

## การวิเคราะห์การขึ้นรูปถ้วยอะลูมิเนียมโดยกระบวนการสปินนิง An Analysis of Aluminium Cup Forming by Spinning Process

ซูไฮดี สนิ<sup>1</sup> ชาญ ถนัดงาน<sup>2</sup> ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล<sup>3</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

โทร 0-2913-2500 ต่อ 1003<sup>2</sup>, ต่อ 8531<sup>3</sup> E-mail : suhaidee@south.rit.ac.th<sup>1</sup>, chn@kmitnb.ac.th<sup>2</sup>, shw@kmitnb.ac.th<sup>3</sup>

Suhaidee Sani<sup>1</sup> Charn Thanadngarn<sup>2</sup> Sirisak Harnchoowong<sup>3</sup>

Department of Production Engineering<sup>1,2</sup>, Department of Mechanical Engineering<sup>3</sup>

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

Tel 0-2913-2500 Ext. 1003<sup>2</sup>, Ext. 8531<sup>3</sup> E-mail : suhaidee@south.rit.ac.th<sup>1</sup>, chn@kmitnb.ac.th<sup>2</sup>, shw@kmitnb.ac.th<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ มุมกรวย รัศมีบน ลูกกลิ้ง และความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มีต่อแรงกดในกระบวนการ สปินนิง ซึ่งเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปที่ใช้สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรง สมมาตรรอบแกน แม่พิมพ์สปินนิง (Mandrel) ที่ใช้ในการศึกษา มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานกรวย 56 mm มุมกรวยที่ทำการทดลอง คือ 90,120 และ 150 องศา ลูกกลิ้ง (Roller) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 mm และคาร์ตมีนลูกกลิ้ง 3,5,7 และ 9 mm ตามลำดับ ถูกป้อน ตามแนวสูงเอียงของมุมกรวยด้วยความเร็ว 200 mm/min ขึ้นทดสอบ ทั้งหมดเป็นแผ่นอะลูมิเนียม AA1100-O ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm มีค่าความหนาต่างกันคือ 1, 2 และ 3 mm ตามลำดับ การวิจัยนี้ทำ การวิเคราะห์แรงกดที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถแบ่ง ออกเป็น แรงสปินนิงในแนวแกนหมุน และแรงสปินนิงในแนวรัศมี

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า (1) แรงกดที่ใช้ในกระบวนการสปิน นิงแปรผันเชิงเส้นกับความหนาของชิ้นงานทดลอง (2) เมื่อคาร์ตมีน ลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นแรงกดขึ้นรูปมีค่าลดลง และ (3) เมื่อเพิ่มมุมกรวยให้มาก ขึ้นจะมีค่าแรงกดในแนวแกนและแรงกดในแนวรัศมีลดลง

**คำสำคัญ :** สปินนิง, กระบวนการสปินนิง, ถ้วยอะลูมิเนียม, แรงกดใน แนวแกน, แรงกดในแนวรัศมี, การขึ้นรูป

### Abstract

The objective of this research is to study the effects of cone angles, roller radii and aluminium sheet thickness on the forming force in spinning process. The spinning process is an axisymmetric out-of-plane forming process. Three 56 mm diameter mandrels with cone angles of 90, 120 and 150 degrees ; and four 125 mm diameter rollers with nose radii of 3, 5, 7 and 9 mm were used to form conical cups. The rollers were fed along the cone surfaces at the rate of 200 mm/min. The specimen material is aluminium alloy No.AA1100-O and all specimens have the same diameter of 100 mm with different thickness of 1, 2 and 3 mm, respectively. Forming forces considered as axial force and radial force were carefully analysed.

From the experimental results, the following summary can be drawn : (1) forming force in spinning process is proportional to the specimen thickness (2) increasing nose radius of the roller decreases the forming force and (3) axial and radial forces decrease as the cone angle increases.

**Keywords :** spinning, spinning process, aluminium cup, axial force, radial force, forming

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming) เป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และภาชนะเครื่องครัว เป็นต้น

อุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ (Metal forming process) ซึ่งจะมีอยู่หลายกรรมวิธีด้วยกัน

สำหรับการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีสปินนิ่ง (Spinning) เป็นวิธีหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่นบางรูปทรงสมมาตรรอบแกน (Axisymmetry) รูปทรงที่มีก้นลึก (Deep shape) รูปร่างแปลกๆ หรือมีขนาดใหญ่มาก เช่น ภาชนะเครื่องครัว ก้นหลอดโทรทัศน์ โคมไฟ ชิ้นส่วนเครื่องบิน ฯลฯ ชิ้นส่วนที่ใช้การผลิตจำนวนน้อย ชิ้นส่วนเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาขึ้นรูปที่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์หลายชุดหรือใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่มากซึ่งมีราคาแพงจึงใช้การขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยวิธีสปินนิ่ง (Spinning) โดยทำการสร้างศูนย์ท่ายแม่พิมพ์ (Mandrel) และศูนย์ท่ายแท่น (Tail stock) ซึ่งทำมาจากวัสดุที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก อีกทั้งยังใช้ในการขึ้นรูปน้อย จึงใช้กับเครื่องจักรที่มีขนาดเล็กได้ แต่ในปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนใหม่ ๆ ในแต่ละครั้งจะต้องมีการลองผิดลองถูก ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน เสียเวลาต่อการทำงานและเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตมากขึ้น

ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ควรจะทำการทดลองหาตัวแปร (Variable) ที่มีความสัมพันธ์ที่สามารถทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปได้รวดเร็วและดีพอที่จะรู้ถึงสิ่งที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปชิ้นงานตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบรูปทรงของชิ้นงานซึ่งทำให้เราสามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงาน การเลือกวัสดุและการเลือกเครื่องจักรได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องต่อไป

## 2. คำทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คำงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**B.Avizur. and C.T.Yang [2]** ศึกษาถึงผลของรูปทรงของกรวยและลูกกลิ้งในกระบวนการเฉียสปินนิ่ง (Shear spinning) ซึ่งความหนาของกรวยเป็นไปตามกฎของซายน์ลอว์ (Sine law)  $t_f = t_o \sin \alpha$  และคำนวณหาแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสจากอัตราความเครียด และสนามความเค้น เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงให้ผลออกมาดี และสรุปผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสดังนี้

(ก) แรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความเค้นครากและความหนาของแผ่นชิ้นงาน

(ข) การเพิ่มอัตราป้อนจะทำให้แรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสเพิ่มขึ้นด้วย

(ค) มุมกรวยที่ใหญ่ขึ้นทำให้แรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสลดลง

(ง) การเพิ่มรัศมีนลูกกลิ้งแทบจะไม่มีผลต่อแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัส

**H.C.Sortais S.Kobayashi and E.G.Thomsen [4]** ศึกษาความหนาของถ้วยที่เปลี่ยนแปลงในการสปินนิ่งกรวยอะลูมิเนียม และสร้างสมการหาแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสขึ้นมาจากวิธีงานอดมคติ โดยสมมุติว่าไม่เกิดการย่นในระหว่างการขึ้นรูป จากผลการศึกษาพบว่าความเค้นในแนวรัศมีเป็นสาเหตุให้เกิดความหนาของถ้วยไม่คงที่ และหาแรงสปินนิ่งในแนวเส้นสัมผัสได้จากทฤษฎีกับผลการทดลองออก

มาตีที่ความหนาของอะลูมิเนียม 0.05 นิ้ว และออกมาไม่ตีที่ความหนาของอะลูมิเนียม 0.088 นิ้ว

**M.M.El-Khabeery M.Fattouh; M.N.El-Sheikh and O.A.Hamed [8]** ทดลองสปินนิ่งรูปถ้วยอะลูมิเนียมทรงกระบอกเพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากมุมลูกกลิ้ง อัตราการป้อน และ รัศมีนลูกกลิ้ง ที่ทำให้อัตราส่วนการสปินนิ่ง (Spinning ratio) สูงสุด ความกลม (Roundness) ความหยาบผิว (Surface roughness) และแรงในการสปินนิ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงในสภาพแห้ง และความหนาถ้วยเท่ากับกับความหนาเดิมของแผ่นชิ้นงาน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

เมื่อลดมุมลูกกลิ้งทำให้ความหนาของถ้วยเบี่ยงเบนจากความหนาเดิมของแผ่นชิ้นงานน้อยลงความกลมของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ผิวถ้วยเรียบขึ้น อัตราส่วนการสปินนิ่งสูงสุดเพิ่มขึ้น และใช้แรงในการสปินนิ่งเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราป้อนทำให้ถ้วยมีความกลมของถ้วยเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการสปินนิ่งสูงสุดเพิ่มขึ้นและใช้แรงการสปินนิ่งเพิ่มขึ้น

การเพิ่มรัศมีนลูกกลิ้งทำให้ความหนาของถ้วยเบี่ยงเบนจากความหนาเดิมของแผ่นชิ้นงานแรงในการสปินนิ่ง และความกลมของถ้วยเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนการสปินนิ่งสูงสุดกลับลดอัตราส่วนการสปินนิ่งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.9 เมื่อใช้มุมลูกกลิ้งเท่ากับ 30 และ 40 องศา

**Serope [15]** ศึกษาการลดความหนาของโลหะให้มากที่สุดที่ไม่ทำให้ชิ้นงานฉีกขาดในระหว่างการสปินนิ่ง เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองจริงให้ผลออกมาสอดคล้องกันดี ผลที่ได้พบว่า การเปลี่ยนแปลงของรัศมีนลูกกลิ้ง ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้ง และความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ไม่ทำให้ความสามารถในการลดความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป แต่ความสามารถในการลดความหนาของชิ้นงานในการสปินนิ่งขึ้นอยู่กับความแข็ง-อ่อน ของโลหะแต่ละชนิด

จากการวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวในข้างต้นทำให้พบว่าส่วนใหญ่แล้วเป็นการวิจัยงานรูปทรงกรวยโดยจะทำการศึกษาถึงผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ โดยคำนึงถึงตำแหน่งหรือระยะเมื่อของลูกกลิ้งเพื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานเดิม โดยวิธีการลดความหนาของชิ้นงาน โดยเริ่มจากสมการ

$$t_f = t_o \sin \alpha \quad (1)$$

งานวิจัยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการวิจัยในลักษณะเฉียสปินนิ่ง (Shear spinning) สำหรับงานวิจัยที่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานให้น้อยสุดก็มีเพียงแต่รูปทรงกระบอก ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่ต้องการจะศึกษาหาค่าแรงกดที่ใช้ในกระบวนการสปินนิ่งที่เป็นรูปทรงกรวยที่เมื่อทำการขึ้นรูปแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานน้อยสุด และทำการศึกษาถ้วยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการสปินนิ่ง

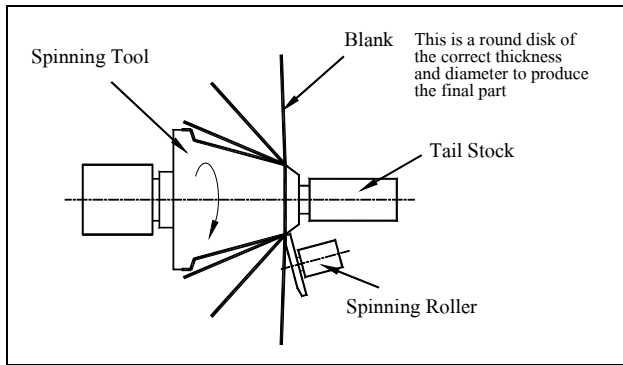
### 2.2 กระบวนการสปินนิ่ง

การขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่างๆ การขึ้นรูปจะเริ่มต้นโดยการนำแผ่นชิ้นงานกลม (Blank) มาติดกับกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท่ายแท่น มากดให้

แผ่นชิ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขั้นตอนต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นชิ้นงานและศูนย์ท้ายแทนหมุนตามไปด้วย

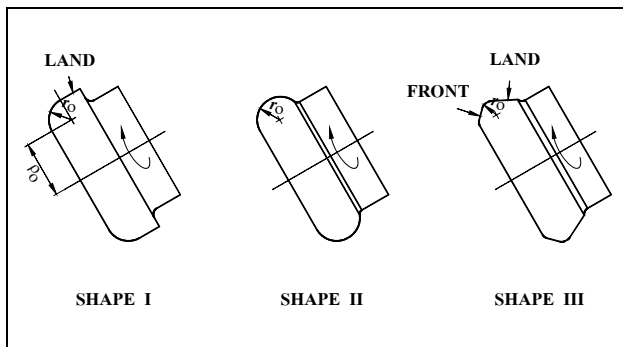
หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดชิ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นชิ้นงานจะค่อยๆ ถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็กๆ ที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นชิ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นชิ้นงานรอบๆ แกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ส่วนประกอบของการสปินนิ่งประกอบด้วย 4 ส่วน

(1) แม่พิมพ์สปินนิ่ง (Mandrel) เป็นตัวกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก



รูปที่ 1 การขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยวิธีสปินนิ่ง

(2) ลูกกลิ้ง (Roller) เป็นตัวรีดชิ้นงานแนบกับแม่พิมพ์



รูปที่ 2 รูปร่างต่างๆ ของลูกกลิ้ง

(3) แผ่นชิ้นงาน (Blank) เป็นวัสดุเนื้ออ่อนที่นำมาขึ้นรูปให้เป็นรูปทรงที่ต้องการสามารถหาขนาดของแผ่นชิ้นงานได้จากพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์

(4) ศูนย์ท้ายแทน (Tail stock) เป็นตัวกดแผ่นชิ้นงานให้หมุนตามไปกับแม่พิมพ์สปินนิ่งโดยที่ศูนย์ท้ายแทนจะหมุนตามแผ่นชิ้นงานไปด้วย

### 3. การออกแบบและวิธีการวิจัย

กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปินนิ่งจะถูกลูกกลิ้งรีดชิ้นงานเปลี่ยนรูปไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์รูปร่างตามมุมต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ดังนั้นแม่พิมพ์ที่ใช้ในการสปินนิ่งที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วย

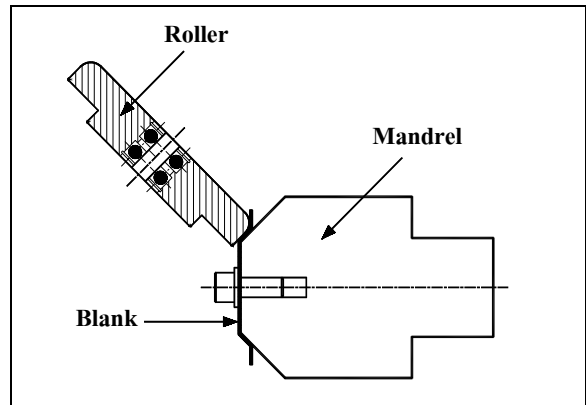
1) แม่พิมพ์สปินนิ่ง สำหรับการขึ้นรูปทรงกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 mm มุมกรวยที่ทำการทดลอง คือ 90, 120 และ 150 องศา

2) ลูกกลิ้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 mm รัศมีบนลูกกลิ้งที่ทำการทดลอง คือ 3, 5, 7 และ 9 mm

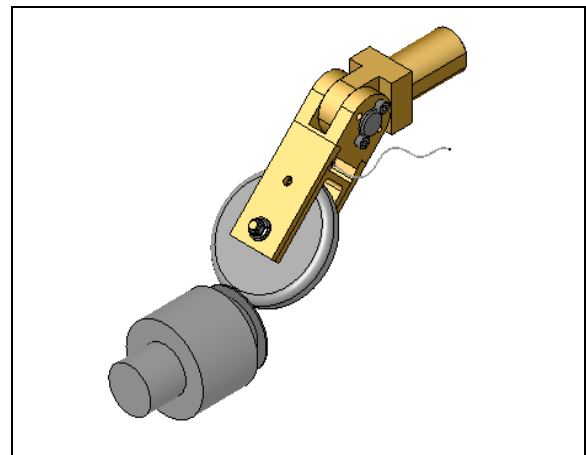
3) ความเร็วรอบหมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 rpm

4) อัตราการป้อนตามแนวสูงเอียง 0.2 mm/rev

5) วัสดุทดลองเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (AA1100-O) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความหนา 1, 2 และ 3 mm



รูปที่ 3 แสดงชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องมือทดลอง



รูปที่ 4 แสดงลักษณะหลักการทำงานของเครื่องมือทดลอง

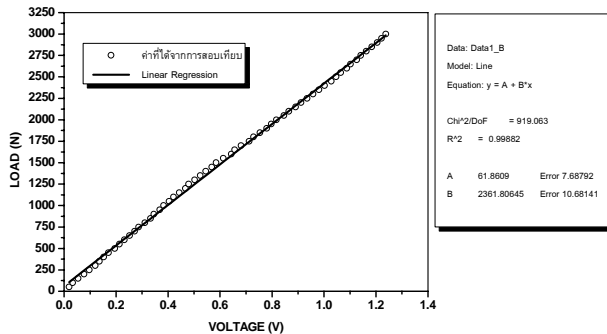
### 3.1 คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม 1100

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม

Temper	Tensile (MPa)	Yield (MPa)	Hardness (HB)	Shear (MPa)
O	90	34	23	62
H12	110	103	28	69
H14	124	117	32	76
H16	145	138	28	83
H18	165	152	44	90

### 3.2 การทดสอบเทียบแรงกดมาตรฐาน

การทดสอบโดยใช้แรงกดมาตรฐานสอบเทียบ ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Material Testing Machines ด้วยเครื่อง Instron รุ่น 5567 Series ได้ค่าการสอบเทียบดังนี้



รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบมาตรฐานระหว่างแรงกดกับแรงดันเพื่อใช้ในการทดลอง

การสอบเทียบของชุดเครื่องมือวัด ได้ผลการเชิงเส้นเป็นสมการเส้นตรงจากสมการดังนี้

$$y = 2361.80645x + 61.8609 \quad (2)$$

จากสมการเชิงเส้นตรงจะเห็นได้ว่าจะได้ค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากทำรีเกรซชันเส้นตรง

$$r = 0.9994$$

ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณจากทำรีเกรซชันเส้นตรง

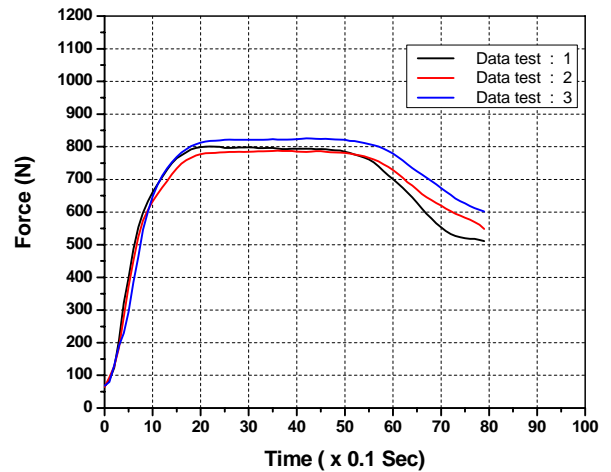
$$R^2 = 99.88\%$$

### 4. ผลการวิจัย

จากงานวิจัยในครั้งนี้เพื่อหาแรงกดในกระบวนการสปิ้นหนึ่ง ผลจากการทดลองในการขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียมนำมาวิเคราะห์ แรงที่ใช้ในการกดของชิ้นงานตามตัวแปรที่ต้องการศึกษาซึ่งประกอบด้วย มุมกรวย รัศมีบนลูกกลิ้ง ความหนาของชิ้นงาน ความเร็วรอบแม่พิมพ์สปิ้นหนึ่ง และอัตราการป้อน จากการที่ได้ทำการทดลองและบันทึกผลนั้นจะได้ผลการทดลองตามเงื่อนไขดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาค่าของแรงกดในการขึ้นรูปสปิ้นหนึ่งของมุมกรวย 90 องศา ความหนาชิ้นงาน 2 mm

มุมกรวย (องศา)	รัศมีบนลูกกลิ้ง (mm)	จำนวนครั้ง			ค่าเฉลี่ย (N)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
90	3	801.01	787.45	825.62	804.69
90	5	630.23	594.76	597.72	607.57
90	7	390.58	393.02	402.43	395.34
90	9	297.82	308.51	305.28	308.87



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลจากการวัดขณะทำการทดลอง

### 4.1 ชิ้นงานจากการทดลองโดยกระบวนการสปิ้นหนึ่ง



มุมกรวย 90 องศา



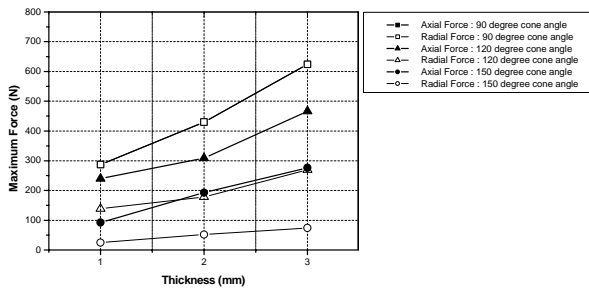
มุมกรวย 120 องศา



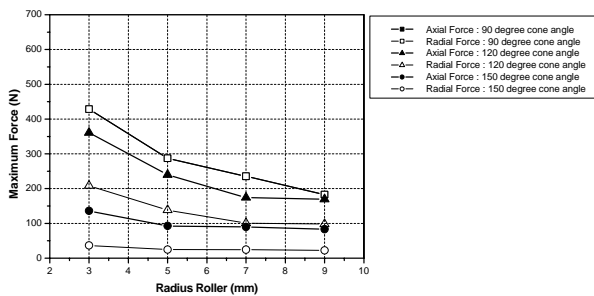
มุมกรวย 150 องศา

รูปที่ 7 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นอะลูมิเนียมได้จากการทดลอง

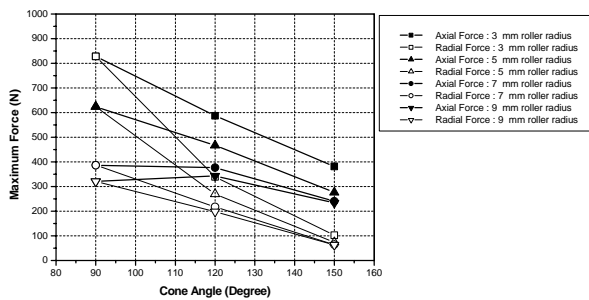
## 4.2 ผลการเปรียบเทียบการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบระหว่างแรงกับความหนาชิ้นงาน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบระหว่างแรงกับรัศมีมัลลูกกลิ้ง



รูปที่ 10 เปรียบเทียบระหว่างแรงกับมุมกรวย

พิจารณาหาค่าของสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในการสปินหนึ่ง กับ มุมกรวย รัศมีมัลลูกกลิ้ง และความหนาชิ้นงาน เพื่อที่จะนำมาใช้ในการทำนาย (Prediction) แรงกดในการสปินหนึ่ง เพื่อที่จะใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดของเครื่องจักร และการออกแบบชุดของแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปที่มีรูปแบบของชิ้นงานคล้ายๆ กัน ได้แม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สำหรับการหาสมการความสัมพันธ์นั้น ได้เลือกใช้วิธีถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด โดยเลือกใช้สมการแบบอัลโลเมตริก (Allometric) จะได้สมการดังนี้

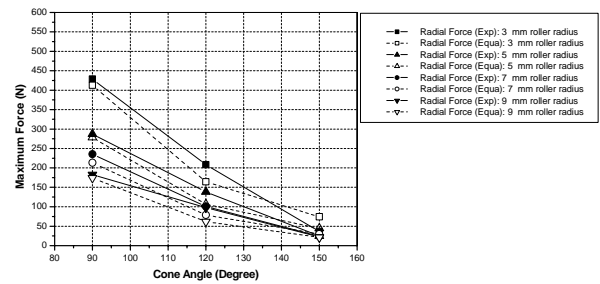
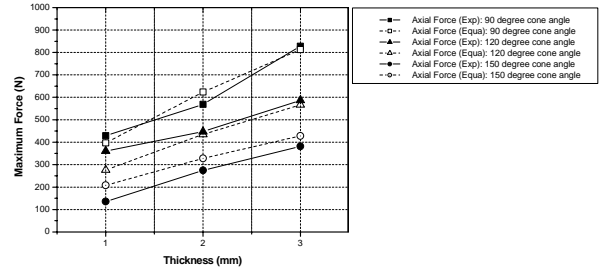
สมการหาค่าแรงกดสปินหนึ่งในแนวแกน

$$F_a = 1517 \left( \frac{T^{0.649}}{\alpha_o^{1.247} \cdot r_o^{0.7}} \right) - 3.75 \quad (3)$$

สมการหาค่าแรงกดสปินหนึ่งในแนวรัศมี

$$F_r = 3622 \left( \frac{T^{0.584}}{\alpha_o^{2.934} \cdot r_o^{0.722}} \right) - 23 \quad (4)$$

## 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับสมการ



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบแรงแนวรัศมีและแนวรัศมี

## 5. อภิปรายผล สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 อภิปรายผล

จากผลสรุปการวิจัยการขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียมโดยกระบวนการสปินหนึ่งชิ้นงานรูปทรงกรวย จากผลการทดลองจะแสดงกราฟผลการทดลองที่ได้จากการวัดเป็นแรงกดสูงสุด (Maximum force) ของแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการสปินหนึ่งเมื่อลูกกลิ้งเริ่มเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสยังมีค่าของพื้นที่ยังน้อยในช่วงของแรกของการสปินหนึ่ง

หลังจากการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งจนผิวของชิ้นงานสัมผัสกับรัศมีของลูกกลิ้งเต็มพื้นที่ผิวของรัศมีลูกกลิ้งจะทำให้การเคลื่อนที่ซึ่งจะเคลื่อนที่ตามอัตราการบินของลูกกลิ้งนั้น จะทำให้จะต้องใช้แรงกดและพลังงาน เพราะว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุจากช่วงอีลาสติกเข้าสู่ในช่วงของพลาสติก

เมื่อวัสดุเริ่มการเปลี่ยนรูปเข้าสู่ในช่วงพลาสติกก็ทำให้วัสดุทดลองเปลี่ยนรูปอย่างถาวร จึงจะเห็นว่า แรงที่ใช้ในการสปินหนึ่งเมื่อระยะเวลาของการสปินหนึ่งเพิ่มขึ้น แรงที่เกิดขึ้นจะลดลง เมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีมัลลูกกลิ้ง เริ่มจากรัศมีมัลลูกกลิ้ง 3, 5, 7 และ 9 mm จากผลการทดลองเห็นได้ว่ารัศมีมัลลูกกลิ้งน้อยที่สุดจะใช้แรงกดในการสปินหนึ่งสูงสุด และเมื่อเพิ่มรัศมีมัลลูกกลิ้งเพิ่มมากขึ้น จากการทดลองเห็นได้ว่าจะใช้แรงกดในการสปินหนึ่งชิ้นงานรูปทรงกรวยนั้นลดลง

## 5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการผลการทดลองของการวิจัยในครั้งนี้สรุปได้ว่า

(1) แรงกดที่ใช้ในกระบวนการสปินนิ่งนั้น ได้แปรผันเชิงเส้นโดยตรงกับความหนาของชิ้นงานทดลอง คือ เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้แรงที่ใช้ในการกดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

(2) จากการเพิ่มรัศมีของลูกกลิ้ง เริ่มจากรัศมีของลูกกลิ้ง 3, 5, 7 และ 9 mm จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่รัศมีของลูกกลิ้งน้อยที่สุดจะใช้แรงกดสูงสุด และเมื่อรัศมีของลูกกลิ้งมีค่าของรัศมีเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้แรงที่ใช้ในชิ้นรูปนั้นลดลง

(3) จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มมุมกรวยให้มากขึ้นนั้น มีผลกระทบให้แรงกดในแนวแกนและแรงกดในแนวรัศมีของชิ้นรูปด้วย อะลูมิเนียมโดยกระบวนการสปินนิ่งนั้นลดลง โดยในการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยที่มุมกรวย 90, 120 และ 150 องศา

(4) จากการวิจัยทำให้ได้สมการหาค่าแรงกดเพื่อใช้เป็นแนวทางในกระบวนการสปินนิ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

(1) การศึกษาถึงคุณภาพของผิวชิ้นงานสำเร็จ ที่ได้หลังจากการทดลองเพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับชิ้นงานให้สูงขึ้น

(2) ควรมีการศึกษาถึงอุณหภูมิในขณะที่ทำการสปินนิ่งว่ามีผลต่อแรงกดอย่างไรบ้าง

(3) ควรคำนึงถึงแรงเสียดทานในขณะที่ทำการสปินนิ่งว่ามีผลอย่างไรต่อแรงกดบ้าง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดี จากภาค วิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ หจก.แมชชีน เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ ซัพพลาย และต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนุ ฉุยฉาย ที่ให้คำปรึกษาทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์การวัดในการทำวิจัยครั้งนี้ จึงขอขอบคุณทุกๆ ท่าน มา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนทุกๆ ท่าน ที่ได้สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

## 7. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_i$  : พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน

$E$  : โมดูลัสยืดหยุ่น

$f$  : ความเร็วในการป้อนต่อการหมุนหนึ่งรอบ

$F$  : แรงลัพธ์จากการวัด

$F_a$  : แรงกดสปินนิ่งในแนวแกน หน่วยเป็น นิวตัน

$F_r$  : แรงกดสปินนิ่งในแนวรัศมี หน่วยเป็น นิวตัน

$r_o$  : รัศมีของลูกกลิ้ง หน่วยเป็น มม

$T$  : ความหนาชิ้นงาน หน่วยเป็น มม

$t_o$  : ความหนาของชิ้นงาน หน่วยเป็น มม

$t_f$  : ความหนาของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป

$x$  : ค่าแรงดันที่อ่านได้ หน่วยเป็น โวลท์

$y$  : ค่าแรงสอเทียบ หน่วยเป็น นิวตัน

$\alpha$  : มุมครึ่งหนึ่งของมุมกรวย หน่วยเป็น เรเดียน

$\alpha_o$  : มุมกรวย หน่วยเป็น เรเดียน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญ ถนัดงาน. เอกสารประกอบการสอนวิชา เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพมหานคร :สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.
- [2] B.Avitur. and C.T.Yang. Analysis of Power Spinning of Cone. Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. 82(August 1960) : 231-245.
- [3] H.C. Sortais, S. Kobayashi, and E.G. Thomsen. Mechanics of Conventional spinning. Trans. ASME Journal of Engineering for Industry.85(November 1963) : 346-350.
- [4] James Brown. Modern Manufacturing process. Newyork, 1991.
- [5] Kang Dachang, Jiang Deming, Z.R. Wang, Cheng Qiunuo and Song Tao. A Study of Quasi Superplastic Spinning of 2091 Al-Li Sheet. J.Materials processing technology. 51(1995) : 79-86.
- [6] Lange K.,ed. Handbook of Metals Forming. Newyork : McGraw-Hill, 1985.
- [7] M.M.El-Khabeery, M.Fattouh, M.N.El-Sheikh, and O.A.Hamed. On the Conventional simple spinning of cylindrical aluminium cups. J.Mech.Tools Manufact. Vol.31.(1991) : 203-219.
- [8] Metal Spinning Application of The process Equipment, Tools & Procedure. London : The Machinery Publishing.
- [9] Metals Handbook. Eight edition Volume 4. : American society for Metals, 1969.
- [10] MT Watkirs .Metal Forming II Pressing and Related processes. Oxford University, 1975.
- [11] William M. Stocker and Diane Heibers. Metal Forming : Modern Mechanics Methods and Tooling for Engineering and Operating personal. American Machinist.
- [12] S.Kobayashi, I.K. Hall, and E.G. Thomsen. A Theory of Shear Spinning of Cone. Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. 83(November 1961): 485-495.
- [13] Serope Kalpakciogle. On the Mechanics of Shear Spinning. Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. 83(May 1961) : 125-130.
- [14] Serope Kalpakciogle. A Study of Shear-Spinnability of Metals. Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. 83(November 1961) : 478-484.
- [15] William F.Hosford. and Robert M. Caddell. Metal Forming. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey : PTR Prentice, 1993.