

## การเปรียบเทียบความหยาบผิวของดรอร์บีตในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

### Comparison of surface roughness of drawbead on non symmetry deep drawing of sheet metal by using finite element simulation

กฤติธรณ์ นามสง่า, ชัยยะ ประณีตพลกรัง, กุลชาติ จุลเพ็ญ, ศิริชัย ต่อสกุล\*

Kittitorn Namsanga, Chaiya Praneetpongung, Kunlachart Junlapen, Sirichai Torsakul\*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

\*Corresponding author: sirichai.to@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ทำการทดลองโดยใช้ดรอร์บีตที่มีความหยาบผิวต่างกัน และทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลองนี้ใช้ดรอร์บีตที่มีรูปร่าง ครึ่งวงกลม โดยกำหนดความหยาบผิว 3 ระดับ คือ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเหล็กรีดเย็นเกรด SPCD (JIS) โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขแรงกดชิ้นงาน 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงที่ได้จากการคำนวณ ผลการทดลองพบว่าความหยาบผิวของดรอร์บีตมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงาน ดรอร์บีตที่มีความหยาบผิวมากส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่นได้มาก ขณะที่ดรอร์บีตที่มีความหยาบผิวน้อย เกิดรอยย่นน้อยที่สุด และไม่เกิดการฉีกขาด การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองจริง แสดงถึงพฤติกรรมการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตร ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์สอดคล้องกัน สามารถแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดการฉีกขาด และรอยย่นของชิ้นงานในการลากขึ้นรูปได้ การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายและหาแนวทางแก้ไขการไหลตัวของชิ้นงานในการลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** ความหยาบผิว, ดรอร์บีต, การลากขึ้นรูป, การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.

#### Abstract

This research aims to study the flow of sheet metal in non symmetry shape deep drawing process. The experiment used different surface roughness of drawbeads and then they were simulated by finite element method. The shape of drawbeads is semicircle with 3 levels of surface roughness--0.152 Ra, 0.963 Ra and 6.127 Ra. The material used was cold rolled steel SPCD (JIS) which was under the condition of using 50 percent of blank holder force from calculation. The results show that the surface roughness of drawbeads effect the flow of sheet metal. Drawbeads with high surface roughness results in increase of tare and wrinkle on workpiece. While those with low surface roughness results in no tare and less wrinkle. Finite element simulation and experiment show a coherent result in the behavior of non symmetry shape deep drawing process. Additionally, finite element simulation can show the area with tare and wrinkle of workpiece. The adaptation of finite element can effectively predict and provide a way to fix the flow of deep drawing process.

**Keywords:** surface roughness, drawbead, deep drawing, finite element simulation

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งทางด้านการตลาด และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีทางการออกแบบแม่พิมพ์ได้เข้ามามีบทบาทในการเพิ่มผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านยานพาหนะ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน หรืออุตสาหกรรมด้านอื่นๆ และแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นส่วนมีความจำเป็นอย่างมาก ต่อการผลิตชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตให้สูงขึ้น

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม มีกระบวนการหรือวิธีในการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน การลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงมีขีดจำกัดอยู่มากในการลากขึ้นรูป ไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการขึ้นรูปสมบัติด้านแอนไอโซทรอปี (anisotropic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียดทานและแรงกดชิ้นงาน โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรเนื่องจากมีอัตราการไหลตัวของวัสดุที่ไม่เท่ากัน จากขีดจำกัดดังกล่าวอาจทำให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานได้ เช่น รอยย่น (Wrinkling) ของชิ้นงาน การเกิดรอยย่นมีผลมาจากโลหะแผ่นไหลตัวไม่สม่ำเสมอหรือ การเกิดการฉีกขาด (Tearing) ซึ่งเกิดมาจากโลหะไหลเข้าแม่พิมพ์มากเกินไป

ได้มีการนำเอาดรอร์บีต (Drawbead) มาใช้เพื่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่น [1] โดยดรอร์บีตจะถูกติดตั้งอยู่ที่แผ่นกดชิ้นงาน ขณะที่มีการลากขึ้นรูปวัสดุจะไหลผ่านดรอร์บีตภายในดรอร์บีตวัสดุจะเกิดการดัดให้ไหลไปในทิศทางหนึ่งและถูกดัดกลับมาในทิศทางตรงกันข้ามก่อนที่จะไหลดัดกลับไปยังทิศทางเดิมจึงทำให้มีการชะลอการไหลของวัสดุไม่ให้ไหลเร็วเกินไป [2,3] อันเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่นก่อนไหลเข้าแม่พิมพ์

แรงเสียดทานถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูป [4] การไหลตัวของแผ่นโลหะเพื่อเข้าแม่พิมพ์ต้องผ่านการสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นกดชิ้นงาน แม่พิมพ์ และดรอร์บีต ความหยาบผิวแต่ละพื้นผิวส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน [5-8] Padmanabhan, R. และคณะ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูป พบว่าร้อยละของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน มากกว่าแรงกดจากแผ่นกดชิ้นงาน

การจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูป เพื่อช่วยในการแก้ไข

ข้อบกพร่องบนชิ้นงานหลังการขึ้นรูป และลดเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์ [10] Meiders, T. [11] ได้ศึกษาการจำลองการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดแรงในการควบคุมการไหลตัวของแผ่นโลหะ (Drawbead Restraining Force) การเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติก และแรงยกดรอร์บีต (Drawbead Lift Force) พบว่าการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแบบพลาสติกของชิ้นงาน Samuel, M. [12] ได้ศึกษารูปทรงของดรอร์บีตในการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบรูปทรงของดรอร์บีตระหว่างร่องบีตที่เป็นแบบครึ่งวงกลมกับร่องบีตที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม และวิเคราะห์ความแตกต่างของการไหลตัวของวัสดุในการใช้ร่องบีตทั้งสองชนิด Ma, W.Y. และคณะ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการลากขึ้นรูปวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยเกรด AA6111 ที่สถานะอุณหภูมิสูง โดยใช้การจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ Trzepieciniski, T. และ Lemu, H.G. [13] ได้ทำการศึกษาแรงเสียดทานจากความหยาบผิวของโลหะแผ่นที่แตกต่างกันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีต เพื่อหาผลกระทบต่อสมบัติด้านไอโซทรอปี (Isotropic) และ แอนไอโซทรอปี (anisotropic) ในการลากขึ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีต Zhang, S. และ คณะ [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมแรงเสียดทานในการลากขึ้นรูป โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความหยาบผิวของโลหะแผ่นลดลงระหว่างการไหลตัว และแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามความหยาบที่เพิ่มขึ้นของผิวสัมผัส Hol J. และคณะ [14] ได้สร้างแบบการจำลองแรงเสียดทานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพัฒนารูปแบบของแรงเสียดทานจากความแตกต่างของพื้นผิวสำหรับการนำไปใช้ในการจำลองการลากขึ้นรูปชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลวิเคราะห์ที่มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้จำนวนการแบ่งชิ้นงาน (Element) เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะตรงบริเวณรัศมีดรอร์บีต ทำให้ต้องใช้เวลามากและเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูง ยังมีจำนวนชิ้นงานที่มีความละเอียดมากเท่าใด ย่อมหมายถึงว่าต้องใช้เวลาและประสิทธิภาพของเครื่องมากเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงต้องกำหนดรูปทรงดรอร์บีตให้มีความเหมาะสมและมีการควบคุมการไหลของชิ้นงานให้คงที่ ซึ่งจะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเครียด (Strain) และความหนาของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

จากความสำคัญและข้อมูลต่างๆ ที่ได้กล่าวถึง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลความหยาบผิวของดรอร์บีตที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดจากการไหลตัวของชิ้นงาน ที่เป็นผลให้เกิดรอยย่น ความเครียดตกค้าง เกิดการฉีก ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาในการทดลองแม่พิมพ์ ลดของเสียที่เป็นต้นทุนจากการทดลองแม่พิมพ์ เพื่อการผลิตจริงต่อไป

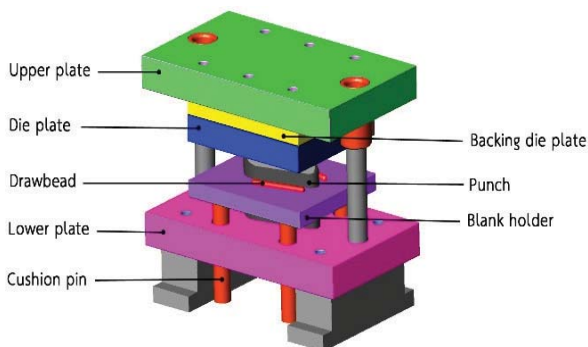
## 2. วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความหนา และการตรวจสอบทางกายภาพ ส่วนที่สองเป็นการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองจริงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.1 เครื่องมือสำหรับการทดลอง

#### 2.1.1 แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตร

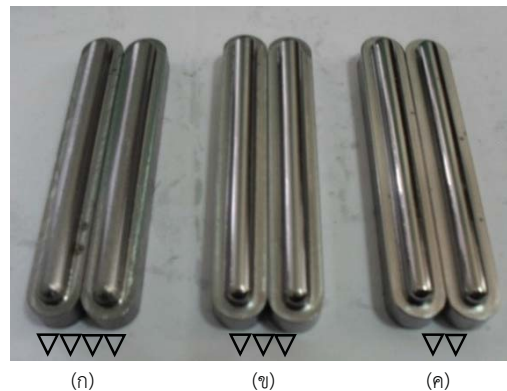
แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรนั้น แสดงรายละเอียดและส่วนประกอบดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานของแม่พิมพ์ดังนี้ แผ่นรองแม่พิมพ์บน (Upper plate) จะยึดกับแผ่นรองตายัน (Backing die plate) และแผ่นตายัน (Die plate) มีชุดนำการบีบ (Guide post) เป็นชุดนำเพื่อความเที่ยงตรงในการบีบชิ้นลง แผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) มีหน้าที่ในการกดยึดชิ้นงานโดยส่งถ่ายแรงจากคูกั้นชิ้น (Cushion pin) ขณะที่พินซ์ (Punch) จะประกบกับ ชุดล่าง (Lower plate) เพื่อยึดกับแท่นวางแม่พิมพ์ (Table)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร

#### 2.1.2 ดรอร์บีต

ดรอร์บีตที่ใช้ในการทดลองมีรูปทรงหน้าตัดครึ่งวงกลม (Half-Round Drawbead) ซึ่งเป็นรูปทรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับดรอร์บีตหน้าตัดสามเหลี่ยม (V-Shaped Drawbead) และ ดรอร์บีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Trapenziform Drawbead) โดยรับการยืนยันจากการศึกษาของ Karnchanaseangthong, T. และคณะ [15] ดรอร์บีตที่ใช้มีขนาดรัศมีส่วนโค้ง 4 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และมีความสูงของดรอร์บีต 8 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 โดยกำหนดสภาพผิวจากการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดออกเป็น 3 แบบ คือ ผิวหยาบที่มองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า ผิวละเอียดปานกลางที่พอมองเห็นได้บ้างแต่ไม่ชัดเจน และผิวละเอียดจะมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ซึ่งมีค่าความหยาบผิวดังนี้ 0.152 Ra, 0.963 Ra และ 6.127 Ra ดังรูปที่ 2

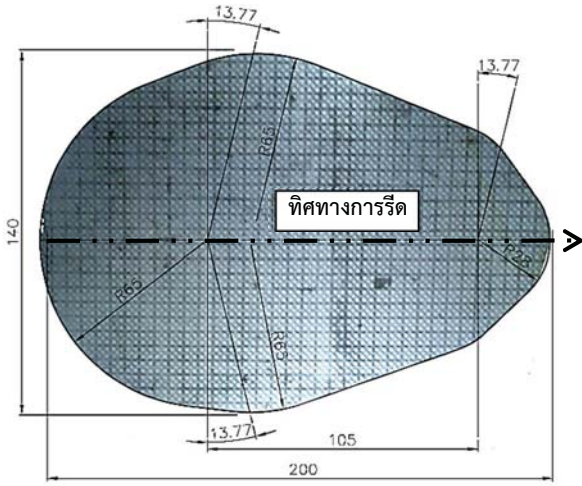


รูปที่ 2 ดรอร์บีตหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra , (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

#### 2.1.3 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดเย็น (low carbon steel) SPCD ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบเย็น ส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จากการทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อหาอัตราส่วนความเครียดพลาสติก  $r$  (Anisotropy) และ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent,  $n$ -value) ของแผ่นเหล็กที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร ตามวิธีการของ ASTM E517 [16] และ ASTM E 646-91 [17] ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

การเตรียมแผ่นชิ้นงานโดยการตัดแผ่นงานตามแนวรีด ที่มีขนาด 220 x 160 มิลลิเมตร ประมาณค่าจากการ pre-test ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปร่างของแผ่นเหล็ก SPCD ที่ใช้ในการขึ้นรูป

## 2.2 การทดลองลากขึ้นรูป

นำแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรติดตั้งบนเครื่องบีบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic press) ขนาด 80 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยใช้ดรรชนีวัดที่ความหยาบผิวต่างกัน กำหนด

ความเร็วในการขึ้นรูป (Die Velocity) 10 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงในการกดขึ้นงาน (blank holder force) 50 เปอร์เซ็นต์ (52 kN) ของแรงขึ้นรูปที่ได้จากการคำนวณ และมีระยะในการลากขึ้นรูป 50 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นในการทดลองลากขึ้นรูปทุกตัวแปร



รูปที่ 4 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องบีบไฮดรอลิกส์ 80 ตัน

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCD

Material	Strength Coefficient ( $K$ )	Strength Hardening ( $n$ )	Anisotropy Coefficients			
			$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$	$\bar{R}$
SPCD	317	0.15	.1301	.1365	468.1	1.378

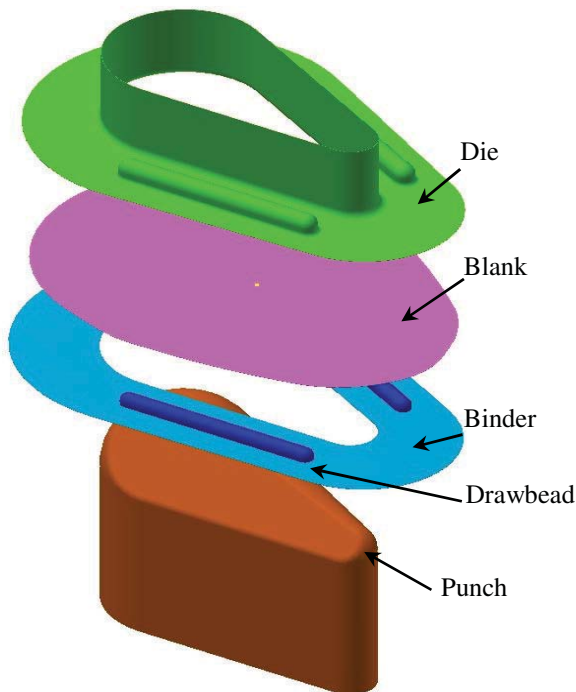
## 2.3 การจำลองการลากขึ้นรูป

การจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปทรงไม่สมมาตร เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้โปรแกรม Dynaform และการใช้ดรรชนีวัดที่ความหยาบผิวต่างกันั้น จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบแรงเสียดทานเพื่อกำหนดเงื่อนไขในโปรแกรม การทดสอบแรงเสียดทานโดยใช้วิธี Ball-on-Disk ด้วยเครื่องไตรบอมิเตอร์ Anton Paar ภายใต้สภาวะการทดสอบโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ดังรูปที่ 6 แผ่นขึ้นงานทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ SKD 11 ที่มีความหยาบผิวเหมือนกับดรรชนีวัด ขณะที่บอลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดเย็น จากผลการทดสอบได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.124, 0.213, 0.373 ที่ความหยาบผิว 0.152 Ra, 0.963 Ra, 6.127 Ra ตามลำดับ

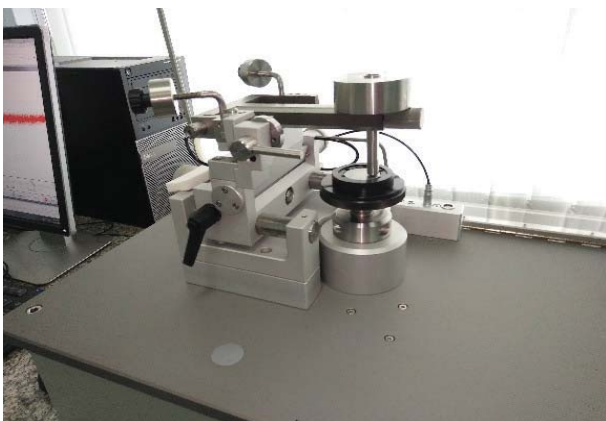
การสร้างพื้นผิว 3 มิติ (Surface modeling) โมเดลแม่พิมพ์และแผ่นขึ้นงาน สำหรับการจำลอง แสดงดังรูปที่ 5 ถูกสร้างด้วยโปรแกรม CAD (Computer Aided Design) และ บันทึกเป็นไฟล์สกุล IGES Files สำหรับการ Import เข้าสู่โปรแกรม Dynaform เพื่อสร้างแบบจำลองตาข่าย (Mesh Model) โดยกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณให้จากขนาดเอลิเมนต์โตสุดเท่ากับ 3 mm และเล็กสุดเท่ากับ 1 mm ซึ่งชิ้นงานมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 3,471 เอลิเมนต์ ที่มีสมบัติวัสดุเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-Plastic) ขณะที่ชุดแม่พิมพ์มีสมบัติเป็นแบบ แข็งแกร่ง (Rigid body) โดยการจำลองแสดงเงื่อนไขการตั้งค่างดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Material	JIS G3141 : SPCD	
Thickness	1 mm	
Material Model	MAT_3-PARAMETER_BARLAT(*36)	
Die Velocity	10 mm/s	
Number of Element	3,471	
Blank holder force	52 kN	
Friction coefficient of Drawbead	0.124, 0.213, 0.373	
Contact Type	FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE	
Hardening curve $\sigma = K\epsilon^n$	<i>K</i>	<i>n</i>
	371	0.15



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน



รูปที่ 6 เครื่องไตรบอมิเตอร์

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การลากชิ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรโดยใช้ดรอร์บีด รูปทรงหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิวแต่ละระดับนั้น พบว่าแรงในการลากชิ้นรูปมีความแตกต่างกัน รูปที่ 7 (ก) การใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra ใช้แรงในการลากชิ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 131 kN รูปที่ 7 (ข) การใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 0.963 Ra ใช้แรงในการลากชิ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 134 kN รูปที่ 7 (ค) การใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ใช้แรงในการลากชิ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 139 kN เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงลากชิ้นรูปที่ระยะลากชิ้นรูป 0 - 40 มิลลิเมตร มีแนวโน้มในแต่ละช่วงใกล้เคียงกัน แต่ในช่วง 40 -50 มิลลิเมตร แรงที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ขณะที่แรงจากการทดลองลากชิ้นรูป มีความราบเรียบ เนื่องจากระยะลากชิ้นรูปในช่วงนี้ แรงกดขึ้นงานในการลากชิ้นรูปจริงที่ได้จากแรงคูดขึ้นพื้นมีการลดระดับลง ขณะที่แรงกดขึ้นงานจากการจำลองมีความคงที่ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้แรงลากชิ้นรูปมีความแตกต่างกัน ซึ่งการใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิวมากส่งผลให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้น โดยสภาพพื้นผิวของดรอร์บีดทำให้เกิดการต้านทานการไหลตัวของแผ่นขึ้นงาน แม้จะเป็นแค่เพียงจุดสัมผัสเล็กน้อยของแผ่นขึ้นงาน

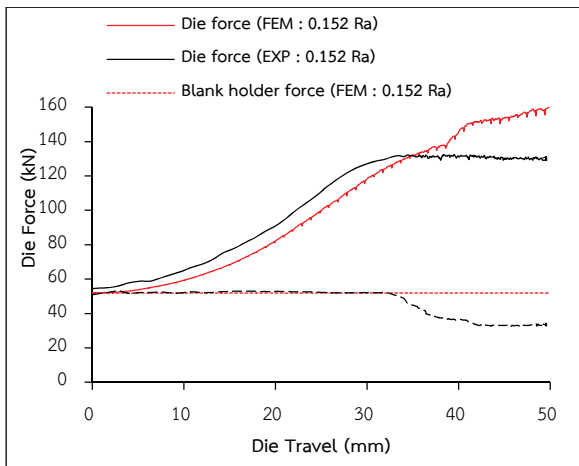
ชิ้นงานหลังการลากชิ้นรูปถูกนำมาวิเคราะห์ความเครียดแนวความหนา ที่เกิดจากการยึดตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นขึ้นงานในแต่ละจุด โดยบริเวณจุดที่ตรวจวัดชิ้นงาน แสดงดังในรูปที่ 8 ซึ่งสามารถคำนวณความเครียดแนวความหนาจากการวัดได้ดังนี้

$$\epsilon_3 = \ln(t/t_0) \quad (1)$$

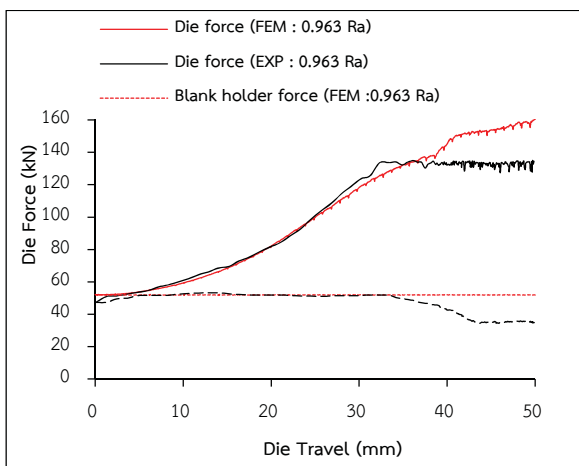
เมื่อ  $t_0$  คือความหนาก่อนการขึ้นรูป และ  $t$  คือความหนาหลังการขึ้นรูป

การวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน SPCD จากการวัดชิ้นงานทั้ง 10 จุด พบว่าความเครียดแนวความหนาในแต่ละจุดมีความแตกต่างกันซึ่งเกิดจากการไหลตัวของแผ่นขึ้นงานที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมมาตร ดังรูปที่ 9 แสดงกราฟความเครียดแนวความหนาของชิ้นงานที่ผ่านการลากชิ้นรูปโดยใช้ดรอร์บีดที่มีความหยาบผิวต่างกัน พบว่าจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานมากที่สุดคือจุดที่ 6 ทำให้จุดนี้มีค่า

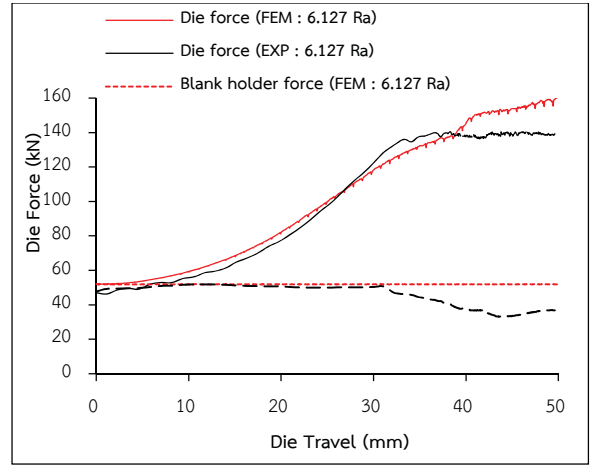
ความเครียดแนวความหนาสูงสุด โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดรรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 6.127 Ra ดังรูปที่ 9 (ค) มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.163 และเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปด้วยดรรอว์บีดที่มีความหยาบผิว 0.152 Ra มีค่าความเครียดแนวความหนาสูงสุดในจุดที่ 6 เท่ากับ 0.151 อย่างไรก็ตามจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีบางจุดที่มีค่าแตกต่างจากผลการทดลอง แม้ว่าในจุดอื่น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองก็ตาม โดยจุดที่ 4 เป็นจุดที่ค่าความเครียดแนวความหนาจากการจำลองสูงกว่าการทดลอง ลากขึ้นรูปทุกๆ ความหยาบผิวของดรรอว์บีด ดังรูปที่ 9 (ก) – (ค) เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดขึ้นงานในช่วงสุดท้ายของการลากขึ้นรูป สูงกว่าการลากขึ้นรูปจริง ส่งผลให้เกิดการต้านทานการไหลตัวในช่วงสุดท้ายมีค่าสูงกว่าการขึ้นรูปจริง ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาในจุดที่ 4 ที่เป็นจุดสูงสุดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



(ก)

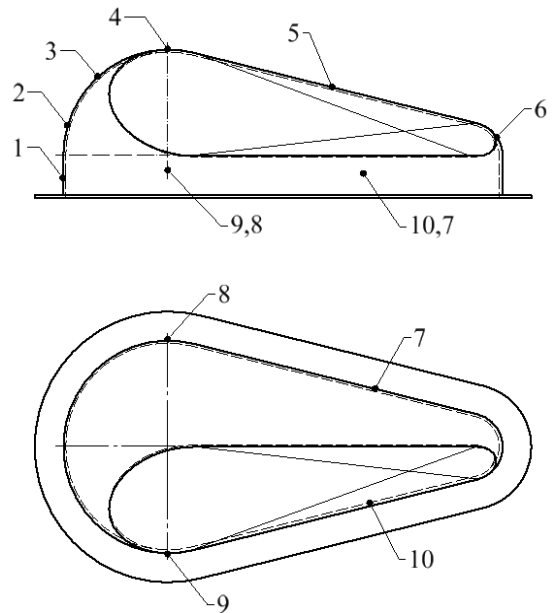


(ข)



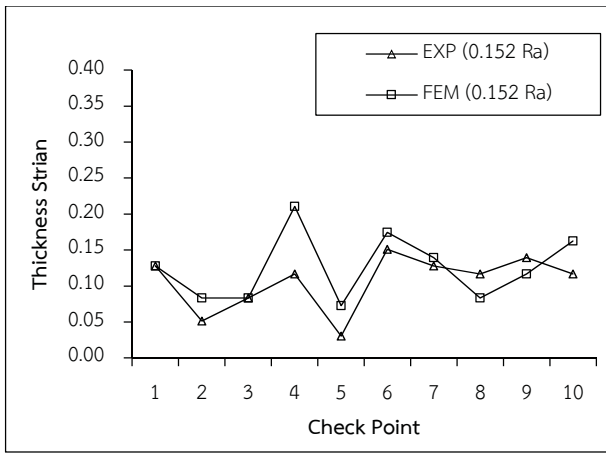
(ค)

รูปที่ 7 แรงลากขึ้นรูปโดยใช้ ดรรอว์บีดหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

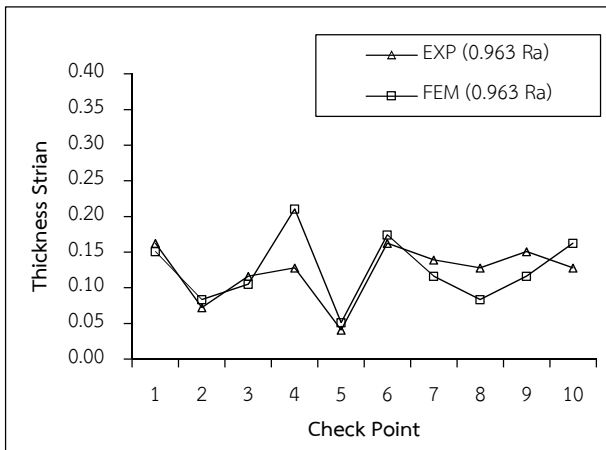


รูปที่ 8 บริเวณจุดที่ตรวจวัดความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงาน

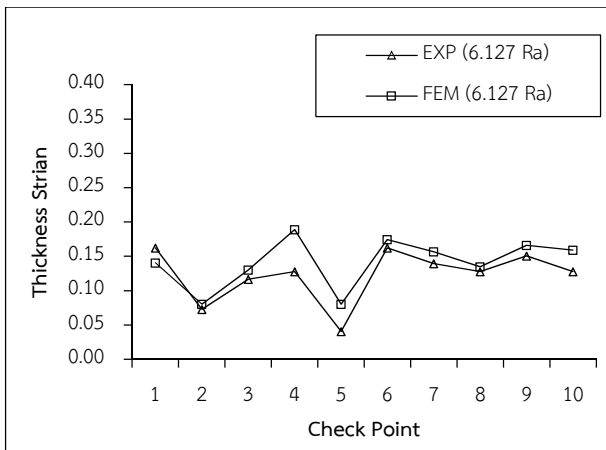
การตรวจสอบและวิเคราะห์ทางกายภาพ หรือรูปร่างของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปถือว่ามีความสำคัญเช่นเดียวกัน จากการพิจารณารูปร่างของชิ้นงานระหว่างการทดลองลากขึ้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกันดังรูปที่ 10 พบว่ามีการเกิดรอยย่นบริเวณปีกชิ้นงาน



(ก)

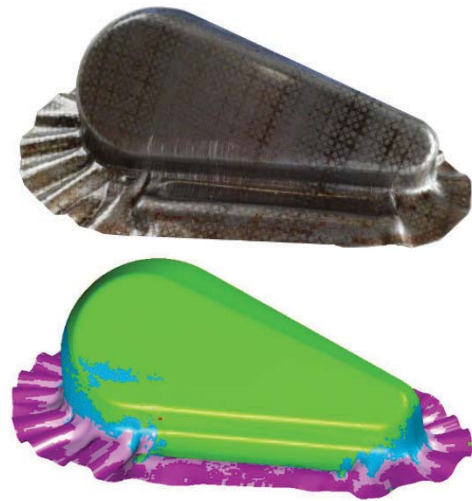


(ข)



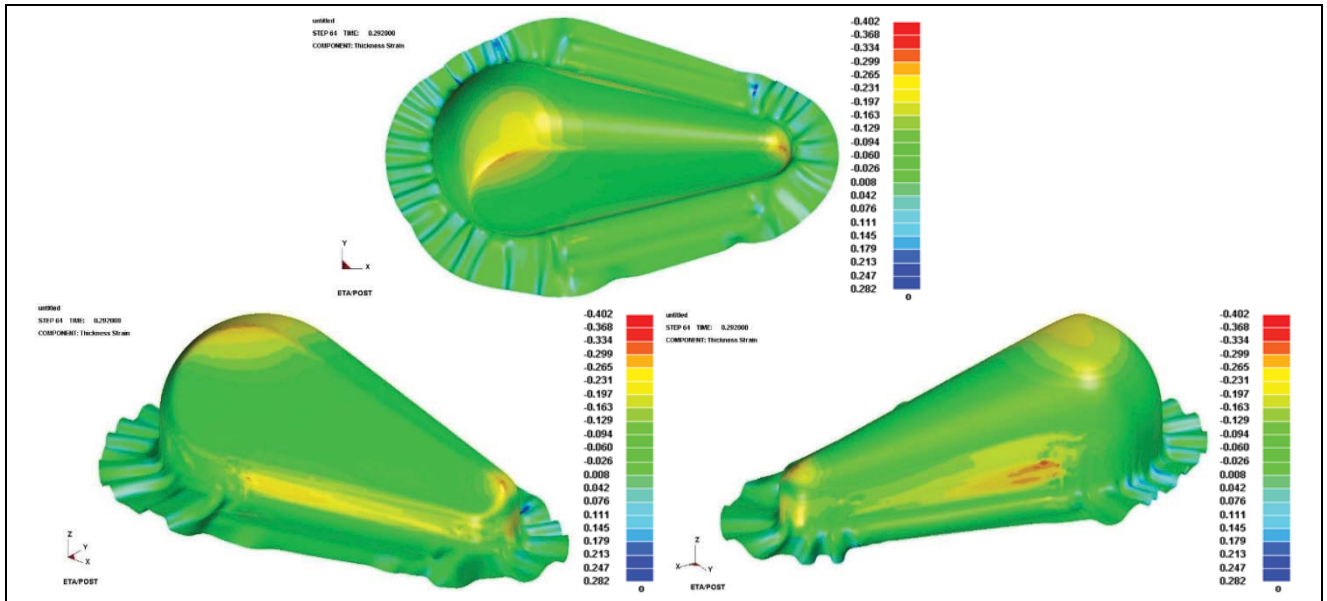
(ค)

รูปที่ 9 ความเครียดแนวความหนาโดยใช้ดรอร์ปิดหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหนาผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra

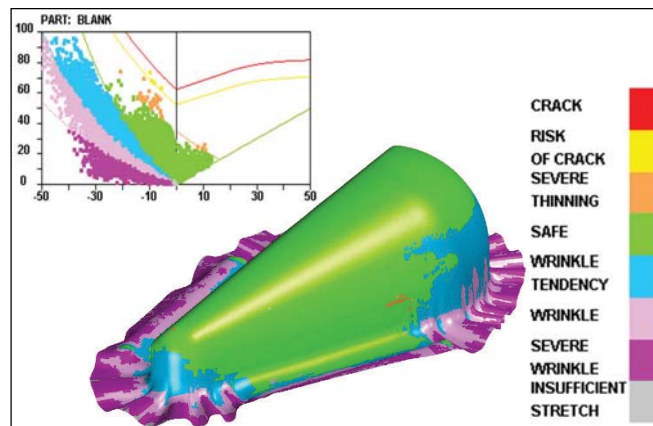


รูปที่ 10 เปรียบเทียบรูปร่างของชิ้นงานระหว่างการทดลองลากขึ้นรูปกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ดรอร์ปิดที่มีความหนาผิว 0.152 Ra

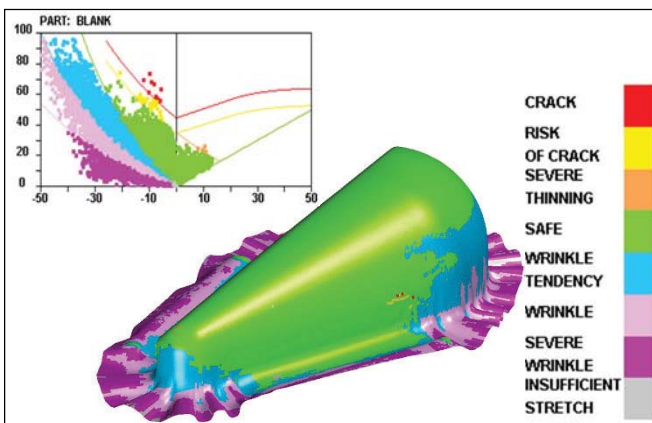
เมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาบนผิวชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น พบว่าบริเวณที่เกิดความเครียดแนวความหนาสูงมีทั้งหมด 4 จุดด้วยกัน ดังรูปที่ 11 บริเวณแรกคือส่วนโค้งที่จุดสูงสุดของชิ้นงาน หรือจุดที่ 4 ที่ทำการตรวจวัด ขณะที่บริเวณส่วนที่สองคือจุดปลายโค้งด้านเล็กของชิ้นงานหรือบริเวณจุดตรวจวัดที่ 6 และส่วนที่สามและสี่เป็นบริเวณที่แผ่นชิ้นงานไหลผ่านดรอร์ปิดหรือจุดตรวจวัดที่ 7, 8, 9 และ 10 แต่เนื่องจากชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมมาตรทำให้ในแต่ละด้านมีการเปลี่ยนแปลงความหนาต่างกัน ชิ้นงานด้านที่รูปทรงโค้งจะมีความเครียดแนวความหนาบริเวณที่ไหลผ่านดรอร์ปิด สูงกว่าด้านที่มีหน้าตัดราบเอียง ซึ่งบริเวณที่กล่าวในข้างต้นนี้มีโอกาสเกิดการฉีกขาดสูงจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram :FLD) ดังรูปที่ 12 พบว่าการเกิดรอยย่นมีความแตกต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตามการฉีกขาดของชิ้นงานมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งการใช้ดรอร์ปิดที่มีความหนาผิวต่ำสุดส่งผลให้การฉีกขาดของชิ้นงานมีค่าต่ำ ขณะที่การใช้ดรอร์ปิดที่มีความหนาผิวมากย่อมส่งผลให้การฉีกขาดสูงขึ้นเช่นกัน ความหนาผิวของดรอร์ปิดส่งผลต่อการลากขึ้นรูปชิ้นงาน การต้านทานการไหลตัวของชิ้นงานที่เกิดจากการตัดโค้งตามรูปทรงของดรอร์ปิด และผิวสัมผัสระหว่างผิวดรอร์ปิดกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นอัดบริเวณปีกชิ้นงาน และหากเกิดการต้านทานการไหลตัวมากเกินไป จะส่งผลให้โลหะไหลตัวได้น้อยชิ้นงานเกิดการดึงยืดขึ้นรูปสูง และการดรอร์ลดลงส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสยืดขึ้นรูปสูงเกินขีดจำกัด บริเวณขอบชิ้นงานเกิดความเค้นอัดสูงซึ่งส่งผลให้เกิดรอยย่นเพิ่มสูงขึ้น



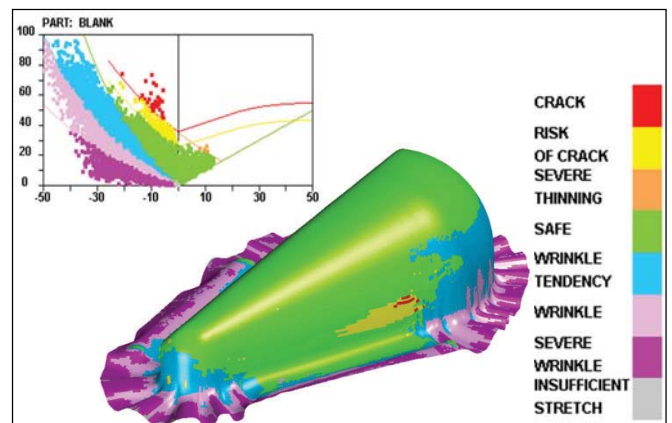
รูปที่ 11 ความเครียดแนวความหนาบนชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ตรอว์ปัดที่มีความหยาบผิว 0.125 Ra



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 12 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ผ่านการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ตรอว์ปัดหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีความหยาบผิว (ก) 0.152 Ra, (ข) 0.963 Ra และ (ค) 6.127 Ra



#### 4. สรุปผล

จากการจำลองลากขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุ SPCD ที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้ดอร์บีตหน้าตัดครึ่งวงกลม ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างกัน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองลากขึ้นรูปชิ้นงานจริง พบว่าสามารถแสดงถึงพฤติกรรมการขึ้นรูปชิ้นงาน ที่มีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ซึ่งสามารถทำนายการเกิดการฉีกขาด และรอยย่นได้ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้น (Forming Limit Diagram FLD) ที่แสดงถึงเอลิเมนต์ที่เกิดการฉีกขาด และรอยย่น

ปัจจัยแรงเสียดทานจากความหยาบผิวของดอร์บีต มีผลต่อความเครียดแนวความหนา การฉีกขาด และรอยย่น การใช้ดอร์บีตที่มีความหยาบผิว 0.125 Ra ชิ้นงานมีความเครียดแนวความหนาน้อยกว่าการใช้ดอร์บีตที่มีความหยาบผิว 0.963 และ 6.127 Ra ดอร์บีตที่มีความหยาบผิวสูงทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และ เกิดรอยย่นได้ โดยเฉพาะบริเวณที่มีการไหลผ่านดอร์บีต

การใช้ดอร์บีตในการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรต้องการการควบคุมการไหลตัวแตกต่างกัน โดยการใช้ออร์บีตที่มีความหยาบผิวสูง ในด้านที่มีการยึดตัวสูงจะทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเกิดการฉีกขาด และความเครียดแนวความหนาเพิ่มขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Murali, A., Gopal, B., Rajadurai, C. (2010). Analysis of Influence of Draw Bead Location and Profile in Hemispherical Cup Forming. *Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 1793-8236.  
[2] Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

[3] Meinders, V. T. (2000). Developments in numerical simulations of the real-life deep drawing process. PhD thesis, University of Twente.  
[4] Ma, W.Y., Wang, B., Fu, L., Zhou, j., Huang, M. (2015). Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*, 25, 2342-2351.  
[5] Zhang, S., Hodgson, P.D., Cardew-Hall, M.J. (2003). A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 34, 81-91.  
[6] Hsu, T.C., Yang, T.S. (2001). The Computer Simulation of Tribological Influence on Strain Path and Forming Limit in Punch Stretching of Sheet Metal. *Advanced Manufacturing Technology*, 7, 393-399.  
[7] Wilson, W.R.D., Huang, X.B., Hsu, T.C. (1995). A realistic friction model for computer simulation of sheet metal forming process. *Journal of Engineering for Industry*, 117, 202-209.  
[8] Wiklund, D., Rosén, B.G., Wihlborg, A. (2009). A friction model evaluated with results from a bending-under-tension test. *Tribology International*, 42(10), 1448-1452.  
[9] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F. (2007). Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Element in Analysis and Design*, 43, 1062-1067.  
[10] Wongkalasin, K., Piyasin S. (2009) A Study of Deep Draw process of Titanium sheet by finite element method and experimental method. The 23<sup>rd</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.  
[11] Meinders, T., Carleer, B.D., Geijselaers, H.J.M., Huétink, J. (1998). The implementation of an Equivalent Drawbead model in a finite Element code for sheet model forming. *Journal of material processing Technology*, 83 (1-3), 234-244.  
[12] Samuel, M. (2002). Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 22(1), 94-103.  
[13] Trzepiecin ski, T., Lemu, H. G. (2014). Frictional Conditions of AA5251 Aluminium Alloy Sheets Using Drawbead Simulator Tests and Numerical Methods. *Journal of Mechanical Engineering*, 60, 51-60.  
[14] Hol, J., Cid Alfaro, M.V., de Rooij, M.B., Meinders, T. (2012). Advanced friction modeling for sheet metal forming. *Wear* 286- 287, 66- 78

- [15] Karnchanaseangthong, T. , Inpunyo, C. , Torsakul. S. (2016). A Study of the Effect of Drawbead Shapes in Non-Symmetry Deep Drawing Process by Using Finite Element- Simulation. IE Network Conference 2016 Thailand. pp.192
- [16] ASTM E517. (1993). Standard Test Method for Plastic Strain Ratio  $r$  for Sheet Metal. 1993 Annual Book of ASTM Standard, vol.3.01, Mechanical Testing. American Society for Testing of Material.
- [17] ASTM E 646-91. (1993). Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponent ( $n$  value) of Metallic Sheet Materials. 1993 Annual Book of ASTM Standard, vol. 3. 01, Mechanical Testing. American Society for Testing of Material.