

## แนวทางการปรับปรุงการผลิตกระบวนการลากขึ้นรูปลิกซ์งานไส้กรองอากาศ โดยวิธีไฟน์เอลิเมนต์

ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ<sup>1\*</sup>, ชีระ เคนแสงอรุณ<sup>2</sup> และ วัลลภ พัฒนพงศ์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงการผลิตกระบวนการลากขึ้นรูปลิกซ์งานไส้กรองอากาศโดยวิธีไฟน์เอลิเมนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม ความสูง 145 มม ซึ่งทำจากวัสดุเหล็กมาตรฐาน SPCE ความหนา 0.6 มม เดิมที่ขึ้นงานที่ผลิตเกิดความเสียหายแตกและทิ้งเป็นจำนวนมากทำให้มีต้นทุนสูงไม่สามารถแข่งขันในตลาดได้ ดังนั้นการนำเสนอการปรับปรุงการออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสมทั้ง 5 ขั้นตอน โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูป  $\beta=1.5, 1.5, 1.1, 1.8,$  และ  $1.07$  ตามลำดับในการวิเคราะห์กำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปถาวรตามสมการยกกำลังของ Ludwik โดยมีค่า  $K = 320 \text{ N/mm}^2$  และ  $n = 0.085$  คุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง Anisotropy ตามกฎของ Hill Law โดยมีค่า  $r_0=1.87$   $r_{45} = 1.30$  และ  $r_{90} = 2.14$  ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นความสามารถในการลากขึ้นรูปด้วยทรงสูงซึ่งไม่สามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว จำเป็นต้องลดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชิ้นงานให้น้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์แสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานอยู่ในขอบเขตกราฟเกณฑ์การแตกหัก ชิ้นงานมีความหนาน้อยสุด 0.53 มม โดยชิ้นงานไม่แตกและค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดความเสียหายสามารถเปรียบเทียบกับทฤษฎี Gurson(GTN)การวิเคราะห์กระบวนการลากขึ้นรูปลิกซ์งานไส้กรองอากาศเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบขั้นตอนการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน

**คำสำคัญ :** กระบวนการลากขึ้นรูปลิกซ์, วิธีไฟน์เอลิเมนต์, อัตราส่วนการลากขึ้นรูป

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่อง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: trinet2518@hotmail.com รับเมื่อ 20 กรกฎาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 27 สิงหาคม 2555

## Production Improvement Modeling of Deep Drawing Process for Air Filter using Finite Element Method

Trinet Yingsamphancharoen<sup>1\*</sup>, Chira Densangarung<sup>2</sup> and Wallop Pattanapong<sup>1</sup>

### Abstract

The production improvement model in deep drawing process for air filter had used finite element method (FEM) in the analysis to optimize product design. The standard material SPCE thickness of 0.6 mm was used to produce the cup of diameter 102 mm and height 145 mm. High quantities of rejected products were discovered with crack defects, which caused the production to be less competitive in the market. Therefore, the improvement of production design had been considered for designing the suitable processes. New improvement consisted of 5 processes which drawing ratio had been design for  $\beta = 1.5, 1.5, 1.1, 1.8,$  and  $1.07$  respectively. In the analysis, the material properties assumed to behave as elastic-plastic according to power law of Ludwik with  $K = 320 \text{ N/mm}^2$  and  $n = 0.085$ . According to Hill Law, the anisotropy of sheet metal were  $r_0 = 1.87$ ,  $r_{45} = 1.30$  and  $r_{90} = 2.14$ . From the predicted results, the formability of high cup cannot be drawn within a single process. The part size should be reduced with suitable drawing ratio which had decreased the least sheet thickness. The simulation results of strain on parts located within the forming limit diagram (FLD), which the lowest part thickness was 0.53 mm without damage occurred. Thus stress and strain occurred at fracture were comparable to the Gurson Model (GTN). From the analysis of deep drawing process for producing filter, the production processes efficiency and product quality can be improved; in order to increase the capabilities.

**Keywords :** Deep drawing process, Finite Element Method (FEM), Drawing ratio

---

<sup>1</sup> Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

<sup>2</sup> Department of Apply Science, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University.

\* Corresponding author, E-mail: trinet2518@hotmail.com Received 20 July 2012, Accepted 27 August 2012

## 1. บทนำ

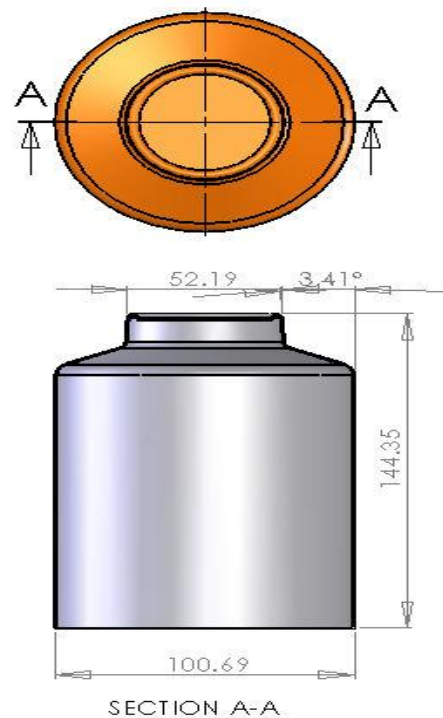
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตไส้กรองอากาศในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ตัวแปรอัตราส่วนการลากขึ้นรูป ผลวิเคราะห์ทำนายค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานแสดงภายใต้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD และสามารถเปรียบเทียบได้กับทฤษฎี Gurson (GTN) กระบวนการลากขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญ ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ ผลิตภัณฑ์ครัวเรือน และ เฟอร์นิเจอร์ ผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันมีรูปทรงซับซ้อนทำให้วิธีการลากขึ้นรูปมีข้อจำกัด ความพยายามในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลวัสดุ เทคนิคการใช้เครื่องมือทันสมัย และการออกแบบกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ

กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะเริ่มต้นผลิตโดยพื้นผิวลากชิ้นงานผ่านด้ายทำให้เกิดแรงดึงในแนวรัศมีและเกิดแรงกดในแนวเส้นรอบวง การเกิดรอยยับบริเวณหน้าแปลนเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลากขึ้นรูปมีค่ามากอัตราส่วนการลากขึ้นรูปคือขนาดอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานกับความหนาเริ่มต้นซึ่งถ้ามีค่ามาก แผ่นกดชิ้นงานต้องใช้แรงกดที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดรอยยับของชิ้นงาน ความเค้นดึงในแนวรัศมีบนหน้าแปลนที่ถูกดึงผ่านผนังของถ้วยโดยพื้นซ์ และความเค้นดึงในแนวรัศมีที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลากขึ้นรูปมีค่ามากช่วยทำให้เอาชนะแรงเสียดทานที่หน้าแปลนและทำให้เกิดการคัดไปมาขึ้นบริเวณรัศมีคายถึงผนังถ้วย อัตราส่วนการลากขึ้นรูปที่สามารถลากขึ้นรูปได้สูงสุดสำหรับวัสดุเหล็กคือ 2.1 หรือ 2.2 โดยการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นซ์ ถ้าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปมีค่ามากจะทำให้ความเค้นในแนวรัศมีและแนวเส้นรอบวงสูงทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ D.H. Park และคณะ[1] ได้ศึกษาการลากขึ้นรูปลึกชิ้นงานด้วยทรงสูงในสามขั้นตอนโดยการเปลี่ยนตัวแปร

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามค่าคือการไม่ใช้สารหล่อลื่น การใช้น้ำมันหล่อลื่น และการใช้แผ่นพลาสติกแสดงให้เห็นว่าการลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานให้น้อยทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ I.Dejmal และคณะ[2] ศึกษาการใช้รัศมีคายเพื่อลดแรงเสียดทานและแรงในการลากขึ้นรูปด้วยอลูมิเนียมและทองแดงโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีอิทธิพลมากในการลากขึ้นรูปให้สำเร็จ ส่วนความหนาของชิ้นงานและรัศมีพื้นซ์มีผลกระทบต่อมาก

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไส้กรองอากาศแสดงในรูปที่ 1 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ออดิฟอร์มวิเคราะห์ผลโดยการแบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยๆ วัสดุที่ใช้ผลิตคือเหล็กตามมาตรฐาน SPCE มีความหนา 0.6 มม ใช้ผลิตด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม ความสูง 145 มม.

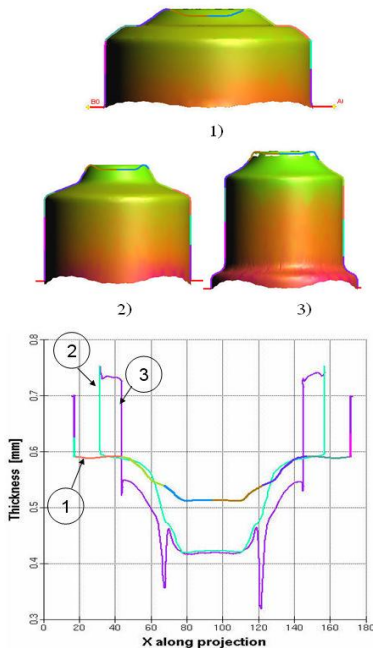


รูปที่ 1 รูปภาพขนาดไส้กรองอากาศ

สมมุติให้คุณสมบัติของวัสดุที่วิเคราะห์มีพฤติกรรมยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปถาวรตามสมการยกกำลังของ Ludwik [3] โดยมีค่า Young's Modulus  $E = 210 \text{ GPa}$ , Poisson's ratio  $\nu = 0.3$ , Strength Coefficient  $K = 320 \text{ N/mm}^2$  และ Strain Hardening Coefficient  $n = 0.085$  วัสดุมีคุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง Anisotropy ตามสมการ Hill Law[3] โดย  $r_0 = 1.87$   $r_{45} = 1.30$  และ  $r_{90} = 2.14$  ซึ่งหาได้จากการทดสอบดึงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกำหนดให้มีค่า 0.15 และแรงดันเพื่อกดชิ้นงานมีค่าที่  $2.5 \text{ N/mm}^2$  บริเวณหน้าแปลนของคาน

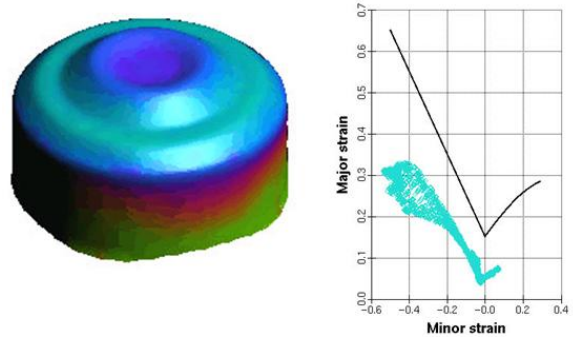
**3. ผลวิเคราะห์และวิจารณ์**

การกำหนดค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเป็นปัจจัยสำคัญในความสำเร็จการลากขึ้นรูป เดิมผู้ผลิตใช้ค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปคือ 1.63 1.23 และ 1.23 ตามลำดับแสดงในรูปที่ 2 ในลักษณะนี้การขึ้นรูปในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ทำให้ชิ้นงานเกิดความหนาลดลงมากดังแสดงในกราฟรูปที่ 2 ซึ่งมีความหนา 0.33 มม. ในขั้นตอนสุดท้ายทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย



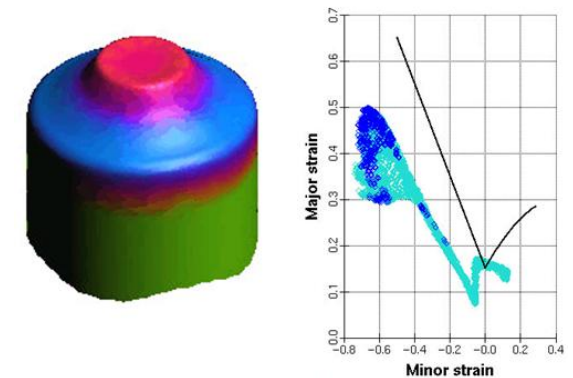
รูปที่ 2 การลากขึ้นรูป 3 ขั้นตอนแบบเดิมและกราฟความหนาชิ้นงานด้านหน้าตัด[4]

ความหนาของชิ้นงานคือหนึ่งในลักษณะสำคัญซึ่งบอถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาไม่เท่ากัน โดยส่วนมากมีความหนาที่ก้นถ้วยสม่ำเสมอ และมีความหนาลดลงที่บริเวณมุมรัศมีของถ้วยและผนังของถ้วยตามลำดับ การเกิดความหนาเปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการผลิตทำให้เกิดความเค้นสะสมขึ้นที่ชิ้นงานเป็นการเร่งการเกิดความเสียหาย สมควรกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง[5] ลักษณะการเกิดความเครียดสามารถสังเกตได้จากกราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD



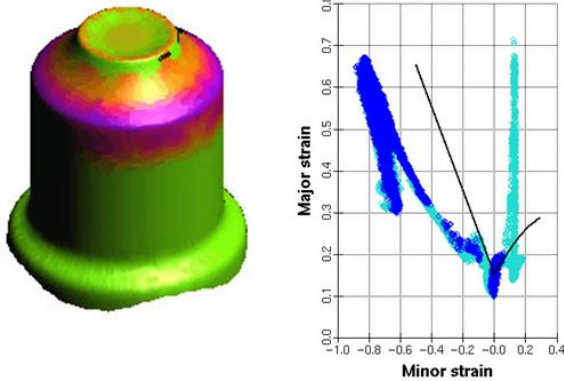
รูปที่ 3 FLD ขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 1 แบบเดิม

ในขั้นตอนที่หนึ่งเป็นการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 253 มม เป็นถ้วยขนาด 156 มม ซึ่งเกิดความเครียดบริเวณผิวบนถ้วยน้อยและอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยได้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 FLD ขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 2 แบบเดิม

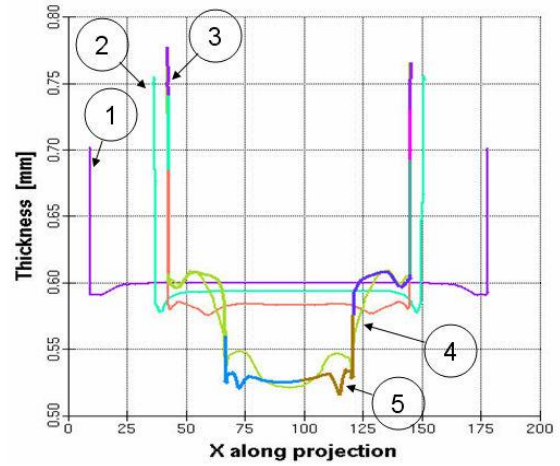
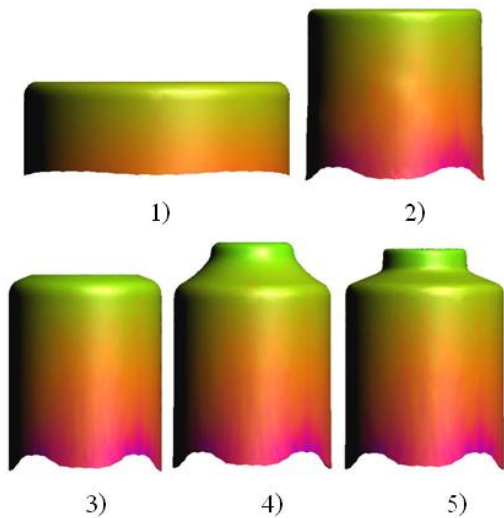
ในขั้นตอนที่สองทำการขึ้นรูปเพื่อลดขนาดด้วยลงเป็น 126 มม ทำให้เกิดความเครียดสูงขึ้นบริเวณผิวด้านบนซึ่งเกินกราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 5 FLD ขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 3 แบบเดิม

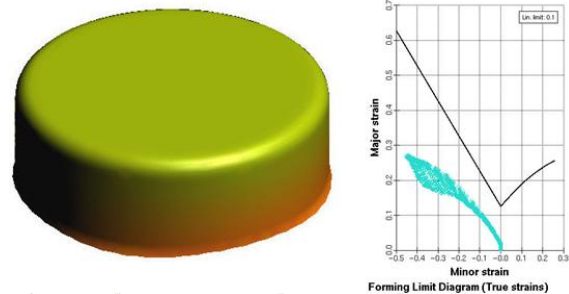
ในขั้นตอนที่สามของการลากขึ้นรูปด้วยขนาด 102 มม แสดงให้เห็นความเครียดเกิดขึ้นสูงบริเวณผิวด้านบนเกินกราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ซึ่งเกิดความเสียหายขึ้นแสดงในรูปที่ 5

ในการปรับปรุงกระบวนการออกแบบเพื่อผลิตไส้กรองอากาศโดยการกำหนดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป  $\beta = 1.5, 1.5, 1.1, 1.8$  และ  $1.07$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นการค่อยๆลดความหนาของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 6 โดยความหนามีค่าน้อยสุดคือ 0.53 มม



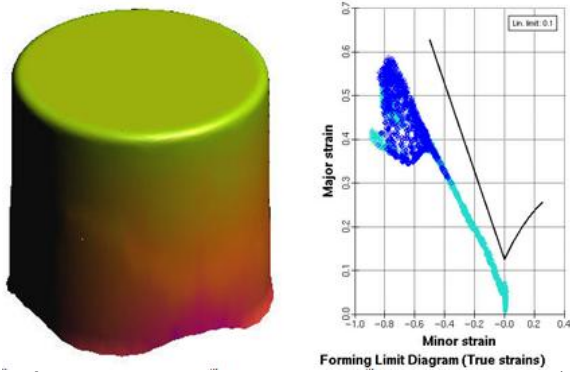
รูปที่ 6 รูปภาพหน้าตัดของชิ้นงานที่ปรับปรุงการผลิตใน 5 ขั้นตอน

ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปครั้งที่หนึ่ง โดยเริ่มจากแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 253 มม ลากขึ้นรูปเป็นถ้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 168 มม ซึ่งทำให้เกิดความเครียดน้อยบนผิวชิ้นงานซึ่งอยู่ใต้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 7



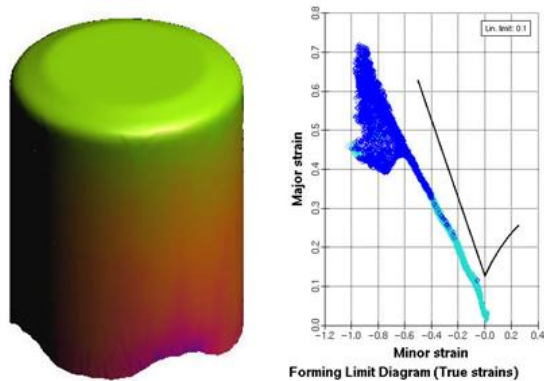
รูปที่ 7 กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ในขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 1

ในขั้นตอนที่สองปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการลากขึ้นรูปด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 168 มม เป็นถ้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 112 มม ซึ่งทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นที่ละน้อยบนผิวของชิ้นงานซึ่งอยู่ใต้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 8



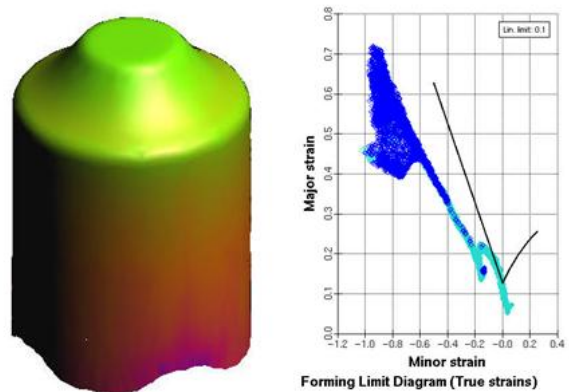
รูปที่ 8 กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ในขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 2

ในขั้นตอนที่สามปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการลากขึ้นรูปด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 112 มม เป็นด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม ซึ่งทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นที่ละน้อยบนผิวบนชิ้นงานซึ่งอยู่ใต้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 9



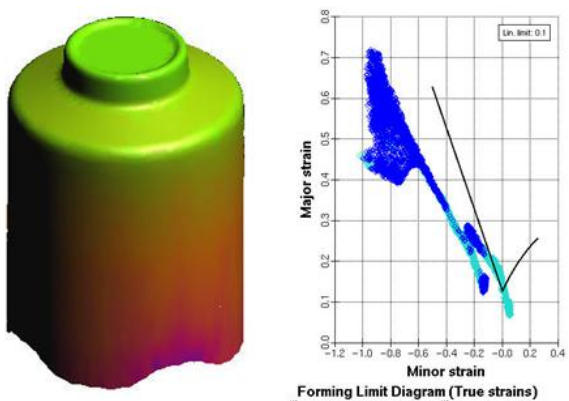
รูปที่ 9 กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ในขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 3

ในขั้นตอนที่สี่ปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการลากขึ้นรูปฝาดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม เป็นด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มม ซึ่งทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นที่ละน้อยบนผิวบนชิ้นงานซึ่งอยู่ใต้กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ในขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 4

ในขั้นตอนสุดท้ายที่ห้าของการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการลากขึ้นรูปฝาดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มม เป็นด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม ซึ่งทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นบนผิวชิ้นงานซึ่งอยู่บริเวณกราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ดังแสดงในรูปที่ 11 และได้ชิ้นงานได้ทรงอากาศสมบูรณ์แบบ ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเท่ากับ 0.15 ซึ่งเปรียบเทียบได้กับน้ำมันมะพร้าว ถ้าสามารถลดความเสียหายลงได้เช่นการใช้แผ่นพลาสติกจะทำให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนลดลงและอยู่ในบริเวณกราฟเกณฑ์การแตกหัก

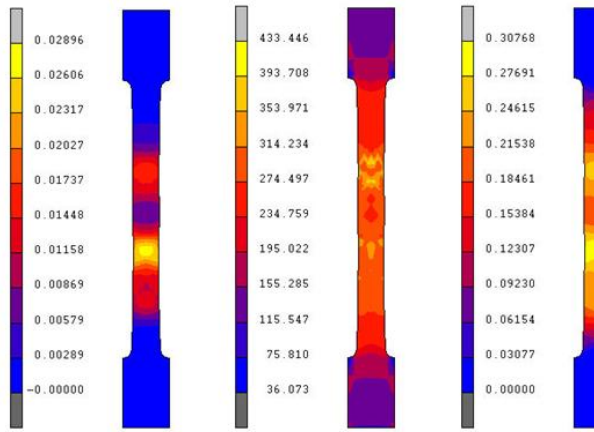


รูปที่ 11 กราฟเกณฑ์การแตกหัก FLD ในขั้นตอนการลากขึ้นรูปที่ 5

การทำนายการเกิดความเสียหายของชิ้นงานโลหะแผ่นเช่นเดียวกับลักษณะเดียวกันที่สามารถทำนายโดยทฤษฎี

Gurson Model, GTN ซึ่งพิจารณาตัวแปรดังนี้  $q_1=1.5, q_2=1, f_{initial}=0, f_{critical}=0.15, f_{failure}=0.25, \text{mean strain nucleation}=0.3, \text{standard deviation}=0.1, \text{and } f_{nucleation}=0.04$  [6]

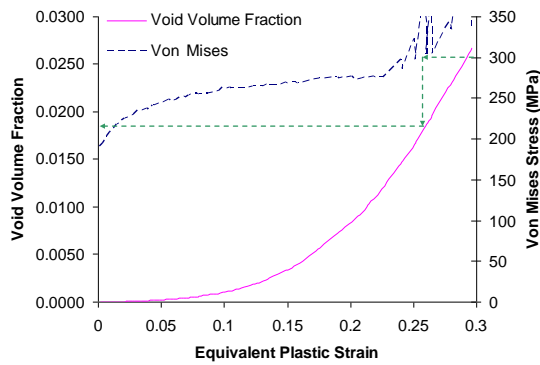
เสียหายขึ้น ค่าความเครียดเมื่อชิ้นงานเกิดความเสียหายจะมีค่าอัตราส่วนการเกิดโพรงเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤตจากสมการ GTN ซึ่งบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุดอยู่ที่มุมของฝาถ้วยได้กรองอากาศแสดงในภาพหน้าตัดรูปที่ 13



ก) Void Volume Fraction = 0.01855

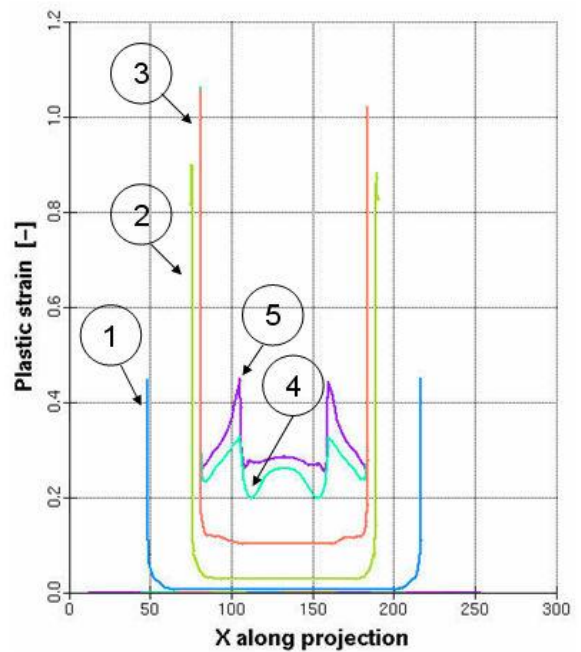
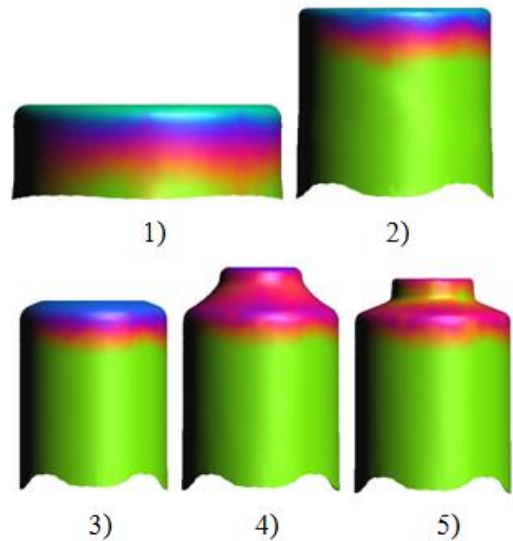
ข) Von Mises Stress = 300 MPa

ค) Equivalent Plastic Strain = 0.26 [7]



รูปที่ 12 รูปภาพแสดงเจดสีชิ้นงานทดสอบดัง ก) Void Volume Fraction = 0.01855 เมื่อ ข) ความเค้น Mises Stress = 300 MPa และความเครียด ค) Equivalent Plastic Strain = 0.26 ง) เปรียบเทียบกราฟของการเริ่มเกิดโพรง

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปโดยการจำลองการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 12 เมื่อค่าความเค้น Von Mises Stress มีค่า 300 MPa, ค่าความเครียดประสิทธิผล equivalent plastic strain 0.26 และอัตราส่วนการเกิดโพรงมีค่าวิกฤต void volume fraction 0.01855 ซึ่งทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดความ



รูปที่ 13 รูปชิ้นงานและกราฟความเครียดภาพหน้าตัดได้กรองอากาศ

## 5. สรุปผลวิจัย

ผลการวิเคราะห์การลากขึ้นรูปลึกหลายชั้นตอน โดยการทำนายสถานะการเกิดความเสียหายและเกณฑ์การลากขึ้นรูปของชิ้นงานใส่กรอบอากาศสำหรับแนวพื้นที่ซึ่งมักจะเกิดความเครียดในบริเวณที่สำคัญ เมื่อวัสดุเปลี่ยนรูปอย่างต่อเนื่องจนถึงการเกิดคอคอดซึ่งทำให้ความหนาของชิ้นงานลดลงและเกิดความเสียหายในที่สุด การออกแบบขั้นตอนการลากขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปที่เหมาะสมจากเดิม  $\beta = 1.63$  1.23 และ 1.23 เปลี่ยนเป็น 1.5 1.5 1.1 1.8 และ 1.07 ตามลำดับซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่ต่อเนื่องสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดความเสียหายการวิเคราะห์การเกิดความเสียหายของชิ้นงานโลหะแผ่นสามารถทำนายผลโดยทฤษฎี Gurson ในลักษณะเดียวกันเมื่อชิ้นงานทดสอบถูกดึงในขณะที่ยังมีความเค้น Von Mises มีค่า 300 MPa, ค่าความเครียดประสิทธิผลจะมีค่า 0.26 และอัตราส่วนการเกิดโพรงมีค่าวิกฤต 0.01855 ซึ่งทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดโพรงขนาดเล็กขึ้นดังนั้นผลจากการวิเคราะห์การขึ้นรูปใส่กรอบอากาศสามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตชิ้นงาน

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.H. Park, Y.M. Huh, S.S. Kang, "Study on Punch Load of Non-Axisymmetric Deep Drawing Product According to Blank Shape", Journal of Material Processing Technology 130-131, 2002, pp.89-94.
- [2] I. Dejmál, J. Tirosh, A. Shirizly, L. Rubinsky, "On the Optimal Die Curvature in Deep Drawing Process", International Journal of Mechanical Sciences 44, 2002, pp. 1245-1258.
- [3] K. Lange, "Hand Book of Metal Forming, McGraw-Hill", New York, 1985, pp.(20.1)-(20.63).
- [4] Auto Form, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, KMUTT, Bangkok, Thailand
- [5] S. Raju, G. Ganesan, R. Karthikeyan, "Influence of Variables in Deep Drawing of AA6061 Sheet", Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20, 2010, pp. 1856-1862.
- [6] M. Rachik., J.M.Roelandt, A.Maillard, "Some Phenomenological and Computational Aspects of Sheet Metal Blanking Simulation", Journal of Materials Processing Technology, 2002, pp. 256-265.
- [7] MSC. Marc, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, KMUTT, Bangkok, Thailand