

การใช้ FEM วิเคราะห์การดึงท่อทองแดงด้วยวิธีโพลทึงปลั๊ก

Analysis of Tube Drawing Process Using Floating Plug by FEM

ณัฐนันท์ มุลสระดู^{1*} พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์² วารุณี เปรมานนท์³ และ ทวีชัย โสภณอดุมสิทธิ์³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9209 โทรสาร 0-2470-9210 *อีเมล nutthanun.moo@kmutt.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9117 โทรสาร 0-2470-9111 อีเมล pongpan.kae@kmutt.ac.th

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9209 โทรสาร 0-2470-9210 อีเมล varunee.pre@kmutt.ac.th

Nutthanun Moolsradoo^{1*}, Pongpan Kaewtatip², Varunee Premanond³, and Taweechai Sophonudomsit³

¹ Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkr, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, *E-mail: nutthanun.moo@kmutt.ac.th

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Bangmod, Tungkr, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, E-mail: pongpan.kae@kmutt.ac.th

³ Department of Tool and Material Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Bangmod, Tungkr, Bangkok 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210, E-mail: varunee.pre@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการดึงขึ้นรูปท่อ (Tube drawing) ที่ใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตท่อทองแดง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีการดึงท่อแบบโพลทึงปลั๊ก (Floating plug) เป็นวิธีที่สามารถผลิตท่อที่มีความยาวต่อเนื่องได้ ซึ่ง การผลิตที่มีประสิทธิภาพดีนั้น ต้องการกระบวนการที่สามารถลดขนาด พื้นที่หน้าตัดได้ครั้งละมากๆ โดยใช้แรงในการดึงน้อย และไม่ทำให้ท่อ เกิดรอยขีดหรือเกิดการขาด ดังนั้นจึงต้องอาศัยสภาพการทำงานที่ เหมาะสมกับกระบวนการ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษานำปัจจัยที่มีอิทธิพล ต่อกระบวนการดึงท่อทองแดง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของมุมตาย มุม ปลั๊ก และอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ที่มีผลต่อแรงในการดึงขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปทางการค้า DEFORM2D เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา ผลที่ได้จากการวิจัยทำให้ ทราบว่าความแตกต่างของมุมปลั๊กและมุมตายที่เหมาะสมคือเท่ากับ 2 องศา และมุมของแม่พิมพ์ที่ทำให้ใช้แรงในการดึงท่อน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ สามารถเพิ่มอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของการดึงท่อได้สูงที่สุดคือ กรณีครึ่งมุมตายเท่ากับ 13 องศาครึ่งมุมปลั๊กเท่ากับ 11 องศา และ

กรณีครึ่งมุมตายเท่ากับ 15 องศาครึ่งมุมปลั๊กเท่ากับ 13 องศา ซึ่ง ให้ผลใกล้เคียงกัน นั่นคือทำให้ได้อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 48 นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองเปรียบเทียบเพื่อดูมุมที่ใช้แรง ในการดึงน้อยที่สุดกับวัสดุที่แตกต่างอีก 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน โดยพบว่าขนาดของมุมตายและมุมปลั๊กที่ใช้แรง ในการดึงน้อยที่สุดเปลี่ยนไป เมื่อชนิดของวัสดุที่ทำการดึงต่างกัน

Abstract

Tube drawing process has been used extensively in copper tube industry. Floating-plug method is mainly used due to its ability to produce tube with unlimited length. For high productivity, large reduction ratio of cross section area and low drawing force are required. Thus, the influences of process parameters in floating plug drawing of copper tube were investigated in this work. The effects of reduction ratio, die and

plug approach angle on tube drawing force were analyzed using a commercial FEM program, DEFORM 2D. The simulation results showed that the appropriate approach angles are half die angle of 13 degree with half plug angle of 11 degree and half die angle of 15 degree with half plug angle of 13 degree. The maximum reduction ratio of 48% has been found. Additionally, the experiments were carried out using others materials which are stainless steel and carbon steel. It was found that the optimum angle of plug and die were changed depending on material types.

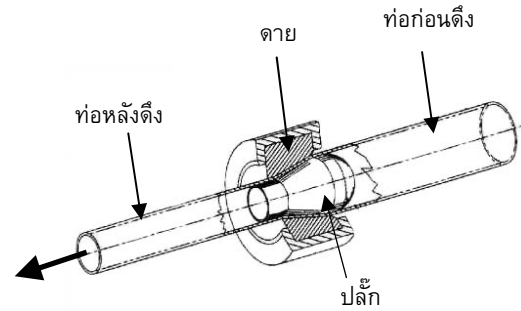
1. บทนำ

กระบวนการดึงท่อ (Tube Drawing) เป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อ กระบวนการหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตท่อ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ท่อทองแดงในอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ซึ่งถือว่ามี การเติบโตอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ในการผลิตจึงจำเป็นต้องพยายามลดต้นทุนให้มีราคาต่ำ เกิดความเสียหายระหว่างการผลิตน้อยที่สุด และใช้เวลาในการผลิตน้อย ดังนั้นการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM; Finite Element Method) จึงเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากการวิเคราะห์งานด้วย FEM ตัวของโปรแกรมมีความสามารถในการคำนวณสูง และให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือ ใช้เวลาประมวลผลน้อย และสามารถลดความผิดพลาดหลังการออกแบบชิ้นงานจริงได้

ในการผลิตท่อเพื่อให้ได้ท่อที่มีมาตรฐานตามต้องการ และท่อไม่เกิดความเสียหายนั้น จำเป็นต้องทราบถึงอิทธิพลของมุมปลั๊กและมุมตาย ความต่างของมุมปลั๊ก และตายที่เหมาะสมต่อกระบวนการดึงท่อ และอิทธิพลของความต่างมุมที่มีต่อผลอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดของท่อ เนื่องจากมุมดังกล่าวถือว่าเป็นตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการดึงท่อ และจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับมุมดังกล่าวในกระบวนการดึงท่อแบบโพลทึงปลั๊กด้วย FEM มากนัก [1-5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของมุมดังกล่าว เพื่อให้สามารถกำหนดมุมที่ใช้ในการผลิตได้อย่างเหมาะสมโดยใช้ FEM ในการจำลองรูปร่างแม่พิมพ์ต่อไป

2. การดึงท่อด้วยวิธีโพลทึงปลั๊ก (Floating Plug Drawing)

กระบวนการดึงท่อด้วยวิธีโพลทึงปลั๊ก ดังที่แสดงในรูปที่ 1 นั้น เป็นกระบวนการขึ้นรูปท่อกระบวนการหนึ่ง โดยการนำท่อที่ได้มาจากกระบวนการขึ้นรูปร้อน นำมาลดขนาดลงให้ได้ตามต้องการเพื่อผลทางความแข็งแรงของท่อ ความเรียบของผิวท่อ และขนาดที่ถูกต้อง ซึ่งกระบวนการโพลทึงปลั๊กนั้น ตัวปลั๊ก (Plug) จะลอยตัวอยู่ได้โดยอาศัยความสมดุลของแรง ระหว่างแรงเสียดทานและแรงต้านจากตาย ซึ่งปลั๊กจะควบคุมขนาดและผิวภายในท่อ [6] ส่วนภายนอกที่จะถูกควบคุมโดยขนาดของตาย (Die) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และเป็นวิธีที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 การดึงท่อด้วยวิธีโพลทึงปลั๊ก [7]

3. การวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการดึงท่อ (Drawing Force)

แรงที่ใช้ในกระบวนการดึงท่อนั้น เป็นแรงที่เกิดจากการดึงที่ปลายท่อด้านหนึ่งผ่านรูของตายและปลั๊กเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดของท่อ อย่างไรก็ตามแรงดึงยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และมุมของตายและปลั๊ก ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถหาแรงในการดึงจากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงกับพื้นที่หน้าตัดของท่อหลังการดึงได้ ดังสมการที่ (1) [8]

$$F = \sigma_{xa} \cdot A_f \quad (1)$$

$$\text{โดย } \sigma_{xa} = \sigma'_0 \left(\frac{l + B'}{B'} \right) \left[1 - \left(\frac{A_f}{A_0} \right)^{B'} \right]$$

$$\text{และ } B' = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

เมื่อ σ_{xa} คือ ความเค้นแรงดึงที่ใช้จริง (N/mm²)

σ'_0 คือ ความเค้นแรงดึงเฉลี่ย (N/mm²)

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อหลังดึง

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนดึง

μ_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อและตาย

μ_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อและปลั๊ก

α คือ ครึ่งมุมตาย (องศา)

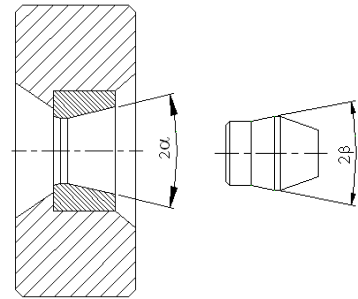
β คือ ครึ่งมุมปลั๊ก (องศา)

4. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการดึงท่อทองแดง เกรด (JIS) H3300 C1220 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกก่อนดึงเท่ากับ 22.23 มิลลิเมตร ผนังท่อหนา 1.14 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกหลังดึงเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ผนังท่อหนา 0.8 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับร้อยละ 36 คุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานได้จากการทดสอบการดึงจริงโดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1 เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองด้วย FEM ได้ทำการทดลองดึงท่อจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม DEFORM2D โดยรูปของตายและปลั๊กที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์เกรด K30 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองคือเครื่องดึงท่อรอนเบนซ์ (Draw bench)

AMM035

ดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 160 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการวัดแรงในการดึงท่อจากการทดลองจริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วย FEM โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป DEFORM 2D ซึ่งมีเงื่อนไขในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการสร้างแบบจำลอง FEM โดยเน้นศึกษาอิทธิพลของมุมตายและมุมปลีกรซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ 4 และอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อ



รูปที่ 4 มุมไหลเข้าของตาย (2α) และปลีกร (2β)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (JIS) H3300 C1220

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	ค่าที่ได้
Tensile Strength	458 MPa
Yield Strength	412 MPa
Strain Hardening Exponent (n)	0.0295
Stress Coefficient (K)	523.59 MPa

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการจำลองการดึงท่อด้วยโปรแกรม DEFORM 2D

Analytical Type	Axis - Symmetry	
Friction coefficient	μ = 0.01	
Type of	Tools	Rigid body
Materials	Work piece	Rigid - Plastic
Number of Element	2000	
Drawing Velocity	20 mm/min	

5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1 การทดสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง

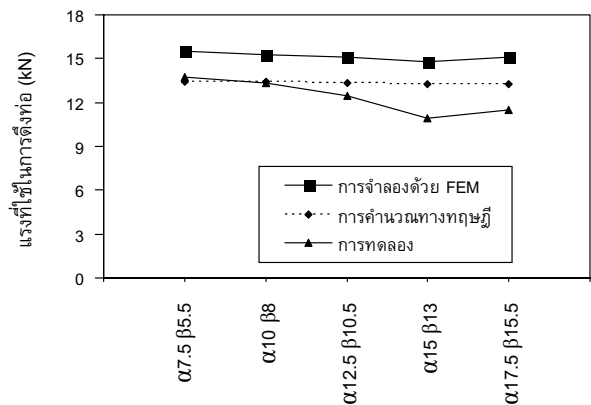
ในการจำลองการดึงท่อทองแดง โดยใช้ครึ่งมุมตายและครึ่งมุมปลีกรที่มีความต่างของครึ่งมุมเท่ากับ 2 องศา ซึ่งขนาดครึ่งมุมตาย (α) เท่ากับ 7.5, 10, 12.5, 15 และ 17.5 องศา ได้ค่าแรงที่ใช้ในการดึงท่อ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าแรงที่ได้จาก FEM มีค่าใกล้เคียงกับแรงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี [8] ซึ่งมีความแตกต่างสูงสุดของแรงเท่ากับ 13% เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบผล FEM กับการทดลอง พบว่ามีความแตกต่างสูงสุดที่ 25% เนื่องจากในการทดลองจริงมีผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปขณะทำการดึง โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขณะทำการดึงสูงถึงประมาณ 85°C ซึ่งระดับอุณหภูมิดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ในขณะที่ในการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM2D จะเป็นการจำลองแบบไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Isothermal analysis) จึงทำให้ผลที่ได้จากการจำลองสูงกว่าผลที่ได้จากการขึ้นรูปจริง อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าที่ได้จาก FEM จะเหมือนกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยพบว่าแรงดึงท่อมี่แนวโน้มต่ำลงเมื่อครึ่งมุมตายเพิ่มขึ้นจนถึง 15 องศา และแรงจะเพิ่มขึ้นหลังจากนี้ เนื่องจากมุมเอียงของตายที่ผิวสัมผัสกับผิวนอกของท่อแตกต่างกัน จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM2D มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 2 ตายและปลีกรที่ใช้ในงานวิจัย



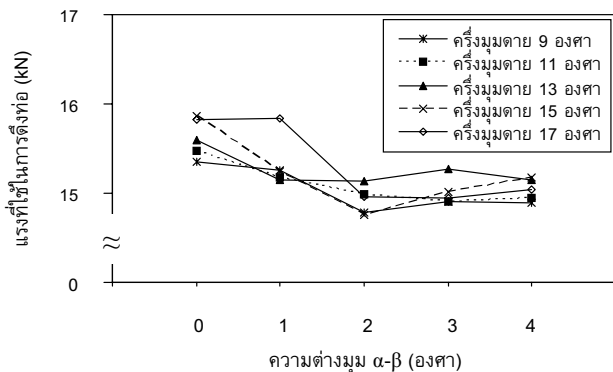
รูปที่ 3 เครื่องดึงท่อดรอปเบนท์



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับการจำลองด้วย FEM

AMM035

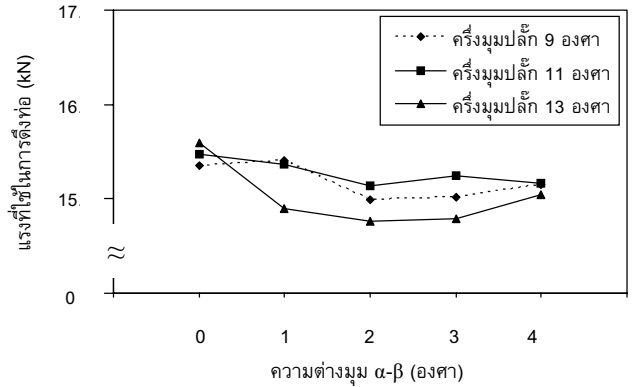
5.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของมุมปลีกโดยกำหนดมุมตายคงที่
 จากการจำลองการดึงท่อด้วย FEM เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของครึ่งมุมปลีกที่มีผลต่อแรงในการดึงท่อเมื่อกำหนดให้ครึ่งมุมตายคงที่ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าความต่างของมุมมามีอิทธิพลต่อแรงในการดึง ทั้งนี้เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวในของท่อกับผิวเอียงของปลีกแตกต่างกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการจำลองจะพบว่าเมื่อขนาดของครึ่งมุมตายและครึ่งมุมปลีกเท่ากัน จะทำให้แรงในการดึงมากที่สุด เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวในของท่อกับผิวเอียงของปลีกมาก แรงดึงที่เกิดจากความเสียดทานจึงมาก และเมื่อลดขนาดของครึ่งมุมปลีกเพื่อให้ความต่างของครึ่งมุมเพิ่มมากขึ้น จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวในของท่อกับผิวเอียงของปลีกน้อยลงตามลำดับ จนถึงที่ความต่างของครึ่งมุมเท่ากับ 2 องศา จากนั้นเมื่อความต่างของครึ่งมุมเพิ่มมากขึ้น แรงดึงกลับเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ถึงแม้ว่าความเสียดทานจะน้อยลง แต่การไหลตัวของเนื้อวัสดุตรงบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนทิศทางไหลมีขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์เป็นมุมเฉือนที่มากขึ้นบริเวณดังกล่าว ทำให้เกิดแรงเฉือนรีดันแดนต์ (Shear redundant) มากขึ้น จึงมีผลต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ส่งผลให้แรงในการดึงมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นจากผลการจำลองในส่วนนี้สรุปได้ว่ากรณีที่ใช้แรงในการดึงท่อน้อยที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างของครึ่งมุมเท่ากับ 2 องศา



รูปที่ 6 อิทธิพลของมุมปลีกเมื่อกำหนดมุมตายคงที่ สำหรับวัสดุทองแดง H3300 C1220

5.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของมุมตายโดยกำหนดมุมปลีกคงที่
 จากการจำลองการดึงท่อด้วย FEM เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของครึ่งมุมตายที่มีผลต่อแรงในการดึงท่อเมื่อกำหนดให้ครึ่งมุมปลีกคงที่ ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 7 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการกำหนดให้ครึ่งมุมตายคงที่ในหัวข้อที่แล้ว นั่นคือเมื่อขนาดของครึ่งมุมตายและครึ่งมุมปลีกเท่ากันจะทำให้แรงในการดึงมากที่สุด เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวนอกของท่อกับผิวเอียงของตายมาก และเมื่อเพิ่มขนาดของครึ่งมุมตายหรือเมื่อเพิ่มค่าความต่างของครึ่งมุมมากขึ้น จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวนอกของท่อกับผิวเอียงของตายน้อยลงตามลำดับ จนถึงที่ความต่างของครึ่งมุมเท่ากับ 2 องศา หลังจากนั้นเมื่อความต่างของครึ่งมุมเพิ่มมากขึ้น พบว่าแรงในการดึงกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะมุมตายที่กว้างขึ้น ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์ที่เป็นมุมเฉือนมากขึ้นตรงบริเวณที่เปลี่ยนทิศทางไหลที่มากขึ้น ทำให้เกิดรีดันแดนต์สูงบริเวณดังกล่าว และหากมุมกว้างมากขึ้นเรื่อยๆ ผลจากรีดันแดนต์

จะทำให้แรงในการดึงมากขึ้นจนเกิดการขาดของท่อได้ และจากผลการจำลองกรณีนี้สรุปได้ว่า กรณีที่ใช้แรงในการดึงท่อน้อยที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างของครึ่งมุมเท่ากับ 2 องศาเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7 อิทธิพลของมุมตายเมื่อกำหนดมุมปลีกคงที่

5.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการผลิตพื้นที่หน้าตัดสูงสุด

จากผลการจำลองที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งพบว่าความต่างของครึ่งมุมปลีกและครึ่งมุมตายที่ทำให้แรงในการดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 2 องศา จึงได้นำผลดังกล่าวมาทำการจำลองการลดพื้นที่หน้าตัด ผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้เพื่อพิจารณาหามุมที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 3 อัตราอัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ได้จากการจำลองที่ความต่างครึ่งมุมตาย (α) กับครึ่งมุมปลีก (β) เท่ากับ 2 องศา

มุมตายและปลีก (องศา)	อัตราการลดพื้นที่หน้าตัด (%)					
	36%	40%	43%	45%	48%	50%
$\alpha 9 \beta 7$	O	O	-	O	X	X
$\alpha 11 \beta 9$	O	O	-	O	X	X
$\alpha 13 \beta 11$	O	O	-	O	O	X
$\alpha 15 \beta 13$	O	O	-	O	O	X
$\alpha 17 \beta 15$	O	O	O	X	-	X

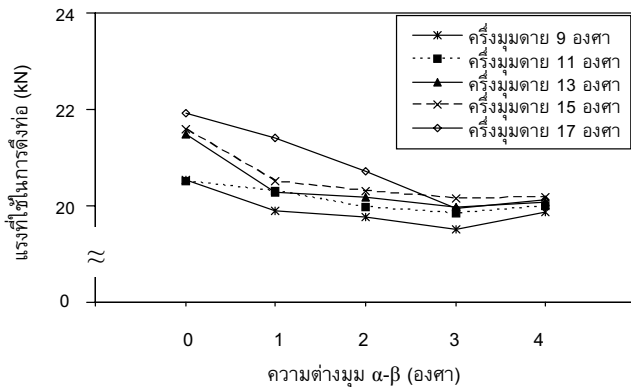
O: ขึ้นรูปได้ X: ขึ้นรูปไม่สำเร็จ -: ไม่ได้ทำการจำลอง

จากผลการจำลองพบว่าที่ครึ่งมุมตาย 13 องศาครึ่งมุมปลีก 11 องศา และครึ่งมุมตาย 15 องศาครึ่งมุมปลีก 13 องศา สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้สูงสุดที่ร้อยละ 48 ส่วนที่ครึ่งมุมตาย 17 องศาครึ่งมุมปลีก 15 องศา สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้เพียงร้อยละ 43 ดังนั้นถ้าพิจารณาจากกรณีที่ทำให้ใช้แรงในการดึงน้อย (จากรูปที่ 6) และสามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้มากๆ มุมที่ดีที่สุดในการดึงท่อทองแดงคือ กรณีครึ่งมุมตาย 13 องศาครึ่งมุมปลีก 11 องศา และกรณีครึ่งมุมตาย 15 องศาครึ่งมุมปลีก 13 องศา

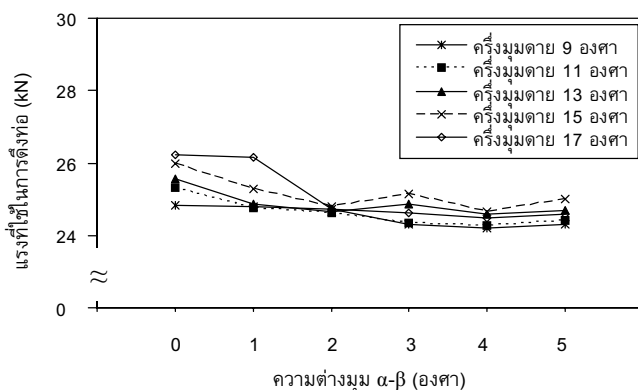
5.5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความต่างมุมที่เหมาะสมของวัสดุต่างชนิดกัน

จากผลการจำลองที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการจำลองการดึงท่อวัสดุทองแดง เกรด (JIS) H3300 C1220 เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงได้ทำ

การจำลองวัสดุต่างชนิดกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของความต่าง
 ครึ่งมุดตายและครึ่งมุดปลั๊กที่ใช้แรงในการดึงน้อยที่สุด เพื่อพิสูจน์ว่า
 สามารถนำผลการจำลองผลต่างของมุมที่เหมาะสม ไปประยุกต์ใช้กับ
 วัสดุอื่นได้หรือไม่ จึงทำการจำลองวัสดุเพิ่มเติมอีก 2 ชนิดคือ เหล็กกล้า
 ไร้สนิม เกรด AISI304 และเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI1045 ด้วย
 เงื่อนไขในการจำลองเหมือนกัน ซึ่งค่าความแข็งแรงของวัสดุทั้งสองนี้
 ใช้ค่ามาตรฐานที่มีอยู่ในฐานข้อมูลโปรแกรม DEFORM 2D ผลการ
 จำลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 อิทธิพลของมุมปลั๊กโดยกำหนดครึ่งมุดตายคงที่
 สำหรับวัสดุ AISI 304



รูปที่ 9 อิทธิพลของมุมปลั๊กโดยกำหนดครึ่งมุดตายคงที่
 สำหรับวัสดุ AISI 1045

จากผลการจำลองดังรูปที่ 6, 8 และ 9 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบจาก
 แรงที่ใช้ในการดึง วัสดุที่ใช้แรงในการดึงมากที่สุด คือเหล็กกล้าคาร์บอน
 เหล็กกล้าไร้สนิม และทองแดง ตามลำดับ ซึ่งผลของความต่างมุมที่ใช้
 แรงในการดึงน้อยที่สุดมีค่าแตกต่างกันเช่นกัน โดยกรณีท่อที่ทำจาก
 วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ค่ามุมต่างของปลั๊กและตายเท่ากับ 4 องศา จะ
 ทำให้ใช้แรงในการดึงน้อยที่สุด ส่วนกรณีท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและท่อ
 ทองแดง ต้องใช้ค่ามุมต่างของปลั๊กและตายเท่ากับ 3 องศาและ 2 องศา
 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า ต้องการ
 ความต่างของมุมมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากมุมของตายที่พบในทาง
 ทฤษฎี [15] พบว่าวัสดุต่างชนิดกัน มุมที่เหมาะสมในการดึงท่อก็มีความ
 แตกต่างกันเช่นกัน ซึ่งจากการจำลองด้วย FEM สามารถให้ผลได้
 เช่นเดียวกัน

6. สรุปผลการวิจัย

1. จากการจำลองดึงท่อทองแดง พบว่าอิทธิพลของความต่างของขนาด
 มุดตายและมุดปลั๊กเป็นตัวแปรที่มีผลต่อแรงในการดึง โดยความต่าง
 ครึ่งมุดที่ทำให้ใช้แรงดึงน้อยที่สุด คือ ครึ่งมุดตายและครึ่งมุดปลั๊กที่มี
 ความต่างกันเท่ากับ 2 องศา
2. ที่ขนาดความต่างครึ่งมุด 2 องศา ในการจำลองดึงท่อทองแดง มุมที่
 สามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้มากที่สุด คือ ครึ่งมุดตาย 13 องศา กับ
 ครึ่งมุดปลั๊ก 11 องศา และครึ่งมุดตาย 15 องศา กับครึ่งมุดปลั๊ก 13
 องศา นั่นคือสามารถลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้สูงสุดที่ 48%
3. จากการจำลองด้วยวัสดุทองแดง เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้า
 คาร์บอน พบว่าความต่างของขนาดมุดตายและมุดปลั๊กที่ทำให้ใช้แรงใน
 การดึงน้อยที่สุดเปลี่ยนไปเมื่อวัสดุเปลี่ยนไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณบางส่วนจากทุนวิจัยพระ
 จอมเกล้าฯ ราชภัฏของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ราชภัฏ และได้
 รับการสนับสนุนวัสดุทดลองจากบริษัท Furukawa (Thailand) Public
 Co., Ltd. และขอขอบคุณ นางสาวบวร โคนชัยภูมิ นักศึกษาระดับ
 ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมืองและวัสดุ ที่ช่วยดำเนินการ
 ทดลองและทำการวัดตรวจเก็บผล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yoshida K., Watanabe M., Ishikawa H., 2001 "Drawing of
 Ni-Ti shape-Memory-alloy fine tubes used in medical tests",
 Journal of Materials Processing Technology, pp. 251-155.
- [2] W.P. Fisher, A.J. Day, 1997, A study of factors controlling the
 tube-sinking process for Polymer materials, Journal of
 Materials Processing Technology, pp. 156-162.
- [3] L.Sadok, J.Kusiak, M.Packo, M.Ruminski, 1996, State of
 strain in the tube sinking process , Journal of Materials
 Processing Technology, pp.161-166.
- [4] Yoshida K. and Furuya H., 2004, Mandrel drawing and plug
 drawing of shape memory-alloy fine tubes used in catheters
 and stents, Journal of Materials Processing Technology, pp.
 1-6.
- [5] K.Swiatkowski and R.Hatalak, 2004, Study of new floating-
 plug process of thin-walled tubes, Journal of Materials
 Processing Technology, pp.105-114.
- [6] Betzalel, A., 1983, Handbook of metal-forming processes,
 John Wiley, New York, pp. 479- 525.
- [7] Kampson, K., 2001, Design for Manufacture in Cost-effective
 and Recyclable Brass. <http://www.brass.org/Training/Lecture/sld043.htm/> (accessed on September 2003)
- [8] Dieter, E., 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill , New
 York, p.674