



“การศึกษาการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูป”

โดย
วิริยากร พานิชวงษ์

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2562



Investigation of draw-bead application
in deep-drawing process

By

Wiriyakorn Phanitwong

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2019

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ ได้รับความเอื้อเฟื้อจากบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์และบุคลากรจากองค์กรภายนอกในการให้คำปรึกษา คำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน ศ. ดร.สุทัศน์ ทัพย์ปรีกมาศ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย

ทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2562 (C-30/2562) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ช่วยเงินทุนในการทำงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน และ ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ปี 2562 (MRG6280205) เป็นทุนวิจัยที่ช่วยเสริมในการทำงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณบริษัทศิรสิรหัตถ์พัฒนาธุรกิจที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องจักรและสถานที่เพื่อทำการทดลอง

ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณแก่ผู้ให้การสนับสนุนเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วิริยากร พานิชวงษ์

สิงหาคม 2562

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : C-30/2562

ชื่อโครงการ : การศึกษาการประยุกต์ใช้ดรอปปิดสำหรับกระบวนการลากขึ้นรูป

ชื่อนักวิจัย : ดร. วิริยากร พานิชวงษ์

กระบวนการลากขึ้นรูปเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่สำคัญและใช้กันมาในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร อุตสาหกรรมการบิน และ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือ การเกิดรอยย่น การบางลงของชิ้นงาน การโค้งงอและโค้งออกของผนังชิ้นงาน ถ้าปัญหาเหล่านี้ลดลงจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้นซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาหลักกระบวนการลากขึ้นรูป มีงานวิจัยหลายส่วนที่ศึกษาเพื่อลดปัญหาดังกล่าวทั้งทางทดลองจริงและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การใช้ดรอปปิดติดตั้งบนด้ายและแผ่นยึดจับชิ้นงานเป็นวิธีการช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ การไหลของวัสดุมีผลกับชิ้นงานสุดท้ายที่ได้จึงจะต้องควบคุมการไหลของวัสดุให้สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน รูปร่างของดรอปปิดสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้จึงมีผลทำให้การไหลของวัสดุแตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพของการลากขึ้นรูป ในงานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการเพิ่มคุณภาพของชิ้นด้วยการลดการบางลงและควบคุมการโค้งของผนังชิ้นงานด้วยการใช้ดรอปปิดแบบ Free-form จากการศึกษาพบว่าสามารถลดการบางลงและสามารถควบคุมการโค้งของชิ้นงานได้ คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จึงดีกว่าการใช้ดรอปปิดแบบมาตรฐาน ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ดรอปปิดแบบ Free-form กับงานที่มีความซับซ้อนเพื่อเพิ่มคุณภาพ และความเที่ยงตรงของชิ้นงานได้

คำสำคัญ : กระบวนการลากขึ้นรูป; ดรอปปิด; การบางลง; การโค้งงอ; การโค้งออก; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

E-mail Address : wiriyakorn pha@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2561 – 30 กันยายน 2562

Abstract

Code of project : C-30/2562

Project name : Investigation of draw-bead application in deep-drawing process

Researcher name : Wiriyakorn Phanitwong Ph.d.

Deep drawing is a significant metal forming process used in the many sheet-metal forming industries such as automotive industry, household utensil industry, aviation industry and electrical industry. The defects of wrinkle, material thinning, and concave/convex feature are main problems to obstacle the increases in quality of deep-drawn parts. Many past researches were carried out to investigate these defects as well as to increase in quality of deep-drawn parts via experiments and numerical analysis. Absolutely, draw bead is a rib-like projection and it is usually mounted on either the die or the blank holder. It acts as a material flow barrier and controls the smooth material flow into the die cavity and over the punch of a draw die. Therefore, the use of traditional draw-bead shape is difficult and limited to control the material flow into die cavity and achieve the high quality of deep-drawn parts. In the present research, to increase the quality of deep-drawn parts by decreasing in material thinning and concave / convex feature, the free-form draw-bead is proposed. As the results, in terms of material thinning and concave / convex feature, they showed that the quality of deep-drawn parts obtained by using free-form draw-bead is better than that obtained by using traditional draw-bead. Therefore, to increase in the quality of deep-drawn parts, the free-form draw-bead should be recommended to apply in deep-drawing process especially for complicated shape parts and difficult -to-form materials.

Keywords: Deep drawing process; Draw bead; Thinning; Concave; Convex; Finite element method

E-mail Address : wiriyakorn.pha@rmutr.ac.th

Period of project : 1 October 2018 – 30 September 2019

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	ฉ

บทที่ 1	บทนำ	เลขหน้า
	1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	2. วัตถุประสงค์การวิจัย	2
	3. ขอบเขตการวิจัย	2
	4. นิยามศัพท์	3

บทที่ 2	ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	เลขหน้า
	1. ทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก	4
	2. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304	17
	3. ความหมายของไฟไนต์เอลิเมนต์	18
	4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

บทที่ 3	ระเบียบวิธีการวิจัย	เลขหน้า
	1. ขั้นตอนการดำเนินงาน	25
	2. วัสดุและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	27
	3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	28
	4. ขั้นตอนการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ	29
	5. ขั้นตอนในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	30
	6. วิเคราะห์ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาสาเหตุ	32
	7. ทำการแก้ไขแม่พิมพ์และทำการทดลองเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
บทที่ 4	ผลการวิจัยและผลการวิเคราะห์	
	เลขหน้า	
	1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	33
	2. ผลการศึกษาการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Alair Hyperform	33
	3. เทียบผลการทดลอง	41
บทที่ 5	สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	เลขหน้า
	1. สรุปผลการวิจัย	44
	2. ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม		46
ภาคผนวก ก	วิธีการใช้โปรแกรม Alair Hyperform	48
ภาคผนวก ข	Free-form draw-bead application in deep-drawing process	52
ประวัติผู้วิจัย		55

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าองค์ประกอบตัวคุณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ	7
2	ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และตายน์	10
3	ความเสียหายที่เกิดในการลากขึ้นรูป	13
4	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304	16
5	สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304	17
6	ตารางบอกเงื่อนไขในการจำลองการตัดโดยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์	30



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ถาดสี่เหลี่ยมและแม่พิมพ์ที่ใช้การลากขึ้นรูป	1
2	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น	2
3	องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก	4
4	พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการลากขึ้นรูปลึก	5
5	แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป	6
6	ความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ และขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป	8
7	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD)	9
8	การเปลี่ยนแปลงของผนังถ้วย	11
9	ความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนเล็กๆ ของโลหะแผ่นในโซน X	12
10	ความหนาที่เปลี่ยนไป	12
11	การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ	14
12	การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม	15
13	การไหลของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม	15
14	ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการใช้	16
15	เอลิเมนต์มิติเดียว	20
16	เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ	20
17	เอลิเมนต์แบบสามมิติ	21
18	การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ	21
19	แผนภาพในการดำเนินงาน	25
20	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น	27
21	เครื่องไฮดรอลิกเพลสที่ใช้ในการลากขึ้นรูป	27
22	เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing)	28
23	Specimen ที่ใช้ในการทดสอบ	28
24	ถาดสี่เหลี่ยมและแม่พิมพ์ที่ใช้การลากขึ้นรูปในโปรแกรม Cimatron E	29
25	การสร้างแบบจำลองการลากขึ้นรูปในโปรแกรม Alair Hyperform	29
26	แบบจำลองและขนาดของดรอปีด	30
27	แสดงการไหลของรูปร่างดรอปีดแบบมาตรฐาน	33
28	แสดงการไหลของรูปร่างของดรอปีดแบบ Free-form	34
29	แสดงการไหลของรูปร่างดรอปีดแบบมาตรฐาน	35
30	แสดงการไหลของรูปร่างของดรอปีดแบบ Free-form	36
31	แสดงการไหลของรูปร่างดรอปีดแบบมาตรฐาน	37
32	ตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงาน	38
33	แสดงการเปรียบเทียบความหนาของดรอปีดแบบมาตรฐานกับ	39

	ดรอปีดแบบ Free-form	
34	แสดงการไหลของรูปร่างของดรอปีดแบบ Free-form	40
35	ชิ้นงานที่ใช้ดรอปีดแบบมาตรฐาน	41
36	ชิ้นงานที่ใช้ดรอปีดแบบ Free-form	41
37	แสดงการเปรียบเทียบความหนาของดรอปีดแบบดรอปีด แบบ Free-form จากการจำลองและการทดลอง	42
ก-1	หน้าต่าง Import รูปร่างและขนาดของแผ่นเปล่าและแม่พิมพ์	49
ก-2	หน้าต่าง mesh สำหรับสร้างอนุภาคของแม่พิมพ์	49
ก-3	หน้าต่าง mesh สำหรับสร้างอนุภาคของชิ้นงาน	50
ก-4	หน้าต่าง Tool setup สำหรับสร้างแผนจับงาน	50
ก-5	หน้าต่าง Autoprocess สำหรับกำหนดกระบวนการและตัวแปรในการจำลอง	51



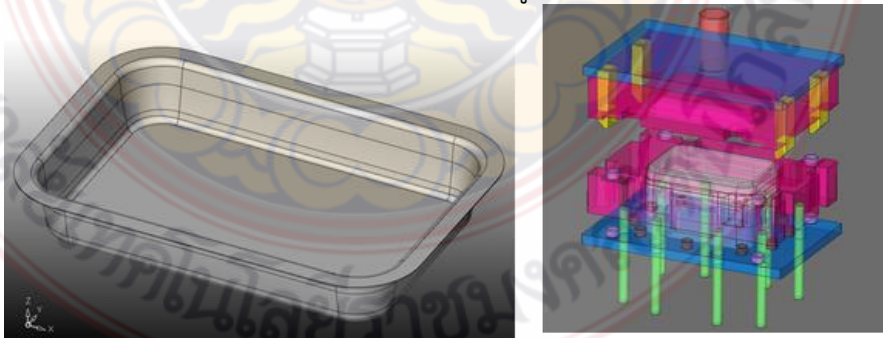
บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ที่ผลิตด้วยสแตนเลสเข้ามามีบทบาทมากขึ้น และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากต่อผู้บริโภคสินค้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องใช้ครัวเรือน เนื่องจากเครื่องใช้ที่ทำการผลิตด้วยสแตนเลสที่มีความคงทนสวยงามและไม่เกิดสนิม แต่อย่างไรก็ตามเครื่องใช้สแตนเลสยังคงมีราคาแพงอยู่ เนื่องจาก ต้นทุนวัสดุที่สูงกว่าและกระบวนการขึ้นรูปที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งเทคนิควิธีการในการผลิตนั้นได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในอดีตการขึ้นรูปจะเป็นการสุ่มหาค่าที่เหมาะสมกับชิ้นงานหรืออาจคำนวณค่าอย่างคร่าวๆ จึงทำให้การผลิตชิ้นงานมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง เป็นการเสี่ยงต่อการลงทุนในการผลิต จนปัจจุบันได้มีการนำเครื่องจักรกลขึ้นรูปอัตโนมัติเข้ามามีส่วนร่วมในการผลิต เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการผลิต และมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัญหาที่สำคัญของกระบวนการผลิตดังกล่าว ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถทราบได้ว่า ขนาดชิ้นงานเริ่มต้นควรเป็นเท่าใด ควรใช้ปริมาตรของเนื้อวัสดุตลอดจนรูปร่างสำหรับขึ้นรูปอย่างไรจึงจะเหมาะสม แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป รวมถึงค่าความแข็งแรงที่สามารถรับได้ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ดีปราศจากข้อบกพร่อง ในปัจจุบันการตอบปัญหาดังกล่าวข้างต้น โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีการแบบลองผิดลองถูก เพื่อทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมนั้น ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองทั้งวัสดุและเวลา ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

จากสาเหตุดังกล่าว ทำให้เกิดแนวความคิดในการออกแบบ วิเคราะห์ แก้ไขปัญหา และการลากขึ้นรูปด้วยดรอปดัดแบบใหม่ ของกระบวนการผลิต ทำการออกแบบ ปรับแต่ง และผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 รวมทั้งพิจารณาออกแบบขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าตัวแปรการผลิตต่างๆที่มีความเหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปได้ ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ตรงต่อความต้องการ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะทำการศึกษารองเท้าของผนังด้านข้าง ที่ได้จากการกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเป็นปัญหาที่ทางโรงงานให้ความสนใจและความสำคัญ โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาและแก้ไขการโค้งตัวในกระบวนการลากขึ้นรูป



ภาพที่ 1 ถาดสี่เหลี่ยมและแม่พิมพ์ที่ใช้การลากขึ้นรูป

-แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปโลหะแผ่น



ก) พันช์

ข) ดायน์



ค) แผ่นกดขึ้นงาน

ภาพที่ 2 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของดรอปีดที่มีต่อการโค้งตัวของผนังและการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนัง
2. พัฒนาดรอปีดเพื่อลดการโค้งตัว และลดการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนัง

3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 ทำการทดลองเพื่อศึกษากลไกการโค้งของผนังชิ้นงานและการลดลงของความหนาชิ้นงาน
- 3.2 วัสดุที่ใช้ทำการทดลองคือสแตนเลสสตีล ความหนา (SUS304) 0.7 mm
- 3.3 ในการทดลองใช้เครื่องกดไฮดรอลิกขนาด 76 Ton
- 3.4 ชิ้นงานเป็นลักษณะภาตรูปสี่เหลี่ยม ตัวแปรที่ส่งผลคือความกว้าง ความยาว และความสูงของภาต
- 3.5 รูปร่างของดรอปีดที่ใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูป ตัวแปรที่ส่งผลคือ ความกว้าง ความสูง ตำแหน่ง มุม และจำนวนของดรอปีด

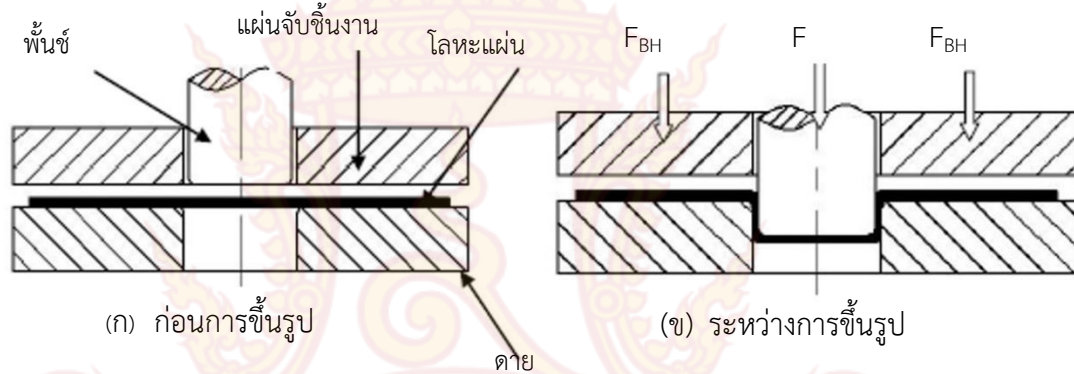
4. นิยามศัพท์

BHF	=	แรงจับชิ้นงาน
Blank	=	แผ่นเปล่า / ชิ้นงาน
Blank holder	=	แผ่นจับชิ้นงาน
Clearance	=	ระยะเผื่อ
Die	=	ดายน์
Deep drawing	=	การลากขึ้นรูปลึก
FEM	=	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
FLC	=	เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป
FLD	=	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
kN	=	กิโลนิวตัน
LDR	=	ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป
Lubricant	=	สารหล่อลื่น
MPa	=	เมกะปาสคาล
N	=	นิวตัน
Oleophobic	=	คุณสมบัติไม่ชอบน้ำมัน
Punch	=	พินซ์
sec	=	วินาที
Strain	=	ความเครียด
Stress	=	ความเค้น
SUS	=	เหล็กกล้าไร้สนิม
USM	=	เครื่องทดสอบสมบัติการขึ้นรูปของโลหะแผ่น
Yield stress	=	ความเค้นจุดคดงอ
mm	=	มิลลิเมตร
mm ²	=	ตารางมิลลิเมตร
mm ³	=	ลูกบาศก์มิลลิเมตร

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีการลากขึ้นรูปลึก

การลากขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมแบบหนึ่ง ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานอย่างถาวร และมีความลึกของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปมากกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลและพันธะภายในเนื้อวัสดุ และขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก ซึ่งประกอบด้วยพUNCH (Punch) ดายน์ (Die) และ แผ่นจับชิ้นงาน (Blank Holder) ดังแสดงในภาพที่ 3

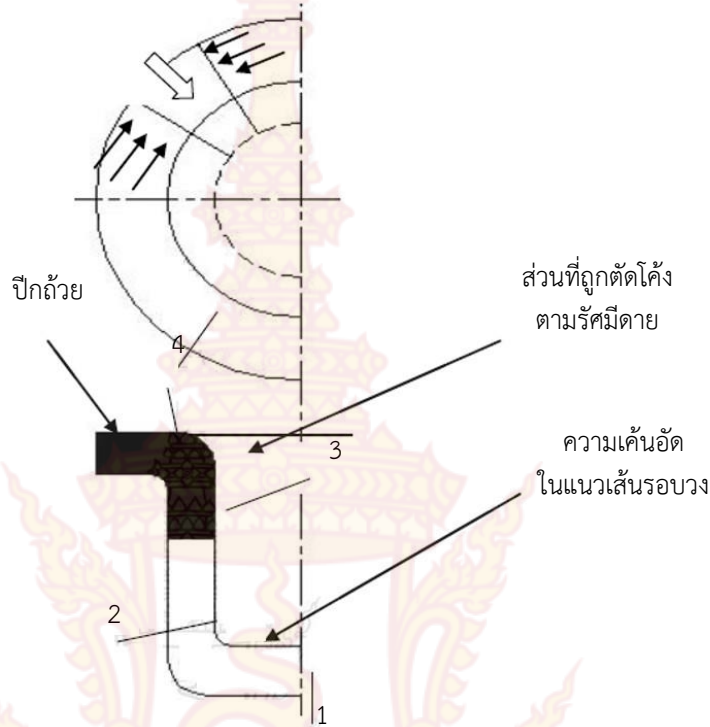


ภาพที่ 3 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก

1.1 ขั้นตอนการลากขึ้นรูปลึก

ส่วนที่สัมผัสโลหะแผ่นเปล่า (Blank) แรงกดจากเครื่องปั๊ม (F) จะส่งผ่านพUNCH เพื่อให้โลหะไหลตัวเข้าไปในช่องดายน์ ขณะเดียวกันก็มีแรงกดอยู่บนแผ่นจับชิ้นงาน (F_{BH}) เพื่อควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่นเปล่าไม่ให้เกิดรอยยับพุดติกรรมและทิศทางการไหลตัวของแผ่นโลหะแสดงดังภาพที่ 4 แรงกดจากพUNCH จะส่งผ่านไปที่บริเวณก้นถ้วย (บริเวณที่ 1) ส่งผลให้เกิดการตัดโค้งของแผ่นโลหะ 2 บริเวณ คือ ส่วนโค้งตามรัศมีพUNCH (บริเวณที่ 2) และส่วนโค้งตามรัศมีดายน์ (บริเวณที่ 3) เมื่อพUNCH เคลื่อนที่ลึกลง ส่วนของแผ่นโลหะที่เป็นผนังถ้วยในแนวตั้ง จะทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงที่กระทำที่ก้นถ้วยไปยังบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (ส่วนของปีกถ้วย และส่วนโค้งตามรัศมีดายน์ที่แรงงาในภาพที่ 4)

ความเค้นอัด
ในแนวเส้นรอบวง



ภาพที่ 4 พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่นภายใต้กระบวนการลากขึ้นรูปลึก

บริเวณที่ 1 ส่วนของก้นถ้วยแทบไม่มีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น พื้นผิวจะพาเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่เข้าไปในช่องดายน์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะบริเวณนี้น้อยมาก

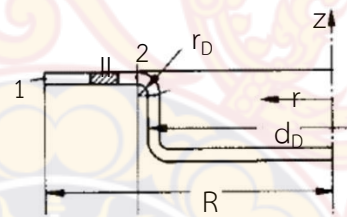
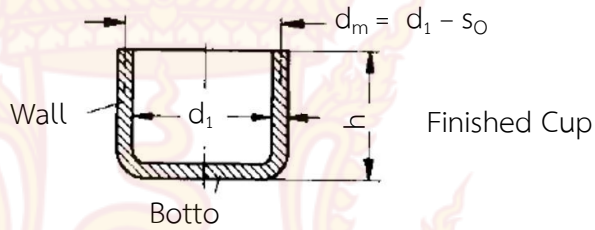
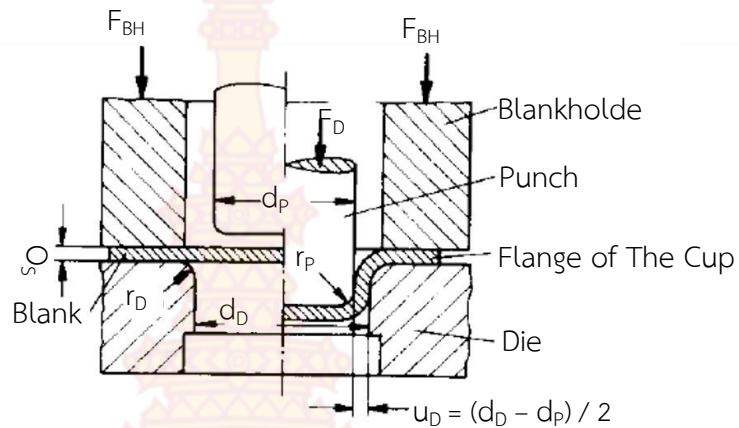
บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นโลหะที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีพื้นผิวและผนังถ้วยในแนวตั้งนี้ผ่านการเปลี่ยนรูปที่สมบูรณ์มาแล้ว แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องส่งผ่านแรงจากก้นถ้วย ทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวแกน ส่งผลให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการยืดตัวและเกิดการบางลงของแผ่นโลหะ บางกรณีก็เกิดการขาด ขึ้นที่บริเวณนี้

บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีตาย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วยเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุด เนื้อโลหะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นอัด ในแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากปริมาตรของเนื้อโลหะ ที่มีมากที่ขอบด้านนอกของแผ่นเปล่าพยายามเบียดเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างดายน์ตามแรงดึงจากพื้นผิว และเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีที่เกิดจากการดึงของพื้นผิว การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นของชิ้นงานจะทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมีและเกิดแรงต้านการไหลตัว มักจะพบว่าแผ่นโลหะที่บริเวณนี้มีความหนาเพิ่มขึ้นมากหรือเกิดการย่น เนื่องจากการอัดตัวในแนวเส้นขอบ ทำให้เกิดการขยายออกใน 2 แนวแกน คือ แนวรัศมี และแนวความหนาของแผ่นโลหะ

1.2 แรงที่ใช้การลากขึ้นรูป (Drawing Load)

แรงสูงสุดของเครื่องที่ใช้ในการดันพื้นผิวในแนวการเคลื่อนที่ และลากให้แผ่นเปล่าไหลเข้าไปในช่องดายน์ สามารถประมาณค่าได้ดังสมการ 1



ภาพที่ 5 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

$$F_{d,max} = \pi d_m s_0 \left\{ e^{\mu\pi/2} 1.1 \sigma_{f,m,I} \ln \frac{d_{F,max}}{d_m} + \frac{2\mu FN}{\pi d_{F,max} s_0} + \sigma_{f,m,II} \frac{s_0}{2r_D} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ

- $F_{d,max}$ = แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป
- s_0 = ความหนาของแผ่นเปล่า
- d_m = ขนาดเส้นรอบวงนอกของชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูป
- $d_{F,max}$ = ขนาดเส้นรอบวงนอกของชิ้นงานขณะที่แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปมีค่าสูงสุด
- $\sigma_{f,m,I}$ = ค่าเฉลี่ยของความเค้นไหลระหว่างขอบแผ่นเปล่าจุดที่ 1 ถึงรัศมีตายันจุดที่ 2
- $\sigma_{f,m,II}$ = ค่าเฉลี่ยของความเค้นไหลระหว่างรัศมีตายันจุดที่ 2 ถึงรัศมีตายันจุดที่ทำให้สามารถแยกเทอมภายในสมการดังนี้

เทอม A = $1.1\sigma_{f,m_1} I \ln \frac{d_{F,max}}{d_m}$ แทนแรงในอุดมคติที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงาน

เทอม B = $\frac{2\mu F_N}{\pi d_{F,max} S_0}$ แทนแรงเสียดทานระหว่างแผ่นเปล้ากับด้ายและแผ่นจับชิ้นงาน

เทอม C = $e^{\mu\pi/2}$ แทนแรงที่เพิ่มขึ้นจากแรงเสียดทานที่รัศมีด้าย

เทอม D = $\sigma_{f,m,II} \frac{S_0}{2r_D}$ แทนแรงที่จำเป็นต้องใช้เพื่อตัดแผ่นเปล้าตามรูปร่างของรัศมีด้าย

1.3 แรงที่ทำให้เกิดการแตก (Cracking Force)

แรงที่สามารถส่งผ่านวัสดุในบริเวณรัศมีพื้นซ์หรือบริเวณรอยต่อระหว่างผนังรูปถ้วยกับกันถ้วยจะเป็นเงื่อนไขจำกัดแรงการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ยอมได้ แรงนี้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดึงสูงสุดมิฉะนั้นจะไม่สามารถลากขึ้นรูปได้เพราะถ้วยจะเกิดการฉีกขาดก่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการสมการ 2

$$F_{cr} = \pi d_m s_0 S_u a_{cr} \quad (2)$$

เมื่อ

F_{cr} = แรงที่ทำให้เกิดการแตก (N)
 d_m = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm)
 s_0 = ความหนาของแผ่นเปล้า (mm)
 S_u = ความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นเปล้า (N/mm²)
 a_{cr} = ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ ดังตาราง 1

ตารางที่ 1 ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตก
แผ่นเหล็กทั่วไป (SAE 1600)	1.05-1.55
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304)	0.95-1.30
แผ่นทองเหลือง (UNS C27000)	0.92-1.27
แผ่นอะลูมิเนียม (AA 1050-O)	0.99-1.22

1.4 แรงกดของแผ่นจับชิ้นงาน (Blank Holder Force)

แรงที่ใช้ในการดันแผ่นจับชิ้นงานให้กดลงบนชิ้นงาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่นและการโก่งตัวอันเป็นผลมาจากความเค้นอัดในแนวสัมผัสของบริเวณปีกแผ่นเปล่าในระหว่างการลากชิ้นรูป ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังสมการ 3

$$F_{BH} = A_{BH} p_{BH} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} F_{BH} &= \text{แรงกดของแผ่นจับชิ้นงาน} \\ A_{BH} &= \text{พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับชิ้นงาน} \\ p_{BH} &= \text{แรงดันในการจับชิ้นงาน} \end{aligned}$$

โดยแรงดันในการจับชิ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดรอยย่น และการโก่งตัวนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของแผ่นวัสดุ ความหนาของแผ่นวัสดุ และ อัตราส่วนการขึ้นรูป ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังสมการ 4

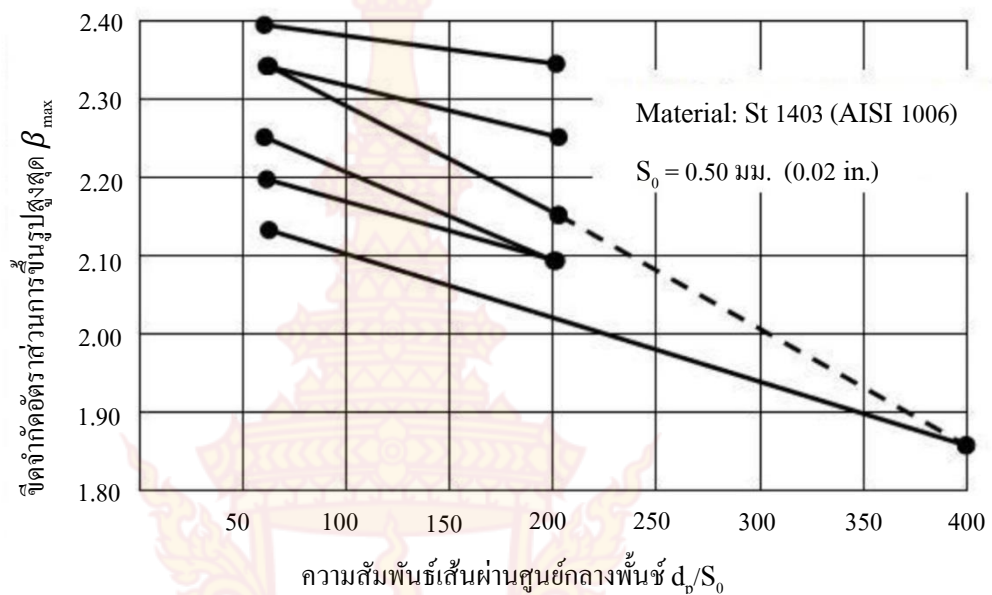
$$p_{BH} = 10^3 c \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 d_0}{s_0} \right] s_u \quad (4)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} C &= \text{ค่าองค์ประกอบตัวคูณที่มีค่าระหว่าง 2 ถึง 3} \\ \beta &= d_0 / d_1 \\ d_0 &= \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่าก่อนกดลากชิ้นรูป (mm)} \\ d_1 &= \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ (mm)} \\ s_0 &= \text{ความหนาของแผ่นเปล่า (mm)} \\ S_u &= \text{ความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นเปล่า (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

1.5 ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป (LDR)

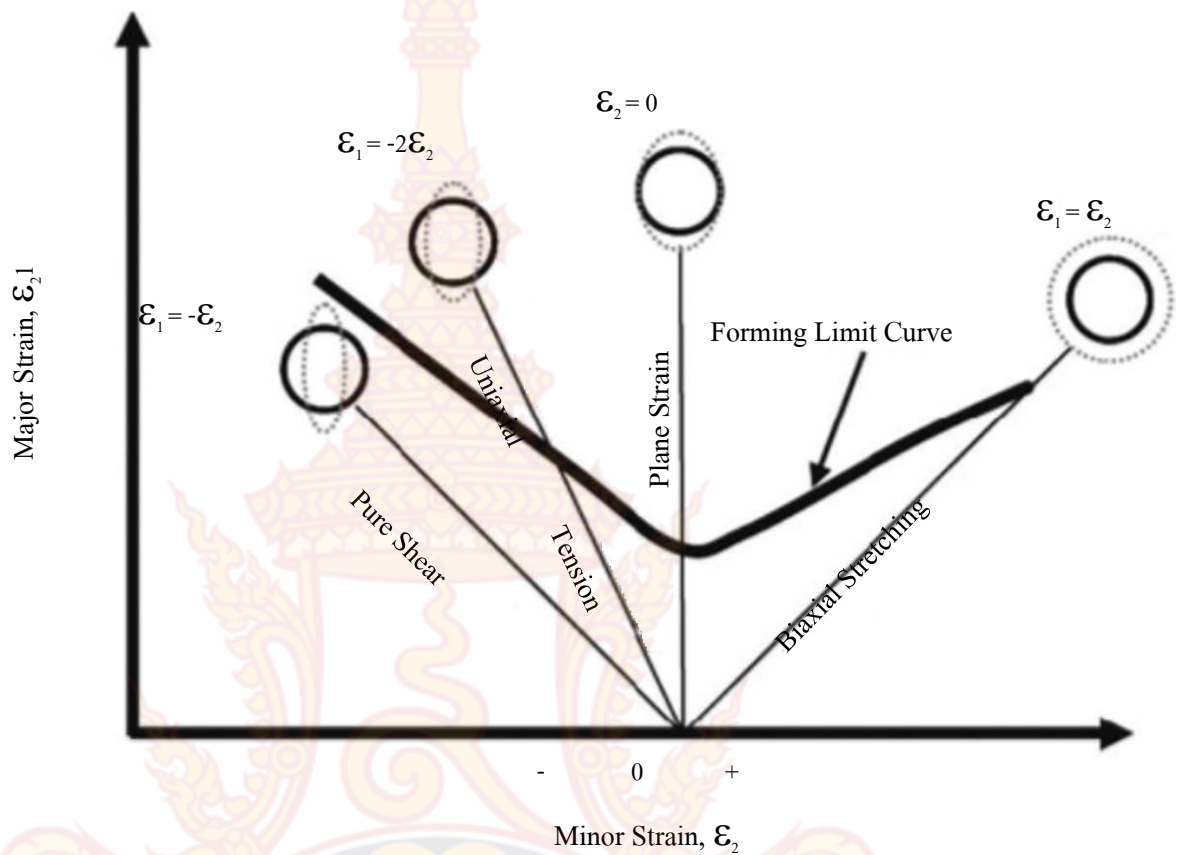
อัตราส่วนการขึ้นรูป $\beta = \frac{d_0}{d_1}$ ที่มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้นในสถานะที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ แรงดังกล่าวนี้จะต้องถูกส่งผ่านผนังของชิ้นงานระหว่างกระบวนการลากชิ้นรูป ดังนั้นอัตราส่วนการขึ้นรูปดังกล่าวจะต้องมีค่าไม่เกินค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด (β_{max}) ที่จะไม่ทำให้เกิดการแตกที่ก้นถ้วย ซึ่งค่าสูงสุดดังกล่าวเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรหลายตัว เช่น คุณสมบัติของแผ่นเปล่าที่ทำการลากชิ้นรูป ความหนาของแผ่นเปล่า ความเสียดทานแรงกดของแผ่นจับชิ้นงาน เป็นต้น ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลาง punches และขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

1.6 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD)

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นแผนภาพที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมของโลหะแผ่นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปดังภาพที่ 7 สร้างขึ้นโดยการนำวัสดุที่ทำการศึกษา มาทดสอบลากขึ้นรูปด้วย punches ครึ่งทรงกลม (Hemispherical Punch Test) ด้วยการลากขึ้นรูปจนวัสดุเกิดความเสียหายแล้วนำสัดส่วนระหว่าง ความเครียดหลัก (Major Strain) และความเครียดรอง (Minor Strain) ณ จุดที่เสียหายมาสร้างเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLC) เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปจึงสามารถนำมาใช้แสดงขีดจำกัดในการลากขึ้นรูปลึกของชิ้นงานที่ไม่สมมาตรรอบแกนได้ โดยบริเวณใต้เส้นโค้งแสดงถึงค่าสัดส่วนระหว่างความเครียดหลัก และความเครียดรองที่งานลากขึ้นรูปจะสามารถทำได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ในขณะที่บริเวณเหนือเส้นโค้งแสดงถึงค่าสัดส่วนระหว่างความเครียดหลักและความเครียดรองในงานลากขึ้นรูปที่จะเกิดความเสียหายขึ้นต่อชิ้นงาน



ภาพที่ 7 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD)

1.7 ช่องว่างระหว่างพินซ์และดายน์

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านทานที่ผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นช่องว่างระหว่างพินซ์และดายน์จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะซึ่งจะมากกว่าประมาณ 1.07 ถึง 1.2 เท่าของความหนาแผ่นขึ้นงาน และจำนวนครั้งของการลากขึ้นรูป ซึ่งแสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าช่องว่างระหว่างพินซ์และดายน์ซึ่งใช้ได้ทั้งในการลากขึ้นรูปทรงกระบอกและการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยม เพียงแต่ตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านของถ้วยสี่เหลี่ยมจะต้องมีค่าช่องว่างพินซ์และดายน์มากกว่าด้านผนังถ้วยสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 2 ระยะช่องว่างระหว่างพินซ์และดายน์

ความหนาของแผ่นขึ้นงาน (mm)	ช่องว่างระหว่างพินซ์และดายน์	
	ลากขึ้นรูปครั้งที่ 1	ลากขึ้นรูปครั้งที่ 2
0.38 หรือน้อยกว่า	1.07 – 1.09 t	1.08 – 1.10 t
0.41 - 1.27	1.08 – 1.10 t	1.10 – 1.12 t
1.28 - 3.18	1.10 – 1.12 t	1.12 – 1.14 t
3.20 ขึ้นไป	1.12 – 1.14 t	1.15 – 1.20 t

1.8 รัศมีพื้นซ์และตายน์

ขนาดของรัศมีพื้นซ์และตายน์ จะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นงาน ในกรณีที่กำหนดแรงในการลากขึ้นรูปให้มีค่าน้อยทำได้โดยการเพิ่ม อัตราส่วนการลากขึ้นรูปและรัศมีตายน์ โดยรัศมีตายน์ที่มีขนาดใหญ่จะเป็นการลดพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่นชิ้นงานกับแผ่นจับชิ้นงาน แต่ก็ทำให้เกิดแนวโน้มที่จะเกิดการย่นที่ปีกของชิ้นงานในบริเวณรัศมีของตายน์ ในทางกลับกันความเป็นไปได้ในการลดการย่นลงได้ถ้าให้ขนาดรัศมีตายน์มีขนาดเล็กลง ดังนั้นการหาขนาดรัศมีตายน์จึงมีความสำคัญ โอห์เลอร์และไกเซอร์ (Oehler and Kaiser) ได้พัฒนาสมการ ดังสมการที่ 5

$$r_D = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]S_d \quad (5)$$

และเซลลิน (Sellin) ก็ได้เสนอการหาขนาดรัศมีโดยมีความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นชิ้นงาน ดังสมการที่ 6

$$r_d = (5-10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นชิ้นงาน} \quad (6)$$

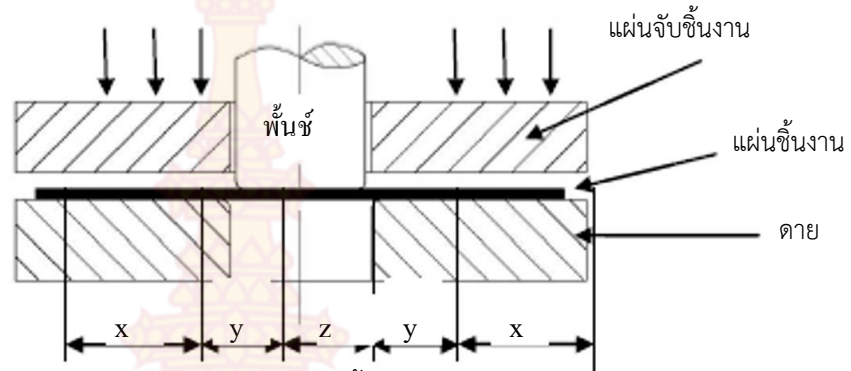
และรัศมีพื้นซ์ก็มีความสัมพันธ์กับรัศมีตายน์ ดังสมการที่ 7

$$r_p = (3-5 \text{ เท่า}) \times \text{รัศมีตายน์} \quad (7)$$

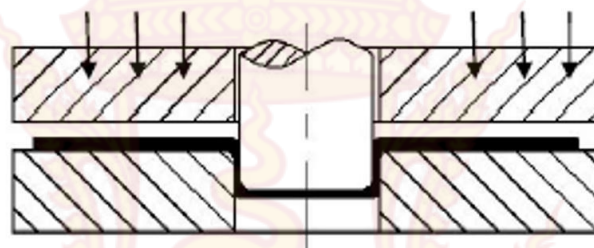
1.9 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วย

การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วยในกระบวนการลากขึ้นรูป โดยที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่ผ่านแม่พิมพ์พื้นซ์จะเกิดการยืดตัวอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะกับแม่พิมพ์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดของแผ่นจับชิ้นงาน ความเค้นดึงและอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะในการขึ้นรูป ซึ่งสาเหตุต่างๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดการบางลงของผนังถ้วยของชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาของผนังถ้วยที่ลดลงนี้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการลากขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น แรงกดของแผ่นจับชิ้นงาน ความเร็วในการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่น รูปร่างของชิ้นงาน เป็นต้น

เมื่อมาพิจารณาในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะในรายละเอียดลึกลงไปอีกโดยจะพิจารณาประกอบกับภาพที่ 8 เราจะแบ่งโลหะแผ่นที่จะนำมาขึ้นรูปออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซน X, Y และ Z ซึ่งโซน X วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นจะสัมผัสกับตายน์ และแผ่นจับชิ้นงาน โซน Y จะไม่สัมผัสกับพื้นซ์ หรือตายน์ และโซน Z จะสัมผัสกับส่วนหัวของพื้นซ์ (Punch Head)



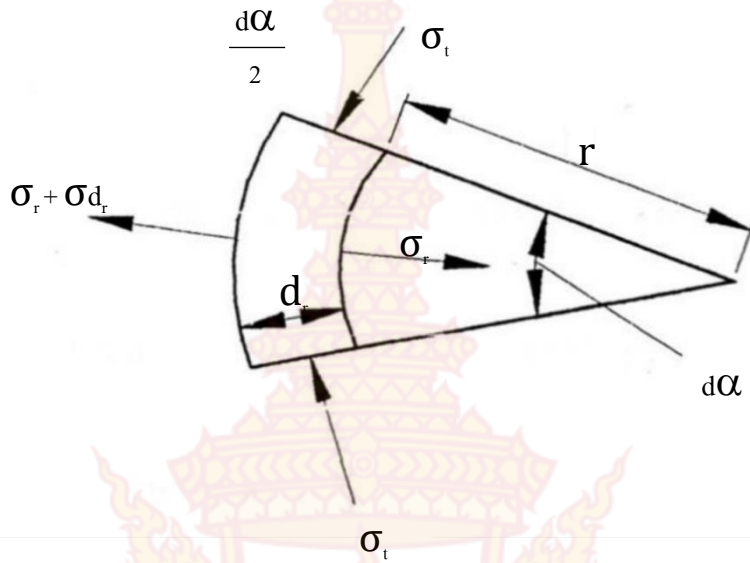
(ก) ก่อนการลากขึ้นรูป



(ข) หลังการลากขึ้นรูป

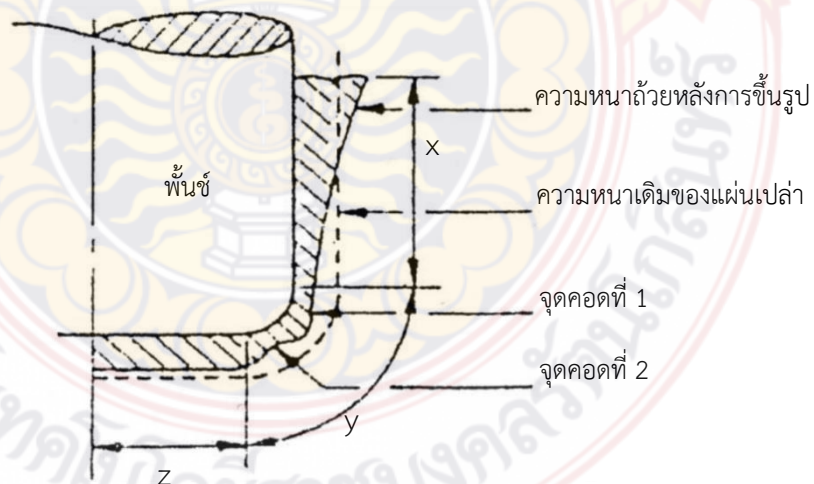
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของผนังถ้วย

เนื่องจากกระบวนการลากขึ้นรูปทรงสูงดังแสดงในรูป 8 (ก) เนื้อชิ้นงานในโซน X จะถูกลากขึ้นรูปไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นในแนวรัศมี (Radial Tensile Stress, σ_r) และผลของการลดลงของรัศมีในโซนนี้ จะนำไปสู่การเกิดความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Compressive Circumferential Stress, σ_c) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดูภาพที่ 9 ประกอบถ้าไม่มีความดันมาออกแรงแผ่นจับชิ้นงานความเค้นในแนวเส้นรอบวง (σ_c) จะทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) เมื่อเนื้อชิ้นงานในโซน X ไหลผ่านตามรูปร่างของคายน (Die Profile) มันจะถูกทำให้บางลงภายใต้ Tensile Stress ซึ่งแผ่นโลหะจะถูกดึงให้ยืดออกจนกลายเป็นผนังของถ้วย ระหว่างพินช์และคายน สุดท้ายส่วนทางด้านของโซน X จะถูกทำให้บางมากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างพินช์และคายน ส่วนด้านนอกของโซน X ก็จะมีความหนาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 9 ความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนเล็กๆ ของโลหะแผ่นในโซน X

พิจารณาในโซน Y เมื่อชิ้นงานในส่วนนี้จะถูกทำให้งอ (Bending) และเกิดการเลื่อนตัว (Sliding) ซึ่งเกิดขึ้นตามรูปร่างของดายน์ ส่วนที่เกิดการยืดตัว (Stretching) โดยแรงดึงจะเกิดระหว่าง ดายน์ และส่วนหัวของพUNCH ส่วนที่เกิดการงอและการเลื่อนตัวจะเกิดขึ้นตามรูปร่างของพUNCH (Punch Profile) ส่วนโซน Z จะเกิดการยืดตัวและการเลื่อนตัว ขึ้นที่ส่วนหัวของพUNCH ขนาดของความเครียด จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพUNCH และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จากข้างต้นสามารถทราบความ เปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วยทรงกระบอกที่เกิดจากกระบวนการลากขึ้นรูป ดังแสดงในภาพ ที่ 10




ภาพที่ 10 ความหนาที่เปลี่ยนไป

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานลากขึ้นรูป เช่นการเกิดการย่น การฉีกขาด (Tear) ซึ่งทำให้ชิ้นงานได้รับความเสียหายจนใช้การไม่ได้ แสดงในตารางที่ 3 ส่วนตัวแปรในการลากขึ้นรูป สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวแปรที่เกิดจากขบวนการขึ้นรูป และ ตัวแปรที่เกิดจากแผ่นขึ้นงาน

ตารางที่ 3 ความเสียหายที่เกิดในการลากขึ้นรูป

ลักษณะรูปร่างที่ปรากฏบนชิ้นงาน	ความเสียหายที่เกิดขึ้น	สาเหตุที่เกิดความเสียหาย	แนวทางการแก้ไขความเสียหาย
	การแตกขาดบริเวณที่ใกล้กันด้วย	มี drawing ratio สูงเกินไปต่อวัสดุชิ้นงานและรูปร่างแม่พิมพ์	ลด drawing ratio ลง
	การฉีกขาดออกบริเวณกันด้วย	<ol style="list-style-type: none"> 1. รัศมี die น้อยเกินไป 2. Die clearance น้อยเกินไป 3. ความเร็วของ punch สูงเกินไป 4. Blank holder pressure สูงเกินไป 	แก้ไข <ol style="list-style-type: none"> 1. รัศมี die และ punch 2. Die clearance 3. ความเร็วของ punch 4. Blank holder pressure ให้เหมาะสม
	การเกิดรอยย่นบริเวณขอบชิ้นงาน	<ol style="list-style-type: none"> 1. Blank holder pressure น้อยเกินไป 2. Die clearance น้อยเกินไป 3. Die radius มากเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เพิ่ม Blank holder pressure 2. เพิ่ม Die clearance 3. ลด Die radius
	การเกิดรอยย่นบริเวณผนังชิ้นงาน	<ol style="list-style-type: none"> 1. Die clearance กว้างเกินไป 2. Die radius มากเกินไป 3. Blank holder pressure น้อยเกินไป 	แก้ไข <ol style="list-style-type: none"> 1. Die clearance 2. Die radius 3. Blank holder pressure ให้เหมาะสม

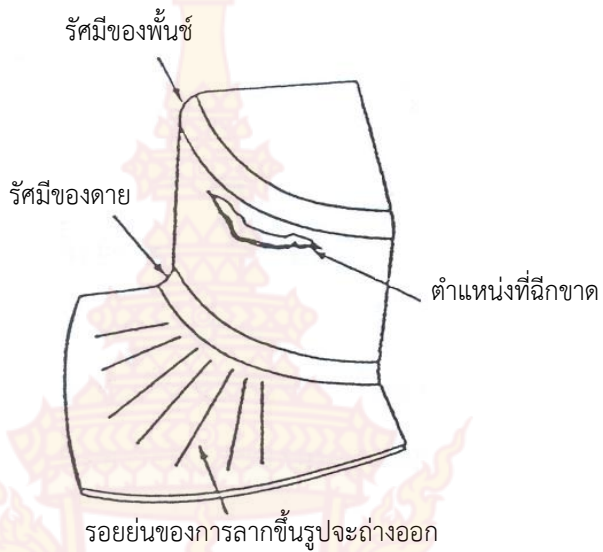
ลักษณะรูปร่างที่ปรากฏบนชิ้นงาน	ความเสียหายที่เกิดขึ้น	สาเหตุที่เกิดความเสียหาย	แนวทางการแก้ไขความเสียหาย
	การเกิดครีสน้ำที่ขอบชิ้นงาน	คุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางการรีดมีค่าไม่เท่ากัน	ใช้โลหะแผ่นที่มี Planer Anisotropy ต่ำ

1.2. การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม

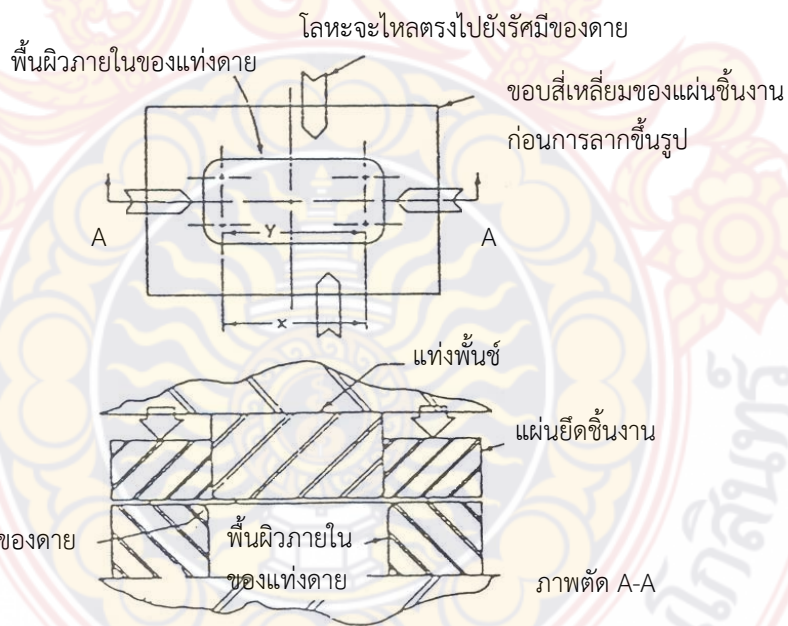
การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนั้นการไหลตัวของโลหะจะไม่เท่ากันทุกจุดทุกด้านเหมือนการลากขึ้นรูปทรงกระบอก ดังนั้นแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปแต่ละส่วนก็จะไม่เท่ากันตามไปด้วย โดยการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะแบ่งการเกิดการไหลตัวของโลหะได้ 2 ส่วน คือ ส่วนตรงมุมของกล่องซึ่งเกิดการลากขึ้นรูป (Drawing) อย่างแท้จริง และส่วนของผนังกล่องจะเป็นการขึ้นรูปในลักษณะเดียวกับการพับ (Bending)



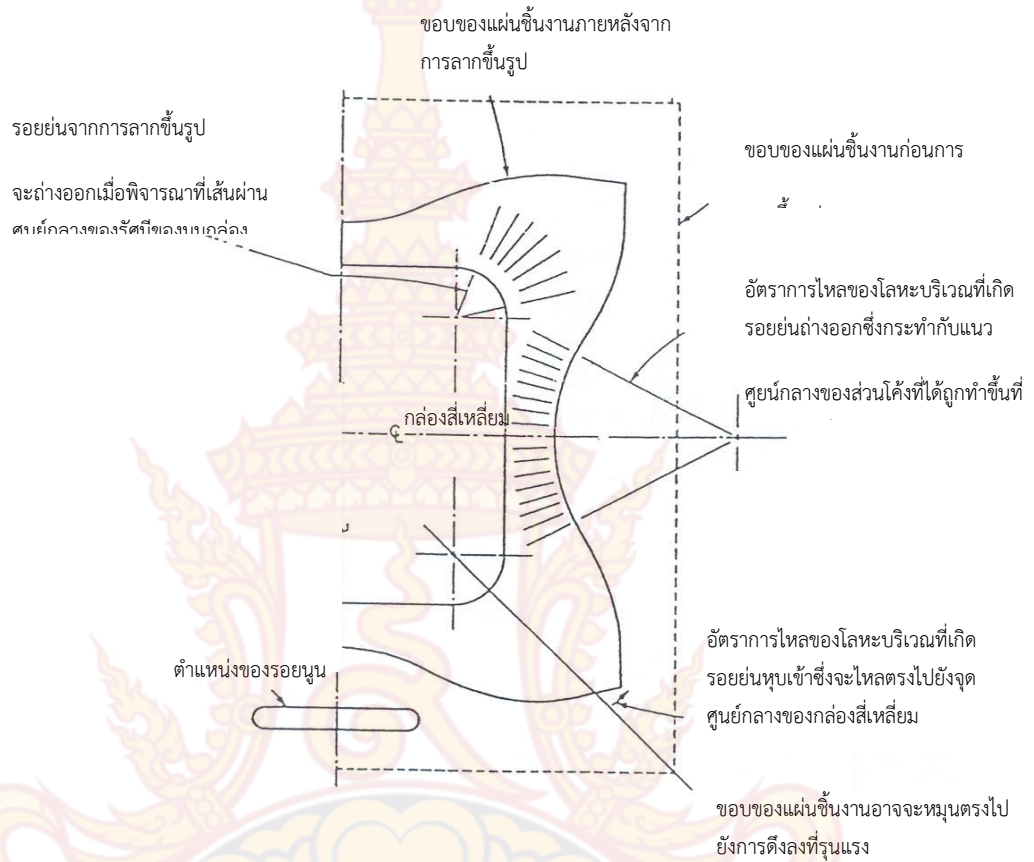
ภาพที่ 11 การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ



ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 13 การไหลของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 14 ลักษณะของรอยยับที่เกิดจากอัตราการไหล

2. เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

2.1 องค์ประกอบทางเคมี

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
ต่ำสุด						18.00	8.00	
สูงสุด	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	20.00	10.50	0.10

2.2 สมบัติเชิงกล

เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 มีสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304

มอดูลัสของยัง	190 กิกะปาสคาล
ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด	520 เมกะปาสคาล
ค่าความแข็งแรงแรงคราก	240 เมกะปาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง	0.30

3 ความหมายของไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันมีวิธีที่ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าตอบของการทำงานในด้านต่าง ๆ อยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น

1. ทฤษฎีทาง Finite volume เป็นเทคนิคของการหาค่าตอบของการทำงานซึ่งตัว mesh ของทฤษฎีนั้นจะไม่สามารถที่จะมีรูปร่างที่บิดเบี้ยวเพื่อให้เข้ากับงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้

2. ทฤษฎีทาง Finite element เป็นเทคนิคที่ใช้หาค่าตอบของพฤติกรรมต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ หลาย ๆ เอลิเมนต์ ที่ถูกกำหนดขึ้นบนชิ้นงานที่เลือกพิจารณา และยังเป็นเอลิเมนต์ ที่สามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับชิ้นงานได้ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้

3. ทฤษฎีทาง Finite difference เป็นเทคนิคที่มีการวิเคราะห์ โดยใช้โครงร่างตาข่าย ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านพื้นผิวของชิ้นงานเท่านั้น แต่ในการทำงานนั้นเราจะเลือกวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ค่อนข้างกว้างในการวิเคราะห์หาค่าตอบในงานประเภทนี้ และมีตัวอย่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดโลหะแผ่นที่ผ่านมา ซึ่งงานวิจัยเหล่านั้นก็ได้เลือกวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าไปช่วยในการทำงานเช่นกันระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีการคำนวณชนิดหนึ่งซึ่งได้นำมาวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาและออกแบบงานทางวิศวกรรมกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยได้รับการพัฒนาขึ้นมาในอดีตจากแรงผลักดัน เพื่อใช้วิเคราะห์และออกแบบงานโครงสร้างที่มีลักษณะที่ซับซ้อน และยังถูกพัฒนาออกไปเพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้านอื่น ๆ อีกด้วย

การวิเคราะห์และการปรับปรุงการออกแบบปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นนี้ อาจทำได้โดยการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้ โดยทั่วไปจะมีราคาที่สูงมาก และที่สำคัญที่สุดผู้ใช้จำเป็นต้องมีความรู้ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางโปรแกรมเหล่านั้นบ้าง จึงจะสามารถใช้ได้ถูกต้องและเกิดความมั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้ต่างจากโปรแกรมทางด้านกราฟฟิกที่ใช้ในการเขียนแบบวาดรูปกันทั่วไป หากต้องการใช้โปรแกรมกราฟฟิกเพื่อวาดรูปวงกลมบนจอภาพแล้วเห็นรูปวงกลมปรากฏขึ้น ผู้ใช้โปรแกรมก็จะเห็นว่าตนเองได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแล้วเพราะบนจอภาพปรากฏรูปวงกลมขึ้นมาจริง ๆ แต่ในการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ระดับความเค้น จะปรากฏขึ้นเป็นแถบสีต่าง ๆ กัน แสดงด้วยแถบสีแดง ส้ม เหลือง เขียว ฟ้ำ น้ำเงิน ม่วง เป็นต้น ผู้ใช้จะไม่สามารถตอบด้วยความมั่นใจได้ว่าแถบสีที่ปรากฏขึ้นนั้นเป็นผลลัพธ์ที่ถูกต้องหรือไม่ หากไม่ทราบว่าแถบสีต่าง ๆ นั้นถูกคำนวณมาได้อย่างไร แถบสีต่างๆเหล่านี้ถูกพล็อตขึ้นมาจากค่าของตัวเลขซึ่งถูกคำนวณด้วยการใช้ขั้นตอนในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผสมผสานกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) แบบต่าง ๆ กัน ในขั้นตอนที่สำคัญของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกประดิษฐ์ขึ้นมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่บ่งบอกสถานภาพความเป็นจริงของปัญหานั้น ๆ ปัญหาต่าง ๆ ทางวิศวกรรมล้วนมี

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกันเสมอ สมการย่อยเหล่านี้เองที่เป็นหัวใจอันแท้จริงและเป็นจุดเริ่มต้นของการประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ

นอกเหนือจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น ๆ แล้ว ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต รูปร่าง ของปัญหานั้นด้วย

ทั้ง 3 องค์ประกอบใหญ่นี้ ซึ่งคือ

1. ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย
2. เงื่อนไขขอบเขตในลักษณะต่าง ๆ
3. รูปร่างของปัญหาซึ่งอาจมีความซับซ้อน

สามารถแก้ปัญหาลักษณะโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นผลให้ระเบียบวิธีนี้ได้รับความนิยมในการแก้ไขปัญหากันอย่างกว้างขวาง ผู้วิเคราะห์สามารถใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหานั้น ๆ ได้เช่นกัน หากทราบถึงเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมและรูปร่างของปัญหาที่กำหนดมาให้ ความเข้าใจในภาพรวมเช่นนี้เองเป็นสาเหตุให้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในสาขาอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน ซึ่งนอกเหนือไปจากปัญหาทางวิศวกรรม จุดเด่นของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นคือ ความสามารถในการประยุกต์ใช้กับการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนทางรูปร่างได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัญหาที่ซับซ้อนเหล่านี้สามารถที่จะแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งหากมองด้วยสายตาในระยะไกลแล้ว เอลิเมนต์เล็กๆเหล่านี้ก็เหมือนกับรวมเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนที่เราต้องการวิเคราะห์ได้

อุปสรรคหลักที่เป็นต้นเหตุทำให้บุคคลทั่วไปไม่เข้าใจระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้โดยชัดเจนคือการแปลงระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปแบบของ Partial derivative ให้ไปเป็นสมการทางพีชคณิตสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ การแปลงดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ขั้นสูง รวมทั้งการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ กัน เช่น การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation function) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ การประยุกต์วิธีหาค่าอนุพันธ์และอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical differentiation and integration) การประยุกต์ระเบียบวิธีการแก้สมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่ (Algebraic simultaneous equation) ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ก็ได้ หากระบบสมการนั้นอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้นก็จำเป็นต้องประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อช่วยแก้เข้าไปอีก เหตุผลต่าง ๆ ข้างต้นนี้เอง ทำให้การเรียนรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกลายเป็นสิ่งจำเป็นก่อนการทำความเข้าใจระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ขนาดของระบบสมการพีชคณิตที่เกิดขึ้นจากระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของปัญหา ซึ่งอาจประกอบด้วยสมการย่อยเพียงหนึ่งสมการหรืออาจจะประกอบด้วยสมการย่อยถึงหลายแสนสมการก็ได้ ซึ่งเป็นผลทำให้การแก้ปัญหาลักษณะระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องทำการผ่านการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อหาผลลัพธ์ การรอผลลัพธ์เป็นเวลานานโดยปราศจากความเข้าใจว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำอะไรอยู่นั้นไม่ควรเกิดกับผู้ทำการวิเคราะห์ ผู้วิเคราะห์จึงควรมีความเข้าใจในขั้นตอนของการคำนวณโดยคร่าว ๆ ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะการวิเคราะห์ปัญหาขนาดใหญ่ นั้น จะประกอบด้วยตัวเลขเป็นจำนวนมากเกินกว่าที่จะนำมาพิจารณาให้เกิดความเข้าใจหรือพล็อตด้วยมือได้ จึงจำเป็นต้องใช้กราฟิกเพื่อการแสดงผล ตัวเลขจำนวนมากเหล่านี้จะถูกแปลงแล้ววิเคราะห์พล็อตขึ้นเป็นแถบสีบนชิ้นงานที่พิจารณา ผู้วิเคราะห์จึงจำเป็นต้องมีประสบการณ์ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในผลลัพธ์ที่คำนวณอย่างลึกซึ้ง

3.1 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางวิศวกรรม

เนื่องด้วยค่าใช้จ่ายของเครื่องมือและเวลาในการผลิตสูงขึ้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดส่วนดังกล่าวลง โดยสามารถที่จะทำให้สำเร็จได้โดยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองแบบของชิ้นงานและวิเคราะห์กระบวนการ

ในการทดลองการปฏิบัตินั้น ถ้ารูปร่างของชิ้นงานเป็นแบบที่ซับซ้อน เราจะต้องเสียเวลาเป็นอย่างมากตามไปด้วย แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะทำให้สามารถที่จะปรับเปลี่ยนขนาดของเครื่องมือได้โดยปราศจากการเพิ่มขึ้นของต้นทุน ทั้งยังสามารถที่จะช่วยในกระบวนการทดลองในการหาค่าที่เหมาะสม วิธีการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ จะสามารถบอกรายละเอียดที่จะเกิดขึ้นในชิ้นงาน (ในที่นี้หมายถึงการตัดโลหะแผ่น) ได้เช่น ค่าความเค้น ค่าความเครียด และลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่เปลี่ยนได้

การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการจำลองการตัดชิ้นงานเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และสามารถบอกสถานะที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งในการทดลองชิ้นงานจริงนั้นไม่สามารถทำได้ หรือถ้าหากว่าศึกษาก็จะมีความยุ่งยาก ใช้เวลามาก และเสียค่าใช้จ่ายในการทำสูงด้วย สิ่งเหล่านี้คือข้อดีของกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ผู้วิจัยเลือกทำการจำลองการตัดชิ้นงานด้วยกรรมวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่ไปกับการทดลองตัดชิ้นงานจริง ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการตัดชิ้นงาน ผลที่ได้จึงเป็นเพียงค่าทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น ความเที่ยงตรงและความถูกต้องของผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ ถ้าสามารถกำหนดสถานะการทำงานให้เหมือนกับการทำงานจริง กำหนดสมบัติของวัสดุได้ถูกต้อง ตลอดจนเลือกทฤษฎีและเกณฑ์การวิเคราะห์ความเสียหาย (Fracture criterion) ได้ถูกต้องและสอดคล้องกับงานที่กำลังทำการวิเคราะห์อยู่ ก็จะทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีเรื่องของความผิดพลาด (Error) ที่อาจจะเกิดจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์อีกด้วย

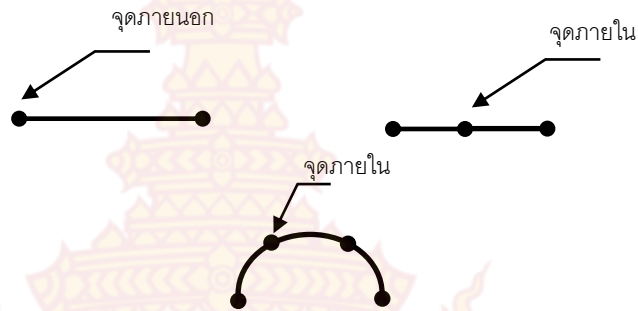
3.2 วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองการตัดชิ้นงานเพื่อแก้ปัญหาด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ได้ทำการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

แบ่งชิ้นงานจากรูปร่างเต็มแล้วนำมาวิเคราะห์ในส่วนที่มีการเปลี่ยนรูป หรือส่วนที่ให้ความสนใจ ในการวิเคราะห์ก็สามารถที่จะช่วยลดเวลาในการคำนวณของโปรแกรมได้และในส่วนที่มีการเปลี่ยนรูปมาก ๆ จะต้องแทนบริเวณนั้นด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ออกมามีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นสามารถแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

3.2.1 เอลิเมนต์มิติเดียว

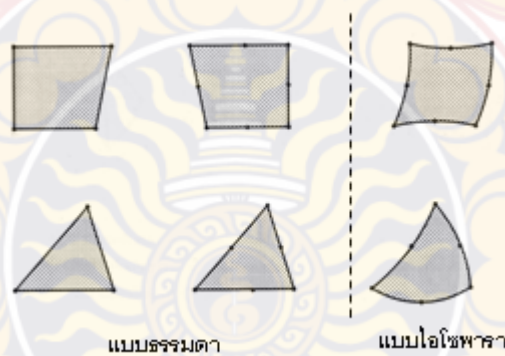
เอลิเมนต์มิติเดียวที่จะนำไปใช้ในปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน การโก่งงอของคานเป็นเอลิเมนต์ที่มีจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านหรือที่เรียกกันว่าจุดต่อภายในในกรณีที่ต้องการผลความแม่นยำเพิ่มขึ้นในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 เอลิเมนต์มิติเดียว [5]

3.2.2 เอลิเมนต์สองมิติ

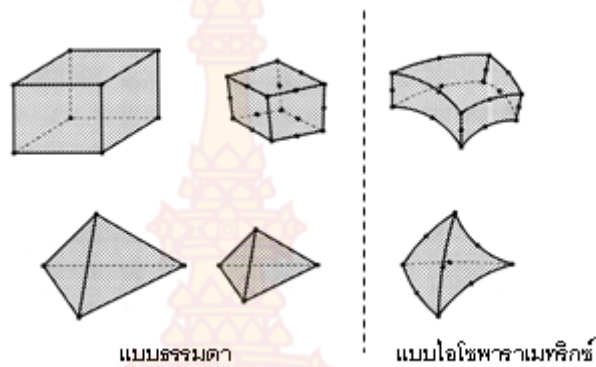
นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติ เช่น ความเค้นระนาบและความเค้นระนาบ (Plane stress and plane strain) โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูป



ภาพที่ 16 เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ [5]

2.3.2.3 เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์ที่อยู่ในระนาบสามมิติจะมีทิศทางการเคลื่อนตัวตามแนวแกนในสามแนวแกนคือ ในแนวแกน x , y และ z ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมปริซึมหรือรูปกรวยสามเหลี่ยมตลอดจนเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง ดังแสดงในรูป



ภาพที่ 17 เอลิเมนต์แบบสามมิติ [5]

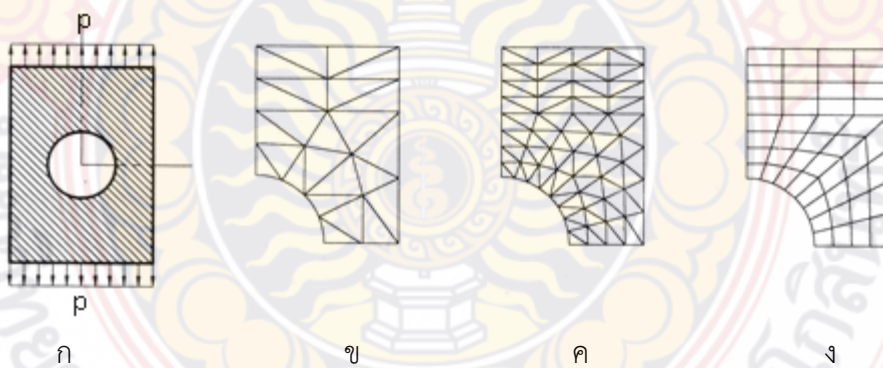
-หลักการแบ่งเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังต่อไปนี้

1. ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ
2. ใช้เอลิเมนต์ที่มีสี่เหลี่ยมด้านเท่าหรืออัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวเข้าใกล้หนึ่ง
3. ควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆในส่วนที่มีเอลิเมนต์หนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ใหญ่ในบริเวณ

ถัดไป

4. การออกแบบเอลิเมนต์จะต้องให้มีความเหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำที่สุด และไม่สิ้นเปลืองเวลาในการประมวลผล



ภาพที่ 18 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ [5]

จากภาพที่ 18 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ก. แผ่นโลหะมีรูตรงกลาง และมีโหลด P กระทำ
- ข. เอลิเมนต์สามเหลี่ยมหายาบ
- ค. เอลิเมนต์สามเหลี่ยมละเอียด

ง. เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง

การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การกระจัด และความเครียด-ความเค้น การหาสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด การกระจัด หรือความเครียดกับความเค้น เช่น ในกรณีที่เป็นปัญหามิติเดียวการยืดตัวของเอลิเมนต์ในทิศทางหนึ่ง ในกรณีของทิศทางในแนวแกน x ก็จะมีความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่กับความเครียดตามสมการ

$$\varepsilon_x = \frac{d_u}{d_x} \quad (8)$$

นอกจากการเปลี่ยนรูปทรง ที่มักทำให้ความต้านแรง ที่มักทำให้ความต้านแรง และความแข็งเพิ่มขึ้นแล้ว การทำให้แข็งด้วยความเครียด หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงจากการเปลี่ยนรูปเย็น ผลที่ตามมาก็คือ คุณสมบัติยืดดิ่งลดลง และความต้านแรงครากเปลี่ยนไป สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประสิทธิผลกับความเครียดประสิทธิผลที่เรียกว่ากฎยกกำลัง (Power law) อยู่ในรูป

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n + Y \quad (9)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (Strength coefficient)

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการขึ้นรูปมีการพัฒนามาตั้งแต่การตีกริตที่ขึ้นงานจริงแล้วนำไปขึ้นรูปเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียด หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนามาใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ เรียกว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งสามารถดูค่าจากการคำนวณได้หลายอย่างทั้งค่าความเค้น ความเครียด ค่าการแตกหัก การไหลตัว เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้ได้กับกระบวนการลากขึ้นรูปเช่นกัน กระบวนการลากขึ้นรูปโดยทั่วไปจะมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลต่อขึ้นงานสำเร็จ คือ รัศมีตายน์อันดับแรก รองลงมาคือ แรงแบงคโกลเดอร์และรัศมีพันซ์ตามลำดับ แรงเสียดทานของขึ้นงานกับแม่พิมพ์ ซึ่งแรงนี้จะแปรผันตรงตามแรงกดแบงคโกลเดอร์ แรงกดแบงคโกลเดอร์ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการแตก หรือฉีกขาดได้ แรงกดแบงคโกลเดอร์ที่น้อยเกินไปขึ้นงานจะเกิดรอยบริเวณผนัง การแก้ปัญหานี้มีหลายวิธีเช่น การแบงแบงคโกลเดอร์ออกเป็นส่วนๆ แต่ละส่วนจะมีช่องว่างทำให้เนื้อวัสดุไหลเขาไปได้ แล้วทำการหมุนไปเรื่อยๆ เมื่อระยะการกดของพันซ์เปลี่ยนไป ทำให้สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ลึกขึ้น นอกจากนี้ยังมี สารหล่อลื่นที่มีผลการแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นด้วย สารหล่อลื่นที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมีทั้งแบบที่เป็นของเหลวเช่น น้ำมัน และแบบที่เป็นของแข็งเช่น แผ่นฟิล์มเพอลิเมอร์ต่างๆ ความหนาของแผ่นฟิล์มจะมีผลต่อการไหลตัวของวัสดุเป็นอย่างมาก การเปลี่ยนรัศมีมุมพันซ์จากรัศมีวงกลมธรรมดา เป็นรัศมีรูปไข่แนวอนและแนวตั้งมีผลต่อ contact pressure อย่างมาก ตำแหน่งที่เกิด contact pressure จะต่างกัน และความรุนแรงของแต่ละจุดที่ต่างกันเช่นกัน เพื่อให้การลากขึ้นรูปมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีการใช้แบงคโกลเดอร์เป็นมุมเอียงมีผลต่อขึ้นงานสุดท้ายเป็น

อย่างมากและสามารถทำได้กับชิ้นงานที่เป็นวงกลมและสี่เหลี่ยม ดังนั้นขนาดมุมที่ใช้จึงต้องเหมาะสมกับงานรูปแบบนั้นๆด้วย ส่วนในวงการอุตสาหกรรมระดับไมโครก็มีการลากชิ้นรูปยังมีขนาดเล็กมากๆ นี้เช่นกัน ซึ่งตัวแปรต่างๆ จะต้องมีความสัมพันธ์กัน เช่น ความหนา ความยาว ความกว้าง ของชิ้นงาน เริ่มต้น ความลึกของชิ้นงานสุดท้าย รัศมีก้น รัศมีด้านข้าง รัศมีปากตายน์ ช่องว่างระหว่างพื้นที่กับตายน์ เป็นต้น ถึงอย่างไรการลากชิ้นรูปก็มีอัตราส่วนที่จำกัดดังนั้นชิ้นงานที่มีขนาดลึกมากๆ ไม่สามารถขึ้นรูปขึ้นตอนเดียวได้ ในการขึ้นรูปขั้นที่สองจะขึ้นรูปได้ยากขึ้นเนื่องจากค่าความเค้นตกค้างอยู่ อัตราการขึ้นรูปในขั้นตอนที่สองจึงน้อยลงตามไปด้วย



บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

สำหรับบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย การประยุกต์ใช้การทำแบบจำลองจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องของแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทำการวิเคราะห์และเก็บผลการวิจัย ที่บริษัท ศรีสหพัฒน์กิจ จำกัด เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น และหาแนวทางแก้ไขต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.1 เก็บข้อมูลของ วัสดุ ขนาดแม่พิมพ์ ขนาดชิ้นงาน และเครื่องจักรที่ใช้

เก็บข้อมูลของวัสดุโดยการ นำวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานไปทดสอบการดึง และศึกษา Drawing ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน โดยเก็บขนาดของแม่พิมพ์มาเพื่อนำไปเขียนแบบลงในโปรแกรม Cimatron E และเก็บข้อมูลชนิดเครื่องจักร ขนาดเครื่อง สารหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป

1.2 เตรียมข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการสร้างแบบของชิ้นงานและแบบของแม่พิมพ์ ด้วยโปรแกรม Cimatron E ซึ่งใช้เป็นพื้นผิวที่มีนามสกุลเป็น .IGS

1.3 จำลองการขึ้นรูป

นำข้อมูลที่ได้นำมา Import ลงในโปรแกรม Alair Hyperform เพื่อทำการสร้างแบบจำลองซึ่งได้แก่ ข้อมูลของแม่พิมพ์ ระยะของเครื่องที่ใช้ในการขึ้นรูป แรงในการขึ้นรูป เป็นต้น

1.4 วิเคราะห์ผลการขึ้นรูป

นำผลจากการจำลองที่ได้มากำหนดจุดทดสอบเพื่อดูผลจากการจำลองว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน และทำการปรับแก้ผลการสร้างแบบจำลองจนได้ผลที่ดีที่สุด

1.5 แก้ไขแม่พิมพ์

นำผลที่ได้จากการแก้ไขแบบจำลองจนได้ผลที่ดีที่สุด มาปรับแก้ที่แม่พิมพ์ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

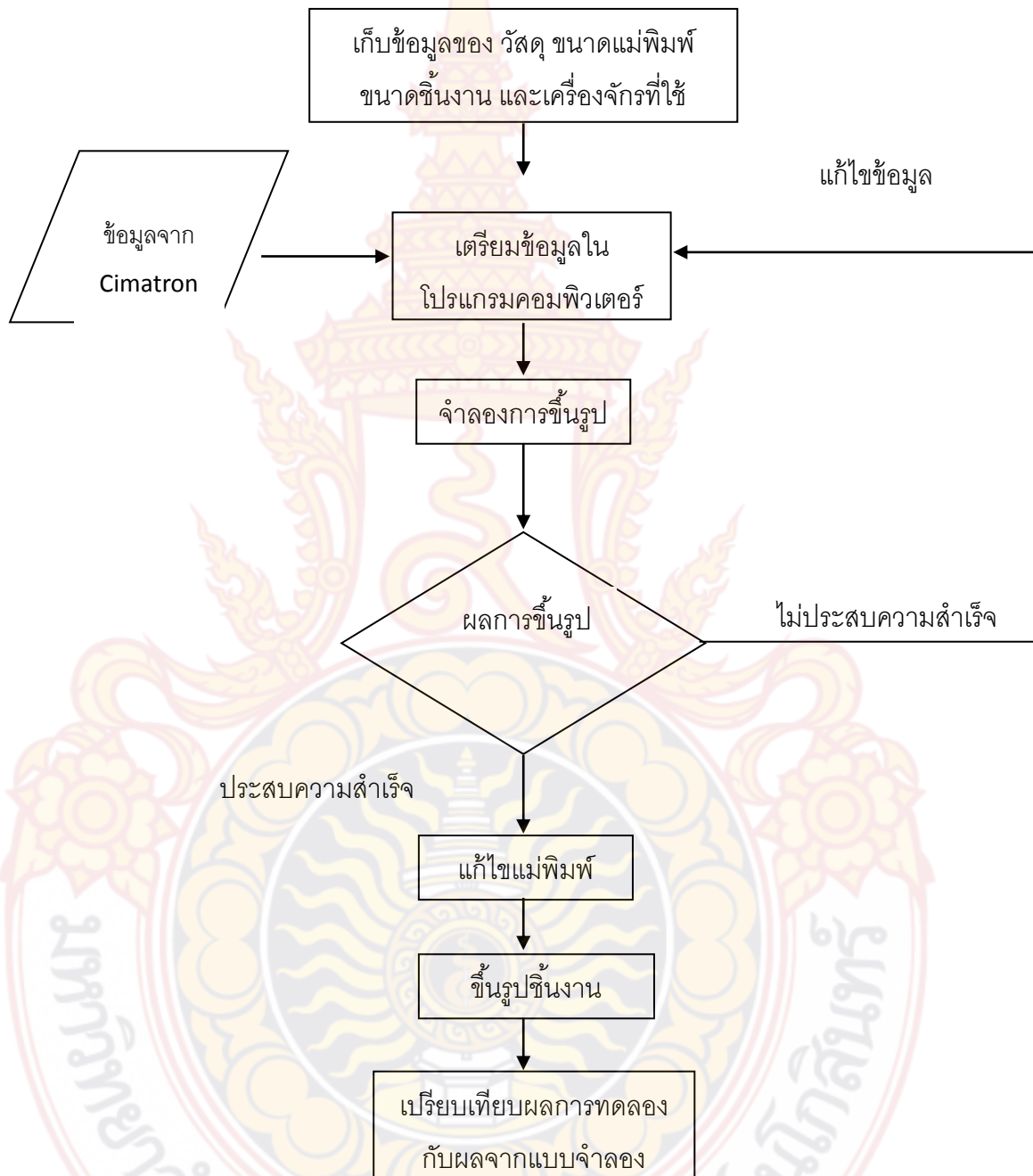
1.6 ขึ้นรูปชิ้นงาน

ทำการทดสอบผลของการปรับแก้แม่พิมพ์ด้วยเงื่อนไขที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง โดยการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานจริงที่ได้

1.7 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลอง

ทำการเปรียบเทียบผลของการขึ้นรูปของแม่พิมพ์จริงหลังจากทำการปรับแก้กับผลของแบบจำลอง

ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการดำเนินงานได้ดังนี้



ภาพที่ 19 แผนภาพในการดำเนินงาน

2 วัสดุและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

2.1 ใช้เหล็กแผ่น SUS 304 ตามมาตรฐาน JIS หนา 0.7 mm cold roll steel

ส่วนผสมทางเคมี	%C (คาร์บอน) = 0.08 max %Mn (แมงกานีส) = 2.0 %Si (ซิลิกอน) = 0.75 %P (ฟอสเฟส) = 0.045 %S (ซัลเฟต) = 0.03 %Cr (โครเมียม) = 18.20 %Ni (นิกเกิล) = 10.5 %N (ไนโตรเจน) = 0.1
คุณสมบัติทางกล	Tensile Strength 520 MPa Compression Strength 210 MPa Proof stress 0.2% 210 MPa Elongation A5 45% Hardness Rockwell B 92
คุณสมบัติทางกายภาพ	Density 8.00 g/cm ³ Melting Point 1400-1450 °c Modulus of Elasticity 193 Gpa Electrical Resistivity $0.072 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ Thermal Conductivity 16.2 W/m.K at 100 °c Thermal Expansion $17.2 \times 10^{-6} /K$ at 100 °c

3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

- ซอฟต์แวร์โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ Alair Hyperform
- คอมพิวเตอร์ Notebook ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
หน่วยประมวลผลกลาง Duo T2250 1.7 GHz
หน่วยความจำหลัก 512 MB
การ์ดแสดงผล 3 มิติ Geforce Go 7300

3.2 การทดลอง

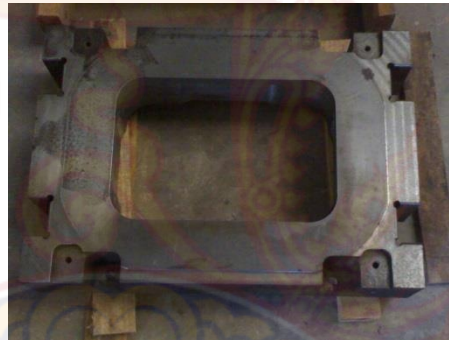
-แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปโลหะแผ่น



ก) ฟันซ์



ข) ดायน์



ค) แผ่นกดขึ้นงาน

ภาพที่ 20 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น

-เครื่องไฮดรอลิกเพรส (Hydraulic Press)



ภาพที่ 21 เครื่องไฮดรอลิกเพรสที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

-เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing) ขนาด 5 Ton



ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing)

- ขนาด Specimen ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง No.5 ตามมาตรฐาน JIS



ภาพที่ 23 Specimen ที่ใช้ในการทดสอบ

4 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ

4.1 ทดสอบหาค่าความแข็งแรงของวัสดุ

- ความเค้นคราก σ_0
- เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง n
- สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ K
- อัตราส่วนความเครียดพลาสติก R_m

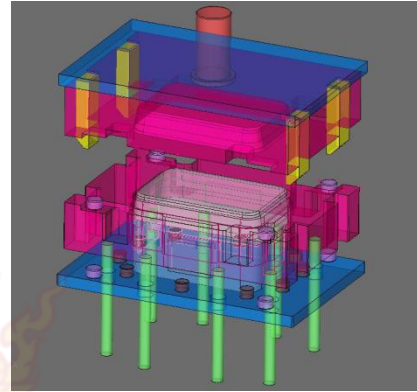
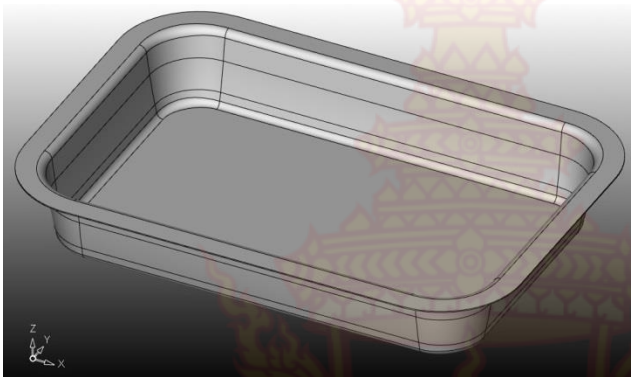
4.2 การทดสอบความแข็งแรงทางดึงของวัสดุ

- อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทาง 0 องศาแนวรีด r_0
- อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทาง 45 องศาแนวรีด r_{45}
- อัตราส่วนความแข็งแรงพลาสติกทิศทาง 90 องศาแนวรีด r_{90}
- อัตราส่วนปัวซอง ν
- ค่า Young's Modulus ของวัสดุ

5 ขั้นตอนในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 ขั้นตอนการเขียนแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์

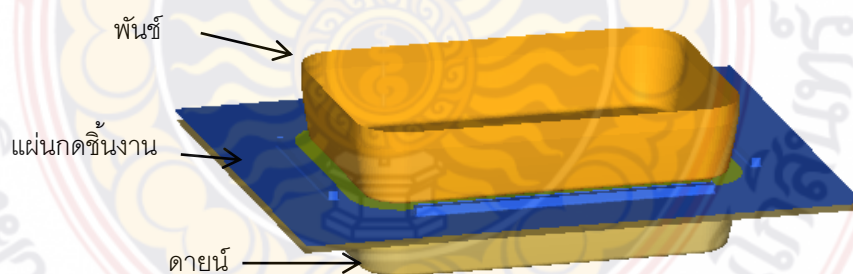
ทำการเขียนแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม Cimatron E ให้มีขนาดดังภาพที่ 24 ซึ่งทำการ Export ผิวชิ้นงานเป็นไฟล์ .IGS เพื่อใช้ในการทำงานร่วมกับ Alair Hyperform



ภาพที่ 24 ถาดสี่เหลี่ยมและแม่พิมพ์ที่ใช้การลากชิ้นรูปในโปรแกรม Cimatron E

5.2 สร้างแบบจำลองในโปรแกรม ชิ้นงานและแม่พิมพ์และทำการจำลอง

- ทำการ Import ที่ได้จากขั้นตอนแรกลงในโปรแกรม Alair Hyperform
- กำหนดคุณสมบัติของวัสดุและตัวแปรต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองและทำการประมวลผลเมื่อทราบสาเหตุการเกิดปัญหาแล้ว จะทำการปรับปรุงแก้ไขโมเดล สภาพเงื่อนไขการขึ้นรูป แล้วจึงทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น และทำซ้ำจนได้ชิ้นงานตามต้องการ

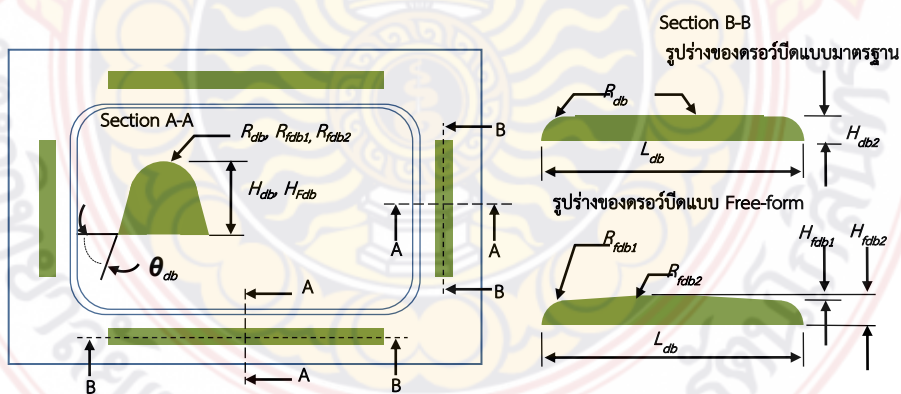


ภาพที่ 25 การสร้างแบบจำลองการลากชิ้นรูปในโปรแกรม Alair Hyperform

เงื่อนไขในการจำลองการลากขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางบอกเงื่อนไขในการจำลองการตัดโดยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รัศมีของแม่พิมพ์	รัศมีพื้นซ์ 4.3 mm, รัศมีตายน์ 5 mm	
แรงกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน	3 MPa	
วัสดุที่ใช้ทำการจำลอง	เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304), $t = 0.7$ mm, σ_u 672.08 MPa, Elongation 47.2%	
สมการควบคุมพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์	$\sigma = 1381\varepsilon^{0.35}$	
มอดุลัสของยัง (Young's modulus)	190 GPa	
อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio)	0.34	
การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (R value)	0°:1.005, 45°:0.685, และ 90°:1.409	
	ตรงกลาง	ด้านข้าง
รูปร่างของดรอปีตแบบมาตรฐาน	$W_{db} = 5$ mm	$W_{db} = 5$ mm
	$H_{db} = 4$ mm	$H_{db} = 4$ mm
	$R_{db} = 2.5$ mm	$R_{db} = 2.5$ mm
รูปร่างของดรอปีตแบบ Free-form	$W_{fdb} = 5$ mm	$W_{fdb} = 5$ mm
	$H_{fdb2} = 8$ mm	$H_{fdb1} = 0.5$ mm
	$R_{fdb2} = 1.3$ mm	$R_{fdb1} = 1.5$ mm
	$\theta_{db} = 70^\circ$	$\theta_{db} = 70^\circ$



ภาพที่ 26 แบบจำลองและขนาดของดรอปีต

6 วิเคราะห์ผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาสาเหตุ

หลังจากการเตรียมข้อมูลและกำหนดเงื่อนไขต่างๆเสร็จสิ้นแล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการจำลองการขึ้นรูปเพื่อการศึกษาและหาสาเหตุการเกิดปัญหาด้วยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการทดลองเปรียบเทียบผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลเฉลยสุดท้ายที่ประสบความสำเร็จในการลากขึ้นรูปของชิ้นงาน ซึ่งจะนำเงื่อนไขที่ปรับปรุงแก้ไขแล้วนำไปกำหนดโมเดลและสภาพเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

7. ทำการแก้ไขแม่พิมพ์และทำการทดลองเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

นำผลจากการ สร้างแบบจำลองจนได้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานแล้วไปทำการปรับแก้แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ และทำการทดสอบผลการปรับแก้ด้วยการขึ้นรูปชิ้นงานและเปรียบเทียบผลการทดสอบ

บทที่ 4 ผลการวิจัย/ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

จากการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะแผ่น SUS 304 หนา 0.7 mm ด้วยการทดสอบการดึง ผลการทดสอบวัสดุ จะมีคุณสมบัติทางกลดังนี้

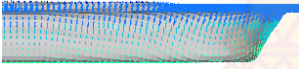
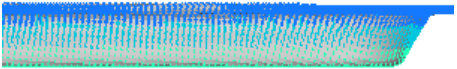
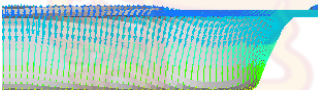
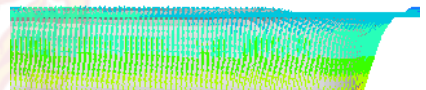
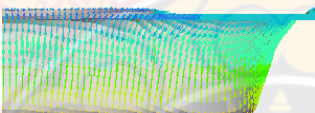
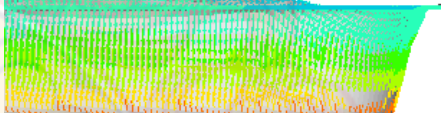
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดจริง	$\sigma = 1381\epsilon^{0.35}$	
- ความหนาแน่น	6.80e-05	
- โมดูลัสของยัง	1.91e+05	N/m ²
- อัตราส่วนปัวซอง	0.34	
- ความเค้นสูงสุด	672.08	MPa
- ความเค้นคราก	283.28	MPa
- อัตราส่วนความเครียดพลาสติก		
แนวรีด 0 องศา	1.005	
แนวรีด 45 องศา	0.685	
แนวรีด 90 องศา	1.409	

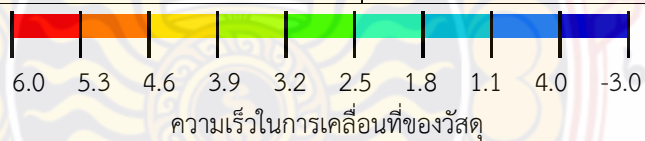
2. ผลการศึกษาการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Alair Hyperform

ปัญหาในกระบวนการลากขึ้นรูปสีกินยวมแก้ไขด้วยการใช้ดรอปด ซึ่งนอร์มัลมีหน้าที่ช่วยในการชะลอการไหลของเนื้อวัสดุให้ช้าลง ในชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ดรอปดจะมีหน้าที่ทำให้การไหลของวัสดุเท่ากันรอบตัวซึ่งเป็นการลดปัญหาการโก่งของผนังชิ้นงานแต่ความหนาที่ได้จะบางลง ดรอปดแบบมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 26 รูปร่างของดรอปด มีความสูงเท่ากันตลอดความยาวแต่การไหลของวัสดุแต่ละจุดของชิ้นงานมีความเร็วไม่เท่ากันถึงแม้จะเป็นด้านที่มีส่วนเรียบตรงเรื่องมาจากอิทธิพลของคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropic) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีดโลหะแผ่นนั่นเอง จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้พัฒนารูปร่างดรอปดให้สอดคล้องกับรูปร่างและผลกระทบที่เกิดขึ้น

2.1 การไหลของวัสดุ

ภาพที่ 27 แสดงการไหลจากผลจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปดแบบมาตรฐาน แสดงให้เห็นปริมาณการไหลของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากัน บริเวณผนังจะมีความเร็วในการไหลของวัสดุมากกว่าบริเวณรัศมีของวัสดุ และบริเวณตรงกลางของผนังจะมีความเร็วในการไหลมากที่สุดถึงแม้ผนังจะเป็นผนังตรง แสดงในภาพที่ 27(a-1) แสดงการไหลในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และภาพที่ 27(b-1) แสดงการไหลในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว และมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในระยะเวลาเคลื่อนที่ของพื้นที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 27(a-2) และ ภาพที่ 27(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 27(b-2) และ ภาพที่ 27(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบการไหลด้านสั้นกับด้านยาวที่ระยะเวลาเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านยาวจะมีการไหลของวัสดุมากกว่าผนังชิ้นงานด้านสั้น แสดงในภาพที่ 27(a) – 27(b) ตามลำดับ

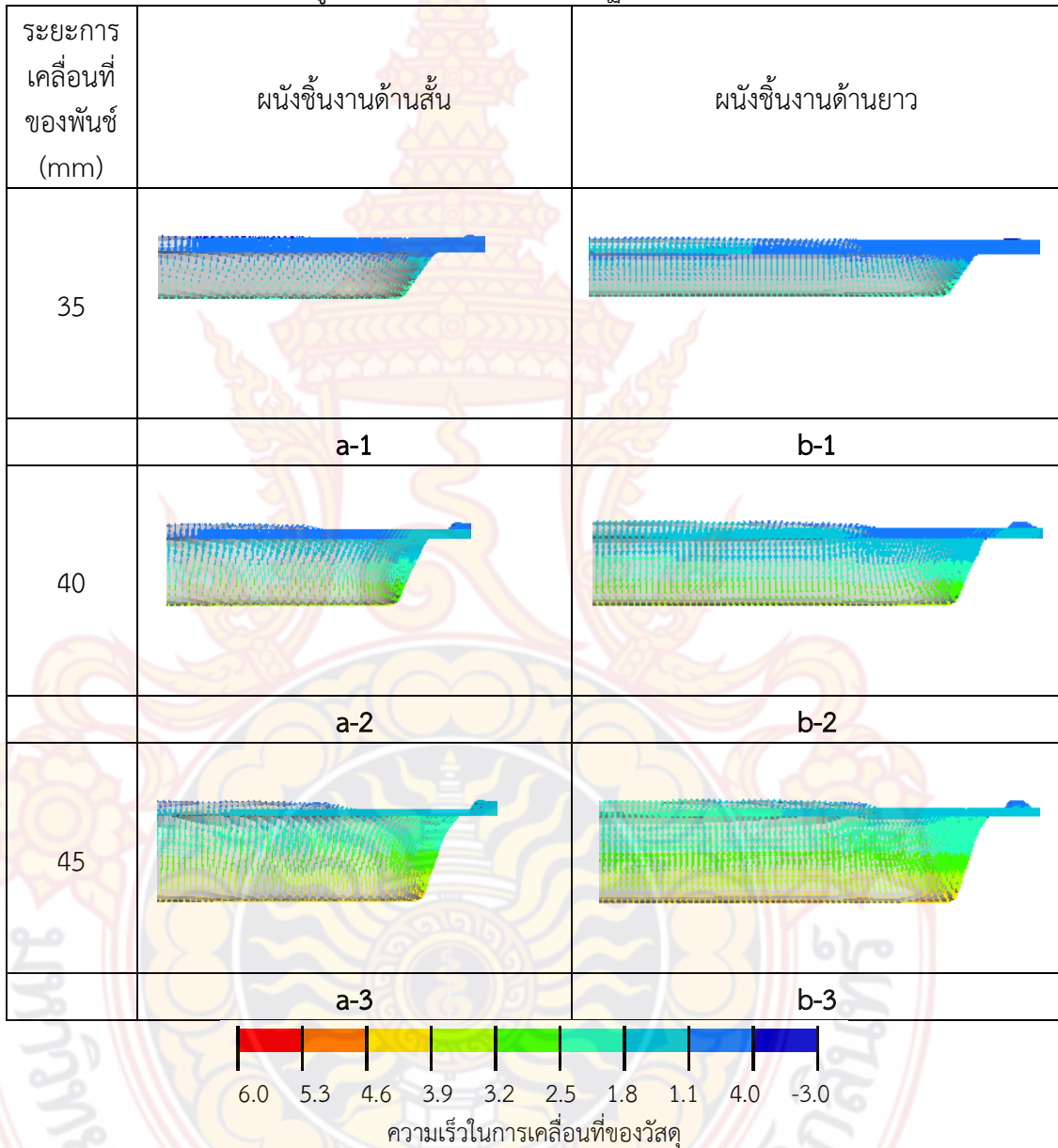
ระยะการเคลื่อนที่ของฟันซ์ (mm)	ผนังชิ้นงานด้านสั้น	ผนังชิ้นงานด้านยาว
35		
	a-1	b-1
40		
	a-2	b-2
45		
	a-3	b-3



ภาพที่ 27 แสดงการไหลของรูปร่างดรอปิดแบบมาตรฐาน
($W_{db} = 5 \text{ mm}$, $H_{db} = 4 \text{ mm}$, $R_{db} = 2.5 \text{ mm}$)

ภาพที่ 28 แสดงการไหลจากผลจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปิดแบบ Free-form แสดงให้เห็นปริมาณการไหลของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากัน บริเวณผนังจะมีความเร็วในการไหลของวัสดุมากกว่าบริเวณรัศมีของวัสดุ และบริเวณตรงกลางของผนังจะมีความเร็วในการไหลมากที่สุดถึงแม้ผนังจะเป็นผนังตรง แสดงในภาพที่ 28(a-1) แสดงการไหลในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และภาพที่ 28(b-1) แสดงการไหลในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว และมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดใน ระยะการเคลื่อนที่ของฟันซ์ที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 28(a-2) และ ภาพที่ 28(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 28(b-2) และ ภาพที่ 28(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบการไหลด้าน

สัมพันธ์กับด้านยาวที่ระยะการเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านยาวจะมีการไหลของวัสดุมากกว่าผนังชิ้นงานด้านสั้น แสดงในภาพที่ 28(a) – 28(b) ตามลำดับ จุดสำคัญคือการไหลที่ได้มีปริมาณที่น้อยลงเมื่อเทียบกับรูปร่างของดรอปปิดแบบมาตรฐาน



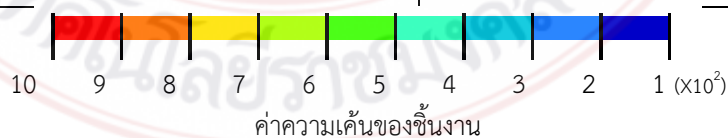
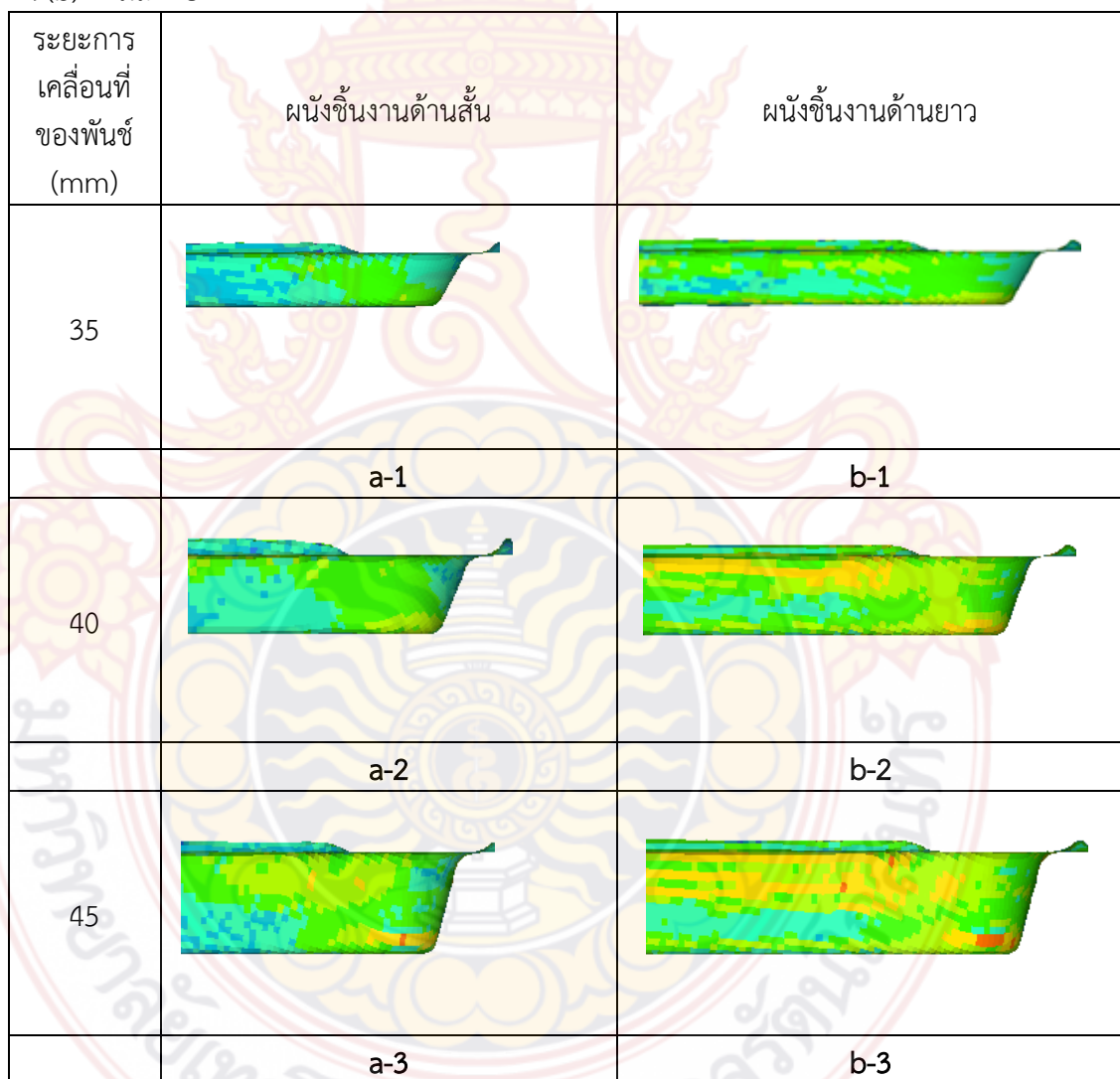
ภาพที่ 28 แสดงการไหลของรูปร่างของดรอปปิดแบบ Free-form

$$(W_{fdb} = 5 \text{ mm}, H_{fdb1} = 0.5 \text{ mm}, H_{fdb2} = 8 \text{ mm}, R_{fdb1} = 1.5 \text{ mm}, R_{fdb2} = 1.3 \text{ mm}, \theta_{db} = 70^\circ)$$

2.2 ความเค้นของวัสดุ

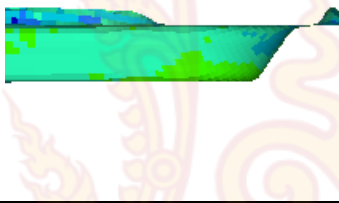
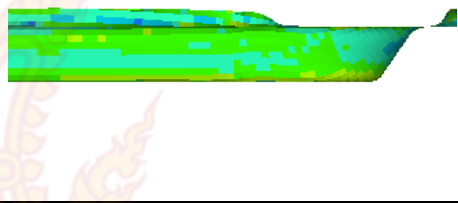
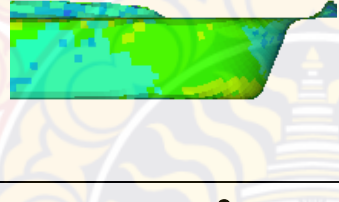
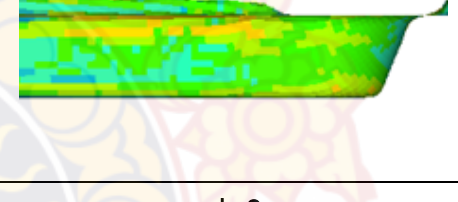
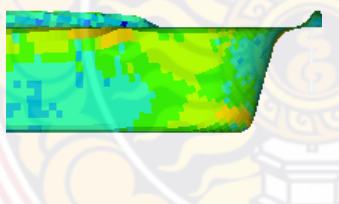
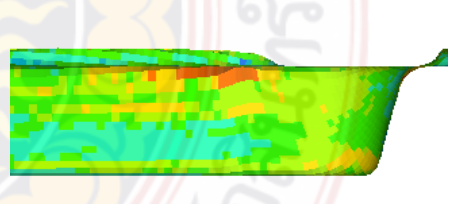
ภาพที่ 29 แสดงความเค้นจากผลจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปปิดแบบมาตรฐาน แสดงให้เห็นความเค้นของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากัน บริเวณที่เป็นส่วนตรงของชิ้นงานจะมีค่าความเค้นดึงที่มากกว่าความเค้นอัด ในขณะที่บริเวณมุมของชิ้นงานจะมีค่าความเค้นอัดมากกว่าความ

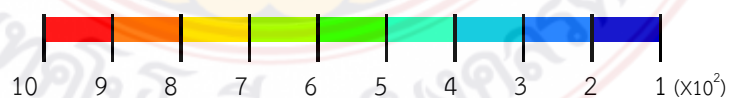
เค้นดึง บริเวณรัศมีปากตายน์ แสดงในภาพที่ 29(a-1) แสดงค่าความเค้นในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และภาพที่ 29(b-1) แสดงค่าความเค้นในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว แต่เมื่อวัสดุไหลพ้นรัศมีปากตายน์ มาแล้ว ชิ้นงานจะมีความเค้นดึกที่มากตลอดทั้งชิ้นงาน และจะมากที่สุดบริเวณมุมของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลตัวที่ยากของชิ้นงานบริเวณมุม และมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในระยะเวลาเคลื่อนที่ของพินซ์ที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 29(a-2) และ ภาพที่ 29(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 29(b-2) และ ภาพที่ 29(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบความเค้นด้านสั้นกับด้านยาวที่ระยะเวลาเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านสั้นจะได้รับผลกระทบจากความเค้นบริเวณมุมของรัศมีมากกว่าผนังด้านยาว จึงทำให้ค่าความเค้นดึงมีค่าน้อยกว่า แสดงในภาพที่ 29(a) – 29(b) ตามลำดับ



ภาพที่ 29 แสดงความเค้นวัสดุของรูปร่างดรอปิดแบบมาตรฐาน
 ($W_{db} = 5 \text{ mm}$, $H_{db} = 4 \text{ mm}$, $R_{db} = 2.5 \text{ mm}$)

ภาพที่ 30 แสดงความเค้นจากผลจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปิดแบบ Free-form แสดงให้เห็นความเค้นของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่าดรอปิดแบบมาตรฐาน บริเวณที่เป็นส่วนตรงของชิ้นงานจะมีค่าความเค้นดิ่งที่มากกว่าความเค้นอัด ในขณะที่บริเวณมุมของชิ้นงานจะมีค่าความเค้นอัดมากกว่าความเค้นดิ่ง บริเวณรัศมีปากตายนี้ แสดงในภาพที่ 30(a-1) แสดงค่าความเค้นในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น

ระยะการเคลื่อนที่ของพินซ์ (mm)	ผนังชิ้นงานด้านสั้น	ผนังชิ้นงานด้านยาว
35		
	a-1	b-1
40		
	a-2	b-2
45		
	a-3	b-3



ค่าความเค้นของชิ้นงาน


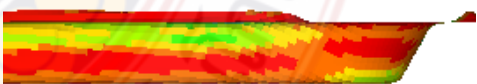
ภาพที่ 30 แสดงความเค้นวัสดุของรูปร่างของดรอปิดแบบ Free-form

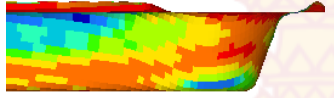
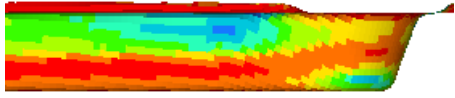
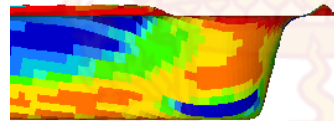
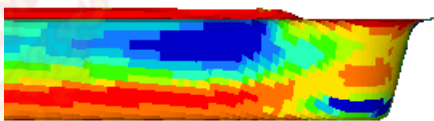
($W_{fdb} = 5 \text{ mm}$, $H_{fdb1} = 0.5 \text{ mm}$, $H_{fdb2} = 8 \text{ mm}$, $R_{fdb1} = 1.5 \text{ mm}$, $R_{fdb2} = 1.3 \text{ mm}$, $\theta_{db} = 70^\circ$)

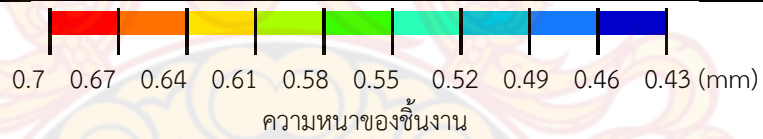
และภาพที่ 30(b-1) แสดงค่าความเค้นในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว แต่เมื่อวัสดุไหลพันรัศมีปากตายน์มาแล้ว ชิ้นงานจะมีความเค้นดึกที่มากตลอดทั้งชิ้นงาน และจะมากที่สุดบริเวณมุมของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลตัวที่ยากของชิ้นงานบริเวณมุม และมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในระยะเวลาเคลื่อนที่ของพินซ์ที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 30(a-2) และ ภาพที่ 30(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 30(b-2) และ ภาพที่ 30(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบความเค้นด้านสั้นกับด้านยาวที่ระยะเวลาเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านสั้นจะได้รับผลกระทบจากความเค้นบริเวณมุมของรัศมีมากกว่าผนังด้านยาว จึงทำให้ค่าความเค้นดิงมีค่าน้อยกว่า แสดงในภาพที่ 30(a) – 30(b) ตามลำดับ

2.3 ความหนา

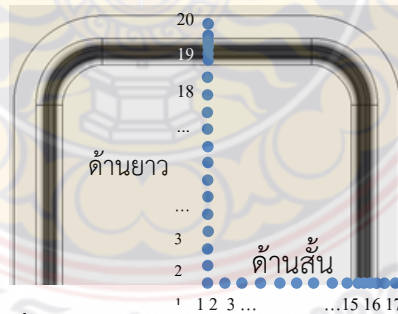
ภาพที่ 31 แสดงความหนาของชิ้นงานจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปิดแบบมาตรฐาน เนื่องจากปริมาณการไหลของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากัน โดยเฉพาะบริเวณมุมของชิ้นงานที่มีปริมาณการไหลของวัสดุที่น้อยจึงทำให้ชิ้นงานบริเวณมุม มีความบางค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผนังด้านตรงของชิ้นงาน แสดงในภาพที่ 31(a-1) แสดงความหนาของชิ้นงานด้านสั้น และภาพที่ 31(b-1) แสดงความหนาของชิ้นงานยาวและมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในระยะเวลาเคลื่อนที่ของพินซ์ที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 31(a-2) และ ภาพที่ 31(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 31(b-2) และ ภาพที่ 31(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบความหนาด้านสั้นกับด้านยาวที่ระยะเวลาเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านยาวจะมีความหนาของวัสดุมากกว่าผนังชิ้นงานด้านสั้น แสดงในภาพที่ 31(a) – 31(b) ตามลำดับ ภาพที่ 32 แสดงตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงาน และภาพที่ 33 แสดงกราฟเปรียบเทียบความหนาของดรอปิดแบบมาตรฐานกับดรอปิดแบบ Free-form แสดงให้เห็นถึงความหนาของการขึ้นรูปแบบ Free-form มีความหนามากกว่าแบบมาตรฐาน

ระยะเวลาเคลื่อนที่ของพินซ์ (mm)	ผนังชิ้นงานด้านสั้น	ผนังชิ้นงานด้านยาว
35		
	a-1	b-1

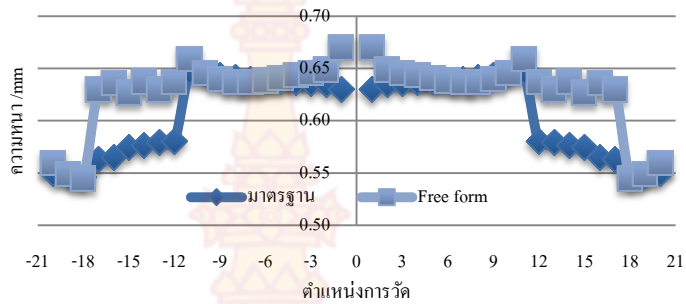
ระยะการเคลื่อนที่ของพินซ์ (mm)	ผนังชิ้นงานด้านสั้น	ผนังชิ้นงานด้านยาว
40		
	a-2	b-2
45		
	a-3	b-3



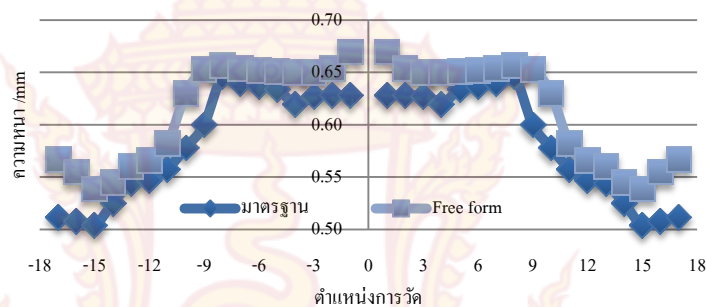
ภาพที่ 31 แสดงการไหลของรูปร่างดรอปิดแบบมาตรฐาน
 ($W_{db} = 5 \text{ mm}$, $H_{db} = 4 \text{ mm}$, $R_{db} = 2.5 \text{ mm}$)



ภาพที่ 32 ตำแหน่งการวัดความหนาของชิ้นงาน



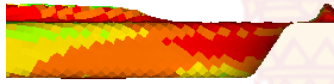
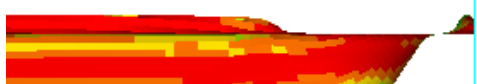
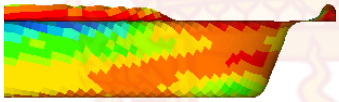
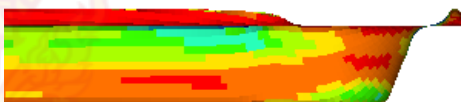
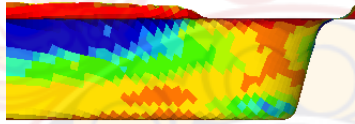
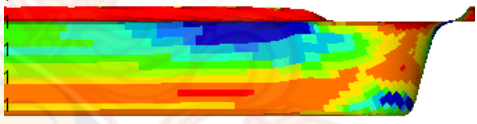
(a) ด้านยาว



(b) ด้านสั้น

ภาพที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบความหนาของดรอปีดแบบมาตรฐานกับดรอปีดแบบ Free-form

ภาพที่ 34 แสดงความหนาของชิ้นงานจากการจำลองในแบบรูปร่างของดรอปีดแบบ Free-form จะเห็นว่าค่าความหนาของวัสดุมีค่าที่ดีกว่าการใช้ดรอปีดแบบมาตรฐาน เนื่องจากปริมาณการไหลของวัสดุในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากันถูกควบคุมการไหลได้ดีขึ้นจากดรอปีดแบบ Free-form โดยเฉพาะบริเวณมุมของชิ้นงานที่มีปริมาณการไหลของวัสดุที่น้อยจึงทำให้ชิ้นงานบริเวณมุม มีความบางค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผนังด้านตรงของชิ้นงาน แสดงในภาพที่ 34(a-1) แสดงความหนาของชิ้นงานด้านสั้น และภาพที่ 34(b-1) แสดงความหนาของชิ้นงานยาวและมีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในระยะเวลาการเคลื่อนที่ของพื้นที่มากขึ้น แสดงในภาพที่ 34(a-2) และ ภาพที่ 34(a-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านสั้น และ ภาพที่ 34(b-2) และ ภาพที่ 34(b-3) ในด้านผนังชิ้นงานด้านยาว เมื่อเทียบความหนาด้านสั้นกับด้านยาวที่ระยะเวลาเคลื่อนที่เดียวกันจะเห็นว่า ผนังชิ้นงานด้านยาวจะมีความหนาของวัสดุมากกว่าผนังชิ้นงานด้านสั้น แสดงในภาพที่ 34(a) – 34(b) ตามลำดับ

ระยะการเคลื่อนที่ของพินซ์ (mm)	ผนังชิ้นงานด้านสั้น	ผนังชิ้นงานด้านยาว
35		
	a-1	b-1
40		
	a-2	b-2
45		
	a-3	b-3



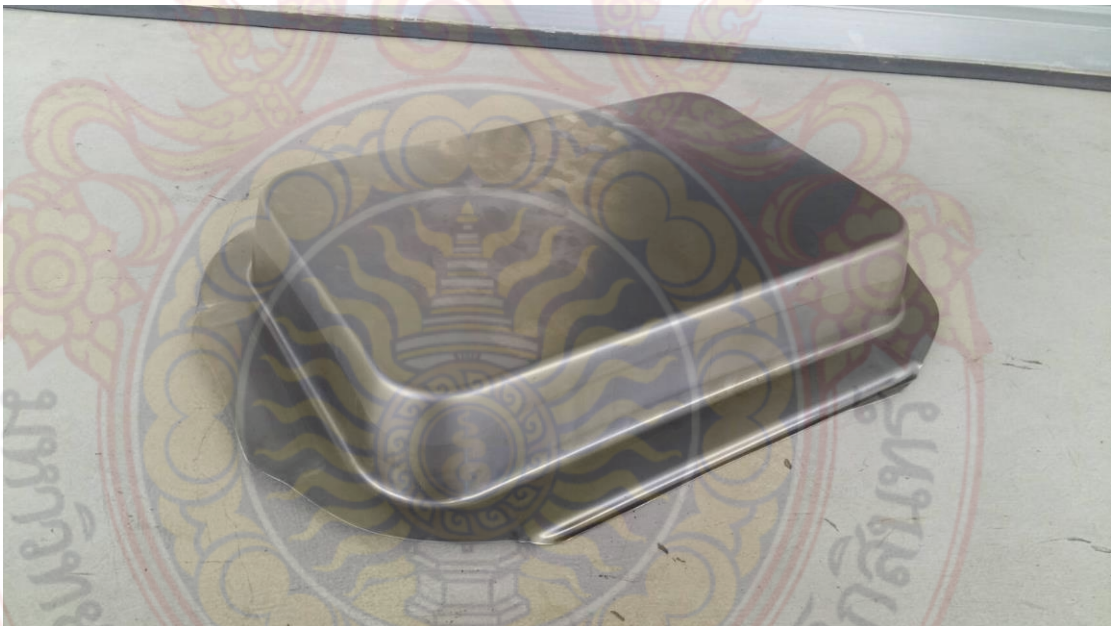
ภาพที่ 34 แสดงความหนาชิ้นงานของรูปร่างของดรอปิดแบบ Free-form ($W_{fdb} = 5 \text{ mm}$, $H_{fdb1} = 0.5 \text{ mm}$, $H_{fdb2} = 8 \text{ mm}$, $R_{fdb1} = 1.5 \text{ mm}$, $R_{fdb2} = 1.3 \text{ mm}$, $\theta_{db} = 70^\circ$)

3. เที่ยงผลการทดลอง

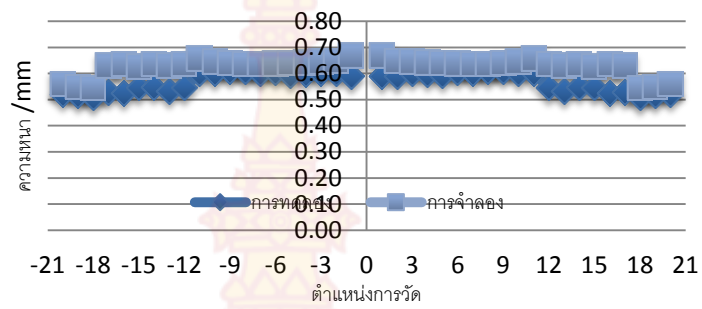
ภาพที่ 36 และ ภาพที่ 37 แสดงตัวอย่างการลากชิ้นรูปที่ได้จากการทดลองแบบรูปร่างของดรอปิดแบบมาตรฐานและดรอปิดแบบ Free-form ตามลำดับ การเปรียบเทียบความหนาที่ได้จากกระบวนการลากชิ้นรูปสักจะได้อาการทดลองและแรงจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างผิดพลาดประมาณจากการจำลองและการทดลองประมาณ 2.8% แสดงภาพที่ 38



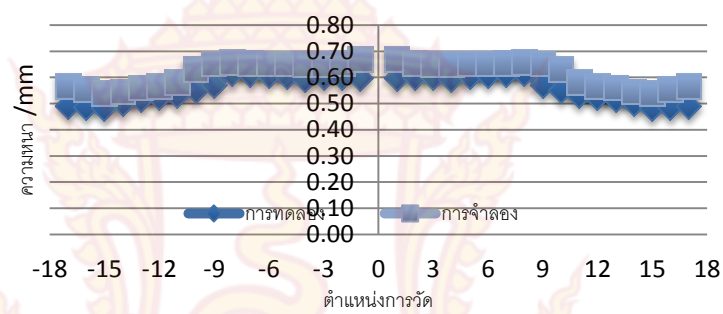
ภาพที่ 35 ชิ้นงานที่ใช้ดรอปิดแบบมาตรฐาน



ภาพที่ 36 ชิ้นงานที่ใช้ดรอปิดแบบ Free-form



(a) ด้านยาว



(b) ด้านสั้น

ภาพที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบความหนาของครอปัดแบบครอปัดแบบ Free-form จากการผลิตและการหล่อ

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ผลของการจำลองเพื่ออธิบายกระบวนการขึ้นรูปนั้นความสามารถของโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นนับว่า เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ส่วนของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในโปรแกรมนั้น ต้องมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงให้ได้มากที่สุด ทั้งในเรื่องของคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่า คุณสมบัติอื่นๆ รวมทั้งเงื่อนไขด้านการขึ้นรูปทั้งหมด เช่น เงื่อนไขของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป กระบวนการของการขึ้นรูป เป็นต้น โดยความถูกต้องของข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการหาปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อ การขึ้นรูปเป็นอย่างมาก ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการออกแบบเงื่อนไขและสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาแล้วนั้น เมื่อทำการแก้ไขปรับปรุงการขึ้นรูปด้วยเงื่อนไขที่ได้จากผลการจำลองพบว่า ผลของการนำวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีส่วนร่วมในการจัดการกับตัวแปรต่างๆ ที่มีอยู่มากมาย ทำให้ขอบเขตของการศึกษาเพื่อแก้ไข ทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้นกว่าการลองผิดลองถูก ซึ่งเป็นวิธีการในอดีตที่ต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์ในการทำงานมาก และเสียค่าใช้จ่ายในการหาตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อปัญหาเป็นอย่างมาก ดังนั้นการนำความรู้ทางการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการออกแบบและทำการปรับแก้ปัญหานั้น จึงเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการปรับแก้ได้เป็นอย่างดี

จากผลการทดลองการปรับปรุงแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตโดยการลดปัญหาการบางลงที่เกิดจากการไหลตัวของส่วนตรงของถาดสี่เหลี่ยมสเตนเลสที่มีอัตราการไหลตัวได้เร็วกว่าส่วนอื่น ด้วยการติดตั้ง ดรอปิดแบบ Free-form แทนการใช้ดรอปิดแบบมาตรฐานลงบนแม่พิมพ์ โดยการแก้ปัญหานี้ ได้มีการนำเอาวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการจำลองการขึ้นรูปและทำการปรับปรุงเงื่อนไขต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยหลังจากได้ทำการทดลองเพื่อปรับตัวแปรต่างๆ ของปัญหาแล้ว จึงได้ นำเงื่อนไขที่ได้จากการสร้างแบบจำลองไปทำการปรับแก้ที่แม่พิมพ์จริง ซึ่งผลการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลการดำเนินการจากการสร้างแบบจำลอง จะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการติดตั้งด้วย ดรอปิดแบบ Free-form ลงในแม่พิมพ์แล้ว ผลจากการสร้างแบบจำลองพบว่า ชิ้นงานที่ลดการบางลงของผนังด้านข้างทั้งด้านสั้นและด้าน ซึ่งเราจะสังเกตจากการเทียบความหนาของชิ้นงาน และในส่วนของชิ้นงานที่ได้จากการนำเงื่อนไขไปทำการปรับปรุงแม่พิมพ์พบว่า ชิ้นงานที่ได้หลังจากการทดสอบขึ้นรูปมีอัตราการไหลตัวของชิ้นงานในส่วนตรงที่خالลง และทำให้ผลการดำเนินการโดยการนำเอาวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาสาเหตุของปัญหานั้นสามารถให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง

2. ข้อเสนอแนะ

1. การหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้นในโปรแกรม Alair Hyperform เป็นเพียงการคลี่ชิ้นงานที่ได้จากการ Import ชิ้นงานเข้าไปในโปรแกรมเท่านั้น ในส่วนของการใช้งานจริงนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการลากขึ้นรูปนั้นมีการยึดตัวออกมา ซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรมที่ไม่สามารถ

เมื่อค่าของการยืดตัวของวัสดุนี้ได้ตั้งนั้นการใช้งานการหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้นนี้จึงเป็นเพียงการวางแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้มีขนาดตามที่กำหนดเท่านั้น โดยในทางปฏิบัตินั้นต้องทำการเผื่อขนาดของการยืดตัวออกเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะวัสดุและลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการขึ้นรูป

2. การทดสอบการใส่ดรอปีดแบบ Free-form และแบบมาตรฐาน ของโปรแกรม Alair Hyperform ยังมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากความสามารถของ โปรแกรมยังไม่สามารถที่จะทำการจำลองขนาดของดรอปีด ที่มีความแม่นยำเป็นรูปแบบของสามมิติได้ และจากข้อจำกัดในการขึ้นรูปนี้ โปรแกรมได้แก้ไขโดยการหาจุดเหมาะสมของชิ้นงานนี้ด้วยการกำหนด เป็นเส้นโดยจะมีการแทนค่าความสามารถในการไหลตัวของวัสดุซึ่งจะนำไปช่วยในการหาขนาดของดรอปีดที่มีความเหมาะสมกับการผลิตและมีความเหมาะสมกับการไหลตัวได้ แต่เพื่อให้ได้ผลการสอบที่แน่นอนเนื่องจากขนาดของดรอปีด ที่เป็น รูปทรงแบบ 3 มิติ นั้นโปรแกรมไม่สามารถแสดงได้ จึงควรทำการสร้างจริงที่ผิวของแม่พิมพ์ เพื่อให้กระบวนการขึ้นรูปมีความใกล้เคียงกับกระบวนการจริง

บรรณานุกรม

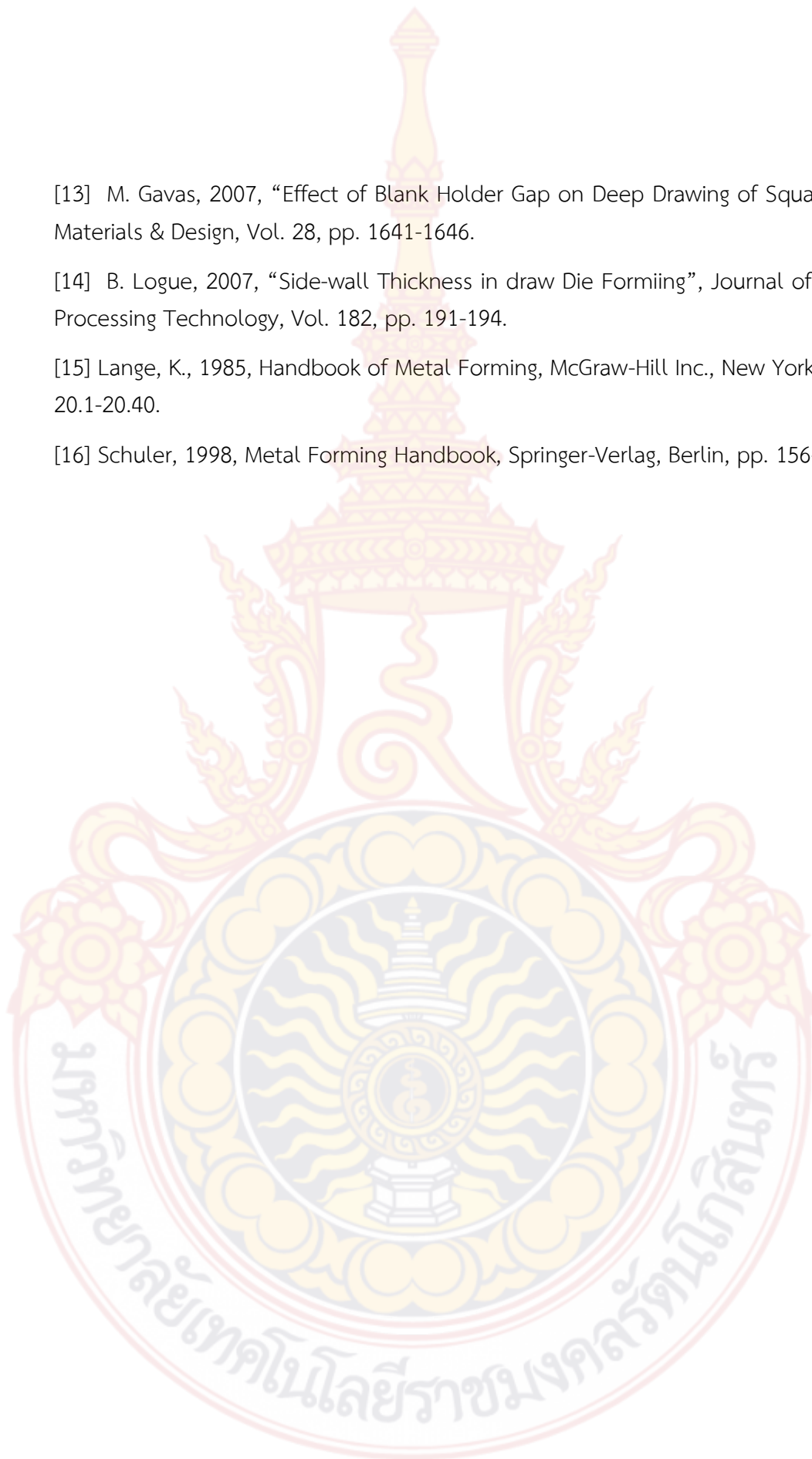
- [1] Douglas C. Montgomery, 1991, Design and Analysis of Experiments, Third Edition, John Wiley & Sons, Singapore, pp.408-410 and 414-432.
- [2] Babatubde A. Ogunnaiké. 2010, Random Phenomena Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers, CRC Press Taylor & Francis Group, pp.792-793.
- [3] M.A. Hassan, 2003, "A Novel Technique of Friction Aided Deep Drawing Using a Blank-Holder Divided into Four Segments", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 408-413.
- [4] F. Micari, 1996, "Prediction of Ductile Fracture Occurrence in Deep Drawing of Square Boxes", Annals of the CIRP, Vol. 15/1, pp. 259-262.
- [5] Zhenyu Hu, 2011, "Realisation and Application of Size Dependent FEM-Simulation for Deep Drawing of Rectangular Work Pieces", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol.4, pp.90-95
- [6] X.Z. Wang, 2011, "Investigation of Die Radius Arc Profile on Wear Behaviour in Sheet Metal Processing of Advanced High Strength Steels", Material and design, Vol. 32, pp. 1118-1128.
- [7] T.S. Yang, 2010, "Investigation of the Strain Distribution with Lubrication During the Deep Drawing Process", Tribology International, Vol. 43, pp. 1104-1112.
- [8] L.M.A. Hezam, 2009, "Development of a New Process for Producing Deep Square Cups Through Conical Dies", International Journal of Mechanical Tool & Manufacturing, Vol. 49, pp. 773-780.
- [9] L.M. Smith, 2009, "A New Experimental Test Apparatus for Binder Draw Bead Simulations", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 4942-4948.
- [10] Daxin E, 2008, "Stress Analysis of Rectangular Cup Drawing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 205, pp. 469-476.
- [11] Halil. Ibrahim Demirci, 2008, "Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: Theoretical and experimental investigation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 206, pp. 152-160.
- [12] G.H. Bae, 2007, "Simulation-Based Prediction Model of the Draw-Bead Restraining Force and its Application to Sheet Metal Forming Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 123-127.


[13] M. Gavas, 2007, “Effect of Blank Holder Gap on Deep Drawing of Square Cups”, Materials & Design, Vol. 28, pp. 1641-1646.

[14] B. Logue, 2007, “Side-wall Thickness in draw Die Forming”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 191-194.

[15] Lange, K., 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Inc., New York, pp. 20.1-20.40.

[16] Schuler, 1998, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag, Berlin, pp. 156-193.

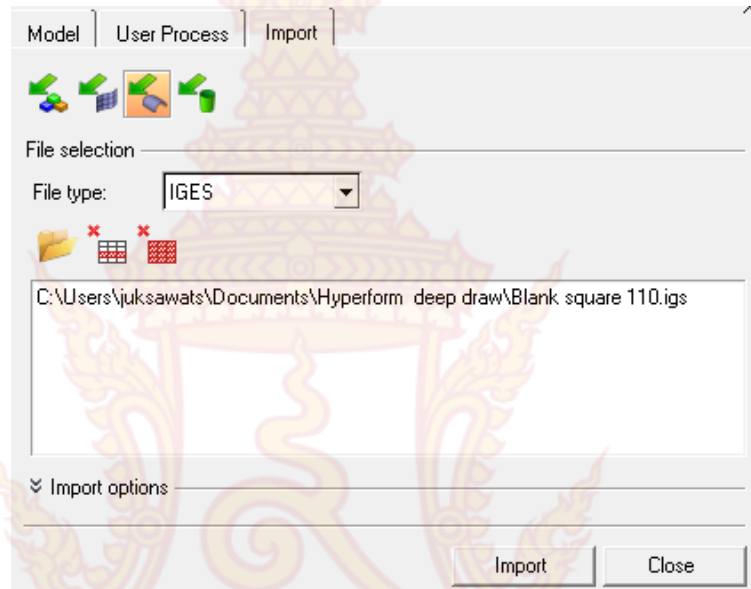




ภาคผนวก ก
วิธีการใช้โปรแกรม Alair Hyperform

ขั้นตอนการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Altair Hyperform

1. การ Import รูปร่างและขนาดของแผ่นเปล่าและแม่พิมพ์จากไฟล์ CAD โดยคลิกที่แถบเครื่องมือ File / Import / Geometry แล้วคลิกที่ไอคอน select file เพื่อ browse ไปยังไฟล์แผ่นเปล่าและแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้แล้วจึงคลิก Import ดังภาพที่ ข.1



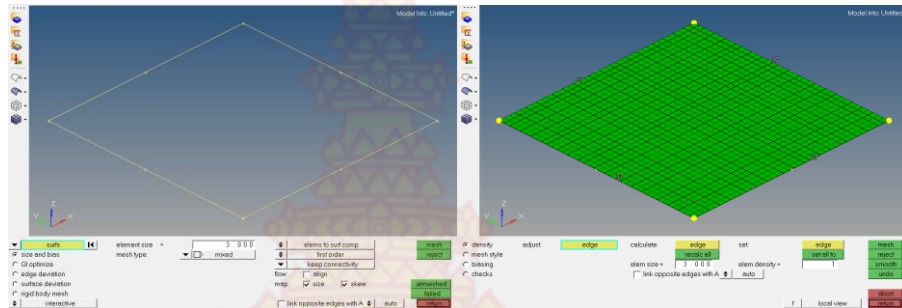
ภาพที่ ก.1 หน้าต่าง Import รูปร่างและขนาดของแผ่นเปล่าและแม่พิมพ์

2. การสร้างพื้นผิวให้กับแม่พิมพ์โดยการคลิกที่แถบเครื่องมือ Mesh / Create / 2DAutomesh แล้วทำการคลิกเลือกผิวของแม่พิมพ์ในส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน (พื้นผิวที่เลือกแล้วจะแสดงภายในเส้นขอบสีขาว) แล้วคลิกที่ปุ่ม mesh ดังภาพที่ ข.2



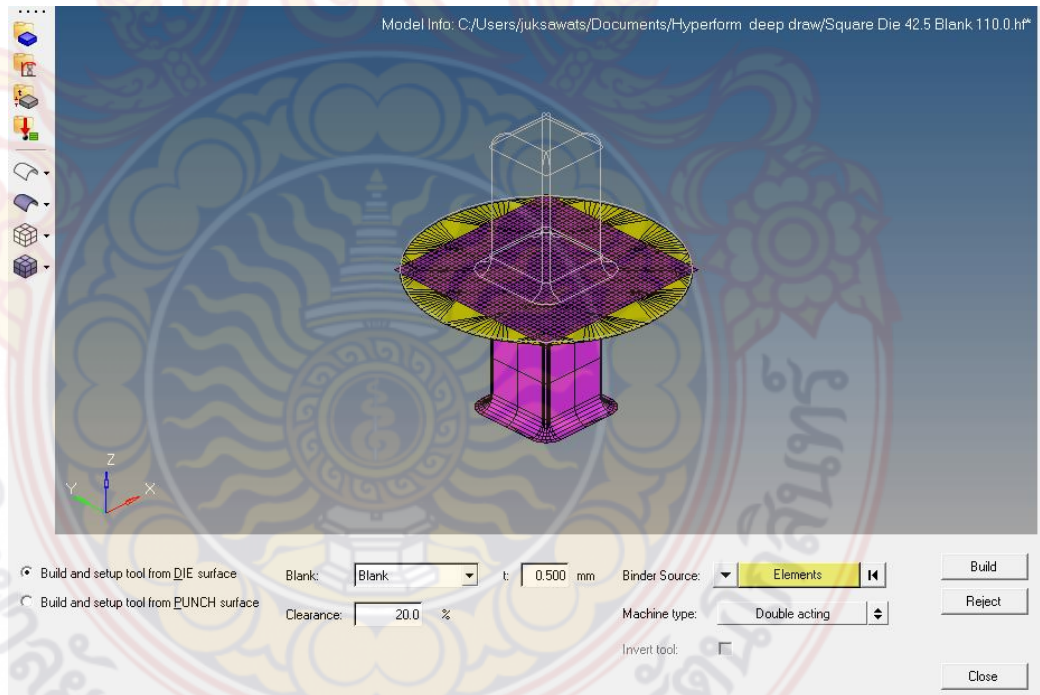
ภาพที่ ก.2 หน้าต่าง mesh สำหรับสร้างอนุภาคของแม่พิมพ์

3. การสร้างแผ่นเปล่า โดยการคลิกที่แถบเครื่องมือ Mesh / Create / 2DAutomesh แล้วทำการคลิกที่แผ่นเปล่า แล้วคลิกปุ่ม mesh ดังภาพที่ ข.3



ภาพที่ ก.3 หน้าต่าง mesh สำหรับสร้างอนุภาคของชิ้นงาน

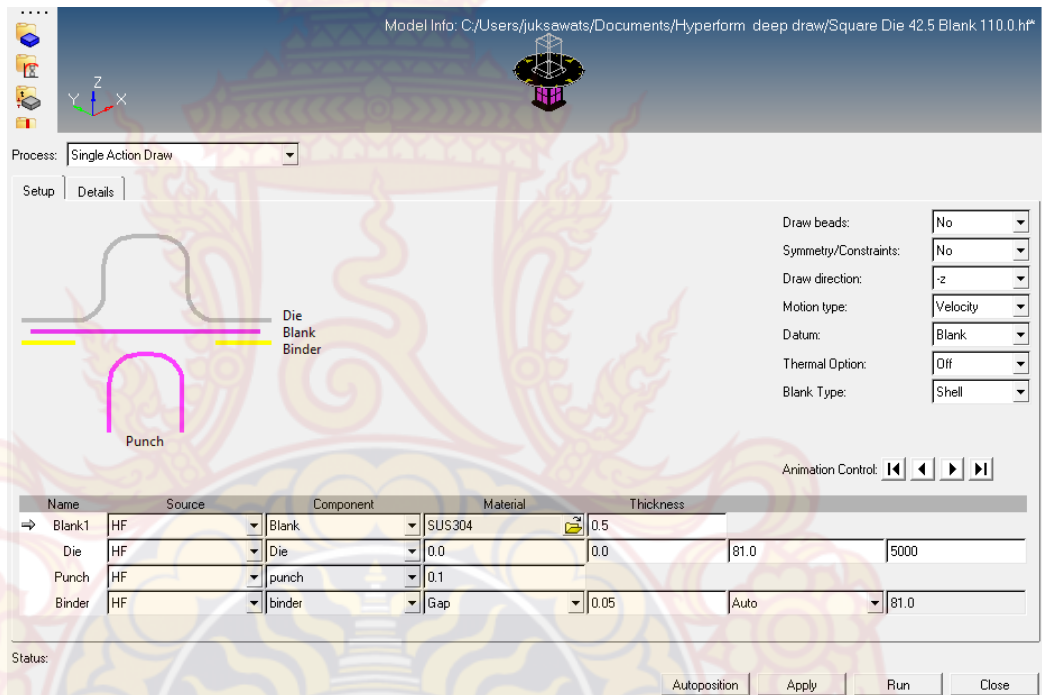
4. ทำการสร้างแผ่นจับชิ้นงานและพื้นซ์ โดยการคลิกที่แถบเครื่องมือ Setup / Tool Setup เลือก binder source เป็น surface และคลิกบนผิวของแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับชิ้นงานแล้วคลิก Build ดังภาพที่ ข.4



ภาพที่ ก.4 หน้าต่าง Tool setup สำหรับสร้างแผ่นจับงาน

5. การระบุกระบวนการทำงาน โดยการคลิกที่แถบเครื่องมือ Tool / Auto process และระบุค่าพารามิเตอร์ดังนี้
- Process: Single Action Draw

- Material: SUS 304
 - Thickness: 0.50
 - Binder gap: 0.01
 - Friction: 0.10 สำหรับผิวที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น Iloform และไม่ได้เคลือบ Oleophobic
 - Friction: 0.03 สำหรับผิวที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น Iloform และเคลือบ Oleophobic
- คลิกที่ปุ่ม Apply แล้วจึงคลิกที่ปุ่ม Run เพื่อให้โปรแกรมเริ่มทำการจำลองผล ดังภาพที่ ข.5



ภาพที่ ก.5 หน้าต่าง Autoprocess สำหรับกำหนดกระบวนการและตัวแปรในการจำลอง



ภาคผนวก ข

Free-form draw-bead application in deep-drawing process

Free-form draw-bead application in deep-drawing process

Wiriyakorn Phanitwong 1* and Sutasn Thipprakmas 2**

* Dept. of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Thailand

** Dept. of Tool and Materials Engineering, King Mongkut's University of Technology
Thonburi, Thailand

Corresponding author's E-mail address: wiriyakorn.pha@rmutr.ac.th

Abstract: Deep drawing is a significant metal forming process used in the many sheet-metal forming industries such as automotive industry, household utensil industry, aviation industry and electrical industry. The defects of wrinkle, material thinning, and concave/convex feature are main problems to obstacle the increases in quality of deep-drawn parts. Many past researches were carried out to investigate these defects as well as to increase in quality of deep-drawn parts via experiments and numerical analysis. Absolutely, draw bead is a rib-like projection and it is usually mounted on either the die or the blank holder. It acts as a material flow barrier and controls the smooth material flow into the die cavity and over the punch of a draw die. Therefore, the use of traditional draw-bead shape is difficult and limited to control the material flow into die cavity and achieve the high quality of deep-drawn parts. In the present research, to increase the quality of deep-drawn parts by decreasing in material thinning, the free-form draw-bead is proposed. As the results, in terms of material thinning, they showed that the quality of deep-drawn parts obtained by using free-form draw-bead is better than that obtained by using traditional draw-bead. Therefore, to increase in the quality of deep-drawn parts, the free-form draw-bead should be recommended to apply in deep-drawing process especially for complicated shape parts and difficult -to-form materials.

Keywords: Deep drawing; Draw bead; Thinning; Concave; Convex; Finite element method

1. Introduction

The complicate geometry of deep drawn part is increasingly required. The high dimension precision is required resulted in the severe formability and defect occurrences. In the past researches, they investigated effects of draw-bead characteristics in rectangular deep drawing parts. The result showed the occurrences of concave wall feature and wall thinning [1]. Some researches were performed to investigate the effects of draw-bead on the quality of deep-drawn parts and the developments of draw-bead were proposed [2-3]. However, in the past researches, the traditional draw-bead shape was investigated such as round bead, vee bead, and angular bead [2-4]. In addition, in the past researches, the draw bead shape and draw bead position were also investigated and developed to control the inner wrinkling during hydrodynamic deep drawing [5] and the automated design of draw-bead was also proposed and applied in deep drawing process. [6].

2. FEM-simulation procedure

The rectangular deep-drawn part is used as an examined model and the difficult-to-form material of stainless steel grade 304 (SUS304, JIS) with a thickness of 0.7 mm which was shown in Table 1 is used as workpiece material. Figure 1 shows the simulation model and detail of draw-bead parameter. The commercial finite element analysis code, HyperForm, is used as a tool to examine the material thinning.

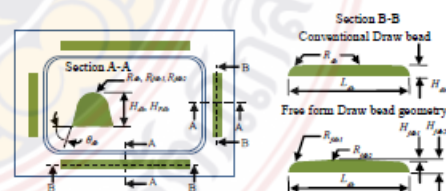


Fig. 1 FEM simulation model and details of draw-bead parameters.

Tool radius	Punch radius 4.3 mm, Die radius 5 mm	
Blank holder force	3 MPa	
Sheet material	Stainless steel (SUS304), $t = 0.7$ mm, σ_u 672.08 MPa, Elongation 47.2%	
Constitutive equation	$\sigma = 1381\epsilon^{0.35}$	
Young's modulus	190 GPa	
Possion ratio	0.34	
Plastic strain ratio (R value)	0°:1.005, 45°:0.685, and 90°:1.409	
	center	side
Conventional draw-bead geometry	$W_{db} = 5$ mm	$W_{db} = 5$ mm
	$H_{db} = 4$ mm	$H_{db} = 4$ mm
	$R_{db} = 2.5$ mm	$R_{db} = 2.5$ mm
Free form draw-bead geometry	$W_{fdb} = 5$ mm	$W_{fdb} = 5$ mm
	$H_{fdb1} = 8$ mm	$H_{fdb1} = 0.5$ mm
	$R_{fdb2} = 1.3$ mm	$R_{fdb1} = 1.5$ mm
	$\theta_{db} = 70^\circ$	$\theta_{db} = 70^\circ$

3. Results and discussion

Figure 2 shows position of the measured point on the sectioned deep drawing part with reference to the material thickness. With the final punch stroke, Figure 3(a) and (b) show the comparison of material thickness on length and width sides, respectively, in the cases of conventional draw-bead geometry and free-form draw-bead. As these results shown, they could be explained that, in the case of conventional draw-bead the material thinning in the case of free-form draw-bead was smaller than that in the

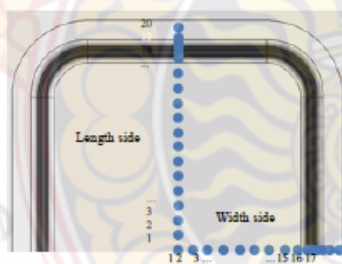


Fig. 2 Illustration of measured points.

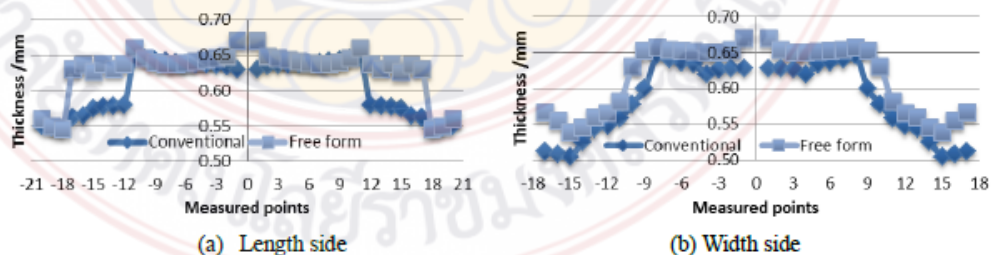


Fig. 3 Comparison of material thickness between conventional and free form draw bead.

case of conventional draw-bead as show in figure 3.

Therefore, the material thinning could be prevented by the free from draw bead application.

4. Summary

Base on the material thinning distribution analysis, by using free-form draw-bead, the material thinning could be reduced.

5. References

- [1] Phanitwong, W. and Thipprakmas, S., "Effects of Draw-Bending Characteristics on Concave Wall Feature in Rectangular Deep-Drawn Parts," *Key Engineering Materials*, 549(2013) pp. 92-99.
- [2] Phanitwong, W. and Thipprakmas, S., "Analysis of Draw Bead Geometry on Wall Thinning and Concave/ Convex Feature in Rectangular Deep Draw Parts," *Adv. Mater. Res.*, 189-193(2011) pp. 274-2707.
- [3] Phanitwong, W. and Thipprakmas, S., "Parameter Design of Draw Bead in Rectangular Deep-Drawing Process Using Taguchi Technique," *Metal Forming*, (2012) pp. 379-382.
- [4] Wang Z., Zhang Q, Liu y., and Zhang Z., "A Robust and Accurate Geometric Model for Automated Design of Drawbeads in Sheet Metal Forming," *Computer-Aided Design*, 92 (2017) pp. 42-57.
- [5] Bao M., Min W., Xiangdong W., Sheng Y., Xudong X., and Jie L., "Inner Wrinkling Control in Hydrodynamic Deep drawing of an irregular Surface Part using Drawbeads," *Chinese Journal of Aeronautics.*, 27(3)(2014) pp. 697-707.
Li R., Bohn M.L., Weinmann K.j., and Chandra A., "A Study of the Optimization of Sheet Metal Drawing with Active Drawbeads," *J Manuf Process.*, 2(4) (2000) pp. 205-216.

Acknowledgements. This research was partially supported by the Rajamangala University of Technology Rattanakosin under grant No. C-30/2562. The authors would like to express their gratitude to King Mongkut's University of Technology Thonburi for supporting of FEM code in this research.



ประวัติผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล ดร.วิริยากร พานิชวงษ์

2. ตำแหน่งปัจจุบัน -

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบล
ศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
เบอร์โทร 085-1539910
wiriyakorn.pha@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หลักสูตร การขึ้นรูปวัสดุและ
นวัตกรรมการผลิต, 2556

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หลักสูตร วิศวกรรมการขึ้นรูปโลหะ,
2553

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หลักสูตร วิศวกรรมเครื่องมือและ
วัสดุ, 2551

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Advanced forming of high-performance steels, lightweight metal alloys, metal
matrix composites (MMCs), etc.

Development of tool and processes

Modeling of materials and forming

Finite Element Analysis (FEA) of advanced forming processes

Optimisation approaches in advanced forming processes

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

ไม่มี

ตัวอย่างส่งปริญญางานการวิจัย
ตัวอย่างที่ 1 กรณีที่มีนักวิจัย 1 คน

การศึกษาการประยุกต์ใช้ตรอบีตสำหรับกระบวนการลากขึ้นรูป วิจัยกร พานิชวงษ์ 2562

