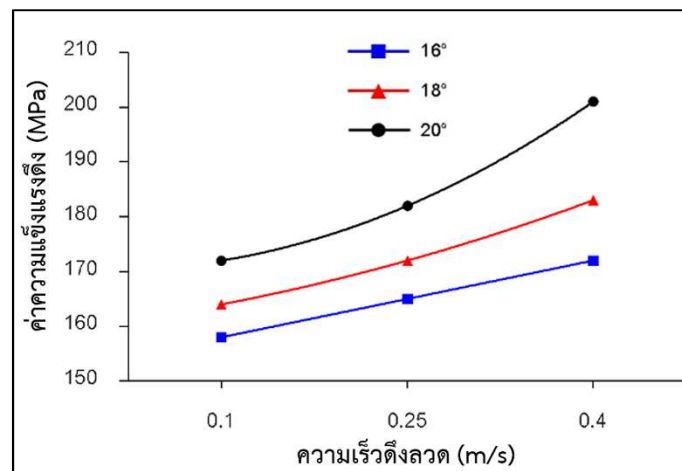
จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งพบว่าค่าความหยาบผิวของเส้นลวดจะมีแนวโน้มลดลง (เรียบขึ้น) เมื่อถูกดึงด้วยความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [20] เนื่องจากความเร็วในการดึงลวดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการยึดเกาะของน้ำมันหล่อลื่นบนเส้นลวด โดยเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านตายซึ่งมีขนาดมุมไหลเข้า 16° ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวต่ำที่สุด (ผิวเรียบที่สุด) และเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านตายขนาดมุมไหลเข้า 20° ด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที จะมีค่าความหยาบผิวสูงที่สุด (ผิวหยาบที่สุด)

3.4 สมบัติทางกลเส้นลวดสำเร็จ

ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า ค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป และใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการดึงขึ้นรูปผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง และใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดเพิ่มมากขึ้น ดังผลการทดลองรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเส้นลวด



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลกระทบของความเร็วดึงลวดที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเส้นลวด

ผลการทดลองรูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (UTS) หรือค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จ จะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของตาย ค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป และค่าความหนืดของสารหล่อลื่น โดยค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดโตขึ้น เนื่องจากขนาดมุมไหลเข้าของตายที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบบริดจ์และคานต์และความเค้นตกค้างในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ของสมการที่ (2) นอกจากนี้ผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [21] ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent) ของเส้นลวดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของตายเพิ่มสูงขึ้น และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกดึงด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลทำให้การเปลี่ยนรูปของเนื้อวัสดุเกิดขึ้นด้วยระยะเวลาสั้น วัสดุมีเวลาในการจัดเรียงตัวของเกรนจำกัดจึงส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ค่าความเครียดแข็งและค่าความแข็งแรงของเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะส่งผลให้เส้นลวดไม่เกิดการสัมผัสโดยตรงกับผิวตาย ค่าความร้อนที่พื้นผิวสัมผัสจึงเพิ่มขึ้นน้อยและเส้นลวดสำเร็จมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง

4. สรุป

1. ขนาดมุมตายที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ต้องใช้แรงในการดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผกผันกับขนาดมุมไหลเข้าของตาย และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามขนาดมุมไหลเข้าของตาย
2. ความเร็วในการดึงลวดที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อแรงดึงลวดและคุณภาพเส้นลวดสำเร็จ ซึ่งพบว่าแรงดึงขึ้นรูปจะแปรผกผันกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป โดยขนาดของแรงดึงขึ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการดึงลวดที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะได้เส้นลวดที่มีความเรียบผิวที่ดีกว่า และค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จจะแปรผันตามความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด
3. การดึงขึ้นรูปเส้นลวดโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำ ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงกว่าการใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูง เส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำจะมีค่าความหยาบผิวต่ำกว่า ส่วนเส้นลวดสำเร็จที่ได้จากการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าจากความเป็นเนื้อเดียวกันของเส้นลวด
4. จากผลการทดลองของการวิจัยนี้เพื่อการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสม ผู้วิจัยเสนอแนะให้ใช้ขนาดมุมตายต่ำสุดที่ 16° และทำการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงสุดที่ 0.4 เมตร/วินาที โดยใช้สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูง เนื่องจากจะส่งผลดีต่อคุณภาพผิวเส้นลวดและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลน้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่มีส่วนช่วยในการทำงานและเก็บผลการทดลอง ทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Viktor. “Steel Wire Production by Cold Drawing”, *Hochschule Anhalt*. Vol. 1, 2010, pp. 70-83.
- [2] G. FEDORKO, V. MOLNÁR, N. HUSÁKOVÁ, M. WEISZER. “Analysis of forces in steel wire rope of mining hoisting machine passing sheave”, *In: 4th Balkan Mining Congress: 18th-20th October 2011, Ljubljana, 2011*, pp. 235-238.
- [3] J. BOROŠKA, V. MOLNÁR, G. FEDORKO, “Vplyv priemeru drôtu ocelového lana na jeho skutočné napätie”, *Doprava a logistika*, Vol. 8, 2005, pp. 5-15.
- [4] G. Vega, A. Haddi, A. Imad, “Temperature effects on wire-drawing process: Experimental investigation”, *International Journal of Material Forming*, 2009, : DOI: 10.1007/s12289-009-0468-y
- [5] F.A.Hashim, S.M.Ihmoood, K.A. Mohammed, “Microstructural Investigation of Wire Failure in Wire Drawing Process”, *University of Thi-Qar Journal*, Vol.14 (1), 2019, pp. 53-62.
- [6] U.S. Dixit, P.M. Dixit, “An analysis of the steady-state wire drawing of strain hardening materials”, *Journal of Material Process Technology*, Vol. 47, 1995, pp. 201–29.
- [7] M. Suliga, R. Kruzel, T. Garstka. (2015). “The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires”, *J. Gazdowicz Metalurgija*, Vol. 54, pp. 161–164.
- [8] S. M. Byon, S. J. Lee, D. W. Lee, Y. H. Lee, and Y. Lee, “Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China English Ed.*, vol. 21(1), 2011, pp. s104–s110.
- [9] S.M. Dhaher, “Preparation of Dry Solid Lubricant for Drawing of Welding Steel Wires from Local Iraqi Materials,” *Al - Mustansiriya J. Sci*, vol. 20 (5), 2009, pp. 28–34.
- [10] M. T. Hillery and V. J. McCabe, “precessh g Materials Wire drawing at elevated temperatures using different die materials and lubricants IAVOmeter Pyrometer,” *J. Mater. Process. Technol*, vol. 55, 1995, pp. 53–57.
- [11] S. M. Hafis, M. J. M. Ridzuan, A. Rahayu, Mohamed, R. N. Farahana, and S. Syahrullail, “Minimum quantity lubrication in cold work drawing process: Effects on forming load and surface roughness,” *Procedia Eng.*, vol. 68, 2013, pp. 639–646.
- [12] E.K. Saied, N.I. Elzeiny, H.T. Elmetwally, A.A. Abd-Eltwab, “An Experimental Study of Lubricant Effect on Wire Drawing Process”, *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29 (1), 2020, pp. 560–568.
- [13] E. Siebel, R. Kobitzsch, “Die Erwärmung des Ziehgutes beim Drahtziehen”. *Stahl U. Eisen*(63), 1943, pp. 110-113.

- [14] G. Vega , A. Haddi, A. Imad, “Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation”, *Int. J. Mater.* Vol.2, 2009, pp. 229–232.
- [15] M. Suliga, R. Kruzel, T. Garstka, “The influence of drawing speed on structure changes in high carbon steel wires”, *J. Gazdowicz, Metalurgija*, Vol.54, 2015, pp. 161–164.
- [16] A.F. Gutsol, “Improving ASTM D445, the Manual Viscosity Test, by Video Recording”, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 47 (1), 2019, pp. 310-323.
- [17] J.Larsson, A. Jansson, P.Karlsson, “Monitoring and evaluation of the wire drawing process using thermal imaging” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.101, 2019, pp. 2121–2134.
- [18] Z. Muskalski, S. Wiewiórowska, “The Theoretical Analysis of Wire Drawing Process for Hydrodynamic Friction Conditions” *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3 (7), 2011, pp. 74-78.
- [19] E.K. Saied, N.I. Elzeiny, H.T. Elmetwally, A.A. Abd-Eltwab, “An Experimental Study of Lubricant Effect on Wire Drawing Process”, *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29 (1), 2020, pp. 560 – 568.
- [20] M. Suliga, “The influence of drawing speed on surface topography of high carbon steel wires”, *Metalurgija*, Vol. 56, 2017, pp. 182–184.
- [21] M.M. Mahdavi, H. Haghighat, “On the Optimum Die Angle in Rod Drawing Process Considering Strain-hardening Effect of Materia” *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 20(1), 2019, pp.113-128.