

การดึงขึ้นรูปลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Round to Square Shape Titanium Wire Drawing by Finite Element Method

จิตติวิช วิบูลย์ศิริพงษ์¹ ดิลก ศรีประไพ² เดช พุทธเจริญทอง³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

โทร 0-24709207 โทรสาร 0-28729080 E-mail: viboonsiripong@yahoo.com¹, dilok.sri@kmutt.ac.th², dech.bud@kmutt.ac.th³

Jittitouch Viboonsiripong Dilok Sriprapai Dech Budcharoentong

Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Pracha-Uthit Rd, Thungkru, Bangkok 10140

Tel: 0-24709207 Fax: 0-28729080 E-mail: viboonsiripong@yahoo.com¹, dilok.sri@kmutt.ac.th², dech.bud@kmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

กระบวนการดึงขึ้นรูปลวดเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ต้องการควบคุมความเที่ยงตรงของหน้าตัด และความยาวอย่างถูกต้องเอาไว้ได้ตลอดกระบวนการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมของการดึงลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการจำลองการดึงขึ้นรูปด้วยโปรแกรม MSC. Marc Mentat 2001 ที่อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.36338 ซึ่งจะแปรเปลี่ยนมุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์จาก 3 – 27 องศา แล้วทำการวัดรัศมีที่มุมของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส การจำลองการดึงขึ้นรูปนี้ได้กำหนดพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก

ผลการวิเคราะห์พบว่า มุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ที่ทำให้สามารถดึงลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 มม. เป็นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้าง 1.63 มม. ทำให้เกิดรัศมีที่มุมน้อยที่สุด คือ 21 องศา นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลของความเครียดพลาสติกประสิทธิผลที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูปจะมีค่ามากกว่าความเครียดแตกหักของวัสดุ ดังนั้น จึงไม่สามารถดึงขึ้นรูปภายในครั้งเดียว จากผลการวิเคราะห์ได้ให้ข้อสรุปว่าจะต้องทำการดึงขึ้นรูปทั้งหมด 7 ขั้นตอน จึงจะช่วยให้สามารถดึงขึ้นรูปได้ตามต้องการซึ่งจะทำให้ได้ลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีรัศมีที่มุมเท่ากับ 0.198 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3.8 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด, มุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์, ความเครียดพลาสติกประสิทธิผล, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

In wire production, one of the most important issues is controlling the accuracy of cross-section area (section accuracy) and length of the wire. In this research, the corner filling of a round to square shape titanium wire during drawing process has been investigated using finite element method (FEM). The drawing process was simulated by MSC Marc Mentat 2001 program and the results were compared with experimental data. The drawing conditions were one-pass reduction, $r = 0.36338$ and semi-die angle, $\alpha = 3 - 27$ degree. The workpiece material was assumed to be elastic-plastic.

It was found that the optimum semi-die angle to obtain the smallest corner radius for a round to square wire drawing process is 21 degrees provided that perform the wire diameter is 2.3 mm and the final square wire is 1.63 mm. Furthermore, the values of the effective plastic strain obtained from FEM are higher than the strain at fracture of titanium. Hence, the desired shape could not be obtained in one-pass. However, the FEM results suggested that such problem could be resolved by seven pass drawing process. The drawing process was also carried out and the final shape of a square wire with the corner radius of 0.198 mm was produced. Only 3.8 % disagreement in the value of corner radius has been observed between the experimental data and the FEM results.

Keyword : One-pass reduction, Semi-die angle, Effective plastic strain, Finite Element Method

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการมีการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถทำการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปหลอดที่มีความซับซ้อน ด้วยการจำลองและใช้ขอบเขตของข้อมูลต่างๆ มาประกอบการวิเคราะห์ผล ซึ่งทำให้วิศวกรสามารถออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความถูกต้องและมีคุณภาพจากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดแนวความคิดเพื่อศึกษาตัวแปรของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นหลอดหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรของแม่พิมพ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปหลอดหน้าตัดอื่นๆ เพื่อรักษาความเที่ยงตรงของหน้าตัด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการดึงขึ้นรูปหลอดวัสดุชนิดอื่นต่อไปได้

Sato [1] ได้ทำการศึกษานาดความเที่ยงตรงและความเค้นตกค้างในการดึงขึ้นรูปหลอดจากหน้าตัดกลมเป็นหลอดหน้าตัดหกเหลี่ยม ซึ่งทำการศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมเอียงของแม่พิมพ์ และอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด โดยการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติและทำการทดลองจริง พบว่ามุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการดึงขึ้นรูปหลอดหน้าตัดหกเหลี่ยม คือ 7 – 10 องศา และอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม คือ 30 ถึง 40 %

Yoshida [2] ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขในการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตหลอดขนาดเล็ก โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการดึงขึ้นรูปหลอด คือ มุมเอียงของแม่พิมพ์ (die-angle), อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (pass reduction) โดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองดึงขึ้นรูปจริงด้วยเส้นหลอดทองแดงและอลูมิเนียม พบว่า มุมเอียงของแม่พิมพ์, อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดึงขึ้นรูปหลอดขนาดเล็ก

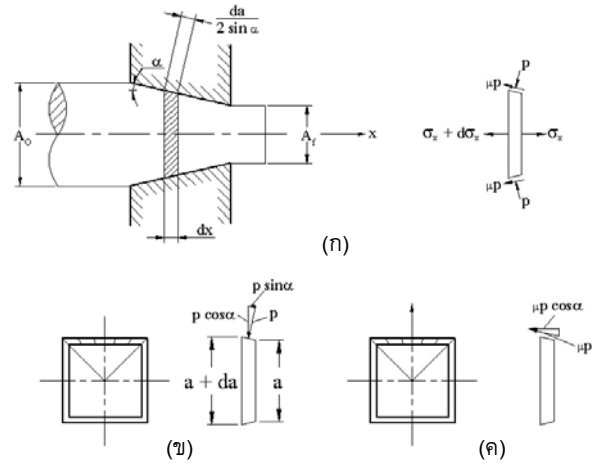
Wistreich [3] ได้ทำการศึกษากลไกของการดึงขึ้นรูปหลอด พบว่าการออกแบบแม่พิมพ์มีอิทธิพลที่สำคัญต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอดพบว่าแต่ละอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดจะมีมุมเอียงของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ทำให้ความเค้นในการดึงขึ้นรูปต่ำสุด เมื่อความเค้นในการดึงสัมพันธ์กับความแข็งแรงครากตัวทางดึงของวัสดุ

2. ทฤษฎี

2.1 การวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปหลอด

การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกของการดึงขึ้นรูปหลอด อาจจะใช้วิธีสมมูลแรงหรือวิธีสแลบ (slab method) ซึ่งจะแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นหรือชั้นบางๆ ที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่า 2 เท่า และสมมติให้แต่ละส่วนมีการกระจายของความเค้นในลักษณะความเค้นระนาบ โดยมีข้อสมมติฐาน ดังนี้

1. ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอ (homogeneous deformation)
2. ความเค้นทานระหว่างแม่พิมพ์กับเนื้อวัสดุมีค่าคงตัวทุกๆ จุด
3. ความเค้นในเนื้อวัสดุในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร เป็นความเค้นหลัก



รูปที่ 1 (ก) สภาวะความเค้นที่กระทำบนสแลบ dx ในการดึงขึ้นรูปหลอด (ข) ความดันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุและแม่พิมพ์ (ค) ความเค้นความเสียหายที่ผิวสัมผัส

ความเค้นในการดึงขึ้นรูปจะหาได้ดังนี้

$$\sigma_{xd} = Y(\epsilon) \left[\frac{1+B}{B} \right] \left[1 - \left(\frac{A_f}{A_o} \right)^{2B} \right] \quad (1)$$

ซึ่งสมการที่ (1) ใช้ในการหาความเค้นในการดึงขึ้นรูปที่ทางออกของแม่พิมพ์ (σ_{xd}) และบางครั้งอาจเขียนอยู่ในเทอมของอัตราการลดพื้นที่หน้าตัด r คือ

$$r = 1 - \left(\frac{A_f}{A_o} \right) \quad (2)$$

จะได้

$$\sigma_{xd} = Y(\epsilon) \left[\frac{1+B}{B} \right] \left[1 - (1-r)^B \right] \quad (3)$$

โดยที่ $B = \mu \cot \alpha$, $Y(\epsilon)$ คือ ความเค้นจริงของวัสดุที่ความเครียดจริง $\epsilon_d = \ln \left(\frac{1}{1-r} \right)$ และ A_o, A_f = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานก่อนและหลังออกจากแม่พิมพ์ ตามลำดับ

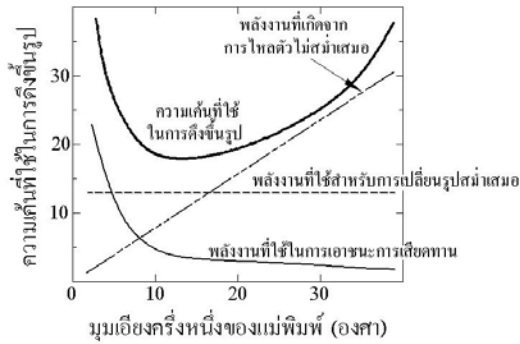
จากสมการที่ (1) หรือ (3) สามารถหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปได้เนื่องจากทราบพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของชิ้นงาน A_f ดังนั้น จึงสามารถหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปได้ (F_f) คือ

$$F_f = \sigma_{xd} \cdot A_f \quad (4)$$

2.2 มุมเอียงของแม่พิมพ์ที่เหมาะสม (optimal cone angle)

ความเค้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะประกอบด้วยองค์ประกอบของพลังงานที่ใช้ในการเอาชนะการเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานและแม่พิมพ์, พลังงานที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปสม่ำเสมอ (homogeneous deformation) และพลังงานที่เกิดจากการไหลตัวไม่สม่ำเสมอ หรือพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบรีดันแดนต์ (redundant deformation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแม่พิมพ์และรูป

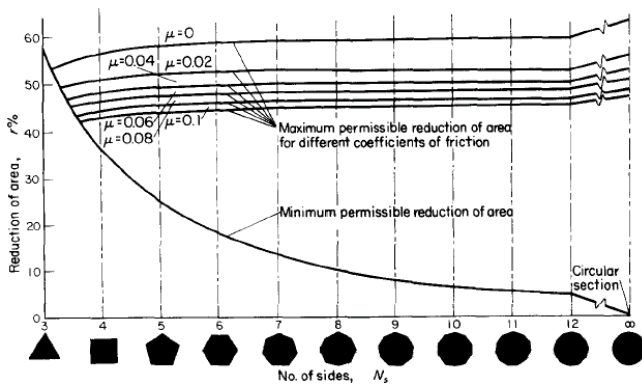
ร่างของชิ้นงานที่ทำให้เกิดความเครียดสัมพัทธ์ขึ้นในเนื้อโลหะและเกิดแรงเฉือนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบของความเค้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป [1]

2.3 ข้อจำกัดของอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดของการดึงขึ้นรูป

ข้อจำกัดของอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดที่จะทำให้สามารถดึงขึ้นรูปได้สำเร็จ คือ ความเสียหายจากแรงดึง (failure tensile) ของชิ้นงาน ซึ่งความเสียหายนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปแห้ง, ท่อ หรือลวด เท่ากับหรือมากกว่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ในทางปฏิบัติเมื่อแห้งโลหะถูกดึงภายใต้อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดที่เข้าใกล้ข้อจำกัดของอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด ความเค้นที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะใกล้เคียงกับความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ดังนั้นสิ่งเหล่านี้เป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการดึงขึ้นรูป ซึ่งอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสมมาตรต่าง ๆ จะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดและต่ำสุดที่เป็นไปได้ในการดึงขึ้นรูป [4]

2.4 อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดที่ยอมรับได้ ในการดึงขึ้นรูปครั้งเดียว

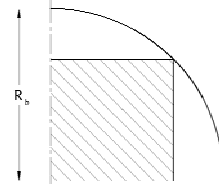
อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดจะมีความสำคัญต่อการดึงขึ้นรูปจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดกลม แต่ในการดึงขึ้นรูปให้ได้หน้าตัดสมมาตร เช่น หน้าตัดสามเหลี่ยม, หน้าตัดสี่เหลี่ยม หรือหน้าตัดหกเหลี่ยม เป็นต้น จะให้ความสำคัญกับอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 3

ในการดึงขึ้นรูปจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดเส้นทแยงมุมของหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใหญ่สุดจะต้องเท่ากับขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง เนื่องจากจะทำให้ได้ลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดวงกลมและพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ 4 สามารถหาอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดได้ คือ

$$\text{อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด } A_r = \frac{\pi R_b^2}{2R_b^2} = 1.5708$$

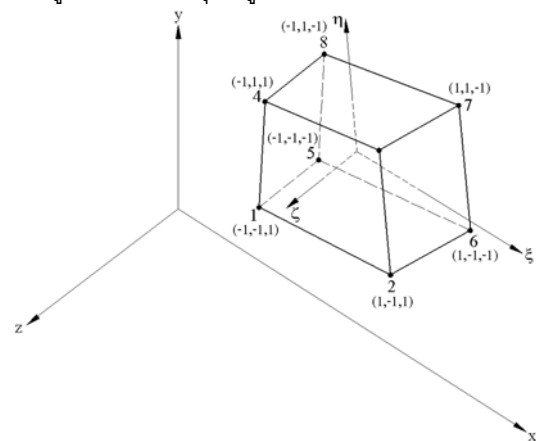
$$\text{จะได้ อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดต่ำสุด } r = 1 - \frac{1}{A_r} = 0.36338$$



รูปที่ 4 รูปร่างหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2.5 ฟังก์ชันรูปร่างสำหรับการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปลวด

สำหรับการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปลวดจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้นได้เลือกใช้เอลิเมนต์สามมิติชนิดด้านตรง 8 จุดต่อแบบไอโซพาราเมตริกซ์เอลิเมนต์ (8-node isoparametric three-dimensional hexahedron element) ทั้งนี้เพื่อให้เอลิเมนต์ที่ประกอบขึ้นเหมือนรูปร่างเดิมมากที่สุดดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เอลิเมนต์สามมิติชนิดด้านตรง 8 จุดต่อแบบไอโซพาราเมตริกซ์เอลิเมนต์

3. วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อให้ได้ลวดที่มีรัศมีที่มุมของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสน้อยที่สุด โดยจะศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากต่อการดึงขึ้นรูปลวด 2 ตัวแปรด้วยกัน คือ

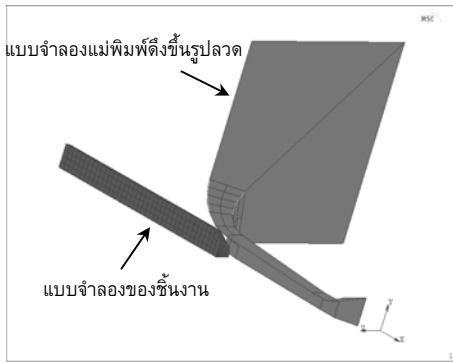
1) อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด พบว่าอัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดต่ำสุดที่ยอมรับได้ ที่จะทำให้การดึงขึ้นรูปลวดจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้นั้น คือ $r = 0.36338$ ดังนั้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของลวดไททานเนียมเท่ากับ 2.3 มม. จะได้ว่าด้านของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ต้องการได้ คือ 1.63 มม.

2) มุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ (α) ต่าง ๆ กัน คือ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, และ 27 องศา ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะใช้โปรแกรม MSC. Marc Mentat 2001 ผู้วิจัยได้เลือกใช้เอลิเมนต์สามมิติชนิดตันตรง 8 จุดต่อแบบไอโซพาราเมตริก ซึ่งในส่วนของพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานได้กำหนดให้เป็นแบบอิลาสติก-พลาสติก โดยทำการทดสอบแรงดึงได้คุณสมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 1 ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมนี้จะใช้พฤติกรรมกรรมการครากของวัสดุตามทฤษฎีของฟอน มิเชลส์ และได้ใช้สมการแพรอนดีน-ราส อธิบายพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปในช่วงอิลาสติก-พลาสติกและความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานนั้นได้ใช้ทฤษฎีของคูลอมบ์ ซึ่งกำหนดให้ ส.ป.ส.ความเสียหายมีค่าเท่ากับ 0.5 [1,2]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของลวดไททาเนียมที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

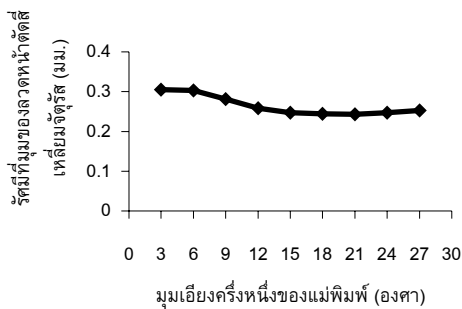
มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนพัชของ	ส.ป.ส.ความเครียดแข็ง (MPa)	เลขยกกำลังความเครียดแข็ง
50,290	0.3324	598.4	0.05



รูปที่ 6 แบบจำลองของชิ้นงานและแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด

3.1 ผลการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พบว่ามีที่มุมของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปที่มุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ต่างๆ กัน สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7



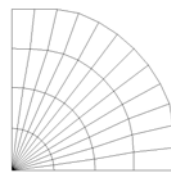
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์กับรัศมีที่มุมของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากผลการวิเคราะห์พบว่าความเครียดพลาสติกประสิทธิผลสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูปให้ได้อัตราส่วนการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.36338 ที่ทุกมุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์จะมีค่ามากกว่าความเครียดแตกหักของวัสดุที่เท่ากับ 0.155 ดังนั้นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปให้สำเร็จภายในครั้งเดียวได้

ดังนั้นจึงต้องทำการดึงขึ้นรูปหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้ลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีด้านยาว 1.63 มม. โดยทำการวิเคราะห์ความเครียดพลาสติกประสิทธิผลสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูปเปรียบเทียบกับความเครียดแตกหักของวัสดุที่เท่ากับ 0.155 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่าจะต้องทำการดึงขึ้นรูปทั้งหมด 7 ขั้นตอน โดยมีด้านของปากแม่พิมพ์ดึงลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมเรียงตามลำดับ คือ 2.14, 2.03, 1.94, 1.85, 1.77, 1.70 และ 1.63 มม. ตามลำดับ และมีมุมเอียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ 3 องศาในทุกแม่พิมพ์

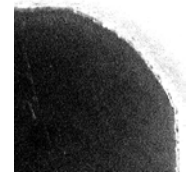
3.2 รูปร่างหน้าตัดของลวดไททาเนียมที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลองดึงขึ้นรูปลวดจริงในแต่ละขั้นตอน

หลังจากทำการทดลองดึงขึ้นรูปลวดจริง จึงได้นาลวดที่ได้ในแต่ละขั้นตอนมาทำการตรวจวัดรูปร่างหน้าตัดที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างหน้าตัดที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณารูปร่างหน้าตัดเพียงแค่ 1 ใน 4 ของหน้าตัดเต็ม ซึ่งได้รูปร่างหน้าตัดดังต่อไปนี้



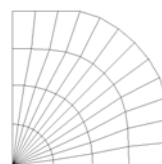
Die 1 : 2.14 x 2.14

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



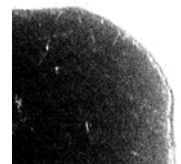
การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 8 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 1 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



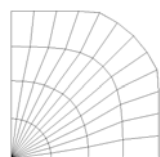
Die 2 : 2.03 x 2.03

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 9 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 2 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



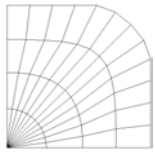
Die 3 : 1.94 x 1.94

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

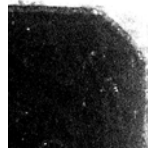


การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 10 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 3 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



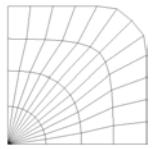
Die 4 : 1.85 x 1.85



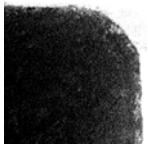
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 11 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 4 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



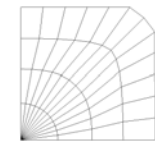
Die 5 : 2.03 x 2.03



วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 12 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 5 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



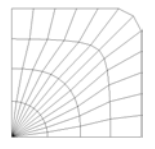
Die 6 : 2.03 x 2.03



วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 13 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งที่ 6 ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง



Die 7 : 2.03 x 2.03



วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองดึงขึ้นรูปจริง

รูปที่ 14 รูปร่างหน้าตัดของลวดจากการดึงขึ้นรูปครั้งสุดท้าย ซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองดึงขึ้นรูปจริง

3.3 รัศมีที่มุมของลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลองดึงขึ้นรูปลวดจริง

ในหัวข้อนี้เป็นผลของรัศมีที่มุมของลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ผ่านการดึงขึ้นรูปครั้งสุดท้ายที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลองดึงขึ้นรูปจริง ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 รัศมีที่มุมของลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดลองดึงขึ้นรูปลวดจริง

รัศมีที่มุมของลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (มม.)	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	การทดลองดึงขึ้นรูปลวดจริง
	0.2058	0.198

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์การดึงลวดไททาเนียมจากหน้าตัดกลมเป็นลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าจะไม่สามารถทำการดึงขึ้นรูปเพียงครั้งเดียวเพื่อให้ได้ลวดที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ เพราะความเครียดพลาสติกประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในเส้นลวดมีค่ามากกว่าความเครียดแตกหักของวัสดุทำให้เกิดการฉีกขาดของลวดขณะทำการดึงขึ้นรูปได้ และจากผลการวิเคราะห์ได้ให้ข้อสรุปว่าจะต้องทำการดึงขึ้นรูปทั้งหมด 7 ขั้นตอน จึงจะทำให้สามารถดึงขึ้นรูปได้สำเร็จในที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้ลวดไททาเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีรัศมีมุมเท่ากับ 0.198 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3.8 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำแนะนำและความร่วมมือในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Sato, M., "Dimensional Accuracy and Residual Stress in Round to Hexagonal Wire Drawing", Journal of the JCBRA, 2001, Vol. 40, No. 1

[2] Yoshida, K., "Optimum Drawing Conditions for Fine Wire Manufacturing", Wire J. International

[3] Wistreich, J.G., "Investigation of the Mechanics of Wire Drawing", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1955, Vol. 169, USA

[4] Basily B.B., Sansome D.H., "Some theoretical considerations for the direct drawing of section rod from round bar", International Journal Mechanical Science, 1976, Vol. 18, pp. 201-208, Great Britain

[5] Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity", New York, Clarendon Press, 1950, pp.15-96

[6] เดช พุทธรเจริญทอง, "การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์", ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 1998