

การจำลองการทุบขึ้นรูปไทเทเนียมโฟมเพื่อการผลิตชิ้นส่วนปลูกฝัง Simulation of Titanium foam forging to produce implant components

อมรรัตน์ ไหว่เอง* และ จุฬาลักษณ์ คำไม้

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์สาย 1 บางซื่อ กทม 10800

*ติดต่อ: E-mail: chit_pan@hotmail.com โทรศัพท์ : (662) 5552000 ต่อ 1539, โทรสาร: (662) 5870029

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พฤติกรรมกลการเสียรูประดับมหภาคของไทเทเนียมโฟมในระหว่างการตีขึ้นรูปและการทุบขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นส่วนของสะโพกเทียมโดยเลือกใช้แบบจำลอง elasto-plastic และ แบบจำลองวัสดุของ Shima-Oyane ในการอธิบายพฤติกรรมของไทเทเนียมโฟม ผลการจำลองของการตีขึ้นรูปได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีมาก่อน สำหรับการทุบขึ้นรูปไทเทเนียมโฟมในแม่พิมพ์ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายความหนาแน่นบนชิ้นงานที่ได้จากการทุบขึ้นรูปบิลเลทที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มต้นสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอทั้งชิ้น

คำหลัก: แบบจำลองวัสดุของ Shima-Oyane, ไทเทเนียมโฟม, การทุบขึ้นรูป, การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper addresses the finite element simulations of macroscopic deformation of titanium foam during upsetting and forging of a section of hip implant. Elasto-plastic and Shima-Oyane material models have been utilized to describe behaviour of Titanium foam. Simulation result obtained from the upsetting of titanium foam billet has been compared against published experimental data. Also analysis of density distribution on the section of hip implant after being forged in the die has been carried out for both uniform and non-uniform initial relative density billets

Keywords: Shima-Oyane model, Titanium foam, Forging, Finite element simulation

1. บทนำ

การใช้ไทเทเนียมโฟมสำหรับเป็นวัสดุปลูกฝังเริ่มได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากไทเทเนียมโฟมมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้กับร่างกายและมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างวัสดุปลูกฝังกับกระดูกมนุษย์ อีกทั้งคุณสมบัติของความแข็งตึง (Stiffness) ที่ใกล้เคียงกับกระดูกมนุษย์ อย่างไรก็ตามการนำมาประยุกต์ใช้นั้นยังประสบปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายในการผลิตและความซับซ้อนในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะรูปร่างที่เฉพาะที่ไม่เป็นรูปเรขาคณิตซึ่งต้องการการขึ้นรูปขึ้นรูปขั้นที่สอง (secondary operation) เช่นการตัด และการทุบขึ้นรูปของบิลเลทหรือสแลบที่ผลิตจากโลหะโฟม ทั้งนี้ยังรวมถึงการขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการขึ้นรูปขึ้นรูปขั้นที่สองของโลหะโฟมอีกด้วย ในการขึ้นรูปโลหะโฟมจากพรี

ฟอร์มโฟมเพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการนั้นต้องมีการออกแบบกระบวนการและแม่พิมพ์ให้เหมาะสมเพื่อให้ชิ้นงานได้คุณภาพและมาตรฐาน ปัจจุบันการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีบทบาทในการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการอย่างมาก อย่างไรก็ตามความถูกต้องของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับการใช้แบบจำลองวัสดุโลหะโฟมที่เหมาะสม เพราะวัสดุโลหะโฟมจะมีพฤติกรรมในการเสียรูปที่ไม่เหมือนโลหะตัน (solid metal) ทั่วไปคือ โลหะตันโดยทั่วไปจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงาน (Incompressible) ในระหว่างเกิดการเสียรูป แต่วัสดุโลหะโฟมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Compressible) ในระหว่างเกิดการเสียรูปเนื่องมาจากการโก่งงอ (Buckling) ของผนังรูพรุนและการพังทลาย (collapse) ของรูพรุนในเนื้อโฟม

ทำให้โลหะมีปริมาตรลดลง ปริมาณรูพรุนจึงมีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของโลหะโพม ดังนั้นพื้นผิวการครากและของโลหะโพมจะขึ้นกับทั้งค่าความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเฉื่อย มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของอลูมิเนียมโพมและทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรม [2-6] ดังกล่าว ซึ่งแบ่งได้เป็นการจำลองแบบ explicit micromechanics ซึ่งทำการจำลองเนื้อโลหะและช่องว่าง [2,5] และการจำลองแบบ implicit continuum [3-5] โดยพิจารณาโลหะโพมเป็นโครงสร้างต่อเนื่องเนื้อเดียว ซึ่งพฤติกรรมของโลหะโพมเป็นไปตามแบบจำลองคอนสติดิวทีฟของโลหะโพม [1,7]

การศึกษาและการจำลองการขึ้นรูปขั้นตอนที่สองของโลหะโพมที่ผ่านมาจะเป็นการจำลองการตัดอลูมิเนียมแผ่นแซนวิชโพม [3] และท่ออลูมิเนียมโพม [6] สำหรับไทเทเนียมโพมนั้นยังมีการศึกษาอยู่น้อย [8,9] เพราะเพิ่งจะสามารถผลิตได้ไม่นานมานี้ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาโดยการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกล

ในบทความนี้จะทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการตีขึ้นงานไทเทเนียมโพมทรงกระบอก โดยเลือกใช้ทั้ง แบบจำลอง elasto-plastic และแบบจำลองวัสดุของ Shima และ Oyane [1] โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการตีขึ้นจากแบบจำลองวัสดุทั้งสองแบบกับการทดลองของ Imwinkelried [8] ที่เปอร์เซ็นต์รูพรุน 62.5% รวมทั้งได้มีการจำลองการทุบขึ้นรูปขึ้นส่วนสะโพกเทียม สำหรับการทุบขึ้นรูปไทเทเนียมโพมในแม่พิมพ์นั้นได้ทำการวิเคราะห์การกระจายความหนาแน่นบนชิ้นงานที่ได้จากการทุบขึ้นรูปบิลเลทที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สม่ำเสมอทั้งชิ้นและไม่สม่ำเสมอ

2. การจำลองการตีขึ้นไทเทเนียมโพม

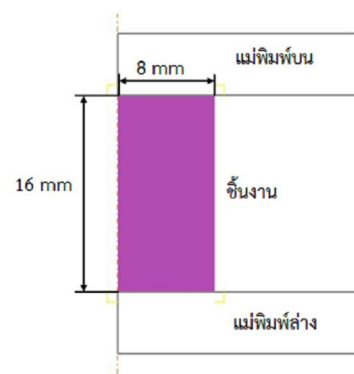
2.1 แบบจำลองการตีขึ้น

ชิ้นงานไทเทเนียมโพมที่นำมาทำการตีขึ้นเป็นชนิดเป็นทรงกระบอกสูง 16 มิลลิเมตร และมีรัศมี 8 มิลลิเมตร โดยทำการจำลองในสองมิติแบบสมมาตรรอบแกนดังแสดงในรูปที่ 1 กำหนดให้แม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) โดยที่แม่พิมพ์ล่างอยู่นิ่งกับที่ ขณะที่แม่พิมพ์บนกดลงมา 50% ของความสูงชิ้นงาน และกำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.75 ตามการศึกษาของ Manisekar และคณะ [10] สำหรับพฤติกรรมของไทเทเนียมโพมอธิบาย

โดยใช้ a) แบบจำลอง Elasto-Plastic ซึ่งคุณสมบัติทางกลจากการทดสอบของ Imwinkelried [8] ที่เปอร์เซ็นต์รูพรุน 62.5% ซึ่งเป็นปริมาณรูพรุนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนปลูกฝัง b) แบบจำลองวัสดุรูพรุนของ Shima-Oyane [1] ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุที่มีรูพรุนในระหว่างการเสียรูปด้วย ดังนั้นฟังก์ชันการคราก (yield function) จะขึ้นอยู่ทั้งค่าความเค้นเฉื่อยและความเค้นประสิทธิผลอีกทั้งได้พิจารณาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ร่วมด้วยดังแสดงในสมการ

$$\delta\sigma_0^2 = A \left\{ \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\} + \left(1 - \frac{A}{3}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 \quad (1)$$

โดย σ_0 คือ ความเค้นคราก $A = 2 + D^2$, $\delta = 2D^2 - 1$ D คือความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยในการจำลองนี้จะกำหนดความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มต้นของชิ้นงานเท่ากับ 0.375 เท่ากันทั้งชิ้น แบบจำลองดังกล่าวสามารถแสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทุบขึ้นรูปชิ้นงานได้

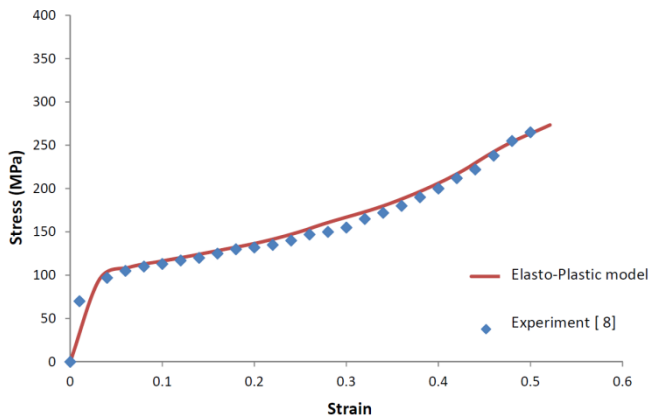


รูปที่ 1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการตีขึ้น

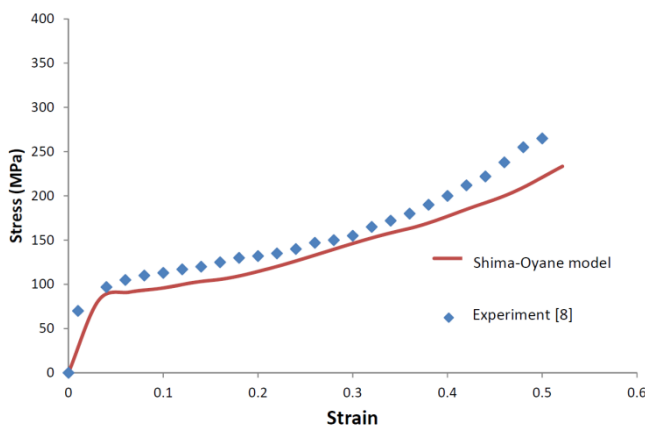
2.2 ผลการจำลองการตีขึ้นไทเทเนียมโพม

ในรูปที่ 2 และ 3 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากผลการทดลองของ Imwinkelried [8] ที่เปอร์เซ็นต์รูพรุน 62.5% กับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic และการใช้แบบจำลองของ Shima-Oyane ตามลำดับ จากกราฟพบว่าผลการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic ให้กราฟความเค้น-ความเครียดใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยความ

คลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 7.2% ในขณะที่ผลการจำลองจากแบบจำลองวัสดุของ Shima-Oyane ให้กราฟที่ให้ค่าความเค้นต่ำกว่าผลการทดลองโดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 17% ที่ความเครียด 0.5

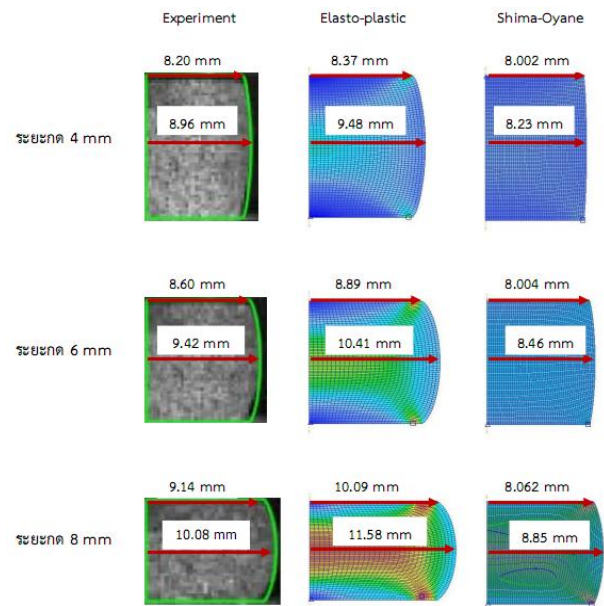


รูปที่ 2 กราฟความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง [8] กับการจำลองแบบ Elasto-Plastic



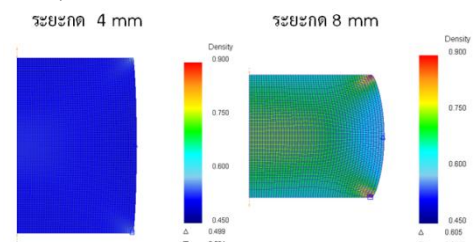
รูปที่ 3 กราฟความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง [8] กับการจำลองแบบ Shima-Oyane

เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างชิ้นงานที่ระยะกด 4 mm 6 mm และ 8 mm ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองจากทั้งสองการจำลองซึ่งแสดงในรูปที่ 4 พบว่าการจำลองที่ใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic เกิดการขยายในแนวรัศมีมากกว่าผลการทดลองในขณะที่รูปร่างที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลอง Shima-Oyane เกิดการขยายทางแนวรัศมีน้อยกว่าผลการทดลอง อย่างไรก็ตามรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองทั้งสองมีความแตกต่างจากการทดลองประมาณ 12% ในแนวรัศมี



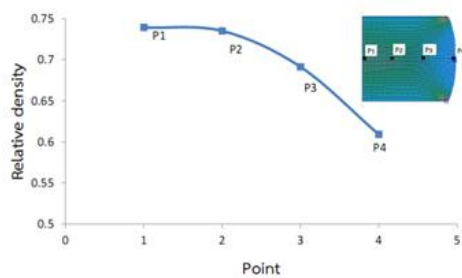
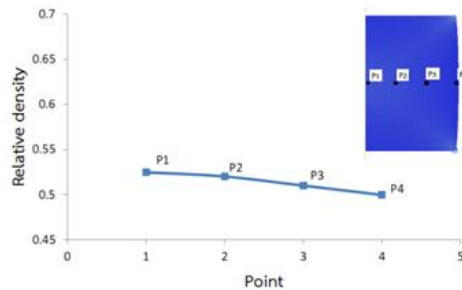
รูปที่ 4 เปรียบเทียบรูปร่างชิ้นงานที่ระยะกดต่างๆ

จากผลการจำลองถึงแม้แบบจำลอง Elasto-Plastic จะให้ผลการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ดีกว่าแบบจำลองของ Shima-Oyane แต่การใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic มีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการทำนาย ไม่สามารถทำนายผลที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์อื่นๆได้ จำเป็นต้องมีผลการทดสอบทางกลของวัสดุที่ความหนาแน่นที่ต้องการวิเคราะห์ อีกทั้งไม่สามารถแสดงการกระจายของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงานได้ ในขณะที่แบบจำลองวัสดุของ Shima-Oyane สามารถแสดงค่าการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงานได้และมีความสามารถในการทำนายผลที่ความหนาแน่นค่าอื่นๆ ได้ ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการทุบขึ้นรูปขึ้นตอนที่สองจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนไประหว่างการขึ้นรูปด้วย เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสม

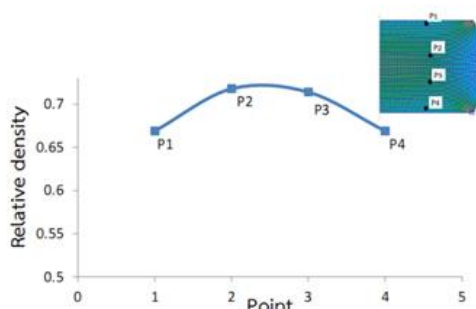
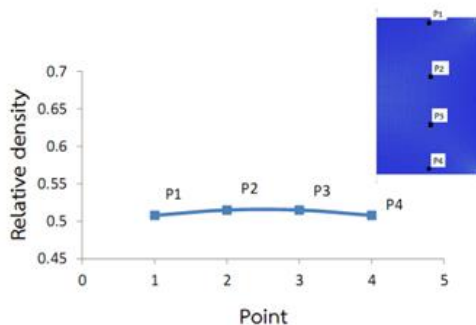


รูปที่ 5 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงาน

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงานที่ระยะกด 4 mm และ 8 mm จะเห็นได้ว่าถึงแม้บิลเลทเริ่มต้นจะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากันแต่เมื่อตีสันความหนาแน่นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอดังกราฟในรูปที่ 6 ที่แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามแนวรัศมีและตามแนวความสูงที่ระยะกด 4 mm และ 8 mm จะเห็นได้ว่ายิ่งกดลงมากความแตกต่างของความหนาแน่นภายในชิ้นงานยิ่งมากขึ้น



(a)



(b)

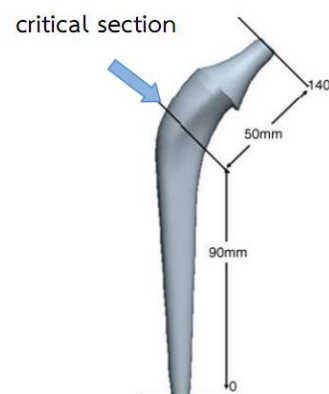
รูปที่ 6 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นตาม (a) แนวรัศมี และ(b) แนวความสูง

3. การจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นส่วนประกอบสะโพกเทียม

ในการทุบขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนมักจะทำให้เกิดการกระจายของความหนาแน่นไม่เท่ากันทั้งชิ้นงาน ถึงแม้ว่าบิลเลทเริ่มต้นจะมีความหนาแน่นเท่ากัน เนื่องจากแต่ละบริเวณของชิ้นส่วนเกิดความเค้นไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติทางกลต่างกัน หากการจำลองสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในระหว่างการทุบขึ้นรูปได้จะช่วยให้สามารถกำหนดการกระจายของความหนาแน่นของบิลเลทเริ่มต้นให้เหมาะสมเพื่อให้ชิ้นงานสุดท้ายมีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอทั้งชิ้น ในที่นี้จะทำการจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นส่วนซับซ้อนที่ทำจากไทเทเนียมโพลีเมอร์โดยใช้แบบจำลองของ Shima-Oyane

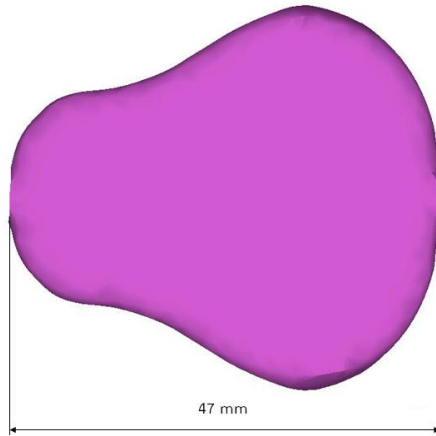
3.1 รูปร่างส่วนประกอบสะโพกเทียม

ในที่นี้จะทำการจำลองเฉพาะส่วนหนึ่งของสะโพกเทียมที่เป็นส่วนที่เกิดความเสียหายจากการล้ามากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 7 บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูงมากจากการศึกษาของ Raimondi และ Pietrabissa [11] รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการจำลองแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงการวางแม่พิมพ์ล่าง แม่พิมพ์บน และชิ้นงานเริ่มต้นซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 52 mm หนา 20 mm กำหนดให้แม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) แม่พิมพ์บนเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 0.2 mm/s ความเสียหายระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์กำหนดโดยสัมประสิทธิ์ความเสียหาย, m , เท่ากับ 0.75 [10].

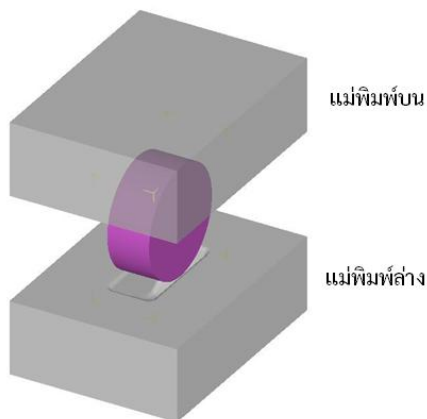


รูปที่ 7 บริเวณที่เกิดการเสียหายจากการล้ามากที่สุดของสะโพกเทียม [11]

ในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์ชิ้นงานไทเทเนียมโพลีเมเริ่มต้นที่มีการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์สม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้นและชิ้นที่มีการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์ไม่สม่ำเสมอทั้งชิ้น



รูปที่ 8 ขนาดของส่วนประกอบสะโพกเทียมที่ใช้ในการจำลอง

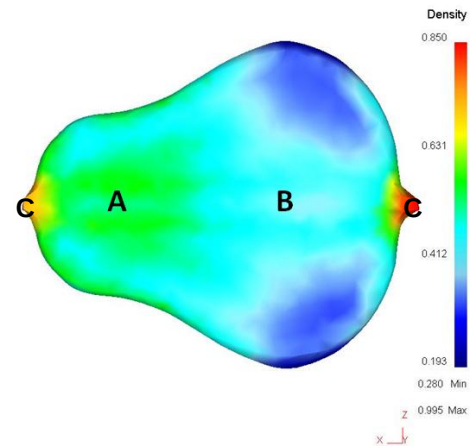


รูปที่ 9 ชุดแม่พิมพ์พอร์จิจ

3.2 ผลการจำลองส่วนประกอบของสะโพกเทียม

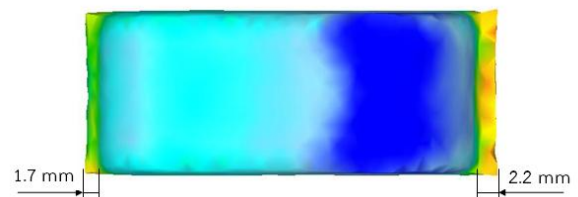
3.2.1 กรณีที่ใช้บิลเลทเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้น

กรณีนี้กำหนดให้ชิ้นงานเริ่มต้นซึ่งเป็นทรงกระบอกมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้นกำหนดให้ความหนาแน่นเป็น 0.3 ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 10

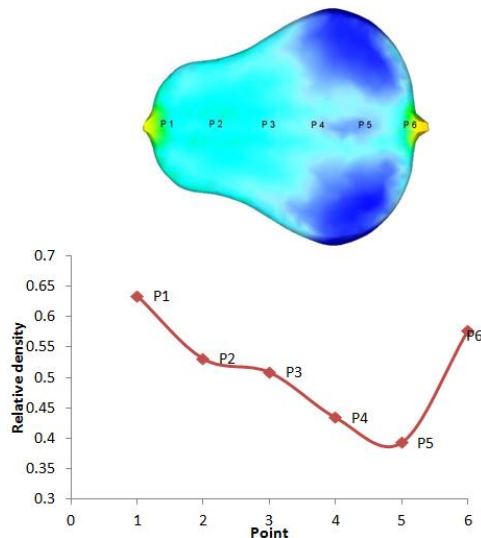


รูปที่ 10 แสดงการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์ในชิ้นงานสำเร็จ

พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นไม่เท่ากันบริเวณที่ถูกกดลงมามาก (บริเวณ A) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณ 80 % ในขณะที่บริเวณ B เสี่ยงน้อยกว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณ 40% บริเวณกลางชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าบริเวณขอบนอกที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ บริเวณขอบ C เกิดครีบขึ้นมีขนาดดังในรูปที่ 11 ซึ่งความหนาแน่นในบริเวณดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นสูงเพราะถูกบีบอัดมาก ครีบทางด้านซ้ายน้อยกว่าทางด้านขวาเพราะบริเวณทางด้านซ้ายเกิดการกดมากกว่าด้านขวา กราฟในรูปที่ 12 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามแนวนอนของชิ้นงานสำเร็จโดยวัดที่จุด P1-P6 พบว่าความหนาแน่นตรงกลางมีค่าต่ำและความแตกต่างสูงสุดของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 0.3 ไม่พิจารณาบริเวณครีบ



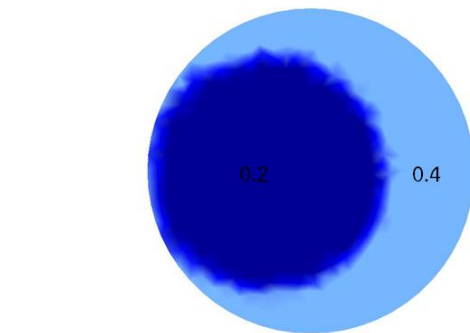
รูปที่ 11 ครีบที่เกิดจากการทุบขึ้นรูปในกรณีที่บิลเลทเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากัน



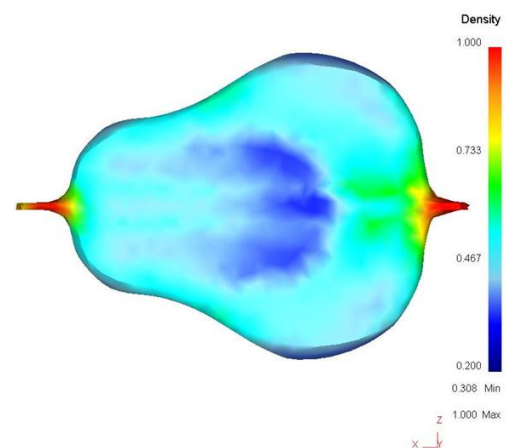
รูปที่ 12 กราฟแสดงการกระจายของความหนาแน่น
สัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ

3.2.2 กรณีที่ใช้บิลเลทเริ่มต้นที่มีความหนาแน่น สัมพัทธ์ไม่สม่ำเสมอ

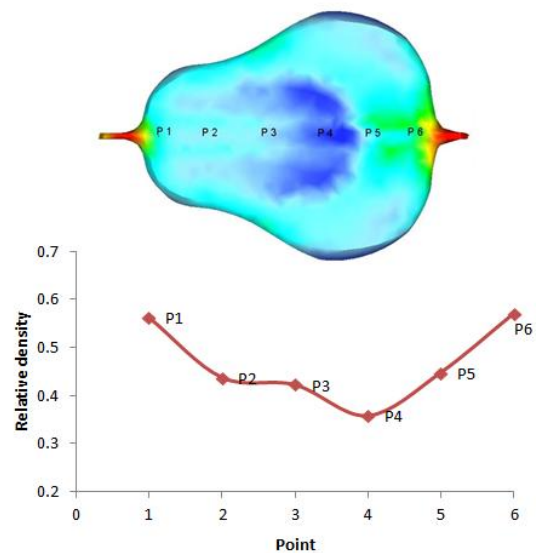
รูปที่ 13 แสดงการกระจายของความหนาแน่นสัมพัทธ์ในชิ้นงานเริ่มต้นโดยในที่นี้กำหนดให้บริเวณทางด้านซ้ายของชิ้นงานมีความหนาแน่น 0.2 ทั้งนี้เพราะเมื่อถูกทุบขึ้นรูปบริเวณนี้เป็นบริเวณที่เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นมากเมื่อเทียบกับทางด้านขวาเพราะถูกกดลงมามาก ส่วนบริเวณด้านขวาให้มีความหนาแน่นมากกว่ากำหนดให้เป็น 0.4 เนื่องจากเกิดการกดน้อย ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นน้อย ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นโดยรวมในชิ้นงานแต่ละบริเวณมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นโดยเมื่อทำการพลอตค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามของชิ้นงานตลอดแกนแนวนอน P1-P6 ดังในรูปที่ 15 พบว่าค่าความแตกต่างสูงสุดของความหนาแน่นสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 0.22 ลดลงจากกรณีแรก รูปที่ 16 แสดงขนาดของครีปซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกันทั้งทางซ้ายและทางขวาเนื่องจากบริเวณทางซ้ายในรูปที่ 16 ถึงแม้ความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มต้นจะน้อยแต่เกิดการบีบอัดมาก ในขณะที่ทางขวาเกิดการบีบอัดน้อยแต่ความหนาแน่นสูงจึงมีปริมาตรลดลงน้อยกว่าและเกิดการไหลออกเป็นครีปมากกว่ากรณีแรก



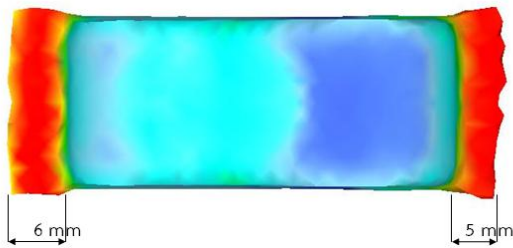
รูปที่ 13 แสดงการค่าความหนาแน่นในบิลเลทเริ่มต้น



รูปที่ 14 แสดงการกระจายของค่าความหนาแน่น
สัมพัทธ์ในชิ้นงานสำเร็จ



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่บริเวณ
ใดๆ ในชิ้นงาน



รูปที่ 16 ครีปที่เกิดขึ้นจากการทุบขึ้นรูปในกรณีที่เป็นโลหะเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์มาสม่ำเสมอ

จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในการออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นงานเริ่มต้นสำหรับไทเทเนียมโฟมจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายความหนาแน่นในชิ้นงานหลังทุบขึ้นรูปด้วยเนื่องจากมีผลต่อคุณสมบัติทางกล

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การทุบขึ้นรูปชิ้นส่วนไทเทเนียมโฟมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเลือกใช้แบบจำลองวัสดุแบบจำลอง Elasto-Plastic และแบบจำลองวัสดุรูปทรงของ Shima-Oyane ในการอธิบายพฤติกรรมและการเสียรูปของไทเทเนียมโฟมระหว่างการทุบขึ้นรูป พบว่าการจำลองที่ใช้แบบจำลอง Elasto-Plastic ให้กราฟความเค้น-ความเครียดใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากกว่ากราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการใช้แบบจำลองของ Shima-Oyane อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองที่ได้จากการใช้แบบจำลอง Shima-Oyane ยังคงให้ผลที่เปรียบเทียบกันได้อีกทั้งยังสามารถแสดงการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงานได้ซึ่งความหนาแน่นของชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทุบขึ้นรูปและมีความแตกต่างกันมากขึ้นภายในชิ้นงานเมื่อเสียรูปมากขึ้น

ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทุบขึ้นรูปชิ้นส่วนหัวสะโพกที่ทำจากไทเทเนียมโฟมจึงได้นำแบบจำลอง Shima-Oyane มาใช้ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าการทุบขึ้นรูปชิ้นงานที่มีสภาวะความเค้นที่ซับซ้อนความแตกต่างของความหนาแน่นภายในชิ้นงานจะสูงและการกระจายความหนาแน่นภายในชิ้นงานไม่สม่ำเสมอถึงแม้ว่าจะใช้ชิ้นงานเริ่มต้นที่มีความหนาแน่นเท่ากันทั้งชิ้นงาน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหากมีการออกแบบบิลเลทเริ่มต้นให้มีความหนาแน่น

ต่างกันภายในชิ้นงานจะช่วยให้ชิ้นงานสำเร็จมีความแตกต่างของความหนาแน่นในชิ้นงานน้อยลงได้ ซึ่งความหนาแน่นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกล

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shima, S., Oyane, M.(1976). Plasticity theory for porous metals, *Int J Mech Sci*, 18, pp 285-291.
- [2] Filice, L., Gagliardi, F. and Umbrello, D. (2009). Simulation of aluminium foam behavior in compression test, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 129-137.
- [3] Styles, M., Compston, P., Kalyanasundaram, S. (2008). Finite element modelling of core thickness effects in aluminium foam /composite sandwich structures under flexural loading, *Composite Structures* 86, pp. 227-232.
- [4] Contorno, D., Filiceb, L., Fratinia, L., Micaria, F. (2006). Forming of aluminum foam sandwich panels: Numerical simulations and experimental tests, *Materials Processing Technology* 177, pp. 364-367.
- [5] Gagliardi, F., De Napoli, L., Filice, L., Umbrello, D. (2009). A comparison among FE model to simulate metallic foams forming – An experimental validation, *Materials and Design* 30, pp.1282-1287.
- [6] Liuwei Guo., Jilin Yu. (2011). Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam, *International Journal of Impact Engineering* 38, pp. 85-94.
- [7] Deshpande, V. S. and Fleck, N. A. (2000). Isotropic constitutive models for metallic foams, *J. Mech. and Phys. of Solids*, pp. 2139-2150.
- [8] Imwinkelried, T. (2007). Mechanical properties of open-pore titanium foam, *J. Biomed Mater Res A*, pp. 964-970.
- [9] Kashef, S., Lin, J., Hodgson P., (2008) Mechanical properties of Titanium foam for biomedical application, *Int. J. of Modern Physics B*, pp.6155-6160.



[10] Manisekar, K., Narayanasamy, R., Malayappan, S., (2006). Mater. Des. 27, pp. 147-155.

[11] Raimondi, M.T. and Pietrabissa, R., Med. Eng. Phys. 21(5) pp. 353-359.