

บทความวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปลึก ชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสงด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์*

ดร.สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย¹⁾

¹⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจร.91 ถนนประชาอุทิศ
แขวง บางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Email: surasak.sur@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นการศึกษาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการลากขึ้นรูปลึกของ
ชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสงโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมสำเร็จรูปทางการค้าชื่อ
OPTRIS ได้ถูกนำมาใช้ในการทำแบบจำลองครั้งนี้ แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นชนิด A1100-O ซึ่งมีความหนา 1
มิลลิเมตร โดยในการศึกษาได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบความ
แม่นยำในการทำนายผลลัพธ์ของโปรแกรม โดยทำการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปและความหนา
ของชิ้นงานขณะขึ้นรูป ทั้งนี้ผลที่ได้รับจากแบบจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลจากการทดลองจริงใน
ขณะที่แม่พิมพ์ยังไม่ได้มีการปรับปรุง จึงสามารถกล่าวได้ว่าแบบจำลองที่ใช้มีความถูกต้องเพื่อนำไปใช้หา
ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน ส่วนที่ 2 เป็นการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อนำไปปรับปรุง
แม่พิมพ์และทำการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยศึกษาอิทธิพลของรัศมีดایที่มีผลต่อความเสียหายและความหนาของ
ชิ้นงาน ตลอดจนอิทธิพลของแรงกดแผ่นชิ้นงานที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงานและรอยย่นที่ปึกชิ้นงาน
ผลที่ได้จากการทำแบบจำลองพบว่า รัศมีดایที่มีขนาดเพิ่มทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลงและทำให้ความหนา
ของชิ้นงานที่กันถ้วยมีความหนาเพิ่มขึ้น แรงกดแผ่นชิ้นงานที่เหมาะสมจะทำให้การไหลตัวของวัสดุดีขึ้น
และช่วยเพิ่มความหนาให้กับชิ้นงาน นอกจากนี้ยังไม่พบรอยย่นที่ปึกชิ้นงาน สำหรับผลที่ได้รับจากการ
ลากขึ้นรูปชิ้นงานจริงหลังปรับปรุงแม่พิมพ์พบว่า รัศมีดایรวมทั้งแรงที่ใช้กดแผ่นชิ้นงานมีความถูกต้อง
เป็นไปตามแบบจำลอง กล่าวคือ ความหนาชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นโดยไม่เกิดความเสียหายและไม่พบรอยย่นที่
ปึกชิ้นงานเมื่อรัศมีดایและแรงกดแผ่นชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ตัวแปรในการลากขึ้นรูป, ชิ้นงานแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสง, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, รัศมี
ดای, แรงกดแผ่นชิ้นงาน

* รับผิดชอบเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2548

Study on the Effects of Parameters in the Deep Drawing Process of Aluminum Sheet Reflector Using Finite Element Method *

Surasak Suranuntchai ¹⁾

¹⁾ Assistant Professor Tool and Materials Engineering Department, Faculty of Engineering, KMUTT
91 Pracha U-thit Rd., Bangmod, Tungkru, Bangkok 10140

Email: surasak.sur@kmutt.ac.th

Abstract

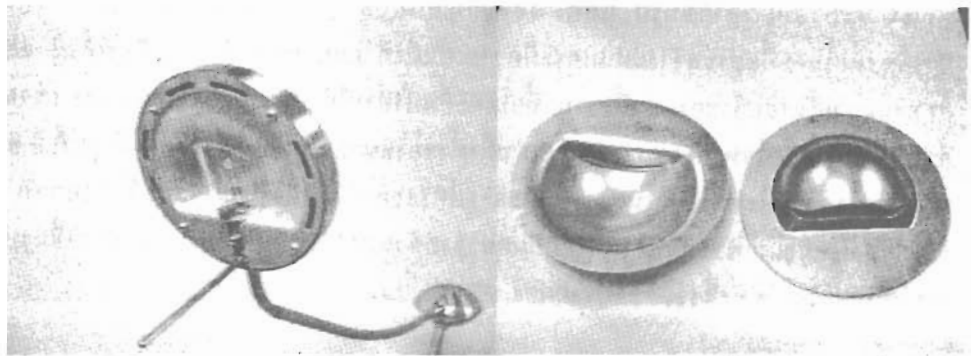
The objective of this research project is to **determine the** optimum parameters in the deep drawing process of aluminum sheet reflector using the **Finite Element (FE)** Method. A commercial FE package called **OPTRIS** was applied as a simulation tool. Aluminum **sheet type A1100-O** used has a thickness of 1mm. With the present investigation, the operation had been divided into two parts. First, the accuracy of the software was tested. By comparison of the simulation results with the real experiments, while the die sets had not been adjusted, in terms of drawing force and product thickness, **good agreement** was found. Thus, it could be concluded that such FE model could be employed to optimize the process parameters. Second, determination of suitable process parameters to improve the die sets was made by studying the **effects** of the die radius on the damage and the thickness of products. Effects of blank holder force on thickness and wrinkle of product edges were investigated, **as well**. From FE simulation results, **it could be found** that when the die radius increased, the reduction of drawing force occurred but **the thickness at bottom** of cup increased. In addition, the optimum blank holder force was able to introduce good material flow rate in the process. As a result, thickness at the bottom of cup increased and wrinkle was not found in all cases. Experimental results obtained from improved die set based on simulation predictions showed that using the optimum die radius and blank holder force can produce sound products without defects.

Keywords : Process Parameters in Deep Drawing, Aluminum Sheet Reflector, Finite Element Method, Die Radius, Blank Holder Force

* Original manuscript submitted: February 25, 2005 and Final manuscript received: June 12, 2005

บทนำ

อุตสาหกรรมทางด้านการผลิตผลิตภัณฑ์จากโลหะแผ่น ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมทางด้านการผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ อุตสาหกรรมทางครัวเรือน หรืออุตสาหกรรมในด้านอื่นๆ ซึ่งกระบวนการลากขึ้นรูปลึกเป็นส่วนหนึ่งในกรรมวิธีการขึ้นรูปที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออุตสาหกรรมโลหะแผ่น โดยเป็นกรรมวิธีการควบคุมแรงกดที่พันทซ์ (Punch) ลงบนแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blank) แล้วดันผ่านตาย (Die) ให้มีรูปร่างเป็นหลุม โดยมีรูปร่างของหลุมที่ต้องการแตกต่างกันออกไป กรรมวิธีการลากขึ้นรูปลึกได้ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานอลูมิเนียมสะท้อนแสงที่ใช้ในดวงโคมไฟฟ้า ดังรูปที่ 1: ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องคุณภาพของงานที่ได้และต้นทุนของวัตถุดิบ

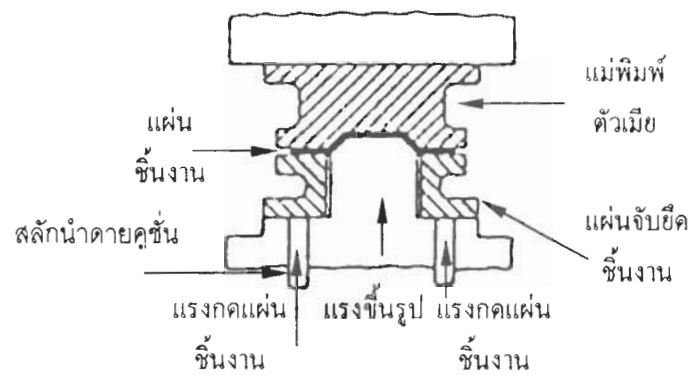


รูปที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งอลูมิเนียมสะท้อนแสงในดวงโคมไฟฟ้าและความเสียหายของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและแก้ปัญหาดังกล่าว เพื่อที่จะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปนี้ ได้คุณภาพที่ดีขึ้น ไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จำลองการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อปรับปรุงเงื่อนไขสภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยค่าของตัวแปรที่จะนำมาศึกษาคือ รัศมีตาย และแรงกดแผ่นชิ้นงานที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน

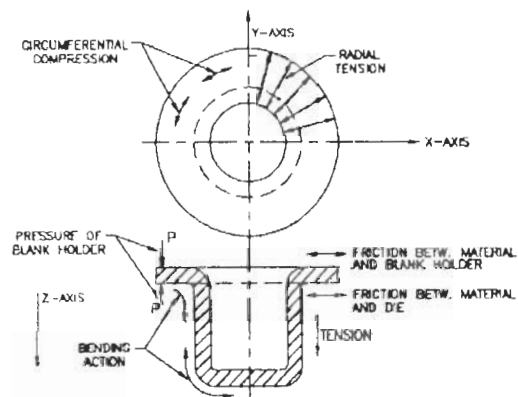
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลากขึ้นรูปลึก

กระบวนการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เป็นการลากขึ้นรูปจากโลหะแผ่นโดยการกดแผ่นเปล่า (Blank) ด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lip of Die) ซึ่งจะทำให้มีรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามแม่พิมพ์ โดยใช้ขั้นตอนการลากขึ้นรูปเป็นแบบ 2 จังหวะ ซึ่งเป็นการลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นกดในการสร้างแรงกด เพื่อลดการเกิดรอยย่น (Wrinkle) ที่เกิดที่ปีกถ้วย (Johnson and Meller, 1972) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การลากขึ้นรูปแบบใช้แผ่นกดขึ้นงาน (ที่มา: ธเนศ เมฆฉาย, 2539)

ระหว่างการลากขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัวผู้กดแผ่นเปล่า ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมียทำให้ขึ้นงานเกิดการดัด เนื้อโลหะที่อยู่ระหว่างแผ่นกดจะมีความเค้นดึงตามแนวการกดของแม่พิมพ์ตัวผู้ และความเค้นอัดตามแนวเส้นรอบวงของแผ่นขึ้นงาน เนื้อโลหะที่ผนังถ้วยได้รับความเค้นดึงแนวแกน (Axial Tension) ส่วนที่ก้นถ้วยเนื้อโลหะเกิดสภาวะความเค้นดึงทั้งสองแนวแกน (Suchy, 1997) ดังรูปที่ 3 สภาวะความเค้นที่กล่าวมาจะมีผลต่อแรงในการขึ้นรูปและรูปทรงของถ้วยอย่างมาก ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ และคุณภาพของขึ้นงานที่ได้ก็มีผลมาจากตัวแปรต่างๆที่เกิดขึ้นในขบวนการขึ้นรูปนี้ด้วย โดยสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ (จุลศิริ ศรีงามผ่อง, 2541)



รูปที่ 3 ความเค้นที่เกิดขึ้นในกรรมวิธีการลากขึ้นรูป (ที่มา: Suchy, 1997)

การดัดงอ

ขณะที่พื้เคลื่อนที่ลงมาในช่องว่างของตาย โลหะแผ่นจะถูกงอเหนือรัศมีพื้ และโลหะในส่วนที่ใกล้เคียงก็จะถูกดัดงอเหนือรัศมีของตาย สำหรับโลหะส่วนที่แบนก็จะสัมผัสกับผิวหน้าพื้ โลหะที่กันด้วยจะไม่เกิดการแข็งตัวในขณะที่ทำการขึ้นรูป และโลหะส่วนนี้ยังมีความหนาเท่าความหนาเดิม

การทำให้ตรง

เมื่อพื้เคลื่อนที่ลงมาอีก ในขั้นตอนนี้นักันด้วยถูกทำให้เคลื่อนที่ลงมาด้วย โลหะส่วนบนก็จะถูกงอเหนือรัศมีพื้ และโลหะที่อยู่เหนือรัศมีตายก็จะถูกทำให้ตรง โลหะส่วนใหม่ที่ไหลเข้ามาก็จะถูกทำให้งอเหนือรัศมีตายอีก ซึ่งโลหะส่วนที่งอมาแล้วถูกทำให้ตรงก็จะเกิดการแข็งตัว ดังนั้นจึงต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อให้โลหะส่วนที่งอนั้นกลับตรงเหมือนเดิม

ความเสียดทาน (Friction)

ในขั้นตอนที่ทำให้ตรง ขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกดึงลงไปในตาย ในขบวนการนี้เรียกว่า การดึง (Pulling) หรือการลาก (Drawing) ซึ่งเกิดความเสียดทานระหว่างแผ่นชิ้นงานและผิวหน้าของตาย รวมถึงแผ่นกดชิ้นงานด้วย โดยแผ่นกดชิ้นงานจะได้รับกำลังมาจาก สปริง ท่อลม ท่อน้ำมัน ของเครื่องปั๊มโลหะ เมื่อต้องการที่จะให้แผ่นชิ้นงานเคลื่อนที่ลงในตาย จะต้องใช้แรงดึงให้มากพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น และแรงที่แผ่นยึดชิ้นงานจะต้องมีขนาดไม่มากเกินไปที่ทำให้โลหะไม่ไหลได้โดยใช้สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นตัวลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

การอัด (Compression)

ในขณะที่แผ่นชิ้นงานได้ถูกทำให้เคลื่อนที่ลงในตาย เนื้อโลหะตามเส้นรอบวงของแผ่นชิ้นงานก็จะลดขนาดลง เช่นเดียวกันเนื้อโลหะที่อยู่ไกลจากขอบปากตายจะถูกบีบอัดน้อยมาก ปริมาณการบีบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโลหะเข้าใกล้ปากตาย การถูกอัดของโลหะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยย่นขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูป ดังนั้นจึงต้องใช้แผ่นกดชิ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น

การเกิดรอยย่น (Wrinkling)

ที่ขอบนอกชิ้นงานจะเกิดความเค้นอัดซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยย่น การแก้ปัญหาโดยทั่วไปเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นก็คือการใช้แผ่นกดชิ้นงานเพื่อให้เกิดแรงอัดในแนวตั้งฉากกับแผ่นชิ้นงาน ดังนั้นความหนาของแผ่นชิ้นงานที่ปึกชิ้นงานจะมีความหนาเพิ่มขึ้นมากกว่าความหนาเดิม การพิจารณา

การเกิดรอยย่นทำได้โดยการวิเคราะห์ภาพตัดเล็ก ๆ ของแผ่นชิ้นงานใกล้กับบริเวณขอบแผ่นชิ้นงาน จากภาพตัดสามารถแสดงให้เห็นแท่งโลหะแผ่นเล็กๆที่อยู่ภายใต้แรงอัดสูง ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่แผ่นชิ้นงานถูกลาก ตรงไปยังรัศมีตาย ความกว้างของแท่งโลหะนี้จะมีขนาดเท่ากับความหนาของแผ่นชิ้นงานเดิม ความยาวของแท่งโลหะนี้จะเป็นสัดส่วนกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน

การดึง (Tension)

ขณะทำการลากขึ้นรูป แรงในการขึ้นรูปที่เกิดจากพันธันกันด้วยลงไปในด้าน บริเวณผนังของชิ้นงานจะเกิดแรงดึงสูงเป็นผลให้ผนังที่อยู่ใกล้กับรัศมีของพันธันเกิดความเค้นสูงสุด และจะมีขนาดบางกว่าความหนาเดิมของโลหะ ทำให้เกิดการฉีกขาดขึ้นบ่อยๆที่บริเวณนี้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงที่สูงขึ้นหรือการยืดที่มากขึ้นก็เป็นผลมาจากการการออกแบบตายด้วยรัศมีแม่พิมพ์ตัวเมีย มีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

ตัวแปรในขบวนการขึ้นรูป

ตัวแปรต่างๆที่มีส่วนสำคัญในการที่จะทำให้กระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานสำเร็จได้มีดังนี้ ขีดจำกัดในการลากขึ้นรูป, แรงในการลากขึ้นรูป, แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน, แรงที่ทำให้เกิดการแตก, รัศมีแม่พิมพ์ตัวเมีย, รัศมีแม่พิมพ์ตัวผู้, ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์, ความเสียดทานของผิวหน้าชิ้นงานกับแผ่นกดชิ้นงาน และขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งรายละเอียดของแต่ละตัวแปรสามารถศึกษาค้นคว้าได้จากเอกสารอ้างอิง อาทิเช่น Lange, 1985, Kobayashi et al., 1989 และ Pearce, 1991 เป็นต้น

การใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การลากขึ้นรูปชิ้นงาน

มีงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วซึ่งแสดงให้เห็นถึงหลักการของการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไขชิ้นงานภายใต้ขบวนการลากขึ้นรูป ดังนี้ Ahmetoglu et al., 1997 ทำการศึกษา รอยย่น และการแตกหัก ในการลากขึ้นรูปชิ้นงาน โดยมีแรงกดแผ่นชิ้นงาน เป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการทดลอง โดยทำการทดลองลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมทรงผืนผ้า วัสดุอลูมิเนียม - อลลอย AA 2008 T4 ที่มีรูปร่างชิ้นงานเริ่มต้นต่างกัน ด้วยโปรแกรม PAM-STAM ซึ่งเป็นโปรแกรมในการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งกำหนดค่าต่างๆในการจำลองการลากขึ้นรูป ดังนี้ 1. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่า $m = 0.08$ 2. เลือกวัสดุเป็นแบบ elasto-plastic material 3. เลือกคุณสมบัติของแม่พิมพ์เป็น rigid element 4. ระยะความลึกในการลากขึ้นรูป 50 มม. 5. สารหล่อลื่นที่ใช้เป็น dillutable oil based lubricant (DB-4251) ทาที่ผิวพันธัน, แผ่นกดชิ้นงาน, ตาย และ ผิวหน้าทั้งสองด้านของแผ่นชิ้นงาน จากการวิจัยพบว่า ในการจำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงานแสดงให้เห็นรอยย่นที่ขอบชิ้นงานโดยใช้ขนาดของแรงกดแผ่นชิ้นงาน เท่ากับ 2 ดัน ซึ่งเป็นจุดที่แรงดันในการกดแผ่นชิ้นงานไม่เพียงพอในการป้องกันการเกิดรอยย่น และส่วนการแตกหักก็ทำนายได้จากการตกลงของแรงพันธันอย่าง

รวดเร็ว จากการทดลองควบคุมแรงกดแผ่นชิ้นงาน เท่ากับ 35 ดัน พบการแตกเกิดขึ้นที่ความลึก 41 มม. และที่แรงกดแผ่นชิ้นงาน เท่ากับ 25 ดัน พบรอยย่นเกิดขึ้นรอบๆชิ้นงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าการป้องกันรอยย่นและรอยแตก ในเวลาเดียวกันนั้นต้องควบคุมแรงกดแผ่นชิ้นงาน กับระยะทางในการขึ้นรูปด้วย ซึ่งแรงกดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นจะสูง เพื่อป้องกันรอยย่น และจะลดต่ำลงเมื่อใกล้จบการทำงาน เพื่อป้องกันการแตกหัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกดแผ่นชิ้นงาน มีความสำคัญมากในการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปได้และคุณภาพของชิ้นงาน Zimniak, 2000 ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองแบบการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อใช้ในการปรับปรุงวางแผนออกแบบเครื่องมือและคุณภาพของชิ้นงานในการลดปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MARC ในการวิเคราะห์ปัญหาการขึ้นรูปชิ้นงานฝาครอบคอมเพรสเซอร์แม่พิมพ์แบบ Multiple forming ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นบริเวณฐานยึดของชิ้นงาน โดยใช้การจำลองการขึ้นรูปแบบสองมิติ วัสดุชิ้นงาน STW 24 (DIN 1016) หนา 2.5 มม. จากการวิจัยพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นมาจากขนาดของรัศมีตาย รัศมีพันซ์ และจำนวนขั้นตอนในการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม ในการขึ้นรูปชิ้นงานโดยจำนวนขั้นตอนในการขึ้นรูปที่ดีที่สุดจะต้องมี 4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปชิ้นงาน และขนาดรัศมีตาย และรัศมีพันซ์ ที่เหมาะสม จะทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานสม่ำเสมอตลอดการขึ้นรูปและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าการจำลองแบบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถช่วยในการแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิตจริงได้

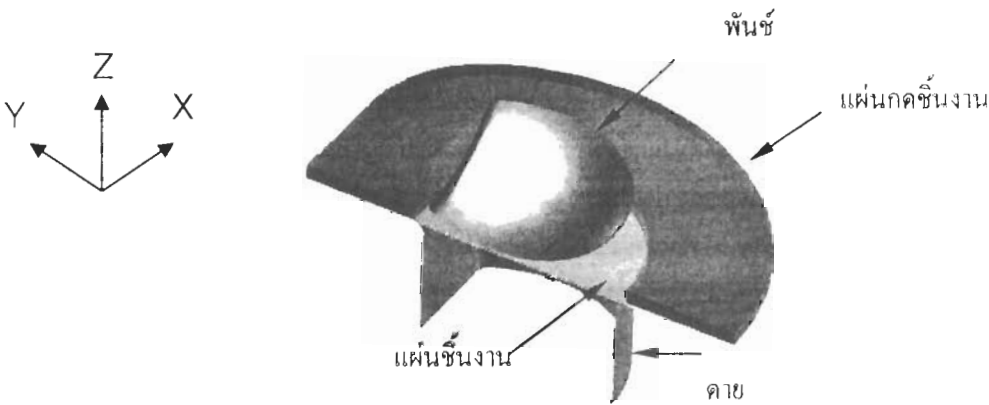
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้คืออลูมิเนียม AA1100-O ผ่านการอบ (Anneal) ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 1 วัสดุที่ใช้ทำพันธก์ับตายคือ S45C แผ่นกดชิ้นงานคือ เหล็กหล่อ สารหล่อลื่นที่ใช้ น้ำมันมะพร้าว ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแผ่นกดชิ้นงานกับชิ้นงาน $\mu=0.078$ และตายกับแผ่นชิ้นงาน $\mu=0.068$ ทดสอบโดยวิธี Ring Compression Test ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนในการทดลองคือ ขนาดรัศมีของตาย เท่ากับ 3, 3.5, 3.75 และ 4 มิลลิเมตร แรงกดแผ่นชิ้นงาน เท่ากับ 2, 2.25, 2.5 และ 2.75 kN ขนาดรัศมีตายที่มีขนาดในช่วงการปรับเปลี่ยนน้อย เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานที่ทางผู้ผลิตกำหนดไว้ไม่เกิน 4 มิลลิเมตร และรัศมีพันซ์ที่ใช้ 4.5 มิลลิเมตร ให้คงที่ รัศมีพันซ์ไว้ ในการจำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม OPTRIS ได้ทำการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานเพียงครึ่งหนึ่งของชุดแม่พิมพ์ ลักษณะชิ้นงานเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) ในระนาบ yz จึงแบ่งชิ้นงานออก ดังในรูปที่ 4 โดยมีขั้นตอนการสร้างแบบจำลองดังนี้ (1) สร้างแบบจำลองแม่พิมพ์ 3 มิติจากโปรแกรม Mechanical Desktop 6 เพียงครึ่งหนึ่ง โดยไม่กำหนดความหนา ดังรูปที่ 5 (2) สร้างโครงตาข่ายเอลิเมนต์ (Element Mesh) บนชุดแม่พิมพ์ โดยโปรแกรม OPTRIS จะทำการสร้างแบบโดยอัตโนมัติ และสร้างแบบจำลองแผ่นกดชิ้นงาน ด้วยการจำลองจากพื้นผิวหน้าของตาย ซึ่งชุดแม่พิมพ์ทั้งหมดถูกกำหนดให้เป็นแบบไม่มีการเปลี่ยนรูป (Rigid Element) ดังรูปที่ 6 (3) สร้างแบบจำลองของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นด้วย Mechanical Desktop 6 โดยมีลักษณะ 3 มิติ เช่นเดียวกับชุด

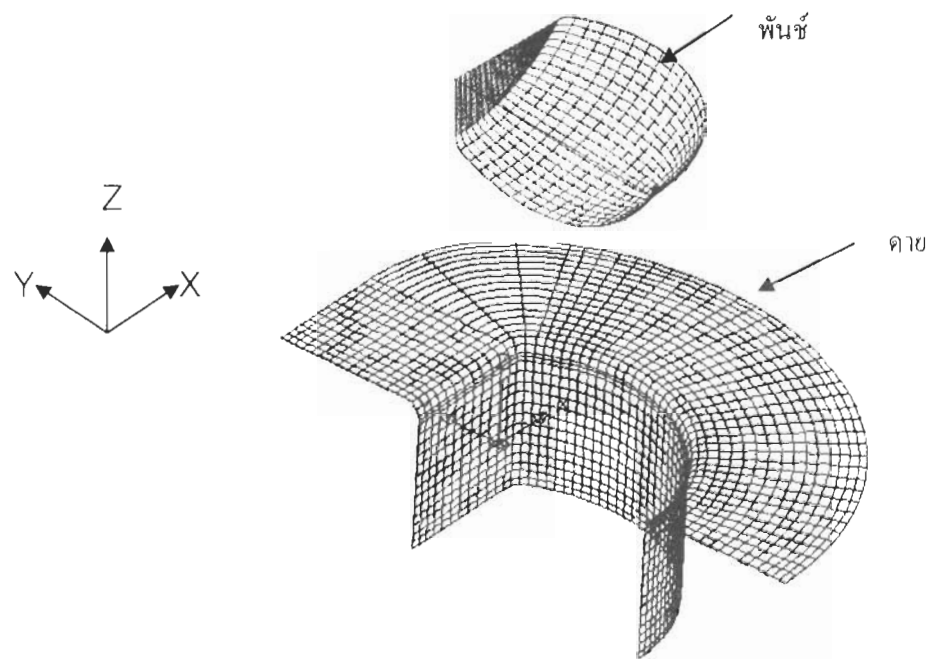
แม่พิมพ์ด้วย และทำการสร้างเอลิเมนต์ให้กับแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น ดังรูปที่ 7 กำหนดคุณสมบัติชิ้นงานเป็นแบบแอนไอโซโทรปี (4) กำหนดเงื่อนไขขอบและขั้นตอนการขึ้นรูปให้กับแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์ตัวเมียไม่มีการเคลื่อนที่ แต่แม่พิมพ์ตัวผู้เคลื่อนที่ได้เฉพาะทิศทางในการขึ้นรูปเท่านั้น กำหนดการทำงานของแม่พิมพ์เป็นแบบ (Double Action) คือแผ่นกดชิ้นงานเคลื่อนที่ลงมากดแผ่นชิ้นงานก่อนแล้วแม่พิมพ์ตัวผู้จึงทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ส่วนการปรับเปลี่ยนการเปลี่ยนรูปของขนาดเอลิเมนต์ในระหว่างการขึ้นรูปกำหนดให้เป็นแบบอัตโนมัติ

ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength, Ultimate)	985MPa
ความแข็งแรงคราก (Tensile Strength ,Yield)	35.3 MPa
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	63.44 GPa
ค่า Plastic Strain Ratio (r)	
- r0°	0.625
- r45°	0.526
- r90°	0.497
Strength Coefficient (K)	0.238 GPa
Strain-Hardening Exponent (n)	0.132

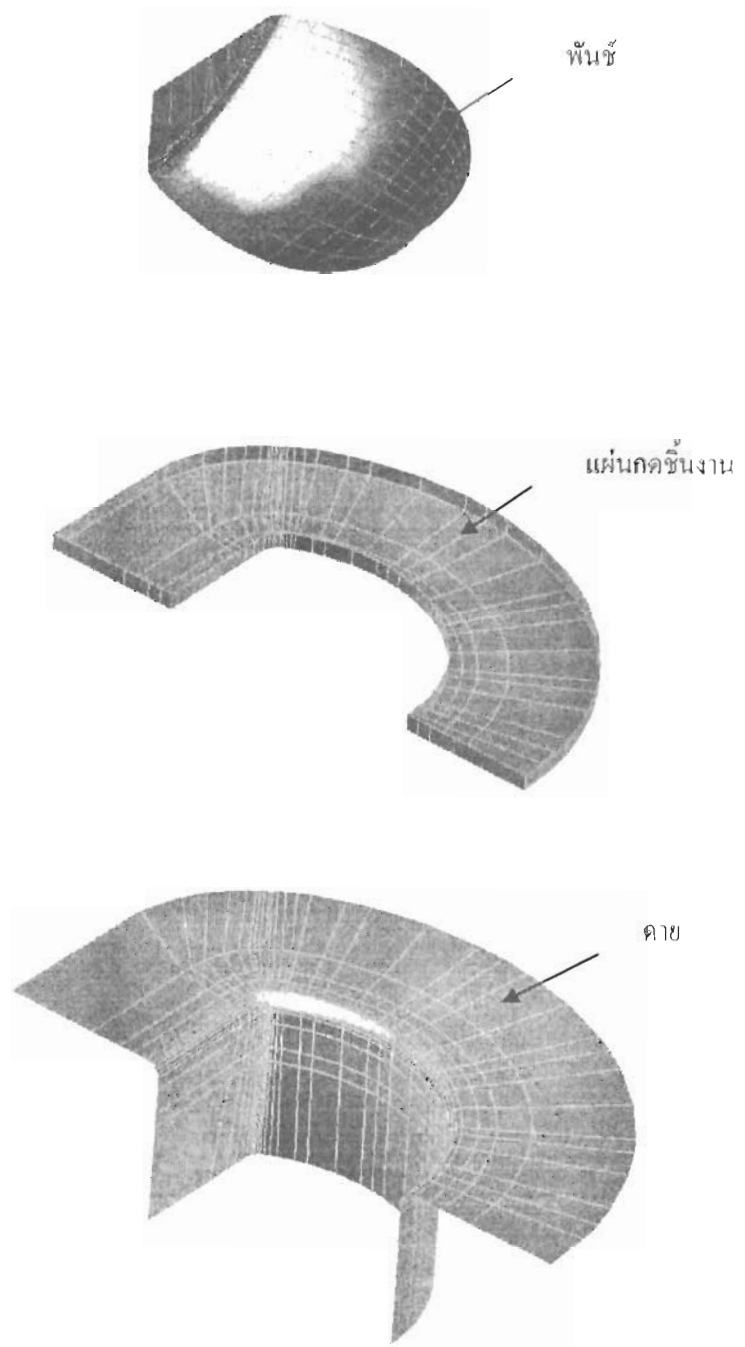
ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง



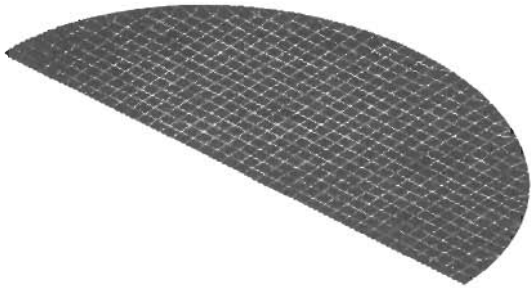
รูปที่ 4 ชุดแม่พิมพ์และชิ้นงานจำลองในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5 แบบจำลองแม่พิมพ์ คาย และพื้นซ์ แบบ CAD ไฟล์



รูปที่ 6 โครงสร้างช่วยเอลิเมนต์ในแบบจำลองชุดแม่พิมพ์



รูปที่ 7 แผ่นขึ้นงานเริ่มต้นถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ก่อนทำการขึ้นรูป

ทำการจำลองการขึ้นรูปเพื่อเลือกใช้ความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ของขึ้นงานที่ 565 เอลิเมนต์ และใช้ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 1 เมตร/วินาที และ 0.07 เมตร/วินาที เพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วจริงที่ได้จากการขึ้นรูปจริง จากที่วัดได้จากเครื่องบีบไฮโดรลิกที่โรงงานเท่ากับ 0.07 เมตร/วินาที โดยการเปรียบเทียบความหนาที่ผนังขึ้นงานจนถึงกันถ้วยตามตำแหน่งต่างๆ ทั้งขึ้นงาน จากการจำลองการขึ้นรูปและขึ้นงานจากการขึ้นรูปจริงที่ระยะ 6, 12 และ 20 มิลลิเมตร โดยทำการวัดจากด้านบนของปีกขึ้นงานลงมาตามที่ผนังขึ้นงาน โดยแทนด้วยตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปด้านข้างขึ้นงานแสดงระยะตรวจสอบขึ้นงาน

โดยการเปรียบเทียบความหนาขึ้นงาน ได้ค่าตามตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าความหนาแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบความหนาที่วัดได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานจริง ซึ่งสามารถเลือกใช้ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 0.07 เมตร/วินาที หรือ 1 เมตร/วินาที ก็ได้ แต่ในการทดลองนี้ เลือกใช้ความเร็วที่ 1 เมตร/วินาที เพราะใช้เวลาในการคำนวณของโปรแกรมน้อยกว่า

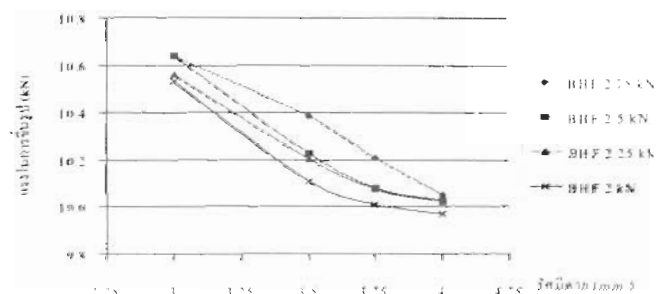
ตำแหน่งวัด ความหนา	ความ หนา ชั้นงาน จากการ ขึ้นรูปจริง (มม.)	ความหนาชั้นงานจาก การจำลองขึ้นรูป (มม.)		ผลต่างความหนา (%) เทียบกับชั้นงานจริง		เวลาที่ใช้คำนวณใน การจำลองการขึ้นรูป	
		1 เมตร / วินาที	0.07 เมตร / วินาที	1 เมตร / วินาที	0.07 เมตร / วินาที	1 เมตร / วินาที	0.07 เมตร / วินาที
ตำแหน่งที่ 1	0.712	0.735	0.743	3.12	4.17	0:40:48 ชั่วโมง	6:40:32 ชั่วโมง
ตำแหน่งที่ 2	0.822	0.872	0.877	5.73	6.27		
ตำแหน่งที่ 3	0.622	0.701	0.707	5.56	6.36		

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการขึ้นรูปกับชั้นงานจากการทดลองจริงที่ความเร็วต่างกัน

ผลการทดลองและวิจารณ์

อิทธิพลของรัศมีด้ายที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูป

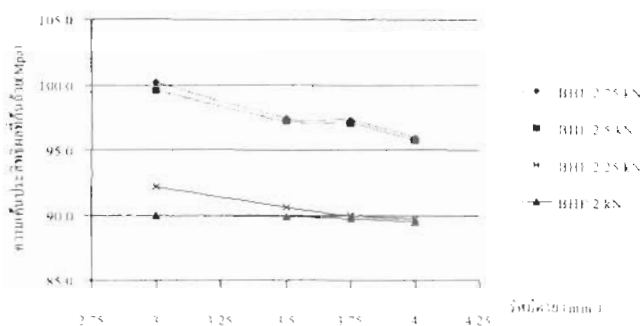
ผลจากการจำลองการลากขึ้นรูป ด้วยรัศมีด้าย 3, 3.5, 3.75 และ 4 มม. ที่แรงกดแผ่นชั้นงานที่มีขนาดต่างกันที่ 2, 2.25, 2.5 และ 2.75 kN ในรูปที่ 9 พบว่าแรงในการขึ้นรูปจะลดลง เมื่อรัศมีด้ายเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากรัศมีด้ายที่มีขนาดเล็กต้องใช้แรงดึงสูงในการพาชั้นงานไหลเข้าไปในด้ายทำให้แรงในการขึ้นรูปสูง แต่เมื่อรัศมีด้ายมีขนาดเพิ่มขึ้นแรงในการดึงดอาก็จะลดลงทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลงด้วย ซึ่งจากแรงในการขึ้นรูปลดลงนี้บริเวณมุมกันด้วยและผนังชั้นงานก็จะมีแรงดึงลดลงด้วย ทำให้การฉีกขาดของชั้นงานมีโอกาสลดลง (Pearce, 1991)



รูปที่ 9 กราฟแสดงรัศมีด้ายขนาดต่างๆ ที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูปของชั้นงาน

อิทธิพลรัศมีด้ายที่มีผลต่อการฉีกขาดที่ก้นถ้วยชิ้นงาน

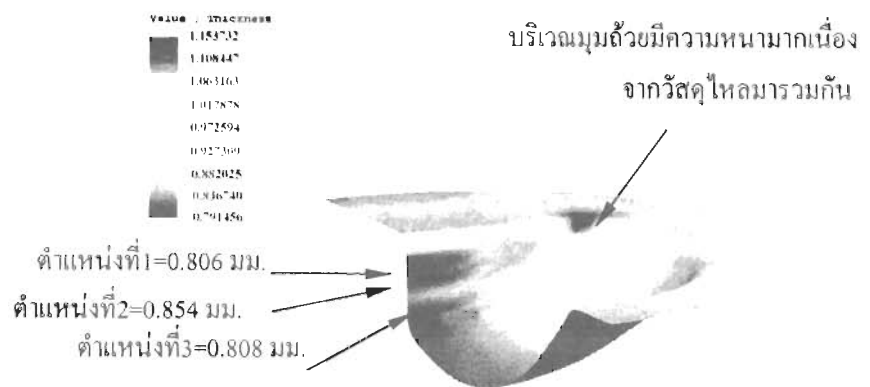
ผนังของชิ้นงานจะเกิดแรงดึงสูงบริเวณที่อยู่ใกล้กับรัศมีของพันธ์ คือบริเวณมุมก้นถ้วย และความหนาชิ้นงานจะมีขนาดบาง ชิ้นงานมีการไหลตัวที่ไม่สะดวกในขณะที่ทำการขึ้นรูป เนื่องจากรัศมีด้ายที่มีขนาดเล็กการไหลตัวของวัสดุเป็นไปได้ยากกว่ารัศมีด้ายที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งจะทำให้บริเวณก้นถ้วยเกิดความเสียหายฉีกขาดได้ (Pearce, 1991) ที่ก้นถ้วยชิ้นงานจะพบความเค้นประสิทธิผล (Effectiveness Stress) สูงมากที่รัศมีด้ายเท่ากับ 3 มม. และความเค้นประสิทธิผลจะลดลงเมื่อรัศมีด้ายเพิ่มขึ้นที่ 3.5, 3.75 และ 4 มม. เมื่อแรงกดแผ่นชิ้นงานมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงรัศมีด้ายขนาดต่างๆ และแรงกดแผ่นชิ้นงาน ที่ทำให้ความเค้นที่ก้นถ้วยลดลง

อิทธิพลรัศมีด้ายที่มีผลต่อความหนาชิ้นงาน

ตำแหน่งวัดความหนาที่ 1, 2 และ 3 ที่รัศมีด้ายเท่ากับ 3, 3.5, 3.75 และ 4 มม. โดยมีขนาดแรงกดแผ่นชิ้นงานเท่ากัน ความหนาบบริเวณมุมก้นถ้วยและผนังจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อรัศมีด้ายเพิ่มขึ้นจาก 3 มม. ไปถึง 4 มม. จากผลการทดลองตำแหน่งที่ 1 และ 3 มีความหนาลดลงมากกว่าตำแหน่งที่ 2 เป็นผลมาจากรูปร่างของชิ้นงานมีผนังถ้วยด้านแบนและผนังถ้วยด้านกลมในชิ้นเดียวกัน บริเวณมุมถ้วยเกิดความเค้นอัดสูงเนื่องจากเนื้อวัสดุไหลจากปีกชิ้นงานเข้ามารวมกัน และยังต้านทานการไหลตัวของวัสดุที่ผนังด้านแบนด้วย เมื่อระยะขึ้นรูปลึกลง (Marciniak and Duncan, 1992) จึงทำให้ผนังถ้วยด้านแบนมีความหนาลดลงในตำแหน่งที่ 1 และ ตำแหน่งที่ 3 มากกว่าตำแหน่งที่ 2 ดังในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความหนาขึ้นงานที่รัศมีตาย 3.5 มม., รัศมีพื้นซ์ 4.5 มม. และแรงกดแผ่นขึ้นงาน 2 kN

อิทธิพลแรงกดแผ่นขึ้นงานที่มีผลต่อความหนาขึ้นงาน

บริเวณปีกขึ้นงานมีแรงกดแผ่นขึ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นที่ปีกขึ้นงาน ซึ่งจะเกิดความเค้นอัด และเป็นตัวต้านทานการไหลตัวของขึ้นงานในการขึ้นรูปขึ้นงาน (Marciniak and Duncan, 1992) ในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงความหนาของขึ้นงานที่จำลองการขึ้นรูปจากรูป พบว่าเมื่อแรงกดแผ่นขึ้นงานลดลงการยึดตัวบริเวณผนังขึ้นงานและที่ก้นถ้วยจะลดลงทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น

อิทธิพลแรงกดแผ่นขึ้นงานที่มีผลต่อการเกิดรอยย่นที่ปีกขึ้นงาน

รัศมีตาย 3, 3.5, 3.75 และ 4 มม. แรงกดแผ่นขึ้นงานที่ 2, 2.25, 2.5 และ 2.75 kN ไม่พบรอยย่นที่ปีกขึ้นงาน แต่พบว่าหากใช้แรงกดแผ่นขึ้นงานสูงกว่า 2 kN จะทำให้แรงในการขึ้นรูปสูงตามเนื่องจากการไหลตัวของวัสดุเข้าสู่ตายไหลได้ยากขึ้นจะเกิดความเสียหายที่ผนังและก้นถ้วยของขึ้นงาน เนื่องจากเกิดการต้านทานการไหลตัวของวัสดุแม้ว่ารัศมีตายจะมากขึ้น แต่แรงกดแผ่นขึ้นงานสูงมากวัสดุจึงไหลตัวไม่สะดวกเกิดแรงดึงสูงที่ผนังและก้นถ้วยจึงเกิดการฉีกขาด (Pearce, 1991) ต่างจากแรงกดแผ่นขึ้นงานที่ 2 kN ไม่พบความเสียหายที่ผนังและก้นถ้วยขึ้นงาน สามารถป้องกันการเกิดรอยย่นที่ปีกขึ้นงานได้และไม่ต้านทานการไหลตัวของวัสดุลงสู่ตายทำให้ขึ้นงาน ไม่เกิดความเสียหายที่ผนังและก้นถ้วยขึ้นงาน (Pearce, 1991)

การเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงแม่พิมพ์

ค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ได้จากการทดลองรัศมีตายที่ 3, 3.5, 3.75 และ 4 มม. แรงกดแผ่นขึ้นงานที่ 2.25, 2.5 และ 2.75 kN ค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่าสูงกว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ซึ่งแสดงว่าขึ้นงานยังเกิดความเสียหายแตกที่ก้นถ้วยอยู่ และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นประสิทธิผลที่ได้

จากแบบจำลองที่รัศมีด้ายข้างต้นแรงกดแผ่นชิ้นงาน 2 kN ค่าความเค้นที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความ
 แข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุแสดงว่าชิ้นงานจะไม่เกิดความเสียหายแตกที่กันด้วย แต่ค่าความเค้นที่ได้ยัง
 ใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุอยู่ จึงได้พิจารณาค่าความเค้นไฮโดรสแตติกที่ตำแหน่งกัน
 ด้วยชิ้นงาน พบว่ามีค่าติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุอยู่ภายใต้อิทธิพลของความเค้นอัดวัสดุจึงไม่เกิด
 ความเสียหาย จึงได้ทำการเลือกรัศมีด้ายที่ 3.5 มม. เป็นรัศมีเริ่มต้นในการปรับปรุงแม่พิมพ์ใช้แรงกด
 แผ่นชิ้นงาน 2 kN

สรุป

ผลการทดลองชิ้นรูปชิ้นงานจากการปรับปรุงแม่พิมพ์

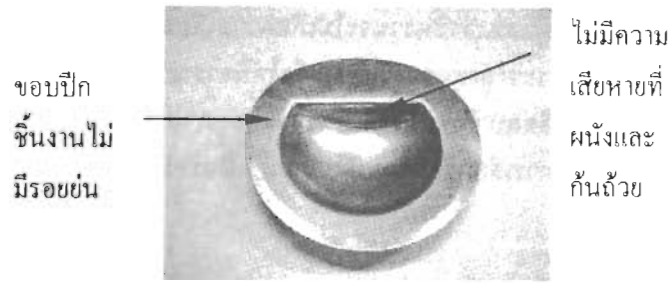
ความหนาชิ้นงานหลังการปรับปรุงแม่พิมพ์แล้ว ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 มีความหนาเพิ่มขึ้น ดัง
 ตารางที่ 3 ความหนาชิ้นงานในตำแหน่งที่ 2 มีความหนาน้อยกว่าชิ้นงานก่อนปรับปรุงชิ้นรูป เนื่องจาก
 วัสดุมีการไหลตัวได้ดีขึ้นเมื่อรัศมีด้ายมีขนาดใหญ่ขึ้นและลดแรงกดแผ่นชิ้นงานลง บริเวณมุมด้วยจะเกิด
 ความเค้นอัดสูงขึ้นเนื่องจากชิ้นงานไหลเข้ามารวมตัวกันมากขึ้น (Wagoner and Chenot, 2001) ใน
 ขณะเดียวกันพื้นที่ก็ยังคงทำการขึ้นรูปชิ้นงานอยู่เมื่อเนื้อวัสดุที่บริเวณมุมด้วยไม่สามารถไหลลงสู่กันด้วย
 ได้ จึงทำให้ความหนาของชิ้นงานในตำแหน่งที่ 2 มีความบางลง จากความเค้นดึงที่ผ่นด้วย

ตำแหน่งวัดความหนา	ชิ้นงานก่อนปรับปรุง (มม.)	ชิ้นงานหลังปรับปรุง (มม.)	ผลต่าง (มม.)
ตำแหน่งที่ 1	0.712	0.820	+0.108
ตำแหน่งที่ 2	0.822	0.790	-0.032
ตำแหน่งที่ 3	0.662	0.862	+0.200

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบความหนาชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุงแม่พิมพ์

ความสมบูรณ์ของชิ้นงาน

สภาพชิ้นงานภายหลังจากการขึ้นรูปแล้วมีสภาพที่สมบูรณ์ไม่พบความเสียหายการแตก หรือฉีก
 ขาดที่ผ่นและกันด้วย ตลอดจนไม่มีรอยย่นที่ปีกชิ้นงานดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 รูปชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปภายหลังจากปรับปรุงแม่พิมพ์

แรงในการขึ้นรูป

แม่พิมพ์ที่ทำการปรับปรุงแล้วให้แรงในการขึ้นรูปเท่ากับ 12.113 kN โดยก่อนปรับปรุงเท่ากับ 13.290 kN ซึ่งลดลง เท่ากับ 8.85 เปอร์เซ็นต์ โดยแรงในการขึ้นรูปที่ลดลงนี้ เป็นผลจากการปรับปรุงรัศมีตายจาก 2.5 มม. เป็น 3.5 มม. และแรงกดแผ่นชิ้นงานจาก 2.75 kN เป็น 2 kN โดยแรงในการขึ้นรูปที่ลดลงนี้เป็นผลจากรัศมีตายที่มีขนาดเพิ่มขึ้นแรงในการดึงอในการขึ้นรูปชิ้นงานก็ลดลง ทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลงและแรงกดแผ่นชิ้นงานก็มีส่วนช่วยให้แรงในการขึ้นรูปลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากแรงกดแผ่นชิ้นงานที่ลดลงทำให้ความเค้นอัดที่กระทำกับปีกชิ้นงานลดลงการต้านทานการไหลตัวของวัสดุจึงไม่มาก ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมากเพื่อลากชิ้นงานเข้ามาในตาย (Wagoner and Chenot, 2001)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท สยามการไฟฟ้า จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ให้นำปัญหาในงานอุตสาหกรรมผลิตจริงมาดำเนินการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งสนับสนุนชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป ตลอดจนเครื่องจักรกลสำหรับขึ้นรูปเพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบ

เอกสารอ้างอิง

- จุลศิริ ศรีงามผ่อง. 2541. วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น. งานเอกสารและการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. หน้า (7.1)-(8.46).
- ธนศ เมฆลาย. 2539. ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ. หน้า 1-35.
- Johnson, W. and Meller, P.B. 1972. *Deep Drawing of a Circular Blank Engineering Plastic*. London: Van Nostrand Reinhold. pp. 293-321.

- Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T. 1989. **Metal Forming and the Finite-Element Method**, Oxford: Oxford University Press.
- Lange, K. 1985. **Handbook of Metal Forming**, New York: McGraw-Hill.
- Marciniak, Z. and Duncan, J.L. 1992. **The Mechanics of Sheet Metal Forming**, London: Edward Arnold.
- Ahmetoglu, M. A., Kinzel, G. and Altan, T. 1997. **Forming of aluminum alloy: application of computer simulation**, Journal of Material Processing Technology. Vol. 71. pp. 147-151.
- Pearce, R. 1991. **Sheet Metal Forming**, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials. Bristol: Hilger.
- Suchy, I. 1997. **Draw Part in Handbook of Die Design**, New York: McGraw-Hill. pp. (9-1)-(9-3).
- Wagoner, R.H. and Chenot, J.-L. 2001. **Metal Forming Analysis**, Cambridge: Cambridge University Press. pp. 286-329.
- Zimniak, Z. 2000. **Problem of multi – step forming sheet metal forming design**, Journal of Material Processing Technology. Vol. 106. pp. 152-158.