

**การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปเบลโลวส์ด้วยกระบวนการ
ทิวบ์ไฮโดรฟอร์มมิ่งโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

**Study of the parameters that influence the bellows forming with tube hydroforming
process by finite element method.**

สุระชัย บุญประกอบ^{1*}, ชาญ ถนัดงาน², กัมปนาท ศิริเวทิน³, วิชิต บัวแก้ว⁴, และยงยุทธ เนียมทรัพย์⁵

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800
³บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ จ.นครนายก 26120
⁵บริษัท สามมิตรมอเตอร์สแมชแพคเจอรिंग จำกัด (มหาชน) จ.สมุทรสาคร 74130

*ผู้ติดต่อ: E-mail : chai7b@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์:08-1132-7487, เบอร์โทรสาร:02-252-3603

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปเบลโลวส์ด้วยกระบวนการทิวบ์ไฮโดรฟอร์มมิ่งโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ชิ้นส่วนที่ใช้ในการวิจัยคือเบลโลวส์ ทำจากวัสดุท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และท่ออะลูมิเนียมเฉื่อย AA 6010-T4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 31.75 mm หนา 1.24 mm และยาว 130 mm โดยเบลโลวส์มีจำนวนลอนทั้งหมด 5 ลอน ระยะห่างระหว่างลอน 10 ± 1.0 mm ความสูงลอน 5.5 ± 1.0 mm และความหนาลอนไม่น้อยกว่า 0.7 mm วิธีดำเนินการวิจัยมีดังนี้คือ สร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DYNAFORM V. 5.6 และ LS-DYNA โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ความดัน เอ็นพีด ที่มีผลต่อความสูงและความหนาลอน

ผลการวิจัยพบว่า เบลโลวส์ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและท่ออะลูมิเนียมเฉื่อย เมื่อใช้ความดันและเอ็นพีดสัมพันธ์กันจะได้ความสูงและความหนาลอนตามที่กำหนด ความสูงลอนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และท่ออะลูมิเนียมเฉื่อยเท่ากัน ส่วนความหนาท่ออะลูมิเนียมเฉื่อยน้อยกว่าท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 10% แต่เบลโลวส์ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้ความดันมากกว่าท่ออะลูมิเนียมเฉื่อย 38.33% เนื่องจากค่าความแข็งแรงของวัสดุท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมากกว่าท่ออะลูมิเนียมเฉื่อย

คำหลัก: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ทิวบ์ไฮโดรฟอร์มมิ่ง, ความดัน, เอ็นพีด, เบลโลวส์

Abstract

The objective of this research is to study of the parameters that influence the bellows forming with tube hydroforming process by finite element method. Parts used in research called bellows which is made from stainless steel tube SUS 304 and aluminum alloy tube AA 6010-T4 with 31.75 mm outer diameter, 1.24 mm thick and 130 mm long. Bellows with have 5 total wave distance between the flutes 10 ± 1.0 mm height, wave 5.5 ± 1.0 mm. and not less than 0.7 mm thick. DYNAFORM V. 5.6 and LS-DYNA software for Simulation and analyzed. The parameters that were studied pressure and end feed that affects the height and thickness of bellows.

The results show that stainless steel tube bellow and aluminum alloy tube bellow. When the pressure and end feed relative cause to the thickness and the wave height, The wave height of stainless steel tube and aluminum alloy tube is equal. The thickness of aluminum alloy tube, stainless steel tube less than 10% But pressure of stainless steel tube, aluminum alloy tube much more 38.33% because of the strength of them.

Keywords: Finite element method, Tube hydroforming, Pressure, End feed, Bellows

1. บทนำ

ไฮโดรฟอร์มมิ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนท่อ การขึ้นรูปด้วยทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวที่มีแรงดันสูงจนชิ้นงานที่เป็นท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามรูปทรงของแม่พิมพ์ การขึ้นรูปด้วยทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่งจะมีข้อได้เปรียบทางด้านความแข็งแรงที่สูงขึ้น คุณภาพดีขึ้น น้ำหนักลดลง และต้นทุนของแม่พิมพ์ลดน้อยลง การขึ้นรูปทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน การควบคุมค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายเช่น เกิดการย่น และการระเบิด สำหรับประเทศไทยการศึกษาทางด้านทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่งยังมีน้อยการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุชิ้นงาน ในกระบวนการขึ้นรูปทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่ง ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุชิ้นงาน

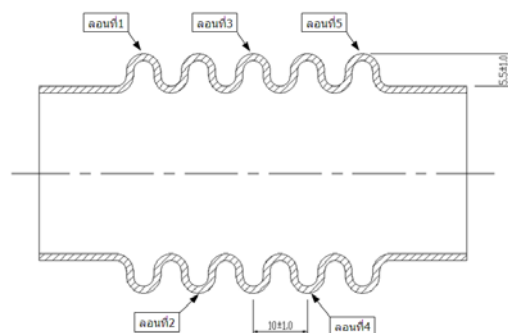
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปเบลโลวส์ด้วยกระบวนการทิวป์ไฮโดรฟอร์มมิ่งโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 ชิ้นงานที่นำมาใช้ในการวิจัยชื่อเบลโลวส์วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยคือท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และท่ออะลูมิเนียมเกรด AA 6010-T4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตสุด 31.75 mm หนา 1.24 mm ยาว 130 mm

1.2.2 จำนวนลอนเบลโลวส์ที่จำลองและวิเคราะห์สำหรับการวิจัยนี้มีจำนวนสูงสุด 5 ลอน ระยะห่างระหว่างลอนคือ 10 ± 1.0 mm ความสูงของลอนคือ 5.5 ± 1.0 mm และความหนาลอนไม่น้อยกว่า 0.7 mm



รูปที่ 1 ภาพตัดเบลโลวส์

1.2.3 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมDYNAFORM V. 5.6 และ LS-DYNA

1.2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

ตัวแปรต้น คือ ความดัน และเอ็นพีดี

ตัวแปรตาม คือ ความสูงของลอน และความหนาของลอน

2. ทฤษฎี

2.1 การประมาณค่าความดัน

รัศมีเล็กสุดของแม่พิมพ์มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป ความดันสูงสุดหาได้จากรัศมีที่เล็กที่สุดของแม่พิมพ์ จากสมการพื้นฐานทฤษฎีผนังบาง (Thin-wall theory) การเปลี่ยนรูปเกิดการยืดทั้ง 2 แกน โดยความดันจะดันวัสดุขึ้นงานให้สัมผัสกับมุมแม่พิมพ์ (Die corner) ความดันสูงสุดหาได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$P = (UTS \times T) \div R \quad (1)$$

เมื่อ UTS คือความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุ, T คือความหนาของวัสดุ และ R คือรัศมีแม่พิมพ์เล็กสุด

2.2 การประมาณค่าเอ็นพีดี

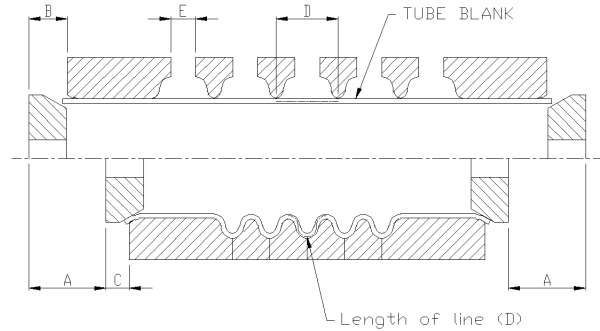
การประมาณค่าเอ็นพีดีที่เหมาะสมช่วยป้องกันการย่นของลอน ระยะการเคลื่อนที่ของเอ็นพีดีที่เหมาะสม (A) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับรูปทรงของลอน ค่าที่เหมาะสมหาได้จากเส้นกึ่งกลางความหนาของลอน (Length of line, D) หลังการขึ้นรูป ตามสมการที่ 2 และ 3 ดังนี้

$$E = D \times 0.4 \quad (2)$$

เมื่อ E คือช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์, 0.4 คือค่าเผื่อการยืดตัวของวัสดุ 40%

$$A = ((B-C) + E + E + E/2) \quad (3)$$

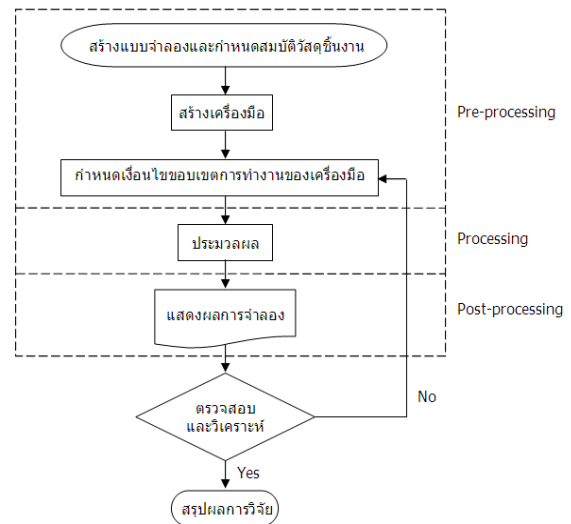
เมื่อ A คือระยะการเคลื่อนที่รวมของเอ็นพีดี, B คือระยะห่างเอ็นพีดีและแม่พิมพ์เริ่มต้น, C คือระยะห่างเอ็นพีดีและแม่พิมพ์กดปลายขึ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระยะการเคลื่อนที่ของเอ็นพีดี

3. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนตามแผนภูมิรูปที่ 3 โดยแบ่งขั้นตอนที่สำคัญได้ดังนี้

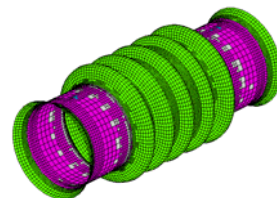


รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

3.1.1.1 สร้างแบบจำลองและกำหนดสมบัติวัสดุขึ้นงาน



รูปที่ 4 แบบจำลองขึ้นรูปเบลโลวส์

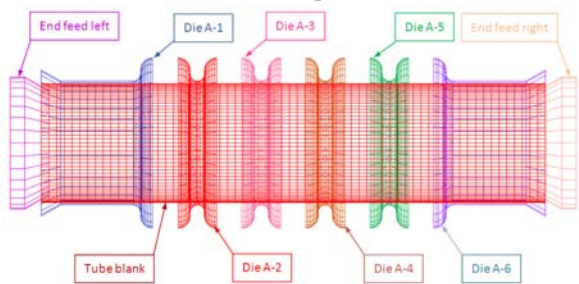
จากรูปที่ 4 สร้างแบบจำลองขึ้นรูปเบลโลวส์ด้วยโปรแกรม DYNAFORM V. 5.6 โดยใช้คำสั่ง Line, Surface และ Mesh ขั้นตอนการสร้าง Mesh เริ่มจากกำหนดให้ Mesh มีเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม แล้วทำการ

แบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ กำหนดให้มีเอลิเมนต์เริ่มต้น 1.82 mm ได้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 1,230 เอลิเมนต์ กำหนดให้มีการแบ่งเอลิเมนต์ตามสภาวะการณ์ (Adaptive meshing) สูงสุดได้ 3 ระดับ จากนั้นทำการกำหนดสมบัติวัสดุชิ้นงานในแบบจำลอง โดยวัสดุที่ใช้ในการวิจัยคือ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และท่ออะลูมิเนียมเกรด AA 6010-T4 สมบัติของวัสดุชิ้นงาน ดังตารางที่ 1 จากนั้นทำการกำหนดชนิดเอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell element) ตามแบบของ Belytschko et al. (1984) มีจำนวนจุดการอินทิเกรต (Number of integration point, NIP) 5 จุดตลอดความหนา ค่าตัวแปรแก้ไขความเฉือน (Shear correction factor) 0.833 อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปด้วยสมการ Power law ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุชิ้นงาน

สมบัติ	SUS 304	AA 6010-T4
Tensile strength, Yield ; MPa	215	170
Tensile strength, Ultimate ; MPa	505	290
Young's modulus (E) ; GPa	207	69
Strength coefficient (K) ; MPa	1426	503.9
Poisson's ratio (V)	0.28	0.33
Elongation at break ; %	70	24
Strain-hardening exponent (n)	0.502	0.211
Power law	$\bar{\sigma} = 1426\bar{\epsilon}^{0.502}$	$\bar{\sigma} = 503.9\bar{\epsilon}^{0.211}$

3.1.1.2 สร้างสร้างเครื่องมือและกำหนดสมบัติเครื่องมือ

สร้างเครื่องมือด้วยโปรแกรม DYNAFORM V. 5.6 โดยใช้คำสั่ง Line, Surface และ Mesh ขั้นตอนการสร้าง Mesh เริ่มจากกำหนดให้ Mesh มีเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ขนาดเอลิเมนต์โตสุด 18.75 mm และเล็กสุด 0.5 mm ซึ่งได้จำนวนเอลิเมนต์ดังนี้ เอ็นพีดซ้าย 64 เอลิเมนต์ เอ็นพีดขวา 64 เอลิเมนต์ แม่พิมพ์ 6,008 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.1.1.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทำงานของเครื่องมือ

เอ็นพีดซ้าย เอ็นพีดขวาและแม่พิมพ์สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกน การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ความดัน สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงาน

3.1.2 การประมวลผล (Processing)

ประมวลผลด้วยโปรแกรม LS-DYNA เป็นขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูป

3.1.3 แสดงผลการจำลอง (Post-processing)

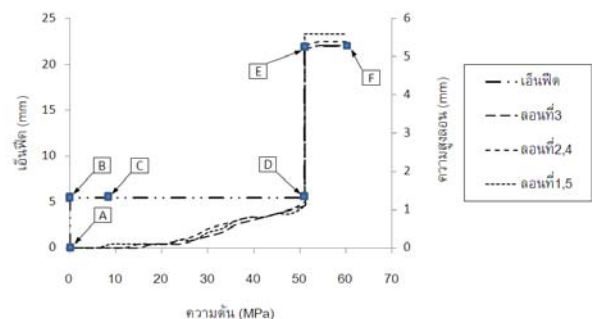
แสดงผลการจำลองด้วยภาพกราฟิกแสดงความหนา ภาพกราฟิกแสดงความสูงเบลโลวส์และแสดงผลของความเสียหายด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD)

3.2 ตรวจสอบและวิเคราะห์ผล

การตรวจสอบและวิเคราะห์ผลความเสียหายจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป กราฟแสดงความหนาและความสูงเบลโลวส์ หากวัสดุชิ้นงานไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดก็จะทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์และประมวลผลใหม่ ส่วนวัสดุชิ้นงานที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดก็จะนำค่าพารามิเตอร์และผลการจำลองไปทำการสรุปผลต่อไป

4. ผลการวิจัย

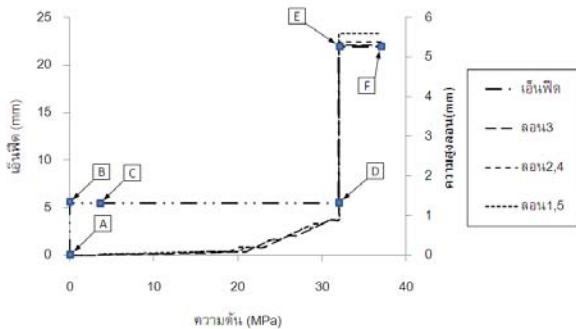
4.1 ผลของความดันและเอ็นพีด ที่มีผลต่อความสูงลอน



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ความดัน เอ็นพีด และความสูงลอนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

จากรูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดัน เอ็นพีดและความสูงลอน เมื่อใช้ความดันและเอ็นพีด

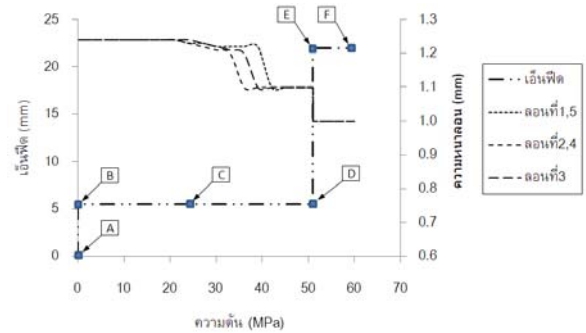
สัมพันธ์กัน จะได้ความสูงลอนตามที่กำหนด โดยที่จุด A คือจุดเริ่มต้น ไม่มีความดันและไม่มีการเคลื่อนที่ของเอ็นไฟด์ ที่จุดB เอ็นไฟด์ 5.5 mm ไม่มีความดัน ที่จุดC ความดัน 9 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ความสูงลอนที่ 1.5 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสูง 0.1 mm ที่จุดD ความดัน 51 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ลอนที่ 1,3,5 สูง 1.1 mm ส่วนลอนที่ 2,4 สูง 1.2 mm ที่จุดE เอ็นไฟด์ปรับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 22 mm ความดัน 51 MPa ลอนที่ 1,5 สูง 5.5 mm ลอนที่ 2,4 สูง 5.3 mm ส่วนลอนที่ 3 สูง 5.2 mm ที่จุดF ความดัน 60 MPa เอ็นไฟด์ 22 mm ความสูงลอนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ความสูงลอนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดคือลอนที่ 1,5 สูง 5.6 mm ลอนที่ 2,4 สูง 5.4 mm ลอนที่ 3 สูง 5.3 mm



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์ และความสูงลอนของท่ออะลูมิเนียมเกรด AA 6010-T4

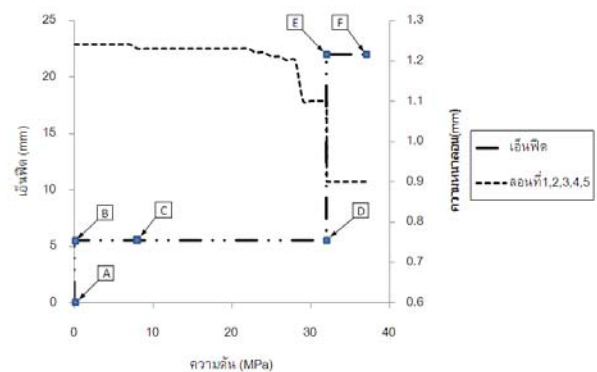
จากรูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์และความสูงลอน เมื่อใช้ความดันและเอ็นไฟด์สัมพันธ์กัน จะได้ความสูงลอนตามที่กำหนด โดยที่จุด A คือจุดเริ่มต้นไม่มีความดันและไม่มีการเคลื่อนที่ของเอ็นไฟด์ ที่จุดB เอ็นไฟด์ 5.5 mm ไม่มีความดัน ที่จุดC ความดัน 4 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ลอนที่ 1,5 สูง 0.04 mm ลอนที่ 2,4 สูง 0.03 mm และลอนที่ 3 สูง 0.02 mm ที่จุดD ความดันปรับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 32 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ความสูงลอนที่ 1,2,3,4,5 สูง 0.9 mm ที่จุดE ความดัน 32 MPa เอ็นไฟด์ 22 mm ความสูงลอนที่ 1,5 สูง 5.6 mm ลอนที่ 2,4 สูง 5.4 mm ลอนที่ 3 สูง 5.3 mm ที่จุดF ความดัน 37 MPa เอ็นไฟด์ 22 mm ความสูงลอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความสูงลอนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดคือความสูงลอนที่ 1,5 สูง 5.6 mm ลอนที่ 2,4 สูง 5.4 mm ลอนที่ 3 สูง 5.3 mm

4.2 ผลของความดันและเอ็นไฟด์ ที่มีผลต่อความหนาลอน



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์ และความหนาลอนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

จากรูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์และความหนาลอน เมื่อใช้ความดันและเอ็นไฟด์สัมพันธ์กัน จะได้ความหนาลอนตามที่กำหนด โดยที่จุด A คือจุดเริ่มต้นไม่มีความดันและไม่มีการเคลื่อนที่ของเอ็นไฟด์ ที่จุดB เอ็นไฟด์ 5.5 mm ไม่มีความดัน ที่จุดC ความดัน 24 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ลอนที่ 1,2,4,5 หนา 1.23 mm ลอนที่ 3 ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่จุดD ความดัน 51 MPa เอ็นไฟด์ 5.5 mm ลอนที่ 1,2,4,3,5 หนา 1.1 mm ที่จุดE เอ็นไฟด์ปรับเพิ่มขึ้นถึง 22 mm ความดัน 51 MPa ทำให้ลอนที่ 1,2,3,4,5 หนา 1.0 mm ที่จุดF ความดัน 60 MPa เอ็นไฟด์ 22 mm ความหนาลอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความหนาลอนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดคือลอนที่ 1,2,3,4,5 หนา 1.0 mm

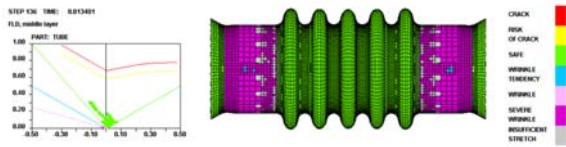


รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์ และความหนาลอนของท่ออะลูมิเนียมเกรด AA 6010-T4

จากรูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดัน เอ็นไฟด์และความหนาลอน เมื่อใช้ความดันและเอ็นไฟด์สัมพันธ์กัน จะได้ความหนาลอนตามที่กำหนด โดยที่

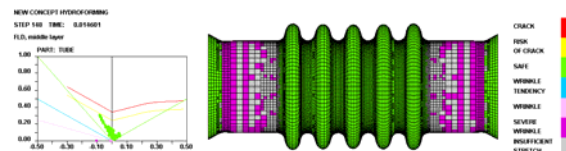
จุด A คือจุดเริ่มต้นไม่มีความดันและไม่มีการเคลื่อนที่ของเอ็นพีดี ที่จุด B เอ็นพีดี 5.5 mm ไม่มีความดัน ที่จุด C ความดัน 8 MPa เอ็นพีดี 5.5 mm ลอนที่ 1,2,3,4,5 หน้า 1.23 mm ที่จุด D ความดันปรับเพิ่มขึ้นถึง 32 MPa เอ็นพีดี 5.5 mm ลอนที่ 1,2,3,4,5 หน้า 1.1 mm ที่จุด E เอ็นพีดีปรับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 22 mm ความดัน 32 MPa ลอนที่ 1,2,3,4,5 หน้า 0.9 mm ที่จุด F ความดัน 37 MPa เอ็นพีดี 22 mm ความหนา ลอน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความหนา ลอน เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดคือ ลอน ที่ 1,2,3,4,5 หน้า 0.9 mm

4.1 ผลของความเสียหายจากการขึ้นรูป



รูปที่ 9 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

จากรูปที่ 9 ดูความเสียหายโดยวิเคราะห์จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พบว่าวัสดุชิ้นส่วนมีความเครียดหลักและความเครียดรองอยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปได้ไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 10 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปท่ออะลูมิเนียมเจือ AA 6010-T4

จากรูปที่ 10 ดูความเสียหายโดยวิเคราะห์จากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พบว่าวัสดุชิ้นส่วนมีความเครียดหลักและความเครียดรองอยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปได้ไม่เกิดความเสียหาย

5. สรุปผล

เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 และท่ออะลูมิเนียมเจือ AA 6010-T4 พบว่าเอ็นพีดีและความสูง ลอน เท่ากัน ส่วนความดัน และความหนา ลอน แตกต่างกัน 38.33% และ 10% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลจำลองการขึ้นรูปเบลโลวส์

ตัวแปรต้น/ตัวแปรตาม	SUS 304	AA 6010-T4	%แตกต่าง
ความดัน (MPa)	60	37	38.33
เอ็นพีดี (mm)	22	22	-
ความสูง ลอน ที่ 1,5 (mm)	5.6	5.6	-
ความสูง ลอน ที่ 2,4 (mm)	5.4	5.4	-
ความสูง ลอน ที่ 3 (mm)	5.3	5.3	-
ความหนา ลอน ที่ 1,5 (mm)	1	0.9	10
ความหนา ลอน ที่ 2,4 (mm)	1	0.9	10
ความหนา ลอน ที่ 3 (mm)	1	0.9	10

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบพระคุณ บริษัท สามมิตรมอเตอร์ส์แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม DYNAFORM V. 5.6 และ LS-DYNA เพื่องานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] M. Plancak, F. Vollertsen and J. Woitschig. (2005) Analysis, finite element simulation and experimental investigation of friction in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 170 pp. 220-228.
- [2] L.M. Smith, N. Ganeshmurthy, P.Murty, C.C. Chen and T. Lim. (2004) Finite element modeling of the tubular hydroforming process part 1. Strain rate-independent material model assumption, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 147 pp. 121-130.
- [3] ทวีภัทร์ บุรณิธิ. การทดสอบทางดิจิทัลกับอิทธิพลของความดันภายในสำหรับการผลิตชิ้นส่วนลักษณะท่อโดยการขึ้นรูปด้วยของเหลว. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551; 14(2-3)

7.2 หนังสือ

[1] ชอายุ ถนัดงาน (2543), เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. (เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ.) กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[2] LSTC. (2006), LS-DYNA Theory Manual Version 970.

[3] S. Harjinder. (2003), Fundamentals of hydroforming. Michigan : Society of Manufacturing Engineering.