



ปัจจัยที่เหมาะสมในการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำเร็จ Stainless Wire Drawing Process Factors Affecting Finished Wire Quality

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}

Received: January, 2017; Accepted: May, 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้ ทำการศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์และความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวและคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดก่อนการดึง 2 มิลลิเมตร ถูกดึงขึ้นรูปผ่านคายที่เคลือบผิวแข็งด้วย TiC ใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันหล่อลื่น SAE40 ด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 10 ขนาดมุมไหลเข้า (2α) ของแม่พิมพ์มี 3 ขนาด คือ 16 18 และ 20° ดึงขึ้นรูปด้วยความเร็ว 4 ระดับ คือ 10 30 60 และ 90 มิลลิเมตรต่อวินาที ตรวจสอบสมมุติฐานและวิเคราะห์ผลจากการทดลองพบว่า ความเรียบผิวเส้นลวดสำเร็จและแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ ขนาดมุมไหลเข้าของคาย ส่วนปัจจัยรองคือ ความเร็วในการดึงขึ้นรูป ซึ่งการดึงขึ้นรูปผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็กจะได้เส้นลวดที่มีพื้นผิวเรียบและมีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นสูง ส่วนการดึงขึ้นรูปผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ได้เส้นลวดที่มีผิวหยาบ ปรากฏรอยแตกขนาดเล็กบนพื้นผิวลวด ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นน้อยกว่า และการดึงขึ้นรูปเส้นลวดด้วยความเร็วสูงจะได้เส้นลวดที่มีพื้นผิวเรียบและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม คือ การเลือกใช้คายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก (16°) และทำการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูง (90 มิลลิเมตรต่อวินาที) เพราะใช้แรงในการดึงขึ้นรูปค่อนข้างต่ำ พื้นผิวเส้นลวดสำเร็จมีแนวโน้มที่เรียบขึ้น และมีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นมากที่สุด

คำสำคัญ : การดึงลวด; มุมไหลเข้าแม่พิมพ์; ความเร็วดึงลวด; เส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

¹ Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

* Corresponding Author E - mail Address: natthasak.por@rmutr.ac.th

Abstract

This research aimed to investigate the influences of die approach angle and wire drawing speed on the performances of stainless steel wire drawing process. The specimen material used in the experiment was SUS304 Stainless steel wire, having the outer diameter of 2 mm. The die was TiC coating. The lubricant oil SAE 40 grade, were used in the experiment. The reduction ratio of the cross sectional area was set to be constant at 10 percentages. The die approach angle (2α) were 16, 18, and 20°, and the pulling speed was 10, 30, and 90 mm/min, respectively. The results of drawing forces, surface roughness, surface photography and tensile mechanical property of the drawn wires were recorded and analyzed. It was found from the results that in the drawing force and the wire surface roughness, based on, the main factor was die approach angle, and the minor factor is the drawing or pulling speed. From the results of the case of using lower die approach angle, the forces required were lower and the surface integrity of the wires was also lower than that of the larger die approach angle, the surface of the wires was also rough and micro cracks appear. And additional on high pulling speed, the surface of the wires is smoother and higher tensile strength. Further, the die with approach angle of 16° and pulling speed of 90 mm./min, provided the drawn wire with the best surface quality minimum drawing force and required maximum tensile strength.

Keywords: Wire Drawing; Die Angle; Drawing Speed; Stainless Steel Wire

บทนำ

การผลิตเส้นลวดหรือท่อโลหะ เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยการลดขนาดหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพื้นที่หน้าตัด โดยใช้หลักการของการเปลี่ยนรูปถาวรเพื่อการขึ้นรูปโลหะแบบเส้น เรียกว่า กระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวด (Wire Drawing Process) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งหลอด ท่อ และแบบเส้น เป็นต้น การผลิตเส้นลวดด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากให้อัตราผลผลิตสูง สามารถควบคุมขนาดได้ง่าย เส้นลวดที่ได้มีคุณภาพผิวที่ดีและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น วิธีการดึงขึ้นรูปจึงถูกใช้เพื่อการผลิตเส้นลวดหลากหลายชนิด เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตสายส่งไฟฟ้า สายเคเบิล สายสลิง สปริง และอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น กระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเริ่มต้นจากการใช้แรงดึงที่ส่วนปลายของเส้นลวดหรือแท่งวัสดุให้ไหลตัวผ่านช่องว่างของดายรูปทรงกรวย ซึ่งส่วนใหญ่จะกระทำที่อุณหภูมิห้อง (การขึ้นรูปเย็น) แต่ในบางลักษณะงานจะทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (การขึ้นรูปร้อน) ในกรณีที่วัสดุมีความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการยืดตัวต่ำหรือต้องใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูง เช่น การผลิตเส้นลวดจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง หรือการผลิตสายไฟที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ในการขึ้นรูปเส้นลวดจะถูกดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูง มีความเสียดทานระหว่างพื้นผิวของดายและผิวชิ้นงาน

เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้คายมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของคาย รวมทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพผิวและคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดที่ได้อีกด้วย [1] ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการดึงขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นชุดคายอยู่ตลอดเวลาหรือให้ชุดคายจมอยู่ในสารหล่อลื่น เพื่อลดแรงเสียดทานและความร้อนจากการขึ้นรูป

ปัจจุบันชนิดของเส้นลวดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลากหลายชนิด เช่น เส้นลวดทองแดง เส้นลวดอลูมิเนียม และเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในลักษณะงานที่แตกต่างกัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่น คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิม มีพื้นผิวสวยงาม มีความแข็งแรงสูง และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรงและคุณสมบัติด้านความเครียดแข็ง [2] จึงเป็นองค์ประกอบหลักที่ถูกนำไปพิจารณาเพื่อการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดเงื่อนไขในการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสม ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเส้นลวด ขนาดมุมไหลเข้าของคาย วิธีการหล่อลื่น ชนิดสารหล่อลื่น ความเร็วในการดึงขึ้นรูป และอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด เป็นต้น ที่ผ่านมามีนักวิจัยได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดไว้อย่างหลากหลาย โดยใช้เทคนิคและการวิเคราะห์ผลที่แตกต่างกัน เช่น วิธีการวิจัยเชิงทดลอง วิธีการอัปเปอร์บาวนด์ (Upper Bound Method) และวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น ทั้งนี้การออกแบบคายเพื่อการดึงขึ้นรูปนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูง เพราะส่งผลโดยตรงต่อค่าพลังงานในการขึ้นรูปและพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเส้นลวด เช่น มีการศึกษาเทคนิคในการออกแบบรูปทรงของคายเพื่อลดความเครียดในกระบวนการอัดและดึงขึ้นรูปเส้นลวดที่มีรูปร่างไม่สมมาตร เพื่อลดแรงในการดึงขึ้นรูป [3] ปัญหาที่พบในเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมภายหลังการดึงขึ้นรูป คือ มักมีการแตกร้าวหรือจุดบกพร่องเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุและบนพื้นผิวภายนอกของเส้นลวดจากพฤติกรรมการไหลตัวของเส้นลวดขณะขึ้นรูป ซึ่งส่งผลให้อัตราการผลิตและคุณภาพของเส้นลวดลดลง แม้ว่าจุดบกพร่องหรือรอยตำหนิบนพื้นผิวลวดจะมีขนาดเล็กแต่จะเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ตามมาและนำไปสู่การฉีกขาดของเส้นลวดเมื่อนำไปใช้งานหรือเมื่อเส้นลวดเกิดความเครียดจากการใช้งาน Sadok L., Luksza J. and Majta J. [4] ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมภายหลังการดึงขึ้นรูป ด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ 5.7 - 24.4 % โดยตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดที่ได้ด้วยการทดสอบแรงดึง โดยใช้ขึ้นทดสอบพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ซึ่งถูกตัดออกจากเส้นลวดที่ได้ในทิศทางกับแนวแกน Cao T.S., Vachey C., Montmitonnet P. and Bouchard P.O. [5] ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อคุณภาพและความเสียหายของพื้นผิวเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม โดยวิธีการทดลองและวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ นักวิจัยบางส่วนได้ทำการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปและชนิดของสารหล่อลื่นในกระบวนการดึงลวด เช่น Suliga M. [6] ได้ทำการศึกษาถึงค่าความเร็วที่ส่งผลต่อแรงกดอัดและประสิทธิภาพของการหล่อลื่น ในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งพบว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการหล่อลื่น เส้นลวดมีขนาดเที่ยงตรงและคุณภาพผิวดีขึ้น Dalmau A., Rmili W., Richard C. and Igual-Muñoz A. [7] ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของสารหล่อลื่นชนิด 3%NaCl ในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิกชนิดใหม่และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวเส้นลวดและการสึกหรอของคาย เป็นต้น

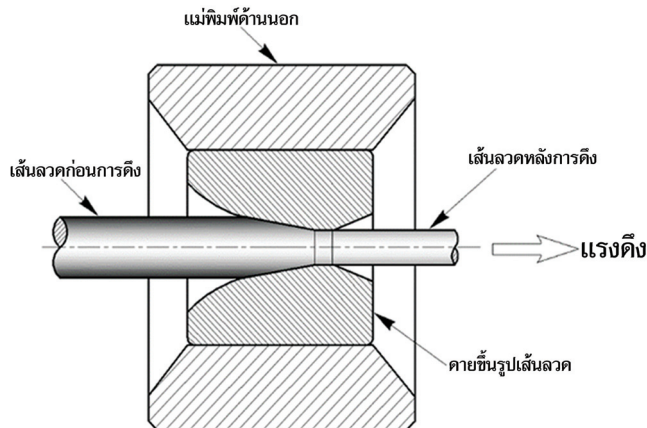
จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีปัจจัยหลากหลายที่จะส่งผลต่อคุณภาพผิว คุณสมบัติทางกลและความเสียหายของเส้นลวดสำเร็จที่ผ่านการดึงขึ้นรูป โดยเฉพาะปัจจัยเกี่ยวกับการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าของด้ายและค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป เนื่องจากขนาดมุมไหลเข้าของด้ายจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อความเค้นภายในและประสิทธิภาพในการไหลตัวของเส้นลวด ส่วนความเร็วในการดึงขึ้นรูปเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการหล่อลื่น ค่าความเสียหายของพื้นผิวสัมผัสบริเวณของมุมไหลเข้าของด้าย และค่าความเค้นตกค้างของเส้นลวด ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์และการกำหนดความเร็วสำหรับการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสม จึงเป็นการควบคุมปริมาณและการกระจายตัวของความเค้นจากการขึ้นรูปให้มีความเหมาะสมและอยู่ในสภาวะสมดุล [8] เนื่องจากความเค้นและความเสียหายจากการขึ้นรูปจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลและคุณภาพผิวของเส้นลวดที่ได้ ดังนั้นการควบคุมแรงกระทำบริเวณพื้นผิวสัมผัสและค่าความเค้นภายในของวัสดุให้มีค่าต่ำที่สุด จะส่งผลดีต่อคุณภาพเส้นลวดสำเร็จและช่วยให้การออกแบบแม่พิมพ์ดึงลวดมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับข้อกำหนดในการออกแบบแม่พิมพ์และเงื่อนไขที่สำคัญในกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อให้ได้เส้นลวดที่มีพื้นผิวเรียบและมีความแข็งแรงสูงที่สุด โดยจะมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้า (Approach Angle) ของด้ายและความเร็วในการดึงขึ้นรูป (Drawing Speed) เนื่องจากขนาดมุมไหลเข้าของด้ายเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อค่าความเค้นจากการเปลี่ยนรูปและประสิทธิภาพการไหลตัวของวัสดุ ส่วนค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการหล่อลื่นและความเสียหายขณะขึ้นรูป ทั้งนี้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาวิจัยได้เสนอแนะขนาดมุมไหลเข้าของด้าย (2α) สำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมไว้ในช่วง $14 - 18^\circ$ และอัตราการขึ้นรูปร้อยละ $10 - 15$ [9] ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของขนาดมุมไหลเข้าที่เด่นชัด จึงได้กำหนดค่ามุมไหลเข้าที่มีขนาดใหญ่ที่ 3 ขนาด คือ 16° , 18° และ 20° ตามลำดับ รวมทั้งเพื่อศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบผลกระทบของความเร็วในการดึงขึ้นรูป จึงกำหนดค่าความเร็วที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 10 30 60 และ 90 มิลลิเมตร/นาที ตามลำดับ ทำการทดสอบการดึงขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นชนิด SAE40 และกำหนดอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 10 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดมุมไหลเข้าและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยจะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากค่าแรงดึงขึ้นรูป ค่าความเรียบผิว ลักษณะพื้นผิวเส้นลวด และคุณสมบัติทางกลของเส้นลวด ก่อนและหลังการดึงขึ้นรูป เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขการดึงขึ้นรูปเส้นลวดที่เหมาะสมต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. กระบวนการดึงลวด (Wire Drawing Process)

เป็นกรรมวิธีในการลดขนาดหรือเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด โดยการใช้แรงดึงที่ส่วนปลายของเส้นลวดให้ไหลตัวผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ส่งผลให้เส้นลวดเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะและขนาดของเส้นลวดที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับรูหรือช่องว่างของด้ายสำหรับขึ้นรูปเส้นลวดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การดึงลวดผ่านชุดแม่พิมพ์ดึงลวด

ขณะทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจะเกิดแรงกระทำหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วย แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal Deformation Force) แรงเฉือนหรือแรงเฉือนรีดันแดนท์ (Redundant Shearing Force) และแรงเสียดทาน (Friction Force) บนพื้นผิวสัมผัสของเส้นลวดและคายนั่นในการคำนวณค่าแรงเพื่อการดึงขึ้นรูปเส้นลวดจึงต้องพิจารณาจากแรงกระทำทั้ง 3 ส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีของไซเบล (Siebel's Method) ดังสมการที่ (1) [10]

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

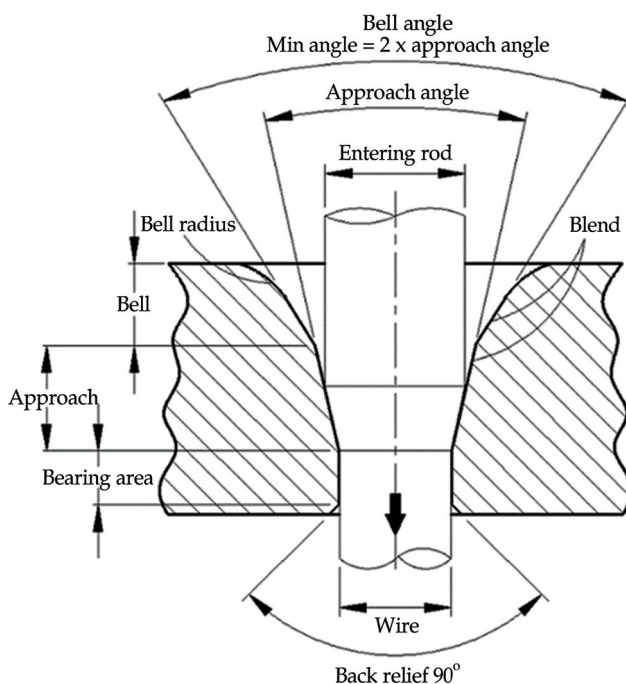
เมื่อ

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

นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ทฤษฎีการสมดุลทางแรงในการวิเคราะห์แรงกระทำขณะขึ้นรูปเพื่อการออกแบบแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขกระบวนการดึงลวดที่เหมาะสม เนื่องจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและความเสียหายที่อาจเกิดกับเส้นลวด [11] ซึ่งตามหลักการของการขึ้นรูป ค่าความเค้นของเส้นลวดที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปจะต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของเส้นลวดหรือแท่งวัสดุดิบเริ่มต้น เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกหักหรือการเปลี่ยนรูปที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในทางปฏิบัติจะจำกัดค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ไว้ไม่เกินร้อยละ 60 ของความเค้นไหลวัสดุเส้นลวด (Flow Stress) [12]

2. มุมไหลเข้า (Approach Angle)

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดหรือแบบแท่ง วัตถุจะถูกดึงให้ไหลตัวผ่านตาย ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยในช่วงเริ่มต้นของการขึ้นรูป เส้นลวดจะถูกดึงให้ไหลตัวต่อเนื่องไปตามผนังทรงกรวยของตาย ซึ่งเรียกว่า มุมไหลเข้า (Approach Angle) ขนาดของเส้นลวดจะค่อย ๆ ลดลงตามลักษณะของทรงกรวย เส้นลวดสำเร็จจะมีขนาดเท่ากับส่วนปลายสุดของทรงกรวยและขนาดของส่วนควบคุมขนาด (Bearing Area) ซึ่งส่วนนี้จะไม่มีความเครียดหรือความเค้นอัดเกิดขึ้นกับเส้นลวด เพื่อควบคุมคุณภาพพื้นผิวเส้นลวดและลดแรงเสียดทานขณะทำการดึงขึ้นรูป สารหล่อลื่นจะถูกเติมเข้าไปในตำแหน่งพื้นที่ผิวโค้งทรงระฆัง (Bell Radius) ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของเส้นลวดจากการดึงขึ้นรูป ซึ่งสารหล่อลื่นจะถูกดึงเข้าไปในพื้นที่ของมุมไหลเข้าทรงกรวย ซึ่งเป็นส่วนของการขึ้นรูป เพื่อลดแรงเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสขณะขึ้นรูป ซึ่งในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดโดยทั่วไปจะกำหนดขนาดของมุมไหลเข้าของตาย (2α) ไว้ในช่วง $8 - 20^\circ$



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของตายสำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด [12]

3. อัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดหรืออัตราการขึ้นรูปเส้นลวด (Wire Drawing Ratio)

อัตราการขึ้นรูปเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป ซึ่งในอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปเส้นลวดได้กำหนดอัตราการขึ้นรูปของเส้นลวดในแต่ละขั้นตอนไว้ไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากมุมไหลเข้าของตาย (Approach Angle) และอัตราการดึงขึ้นรูป (Drawing Ratio) เป็นส่วนที่มีความสำคัญและเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปสมัยใหม่จึงได้รวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดมุมไหลเข้าและอัตรา

การลดลงของพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม เรียกว่า เดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ซึ่งค่าที่เหมาะสมถูกกำหนดไว้ในช่วง 1.5 - 3 หากค่า Δ สูงกว่าช่วงที่กำหนด ชี้ให้เห็นว่าเป็นลักษณะของการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดต่ำและมีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ หากค่า Δ ต่ำกว่าช่วงที่กำหนดจะเป็นการดึงขึ้นรูปด้วยอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดสูงและมีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก [12] ซึ่งค่าของเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2)

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

เมื่อ

α คือ ขนาดครึ่งของมุมไหลเข้า (Approach Semi-Angle)
 r คือ อัตราการดึงขึ้นรูป คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$r = 1 - A_1 / A_0 \quad (3)$$

เมื่อ

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
 A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดสำเร็จของเส้นลวด

4. ผลกระทบของแรงเสียดทาน (Effect of Friction)

ในการออกแบบแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวด หากค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ต่ำกว่าช่วงที่กำหนด จะชี้ให้เห็นว่าเกิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวเส้นลวดและพื้นผิวดายมากเกินไป และหาก Δ มีค่าสูงกว่าช่วงที่กำหนด แสดงว่าเส้นลวดจะได้รับแรงรีดดันแค้นท์หรือค่าความเครียดถาวรเกิดขึ้นมากเกินไป ซึ่งพิจารณาได้จากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเส้นลวด โดยแรงรีดดันแค้นท์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า Δ สูงขึ้น ส่วนแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นสูงหากค่า Δ ลดต่ำลง จากผลกระทบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่า Δ ระดับปานกลางหรืออยู่ในช่วงที่เสนอแนะ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

5. งานรีดดันแค้นท์ของการขึ้นรูป (Redundant Work of Deformation)

การเปลี่ยนรูปรีดดันแค้นท์จะเกิดขึ้นในระหว่างการดึงขึ้นรูป เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ แสดงให้เห็นในรูปของแฟกเตอร์งานรีดดันแค้นท์ (Φ) หรืออัตราส่วนของงานจากการเปลี่ยนรูปถาวรโดยรวมและงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งแฟกเตอร์งานรีดดันแค้นท์ Φ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (4) [12]

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

6. ความเร็วในการดึงลวด (Drawing Speed)

ทฤษฎีปริมาตรคงที่ถูกใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์ผลกระทบของความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยจะกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของเส้นลวดทางเข้าและทางออกของดายมีค่าเท่ากัน เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดมีขนาดลดลงในระหว่างการดึงขึ้นรูป จึงส่งผลให้ความเร็วในการไหลตัวของเส้นลวดที่ตำแหน่งทางออกของดายจึงมีค่ามากกว่าความเร็วทางเข้า ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดให้เหมาะสมกับอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) [12]

$$V_i \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = V_f \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \quad (5)$$

เมื่อ

V_i	คือ	ความเร็วทางเข้า (เมตร/นาที)
V_f	คือ	ความเร็วทางออก (เมตร/นาที)
d_i	คือ	ขนาดเส้นลวดทางเข้า (มิลลิเมตร)
d_f	คือ	ขนาดเส้นลวดทางออก (มิลลิเมตร)

ในกรณีที่ต้องการทำการดึงขึ้นรูปหลายขั้นตอน ค่าความเร็วที่ทางออกของดายแต่ละตัวจะต้องปรับเพิ่มขึ้นเพื่อควบคุมให้อัตราการไหลของเส้นลวดผ่านดายแต่ละตัวเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วหลังจากดึงผ่านดายแต่ละตัว หากไม่มีการควบคุมความเร็วที่เหมาะสมจะส่งผลให้เส้นลวดขาดได้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดมุมดายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวและคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดสำเร็จ ในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 (20Cr-10Ni) ชนิดหน้าตัดกลมขนาดก่อนการดึงขึ้นรูป $\varnothing 2.0$ มิลลิเมตร ความยาวของส่วนการขึ้นรูป 90 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดคุณสมบัติทางกลของเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ISO 6892-1:2009 แสดงดังตารางที่ 1 โดยก่อนการทดลองจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดความโตเส้นลวดด้วยดิจิทัลดไมโครมิเตอร์ (Digital Micrometer) 0 - 25 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ตรวจสอบและบันทึกค่าความเรียบผิวของเส้นลวดเริ่มต้นและความเรียบผิวดาย เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ผล ด้วยเครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Measuring Device) โดยรายละเอียดของวัสดุเริ่มต้น แม่พิมพ์ดึงลวด และเงื่อนไขเพื่อการทดสอบการดึงขึ้นรูปเส้นลวด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

	YS(MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	TE (%)
SUS304	210.79	520.87	173.47	24

ตารางที่ 2 รายละเอียดของวัสดุเส้นลวด แม่พิมพ์ดัดลวดก่อนการดึงขึ้นรูป และเงื่อนไขการดึงขึ้นรูป

รายการ	รายละเอียด	หมายเหตุ
ชนิดของวัสดุ	SUS304 (20Cr-10Ni)	
ขนาดความโตและความยาว	Ø 2 มม. ความยาว 90 มม.	ค่าความยาวเฉพาะส่วนที่มีการขึ้นรูป
ความเรียบผิวเฉลี่ยของเส้นลวดเริ่มต้น	$R_a = 0.1323 \mu\text{m}$.	วัดตามแนวความยาวเส้นลวด
ความเรียบผิวเฉลี่ยผิวตาย	$R_a = 0.0823 \mu\text{m}$.	
ขนาดมุมไหลเข้าของคาย (2α)	16 18 และ 20°	
ความเร็วในการดึงขึ้นรูป	10 30 60 และ 90 มม./นาที	



Die angle (2α) = 16°

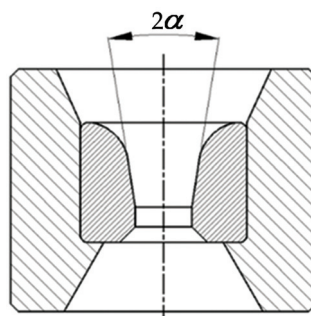


Die angle (2α) = 18°



Die angle (2α) = 20°

(ก) ลักษณะของคายอินเลิร์ต



(ข) มุมไหลเข้าของคาย

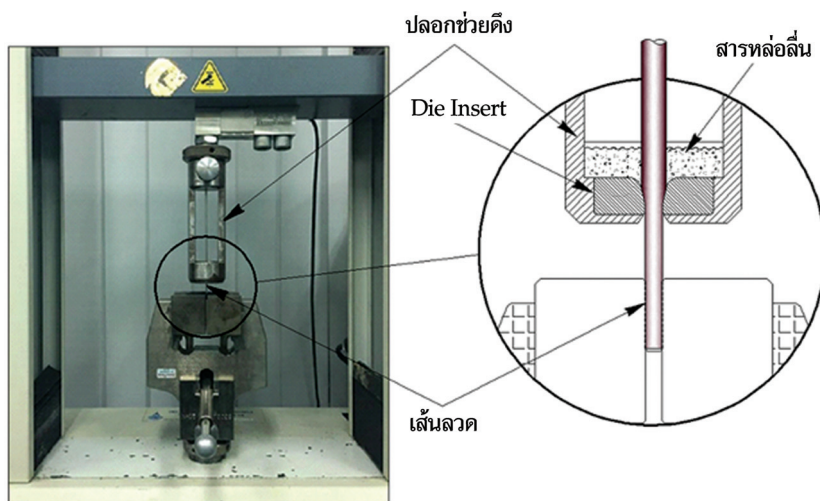
รูปที่ 3 ลักษณะของแม่พิมพ์สำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวด

2. แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดและข้อกำหนดการทดลอง

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเส้นลวดตามมาตรฐาน W103 ส่วนของคายอินเลิร์ต (Die Insert) ทำมาจากทังสเตนคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) ลักษณะดังรูปที่ 3 (ก) ถูกเคลือบผิวแข็งด้วย TiC โดยกรรมวิธี CVD Coating ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

กำหนดขนาดมุมไหลเข้า (2α) 3 ขนาด คือ 16 18 และ 20° ตามลำดับ กำหนดอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละ 10 รายละเอียดการออกแบบคายสำหรับการดึงขึ้นรูปเส้นลวดแสดงดังรูปที่ 3 (ข) ทำการออกแบบและจัดทำอุปกรณ์จับยึดชุดคายหรือบล็อกช่วยดึง เพื่อติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Test ยี่ห้อ Zwick/Z020) ขนาด 2 ตัน และทำการทดสอบการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารหล่อลื่นเกรด SAE40 ซึ่งจะถูกเติมลงในบล็อกช่วยดึงที่ตำแหน่งด้านหน้ามุมไหลเข้าของคาย ดังรูปที่ 4 กำหนดค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูป 4 ระดับ คือ 10 30 60 และ 90 มิลลิเมตร/นาทิต ตามลำดับ

เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผลและได้ข้อมูลที่มีความเชื่อถือทางสถิติภายใต้ความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จึงกำหนดให้มีการทดลองซ้ำจำนวน 6 ตัวอย่าง ในแต่ละข้อกำหนด และเงื่อนไขการทดสอบการดึงขึ้นรูปเส้นลวด โดยจะทำการบันทึกผลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดึงขึ้นรูป ค่าความเรียบผิว ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิว และคุณสมบัติทางกลของเส้นลวด ก่อนและหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4 การติดตั้งชุดทดสอบการดึงขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการเติมสารหล่อลื่น

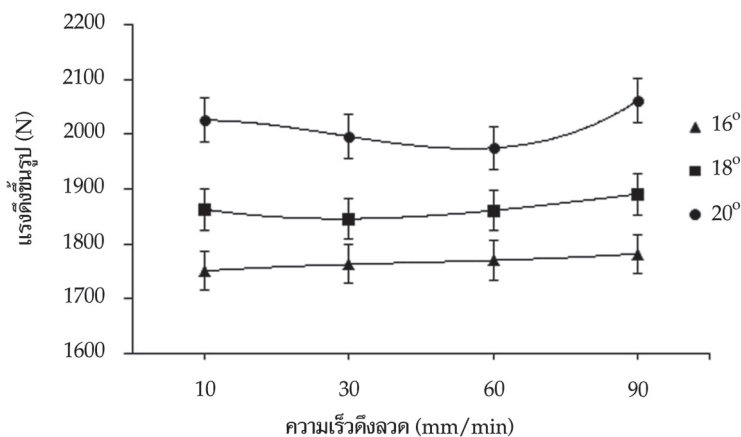
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองตามข้อกำหนดและขอบเขตงานวิจัยของกระบวนการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ที่ขั้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) โดยใช้สารหล่อลื่นเกรด SAE40 เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงขึ้นรูป ความหยาบผิว และคุณสมบัติทางกลเส้นลวดหลังการขึ้นรูป และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบคายและกำหนดเงื่อนไขด้านความเร็วในการดึงลวดที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

1. อิทธิพลของขนาดมุมคายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวด

ผลการวัดและเปรียบเทียบค่าแรงดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าแรงดึงขึ้นรูปแปรผันตามขนาดของมุมคาย (2α) และความเร็วในการดึงขึ้นรูป และพบว่าการดึงขึ้นรูปที่ขนาดมุมคาย 20° ด้วยความเร็วสูงสุด (90 มิลลิเมตร/นาทิต) ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุด และการดึงขึ้นรูป

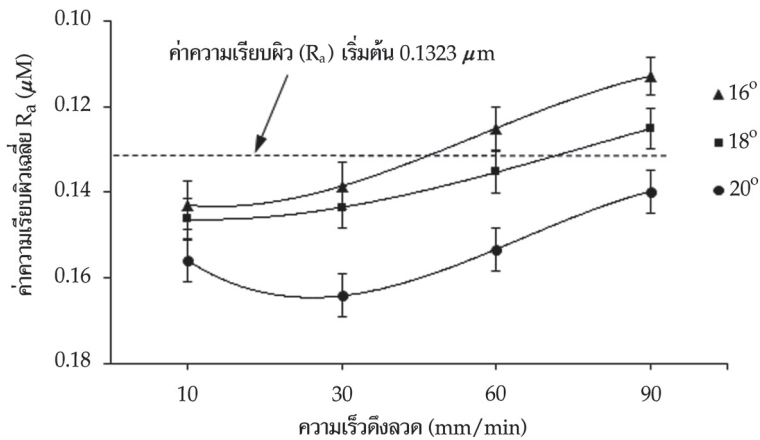
ที่ขนาดมุมคาย 16° ด้วยความเร็วต่ำสุด (10 มิลลิเมตร/นาที) ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปน้อยที่สุด เนื่องจากขนาดของมุมคายส่งผลโดยตรงต่อแรงเฉือนรีดันแดนท์ ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงขึ้นรูปในสมการที่ (1) และค่าแรงดึงขึ้นรูปจากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณค่ารีดันแดนท์แฟกเตอร์ (Φ) ดังสมการที่ (4) [12] เนื่องจากเมื่อขนาดมุมไหลเข้าหรือค่าความลาดเอียงของคายมากขึ้น จะส่งผลให้เส้นลวดไหลตัวได้ยากและแรงเฉือนรีดันแดนท์เพิ่มสูงขึ้น [9] อีกทั้งขนาดของมุมคายที่เพิ่มสูงขึ้น ยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสมีแนวโน้มลดลง [13] จึงส่งผลทำให้ต้องใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Suliga M. [6] ส่วนผลกระทบของความเร็วในการดึงขึ้นรูป พบว่าเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดึงขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Wire Drawing Stress) แปรผันตามค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปตามทฤษฎีของการดึงขึ้นรูป [14] ทั้งนี้แม้ว่าการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น Suliga M. [6] และเนื่องจากเส้นลวดถูกดึงผ่านคายที่อยู่ในช่วงความลาดเอียงสูงทำให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อแรงดึงขึ้นรูปน้อยกว่าประสิทธิภาพไหลตัวและแรงเฉือนรีดันแดนท์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ของมุมคายและความเร็วขึ้นรูปที่ส่งผลต่อแรงดึงขึ้นรูป

2. อิทธิพลของขนาดมุมคายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อพื้นผิวเส้นลวด

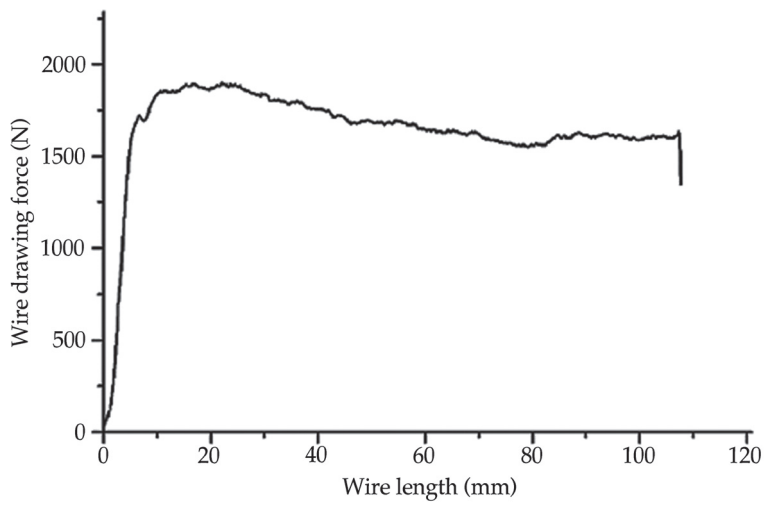
การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ในทิศทางการดึงขึ้นรูปจะให้รายละเอียดของพื้นผิวที่สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงเฉือนรีดันแดนท์จากการขึ้นรูป เนื่องจากลักษณะพื้นผิวรวมทั้งการเกิดรอยแตกขนาดเล็กมักจะเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการดึง [10] ผลการวัดและเปรียบเทียบค่าความเรียบผิวของเส้นลวดแสดงดังรูปที่ 6



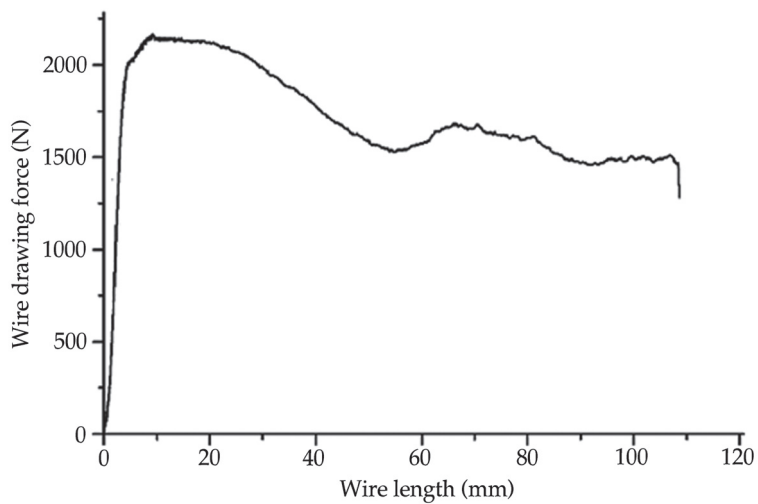
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของมุมคายและความเร็วขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความเรียบผิวเฉลี่ยเส้นลวด

จากผลการทดลองพบว่าค่าความเรียบผิวของเส้นลวดจะแปรผกผันกับขนาดมุมไหลเข้าของคาย (2α) แต่แปรผันตามความเร็วในการดึงขึ้นรูป เส้นลวดที่ถูกดึงผ่านคายขนาดมุนน้อยสุด (16°) ด้วยความเร็วสูงสุด (90 มิลลิเมตร/นาท) มีค่าความเรียบผิวสูงสุด และเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านคายขนาดมุนไหลเข้าโดสุด (20°) ด้วยความเร็วต่ำสุด (10 มิลลิเมตร/นาท) มีค่าความเรียบผิวต่ำที่สุด (ผิวหยาบสุด) ซึ่งเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านคายมุม 16° และ 18° มีค่าความเรียบผิวใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากมุมดังกล่าวเป็นมุมที่มีความเหมาะสม เกิดกลไกการถ่ายผิวระหว่างแม่พิมพ์สู่ผิวลวดได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lima-Filho A.D.P. [11] และจากการดึงลวดผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก มีความรุนแรงในการขึ้นรูปต่ำ ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนริ้นแดนที่น้อย ซึ่งแตกต่างจากเส้นลวดที่ได้จากการดึงขึ้นรูปผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลทำให้ผนังคายทำมุมกับทิศทางการดึงขึ้นรูปมากขึ้น เกิดแรงเฉือนริ้นแดนที่สูง ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นลดลงทำให้เส้นลวดไหลตัวได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเรียบผิวของเส้นลวดลดลง (ผิวหยาบขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการดึงขึ้นรูปเส้นลวด [14]

ผลกระทบของความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จ จากรูปที่ 6 พบว่าการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้เส้นลวดสำเร็จมีพื้นผิวที่เรียบขึ้น สอดคล้องกับประสิทธิภาพการหล่อลื่น ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วในการดึงขึ้นรูป [14] เมื่อพิจารณาจากค่าความเรียบผิวของเส้นลวดสำเร็จที่ได้จากคายทุกขนาดพบว่า เมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เส้นลวดมีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้น โดยเส้นลวดที่ได้จากคายที่มีขนาดมุม 16° เมื่อดึงขึ้นรูปด้วยความเร็ว 60 และ 90 มิลลิเมตร/นาท พบว่าค่าความเรียบผิวจะสูงกว่าความเรียบผิวของเส้นลวดเริ่มต้น และพบว่าค่าความเรียบผิวของเส้นลวดมีความสอดคล้องกับลักษณะความแปรปรวนของแรงดึงขณะขึ้นรูป ดังผลการทดลองดึงลวดผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าต่ำสุด (16°) ด้วยความเร็วในการดึงสูงสุด (90 มิลลิเมตร/นาท) พบว่าแรงดึงขึ้นรูปค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดความยาวเส้นลวดที่ถูกขึ้นรูป ดังรูปที่ 7 (ก) ทั้งนี้เนื่องจากค่าความลาดเอียงของมุมคายน้อย จึงได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนริ้นแดนที่น้อยลง ร่วมกับการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงซึ่งมีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีกว่า เส้นลวดจึงไหลตัวได้ดีและมีความสม่ำเสมอ เส้นลวดที่ได้จึงมีความเรียบผิวสูงขึ้น

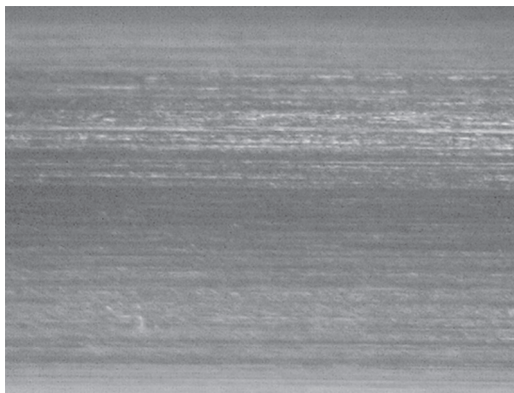


(ก) ดึงลวดผ่านคายนมุม 16° ความเร็ว 90 มิลลิเมตร/นาที

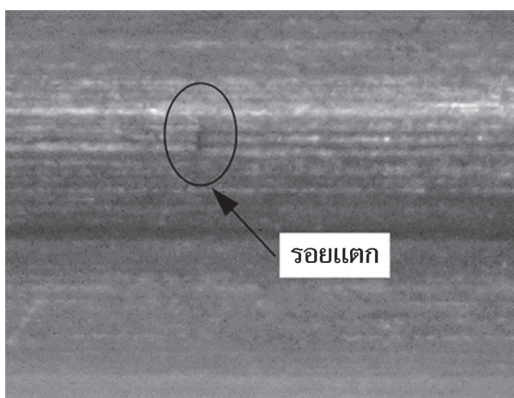


(ข) ดึงลวดผ่านคายนมุม 20° ความเร็ว 10 มิลลิเมตร/นาที

รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดึงและระยะการดึงลวด



(ก) มุมคาย $2\alpha = 16^\circ$ ความเร็ว 90 มิลลิเมตร/นาทีก



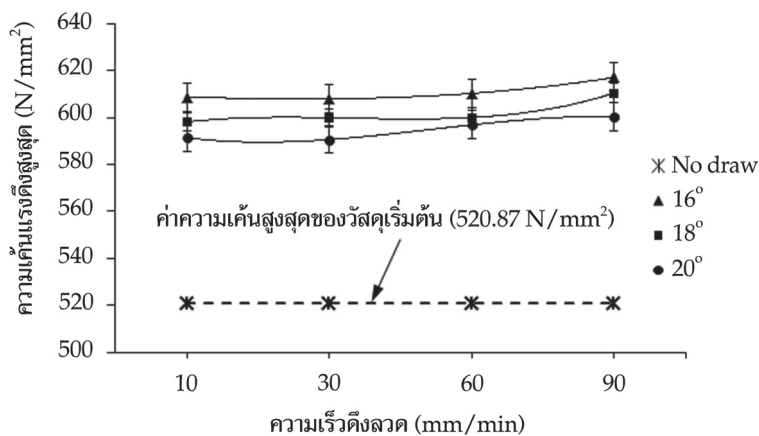
(ข) มุมคาย $2\alpha = 20^\circ$ ความเร็ว 10 มิลลิเมตร/นาทีก

รูปที่ 8 ลักษณะพื้นผิวเส้นลวดจากการดึงขึ้นรูป

ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวของเส้นลวดที่ได้จากการดึงขึ้นรูปผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้าต่ำ (16°) และใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง (90 มิลลิเมตร/นาทีก) ซึ่งพบว่าเส้นลวดมีความเรียบผิวสูง ดังรูปที่ 8 (ก) แตกต่างกับการดึงลวดผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าสูงสุด (20°) ด้วยความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำสุด (10 มิลลิเมตร/นาทีก) พบว่าแรงดึงขึ้นรูปตลอดความยาวเส้นลวดมีความแปรปรวนและไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 8 (ข) เนื่องจากมุมไหลเข้าของคายทำมุมกับทิศทางการไหลของเส้นลวดมากขึ้น เกิดผลกระทบจากแรงเฉือนรีดันแดนที่สูงร่วมกับการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นต่ำกว่า เส้นลวดจึงไหลตัวได้ยากขึ้น ส่งผลให้เส้นลวดที่ได้มีความเรียบผิวต่ำ สอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเส้นลวด ซึ่งพบว่าการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ (20°) โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่ำ (10 มิลลิเมตร/นาทีก) พื้นผิวของเส้นลวดจึงมีความขรุขระสูงและปรากฏรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นดังรูปที่ 8 (ข) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นลวดที่ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนรีดันแดนที่สูงและมีความเสียดทานบริเวณพื้นผิวสัมผัสสูงด้วยนั้น จะส่งผลให้ค่าความเค้นที่พื้นผิวลวดเพิ่มสูงขึ้นและหากค่าความเค้นดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุเส้นลวด จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวของเส้นลวด ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับทฤษฎีคุณภาพพื้นผิวในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด [14]

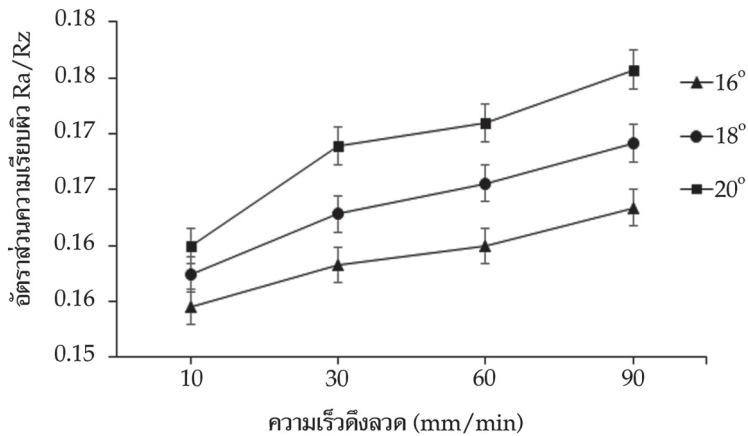
3. อิทธิพลของขนาดมุมคายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเส้นลวด

จากรูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล (ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด) ของเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการดึงขึ้นรูปผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้าและค่าความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของเส้นลวดจะเพิ่มสูงขึ้นหลังการดึงขึ้นรูป โดยเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็กจะมีค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้นสูงที่สุด และค่าความเค้นแรงดึงของเส้นลวดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของคายเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของเส้นลวดสำเร็จกับเส้นลวดเริ่มต้นก่อนการขึ้นรูป พบว่าเส้นลวดที่ได้จากการดึงผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นมากที่สุด (16.87 %) ตามด้วย คายที่มีมุมไหลเข้า 18° (14.83 %) และคายที่มีมุมไหลเข้า 20° มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (13.53 %)



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของมุมคายและความเร็วขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความเค้นแรงดึงสูงสุด

จากรายละเอียดผลการทดลองข้างต้น พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎีการดึงขึ้นรูป [15] ที่อธิบายไว้ว่าขนาดมุมไหลเข้าของคายจะส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุและคุณภาพผิวลวด ซึ่งคายที่มีขนาดมุมไหลเข้าน้อยจะส่งผลให้เส้นลวดมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง และความเป็นเนื้อเดียวกันจะลดลงเมื่อขนาดมุมคายเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งจากการเปรียบเทียบค่าความเรียบผิวในการทดลองนี้พบว่า เส้นลวดที่ผ่านการขึ้นรูปผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก ให้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยดีกว่าเส้นลวดจากการดึงผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ และจากการเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดมุมคายและความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความเรียบผิว R_a/R_z ซึ่ง R_a คือค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness Average) และ R_z คือ ความหยาบผิวเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุม จากผลการทดลอง (รูปที่ 10) พบว่าอัตราส่วน R_a/R_z ลดลงเล็กน้อยเมื่อขนาดมุมไหลเข้าของคายเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วในการดึงลวดต่ำสุด (10 มิลลิเมตร/นาท) พบว่าค่า R_a/R_z ที่ขนาดมุมคาย 16° และ 20° มีความแตกต่างกันที่ 5.40 % และเมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นค่า R_a/R_z จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหรือค่าความเรียบผิว R_z ลดลงมากกว่าความเรียบผิวเฉลี่ย R_a เมื่อพิจารณาที่ความเร็วในการดึงลวดสูงสุด (90 มิลลิเมตร/นาท) พบว่าค่า R_a/R_z ที่ขนาดมุมคาย 16° และ 20° มีความแตกต่างกันที่ 10.50 %

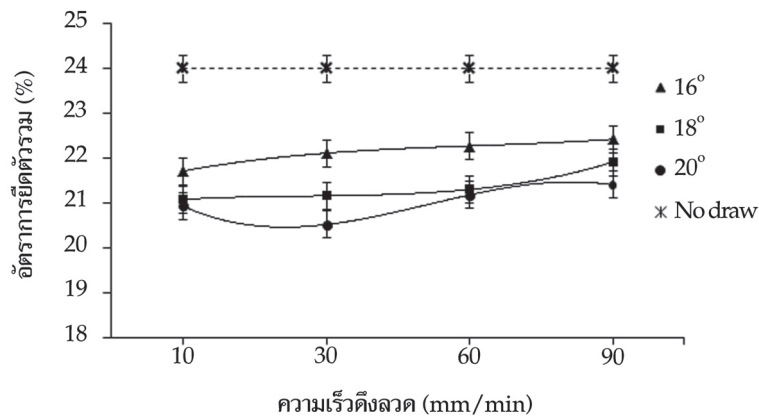


รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ของมุมคายและความเร็วขึ้นรูปที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความเรียบผิว R_a / R_z

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าการดึงขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็กจะได้เส้นลวดสำเร็จที่มีความเรียบผิวที่ดีและมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเส้นลวดที่ได้จากคายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่ แม้ว่าขนาดของมุมไหลเข้าที่มากขึ้นจะส่งผลต่อแรงเฉือนรีดต้นแดนท์และส่งผลต่อความเครียดเชิงของเส้นลวดก็ตาม แต่ขนาดมุมไหลเข้าของคายส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดเชิงไม่มากนัก เนื่องจากปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความเครียดเชิงของเส้นลวด คือ อัตราการดึงขึ้นรูปหรืออัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัด [15] นอกจากนี้ผลการทดลองยังมีความสอดคล้องกับค่าเคลต้าแฟกเตอร์ (Δ) ดังสมการที่ (4) [12] และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความเร็วในการดึงขึ้นรูปเส้นลวด พบว่าเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูงขึ้นจะส่งผลให้เส้นลวดมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังผลการทดลองในการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านคายที่มีมุมไหลเข้าต่างกันทุกขนาดพบว่า ค่าความเค้นแรงดึงของเส้นลวดสำเร็จจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูงจะส่งผลทำให้ค่าความเค้นจากการดึงขึ้นรูป (Wire Drawing Stress) สูงขึ้น เกิดความเค้นตกค้างหรือวัสดุเกิดความเครียดเชิงมากขึ้น อีกทั้งความเร็วที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น [16] จึงส่งผลให้เส้นลวดมีความเรียบผิวที่ดีขึ้น รอยตำหนิหรือจุดบกพร่องเกิดขึ้นน้อยลง วัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น ทำให้เส้นลวดที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

4. อิทธิพลของขนาดมุมคายและความเร็วการดึงที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการยืดตัวเส้นลวด

จากผลการทดลองรูปที่ 11 พบว่าเส้นลวดที่ผ่านการดึงขึ้นรูปในทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่าความสามารถในการยืดตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นลวดก่อนการดึง โดยเส้นลวดที่ถูกดึงผ่านคายขนาดมุมไหลเข้า 20° ค่าความสามารถในการยืดตัวลดลงมากที่สุด และเส้นลวดจากการดึงผ่านคายที่มีขนาดมุมไหลเข้า 16° ค่าความสามารถในการยืดตัวลดลงน้อยที่สุด และพบว่าค่าความสามารถในการยืดตัวของเส้นลวดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึงของเส้นลวดหลังการขึ้นรูป เนื่องจากค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุประเภทโลหะโดยทั่วไปมักจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงสูงสุด และมีความสัมพันธ์กับค่าความเรียบผิวของวัสดุ [17] จึงสรุปได้ว่าเส้นลวดสำเร็จที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเรียบผิวสูง จะมีความแข็งแรงสูงและยืดตัวได้ดีกว่า



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ของมุมตายและความเร็วขึ้นรูปที่ส่งผลต่ออัตราการยืดตัวของเส้นลวด

สรุปผลงานวิจัย

มุมไหลเข้าของตาย (2α) เป็นส่วนแรกที่เส้นลวดเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปเมื่อเส้นลวดถูกดึงให้ไหลตัวเข้าสู่ตาย เป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีความสำคัญ เพราะจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพพื้นผิวและค่าความแข็งแรงของเส้นลวดสำเร็จ จากผลการทดลองนี้ เห็นได้ชัดเลยว่าตายที่มีมุมไหลเข้าขนาดเล็ก (16°) เส้นลวดจะไหลตัวได้ดีเนื่องจากมีความรุนแรงในการขึ้นรูปต่ำและมีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ดีกว่าจึงใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปต่ำ เส้นลวดสำเร็จมีพื้นผิวเรียบ มีความแข็งแรงดึงสูง และความสามารถในการยืดตัวลดลงน้อยที่สุด ส่วนตายที่มีมุมไหลเข้าขนาดใหญ่เกิดการเปลี่ยนรูปที่รุนแรง ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือนริคินแดนท์สูง และมีประสิทธิภาพในการหล่อลื่นที่ต่ำกว่า จึงต้องใช้แรงเพื่อการดึงขึ้นรูปสูงขึ้น ได้เส้นลวดสำเร็จที่มีผิวหยาบและเกิดจุดบกพร่องในลักษณะของรอยแตกขนาดเล็กบนพื้นผิว ส่งผลทำให้เส้นลวดสำเร็จมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดตัวลดลง ส่วนเงื่อนไขเกี่ยวกับความเร็วในการดึงขึ้นรูป พบว่าการดึงขึ้นรูปด้วยความเร็วสูง ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่นขณะขึ้นรูป เส้นลวดสำเร็จมีพื้นผิวเรียบและความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าการดึงลวดผ่านตายที่มีขนาดมุมไหลเข้า (2α) ขนาดเล็ก (16°) ด้วยความเร็วในการดึงขึ้นรูปสูง (90 มิลลิเมตร/นาที) เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด $\varnothing 2$ มิลลิเมตร เนื่องจากเส้นลวดสำเร็จมีพื้นผิวเรียบไม่มีรอยตำหนิ และมีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประจำปีงบประมาณแผ่นดิน 2557 และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ นักศึกษาสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต ที่มีส่วนช่วยในด้านการดำเนินงานและเก็บผลการทดลองทางผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

Reference

- [1] Fang F., Zhou L., Hu X., Zhou X., and Jiang J. (2015). Microstructure and Mechanical Properties of Cold-Drawn Wires Affect by Inherited Texture. *Materials and Design*. Vol. 79. pp. 60-67
- [2] Shinohara T. and Yoshida K. (2005). Deformation Analysis of Surface Flaws in Stainless Steel Wire Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 162. pp. 579-584. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.129
- [3] Tourret R. (1955). The State of Lubrication in Wire Drawing Operation. *Wire and Wire Products*. Vol. 30. Nr 3. pp. 30-37
- [4] Sadok L., Luksza J. and Majta J. (1994). Inhomogeneity of Mechanical Properties in Stainless Steel Rods After Srawing. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 44. Issue 1-2. pp. 129-141
- [5] Cao T.S., Vachey C., Montmitonnet P. and Bouchard P.O. (2015). Comparison of Reduction Ability Between Multistage Cold Drawing and Rolling of Stainless Steel Wire - Experimental and Numerical Investigations of Damage. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 217. pp. 30-47. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.020
- [6] Suliga M. (2015). The Analysis of the High Speed Wire Drawing Process of High Carbon Steel Wire Under Hydrodynamic Lubrication Condition. *Archives of Metallurgy and Materials*. Vol. 60. Issue 1. pp. 403-408. DOI: 10.1515/amm-2015-0066
- [7] Dalmau A., Rmili W., Richard C. and Igual-Muñoz A. (2016). Tribocorrosion Behavior of New Martensitic Stainless Steels in Sodium Chloride Solution. *Wear*. Vol. 368-369. pp. 146-155
- [8] Leonardo K., Simone T. and Gustavo M. (2009). The Influence of Die Geometry on Stress Distribution by Experimental and FEM Simulation on Electrolytic Copper Wire Drawing. *Materials Research*. Vol. 12. No. 3. DOI: 10.1590/S1516-14392009000300006
- [9] Harish J. and Asim J. (2015). Dies Management in Wire Drawing Industry. *Wire and Cable*. Access (1 November 2014). Available (<http://www.wirecable.in/2015/04/dies-management-in-wire-drawing-industry>)
- [10] Siebel E. and Kobitzsch R. (1943). Die Erwärmung Des Ziehgutes Bbeim Drahtziehen. *Stahl Und Eisen*. Vol. 63. pp. 110-113
- [11] Lima-Filho A.D.P. (2003). A Wire Drawing Machine Design for Research and Experiment Teaching of Mechanical and Metallurgical Engineering Courses. In 17th International Congress of Mechanical Engineering. pp. 10-14
- [12] Semiatin, S.L. (2005). *Metalworking: Bulk Forming*. ASM Handbook. Vol. 14.

- [13] Vega G., Haddi A. and Imad A. (2009). Investigation of Process Parameters Effect on the Copper-Wire Drawing. *Materials and Design*. Vol. 30. pp. 3308-3312
- [14] Kurt L. (1985). *Handbook of Metal Forming*. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan 481 21, USA.
- [15] George E.D., Howard A.K., and Semiatin S.L. (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. ASM International
- [16] Tourret R. (1955). The State of Lubrication in Wire Drawing Operation. *Wire and Wire Products*. Vol. 30. pp. 30-37
- [17] Ranaweera G. (2014). *Theory of Wire Drawing*. Access (1 November 2014). Available (<http://www.antaac.org.mx/assets/10-theory-of-wiredrawing.pdf>)