การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การวิเคราะห์การสปินนิ่งถ้วยอะลูมิเนียมทรงกรวยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Spinning of Conical Aluminum Cup by Finite Element Method

เจษฎา ชัยโฉม
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-27392348 โทรสาร 0-27392349 E-mail: kcjedsad@kmitl.ac.th

ชาญ ถนัดงาน
ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถ.พิบูลย์สงคราม เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-29182500-24 ต่อ 8212 โทรสาร 0-25870029 E-mail: chn@kmitnb.ac.th

ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถ.พิบูลย์สงคราม เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-29182500-24 ต่อ 8531 โทรสาร 0-25870026 E-mail: chw@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ มุมกรวย รัศมีมนลูกกลิ้งและ ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มีต่อแรงกดลูกกลิ้งในการสปินนิ่งถ้วยทรงกรวยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ใช้มุมกรวย : 60, 90, 120 และ 150 องศา รัศมีมนลูกกลิ้ง : 3, 5, 7 และ 9 mm และความหนาแผ่นอะลูมิเนียม 1100-O : 1, 2, 3 และ 4 mm กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้ง 125 mm ความเร็วป้อนลูกกลิ้งตามแนวความสูงเอียงของกรวย 1 mm/rev และ แม่พิมพ์สปินนิ่งหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ 450 rpm แบบจำลองสำหรับการสปินนิ่งมีลักษณะ : ลูกกลิ้งและแม่พิมพ์เป็นวัสดุแข็งเกร็ง ชิ้นงานเป็นวัสดุไอโซทรอปิกที่มีสมบัติเป็นไปตามกฎยกกำลัง. การวิเคราะห์ไม่พิจารณาผลของความร้อนและแรงเสียดทาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองใช้ผลลัพธ์ในการสปินนิ่งถ้วยทรงกระบอกเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [1] ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งแรงสูงสุดในแนวแกนหมุน 4.44 % และในแนวรัศมี 1.74 %
จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขสรุปได้ว่า แรงในกระบวนการสปินนิ่งทั้งสามทิศทางแปรผันเชิงเส้นกับความหนาของวัสดุ การเพิ่มรัศมีมนลูกกลิ้งทำให้ขนาดของแรงในแนวแกนหมุนลดลงเล็กน้อย แต่ขนาดของแรงในแนวรัศมีกับแรงในแนวเส้นสัมผัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเพิ่มมุมกรวยทำให้ขนาดของแรงทั้งสามทิศทางลดลง สุดท้ายนำผลลัพธ์เชิงตัวเลขมาสร้างฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับมุมกรวย รัศมีมนลูกกลิ้งและความหนาของวัสดุ ด้วยวิธีถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

Abstract

The objective of this research is to study the effects of cone angles, roller nose radius and aluminum sheet thicknesses on the roller forces in conical cup spinning process using finite element method. According to the analysis, the cone angles of 60 90, 120 and 150 degrees, the roller nose radius of 3, 5, 7 and 9 mm, the aluminum 1100-O sheet thicknesses of 1, 2, 3 and 4 mm are selected. Furthermore, the roller diameter of 125 mm, the roller feed rate along cone inclined height of 1mm/rev, and mandrel speed of 450 rpm are specified. The spinning model is as follows : the roller and mandrel are rigid ; aluminum sheet is assumed to be isotropic and follows the power law ; friction forces and heat generated in the process are neglected. The accuracy of the finite element model was checked by comparing the numerical results obtained from cylindrical cup spinning with the experiment results [1]. It shows that the error of maximum axial roller force is 4.44% while 1.74% in radial direction.

According to the numerical results, all roller force components applied in spinning process are linearly proportion to the aluminum sheet thickness. Increasing of roller nose radius results in decreasing of axial force but increasing in radial and tangential forces. All roller force components decrease as the

cone angle increases. At last, these numerical results are curve fitted by least square method.

1. บทนำ

กระบวนการสปินนิ่ง(Spinning Process)เป็นวิธีการหนึ่งในการขึ้นรูปแผ่นโลหะบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่าง ๆ การขึ้นรูปจะเริ่มต้นโดยการนำแผ่นชิ้นงานกลมมาติดกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง(Mandrel) ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท้ายแท่นมากดให้แผ่นชิ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขั้นต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นชิ้นงานและศูนย์ท้ายแท่นหมุนตามไปด้วย หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดแผ่นชิ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นชิ้นงานจะค่อย ๆถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็ก ๆที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นชิ้นงานรอบ ๆแกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง

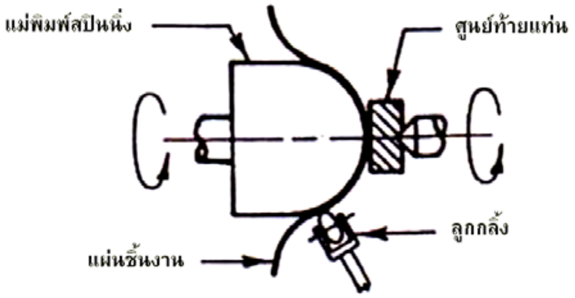
1.1 การสปินนิ่งประกอบด้วย 4 ส่วนประกอบดังภาพที่ 1

1.1.1 ลูกกลิ้ง ทำจากวัสดุเนื้อแข็งเป็นตัวรีดให้แผ่นชิ้นงานแนบสนิทไปกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง

1.1.2 แผ่นชิ้นงาน เป็นวัสดุเนื้ออ่อนที่นำมาขึ้นรูปให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ

1.1.3 แม่พิมพ์สปินนิ่ง เป็นตัวกำหนดรูปทรงของผลิตภัณฑ์ แม่พิมพ์สปินนิ่งทำจากวัสดุที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนักส่วนใหญ่ทำจากไม้เนื้อแข็ง

1.1.4 ศูนย์ท้ายแท่น เป็นตัวกดแผ่นชิ้นงานให้หมุนตามไปกับแม่พิมพ์สปินนิ่งโดยที่ศูนย์ท้ายแท่นจะหมุนตามแผ่นชิ้นงานไปด้วย



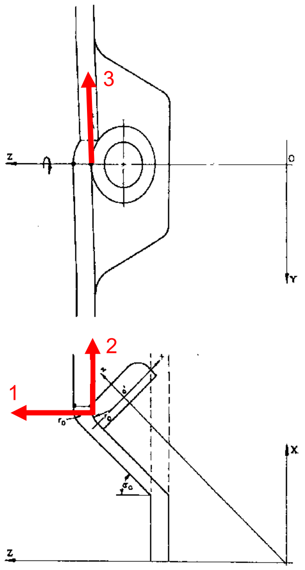
ภาพที่ 1 การขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยวิธีสปินนิ่ง

1.2 ลักษณะของแรงในการสปินนิ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับชิ้นงาน ประกอบด้วยแรงในสามแนวแกนดังภาพที่ 2

1.2.1 แรงในแนวแกนหมุน(Axial Force) F_a มีทิศขนานกับแกนการหมุน

1.2.2 แรงในแนวรัศมี(Radial Force) F_r มีทิศตั้งฉากกับแกนการหมุน

1.2.3 แรงในแนวเส้นสัมผัส(Tangential Force) F_t มีทิศตั้งฉากกับแรงในแนวแกนหมุนและตั้งฉากกับแรงในแนวรัศมี แรงในแนวเส้นสัมผัสเป็นแรงที่ใช้ในการกำหนดขนาดของเครื่องจักรในการขึ้นรูป



ภาพที่ 2 ทิศของแรงต่าง ๆในการสปินนิ่ง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) เมื่อโลหะเสียรูปถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) โลหะจะเกิดพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดเป็นผลให้โลหะมีคุณสมบัติยืดดึง (Ductility) ลดลงและความต้านแรงครากเปลี่ยนแปลงไป สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลกับความเครียดประสิทธิผลที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power Law) อยู่ในรูป

$$\overline{\sigma} = k\overline{\varepsilon}^{n} = Y \qquad (1)$$

2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงได้ดังนี้

$$d\sigma = [D]d\varepsilon \qquad (2)$$

เมตริกซ์ [D] เกิดจากผลต่างผลต่างระหว่างการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่น กับช่วงพลาสติก แสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$[D] = [D^{e}] - [D^{p}] \qquad (3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของเอลิเมนต์เมื่อพิจารณาที่เอลิเมนต์ i แสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$[k_i]\{u_i\} = \{f_i\} \qquad (4)$$

เมื่อ

$$[k_i] = \int [B_i]^{T}[D_i][B_i]dv_i \qquad (5)$$

หลังจากที่ได้สมการของแต่ละเอลิเมนต์แล้ว ก็จะนำเอาเมตริกซ์ของทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเป็นเมตริกซ์ระบบรวมได้ดังนี้

$$[K]\{u\} = \{f\} \qquad (6)$$

ปัญหาที่ขึ้นกับเวลา จากสมการของ d'Alembert

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_{int}(u) = F(t) \qquad (7)$$

u เป็นเวคเตอร์การเคลื่อนตัวที่เราสามารถจะพัฒนาค่าใหม่โดยการบวกระยะการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นกับรูปทรงเดิมดังสมการ

$$x^{n+1} = x^0 + u^{n+1} \qquad (8)$$

ใช้วิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนต์ (Central Difference Method) อินทิเกรตสมการ (7) โดยแทนค่าความเร็วและความเร่งที่เวลา t ด้วย

$$\dot{x}_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2\Delta t} \qquad (9)$$

$$\ddot{x}_n = \frac{x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}}{\Delta t^2} \qquad (10)$$

3. การดำเนินการวิจัย

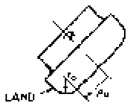
โดยหาแรงกดลูกกลิ้งในการสปินนิ่งอันประกอบด้วยแรงสปินนิ่งในแนวแกนหมุน แรงสปินนิ่งในแนวรัศมี และแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัส คำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองในระยะเริ่มแรกจะใช้แบบจำลองสปินนิ่งถ้วยทรงกระบอก เพื่อตรวจสอบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลจากการทดลองที่มีผู้ทำไว้แล้ว[1] หลังจากนั้นจึงใช้แบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์การสปินนิ่งถ้วยทรงกรวยต่อไป

3.1 ขอบเขตการวิจัย

3.1.1 รูปทรงของลูกกลิ้งเป็นดังภาพที่ 3 มีแกนการหมุนของลูกกลิ้งขนานกับความสูงเอียงของกรวย เส้นผ่าศูนย์กลางลูกกลิ้ง 125 mm รัศมีมนของลูกกลิ้ง 3, 5 7 และ 9 mm อัตราป้อนลูกกลิ้งตามแนวความสูงเอียงของกรวย เท่ากับ 1 mm/rev

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นอะลูมิเนียม 1100-O เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm หนา 1, 2, 3 และ 4 mm หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่ 450 rpm

3.1.3 แม่พิมพ์สปินนิ่งเป็นทรงกรวย เส้นผ่านศูนย์กลางปลายกรวยเท่ากับ 56 mm มุมกรวยเท่ากับ 60, 90, 120 และ 150 องศา



ภาพที่ 3 รูปทรงของลูกกลิ้ง

3.2 สมมติฐานการวิจัย

3.2.1 ลูกกลิ้ง และแม่พิมพ์สปินนิ่งเป็นวัสดุแข็งเกร็ง

3.2.2 วัสดุที่ใช้สมมุติว่าเป็นวัสดุเอกพันธ์ไอโซทรอปิก ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงไม่คำนึงถึงผลจากแรงเสียดทานและความร้อนในการขึ้นรูป

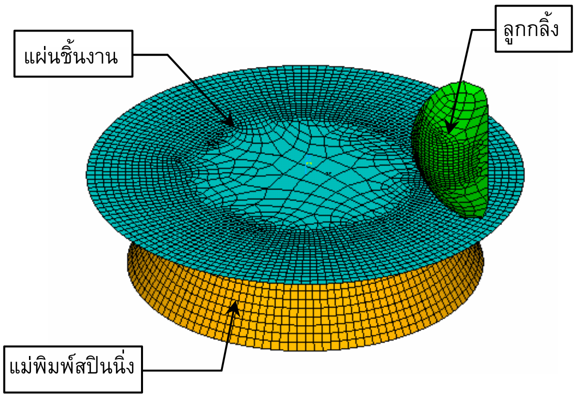
ในการคำนวณใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการวิเคราะห์แบบเอ็กพลิซิส(Explicit) เพื่อใช้คำนวณปัญหาในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาโดยเลือกใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกในการวิเคราะห์

3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

3.3.1 สร้างพื้นผิวของแบบจำลองอันประกอบด้วยพื้นผิวส่วนหนึ่งของลูกกลิ้งเฉพาะบริเวณที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับชิ้นงาน พื้นผิวของแม่พิมพ์สปินนิ่ง และพื้นผิวของแผ่นชิ้นงานเพื่อนำไปแบ่งเป็นเอลิเมนต์โดยใช้ข้อมูลขนาดรูปทรงของแบบจำลอง

3.3.2 เลือกชนิดของเอลิเมนต์ให้เป็นเอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือก กำหนดความหนาเริ่มต้นของแผ่นเปลือก กำหนดจำนวนจุดการอินทิเกรตของเกาส์ตลอดความหนา

3.3.3 สร้างเอลิเมนต์จากพื้นผิวที่กำหนดโดยเลือกใช้รูปทรงของเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าสี่จุดต่อแบ่งเอลิเมนต์เริ่มต้นของลูกกลิ้ง แม่พิมพ์สปินนิ่งและแผ่นชิ้นงานได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์เริ่มต้นของลูกกลิ้ง แม่พิมพ์สปินนิ่งและแผ่นชิ้นงาน

3.4 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ จะแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.4.1 วัตถุแข็งเกร็ง(Rigid Body) โดยกลุ่มของวัตถุแข็งเกร็งนี้ประกอบด้วยแบบจำลองของลูกกลิ้ง และแบบจำลองของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ซึ่งจะสมมุติว่าวัสดุไม่มีการเสียรูป

3.4.2 วัตถุเสียรูปได้(Deformed Body) ใช้กำหนดในแบบจำลองของแผ่นชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยเลือกใช้แบบกฎยกกำลังไอโซทรอปิก(Power Law Isotropic Plasticity) มีสมการคือ

$\overline{\sigma} = k\overline{\varepsilon}^n$ โดยค่าคงที่ k และ n ของวัสดุ อะลูมิเนียม 1100-O หาจากการทดสอบการดึงในแกนเดียวลงจุดบนพิกัดลอการิทึม[3]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุชิ้นงานอลูมิเนียม 1100 – O ในบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ อะลูมิเนียม 1100 – O	
ความหนาแน่น, ρ (Kg/m^3) [2]	2710
อัตราส่วนของปัวส์ซอง, υ [2]	0.33
มอดูลัสความยืดหยุ่น, E (MPa) [3]	69,000
สัมประสิทธิ์ความต้านแรง, k (MPa) [3]	172.3675
เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด , n [3]	0.25

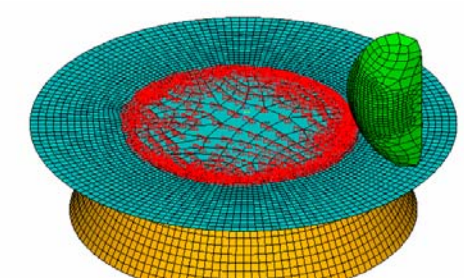
3.4.3 การกำหนดคู่สัมผัสระหว่างวัตถุแข็งเกร็งกับวัตถุเสียรูปได้ซึ่งจะมี 2 คู่สัมผัสคือ คู่สัมผัสระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นชิ้นงาน และคู่สัมผัสระหว่างแม่พิมพ์สปินนิ่งกับแผ่นชิ้นงาน

3.4.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบ แบ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับแบบจำลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.4.4.1 กำหนดการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งให้หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม 15π/s (450 rpm) แทนลักษณะการขึ้นรูปจริงที่แม่พิมพ์สปินนิ่งและแผ่นชิ้นงานหมุน และลูกกลิ้งคลื่อนที่ลงมาตามมุมเอียงของกรวยด้วยความเร็วเท่ากับอัตราป้อนต่อการหมุนหนึ่งรอบ

3.4.4.2 กำหนดเงื่อนไขขอบของแม่พิมพ์สปินนิ่งไม่ให้มีการเคลื่อนที่

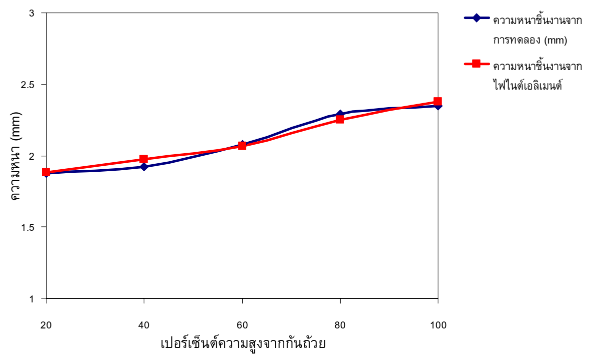
3.4.4.3 กำหนดเงื่อนไขขอบของแผ่นชิ้นงานเฉพาะบริเวณตรงกลางไม่ให้มีการเคลื่อนที่ แทนลักษณะการขึ้นรูปจริงที่มีศูนย์ท้ายแท่นมากดแผ่นชิ้นงานให้แนบสนิทและหมุนตามไปกับแม่พิมพ์สปินนิ่งดังภาพที่ 5



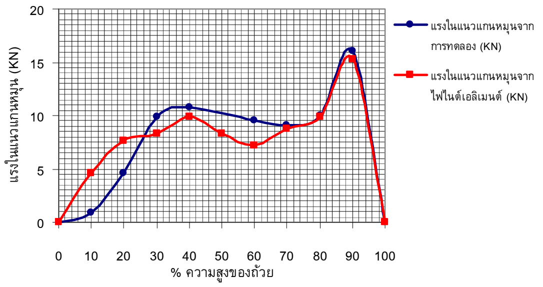
ภาพที่ 5 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบของแผ่นชิ้นงานเฉพาะบริเวณตรงกลางไม่ให้มีการเคลื่อนที่

3.4.8 การแก้สมการและอ่านผลการคำนวณ โปรแกรมจะมีการคำนวณเวลาขั้นเพิ่ม เพื่อความเสถียรภาพของวิธีเอ็กพลิซิส ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ค่าเวลาขั้นเพิ่มเท่ากับ 0.9 เท่าของเวลาขั้นเพิ่มวิกฤตที่คำนวณได้จากโปรแกรม และอ่านค่าของแรงที่คำนวณได้จากแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคู่สัมผัสของลูกกลิ้งกับแผ่นชิ้นงาน

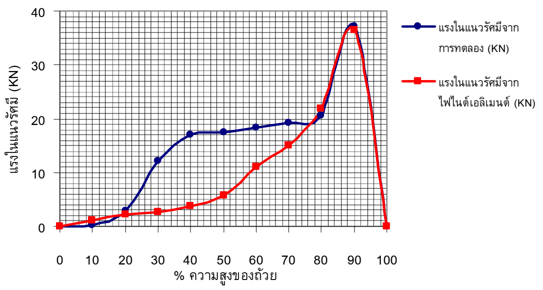
3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ผลลัพธ์ในการสปินนิ่งถ้วยทรงกระบอกกับผลการทดลองที่ El-Khabeery [1] ทำไว้ โดยใช้แม่พิมพ์สปินนิ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 mm เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้ง125 mm รัศมีมนของลูกกลิ้ง 9 mm มุมลูกกลิ้งเท่ากับ 30 องศา อัตราป้อนลูกกลิ้ง 1.0 mm/rev วัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม 1100-O มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm หนา 2 mm หมุนด้วยความเร็วคงที่ 450 rpm โดยแบ่งแผ่นชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมย่อยๆจำนวน 3425 เอลิเมนต์ และใช้การอะแดบถีบเหม็ดชิ่ง (Adaptive Meshing) ซึ่งจะแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างของเอลิเมนต์มากให้เล็กลงในระหว่างการคำนวณ ผลของการคำนวณกับผลการทดลองถูกเปรียบเทียบและแสดงไว้ในภาพที่ 6 ถึง ภาพที่ 8



ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของความหนาผนังถ้วยระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง



ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงในแนวแกนหมุนระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงในแนวรัศมีระหว่างแบบจำลองกับการทดลอง

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าความหนาผนังถ้วยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุดเท่ากับ 2.47 % และผลการเปรียบเทียบแรงในแนวแกนหมุน และแรงในแนว

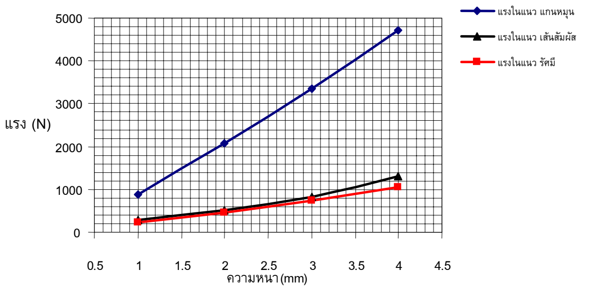
รัศมี มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ตำแหน่งแรงสูงสุดเท่ากับ 4.44 % และ 1.74 % ตามลำดับ ซึ่งค่าผิดพลาดขนาดนี้ในงานอุตสาหกรรมสามารถยอมรับได้ เพราะเมื่อคิดเป็นค่าตัวคูณความปลอดภัยจะมีค่าเพียง 1.044 เท่านั้น ดังนั้นแบบจำลองของการสปินนิ่งที่ได้เสนอมาข้างต้นย่อมนำไปประยุกต์กับการสปินนิ่งได้

4. ผลลัพธ์เชิงตัวเลข

จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟโดยแบ่งกลุ่มอิทธิพลของตัวแปรได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

4.1 กลุ่มอิทธิพลของความหนาที่มีต่อแรงในการสปินนิ่ง

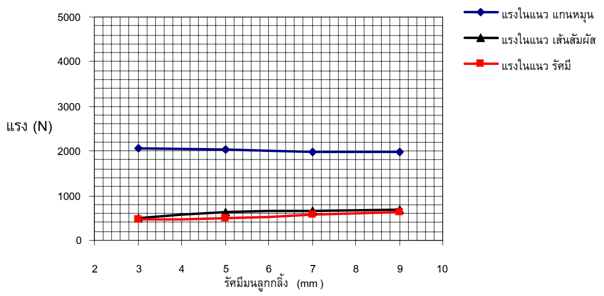
กลุ่มอิทธิพลของความหนาที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งที่รัศมีมนลูกกลิ้งและมุมกรวยต่างๆ พบว่าลักษณะกราฟในกลุ่มนี้มีลักษณะกราฟของแรงแปรผันกับความหนาของวัสดุและการแปรผันมีลักษณะใกล้เคียงกับการแปรผันเชิงเส้นทั้งสามทิศทาง



ภาพที่ 9 อิทธิพลของความหนาที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งสำหรับรัศมีมนลูกกลิ้ง 3 mm และมุมกรวย 60 $^{\circ}$

4.2 กลุ่มอิทธิพลของรัศมีมนลูกกลิ้งที่มีต่อแรงในการสปินนิ่ง

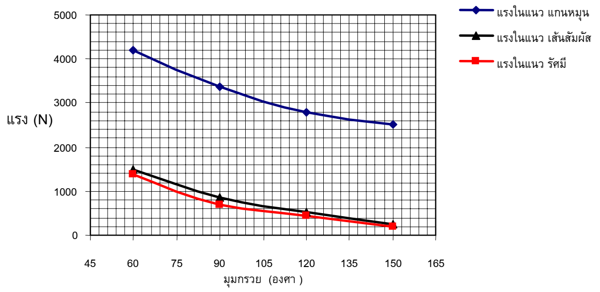
กลุ่มอิทธิพลของรัศมีมนลูกกลิ้งที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งที่ความหนาและมุมกรวยต่างๆ พบว่าลักษณะกราฟในกลุ่มนี้มีลักษณะกราฟของแรงในแนวแกนหมุนแปรผันผกผันกับรัศมีมนลูกกลิ้งเล็กน้อยแต่กราฟของแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงในแนวรัศมี มีลักษณะแปรผันกับรัศมีมนลูกกลิ้งเล็กน้อย



ภาพที่ 10 อิทธิพลของรัศมีมนลูกกลิ้งที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งสำหรับความหนา 2 mm และมุมกรวย 60 $^{\circ}$

4.3 กลุ่มอิทธิพลของมุมกรวยที่มีต่อแรงในการสปินนิ่ง

กลุ่มอิทธิพลของมุมกรวยที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งที่รัศมีมนลูกกลิ้งและความหนาต่างๆ พบว่าลักษณะกราฟในกลุ่มนี้มีลักษณะกราฟของแรงทั้งสามทิศทางแปรผันผกผันกับมุมกรวย



ภาพที่ 11 อิทธิพลของมุมกรวยที่มีต่อแรงในการสปินนิ่งสำหรับรัศมีมนลูกกลิ้ง 9 mm และความหนา 4 mm

นำข้อมูลของผลลัพธ์เชิงตัวเลข มาสร้างฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับมุมกรวย รัศมีมนลูกกลิ้ง และความหนาของวัสดุ เพื่อนำไปใช้ในการทำนายแรงกดลูกกลิ้ง ทำให้สามารถเลือกขนาดเครื่องจักรและนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์สปินนิ่งและลูกกลิ้งได้อย่างเหมาะสม สำหรับการสปินนิ่งอะลูมิเนียมหมายเลข 1100-O เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm หนา 1 ถึง 4 mm มีแม่พิมพ์สปินนิ่งเป็นทรงกรวยเส้นผ่านศูนย์กลางปลายกรวย 56 mm มีมุมกรวยอยู่ในช่วง 60 ถึง 150 องศาหมุนด้วยความเร็วคงที่ 450 rpm รูปทรงของลูกกลิ้งเป็นแบบในภาพที่ 3 แกนการหมุนของลูกกลิ้งขนานกับความสูงเอียงของกรวย เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้ง 125 mm รัศมีมนลูกกลิ้งอยู่ในช่วง 3 ถึง 9 mm อัตราป้อนลูกกลิ้งตามความสูงเอียงของกรวยเท่ากับ 1 mm/rev โดยใช้วิธีถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด เลือกใช้สมการแบบอัลโลเมตริก (Allometric) ได้สมการที่ (11) ถึง (13)

แรงสปินนิ่งในแนวแกนหมุน

$$F_a = 5400\frac{t^{1.17}}{\alpha^{0.45} r_0^{0.14}} - 128 \qquad (11)$$

แรงสปินนิ่งในแนวรัศมี

$$F_r = 25700\frac{r_0^{0.23} t^{1.03}}{\alpha^{1.42}} - 58.5 \qquad (12)$$

แรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัส

$$F_t = 28155\frac{r_0^{0.16} t^{1.12}}{\alpha^{1.40}} - 52 \qquad (13)$$

เมื่อ F_a คือ แรงสปินนิ่งในแนวแกนหมุน (N)

F_r คือ แรงสปินนิ่งในแนวรัศมี (N)

F_t คือ แรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัส (N)

t คือ ความหนาของวัสดุ (mm)

α คือ มุมกรวย (องศา)

r_0 คือ รัศมีมนลูกกลิ้ง (mm)

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในการวิเคราะห์หาแรงในการสปินนิ่งโดยตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง[1] ในการสปินนิ่งถ้วยทรงกระบอกในภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 8 พบว่าผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแรงในแนวแกนหมุน และแรงในแนวรัศมี ที่ตำแหน่งแรงสูงสุดเท่ากับ 4.44 % และ 1.74 % ตามลำดับ ซึ่งค่าผิดพลาดขนาดนี้ในงานอุตสาหกรรมสามารถยอมรับได้ เพราะเมื่อคิดเป็นค่าตัวคูณความปลอดภัยจะมีค่าเพียง 1.044 เท่านั้น ดังนั้นแบบจำลองของการสปินนิ่งที่ได้เสนอมาข้างต้นย่อมนำไปประยุกต์กับการสปินนิ่งได้

ความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของถ้วยในภาพที่ 6 พบว่าค่าของความหนาที่ได้จากการคำนวณโดยมีการปรับค่าความหนาตามภาระความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์ในแต่ละรอบของการคำนวณมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง[1] คือชิ้นงานมีความหนาน้อยกว่าความหนาเดิมของแผ่นวัสดุในบริเวณก้นถ้วย และชิ้นงานมีความหนามากกว่าความหนาเดิมของแผ่นวัสดุในบริเวณปากถ้วย และมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาสูงสุดเท่ากับ 2.47 %

ในการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อแรงในการสปินนิ่งถ้วยทรงกรวย ซึ่งตัวแปรที่ต้องการศึกษาประกอบด้วย มุมกรวย รัศมีมนของลูกกลิ้งและความหนาของวัสดุ จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขสรุปได้ว่า

5.1 แรงในกระบวนการสปินนิ่งทั้งสามทิศทางแปรผันเชิงเส้นกับความหนาของแผ่นชิ้นงาน ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองในการเชียร์สปินนิ่ง [4]

5.2 การเพิ่มรัศมีมนลูกกลิ้งทำให้ขนาดของแรงสปินนิ่งในแนวแกนหมุนลดลงเล็กน้อย แต่ขนาดของแรงสปินนิ่งในแนวรัศมีกับในแนวเส้นสัมผัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5.3 การเพิ่มมุมกรวยทำให้ขนาดของแรงสปินนิ่งทั้งสามทิศทางลดลง ซึ่งให้ผลเหมือนกับผลการทดลองในการเชียร์สปินนิ่ง [4]

เอกสารอ้างอิง

[1] M. M. El-Khabeery. et al., “On The Conventional Simple Spinning of Cylindrical Aluminium Cups.” Int. J. Mach. Tools Manufact. 31 No.2 (1991) : 203-219.

[2] Commercial Pure Aluminium nuber 1100. Available online at http://202.44.14.73/aluminium/html/index_w1100.html.

[3] William F. Hosford. and Robert M. Caddell. Metal Forming. 2nd edition. New Jersey : PTR Prentice Hall, 1993.

[4] B. Avitzur. and C. T. Yang. “Analysis of Power Spinning of Cone.” Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. 82 (August 1960) : 231-245.