

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติสำหรับกระบวนการทอบขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูง 3D Finite Element Model for Hot Powder Forging Process

วิวัฒน์ ตันวงษ์วาน^{1,2} จุฬาลักษณ์ คำไม้¹ อัญชลี มโนกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2913-2500 ต่อ 8208 โทรสาร 0-2587-0029 E-mail: jcm@kmitnb.ac.th

²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-5600 ต่อ 4712 (วิวัฒน์) 4707 (อัญชลี) โทรสาร 0-2564-6403 E-mail: wiwatt@mtec.or.th, anchalm@mtec.or.th

Wiwat Tanwongwan^{1,2}, Julaluk Carmai¹, and Anchalee Manonukul²

¹Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand

Tel: 0-2913-2500 Ext. 8208 Fax: 0-2587-0029 E-mail: jcm@kmitnb.ac.th

²National Metal and Materials Technology Center,

114 Thailand Science Park Paholyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

Tel: 0-2564-6500 Ext. 4712 (WT), 4707 (AM) Fax: 0-2564-6403 E-mail: wiwatt@mtec.or.th, anchalm@mtec.or.th

บทคัดย่อ

สมการคอนสติติวทีฟสำหรับวัสดุที่มีรูพรุนของ Duva และ Crow ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่มีรูพรุนได้ถูกประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองวัสดุในรูปของโปรแกรมย่อยฟอร์แทรน สำหรับใช้จำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การพัฒนาต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลาเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง และใช้ทฤษฎีการเสียรูปอย่างมากมายประกอบกับสมการคอนสติติวทีฟเนื่องจากการทอบขึ้นรูปโลหะมักเกิดความเครียดสูงและการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง จากการศึกษาพบว่าความเสียหายมีผลต่อกระบวนการเสียรูป อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสัมพัทธ์ ระดับแรงอัดและเวลาที่ต้องการสำหรับการขึ้นรูป แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้เพื่อจำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปโลหะผงและลดจำนวนการลองผิดลองถูก

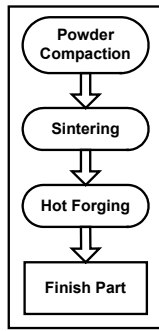
Abstract

The constitutive equations developed by Duva and Crow for porous metal were adopted to be the material model for powder forging process. The material model is implemented for finite element analysis in the form of Fortran user-defined subroutine. Care must be taken during the implementation. The material behaviour must be time dependent due to high temperature. In

addition, the large deformation theory must be incorporated during the implementation because hot forging commonly involves large strain and rigid body rotation. It is found that friction has direct impact on deformation, rate of change of relative density, force and time required for hot powder forging. The developed model could be used for powder forging process modelling to reduce the number of trial-and-error experiments.

1. บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและยานยนต์ นิยมใช้กระบวนการทางโลหะผงวิทยาแบบดั้งเดิม (Conventional powder metallurgy) กล่าวคือ การอัดขึ้นรูป (Compaction) และเผาซินเทอริง (Sintering) เนื่องจากมีอัตราการผลิตสูง และเศษเหลือทิ้งต่ำ โดยปกติชิ้นงานจะมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าชิ้นงานจากการหล่อ แต่ด้อยกว่าชิ้นงานจากการทอบขึ้นรูปทั่วไป (Conventional forging) ทั้งนี้เนื่องจากวิธีทางโลหะผงวิทยาแบบดั้งเดิมไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีระดับรูพรุนต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ได้ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังกระบวนการโลหะผงวิทยาแบบดั้งเดิมจะผ่านการทอบขึ้นรูปร้อนซึ่งนิยมเรียกว่าการทอบขึ้นรูปโลหะผง (Powder forging) ดังแสดงขั้นตอนการทอบขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนของการทึบขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูง

ถึงแม้การทึบขึ้นรูปโลหะผงนิยมใช้อย่างแพร่หลายทั้งในยุโรปและอเมริกา แต่ประเทศไทยยังไม่มีมีการนำกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผงมาใช้ในการผลิต การสร้างพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผงจะนำไปสู่การส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาของอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและยานยนต์ด้วยกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผง และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ อีกทั้งยังช่วยลดการนำเข้า และส่งเสริมการส่งออกชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและยานยนต์ที่ผลิตด้วยกระบวนการวิธีทึบขึ้นรูปโลหะผง

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตมักอาศัยประสบการณ์และการลองผิดลองถูก ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก การจำลองกระบวนการสามารถช่วยลดจำนวนการลองผิดลองถูกเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมลงได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติสำหรับจำลองกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผง และศึกษาผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเสียรูป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดพฤติกรรมของวัสดุมีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์ หากกำหนดพฤติกรรมวัสดุไม่เหมาะสมผลการวิเคราะห์จะไม่ถูกต้องแม่นยำ ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผงนั้นชิ้นงานเริ่มต้นจะเป็นวัสดุที่มีรูพรุน (Porous material) ซึ่งพฤติกรรมในระหว่างการผลิตแตกต่างไปจากชิ้นงานที่ไม่มีรูพรุน กล่าวคือชิ้นงานที่มีรูพรุนจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Compressible materials) และการเสียรูปในระหว่างกระบวนการทึบขึ้นรูป ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีรูพรุนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Incompressible materials) แบบจำลองวัสดุ (Material model) ที่พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎีพลาสติกซิตี (Plasticity theory) สันนิษฐานว่าชิ้นงานจะไม่มีเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถนำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่มีรูพรุนได้

ในอดีตได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการพัฒนาแบบจำลองคอนสติติวทิฟ (Constitutive model) สำหรับวัสดุที่มีรูพรุนที่มีพฤติกรรมมีการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent deformation) [1-5] ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ได้พิจารณาผลของความเค้นเฉือน (Hydrostatic

stress) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและผลของความเค้นเฉือน (Deviatoric stress) ที่มีผลต่อการเสียรูปของชิ้นงาน ดังนั้นสมการที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่มีรูพรุนโดยทั่วไปจะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของศักย์อัตราความเครียด (Strain rate potential, ϕ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความเค้นเฉือนและความเค้นเฉือน ดังได้แสดงในสมการที่ (1)

$$\phi = \frac{\dot{\epsilon}_0 \sigma_0}{n+1} \left(\frac{S}{\sigma_0} \right)^{n+1} \quad (1)$$

โดยที่

$$S^2 = a\sigma_e^2 + b\sigma_m^2 \quad (2)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \quad (3)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (5)$$

S คือ Effective stress [1] สำหรับวัสดุที่มีรูพรุน n คือสัมประสิทธิ์อธิบายการคืบ σ_e คือความเค้นประสิทธิผล (effective stress) σ_m คือความเค้นเฉือน เนื่องด้วยการใช้วิธีที่แตกต่างกันในการหาค่าศักย์อัตราความเครียดสำหรับการคืบของวัสดุรูพรุนทำให้สัมประสิทธิ์ a และ b ที่ได้มีค่าแตกต่างกันด้วยโดย Cocks [2] และ Ponte Castaneda [3] ได้ให้ผลการวิเคราะห์ของการคืบวัสดุรูพรุนที่ดีในช่วงที่เป็นความเค้นเฉือนแต่เมื่ออยู่ในช่วงของความเค้นเฉือน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะไม่ดีจากนั้นในปี ค.ศ. 1992 Sofranis และ McMeeking [4] ได้พัฒนาแบบจำลองของวัสดุรูพรุน โดยแบบจำลองที่ได้สามารถทำนายได้ดีในช่วงของความเค้นเฉือนแต่จะให้ผลการทำนายไม่ดีในช่วงความเค้นเฉือนและในปี ค.ศ. 1992 Duva และ Crow [5] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองวัสดุรูพรุนเช่นกัน โดยแบบจำลองที่ได้สามารถทำนายหรืออธิบายพฤติกรรมของวัสดุรูพรุนได้ดีทั้งในช่วงของความเค้นเฉือนและความเค้นเฉือน

3. แบบจำลองวัสดุสำหรับกำหนดพฤติกรรมของวัสดุที่มีรูพรุน

การจำลองกระบวนการทึบขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูงจะทำการจำลองในส่วนของขั้นตอนที่ชิ้นงานผ่านการเผาขึ้นเทอริงแล้ว นั่นคือการนำส่วนของชิ้นงานที่มีรูพรุนไปทำการทึบขึ้นรูปร้อน สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนในสภาวะความเค้นที่ซับซ้อนมีความจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองโดยความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียด และความพูนของชิ้นงานกำหนดโดยแบบจำลองคอนสติติวทิฟของวัสดุที่มีรูพรุน จากการสำรวจงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองวัสดุที่มีรูพรุนของ Duva และ Crow [1, 5] เนื่องจากให้ผลการทำนายที่ดีทั้งในช่วงของความเค้นเฉือนและความเค้นเฉือนโดยสมการของ a และ b ที่ได้จาก Duva และ Crow ได้แสดงไว้ในสมการที่ (6) และ (7)

$$a = \frac{1 + \frac{2}{3}(1-D)}{D^{2n(n+1)}} \quad (6)$$

$$b = \left[\frac{n(1-D)}{(1-(1-D)^{1/n})^n} \right]^{2/(n+1)} \left(\frac{3}{2n} \right)^2 \quad (7)$$

โดย a และ b เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density, D) ซึ่ง a จะสอดคล้องกับความเค้นเฉือน และ b จะสอดคล้องกับความเค้นเฉีย จากสมการที่ (6) และ (7) จะพบว่าเมื่อ $D=1$ b จะมีค่าเท่ากับ 0 และ a จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะกล่าวได้ว่าความเค้นเฉียไม่มีผลต่อการเสียรูป นั่นคือเมื่อความหนาแน่น D มีค่าเท่ากับ 1 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงาน

ยิ่งไปกว่านั้นในการขึ้นรูปโลหะนั้นมักเกิดความเครียดสูง (Large strain) และเกิดการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body rotation) ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุที่ได้มาจากสมการคอนสติดิตีฟยังไม่ได้รวมอิทธิพลของวัตถุแข็งเกร็ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีการเสียรูปอย่างมาก (Large deformation theory) มาประกอบกับสมการคอนสติดิตีฟ แบบจำลองวัสดุและทฤษฎีข้างต้นได้นำมาพัฒนาในรูปแบบโปรแกรมย่อยฟอร์แทรน (Fortran subroutine) โดยสามารถนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการใช้งานทั่วไปแบบไม่เชิงเส้น อะบาคัส (ABAQUS)

การจำลองชิ้นงานที่มีรูพรุนในกระบวนการขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูง จะสามารถอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปไปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ในรูปของส่วนประกอบของอัตราความเครียด (Strain rate components, $\dot{\epsilon}_{ij}$) ของวัสดุที่มีรูพรุนซึ่งสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ของศักย์อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นเทียบกับส่วนประกอบความเค้น (Stress components, σ_{ij}) ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} = AS^{n-1} \left(\frac{3}{2} a \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} b \delta_{ij} \sigma_m \right) \quad (8)$$

พารามิเตอร์ของวัสดุ (Material parameter, A)

$$A = \frac{\dot{\epsilon}_0}{\sigma_0^n} \quad (9)$$

อัตราหดขยาย (Dilatation rate, $\dot{\epsilon}_{kk}$) หาได้จาก

$$\dot{\epsilon}_{kk} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz} \quad (10)$$

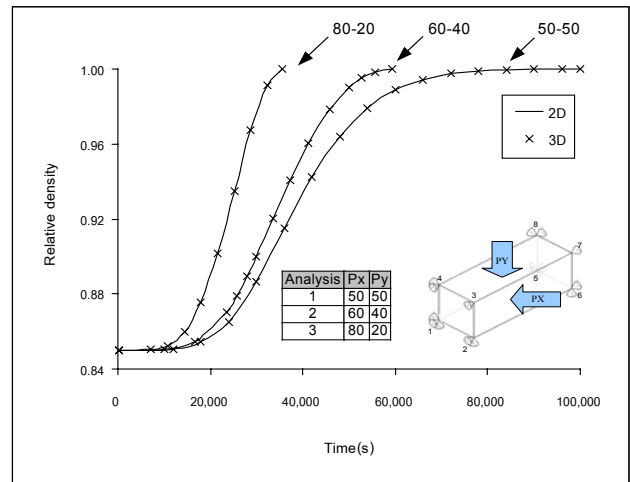
ดังนั้น อัตราความหนาแน่น (Densification rate, $\dot{D}$) ที่เกิดขึ้น

$$\dot{D} = -D \dot{\epsilon}_{kk} \quad (11)$$

และ D คือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

ความถูกต้องของโปรแกรมย่อยฟอร์แทรนที่พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดถี่ถ้วน เช่น การคำนวณเมื่อเมื่อเป็นไปได้ การ

เทียบผลกับฐานข้อมูลวัสดุ (Material library) ภายใต้ภาวะการคืบของโปรแกรมอะบาคัสเมื่อวัสดุไม่มีรูพรุน คือเมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์เท่ากับ 1 ซึ่งได้ผลเหมือนกัน พฤติกรรมของวัสดุที่มีรูพรุนได้ทดสอบได้ภาวะที่มีความเค้นเฉียเท่านั้นเช่นเดียวกับภาวะของ Wilkinson และ Ashby [6] และได้ผลใกล้เคียงกัน จากการจำลองที่ความเค้นเฉียเพิ่มขึ้น อัตราความหนาแน่นสูงขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการได้ชิ้นงานที่ปราศจากรูพรุนในเวลาที่น้อยลงเหมือนกับผลการทดลอง อีกทั้งได้เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติโดยใช้เอลิเมนต์ความเครียดระนาบ (Plane strain) และแบบจำลองสามมิติภายใต้เงื่อนไขของความเครียดระนาบได้ภาวะความดันต่างกัน 3 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2 กราฟความหนาแน่นสัมพัทธ์กับเวลา พบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากแบบจำลองสองมิติและสามมิติจะมีค่าเหมือนกันทั้ง 3 กรณี สังเกตว่าทั้ง 3 กรณีมีความเค้นเฉียที่เท่ากันและคู่ความดัน 50-50 MPa ซึ่งเป็นความดันเท่ากันให้ค่าอัตราความหนาแน่นต่ำกว่าของความดัน 60-40 MPa และ 80-20 MPa โดยความดัน 80-20 MPa มีค่าความเค้นประสิทธิผลสูงสุด และให้ผลการทำนายค่าอัตราความหนาแน่นได้สูงสุดอีกด้วย ดังนั้นจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าความเค้นเฉียมีผลช่วยทำให้อัตราความหนาแน่นสูงขึ้น



รูปที่ 2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์จากแบบจำลองสองมิติและสามมิติได้ภาวะความดันดังแสดงในรูป

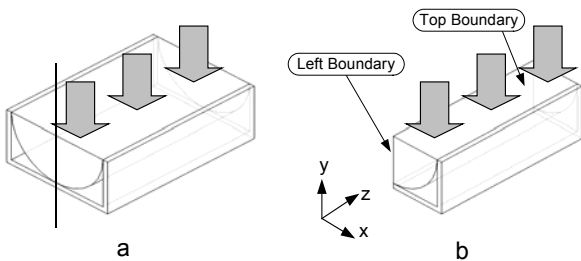
4. การจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะผงในสภาวะความเค้นที่ซับซ้อน (Complex stress states)

หลังจากทำการตรวจสอบและยืนยันว่าแบบจำลองวัสดุสำหรับกำหนดพฤติกรรมของวัสดุที่มีรูพรุนได้รับการพัฒนาในรูปแบบโปรแกรมย่อยฟอร์แทรนอย่างถูกต้องแล้ว ต่อไปจะเป็นการจำลองในสภาวะความเค้นที่ซับซ้อนรวมถึงผลกระทบของความเสียดทานภายใต้สภาวะดังกล่าว โดยพิจารณาการขึ้นรูปวัสดุที่มีรูพรุนของชิ้นงานรูปทรงกระบอกฐานครึ่งวงกลมด้วยแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมและการขึ้นรูปของชิ้นงานทรงกระบอกกลวงด้วยแม่พิมพ์รูปทรงกระบอกเรียว (Taper) โดยวัสดุที่ทำการจำลองคือ Ti-6Al-4V โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการ

ขึ้นรูปคือ 900 องศาเซลเซียสและพารามิเตอร์วัสดุ $A = 1.575E-9$ และ $n = 3.795$ โดยใช้ข้อมูลจาก Carmai และ Dunne ซึ่งได้จากชุดผลการทดลองแรงดึงที่อัตราความเครียดต่างๆ [7]

4.1 การจำลองการทอบขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกฐานครึ่งวงกลมด้วยแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยม

ชิ้นงานรูปทรงกระบอกฐานครึ่งวงกลมซึ่งมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.85 หลังการเผาขึ้นเทอริงถูกกดในแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3(a) ในทางปฏิบัติเพียงครึ่งของชิ้นงานจำเป็นต้องได้รับการจำลองตามหลักการสมมาตรในแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 3(b) โดยจุดต่อ (Node) ทุกจุดต่อที่ Left boundary ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน X ได้แต่สามารถเคลื่อนที่ในทิศทางอื่นได้ และ Top boundary จะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 5×10^{-4} mm/s กำหนดให้กรณีแรกไม่มีแรงเสียดทาน คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์เป็น 0.0 และ อีกกรณีมีค่า 0.2 ซึ่งเป็นค่าโดยทั่วไปที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะร้อนที่เลือกสารหล่อลื่นดี

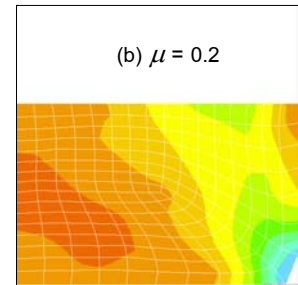
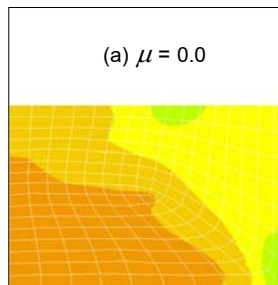
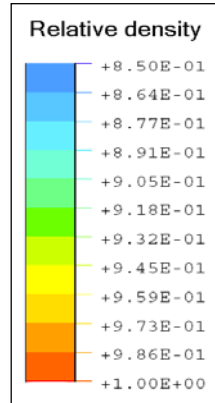


รูปที่ 3 (a) การขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกฐานครึ่งวงกลม (b) รูปสมมาตรของชิ้นงานเพื่อจำลอง

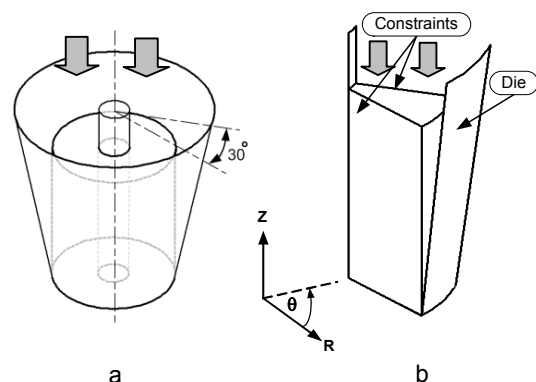
จากผลการคำนวณพบว่าความเค้นและความเครียดในแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ ในช่วงต้นบริเวณที่มีความเค้นและความเครียดสูงกว่าบริเวณอื่นๆ คือบริเวณมุมล่างซ้ายซึ่งเป็นบริเวณที่ติดกับแม่พิมพ์และเสียรูปก่อนบริเวณอื่นๆ ส่งผลให้บริเวณนี้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราความหนาแน่นแปรผันตามอัตราการหดตัว ดังแสดงในสมการ (11) เช่นตัวอย่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ในรูปที่ 4 บริเวณด้านซ้ายมีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่าบริเวณด้านขวา และเมื่อมีความเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ เป็นการเพิ่มข้อจำกัดในการเสียรูปทำให้ต้องใช้เวลานานขึ้นในการทอบขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานเต็มแม่พิมพ์ สังเกตว่าในรูปที่ 4(b) ยังมีช่องว่างที่เห็นชัดเจนอยู่ที่มุมขวาล่าง และความหนาแน่นสัมพัทธ์รอบบริเวณนั้นประมาณ 0.88 ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ความเสียดทานส่งผลให้ความเค้น ความเครียด และความหนาแน่นสัมพัทธ์ในชิ้นงานมีความแตกต่างกันมากขึ้น ที่บริเวณมุมขวาล่างจะมีอัตราการเสียรูปน้อยกว่าบริเวณใกล้เคียงซึ่งบริเวณนี้นิยมเรียกว่า เดดโซน (Dead zone)

4.2 การจำลองการทอบขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกกลวงในแม่พิมพ์รูปทรงกระบอกเรียบ

ชิ้นงานรูปทรงกระบอกกลวงซึ่งมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.85 หลังการเผาขึ้นเทอริงถูกกดในแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเรียบดังแสดงในรูปที่ 5(a) เนื่องจากชิ้นงานมีความสมมาตรรอบแกนกดเพียง 1/12 ของชิ้นงานจะถูกจำลองดังแสดงในรูปที่ 5(b) และกำหนดแนวสมมาตรที่เหมาะสม ก้านอัด (Punch) จะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 5.5×10^{-3} mm/s ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ที่จำลองคือ 0.0 0.3 0.5 และ 0.7 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเสียดทานต่อการเสียรูปของวัสดุมีรูปพจนานุกรมระหว่างการทอบขึ้นรูปโลหะผง

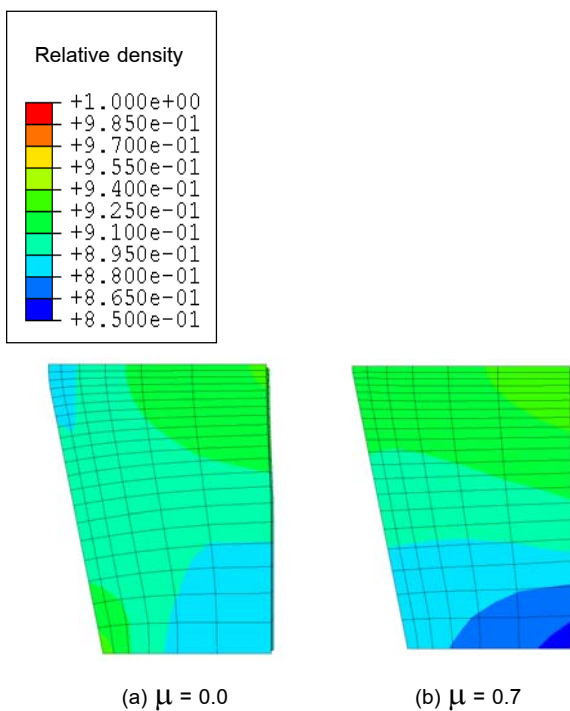


รูปที่ 4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของการทอบขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกที่เวลา 3484 วินาทีสำหรับ (a) ไม่มีแรงเสียดทาน และ (b) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ 0.2

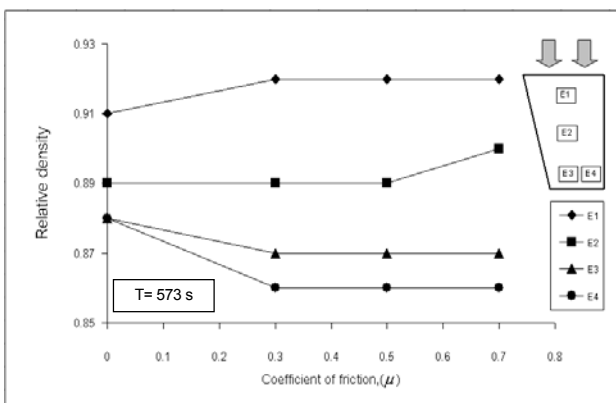


รูปที่ 5 (a) การขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกกลวง (b) รูปสมมาตรของชิ้นงานเพื่อจำลอง

ผลกระทบของความเสียดทานเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้ คือความหนาแน่นสัมพัทธ์บนชิ้นงานมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อมีความเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 6 จากรูปจะเกิดเตโชขึ้นบริเวณมุมขวาเนื่องจากความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ แต่ไม่ได้เกิดที่มุมขวาบน ทั้งนี้เนื่องจากกำหนดให้ไม่มีความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและก้านอัด รูปที่ 7 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ 4 ตำแหน่งที่เลือกมาจากพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกเรียงที่ผ่านการทุบขึ้นรูปไปได้ 573 วินาที เนื่องจากตำแหน่ง E4 อยู่ในบริเวณเตโชเมื่อมีความเสียดทานความหนาแน่นสัมพัทธ์จึงต่ำกว่าตำแหน่งอื่นๆ ส่วนตำแหน่ง E1 เป็นบริเวณที่มีอิสระในการไหลมากที่สุดส่งผลให้การเสียรูปสูง อัตราการเพิ่มความหนาแน่น (Consolidation) สูง และความหนาแน่นสัมพัทธ์สูง

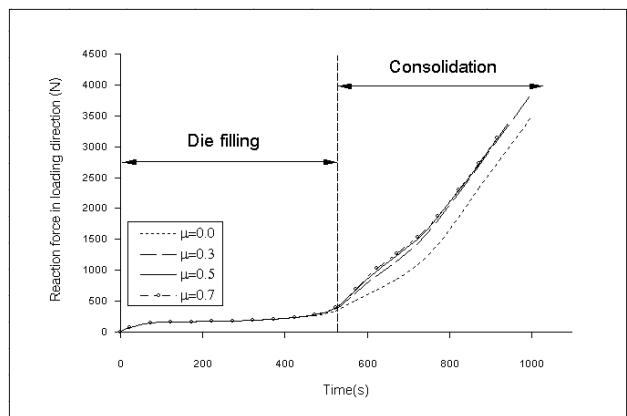


รูปที่ 6 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของการทุบขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกเรียงที่เวลา 573 วินาทีสำหรับ (a) ไม่มีความเสียดทาน และ (b) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ 0.7

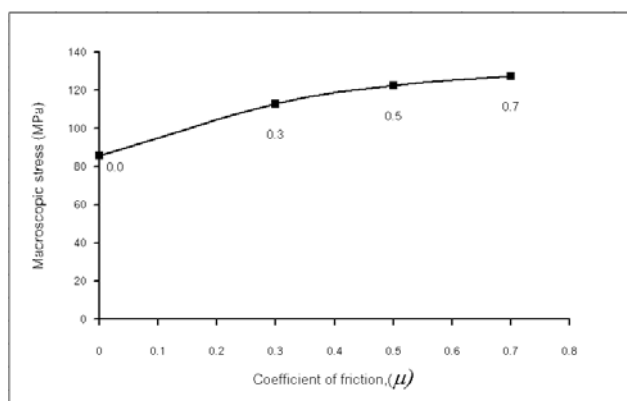


รูปที่ 7 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของการทุบขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกเรียงที่เวลา 573 วินาทีสำหรับ 4 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงอัดที่ก้านอัดระหว่างการทุบขึ้นรูป สังเกตว่าในช่วงเริ่มต้นถึงเวลาประมาณ 580 วินาที อัตราการเพิ่มของแรงอัดต่ำกว่าช่วงหลัง เมื่อสังเกตรูปร่างของชิ้นงานที่เสียรูปไปพบว่าช่วงเริ่มต้นถึงเวลา 580 วินาทีเป็นเวลาที่ชิ้นงานเติมเต็มแม่พิมพ์ (Die filling) แรงอัดที่ทำให้ส่วนใหญ่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างส่งผลให้อัตราการเพิ่มความหนาแน่นเฉลี่ย (Macroscopic consolidation rate) ต่ำ ในช่วงเวลาหลัง 580 วินาที แรงอัดที่ทำให้ส่วนใหญ่ส่งผลให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่น เมื่อมีความเสียดทานเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสส่งผลให้ต้องการแรงอัดมากขึ้นในการขึ้นรูป รูปที่ 9 แสดงความเค้นเฉลี่ย (Macroscopic stress) เมื่อทุบขึ้นรูปชิ้นงานไปได้ 673 วินาทีสำหรับระดับความเสียดทานที่ต่างกัน (ความเค้นเฉลี่ยคำนวณจากแรงอัดที่ก้านกดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่สัมผัสกับก้านอัด) เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นความเค้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 8 แรงอัดที่ก้านอัดระหว่างการทุบขึ้นรูปเมื่อชิ้นงานและแม่พิมพ์มีระดับความเสียดทานต่างกัน



รูปที่ 9 ความเค้นเฉลี่ยที่เวลา 673 วินาทีเมื่อชิ้นงานและแม่พิมพ์มีระดับความเสียดทานต่างกัน

5. สรุป

แบบจำลองวัสดุสามมิติในรูปของโปรแกรมย่อยฟอร์แทรนโดยมีพื้นฐานมาจากสมการคอนสตีติวทีฟสำหรับวัสดุที่มีรูพรุนของ Duva และ Crow ได้ถูกพัฒนาขึ้น และมีการตรวจสอบความถูกต้องอย่างละเอียดถี่ถ้วนก่อนใช้งานจริง จากการศึกษาในกรณีต่างๆ พบว่าทั้งความเค้นเฉื่อยและความเค้นประสิทธิผลมีผลต่อการเสียรูป ที่ระดับความเค้นที่สูงส่งผลให้อัตราความหนาแน่นสูงเช่นกัน ความเสียหายมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราความหนาแน่นสัมพัทธ์ ความเสียหายส่งผลเพิ่มความไม่สม่ำเสมอในการเสียรูปของชิ้นงานเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะเห็นได้จากค่าความแตกต่างของระดับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ชิ้นงานที่มีระดับความเสียหายสูงต้องการแรงอัดที่มากกว่าและในบริเวณสามารถเกิดเด็คโชนได้ อัตราการเพิ่มของแรงอัดขึ้นอยู่กับสภาพการเติมเต็มแม่พิมพ์ของชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Duva, J.M., Crow, P.D., 1994. Analysis of consolidation of reinforced materials by power-law creep. *Mechanics of Materials* 17, 25-32.
- [2] Cocks, A.C.F., 1989. Inelastic deformation of porous materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 37(6), 693-715.
- [3] Ponte Castaneda, P., 1991. The effective mechanical properties of nonlinear isotropic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 39(1), 45-71.
- [4] Sofronis, P., McMeeking, R.M., 1992. Creep of power-law material containing spherical voids. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME* 59(2), s88-s95.
- [5] Duva, J.M., Crow, P.D., 1992. The densification of powders by power-law creep during hot isostatic pressing. *Acta Metallurgica et Materialia* 40(1), 31-35.
- [6] Wilkinson, D.S., Ashby, M.F., 1975. Pressure sintering by power law creep. *Acta Metallurgica et Materialia* 23, 1277-1285.
- [7] Carmai, J. and Dunne, F.P.E., A simple approach to modeling consolidation of matrix-coated fibre composite, In proceeding of JSME/ASME international conference on materials and processing 2002, Honolulu, Hawaii, USA 15-18 October.