

บทที่ 2

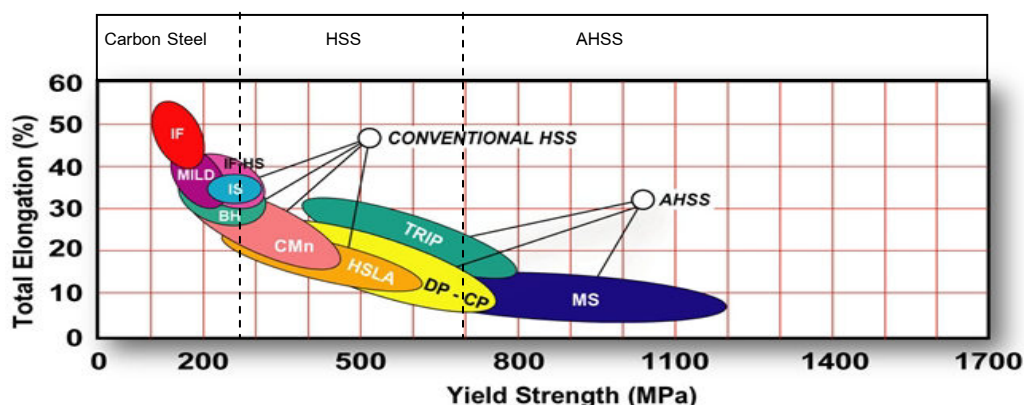
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองจำเป็นต้องนำความรู้จากหลายๆ ส่วนที่เกี่ยวข้องมาใช้ในกระบวนการวิจัย ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นช่วยในการออกแบบการทดลอง และช่วยตัดสินใจในการสรุปผลการทดลองในบทต่อไป

2.1 วัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

Takita และคณะ [1] ได้กล่าวถึงการใช้ HSS เป็นวัสดุคืบในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศญี่ปุ่นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็ทำให้น้ำหนักของรถยนต์รุ่นใหม่ที่ถูกผลิตออกมามีน้ำหนักลดลงด้วยการใช้งานของเหล็กกลุ่มดังกล่าว จะพิจารณาถึงลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนยานยนต์นั้น เช่น ชิ้นส่วนเสริมแรงของประตูรถ กันชนรถ และในอีกหลายชิ้นส่วน จะใช้เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงไม่เกิน 590 MPa ส่วนกรณีเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงเกินนี้จะใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างง่าย ไม่ซับซ้อน เพื่อป้องกันการบิดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปอ่อนเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากปัญหาการบิดตัวกลับและความสามารถในการขึ้นรูปที่ลดต่ำลงแล้ว ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้องเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูป และต้องปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ในการขึ้นรูปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

International Iron & Steel Institute ได้จัดการประชุมร่วมกันระหว่างบริษัทผู้ผลิตเหล็กจากทั่วโลก เพื่อกำหนดประเภทเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางด้านโลหะวิทยา และสมบัติทางกลของวัสดุ จากการประชุมดังกล่าวสามารถแบ่งประเภทเหล็กเป็นประเภทใหญ่ได้ 3 ประเภท แสดงดังภาพที่ 2.1 คือเหล็กกล้าคาร์บอน (Mild Steel or Low Strength Steel) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ (AHSS) โดยเหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) น้อยกว่า 270 MPa จะจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงดึงระหว่าง 270 ถึง 700 MPa จะเป็นเหล็ก HSS และถ้าค่าความแข็งแรงดังกล่าวมีค่ามากกว่า 700 MPa ก็จะจัดอยู่ในกลุ่มเหล็ก AHSS ซึ่งโดยปกติเหล็ก HSS จะมีโครงสร้างแบบเฟสเดียว (Single Phase) ที่เป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ส่วนเหล็ก AHSS จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบหลายเฟส (Multi Phase) ซึ่งอาจประกอบด้วย เฟอร์ไรต์ มาร์เทนไซต์ (Martensite) เบไนท์ (Bainite) และ/หรือ มีส่วนผสมของออสเทนไนท์ (Austenite) รวมอยู่ด้วย [2]



ภาพที่ 2.1 ประเภทของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แบ่งตามความสัมพันธ์ของความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว [2]

จากภาพที่ 2.1 จะพบว่าเมื่อค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation %) ของวัสดุจะลดลง และเมื่อค่าความแข็งแรงของวัสดุสูงตามทฤษฎีค่าความแข็งแรงก็จะแปรผันตามด้วย

2.2 ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะ

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะมีแรงมากระทำต่อชิ้นงานโลหะแผ่น (Sheet Metal Blank) จึงเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงานอย่างถาวร ความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปที่โลหะชิ้นงานจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะชิ้นงานมิฉะนั้นชิ้นงานจะฉีกขาดนำไปใช้งานไม่ได้ ความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปจะเกิดบนพื้นที่บางส่วนของพื้นที่ชิ้นงาน และมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแล้วมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความเค้นมีค่าเป็นศูนย์ตรงบริเวณพื้นที่ที่ห่างจากบริเวณพื้นที่ที่มีการขึ้นรูป การเปลี่ยนรูปร่างของโลหะชิ้นงานอย่างถาวรนั้นเกิดจากมีค่าความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปมีค่ามากกว่าจุดคราก (Yield Point) ของโลหะชิ้นงาน [6] ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งตามลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุชิ้นงานได้ 5 กลุ่ม [4] คือ

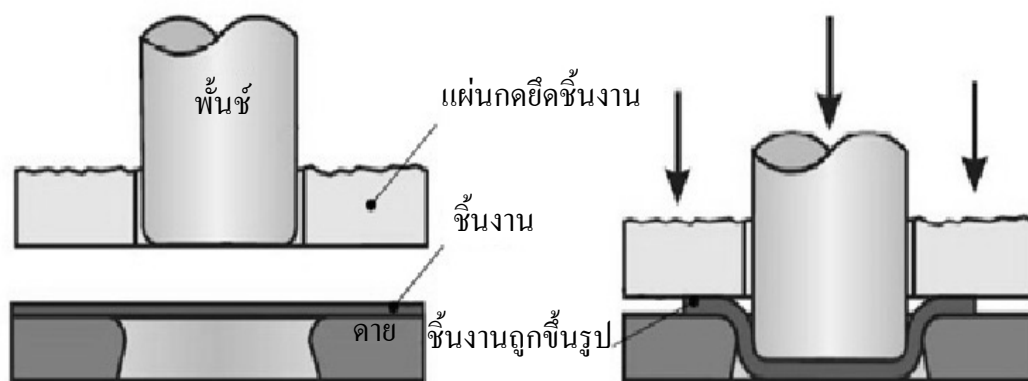
- 2.2.1 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นอัด (Compressive Forming) เช่น การรีด (Rolling)
- 2.2.2 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง และสภาวะความเค้นอัด (Combined Tensile and Compressive Forming) เช่น การลากขึ้นรูป (Deep Drawing)
- 2.2.3 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดึง (Tensile Forming) เช่น การยืด (Stretching)

2.2.4 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นดัด (Forming by Bending) เช่น การดัด (Bending)

2.2.5 การขึ้นรูปภายใต้สภาวะความเค้นเฉือน (Forming by Shearing) เช่นการตัดเฉือน (Shearing) เป็นต้น

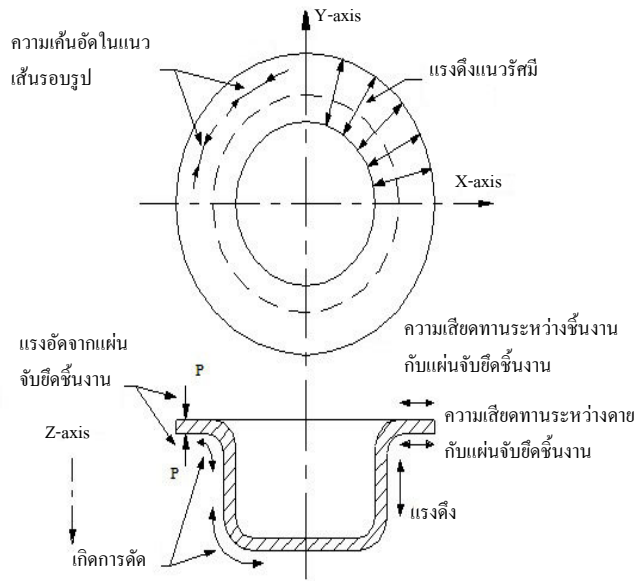
2.3 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะ

เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น [4 – 5] ภายใต้สภาวะความเค้นอัด และสภาวะความเค้นดึง กระบวนการนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่นเช่นเดียวกับกระบวนการดัดขึ้นงาน การลากขึ้นรูปสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การลากขึ้นรูปขึ้นงานโดยไม่ใช้แผ่นจับยึดขึ้นงาน (Deep Drawing without a Blank Holder) และการลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นจับยึดขึ้นงาน (Deep Drawing with a Blank Holder) ในการสร้างแรงกดขึ้นงานขณะขึ้นรูปซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด โดยโลหะแผ่นจะถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วย พันช์ (Punch) ดाय (Die) และแผ่นจับยึดขึ้นงาน (Blank Holder) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น [5]

กระบวนการนี้โลหะแผ่นจะถูกลากผ่านรัศมีดาวยเข้าสู่ดาวย โดยมีแผ่นกดยึดขึ้นงานควบคุมการไหลเพื่อไม่ให้บริเวณปีกขึ้นงานเกิดรอย่นการควบคุมการไหลของวัสดุขึ้นงานสามารถกระทำได้โดยควบคุมแรงกดที่แผ่นกดยึดขึ้นงาน กระบวนการนี้ความหนาของโลหะขึ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลง แผ่นขึ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆจะเกิดทั้งการดัด (Bending) การดัดกลับ (Re – Bending) และถูกยึดให้ตรง (Straightening Out) ซึ่งจะเกิดสภาวะแรงต่างๆ ณ ช่วงการลากขึ้นรูปดังแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูป [7]

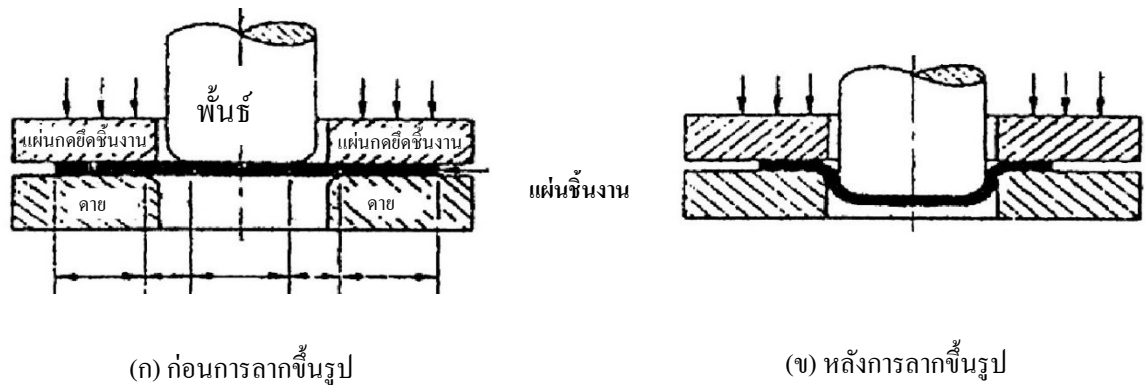
จากภาพที่ 2.3 เมื่อพิจารณาสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุแผ่นงาน ที่บริเวณก้นถ้วยที่พื้นที่เคลื่อนที่ลงมาคั่นนั้นจะเกิดความเค้นดึงในสองแนวแกน (Biaxial Tension) เนื่องจากการตัดที่บริเวณบ่าของพื้นที่ และบริเวณผนังถ้วยจะมีสถานะที่ถูกดึงเกิดความเค้นดึง เนื่องจากวัสดุแผ่นงานในบริเวณนี้ผ่านขั้นตอนคือ การตัด การตัดกลับ และการทำให้ตรง ซึ่งจะเคลื่อนที่สัมผัสไปกับพื้นที่เป็นตัวบังคับซึ่งไม่ทำให้เกิดการหดตัวในแนวรัศมี ที่บริเวณปีกถ้วยนั้นจะเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี (Radial Tension) และความเค้นอัดในแนวเส้นรอบรูป (Circumferential Compression)

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังถ้วย

ในกระบวนการลากขึ้นรูปโดยที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่ผ่านแม่พิมพ์นั้นจะเกิดการยึดตัวอันเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะกับแม่พิมพ์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดแผ่นโลหะ (Blank Holder Force) ความเค้นดึงและอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นโลหะในการขึ้นรูป ซึ่งสาเหตุต่างๆเหล่านี้จะทำให้เกิดการบางลงของผนังถ้วยของชิ้นงาน นอกจากนี้ความหนาของผนังถ้วยที่ลดลงนี้จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการลากขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น แรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ความเร็วในการลากขึ้นรูป สารหล่อลื่น รูปร่างของชิ้นงาน เป็นต้น

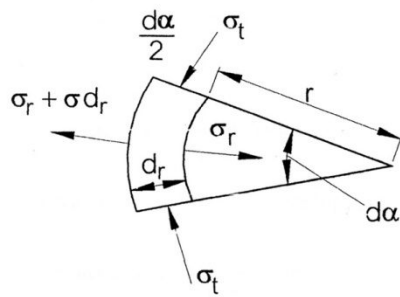
เมื่อเรามาพิจารณาในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะในรายละเอียดที่ลึกลงไปอีกโดยจะพิจารณาประกอบกับภาพที่ 2.4 (ก) เราจะแบ่งโลหะแผ่นที่จะนำมาขึ้นรูปออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซน

X, Y และ Z ซึ่งโซน X วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นจะสัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และส่วนที่ใช้กดชิ้นงานโลหะแผ่น (Blank Holder) โซน Y จะไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) หรือ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และ โซน Z จะสัมผัสกับส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head)

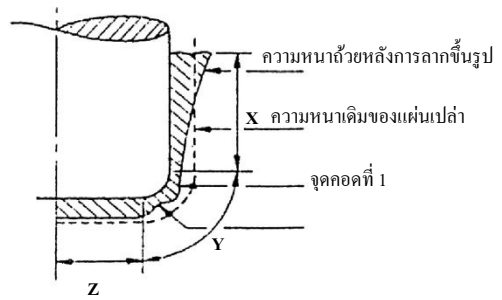


ภาพที่ 2.4 ก่อนและหลังการลากชิ้นรูปโลหะ [3]

เนื่องจากกระบวนการลากชิ้นรูปทรงสูงแสดงดังภาพที่ 2.4 เนื้อชิ้นงานในโซน X จะถูกลากชิ้นรูปไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นในแนวรัศมี (Radial Tensile Stress, σ_r) และผลของการลดลงของรัศมีในโซนนี้ จะนำไปสู่การเกิดความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Compressive Circumferential Stress, σ_c) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.5 (ก) ถ้าไม่มีความดันมาออกแรงแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (σ_c) จะทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) เมื่อเนื้อชิ้นงานในโซน X ไหลผ่านตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die profile) มันจะถูกทำให้บางลงภายใต้ความเค้นดึง (Tensile Stress) ซึ่งแผ่นโลหะจะถูกดึงให้ยืดออกจนกลายเป็นผนังของถ้วยระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) สุดท้ายยส่วนทางด้านของโซน X จะถูกทำให้บางมากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ส่วนด้านนอกของโซน X ก็จะมี ความหนาเพิ่มขึ้น



(ก) ความเค้นที่เกิดขึ้นในโซน X



(ข) ค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป

ภาพที่ 2.5 ความเค้นที่เกิดขึ้นของโลหะแผ่นและค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป [3]

จากภาพที่ 2.5 (ข) พิจารณาในโซน Y เนื้อชิ้นงานในส่วนนี้จะถูกทำให้งอ (Bending) และเกิดการเลื่อนตัว (Sliding) ซึ่งเกิดขึ้นตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Profile) ส่วนที่เกิดการยืดตัว (Stretching) โดยแรงดึงจะเกิดระหว่างแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Profile) ส่วนที่เกิดการงอและการเลื่อนตัว จะเกิดขึ้นตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) ส่วนโซน Z จะเกิดการยืดตัว (Stretching) และการเลื่อนตัว (Sliding) ขึ้นที่ส่วนหัวของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) ขนาดของความเครียด (Strain) จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Head) และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส จากข้างต้นเราสามารถทราบความเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังด้วยรูปทรงกระบอกที่เกิดจากกระบวนการลากขึ้นรูป

2.3.2 การคำนวณหาขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น

การคำนวณหาขนาดแผ่นชิ้นงานเริ่มต้นเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก นอกเหนือจากรูปร่างชิ้นงานสุดท้ายที่ต้องการแสดงดังตารางที่ 2.1 สมการการหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (Blank Diameter, D) ของชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน ในตารางดังกล่าวเป็นสมการการหาขนาดของชิ้นงานด้วยทรงกลมที่กั้นด้วยมีค้ำรัศมีน้อยกว่า 10 มม. กรณีที่มีปีกและไม่มีปีกชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 การหาขนาดชิ้นงานเริ่มต้นด้วยทรงกลมกรณีมีปีกและไม่มีปีกชิ้นงาน [5]

ภาพตัดขวางชิ้นงานรูปทรงด้วยสมมาตร	ขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (D)
	$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$
	$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$

สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนสมการการคำนวณจะไม่ตายตัวจำเป็นต้องทดลองโดยการทดลองผิดพลาดถูก (Trial and Error) ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ช่วยในการหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งขนาดของชิ้นงานเริ่มต้นนี้จะเป็นตัวกำหนดขั้นตอนการลากขึ้นรูปด้วย แต่ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและออกแบบการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งทำให้ง่ายและสะดวกในการหาค่าดังกล่าว

2.3.3 อัตราส่วนการลากขึ้นรูป

อัตราส่วนการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio; β) เป็นค่าที่สำคัญในการหาจำนวนครั้งในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้น (d_0) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป (d_1) ของการลากขึ้นรูปด้วยที่เหมาะสมของวัสดุซึ่งจะต้องไม่เกินขีดจำกัดการขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio; LDR) หรือ β_{\max} จึงจะทำให้ไม่เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยโดยปกติแล้วการขึ้นรูปโลหะแผ่นจะกำหนดค่า β_{\max} ไม่เกิน 2.1 หรือ ประมาณอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเริ่มต้นต่อขนาดความหนาชิ้นงานเริ่มต้น (d_0/s_0) เท่ากับ 50 หรือดังแสดงดังตารางที่ 2.2 แต่ทั้งนี้ยังคงขึ้นกับปัจจัยอื่นอีก เช่น ค่าความเสียดทานระหว่าง ผิวคู่สัมผัสชิ้นงานกับแม่พิมพ์ รัศมีของคายเป็นต้น [4]

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดการขึ้นรูปสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิด [4]

Material	β_{\max}
Steel sheet, depending on quality	1.8 – 2.2
Aluminum, Copper, Al Cu Mg sheet	2.1
Brass sheet, Depending on Pre strain	1.7 – 2.2

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า β_{\max} เป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน (d_0) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ (d_1) ดังสมการที่ 2.1

$$\beta_{\max} = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.1)$$

แต่ในกรณีที่เป็นการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม ให้เราทำการเทียบ (Equivalent) โดยทำการเทียบพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่ให้เท่ากับ (d_1) และเทียบพื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงานให้เท่ากับ (d_0) โดยสามารถทำได้ดังนี้

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$$

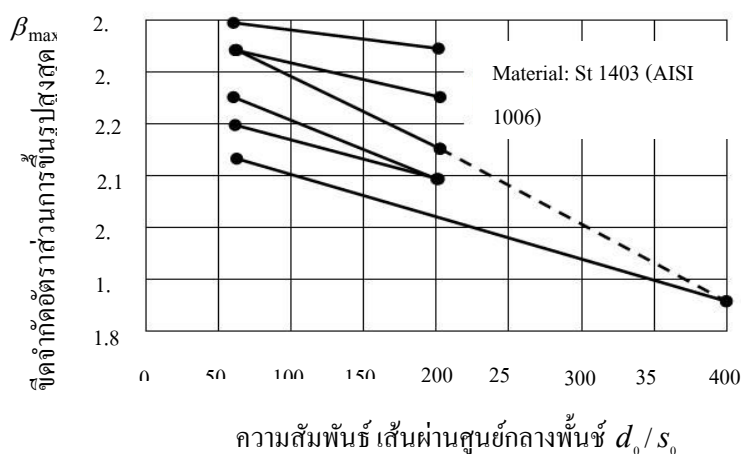
เมื่อ $A_0 =$ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นชิ้นงาน

$A_1 =$ พื้นที่หน้าตัดของพินซ์

$$d_0 = 2\sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (2.2)$$

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \quad (2.3)$$

ค่า β_{\max} เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นตัวแปรสำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนความหนา กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ (d_0/s_0) โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} จะสูงขึ้นถ้ามีความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพินซ์ (d_0/s_0) มีค่าต่ำลง ดังนั้น การปฏิบัติงานในระบบของการหล่อลิ้นในการดึงขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} ด้วย ดังนั้น ค่าความเสียดทานที่คานและแผ่นกดยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมพันธ์กับความเสียดทานที่พินซ์มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด β_{\max} [8]

2.3.4 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูป

ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานจำเป็นต้องรู้ขนาดของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานด้วย (Deep Drawing Force; F_d) แรงที่ใช้ในการควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานด้วยแผ่นกดยึดชิ้นงาน

(Blank Holder Force; F_{BH}) เพื่อใช้ในการเลือกขนาดของเครื่องจักรที่ต้องแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานหาได้จากแรงลากขึ้นรูปสูงสุด ($F_{d,max}$) ดังสมการที่ 2.4

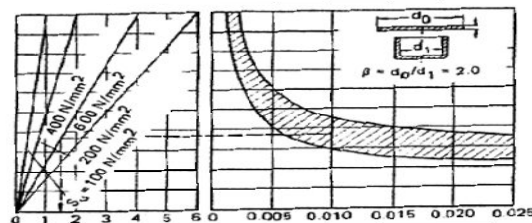
$$F_{d,max} = \pi d_m t \left[1.1 \frac{1.3 \sigma_u}{\eta_{def}} \left(\ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right] \quad (2.4)$$

- เมื่อ σ_u = ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (N/mm²)
 η_{def} = ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป ซึ่งมีค่าอยู่ในระหว่าง 0.5 – 0.7
 t = ความหนาชิ้นงาน (mm)
 d_m = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นรับความหนาชิ้นงาน) (mm)

ในการลากขึ้นรูปชิ้นงานการใช้แผ่นกดยึดชิ้นงานควบคุมการไหลตัวของวัสดุเพื่อไม่ให้บริเวณปีกชิ้นงานเกิดรอยย่น (Wrinkle) สามารถกระทำได้ด้วยการสร้างแรงดันผ่านแผ่นกดยึดชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานขณะขึ้นรูป หาได้จากสมการที่ 2.5 แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยย่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.6 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกด โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป $\beta = 2.0$ และใช้วัสดุที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เท่ากับ 100, 200, 400 และ 600 N/mm² ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟแสดงดังภาพที่ 2.7 โดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ [9]

$$P_{BH} = 10^3 c \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 d_0}{s_0} \right] S_u \quad (2.5)$$

- เมื่อ P_{BH} = ความดันบนแผ่นกดชิ้นงาน (N/mm²)
 c = ตัวประกอบแรงลักษณะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ~ 3
 β = อัตราส่วนการลากขึ้นรูป



ก. ความดันของตัวเหยียบ (P_{BH})N/mm²

ข. ความหนาแผ่นสัมพันธ์ S_u/d_0

ภาพที่ 2.7 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก [10]

ดังนั้นแรงในการควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอย่นบริเวณปีก
ชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.6)$$

เมื่อ A_{BH} = พื้นที่ที่แผ่นกดชิ้นงานสัมผัสชิ้นงาน (mm^2)

ขนาดของแรงกดแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) ซึ่งเป็นแรงที่ใช้เพื่อป้องกันการ
เกิดรอย่นและการ โกงของปีกชิ้นงานซึ่งเกิดจากความเค้นอัดในแนวสัมผัส (แนวเส้นรอบวง) โดยที่
ขนาดของแรงแผ่นกดยึดชิ้นงานที่พอเพียงสำหรับป้องกันไม่ให้เกิดรอย่นได้นั้นหาได้จากการทดลอง
เป็นสำคัญ หรือสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.7 [11]

$$F_{BH} = \frac{F_{d,\max}}{3} \quad (2.7)$$

ถ้าขนาดของแรงกดไม่พอจะทำให้เกิดการย่นของโลหะขึ้นซึ่งรอย่นเหล่านี้จะทำให้โลหะ
ไม่สามารถไหลตัวได้ และบริเวณกันของกล่องสี่เหลี่ยมของชิ้นงานก็จะถูกพันธันจนฉีกขาด ใน
ขณะเดียวกันถ้าแรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้เช่นกัน
ชิ้นงานก็จะถูกคั่นจากพันธันฉีกขาดอีกเหมือนกัน สำหรับการขึ้นรูปแบบทรงกระบอกโลหะจะมี
การไหลอย่างสม่ำเสมอและเท่ากันทุกจุดนั้น แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานก็จะใช้เท่ากันทุกจุดด้วย แต่
ถ้าสำหรับการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมหรือทรงอื่นๆ ก็จะมีอัตราการไหลตัวของโลหะแต่ละจุดที่ไม่
เท่ากัน ก็จะทำให้ใช้แรงกดของแผ่นกดยึดชิ้นงานไม่เท่ากันด้วย จึงมีการใช้ครอว์บิด (Draw Bead) เข้า
มาใช้ตรงบริเวณที่ต้องการแรงกดมากเพื่อเพื่อมาช่วยทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง

2.3.5 แรงที่ทำให้เกิดการแตก [12]

แรงที่สามารถส่งผ่านวัสดุในบริเวณรัศมีพันธันหรือบริเวณรอยต่อระหว่างผนังรูปถ้วยกับก้น
ถ้วยจะเป็นเงื่อนไขจำกัดแรงการลากขึ้นรูปสูงสุดที่ยอมได้ แรงนี้เรียกว่าแรงฉีกขาด (Cracking Force)
แรงนี้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดึงสูงสุด มิฉะนั้นจะไม่สามารถลากขึ้นรูปถ้วยได้เพราะถ้วยจะเกิดการฉีก
ขาดก่อนจะสำเร็จแรงฉีกขาดโดยประมาณ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.8

$$F_{cr} = \pi \times d_m \times s_0 \times S_u \times a_{cr} \quad (2.8)$$

เมื่อ F_{cr} = แรงที่ทำให้เกิดการแตก (N)

d_m = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm)

s_0 = ความหนาของแผ่นโลหะ (mm)

S_u = ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (N/mm^2)

a_{cr} = ค่าองค์ประกอบตัวคูณการแตกของวัสดุชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ค่า a_{cr} ของวัสดุชนิดต่างๆ [12]

วัสดุ	ค่า a_{cr}
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

2.3.6 ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านทานที่ผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย (Die Clearance) จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะ ซึ่งจะมากกว่าประมาณ 1.07 ถึง 1.2 เท่าของความหนาแผ่นชิ้นงาน และจำนวนครั้งของการลากขึ้นรูปซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.4 เป็นค่าช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายซึ่งใช้ได้ทั้งในการลากขึ้นรูปทรงกระบอกและการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมเพียงแต่ตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านของกล่องสี่เหลี่ยมอาจจะต้องมีค่าช่องว่างพื้นซ์และคายมากกว่าส่วนทางด้านผนังกล่องสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 2.4 ระยะช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย [13]

ความหนาของแผ่นชิ้นงาน (มม.)	ช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย	
	ลากขึ้นรูปครั้งแรก	ลากขึ้นรูปครั้งที่ 2
หนาถึง 0.38	1.07 – 1.09 t	1.08 – 1.10 t
0.41 – 1.27	1.08 – 1.10 t	1.09 – 1.12 t
1.29 – 3.18	1.10 – 1.12 t	1.12 – 1.14 t
3.2 ขึ้นไป	1.12 – 1.14 t	1.15 – 1.20 t

จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นชิ้นงานเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป ค่าช่องว่างนี้ก็เพิ่มขึ้นอีก เช่น ช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายในการลากขึ้นรูปครั้งแรกเท่ากับ 1.1 เท่าของความหนา และในการลากขึ้นรูปครั้งที่ 2 ต้องเพิ่มขึ้นเป็น 1.12 เท่า หรือ 1.14 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า

2.3.7 ขนาดของรัศมีพื้นซ์และคาย

รัศมีพื้นซ์และรัศมีคายเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับการงอและการทำให้ตรงโดยที่รัศมีของพื้นซ์ที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะเป็นตัวกำหนดรัศมีของชิ้นงานที่ต้องการทำขึ้นมา ถ้ารัศมีที่เล็กจะทำให้ต้องใช้

แรงในการงอสูงกว่ารัศมีที่มีขนาดใหญ่ รัศมีของคายจะมีผลที่เกิดขึ้นในลักษณะคล้ายกับรัศมีของพื้นซ์ รัศมีของคายจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการงอครั้งแรกของชิ้นงาน ถ้าใช้รัศมีของคายเล็กไปจะทำให้เกิดแรงดึงที่ผนังชิ้นงานมากดังนั้นในการกำหนดรัศมีพื้นซ์และคาย จะขึ้นกับขนาดและความหนาของชิ้นงานถ้ารัศมีคายมีขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดแนวโน้มในการทำให้เกิดรอยย่นมากกว่าในการหารรัศมีคายที่เหมาะสม โอห์เลอร์และไกเซอร์ (Oehler and Kaiser) [14] ได้พัฒนาความสัมพันธ์ที่ 2.9

$$r_d = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]\sqrt{t_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ r_d = รัศมีคาย (mm)

t_0 = ความหนาแผ่นเปล่า (mm)

d_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเปล่า (mm)

d_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นซ์ (mm)

เซลลิน (Sellin) [14] ได้ทำการเสนอการหารรัศมีคายโดยให้ความสัมพันธ์กับความหนาไว้ดังสมการที่ 2.10 และรัศมีพื้นซ์ จะมีความสัมพันธ์กับรัศมีคายดังสมการที่ 2.11

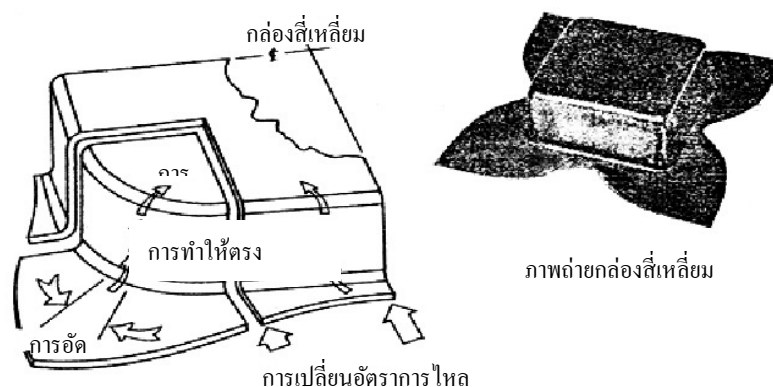
$$r_d = (5 - 10 \text{ เท่า}) \times \text{ความหนาของแผ่นชิ้นงาน} \quad (2.10)$$

$$r_p = (3 - 5 \text{ เท่า}) \times \text{รัศมีคาย} \quad (2.11)$$

2.3.8 การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [15]

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

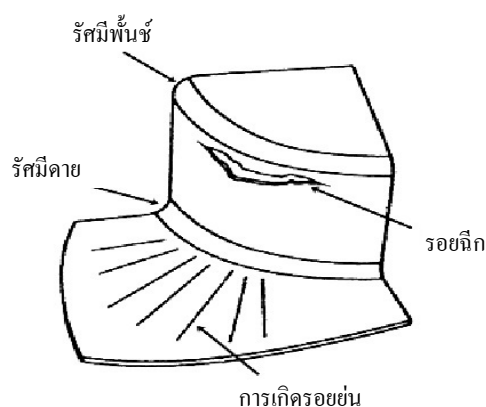
การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงมุมกล่อง ซึ่งการศึกษาการไหลตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนี้ทำได้โดยการใช้กระแสไฟฟ้ากัด (Etching) ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานแบนให้เป็นวงกลมเล็กๆ ลักษณะของการไหลของโลหะจะถูกแสดงให้เห็นถึงครั้งแรก เมื่อวงกลมเล็กๆนั้นถูกเปลี่ยนเป็นรูปวงรี การศึกษาการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมนี้จะต้องแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆแล้วนำมาศึกษา ดังแสดงภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การแบ่งกล่องสี่เหลี่ยมออกเป็นส่วนต่างๆ [15]

เนื่องจากมุมของกล่องที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น จะใช้มุมกล่องสี่เหลี่ยมเพียงแค่มุมเดียว ลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อลากขึ้นรูปกล่องก็ยังคงเกิดขึ้นที่มุมของกล่องมุมอื่นๆ เหมือนกัน ลูกศรอันใหญ่ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.8 ได้แสดงให้เห็นว่าโลหะจะมีการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อนจะยื่นออกไปเหนือรัศมีของคาน ซึ่งที่ส่วนนี้ยังคงมีโลหะเหลืออยู่มากเกินไป อาจจะทำให้รอยย่นขึ้นได้ง่าย ขณะที่มีการลากขึ้นรูปจะต้องใช้แรงของแผ่นกดยึดขึ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่นที่ตรงมุมของกล่องนี้ สารประกอบที่ใช้ในการลากขึ้นรูป หรือสารหล่อลื่นที่ดีได้ถูกนำมาใช้ที่ตรงมุมของกล่อง เพื่อให้โลหะไหลตัวภายใต้แผ่นกดยึดขึ้นงานได้ง่ายขึ้น โดยจะเป็นตัวลดความเสียหาย การใช้รัศมี

ของคานที่ใหญ่ตรงมุมของกล่องจะช่วยลดแรงที่เกิดจากการงอ และการทำให้ตรงซึ่งมันจะช่วยทำให้การลากขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น มันเป็นเรื่องจริงเช่นเดียวกับการลากขึ้นรูปกล่อง คือว่า รอยย่นที่เกิดขึ้นที่มุมของแผ่นขึ้นงานจะเบียดกันเพื่อแย่งการไหลตรงมายังมุมของกล่อง การเกิดรอยย่นเช่นนี้จะมองเห็นได้โดยตา สำหรับรอยย่น และการฉีกขาดที่เกิดขึ้นจากการลากขึ้นรูปที่บริเวณมุมของกล่อง แสดงดังภาพที่ 2.9 เมื่อมีแรงดึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่ผนังซึ่งเป็นบริเวณมุมของกล่อง จะทำให้มีการฉีกขาดเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น การฉีกขาดที่ตรงมุมของกล่องนี้อาจจะมากขึ้นจนลามไปถึงผนังส่วนที่แบน การฉีกขาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมันจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมของกล่องระหว่างการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเสมอ



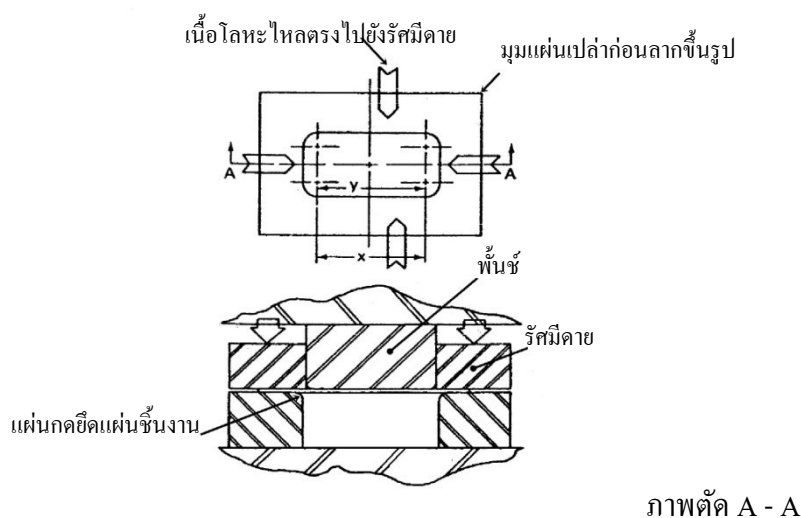
ภาพที่ 2.9 การวิเคราะห์ที่มุมของกล่องสี่เหลี่ยม [15]

การวิเคราะห์การไหลตัวของโลหะตรงส่วนของผนังกล่อง จะใช้กระแสไฟฟ้ากัดให้เป็นวงกลมเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของโลหะที่ได้ถูกการลากขึ้นรูป ลากการขึ้นรูปบริเวณมุมกล่องนั้น โลหะจะเกิดการอัดตัวตรงมุมของแผ่นขึ้นงานก่อน จึงจะยินยอมให้โลหะไหลตัวลงไปเหนือรัศมีคาย แต่สำหรับการทำผนังส่วนที่แบนของกล่องนั้นไม่มีการอัดตัวของโลหะเพื่อยอมให้โลหะไหลไปยังรัศมีของคายการศึกษาถึงเงื่อนไขนี้ จะถูกพบในภาพที่ 2.10 ความยาวของแผ่นขึ้นงานเพื่อที่จะป้อนเข้าไปเป็นผนังส่วนที่แบนของกล่องได้ถูกแทนโดยใช้สัญลักษณ์ X ความยาวของปากคายที่จะทำให้โลหะไหลผ่านลงไปเป็นผนังส่วนที่แบนได้ถูกแสดงโดยการใช้ความยาว Y เพราะความยาว X เท่ากับความยาว Y การอัดตัวของโลหะจึงไม่เป็นที่จำเป็น ถ้าไม่มีการอัดตัวของโลหะเกิดขบวนการนั้นไม่มารจะเรียกได้ว่า การลากขึ้นรูป

ในการบรรยายการไหลของโลหะที่ผนังส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมจะได้อธิบายโดยแสดงถึงขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกแผ่นขึ้นงานจะเลื่อนตรงไปยังรัศมีของคายโดยไม่มีการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปหรือไม่มีการเปลี่ยนขนาด ต่อมาเมื่อโลหะถูกป้อนอยู่เหนือรัศมีของคาย โลหะจะถูกทำให้โค้ง ลำดับสุดท้าย โลหะได้ทำให้ตรงเพื่อสร้างผนังส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมขึ้นมา ขั้นตอนของการที่เกิดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.8 ด้วยเหมือนกัน ขบวนการของการเปลี่ยนแปลงของโลหะนี้ได้ถูกเรียกว่า การงอ และการทำให้ตรง (Bend and Straighten) การลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมก็จะเป็นขบวนการที่ผสมผสานระหว่างขบวนการลากขึ้นรูปกับขบวนการงอ และการทำให้ตรงดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการลากขึ้นรูปเพียงบางส่วนของขึ้นงานโดยการใช้การลากขึ้นรูป ในการ

ปฏิบัติภายในโรงงานจะเรียนการผลิตชิ้นงานในลักษณะเช่นนั้น รวมทั้งว่าเป็นการใช้กระบวนการการลากขึ้นรูป

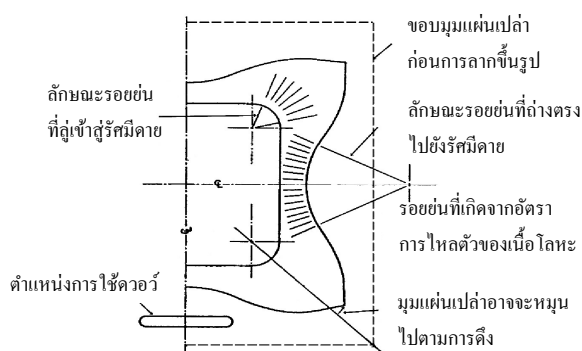
รอยยับที่เกิดจากอัตราการไหล (Flow – Rate Wrinkle) ส่วนที่เป็นมุมและส่วนที่แบนของกล่องสี่เหลี่ยมนี้สามารถที่จะมองเหมือนกับว่าแยกส่วนออกจากกัน โดยไม่มีความยุ่งยาก แต่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะจากส่วนหนึ่ง ไปยังอีกส่วนหนึ่ง ของผนังที่เป็นมุมกับส่วนที่แบนนั้น โลหะซึ่งถูกลากขึ้นรูปที่มุมของกล่องจะไหลตรงไปยังรัศมีของคายก่อนข้างจะเข้าเนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการอัดตัวของโลหะ แผ่นชิ้นงานส่วนที่เป็นมุมนี้สามารถเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายได้เร็วเท่ากับการเคลื่อนที่ของแท่งพื้นที่ลากผ่านชิ้นงาน แต่ในส่วนของผนังส่วนที่แบนแผ่นชิ้นงานจะเคลื่อนที่ตรงไปยังรัศมีของคายด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วยของแท่งพื้นที่ลากโลหะผ่านขั้นตอนของการทำให้งอและการทำให้ตรงของผนังส่วนที่แบนนั้นจะทำให้มีการยึดตัวของโลหะเกิดขึ้นบ้าง ปัญหาที่สำคัญในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมก็คือ การแปรผันในอัตราของการไหลหรืออัตราของการไหลที่เร็วกว่าของผนังส่วนที่แบนนี้ ผลก็คือจะเกิดการรัศตัว (Pull – In) ของขอบแผ่นชิ้นงานอย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.10 การไหลของของโลหะที่บริเวณผนังส่วนตรงของการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม [15]

ปัญหาของการผลิตหลายๆ อย่างอาจจะมาจากอัตราการไหลที่แปรเปลี่ยน ซึ่งจะมองเห็นรอยยับที่เกิดขึ้นได้ที่ปีกขอบของผนังส่วนที่ตรง รอยยับที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะถ่างออกตรงไปยังรัศมีคาย และจะเรียกมันว่ารอยยับที่เกิดจากอัตราการไหล ดังแสดงดังภาพที่ 2.11 การเกิดรอยยับที่ปีกของผนัง

ส่วนที่ตรงจะไม่เหมือนกับรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมซึ่งการเกิดรอยย่นที่ปีกของผนังส่วนที่เป็นมุมจะมีลักษณะลู่เข้า จะต้องมีการใช้แผ่นกดยึดชิ้นงานเพื่อป้องกันหรือกำจัดการเกิดรอยย่นเหล่านั้นที่บริเวณรอบๆ เส้นรอบรูปของกล่องสี่เหลี่ยม การลากชิ้นรูปกล่องก็มีการเกิดรอยย่นทั้งสองแบบนี้เช่นเดียวกัน ลูกศรใหญ่และเล็กที่ได้แสดงเอาไว้ในผนังส่วนที่ตรงดังภาพที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการใช้โลหะไปกับการโค้งงอของกล่อง



ภาพที่ 2.11 ลักษณะของรอยย่นที่เกิดจากอัตราการใช้โลหะ [15]

2.3.9 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการลากชิ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม

- 1) เกิดการแตกขาดบริเวณผนังด้านข้างของกล่อง
- 2) เกิดการแตกหักขาดบริเวณก้นกล่องสี่เหลี่ยม
- 3) เกิดรอยย่นที่ปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม
- 4) เกิดรอยย่นที่ขอบปากของกล่องสี่เหลี่ยม
- 5) ขอบหรือปีกของชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

2.4 สารหล่อลื่น [16]

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi – Solid) และ ของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil)

2.4.1 น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ได้จากการเอา ส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นภายใต้บรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และ กากคาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮโดรและชนิดชั้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็ สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของ น้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พาราฟฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้อง ผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อน

2.4.2 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็น ตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและ ความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

2.4.3 น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่น น้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะ สารที่มีสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็น น้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่ง เป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็น สารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิ ที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บาง ประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มี สมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สาร เพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

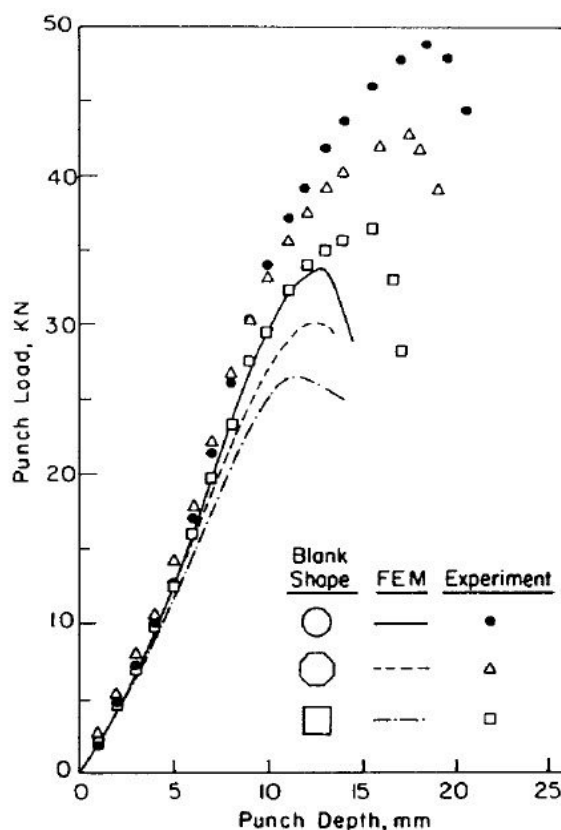
2.4.4 สารหล่อลื่นของแข็ง เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดี และในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเลื่อนไหลไปได้อย่างง่าย ในชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 อิทธิพลของของรูปร่างของแผ่นเปล่า

Chandorkan [17] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแผ่นชิ้นงาน และแรงกดยึดของแผ่นเปล่า และได้มีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างแบบจำลองการลากขึ้นรูปเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยการทดลองใช้อะลูมิเนียม (2008 – T4) หนา 1.016 มม. ลากขึ้นรูปกล่องขนาด $305 \times 380 \times 50$ มม. ใช้สารหล่อลื่น (DB – 4251) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 มีลักษณะของแผ่นเปล่า คือ แผ่นสี่เหลี่ยม แผ่นตัดมุม แผ่นโค้งมน จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่เกิดขึ้น แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมสามารถขึ้นรูปได้ลึกที่สุด รองลงมาเป็นแผ่นเปล่าตัดมุม และแผ่นเปล่าโค้งมน

Toh และ Kobayashi [18] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างแผ่นเปล่าในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการทดลองการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยม โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นเปล่า มีรูปร่างอยู่ 3 แบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม แบบสี่เหลี่ยมตัดมุม แบบวงกลม โดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่าเฉลี่ยความเครียดเปลี่ยนรูปถาวร (Average Anisotropy) เท่ากับ 1.025 และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็น 0.04 ความหนาเท่ากับ 0.76 มม. ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด เท่ากับ $\sigma = 1514 \varepsilon^{0.430}$ MPa

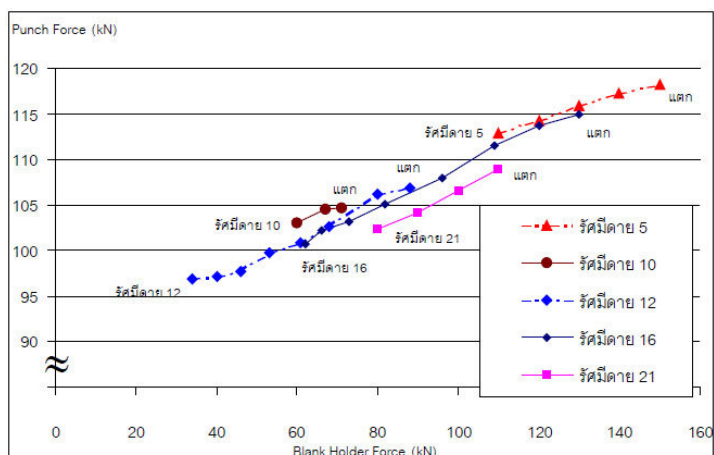


ภาพที่ 2.12 แรงลากขึ้นรูปที่ได้จากการทดลองและการจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

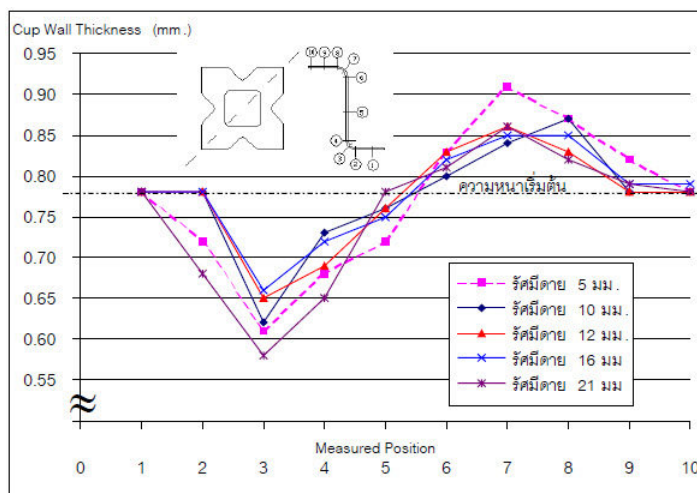
จากภาพที่ 2.12 ผลการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นเปลามีอิทธิพลต่อแรงลากขึ้นรูป โดยผลการทดลองที่ได้จะมีผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และแรงที่เกิดขึ้นในพันธมีค่าสูงสุดในแผ่นเปลารูปวงกลม โดยที่แรงในการลากขึ้นรูปในแผ่นสี่เหลี่ยมตัดมุม และแผ่นสี่เหลี่ยม น้อยลงตามลำดับ

2.5.2 อิทธิพลของรัศมีพื้นผิวและคาย

ชาญศักดิ์ ภัทรพรนันท์ [19] ได้ศึกษาการลากขึ้นรูปลึกลงสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:SPCEN) ขนาด $100 \times 100 \times 53$ มม. และความหนา 0.78 มม. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม OPTRIS จากผลงานวิจัยพบว่าขนาดของรัศมีคายที่สามารถจะทำการลากขึ้นรูปได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 มม. ถึง 21 มม. (6 – 26 เท่าของความหนาแผ่นเปล่า) โดยที่ช่วงรัศมีคาย 12-16 มม. จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยและความหนาของแผ่นเปล่าเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 2.13 และ 2.14



ภาพที่ 2.13 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบกับรัศมีคายนต่างๆ



ภาพที่ 2.14 ความหนาบริเวณมุมกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสในตำแหน่งต่างๆ

El – Wakil, Kamal และ Darwish [20] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปกับรัศมีของคายน จากผลการทดลองเมื่อรัศมีคายนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2 มม. เป็น 7 มม. พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปที่รัศมีคายน 7 มม. ลดลงประมาณ 20 % เมื่อเทียบกับรัศมีคายน 2 มม. แต่เมื่อรัศมีคายนเพิ่มขึ้นจาก 7 มม.เป็น 10 มม. พบว่าแรงในการลากขึ้นรูปสูงขึ้น แต่แรงที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปที่รัศมีคายน 2 มม.

Fratini,Casto และ Micari [21] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีพื้นซ์และคายนในการลากขึ้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองสถานการณ์ แล้วทำการทดลองเป็นการพิสูจน์โดย

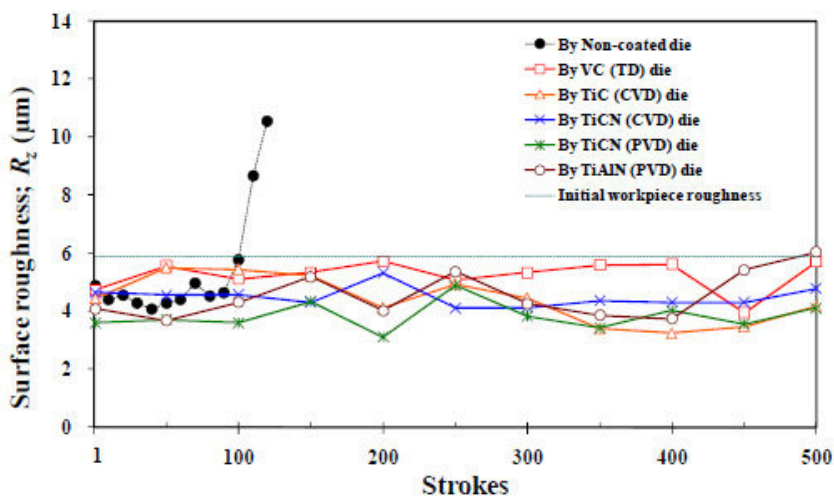
ใช้แม่พิมพ์แบบอินเวิร์ทตาย (Invert Die) ที่มีรัศมีตายและพื้นซ์เท่ากันประกอบกันเป็นคู่ 3 ระดับรัศมี คือ 3, 6, 9 มม. จากการทดลองใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 9 มม. จะเกิดรอยย่นตรงบริเวณปีกขอบด้วย เมื่อใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 6 มม. จะไม่พบทั้งรอยย่นและรอยฉีกขาดบนด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเมื่อใช้รัศมีตายและพื้นซ์ ขนาด 3 มม. จะทำให้ผนังของถ้วยบางมากจนเกิดรอยฉีกขาดบนด้วยสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเมื่อใช้วิธีไฟในเอลิเมนต์จำลอง ได้ผลสอดคล้องกันกับการทำทดลอง

2.5.3 อิทธิพลของแรงกดยึดแผ่นกดยึดชิ้นงาน

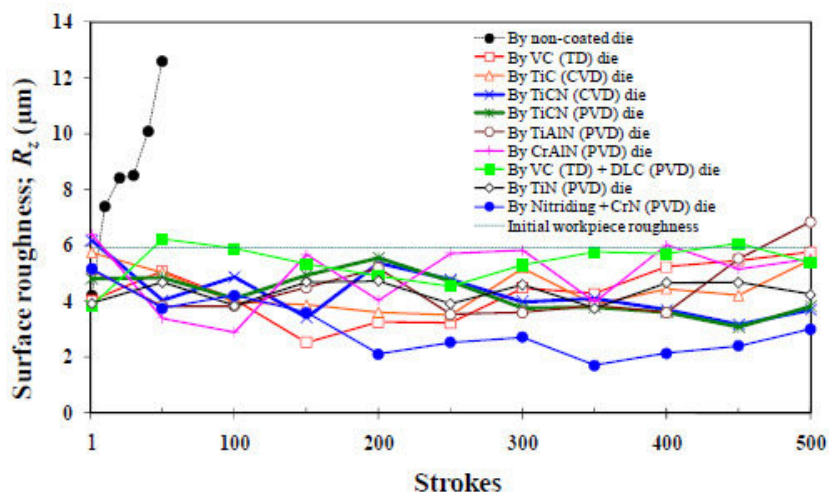
นฤทธิ์ คชฤทธิ์ [22] ได้ทำการศึกษาถึงแรงกดยึดชิ้นงานที่ใช้ในการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้ว โดยเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ ในการทำการทดลองนั้น ได้ใช้เครื่องเพชรหนึ่งจังหวะ มาทำการลากขึ้นรูป โดยให้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากความเสียดทานของยางยูรีเทนที่สวมอยู่กับแกนในชุดพื้นซ์และชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน วงแหวนยางยูรีเทนขยายตัว เมื่อได้รับแรงกดขณะขึ้นรูปทำให้เกิดความเสียดทานเพื่อต้านการเคลื่อนที่ของชุดกดยึดแผ่นชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงกดยึดแผ่นชิ้นงานขึ้นอย่างอัตโนมัติ เมื่อใช้หลักการดังกล่าวกับการลากขึ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 1.92 ต้องใช้แรงกดยึดแผ่นชิ้นงานประมาณ 29% ของแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงสุด จึงเพียงพอในการยับยั้งการเกิดรอยย่นในระหว่างการขึ้นรูปได้

2.5.4 ด้านงานขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเริง [2] ได้ศึกษาถึงการปรับสภาพผิวและการเคลือบผิวแม่พิมพ์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการยึดติดของอนุภาคชิ้นงานบนผิวตายในกระบวนการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวัสดุเหล็ก SAPH 440 และ SPFH 590 เปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบผิวตาย โดยเลือกการปรับสภาพผิวหรือเคลือบผิวด้วย VC (TD), TiC (CVD), TiCN (CVD), TiCN (PVD), TiAlN (PVD), CrAlN (PVD), VC (TD) + DLC (PVD), TiN (PVD) และ Nitriding + CrN (PVD)



ภาพที่ 2.15 ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SAPH 440 หลังการปั๊มขึ้นรูปด้วย



ภาพที่ 2.16 ความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด SPFH 590 หลังการปั๊มขึ้นรูปด้วย

จากภาพที่ 2.15 และ 2.16 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพผิว และเคลือบผิว ช่วยลดการยึดติดของอนุภาคชิ้นงานบนผิวตายได้ทุกชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับตายที่ไม่เคลือบผิว โดยฟิล์ม TiC (CVD), TiCN (PVD), TiCN (CVD) และ Nitriding + CrN (PVD) ให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดได้ดีสุดในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PVD สามารถเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับตายด้วยการทำเรดิคัลไนไตรด์ ก่อนแล้วเคลือบทับด้วยฟิล์มที่ต้องการใช้งานเช่นฟิล์ม Nitriding + CrN (PVD) ถูกทดสอบด้วยการลากขึ้นรูปชิ้นงาน

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC 980Y (JIS) ผลการทดลองพบว่าหลังการขึ้นรูป 1,000 ชั้น ไม่พบการเกิดการยึดติดของอนุภาคบนผิวตาย และฟิล์ม CrN (PVD) ยังยึดเกาะกับผิวตายได้ดีกว่ากรณีตายที่ไม่ได้ทำเรดิคัลไนไตรต์ก่อนการเคลือบ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งแก้ปัญหาการขึ้นรูปเหล็กกลุ่ม HSS และ AHSS ดังมีงานวิจัยที่ดำเนินงานด้านการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป การเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเกิดจากหลายปัจจัยเช่น ชนิดของวัสดุ ความหนาของวัสดุ และมุมของการตัด เป็นต้น Yoshida และคณะ [23] ศึกษาถึงกลไกการเกิดการติดตัวกลับและใช้เทคนิคการควบคุมรูปร่างของชิ้นงานที่ทำจาก HSS ด้วยการทำให้ Reverse Bending ในช่องว่างแม่พิมพ์ หรือระยะเคลียร์เรนซ์ (Clearance) การเพิ่มแรงดึงที่ผนังข้างของชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปด้วยการให้แรงจากแผ่นคดรีงชิ้นงาน (Blank Holder) และสร้างรอยนูนสำหรับโลหะไหลผ่าน (Draw Bead) นอกจากนี้ Yoshida และคณะ [24] ศึกษาการลดการติดตัวกลับของชิ้นงาน HSS ด้วยการขึ้นรูปด้วยการกระแทก (Crash Forming) ชิ้นงานรูปตัวยู (U – Channel) Yanagimoto และคณะ [25] แสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน HSS หลังการขึ้นรูปมีรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการไม่เกิดการติดตัวกลับเมื่อขึ้นรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 477°C แต่ต่ำกว่างานขึ้นรูปร้อน (Hot Working) Mori และคณะ [26] ใช้เครื่องเซอร์โวเพรส (Servo Press) ในการควบคุมการเกิดการติดตัวกลับของชิ้นงานด้วยการลดความหนาของชิ้นงานในการพับขึ้นรูปตัววี (V – Bending)

สรุปจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีแนวทางการทำวิจัยโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองลากขึ้นรูปเหล็กกล้ารีดร้อนสำหรับโครงสร้างยานยนต์เกรด SAPH 440 (JIS) โดยใช้แม่พิมพ์ชุดเดิมที่ออกแบบสำหรับวัสดุเหล็กแผ่นรีดเย็นเกรด SPCC (JIS) แล้วทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีปาดายของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Radius) เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากขึ้นผลการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างไร โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการลากขึ้นรูป คือ รัศมีปาดาย (Die Radius) แรงกดของแผ่นคดรีดชิ้นงาน ความหนา ความหยาบผิว และคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการลากขึ้นรูป