

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการค้าสูงมาก ในประเทศไทยมีผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมหลายสาขาได้มีการปรับปรุงคุณภาพการผลิตสินค้า และขยายตัวไปอย่างรวดเร็วมีการแข่งขันในทางธุรกิจอุตสาหกรรมเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งด้านการตลาด รูปแบบของผลิตภัณฑ์ และเงินลงทุน ผู้ประกอบการธุรกิจอุตสาหกรรมแต่ละแห่งต้องเร่งพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการวางแผนงาน ขบวนการผลิต การพัฒนาบุคลากร การจัดการทางตลาด เพื่อให้ลดต้นทุนการผลิต พร้อมทั้งกำหนดมาตรฐานสินค้าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในการขยายตลาดเพื่อการผลิต [1] วิศวกรได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆเช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องจักร บรรจุก๊าซ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเกิดความเครียด (Strain) ในรูปแบบการได้รับความเค้นที่แตกต่างกันภายใต้ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดความเครียดในขณะทำการขึ้นรูป เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน รัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch radius) รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die radius) ช่องว่างระหว่างพื้นที่กับคาน (Clearance) และแรงกดของแผ่นกดงาน (Blank holding force : BHF) จะทำอย่างไรจึงจะสามารถสมดุลความเครียด (Balance strain) ที่เกิดขึ้นได้ เพื่อความสม่ำเสมอและความสมบูรณ์ของการขึ้นรูปต้องควบคุมการไหลตัวของวัสดุเข้าชิ้นงานโดยเลือกใช้ครอร์บีดที่เหมาะสม สารหล่อลื่นเพื่อช่วยลดความเสียดทาน ตามรูปร่างของการขึ้นรูปตามผนังจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อขีดจำกัดในความเค้นดึง (Tensile stress) และก่อให้เกิดรอยร้าวตามพื้นที่ของแรงกดของแผ่นกด (Blank holder) และเพื่อลดความบกพร่องมีรูปร่างลักษณะไม่ได้ตามที่ต้องการ [2] เช่น เกิดรอยร้าว ซึ่งมักจะเกิดในบริเวณพื้นที่ที่มีค่าความเครียดอัดตัวสูงๆการฉีกขาดซึ่งมักเกิดขึ้นในบริเวณที่โลหะแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรุนแรง ทำให้เกิดรอยขีดตามพื้นที่ของการเสียดสีบนผิวชิ้นงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการขึ้นรูปลึกชิ้นงานแบบรูปทรงไม่สมมาตร

1.2.2 เพื่อนำเสนอแนวทางในการเลือกตัวแปรต่างๆ ในการประยุกต์ของการขึ้นรูปลึกวัสดุเหล็กเกรดเย็นเกรด (JIS: SPCC) ได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุชิ้นงานแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC หนา 1.0 มม. ทำการลากขึ้นรูปลึกด้วยรูปทรงที่ไม่สมมาตร
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของการตัดแผ่นเปล่า
 - ก. แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 140x200 มม.
 - ข. แบบสี่เหลี่ยมชนิดบากมุมทั้งสี่ด้านมุม 45 องศา ขนาด 35 มม. จากมุม
 - ค. แบบทรงตามรูปร่างของการขึ้นรูปซึ่งได้จากการประมาณค่า
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของแรงที่แผ่นกดขึ้นงานโดยเปรียบเทียบจากเปอร์เซ็นต์ของแรงที่ขึ้นรูปใช้เท่ากับ 10% 30% 50% และ 70% ของแรงที่ใช้เพื่อขึ้นรูปลึก
- 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของครอว์บีคชนิดเดียว
 - ก. ชนิดที่ไม่ใช้ครอว์บีค
 - ข. ชนิดครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มม.
 - ค. ชนิดรูปสามเหลี่ยมหรือตัววีที่ทำมุมรวม 60 องศา และสูง 4.0 มม.
- 1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารหล่อลื่น
 - ก. สารสังเคราะห์ กลุ่ม EP (Extreme pressure oil) เป็นน้ำมันผสมไขมันง่ายต่อการทำความสะอาด
 - ข. แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน PE (Polyethylene) ที่มีความหนา 0.1 มม.
 - ค. น้ำมันมะพร้าว
 - ง. ไม่ใช้สารหล่อลื่น

1.4 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

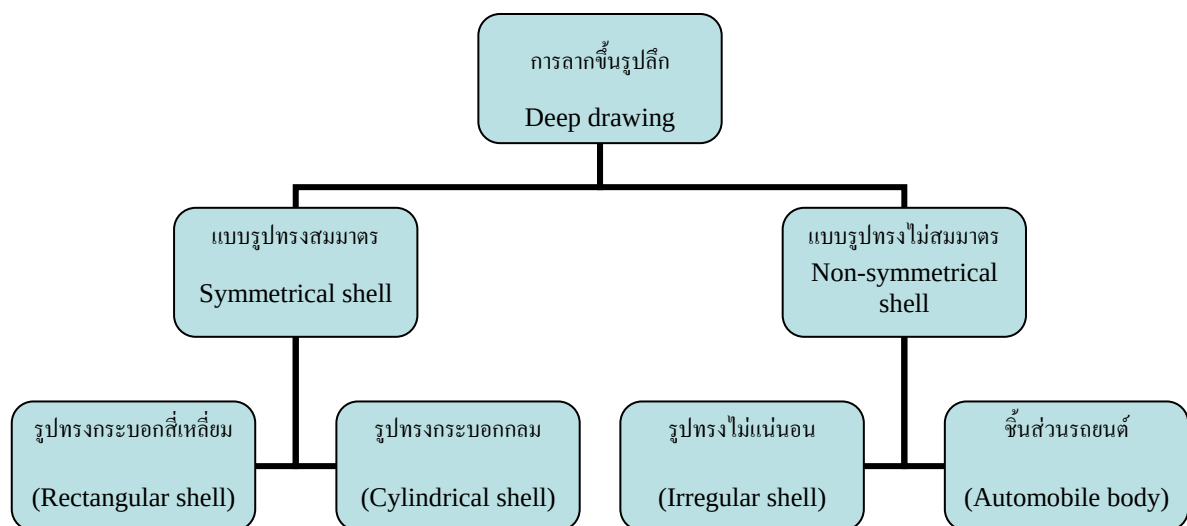
- 1.4.1 การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) คือ การแปรสภาพโลหะจากแผ่นเรียบให้เป็นภาชนะรูปถ้วย (Shell) การเปลี่ยนสภาพนี้ทำได้โดยการกดโลหะแผ่นเรียบด้วย 펀ช์ให้เข้าไปในช่องว่างของคาย ซึ่งรูปแบบอาจเป็นรูปทรงกระบอก รูปกล่องที่มีด้านตรงเอียง และเป็นเส้นโค้งเป็นต้น [1]
- 1.4.2 แรงกดขึ้นงาน (Punch force) คือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) ที่พอเหมาะ สำหรับป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยย่น หรือชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด หรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นได้ [1]
- 1.4.3 ครอว์บีค (Draw bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในคาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูป นอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดของเบงก์ โซลเดอร์ตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับเป็นตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [2]

1.4.4 การหล่อลื่น (Lubrication) การขึ้นรูปจะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับ การหล่อลื่นด้วยหากเลือกใช้ประเภทของสารหล่อลื่นไม่ถูกต้องแล้ว การขึ้นรูปก็จะไม่สำเร็จผลได้ [3]

1.4.5 แผ่นตัดเปล่า (Blank geometry) คือ ขนาดและรูปร่างของแผ่นขึ้นงานก่อนทำการขึ้นรูป ต้องมีการหาขนาดก่อน เพื่อที่จะสามารถทราบว่ามีขึ้นรูปเสร็จแล้ว จะได้ขนาดของขึ้นงานที่มีความลึกตามต้องการ [1]

1.5 ทฤษฎีที่สำคัญและ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในงานวิจัย

โดยหลักการทั่วไปได้แบ่งการขึ้นรูปออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ [4] คือ การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical shell) และการขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell)



ภาพที่ 1.1 การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป [4]

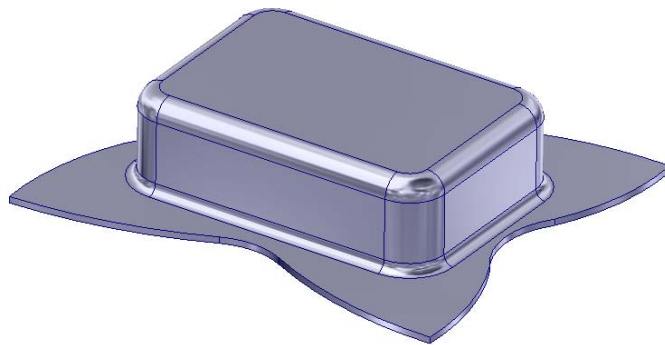
ก. การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical shell)

การขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะประกอบด้วยดาย (Die) พUNCH (Punch) และแผ่นกดยึดขึ้นงาน (Blank holder) การขึ้นรูปลึกจะใช้พUNCHกดลงบนแผ่นเปล่าบนราบขณะที่มีแผ่นกดยึดขึ้นงานกดยึดก่อนจะมีการเปลี่ยนรูปถาวร [3] จะไปยังกดแผ่นตัดเปล่าเพื่อควบคุมให้ไหลเข้าไปในดายหน้าที่ของแผ่นจะกดยึดขึ้นงานก็คือ ป้องกันการย่นที่ขอบขึ้นงาน เพื่อให้ได้ขึ้นงานทรงกระบอกกลมดังภาพที่ 1.2 และการขึ้นรูปขึ้นงานรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.2 การขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอก

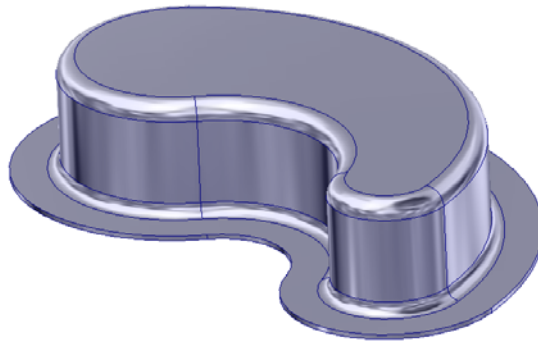
ในการขึ้นรูปลึกทรงแบบสมมาตรทั้งแบบทรงกระบอกกลมและแบบทรงกระบอกสี่เหลี่ยม นั้น จะเห็นได้ว่าจะสามารถควบคุมในการทำให้เกิดความเครียด (Strain) เพื่อเกิดความสมดุล จะเป็นไปได้ง่าย ด้วยรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อนของชิ้นงาน



ภาพที่ 1.3 ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

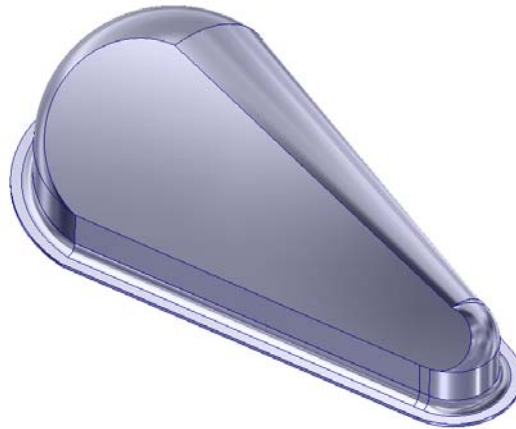
ข. การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell)

จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) ในรูปทรงต่างๆจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกทรงแบบไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell) [4] ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ ที่ได้รับความเค้น (Stress) ที่แตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินไปจะควบคุมจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงานเช่น เกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น



ภาพที่ 1.4 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร

โดยปัญหาที่เกิดขึ้นงานในแต่ละแบบเช่น การฉีกขาด การเกิดการย่นของผิวงาน เป็นต้น ล้วนเกิดจากตัวแปรที่มีอิทธิพล ต่อความสำเร็จของการเปลี่ยนรูอย่างถาวรของแผ่นแบลงค์ ผู้วิจัยจึงออกแบบรูปทรงของชิ้นงานที่อยากต่อการสมดุล ด้วยการขึ้นรูปซึ่งเป็นการขึ้นรูปลึก ดังภาพที่ 1.5



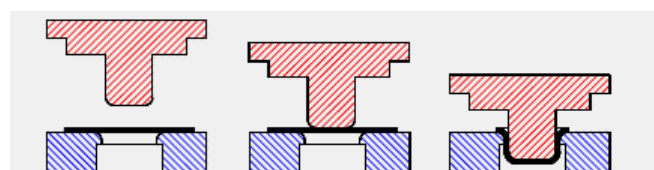
ภาพที่ 1.5 รูปทรงชิ้นงานสำเร็จด้วยการขึ้นรูปลึก

1.5.1 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก

การขึ้นรูปลึกโดยใช้แม่พิมพ์ (Die) การดึงขึ้นรูปโดยใช้สื่อแรงดัน (Pressure medium) การดึงขึ้นรูปโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Energy activation)

การแบ่งแม่พิมพ์ตามโครงสร้างของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังต่อไปนี้

ก. แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน



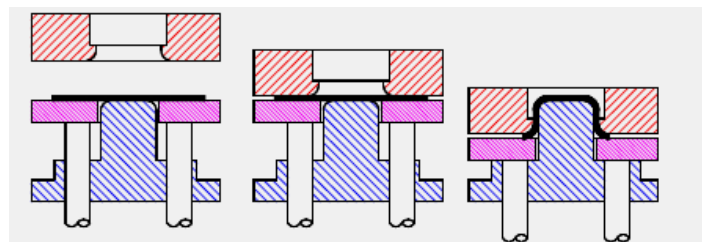
ภาพที่ 1.6 แบบจังหวะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [9]

แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 1.6 และปราศจากรอยย่นที่ชิ้นงาน ถ้าความต้านทานการโก่งตัวของโลหะแผ่นด้านความเค้นแรงกดที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีได้สูงพอ สิ่งนี้จะเป็นจริงได้เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นงานต่อความหนา คือ d_0 ต่อ s_0 มีค่า 25 ถึง 40 ดังสมการที่ (2.1) ค่าที่น้อยที่สุดเป็นค่าที่สามารถใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป β ค่ามากได้ [9]

$$\frac{d_0}{s_0} \text{ มีค่าอยู่ระหว่าง } 25 - 40 \quad (2.1)$$

การขึ้นรูปโดยไม่มีการจับยึดชิ้นงานเป็นการใช้เครื่องมือที่มีโครงสร้างแบบง่ายๆ เนื่องจากไม่มีความเสียดทานที่เกิดจากแผ่นจับยึดงานจึงทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลง และขอบเขตของอัตราส่วน (β) อาจจะเพิ่มขึ้น สิ่งจำเป็นสำหรับการขึ้นรูปของแม่พิมพ์จังหวะเดียวเมื่อใช้แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ด้ามมีรูปทรงเรขาคณิตลักษณะพิเศษ แต่ในการขึ้นรูปที่อัตราส่วนการขึ้นรูป (β) น้อยสามารถทำได้ดีกว่าที่ขอบของแผ่นงานจะถูกยกตัวขึ้น

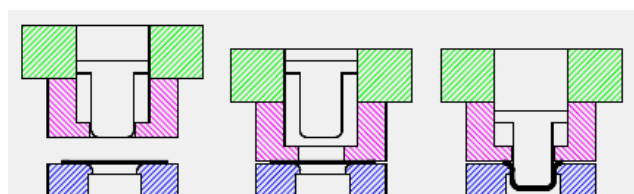
ข. แม่พิมพ์จังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน



ภาพที่ 1.7 แบบจังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [9]

แผ่นจับยึดชิ้นงานจะทำควบคู่กันกับด้ามคูชั่นในแท่นเครื่องปั๊ม ดังนั้นเมื่อพื้นที่ถูกยึดกับแท่นเครื่อง และด้ามถูกยึดติดกับส่วนที่เป็นตัวสไลด์เคลื่อนที่ด้านบนของแม่พิมพ์ในตำแหน่งแรงของแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบน ซึ่งแผ่นชิ้นงานสามารถจะใส่เข้าไปในด้ามได้ในตอนเริ่มต้นของการขึ้นรูป แผ่นจับยึดชิ้นงานและด้ามจะเป็นตัวไปกดแผ่นชิ้นงาน เมื่อสไลด์ส่วนบนเคลื่อนที่ลงมา ด้ามคูชั่นจะส่งแรงด้านด้านล่างผ่านสลักนำไปดันที่นำไปดันที่แผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นแรงในการขึ้นรูปมีแรงต่างกัน คือ แรงกดระหว่างพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 1.7

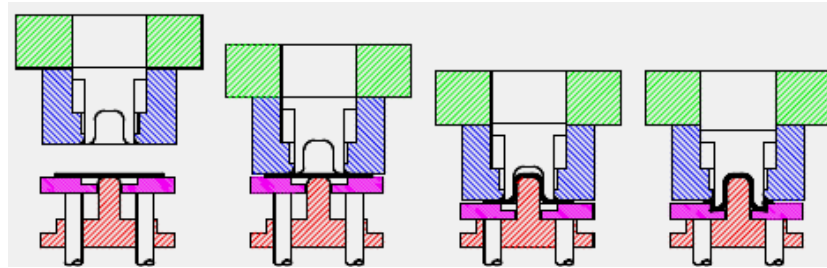
ค. แม่พิมพ์สองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่



ภาพที่ 1.8 แบบสองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ [9]

จากภาพที่ 1.8 แผ่นจับยึดชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่งของตัวสไลด์ส่วนเคลื่อนที่ด้านบนทิศทางการทำงานของแผ่นจับยึดชิ้นงานจะไปในทิศทางเดียวกันกับตัวสไลด์พื้นซ์ของเครื่องปั๊มคายของแม่พิมพ์จะยึดติดแน่นกับแท่นของเครื่องปั๊ม การใส่แผ่นชิ้นงานลงไปในคายจะกระทำในขณะที่พื้นซ์และแผ่น จับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบนในขั้นตอนแรงของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานจะกดลงบนแผ่นชิ้นงาน และในขั้นที่สอง พื้นซ์จะเคลื่อนตัวลงมาทำการขึ้นรูปต่อไป

ง. แม่พิมพ์สามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานและคายคู่ชั้น



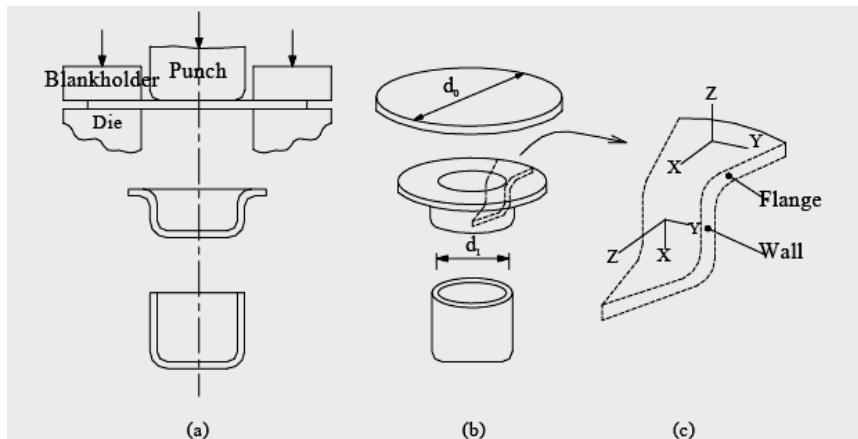
ภาพที่ 1.9 แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวคายคู่ชั้น [9]

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแม่พิมพ์สองจังหวะ ที่มีตัวสไลด์แผ่นยึดชิ้นงานเคลื่อนที่กับแม่พิมพ์สามจังหวะที่มีคายคู่ชั้นเพิ่มขึ้นมา จากภาพที่ 1.9 เมื่อเราใส่แผ่นชิ้นงานเข้าไปในคายแล้วพื้นซ์ และแผ่นจับยึดชิ้นงานรวมทั้งคายคู่ชั้นจะอยู่ในตำแหน่งบนของแม่พิมพ์ ขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นจับยึดชิ้นงานกับคายคู่ชั้นในตำแหน่งนี้แม่พิมพ์ส่วนจะเคลื่อนที่ลงมา และเริ่มต้นการขึ้นรูปด้วยพื้นซ์ ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่แท่นเครื่อง ในจังหวะ ที่สองตัวสไลด์ของเครื่องปั๊มที่อยู่ด้านบนจะเคลื่อนตัวลงมา และทำการขึ้นรูปลึก ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ชนิดนี้ จะเป็นการขึ้นรูปแบบดึงขึ้นรูปครั้งแรกและดึงขึ้นรูปกลับทางอยู่ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งแรงในการดึงขึ้นรูปเป็นผลของแรงที่ต่างกันระหว่างพื้นซ์ และแผ่นจับยึดชิ้นงาน

1.5.2 การขึ้นรูปลึกรูปทรงกระบอกกลม

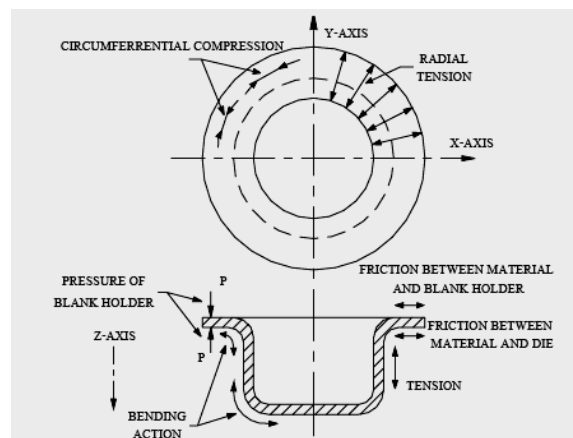
เมื่อพิจารณาการขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกลม ดังภาพที่ 1.10 (c) แสดงรูปถ้วยและนิยามระบบแกนพิกัด x y และ z บริเวณที่สำคัญมีอยู่ 2 บริเวณคือ บริเวณปีกซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุด และบริเวณผนังซึ่งต้องรับแรงที่ทำให้เปลี่ยนรูปที่ขอบได้เพียงพอ ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่าใหญ่เกินไป แรงที่ต้องส่งผ่านผนังจะมีค่ามากเกินไป จึงทำให้วัสดุขาดเสียหายได้ สภาพชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้อาจแสดงโดย จิตจำกัอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึก เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เสียหายในระหว่างการลากขึ้นรูปแผ่นชิ้นงาน เปล่า (Blank) จะถูกพื้นซ์เคลื่อนที่ลงมากดดึงผ่านลงไป ในปากคาย ทำให้แผ่นชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ เกิดทั้งการดัด (Bending) การดัดกลับ (Rebending) และ

การทำให้ตรง (Straightening) การวิเคราะห์สภาวะความเค้นที่บริเวณต่างๆ ระหว่างช่วงการลากขึ้นรูป จะมีความสำคัญอย่างมาก

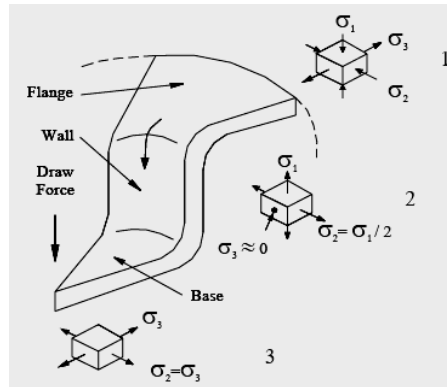


ภาพที่ 1.10 (a) วิธีการลากขึ้นรูปลึก (b) ชิ้นงานทรงกระบอก (c) รูปถ้วยและแกนพิกัด x, y, z [13]

ภาพที่ 1.11 เมื่อพิจารณาภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุแผ่นงาน ที่บริเวณก้นถ้วย ที่พื้นซึ่งเคลื่อนที่ลงมากดนั้นจะเกิดความเค้นดึงในสองแนวแกน (Biaxial tension) เนื่องจากการดัดที่บริเวณปากของพื้นส์ และบริเวณผนังถ้วยจะมีสภาวะที่ถูกดึงเกิดความเค้นดึง เนื่องจากวัสดุแผ่นงานในบริเวณนี้ผ่านขั้นตอนคือ การดัด การดัดกลับ และการทำให้ตรง ซึ่งจะเคลื่อนที่สัมผัสไปกับพื้นส์ที่เป็นตัวบังคับซึ่งไม่ทำให้เกิดการหดตัวในแนวรัศมี ที่บริเวณปากถ้วยนั้นจะเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี (Radial tension) และความเค้นอัดในแนวเส้นรอบรูป (Circumferential compression)

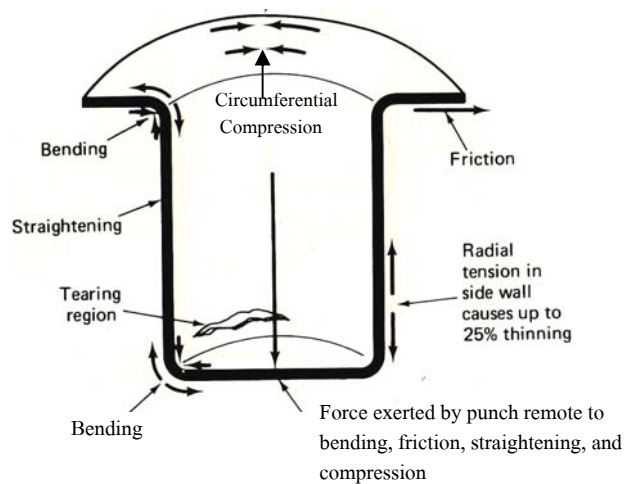


ภาพที่ 1.11 ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึก [13]



ภาพที่ 1.12 สถานะความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [13]

ความเค้นที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปลึกมีดังนี้คือ ความเค้นอัดตามแนวเส้นรอบวง (Hoop compression stress) ความเค้นดัด ความเค้นอัด ความเค้นดึง แสดงในภาพที่ 1.13



ภาพที่ 1.13 ความเค้นที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปลึก [13]

1.5.3 การขึ้นรูปลึกรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเปลือกรูปวงรี

ขีดจำกัดการดรอว์เปลือกรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขึ้นอยู่กับผลกระทบของตัวแปรต่างๆ มากมาย เช่น ชนิดของวัสดุแผ่น ความหนาแผ่นโลหะ ลักษณะรูปร่างที่ขึ้นรูป รัศมีมุมของงาน อัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาวของรูปด้วย ฯลฯ เพราะว่าขีดจำกัดการดรอว์เป็นเรื่องที่ซับซ้อนเกินกว่าจะกำหนดตายตัวได้ จึงมีหลายวิธีการที่พยายามจะอธิบายและกำหนดถึงขีดจำกัดการดรอว์ เช่น ในการดรอว์เปลือกรูปวงรีมีการกำหนดค่าว่าถ้าใช้พื้นที่ของแผ่นขึ้นงานไม่มากกว่าสี่เท่าของพื้นที่ หน้าตัดขวางพื้นที่ สามารถดรอว์ได้ภายในครั้งเดียว และสำหรับการดรอว์งานเปลือกรูปทรงสี่เหลี่ยมต่างๆไป ใช้อัตราส่วนระหว่างความสูงเปลือกรูปด้วยกับรัศมีมุมพื้นที่เท่ากับ 4-6 เท่า และ

การคร่าวให้ได้ความสูงรูปถ้วยจากความสัมพันธ์ของความยาวและความกว้างของเปลือกชิ้นงานได้ดังสมการต่อไปนี้ [11]

$$\frac{h}{w} = C \sqrt{\frac{l}{w}} \quad (2.2)$$

เมื่อ C = ค่าคงที่

เท่ากับ 0.8 เมื่อใช้วัสดุ เหล็กกล้าละมุน ทองแดง ทองเหลือง

เท่ากับ 0.70-0.75 เมื่อใช้วัสดุ อะลูมิเนียมเจือชนิดอ่อน

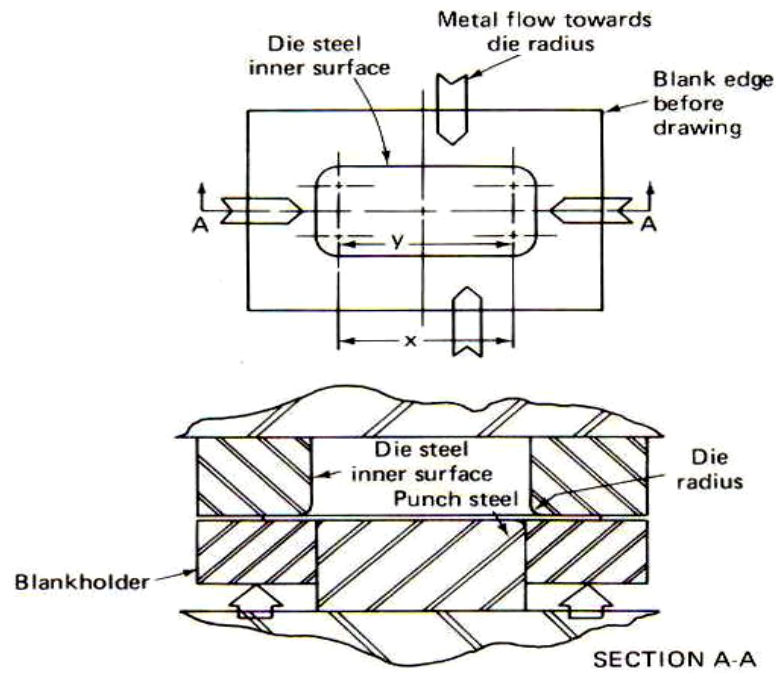
l = ความยาวเปลือกรูปถ้วย

w = ความกว้างเปลือกรูปถ้วย

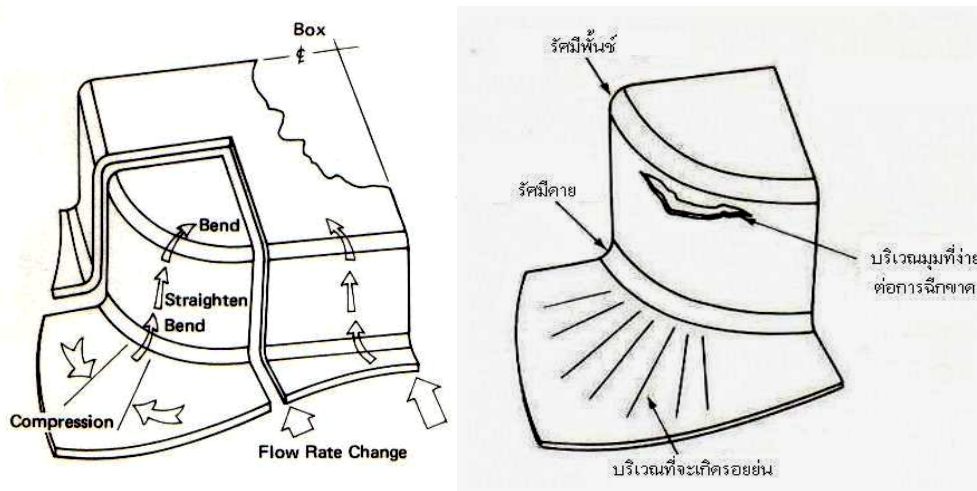
h = ความสูงเปลือกรูปถ้วย

ตารางที่ 1.1 แรงดันที่เหมาะสมที่ใช้กดยึดแผ่นชิ้นงานตามวัสดุต่างๆ [15]

Meterial	(kgf/cm ²)
Ordinary steel	16 ~ 18
Deep drawing steel	20 ~ 25
Stainless steel	18 ~ 20
Copper	8 ~ 12
Brass	11 ~ 16
Aluminum	3 ~ 7



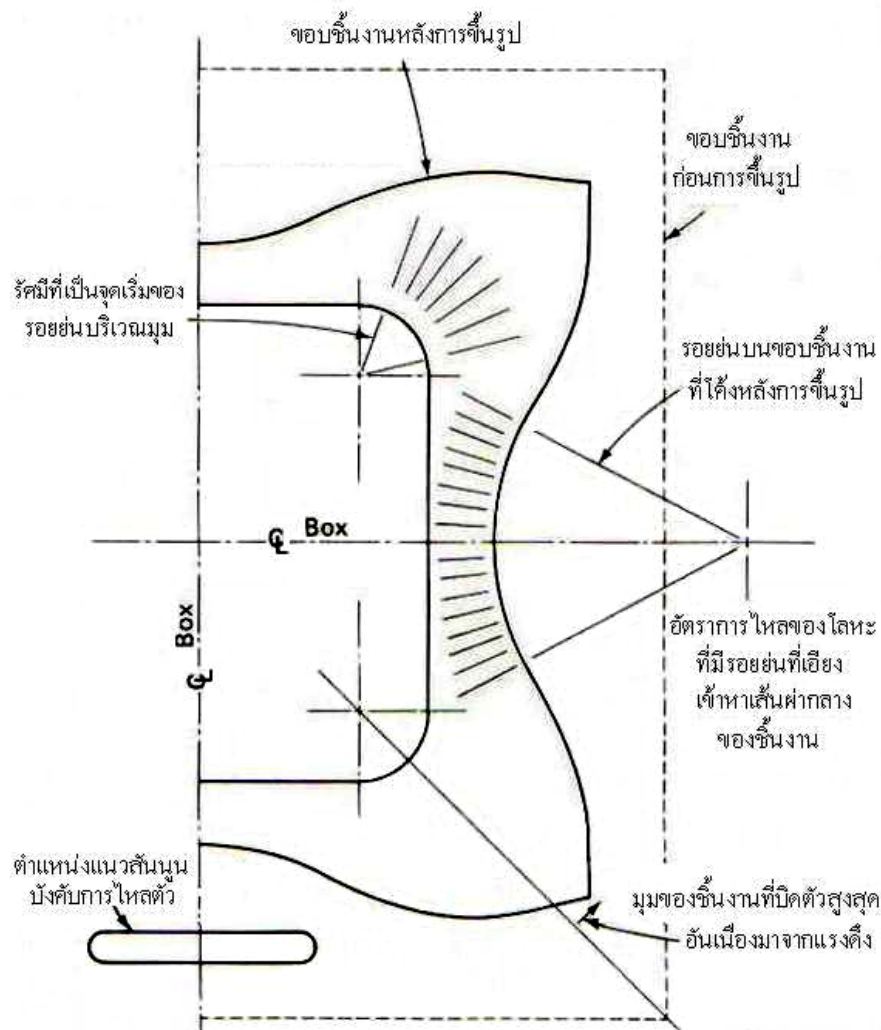
ภาพที่ 1.14 พื้นที่ของความสามารถการไหลตัว [13]



ภาพที่ 1.15 ความเค้นและจุดบกพร่องของโลหะระหว่างการขึ้นรูปลึก [13]

ผลกระทบของรูปร่างผลิตภัณฑ์ และค่าแอนไอโซทรอปีในแนวระนาบกับความสามารถในการขึ้นรูปลึก (Deep draw) เปลือกทรงสี่เหลี่ยมของแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งมีสองปรากฏการณ์ที่สามารถใช้เป็นข้อพิจารณาถึงขอบเขตในการขึ้นรูปลึกคือ

- การไหลตัวของโลหะบริเวณมุมของชุดคายน
- การป้องกันการเกิดการฉีกขาดที่มุมพื้นซ์โดยการเปลี่ยนรูปร่างของภาคตัดหน้าขวางพื้นซ์



ภาพที่ 1.16 การไหลตัวของโลหะหลังการขึ้นรูป [13]

จุดแรกที่น่ามาพิจารณาของการขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 1.16 ที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนคือ การเปลี่ยนรูปบริเวณหน้าตัดขวางพื้นที่และการไหลตัวของโลหะที่ไม่สมมาตรกัน ผลที่ตามมาคือเกิดการบิดงอซึ่งตามปกติจะเกิดที่บริเวณมุมพื้นที่และโลหะบริเวณที่ไหลตัวเข้าสู่ปากตาย จะเกิดการเปลี่ยนรูปที่เรียกว่าผลจากการคลายความเครียด (Strain relief effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการขึ้นรูปลึก (Deep draw) จากการศึกษามากมายของมาซิเนียคและคณะ ถึงผลกระทบของหน้าตัดขวางของเครื่องมือต่อการขึ้นรูปโดยใช้พื้นที่ที่มีหน้าตัดต่าง ๆ กันไปเช่นใช้รัศมีมุมพื้นที่และคายเท่ากันที่ 4, 8, 16 และ 20 มม. ใช้รัศมีขอบพื้นที่และคายเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ศึกษาถึงผลกระทบของความไม่เท่ากันทางคุณสมบัติในทุกทิศทางของโลหะในการขึ้นรูปลึก โดยตัดแผ่นชิ้นงานในแนวเส้นทแยงมุมกับแนวการรีดในการผลิตโลหะแผ่นที่ 0° และ 45° และกำหนดอัตราส่วนระหว่างด้านกว้างแผ่นชิ้นงานกับด้านกว้างพื้นที่ ซึ่งจะใช้ในการหาความสามารถในการขึ้นรูปลึกดีปดรอว์เปลือกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

1.5.4 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการขึ้นรูปลึก

ก. แรงในการดึงขึ้นรูป (Punch force)

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพUNCH สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป สำหรับการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก แรงขึ้นรูปสูงสุดหาได้จากสมการ 2.3 [11] และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงที่ไม่สมมาตรดังสมการที่ 2.4 [4]

$$F_d = \pi \times d_m \times s_o \left[1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{def}} \left[\ln \frac{d_o}{d1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.3)$$

$$Fd = \frac{Sy + Su}{2} \times Lt \times So \quad (2.4)$$

Fd = แรงขึ้นรูป (N)

Sy = ความเค้นจุดคราก (N/mm^2)

Su = ความเค้นสูงสุด (N/mm^2)

Lt = ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)

So = ความหนาของวัสดุ (mm)

ข. แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holding force: BHF)

ปีกของชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปจะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร่นเนื่องจากการโก่งตัวของวัสดุรอยร่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกด ซึ่งแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงาน P_{BH} จะไปกดลงบนแผ่นขอบปีกชิ้นงานขณะทำการลากขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ A_{BH} ดังนั้นการคำนวณค่าแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานหาได้จากสมการที่ 2.5 [11]

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.5)$$

F_{BH} = แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

A_{BH} = พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน

P_{BH} = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลียงรอยขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.6 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกด โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป $\beta=2.0$ และใช้วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) S_U เท่ากับ 100 200 400 และ 600 N/mm² ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟแสดงในภาพที่ 1.17 โดยสัมพันธ์กับค่าความหนาของวัสดุ $\frac{S_0}{d_0}$ [11]

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times S_U \left[(\beta - 1) + \frac{0.005 \times d_0}{S_0} \right] \quad (2.6)$$

P_{BH} = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด

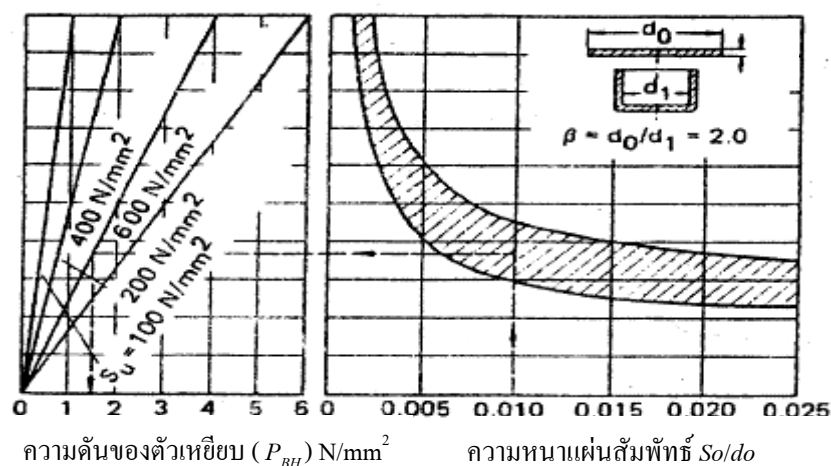
C = ค่าคงที่

S_u = ความต้านแรงดึง

β = อัตราส่วนการขึ้นรูป

d_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางแผ่นชิ้นงาน

S_0 = ความหนาของชิ้นงาน



ภาพที่ 1.17 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก [16]

ค. ระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die clearance)

ในทางปฏิบัติเพื่อกำหนดระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มักจะกำหนด โดยรูปสมการที่ได้มาจากการทดลอง สมการเหล่านี้อนุญาตให้ใช้ได้แต่เพียงการดึงขึ้นรูปเล็กที่มีชิ้นงานเป็นรูปร่างกลม โดยไม่มีการรีดของเนื้องาน (Ironing) [11]

$$U_D = S_0 + 0.07\sqrt{10 \times S_0} \text{ สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.7)$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \text{ สำหรับอลูมิเนียม} \quad (2.8)$$

$$U_D = S_0 + 0.04\sqrt{10 \times S_0} \text{ สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่นๆ} \quad (2.9)$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \text{ สำหรับโลหะผสมอุณหภูมิ} \quad (2.10)$$

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านที่ผิวของแม่พิมพ์ระยะเพื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die clearance) ในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle cup drawing) ดังนั้นช่องระหว่างพื้นซ์ กับ ดาย จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะซึ่งส่วนที่มากกว่านี้มีค่าประมาณ 7 - 20% ของความหนาชิ้นงาน ตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านจะต้องมีระยะเพื่อช่องว่าง (Clearance) มากกว่าทางด้านตรงนั้น ระยะเพื่อช่องว่างจะมีค่าน้อยโดย [18]

$$c = t \text{ (\% ความเผื่อ)} \quad (2.11)$$

$$\text{Die size} = D \text{ work} \quad (2.12)$$

$$\text{Punch size} = D \text{ work} - (2t+2c) \quad (2.13)$$

ตารางที่ 1.2 ค่าพิคัดความเผื่อสำหรับงานลากขึ้นรูป [12]

Thickness, 1 (in.)	First Draw (%)	Second Draw (%)
Up to 0.015	7-9	8-10
0.016-0.050	8-10	9-12
0.051-0.125	10-12	12-14
Over 0.125	12-14	15-20

จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นตัดเปล่า (Blank) เพิ่มขึ้นระยะเพื่อช่องว่างจะเพิ่มขึ้นด้วย และสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อไป ไประยะเพื่อช่องว่าง (Clearance) ก็ต้องเพิ่มขึ้นอีก

ง. ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป ($\beta_{\max}$) มันเป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุและขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นงาน d_o และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ d_f ดังสมการที่ 2.14 [11]

$$\beta_{\max} = \left[\frac{d_o}{d_f} \right]_{\max} \quad (2.14)$$

ค่านี้เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนความหนาของเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ d_p/s_o ค่าโดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด จะสูงขึ้นถ้าความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ d_p/s_o มีค่าต่ำลง ดังนั้นการปฏิบัติงานในระบบของการหล่อขึ้นรูปมีการขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด ด้วย ดังนั้นค่าความเสียหายที่ตายและแผ่นจับยึดขึ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมประสิทธิ์ความเสียหายที่พื้นที่ (Punch) มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด [10]

Material	$\beta_{\max}$
Steel sheet , depending on quality	1.8 - 2.2
Aluminum , copper , Al Cu Mg sheet	2.1
Brass sheet , depending on prestrain	1.7 - 2.2

1.5.5 ปัญหาในการขึ้นรูป

ปัญหาหลักที่พบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือการแตก การโก่ง (Buckling) และการย่น การเสียรูป (Shape distortion) โลหะหย่อน (Loose metal) และเนื้อผิวเสีย (Undesirable surface textures) เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโลหะแผ่นนั้นใช้ไม่ได้ ผลของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [8]

ก. การแตก

เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยึดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการดรอว์มากเกินไปขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะรับได้ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยึดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตก การเกิด

รอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอ

ข. การโค้งและการย่น

ในการขึ้นรูปด้วยพื้นที่กดอัดบนแผ่นเบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นเบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่าการโค้ง การโค้งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นเบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหันและบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นเบลงก์จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

ค. การเสียรูป

โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับการดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับกับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ (Springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่น เบลงก์แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

ง. โลหะหย่อน

เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีมีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดงอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่น การดัดเป็นลอนแหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสรอยย่นทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการยืดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นเบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

จ. เนื้อผิวเสีย

เกิดจากโลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบ มักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่

มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการขีดที่จุดคราก นั่นคือ วัสดุขีดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยนรูปที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะเรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders line) หรือรีวคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำ ความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่ม อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน

1.5.6 สมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูป

(Mechanical properties and formability)

การเลือกวัสดุเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติกลางๆระหว่างสมบัติที่ต้องการในชิ้นงานกับสมบัติในการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานช่วงกว้างๆ ควรมีสมบัติดังนี้

ก. ความต้านแรงคราก (Yield strength)

ความต้านแรงครากของแผ่นเหล็กเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปและความแข็งแรงหลังการขึ้นรูป พฤติกรรมการครากหลายๆชนิดสังเกตจากแผ่นเหล็ก เมื่อเกิดการขีดที่จุดครากเป็นค่าที่ต่ำที่สุดระหว่างการครากที่ไม่ต่อเนื่อง ในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปความต้านแรงคราก 240 MPa หรือมากกว่ามีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการติดกลับที่มากเกินไปและเกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุที่มีความต้านแรงครากน้อยกว่า 140 MPa อาจจะมีผลกับชิ้นงานได้ซึ่งมีระดับความแข็งแรงไม่เพียงพอ เหล็กแผ่นที่มีความแข็งแรงสูงๆ สามารถปรับปรุงการขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม

ข. การยืดรวม (Total elongation)

เป็นการวัดขึ้นทดสอบการดึงโดยวัดความยาวเกจ (Gauge length) ภายหลังเกิดการแตกหัก การยืดเป็นการคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของความยาวทดสอบเดิม ซึ่งปกติ 50 มม. (อาจจะใช้ความยาวทดสอบ 200 มม. สำหรับโลหะเกรดแข็งแรง) ขึ้นทดสอบโลหะแผ่นโดยปกติจะใช้ทดสอบการดึงช่วงความยาวทดสอบสั้นๆ ด้านข้างขนาน หน้าตัดจะลดลง แต่หน้าตัดจะลดเป็นลักษณะเรียวเพียงเล็กน้อยบางครั้งใช้ควบคุมตำแหน่งการเกิดรอยคอดและรอยแตกหัก

ตารางที่ 1.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น [9]

ชนิด	ลักษณะพิเศษ	ความเค้น คราก (MPa)	การยืดตัว ใน 50 mm (%)	ความ แข็ง (HRB)	n	r _m	m
Commercial	Standard properties	234	35	45	0.18	1.0	0.012
Drawing(Rimmed)	Stretchable	207	42	40	0.22	1.2	0.014
Drawing(Special killed)	Deep drawing	172	42	40	0.22	1.6	0.015
Interstitial free (IF)	Extra deep drawing	152	42	45	0.24	2.0	0.015
Medium strength	Formable	414	25	85	0.20	1.2	...
High strength	Moderately formable	689	10	25 (HRC)	...	...	...

ตัวอย่างค่าการยืดของความยาวทดสอบ 50 มม. ดังแสดงในตาราง 1.4 ซึ่งเป็นการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเกรดธรรมดา โดยทั่วไปการยืดตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำปกติจะอยู่ที่ 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ในความยาวเกจ (Gauge length) 50 มม. ค่าที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่า

ค. การยืดสม่ำเสมอ (Uniform elongation)

การยืดรวมของแผ่นขึ้นทดสอบแรงดึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือการยืดสม่ำเสมอและหลังการยืดสม่ำเสมอ สำหรับวัสดุที่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกฎกำลัง ($\sigma = K\epsilon^n$) การยืดสม่ำเสมอวัดในความเครียดจริง เป็นค่าที่เหมาะสมต่อเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ภายหลังการยืดสม่ำเสมอเกิดขึ้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดและความไวของอัตราความเครียดทั้งสองชนิดของโลหะต่อความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราส่วนความเครียดทั้งสองชนิดของโลหะจะมีความมากกว่าบริเวณภายนอก เมื่อการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่ามากขึ้นวัสดุจะถึงจุดต้านทานแรงได้น้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านความหนาลดลง ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนรูปบริเวณด้านนอกของรอยคอด

ง. การยืดที่จุดคราก (Yield point elongation)

เป็นส่วนหนึ่งของการยืดรวมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการครากแบบไม่ต่อเนื่องที่ความเค้นคราก ตามด้วยการก่อรูปของรอยร้าวที่พื้นผิวซึ่งรู้จักกันว่าเส้นลือเดอร์หรือริ้วคราก ซึ่งเป็นการแสดง

ข้อผิดพลาดในวิธีใช้หลายอย่างของโลหะแผ่น การยึดที่จุดครากระหว่างการทดสอบแรงดึงที่ไม่ปรากฏให้เห็น จะแสดงให้เห็นเส้นลือเดอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป

การยึดที่จุดครากส่วนใหญ่จะต้องมีเศษแทรกในธาตุเจือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้เหล็กที่มีสารแทรกต่ำจะไม่แสดงออก การยึดที่จุดครากสามารถระงับได้โดยการอบคืนตัวรอบๆแผ่นโลหะขณะทำการบด เว้นเสียแต่ในไนโตรเจนมีส่วนผสมของธาตุอื่น(ปกติอะลูมิเนียม) เหล็กกล้าจะมีความแข็งแรงขึ้นหลังจากมีการเก็บไว้นานๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆในการเก็บ) เหล็กกล้าที่มีการเปลี่ยนตามอายุสามารถใช้ในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด

จ. อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic strain ratio)

ค่า r มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง (ϵ_w) ต่อความเครียดจริงในแนวความหนา (ϵ_t) ของความเครียดช่วงพลาสติกในโลหะแผ่นบริเวณการยึดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง เกี่ยวข้องกับความสามารถในการดรอว์ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนา (Thinning) ในการดรอว์วัสดุบริเวณริมขอบชิ้นงานจะเกิดการยึดในทิศทางเดียว แนวรัศมี เกิดการกดในทิศทางตั้งฉาก(แนวเส้นรอบวง) ค่า r สูงแสดงว่าวัสดุมีสมบัติการดรอว์ได้ดี [19]

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w / w_o)}{\ln(t / t_o)} \quad (2.15)$$

อัตราส่วนความเครียดพลาสติกเกี่ยวข้องกับการกำหนดทิศทางโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งค่าจะเปลี่ยนไปตามทิศทางการทดสอบ(สัมพันธ์กับทิศทางการรีด) ในโลหะที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ค่าเฉลี่ย r_m (บางครั้งเรียกว่า $\bar{r}$) แทนด้วยแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉากของแผ่นเหล็ก ค่า r ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามทิศทางของแผ่นวัสดุในการดรอว์ขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ผนังของถ้วยสูงไม่เท่ากัน เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่ารอยดิ่ง (Earring) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักวัดค่า r เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปี้ตั้งฉากเฉลี่ย r_m (Normal anisotropy) และแอนไอโซทรอปี้ระนาบ ค่า Δr (Planar anisotropy) [19]

สมบัติของ r_m มีนิยามว่า

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.16)$$

เมื่อตัวห้อยที่อ้างถึงคือมุมระหว่างแกนขึ้นทดสอบการดึงกับทิศทางการรีดแผ่นวัสดุเหล็ก รีดร้อนและรีดเย็นอบคืนตัวอุณหภูมิสูงคือไอโซทรอปิกทั่วไป ($r_m = 1.0$) เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ (รีมส์ สตีล) ปกติมี r_m เท่ากับ 1.2 แต่อาจจะมีค่าสูงขึ้นในกรณีพิเศษเช่นผลิตภัณฑ์ที่มีเมงกานีสและซิลิโคนผสมอยู่ต่ำๆ เหล็กกล้าเนื้อแน่น (อะลูมิเนียมคิลล์สตีล) จะมีแอนไอโซทรอปิก r_m เท่ากับ 1.6 หรือค่า อาจจะสูงกว่า (สูงถึง 2.5) ซึ่งได้มาโดยควบคุมส่วนประกอบและขบวนการผลิต จิตจำกัค่าสูง สำหรับเหล็กกล้าเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.0 ถึงแม้ว่าค่าใกล้เคียง 3.0 จะได้ใช้นานๆ ครั้ง เหล็กกล้า (Interstitial free steel) จะมี r_m ประมาณ 2.0 ค่า r_m ใช้ทำนายความสามารถในการดรอว์ขึ้นรูปโลหะ แอนไอโซทรอปิกในระนาบ ค่า Δr นิยามว่า [19]

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.17)$$

r_m เป็นค่าที่กำหนดความลึกเฉลี่ย (ความสูงของผนัง) ของการดรอว์ลึกที่สุดเท่าที่จะ เป็นได้ Δr เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของรอยดึง วัสดุที่มีค่า r_m สูงและค่า Δr ต่ำในขณะเดียวกันทำ ให้มีความสามารถในการดรอว์ที่เหมาะสม

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อนมีค่า r_m ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์รีดเย็น (Cold-rolled rimmed steel) มีค่าในช่วง 1.0 ถึง 1.4 เหล็กกล้าเนื้อแน่นรีดเย็นกำจัดออกซิเจน (Cold-rolled aluminium-killed steel, Deoxidized) มีค่าในช่วง 1.4 ถึง 2.0 เหล็กกล้า (Interstitial free steel) มี ค่าในช่วง 1.8 ถึง 2.5 และอะลูมิเนียมเจือมีค่าในช่วง 0.6 ถึง 0.8 ค่า r_m สูงสุดในทางทฤษฎีสำหรับ เหล็กกล้าเฟอร์ไรต์ (Ferritic steel) คือ 3.0

จ. เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent)

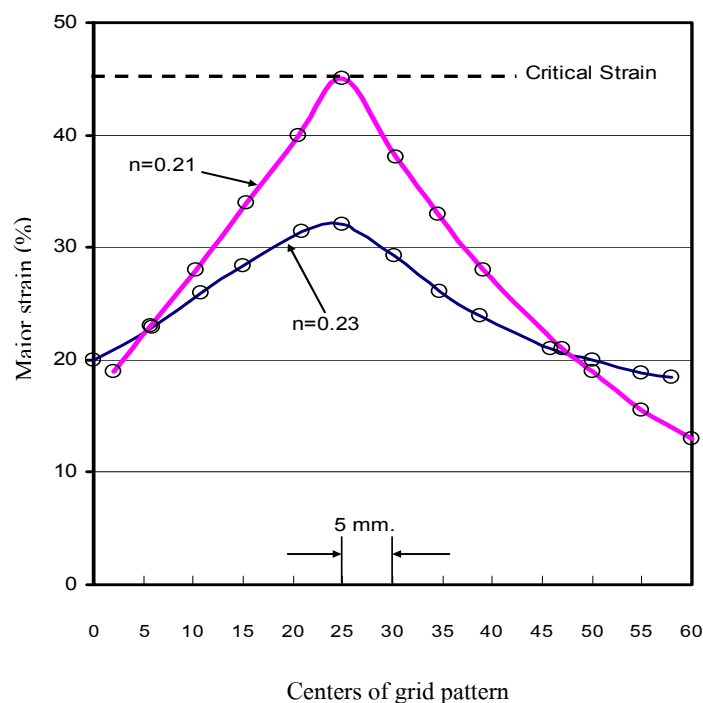
n คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริงเมื่อมีการพล็อตบนค่า ลอการิทึม เป็นการกำหนดโดยขึ้นอยู่กับความเค้นไหล (Flow stress) บริเวณจุดครากบนระดับ ความเครียด ในวัสดุค่า n มีค่าสูงความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียด ซึ่งควร ระวังการกระจายความเครียดที่เพิ่มขึ้นในบริเวณความเครียดและความเค้นไหลที่ต่ำกว่า ค่า n ที่สูงจะ เป็นตัวชี้ว่ามีความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรงสำหรับ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความหมายตามสมมุติฐานของสมการ [19]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.18)$$

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่า n โดยทั่วไปประมาณ 0.22 ใช้สำหรับขึ้นรูปขึ้นส่วนที่ยู่ยาก ชับซ้อน ค่าที่สูงกว่า (ขึ้นไปถึง 0.26) จะระบุถึงความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี เหล็กกล้าผิว

บริสุทธิ์โดยทั่วไปค่า n เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีการรีดที่ดีกว่าหลังการประกันอายุและมีค่าน้อยกว่า บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีขบวนการผลิตไม่เพียงพอสำหรับความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะเกรดรีดร้อนจะมีค่า n ต่ำ เท่ากับ 0.10 แต่เกรดที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า n มากกว่า 0.14

ผลของค่า n ที่แตกต่างกันสำหรับการกระจายความเครียดในบริเวณวิกฤตของชิ้นงานขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กด้วยค่า n ที่ต่ำ (0.21) อาจเกิดการบางและรอยแตกที่มากเกินไปในบริเวณวิกฤต การขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมือนกันทุกประการจากแผ่นที่มีค่า n สูง (0.23) หลายครั้ง จะเกิดความแข็งแรงขึ้นในพื้นที่วิกฤตถ่ายทอดความเครียดไปยังพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงอาจทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างการขึ้นรูป



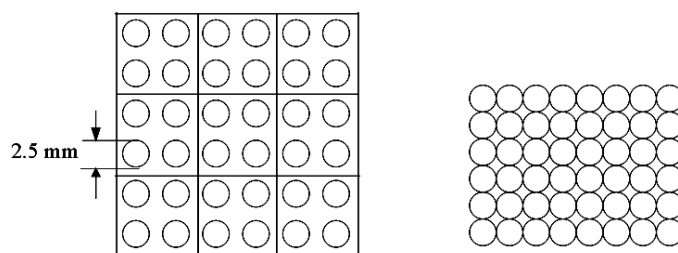
ภาพที่ 1.18 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า n ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต [8]

1.5.7 การตีกริดและวิเคราะห์กริดวงกลม

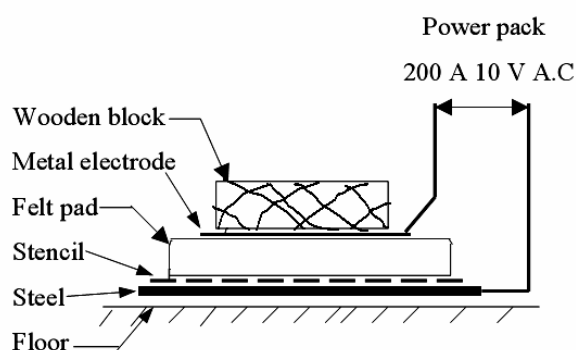
ก. การตีกริดด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrochemical)

อาศัยตะแกรง (Stencil) เพื่อให้มันง่ายและใช้แรงดันของไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นรูปแบบของแผ่นขึ้นงานที่วางเปล่า มีผ้าขนสัตว์ (Felt pad) วางทับลูกกลิ้งหรือแผ่นทับ (Wooden block) เดินเข้าๆ ชุ่มกับสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อยู่วางทับทางด้านบนของความว่างแผ่น Stencil และขั้วไฟฟ้าใช้กับแผ่นเหล็ก (Metal electrode) สารเข้าร่วมขั้วไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกับอิเล็กโทรดสามารถปรับ กระแสและแรงดันปรับจาก 15 ถึง 200 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับ

ขนาดของตะแกรง (Stencil) และความหนาแน่นเส้นบรรทัด หลังจากให้ทำผ่านสั้วกับขั้วไฟฟ้าเดิน
 ซ้ำๆจนสิ้นสุดแผ่นของแผ่นงาน สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะ
 ทำให้เคลื่อนผ่านตะแกรง (Stencil) และเข้ามาติดต่อบนแผ่นเหล็กของชิ้นงานการตีกริดโดยใช้กรดให้
 กัดกร่อน (Electrochemically) ผ่านถูกผ้าสักกราดที่ต้องเป็นตัวกลางผ่านสารละลายไปยังแผ่นโลหะ [4]



Patterns of circle grids



ภาพที่ 1.19 ขั้นตอนการตีกริด (Electrochemical marking) [4]

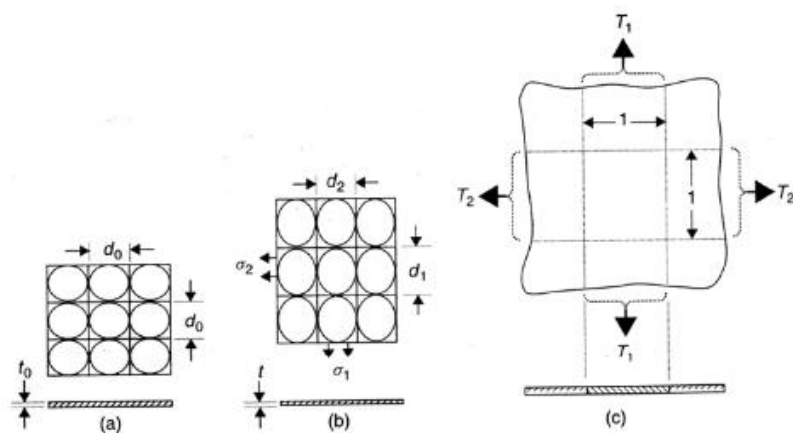
สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเหมาะสมของ
 สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าควรจะเป็นซึ่งถูกใช้เป็นชนิดโลหะ
 โดยเฉพาะสารละลายเป็นด่างของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า
 จะมีส่วนผสมของสารละลายดังนี้

โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride)	: 80 กรัม
โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)	: 90 กรัม
กรดไนตริก (Nitric acid)	: 100 มม.
กรดเกลือ (Hydrochloric acid)	: 100 มม.
น้ำ (Water)	: 4.5 ลิตร

ข. การวิเคราะห์กริดวงกลม (Analysis of circle grid)

- การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress)

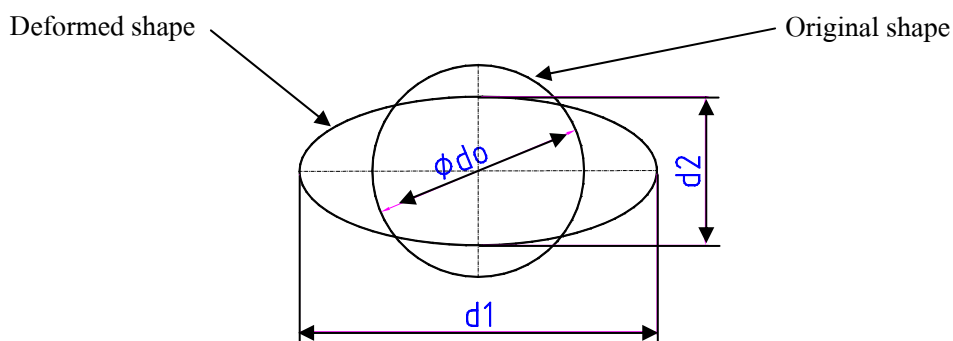
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ในรูปที่ 2.19 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 แสดงในรูปที่ 2.19 (a) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ d_1 แกนรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางการหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในรูปที่ 2.19 (b) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังในภาพที่ 1.20 (c) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 [20]



ภาพที่ 1.20 กรณีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด [20]

- ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤติของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป ดังภาพที่ 1.21



ภาพที่ 1.21 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม [4]

$$\text{ค่าความเครียดหลัก (Major strain)} \quad \varepsilon_1 = \ln \frac{d1}{d0} \quad (2.19)$$

$$\text{ค่าความเครียดรอง (Minor strain)} \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d2}{d0} \quad (2.20)$$

$$\text{ค่าความเครียดที่ความหนา (Thickness strain)} \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{t1}{t0} \quad (2.21)$$

$$\text{ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)} \quad \bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (2.22)$$

1.5.8 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียดนิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกของรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese industrial standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.5 SPCC เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอัดโลหะ ยกเว้นอัดขึ้นรูปลึกมาก (Sever deep-drawing) ผิวของเหล็กแผ่นเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นชนิดด้าน (Dull sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดผิวหยาบ และผิวเรียบ (Bright sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดละเอียด [8]

SPCC เป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเกรดเหล็ก (Steel grade) ตามมาตรฐาน JIS G3141:1996 (Cold reduced carbon steel sheets and strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE ซึ่งเป็น (Deep draw quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก [8]

ตารางที่ 1.5 เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) มาตรฐาน [8]

ชนิด	ส่วนผสม					การใช้งาน
	C	Si	Mn	P	S	
SPCC	<0.12	-	<0.05	<0.040	<0.045	ใช้ในการอัดโลหะทั่วไป
SPCD	<0.10	-	<0.45	<0.035	<0.035	ใช้อัดขึ้นรูป
SPCE	<0.08	-	<0.40	<0.030	<0.030	ใช้อัดขึ้นรูปลึก

ตารางที่ 1.6 เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล [8]

Symbol of quality	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation %						Tensile test piece
	Discrimination according to nominal thickness (mm)							
	0.25 or over	0.25 to 0.40	0.40 to 0.60	0.60 to 1.00	1.0 to 1.60	1.6 to a 2.50	2.50 or over	
SPCC	270	32	34	36	37	36	36	No.5,in rolling direction
SPCD	270	34	36	38	39	40	40	
SPCE	270	36	38	40	40	42	42	

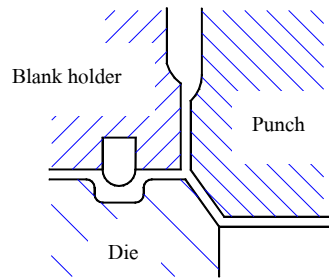
1.5.9 ดรอร์บีด (Draw Bead)

การควบคุมแรงกดแบบล็กโฮลเดอร์ที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดการย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะทำให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพันซ์ตันนิกด แต่ถ้าแรงกดของแบบล็กโฮลเดอร์มากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอร์บีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [2]

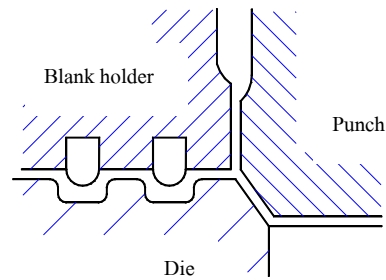
ดรอร์บีดมีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในคาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูปนอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดของแบบล็กโฮลเดอร์และเป็นตัวรีดโลหะให้มีความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะการติดตั้งดรอร์บีดสามารถติดตั้งที่ของแบบล็กโฮลเดอร์หรือที่คายก็ได้แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่ของแบบล็กโฮลเดอร์ และร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่คาย [2]

ก. ปรายโค้งมน (Round Bead)

ปรายโค้งมนมีทั้งแบบเดี่ยว (Single bead) ใช้กับการขึ้นรูปโดยทั่วไปที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลของโลหะในขณะขึ้นรูป และแบบคู่ (Double bead) ใช้ในกรณี Single bead ไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้เพียงพอ [1]



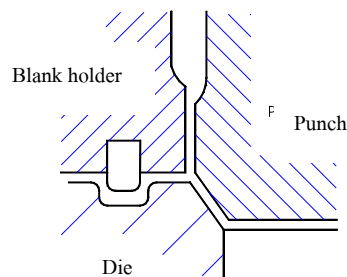
ภาพที่ 1.22 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead)



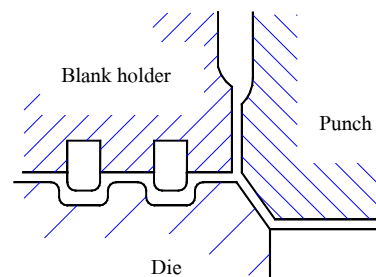
(ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

ข. แบบสี่เหลี่ยม (Square bead)

สามารถควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้มากกว่า Double type และแบบคู่ (Double bead) ควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้ดีกว่า 3 แบบที่กล่าวมาแล้ว



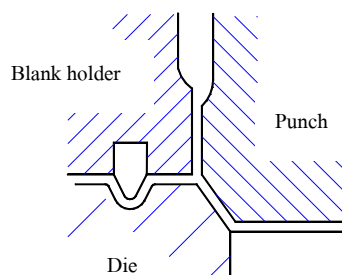
ภาพที่ 1.23 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead)



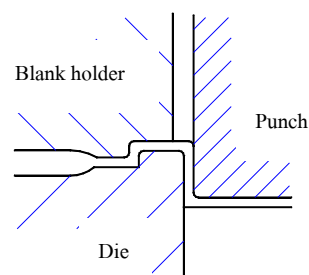
(ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

ค. แบบสามเหลี่ยม (Three angle bead)

จากรูปที่ 2.24 (ก) และแบบไม่ไหลตัว (Lock bead) ดังภาพที่ 1.23 (ข) ใช้ในการขึ้นรูปที่ไม่ต้องการให้โลหะเกิดการไหลตัวในระหว่างการขึ้นรูป



ภาพที่ 1.24 (ก) สามเหลี่ยม (Three angle bead)



(ข) แบบไม่ไหลตัว (Lock bead) [1]

1.5.10 สารหล่อลื่นในงานดิ่งขึ้นรูปลึก

ในการขึ้นรูปจะประสบผลสำเร็จหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับการใช้หล่อลื่นด้วย หากเลือกใช้ประเภทน้ำมันหล่อลื่นไม่ถูกต้องแล้วการขึ้นรูปก็จะไม่สำเร็จผลได้ หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่นมีอยู่ 3 ประการ คือ [3]

- ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์การกดตัวของแผ่นกดขึ้นงานกับตาย
- ช่วยให้แผ่นตัดเปล่าเคลื่อนตัวได้อย่างราบเรียบระหว่างการกดตัวของแผ่นกดขึ้นงานกับตาย
- ป้องกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนในขณะที่โลหะไหลตัว

ก. การเลือกสารหล่อลื่น

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำชิ้นงาน สภาพผิวของวัสดุ รวมทั้งสภาพผิวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ด้วย สารหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปกับงานดิ่งขึ้นรูปลึกได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 สารที่ใช้เป็นตัวผสม ตัวอย่าง เช่น การไฟต์ ซิงค์ซัลไฟด์ ปูนขาว ซอลล์ ฮาโลเจน และสารประกอบของฟอสฟอรัส หรืออาจเป็นตะกั่วออกไซด์ขาว สารหล่อลื่นที่กล่าวมาถูกใช้ผสมกับน้ำมันเครื่อง เพื่อเป็นส่วนช่วยให้สารเหล่านั้นรวมตัวกันได้เมื่ออยู่ภายใต้แรงกดดันสูง สารหล่อลื่นที่อยู่ที่อยู่ในรูปของแข็ง (Solid lubrication) ได้แก่ สารสบู่ (Metal soap) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และ กราไฟต์เหลว (Colloidal graphite) ได้ถูกใช้ในงานดิ่งขึ้นรูปลึกด้วย

ตารางที่ 1.7 สารหล่อลื่นที่ใช้กับการดิ่งขึ้นรูปลึก [9]

วัสดุและโลหะผสม	ขึ้นรูปเย็น	ขึ้นรูปร้อน
อลูมิเนียม	สารละลายสังเคราะห์ MO + FO,E,L ซัสเพนชัน , Wa ซัสเพนชัน , สารละลายของ S	G ซัสเพนชัน(สารแขวนลอย)
ทองแดง	E+ FO, MO + FO , S ซัสเพนชัน ,Wa ซัสเพนชัน , T ซัสเพนชัน และสารละลายสังเคราะห์	ผงสีผสมน้ำมัน(Pigmented pastes) G ซัสเพนชัน
แมกนีเซียม	สารละลาย +FC, MO + FC	G + MoS ₂ S + Wa. T + G
โลหะทนไฟ	แผ่นทองแดง	MoS ₂ ,Gซัสเพนชัน
นิกเกิล	E, MO + EP, CI Wa . CC + S	G ซัสเพนชัน, MoS ₂ ซัสเพนชัน, การเคลือบ เรซิน กับ + Sa

ตารางที่ 2.7 สารหล่อลื่นที่ใช้กับการดึงขึ้นรูปลึก (ต่อ)

โลหะทนไฟ	แผ่นทองแดง	MoS ₂ , G ชั้สเฟนชั้น
เหล็ก ผสม คาร์บอน , โลหะผสมต่ำ	E,S เหลว, Wa , FO + Mo, P, CC + S, MoS ₂ หรือ G ใน จาระบี , สารละลาย สังเคราะห์	G ชั้สเฟนชั้น
สแตนเลส	FO + MO, Wa, P, MO + EP, ลิข้อมสนุ, CC + S	G ชั้สเฟนชั้น
ไทเทเนียม	Wa, P, ลิข้อมสนุ, CC + S	G and MoS ₂ ชั้สเฟนชั้น

ข. ชนิดของสารหล่อลื่น [9]

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi - solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous solution) น้ำมันแร่ (Mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil)

- น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกั่น ได้จากการเอาส่วนที่อยู่กันหอกั่นภายใต้บรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) และกากคาร์บอน (Carbon residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พวกพาราฟินิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้องผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมี

- น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมากและใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความข้นและความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

- น้ำมันสังเคราะห์ [3] น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้ และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่ เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

- สารหล่อลื่นของแข็ง [3] เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดี และในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเลื่อนไถลไปได้อย่างง่าย ในชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยป้องกันการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดีนัมได-ซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก (Polyethylene)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 กิตติภฏ รัตนจันทร์ [2] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีด (Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอว์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบลงก์ไฮดรอลิกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยยับที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

6.2 เชษฐ อุทัยยัง [3] ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีผลต่อขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 พบว่ามีปัจจัยหลายตัวแปรทดสอบที่มีอิทธิพลดังนี้ สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนหนา 0.07 และ 0.1 มิลลิเมตร ได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.09 ซึ่งจะได้ค่าที่สูงกว่าการใช้สารหล่อลื่นในกลุ่มน้ำมัน ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.03 สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูง จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำแต่จะได้ผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบ สารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อแรงในการลากขึ้นรูปคือ แรงในการลากขึ้นรูปลึกที่ได้จากการใช้สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นของแข็งจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ากรณีที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว เนื่องจากมีเสถียรภาพต่อแรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสูงกว่าน้ำมันจึงทำให้แยกการสัมผัสของแผ่นเปล่า ผิวหน้าตาย และผิวหน้าของแผ่นจับยึดชิ้นงาน จึงไม่เกิดการเกาะติด และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำส่งผลลงไว้ได้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำ ผิวชิ้นงานสำเร็จที่ได้หลังจากการลากขึ้นรูปลึกจะมีผิวหยาบมากขึ้นเมื่อเทียบกับผิววัสดุชิ้นงานเริ่มต้น เนื่องจากวัสดุชิ้นงานถูกตัดและตัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การถูกตัดงอผ่านรัศมีตายและถูกยึดมากขึ้นทำให้ผิวบางส่วนที่ยอดผิวของเนื้อวัสดุมีความลึกมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่กล่าวถึงผิววัสดุชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูป นั่นคือ วัสดุชิ้นงานเมื่อทำการขึ้นรูปจะถูกยึดมากขึ้นและมีความลึกที่ผิวมากขึ้น ทำให้ผิวชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปมีผิวหยาบ น้ำมันหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปลึก มีความหนืดปานกลางและมีสารเพิ่มคุณภาพกัมมะถันที่มาก จะสามารถรับแรงกดได้สูง ด้านทานการสึกหรอ ซึ่งจะช่วยให้ป้องกันการสัมผัสของผิวคู์โลหะได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่น ทำให้ได้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูงขึ้น

6.3 ศิวกร อ่างทอง [4] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process ทดลองเพื่อหาจุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายในกรณีต่างๆ ภายใต้ข้อกำหนดเช่น ขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank size) แรงกดยึดชิ้นงาน (Blank holder force) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดและความสูงของครอว์บีด (Draw bead) โดยทำการทดลองการขึ้นรูปผลของแรงที่ใช้ขึ้นรูป แรงใช้ในการกดยึด ความเสียดทานสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามชนิดของสารหล่อลื่น ใช้ครอว์บีดเพื่อลดการเกิดความเครียด (Strain) ในบางพื้นที่ที่จะเกิดความสมดุลของความเครียด และมีการประยุกต์เพื่อหาค่าของแผ่นตัดเปล่าโดยวิธีประมาณค่ากับรูปทรงของชิ้นงานสำเร็จในรูปทรงต่างๆ

6.4 วารุณี เปรมานนท์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีตายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) โลหะแผ่นของชิ้นงานรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมตัวแปรที่ทำการศึกษาคือรัศมีตาย ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีตายที่มีต่อแรงในการขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการกดแผ่นยึดชิ้นงาน ความหนาและคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป ขนาดงานถ้วยสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง คือกว้าง 100 มม. ยาว 100 มม. ลึก 50 มม. ทำจากเหล็กแผ่นเกรด JIS

SPCEN หน้า 0.8 มม. จัดทำการทดลอง 4 ชุด ได้รูปสำเร็จ คือ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก เมื่อใช้ชุดแม่พิมพ์ที่มีรัศมีดาขนาดใหญ่ พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลงและเมื่อเพิ่มขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานก็จะทำให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงขึ้น โดยที่แม่พิมพ์แต่ละชุดมีช่วงของการจับยึดชิ้นงานอยู่ระยะหนึ่งที่ทำให้การขึ้นรูปสมบูรณ์ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานด้วยความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยไม่ขึ้นกับรัศมีดา ผลของความหนาที่แต่ละส่วนบนตัวในการจดบันทึกและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแม่พิมพ์แต่ละชุดที่มีรัศมีดาต่างกัน

6.5 นฤฤทธิ์ คชฤทธิ์ [6] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปลึกชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แรงกดยึดชิ้นงานที่เป็นสัดส่วนกับแรงที่ใช้กับพื้นที่ ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปของชิ้นงานสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าสารหล่อลื่นมีผลต่อแรงในการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน คือชิ้นงานที่ใช้ น้ำมันจะทำให้ลดแรงในการขึ้นรูป และความเครียดของชิ้นงานได้ขนาดของแผ่น Blank มีผลต่อแรงในการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน คือชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก จะทำให้ลดแรงในการขึ้นรูปและความเครียดของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แนวในการขึ้นรูปยังมีผลต่อการใช้แรงในการขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน คือชิ้นงานที่ทำมุมกับทิศทางการรีดตัวของแผ่นเหล็กล็กน้อย จะทำให้ลดแรงในการขึ้นรูปและความเครียดของชิ้นงานได้

6.6 สุวัฒน์ จีระธีรนาถ, ธนสาร อินทรกำธรชัย และ วิโรจน์ ลิ้มตระการ [7] (2004 : 79-81) แผนภาพจำกัดการขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการทำงานของโลหะแผ่น วิเคราะห์โดยใช้กริดทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขึ้นรูป โดยพิจารณาผลกระทบจากกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ จุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหา FLD ของโลหะแผ่นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย กรณีศึกษาวัสดุ SPCC หน้า 1 mm. เบื้องต้นศึกษาการทดลองเชิงตัวเลขหา FLD เป็นหลัก เสนอแนะผลการจำลองรูปร่างขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง แสดงผลกระทบของขนาดขึ้นทดสอบและวิธีความเครียดบริเวณที่เกิดแรงเสียดทานของการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ