# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมเช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน เครื่องใช้ในครัวเรือนเป็นต้น และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นก็มีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีตามความเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ แต่ที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากก็คือการลากขึ้นรูป (Drawing) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการโดยไม่เกิดตะเข็บ โดยจะใช้เครื่องมือการขึ้นรูปที่เรียกว่าแม่พิมพ์ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ พั้นช์ (Punch) และ ดาย (Die) จากนั้นพั้นช์จะเคลื่อนที่พาโลหะแผ่นไปสัมผัสกับดาย ทำให้โลหะแผ่นมีรูปร่างตามแม่พิมพ์

## 2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) คือ การแปรสภาพโลหะจากแผ่นเรียบให้เป็นภาชนะรูปทรงต่างๆโดยที่ความหนาของโลหะไม่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนสภาพนี้ทำได้โดยการกดโลหะแผ่นเรียบด้วยพั้นช์ให้เข้าไปในช่องว่างของดาย ซึ่งรูปแบบอาจเป็นรูปทรงกระบอก รูปกล่องที่มีด้านตรงเอียง และเป็นเส้นโค้งเป็นต้น [1]

2.1.2 แรงกดชิ้นงาน (Punch Force) คือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดชิ้นงาน (Blank Holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยย่น หรือชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาด หรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นได้[1]

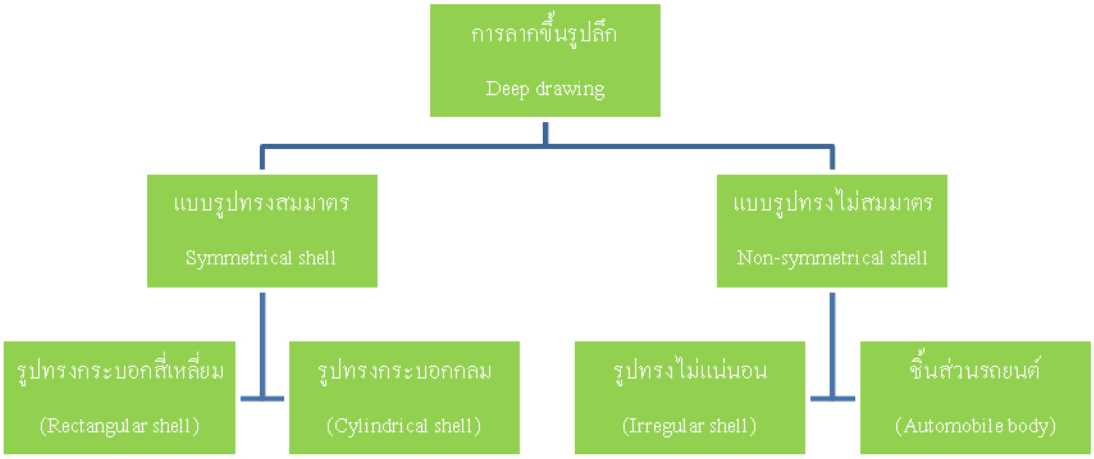
2.1.3 แผ่นตัดเปล่า (Blank Geometry) คือ ขนาดและรูปร่างของแผ่นชิ้นงานก่อนทำการขึ้นรูปต้องมีการหาขนาดก่อน เพื่อที่จะทราบว่าเมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว จะได้ขนาดของชิ้นงานที่มีความลึกตามต้องการ [1]

2.1.4 ดรอว์บีด (Draw Bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในดายและช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูป นอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดของแบลงค์โฮลเดอร์ตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับเป็นตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [2]

2.1.5 การหล่อลื่น (Lubrication) การขึ้นรูปจะประสบความสำเร็จหรือไม่นั้น ก็ขึ้นอยู่กับการหล่อลื่นด้วยหากเลือกใช้ประเภทของสารหล่อลื่นไม่ถูกต้องแล้ว การขึ้นรูปก็จะไม่สำเร็จผลได้ [3]

## 2.2 ทฤษฎีที่สำคัญของการขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

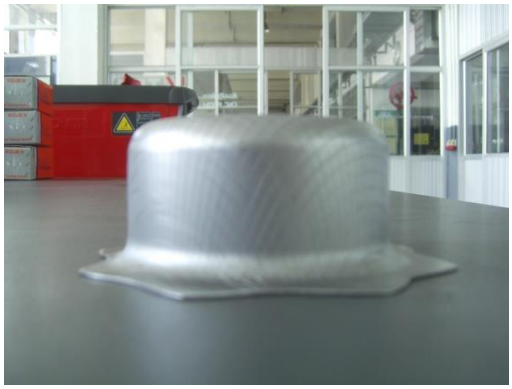
การขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming) เป็นรูปแบบหนึ่งในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมโดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเริ่มต้นให้มีรูปร่างสุดท้ายตามความต้องการ โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลและพันธะภายในเนื้อวัสดุซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมักจะมีรูปร่างที่ซับซ้อนกว่ารูปร่างเริ่มต้น และในการขึ้นรูปโลหะนั้นก็ยังแบ่งออกได้หลายประเภทตามลักษณะของการผลิตซึ่งการขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะด้วย 2 กลุ่มใหญ่ [4] คือ การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical Shell) และการขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell)




ภาพที่ 2.1 การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป [4]

ก. การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical Shell)

การขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะประกอบด้วยดาย (Die) พั้นซ์ (Punch) และแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) การขึ้นรูปลึกจะใช้พั้นซ์กดลงบนแผ่นเปล่าแบนราบขณะที่มีแผ่นกดยึดชิ้นงานกดยึดก่อนจะมีการเปลี่ยนรูปถาวร [3] จะไปยังกดแผ่นตัดเปล่าเพื่อควบคุมให้ไหลเข้าไปในดายหน้าที่ของแผ่นจะกดยึดชิ้นงานก็คือ ป้องกันการย่นที่ขอบชิ้นงาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอกกลมดังภาพที่ 2.2 และการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 การขึ้นรูปลึกถ้วยทรงกระบอก

ในการขึ้นรูปลึกรูปทรงแบบสมมาตรทั้งแบบทรงกระบอกกลมและแบบทรงกระบอกสี่เหลี่ยมนั้น จะเห็นได้ว่าจะสามารถควบคุมในการที่ให้เกิดความเครียด (Strain) เพื่อเกิดความสมดุลจะเป็นไปได้ง่าย ด้วยรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อนของชิ้นงาน

ภาพที่ 2.3 ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

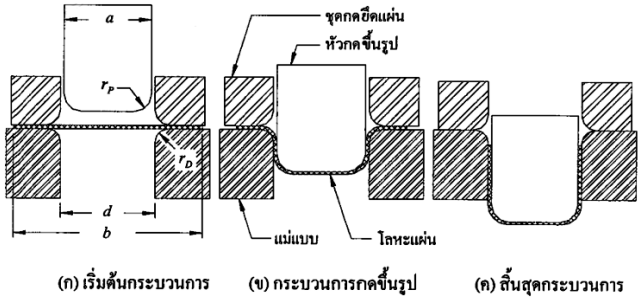
ข. การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell)

จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ในรูปทรงต่างๆจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกรูปทรงแบบไม่สมมาตร (Non-Symmetrical Shell) [4] ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ ที่ได้รับความเค้น (Stress) ที่แตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินจะควบคุมจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงานเช่น เกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น

ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรและพื้นที่เกิดความบกพร่อง [8]

2.2.1 พื้นฐานการขึ้นรูป

การขึ้นรูปลึกโลหะเป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้หัวกดขึ้นรูปกดลงบนโลหะแผ่นที่ถูกกดจากชุดกดยึดแผ่นให้ไหลเข้าไปในแม่แบบเพื่อให้เกิดชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการซึ่งในทางอุดมคติแล้วโลหะแผ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแต่ในทางปฏิบัตินั้นความหนาก็จะมีความเปลี่ยนแปลงไปบ้างในบางตำแหน่ง ในกระบวนการขึ้นรูปลึกประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ หัวกดขึ้นรูป (Punch) แม่แบบ (Die) และชุดกดยึดแผ่น (Blank holder) ดังแสดงในภาพที่ 2.5

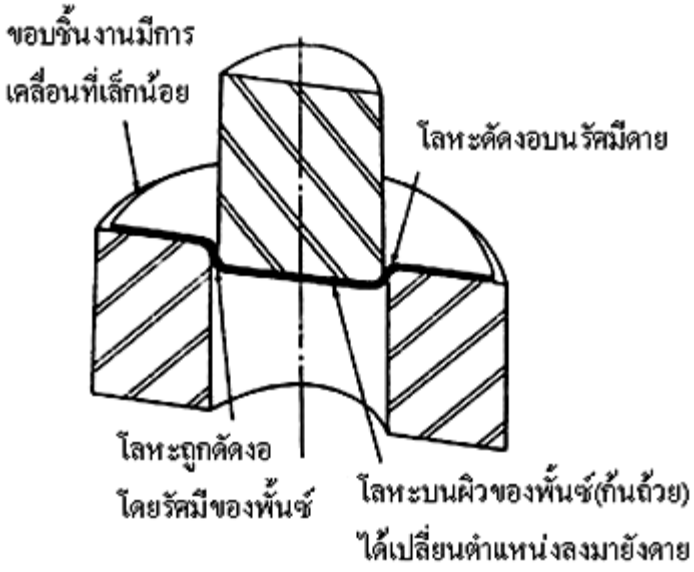



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึกอย่างง่าย [1]

2.2.2 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปลึก

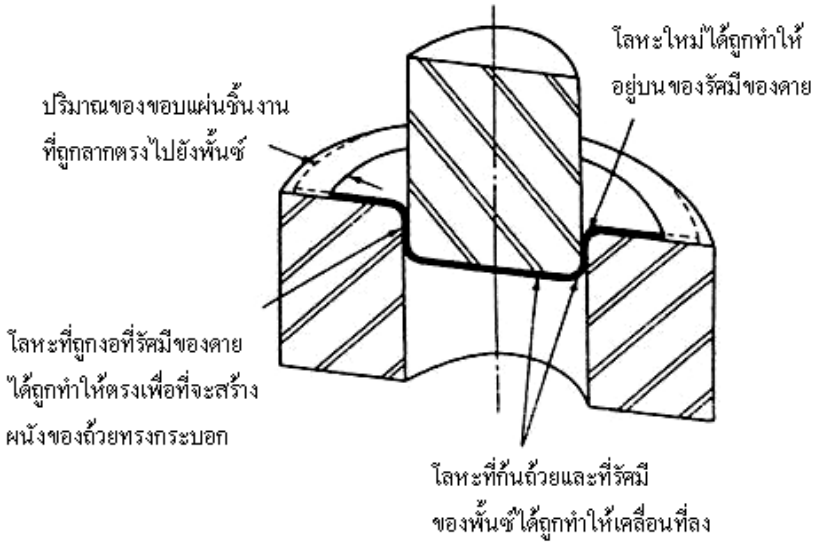
จากภาพที่ 2.5 ได้แสดงให้เห็นขบวนการขึ้นรูปลึกอย่างง่ายโดยจะเริ่มจากโลหะแผ่นติดตั้งอยู่เหนือแม่แบบและถูกจับยึดไว้โดยชุดกดยึดแผ่นหลังจากนั้นหัวกดขึ้นรูปจะเคลื่อนที่เข้าไปในแม่แบบพร้อมกับกดให้โลหะแผ่นให้ไหลตามเข้าไปในแม่แบบด้วย เมื่อหัวกดขึ้นรูปเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งสุดท้ายก็จะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการ ซึ่งขณะที่กระบวนการขึ้นรูปลึกดำเนินไปนั้นจะมีสภาวะที่เกิดขึ้นกับโลหะแผ่นคือ

1) การดัดงอ (Bending) เมื่อแรงกระทำส่งผ่านให้พั้นซ์เคลื่อนที่ลงในช่องว่างดายเพื่อทำการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น ช่วงแรกโลหะแผ่นจะเริ่มเกิดการดัดงอบนรัศมีพั้นซ์ ในขณะเดียวกันโลหะบริเวณใกล้เคียงก็จะถูกดัดงอบนรัศมีของดายส่วนปลายของพั้นซ์จะพาโลหะแผ่นเคลื่อนที่ลงทำให้เกิดเป็นก้นถ้วย โลหะบริเวณก้นถ้วยจะไม่เกิดการแข็งตัวระหว่างถูกแปรรูปและโลหะบริเวณนี้แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเปลี่ยนแปลงความหนาดังแสดงในภาพที่ 2.6 ขอบของชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาพั้นซ์เล็กน้อย ในช่วงเริ่มต้นนี้แรงที่ทำให้เกิดการดัดงอเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงที่ทำให้เกิดการอัดตัวของโลหะ [1]



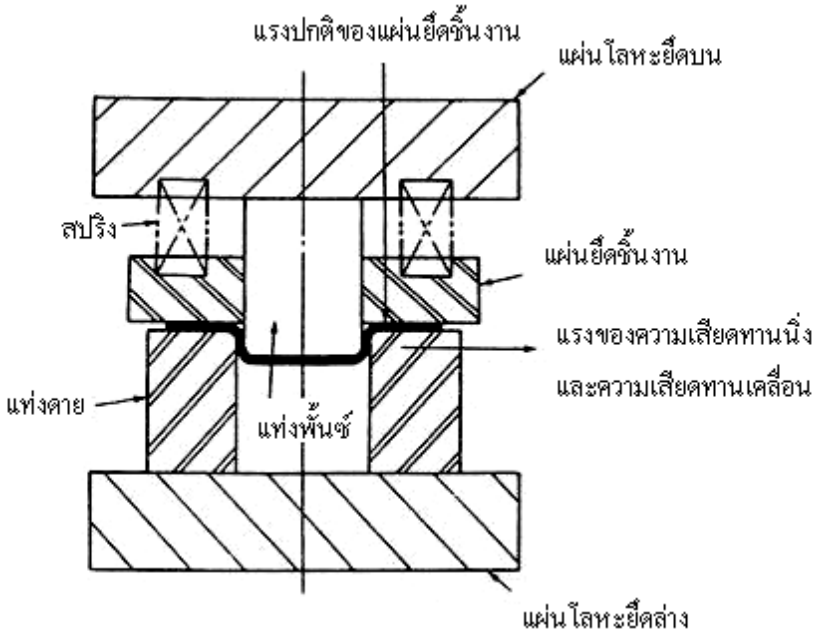

ภาพที่ 2.6 การดัดงอที่จุดเริ่มต้นของขบวนการ [1]

2) การทำให้ตรง (Straightening) การพิจารณาในลำดับต่อไปจะพิจารณาเมื่อพั้นซ์ได้เคลื่อนที่ลงมาเล็กน้อยที่ขั้นตอนนี้ก้นถ้วยจะถูกทำให้เคลื่อนที่ลงมาด้วยในขณะที่มีการเคลื่อนที่ลงมาของก้นถ้วยนั้นโลหะก็ยังอยู่บนรัศมีของพั้นซ์ และได้มีเหตุการณ์ใหม่เกิดขึ้นมาคือโลหะที่ถูกดัดงอบนรัศมีดายมาแล้วจะถูกทำให้ตรงอีกครั้ง และโลหะก็จะถูกดัดงอบนรัศมีดายอีกครั้งนอกจากนั้นยังมีปรากฏการณ์ที่ผิดปกติเกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูปคือ โลหะที่งอบนรัศมีดายมาแล้วและต่อมาจะถูกทำให้ตรงจนกลายเป็นผนังของถ้วยทรงกระบอกเพราะโลหะส่วนนี้ได้ถูกทำให้เกิดการแข็งตัวโดยการดัดงอมาแล้วดังนั้นจึงต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้โลหะส่วนที่งอนั้นกลับตรงอย่างเดิม [1]



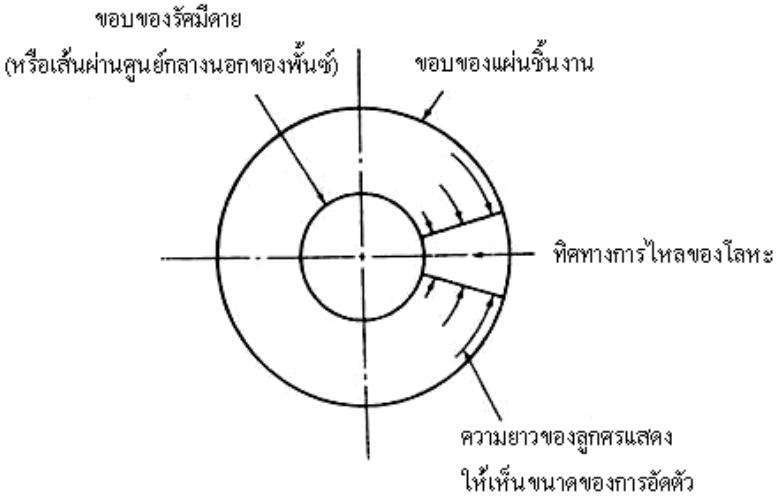

ภาพที่ 2.7 ลักษณะอาการเริ่มต้นของการลากขึ้นรูปโดยการทำให้ตรง [1]

3) ความเสียดทาน (Friction) ที่ขั้นตอนเช่นเดียวกับการทำให้ตรง ขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกดึงตรงไปยังพั้นซ์เป็นปริมาณค่อนข้างมาก ขบวนการลากขึ้นรูปจึงได้ชื่อจากการกระทำเช่นนี้คือ การดึง (Pulling) หรือการลาก (Drawing) โลหะตรงไปยังพั้นซ์ ในขั้นตอนนี้จะมีเงื่อนไขหลายๆ อย่างที่ต้องพิจารณาคือ สิ่งแรกคือความเสียดทานนิ่ง (Static Friction) ที่เกิดระหว่างแผ่นชิ้นงานและผิวหน้าของดายจะต้องถูกเอาชนะ ตามปกติในดายสำหรับการลากขึ้นรูปจะมี แผ่นยึดชิ้นงานหรือแหวนโลหะอยู่รอบๆ ซึ่งย่อมทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างแผ่นยึดชิ้นงานและ พื้นผิวของแผ่นยึดชิ้นงานด้วยเหมือนกัน แผ่นยึดชิ้นงานคือแผ่นโลหะที่ได้กดชิ้นงานโดยได้รับกำลังมาจาก สปริง ท่อลม ท่อน้ำมัน หรือจาก แรมของเครื่องปั๊มโลหะ แรงปกติ (Normal Force)ได้ถูกกระทำขึ้นที่แผ่นยึดชิ้นงานบวกกับความสำคัญบางอย่างเพื่อทำให้เกิดแรงของความเสียดทานนิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เมื่อต้องการให้แผ่นชิ้นงานเคลื่อนที่ลงในดาย จำเป็นต้องใช้แรงดึงให้มากพอที่จะเอาชนะความเสียดทานนิ่งที่เกิดขึ้น ในขณะเดียวกันยังคงต้องใช้แรงต่อไปเพื่อที่จะเอาชนะแรงเสียดทานเคลื่อน (Dynamic Friction) ด้วย แรงที่ต้องการเอาชนะความเสียดทานเคลื่อนที่จะน้อยกว่าแรงที่ต้องการใช้เพื่อเอาชนะการเกิดความเสียดทานนิ่ง อย่างไรก็ตามแรงที่แผ่นยึดชิ้นงานจะต้องมีขนาดที่ไม่มากเกินไปที่ทำให้โลหะไม่สามารถไหลตัวได้ ตามปกติจะใช้สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นตัวช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น [1]

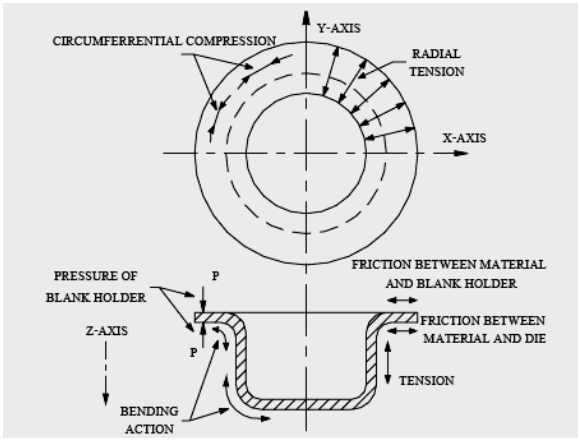



ภาพที่ 2.8 แรงที่ใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทาน [1]

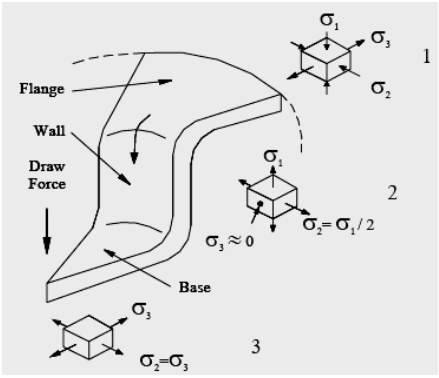
4) การอัด (Compression) เงื่อนไขอย่างหนึ่งที่ใช้ในการดึงขอบของแผ่นชิ้นงานคือโลหะแผ่นต้องถูกอัด ขณะที่ขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกทำให้เคลื่อนที่ลงภายในดาย เส้นรอบวง หรือเส้นรอบรูปของมันก็จะลดขนาดลงเช่นเดียวกัน โลหะส่วนที่อยู่บนขอบของแผ่นชิ้นงานและรัศมีดายได้ถูกบีบให้เป็นขนาดต่างๆ โลหะที่อยู่ใกล้กับรัศมีของดายจะถูกบีบน้อยมาก ปริมาณของการบีบจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อโลหะเคลื่อนที่เขาใกล้กับขอบนอกของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โลหะจะถูกบีบอัดเพื่อแสดงว่ามันได้มีการเคลื่อนที่ภายในดายและมีการไหลตัวบนรัศมีของดาย การถูกอัดสำหรับโลหะที่บางตามปกติเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยย่นขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มแผ่นยึดชิ้นงานเข้าไปที่ดายเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น สำหรับโลหะที่หนาบางอย่างนั้นสามารถที่จะลากขึ้นรูปได้โดยไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่น [1]




ภาพที่ 2.9 การบีบหรืออัดตัวของโลหะระหว่างการลากขึ้นรูป [1]

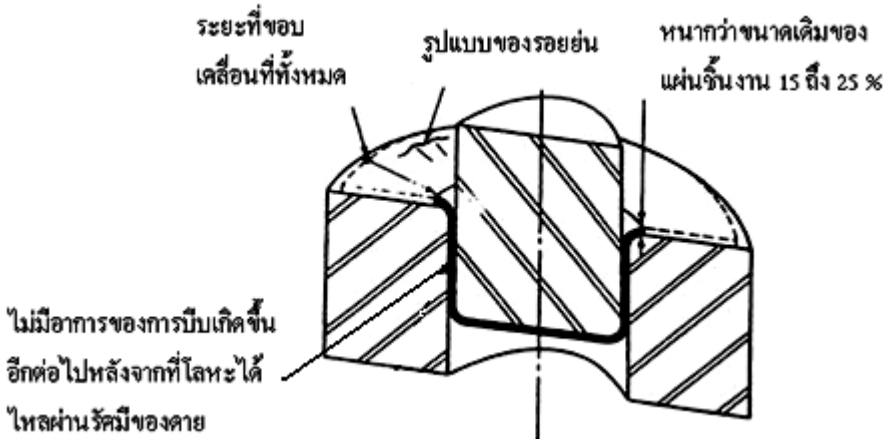



ภาพที่ 2.10 ลักษณะของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึก [3]



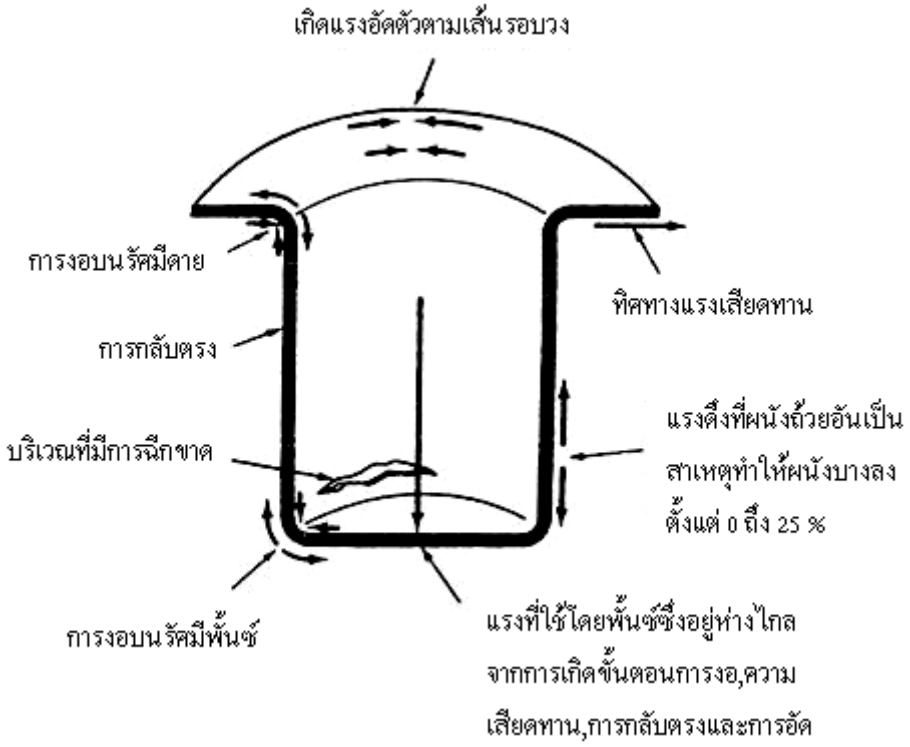

ภาพที่ 2.11สภาวะความเค้นที่เกิดระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [3]

เมื่อมีการเคลื่อนที่ต่อไปของพั้นซ์ ผลที่เกิดขึ้นตำแหน่งของการลากขึ้นรูปที่ปีกของถ้วยขณะที่การบีบได้เกิดมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ปีกและส่วนบนของผนังถ้วย มีความหนามากกว่าความหนาเดิมของแผ่นชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูปได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ภาระของการถูกอัดจะหยุดลงหลังจากที่โลหะได้ไหลผ่านรัศมีของดายไปแล้ว ภายหลังจากการทำให้โลหะตรงโลหะจะถูกทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และจะถูกลากลงไปในดายได้ง่ายขึ้น วัตถุประสงค์อันแรกของการลากขึ้นรูป คือการที่โลหะถูกอัดตัวเพื่อทำให้ การลากขึ้นรูปถ้วยได้ลึกมากโดยไม่มีรอยย่นปรากฏขึ้น



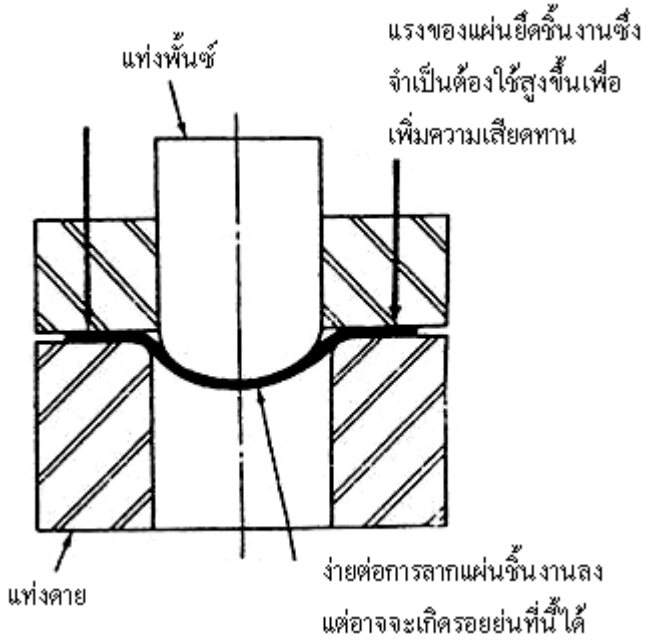

ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนสุดท้ายของการลากขึ้นรูป [1]

5) การดึง (Tension) การทำการลากขึ้นรูปทั้งหมดได้ถูกทำโดยการใช้แรงที่พั้นซ์ผลักลงบนก้นถ้วยที่แบน ตำแหน่งของแรงที่พั้นซ์ใช้บนแผ่นชิ้นงานเริ่มจะอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งที่โลหะเกิด การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเสียดทาน ขณะที่ถ้วยถูกทำให้ลึกลงในตำแหน่งที่กล่าวถึงนี้จะอยู่ ห่างมากยิ่งขึ้นตามลำดับ ผนังถ้วยจึงได้ทำหน้าที่ส่งแรงที่พั้นซ์ไปยังพื้นที่ถูกงอโดยทำให้ตรง เกิดความเสียดทานและถูกอัด ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะเกิดการดึงที่สูงขึ้นที่ผนังของถ้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ผนังถ้วยที่อยู่ใกล้กับรัศมีของพั้นซ์จะเกิดความเค้นสูงสุดและจะมีขนาดบางกว่าโลหะเดิมทำให้ มีการฉีกขาดที่อาจจะเกิดขึ้นบ่อยที่บริเวณนี้ ดังนั้นการลากขึ้นรูปจึงเกี่ยวข้องกับการแปรเปลี่ยน ของแรงดึงที่สูง หรือการยืดที่มากขึ้นซึ่งเป็นผลจากการออกแบบดายที่ใช้ ถ้าขอบของแผ่นชิ้นงานได้ถูกผลักเขาหาพั้นซ์ลอย (Floating Punch) ในลักษณะแบบ เดียวกันตลอด การดึงจะไม่เกิดขึ้นระหว่างการลากขึ้นรูป ของเหลวที่มีความดันสูงได้ถูกใช้เพื่อผลัก ขอบของแผ่นชิ้นงานเข้าไปในดาย [1]




ภาพที่ 2.13 ผลที่เกิดขึ้นจากแรงดึงที่ผนังของถ้วย [1]

6) การยืดขึ้นรูปถ้วย (Stretch Forming) ขั้นตอนของการลากขึ้นรูปถ้วยอย่างอื่นๆควรที่จะต้องรู้ด้วย เมื่อต้องการจะทำก้นถ้วยในลักษณะรูปแบบอื่นๆ นอกเหนือจากก้นถ้วยแบนการยืดขึ้นรูปจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง รูปสามัญของก้นถ้วยที่นิยมใช้กันก็คือ ถ้วยก้นโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ตำแหน่งเริ่มแรกของการลากขึ้นรูปถ้วยก้นโค้งนั้น ก้นถ้วยโค้งจะต้องถูกขึ้นรูปมาก่อน โดยการยืดโลหะแผ่นเหนือขอบของพั้นซ์ ในการยืดขึ้นรูปถ้วยนั้นต้องใช้แรงของแผ่นยึดชิ้นงาน และแรงเสียดทานที่สูงมากขึ้น รูปแบบของการยืดก้นถ้วยใกล้จะเสร็จก่อนที่แผ่นชิ้นงานจะถูกดึงลง ถ้าแผ่นชิ้นงานได้ถูกดึงลงในลักษณะอิสระ มวลของรอยย่นจะปรากฏขึ้นที่ส่วนโค้งของก้นถ้วย แรงที่ ใช้จะสูงมากขึ้นอย่างผิดปกติบนแผ่นชิ้นงานจะเป็นสิ่งที่จำกัดความลึกของการลากขึ้นรูปถ้วยแบบนี้ บริเวณของพื้นที่โลหะที่บางที่สุด และมีโอกาสจะฉีกขาดมากที่สุดจะเกิดบริเวณส่วนโค้งของก้น ถ้วย การลากขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแปลกอย่างอื่นๆ นั้นจะเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นจากการผสม ระหว่างการทำการยืดขึ้นรูป และการลากขึ้นรูปถ้วย [1]




ภาพที่ 2.14 การยึดขึ้นรูปถ้วยก้นโค้ง ณ จุดเริ่มต้นของการลากขึ้นรูป [1]

2.2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการขึ้นรูปลึก

1) แรงในการดึงขึ้นรูป (Punch Force) แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพั้นซ์ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูป จากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูป สำหรับการลากขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก แรงขึ้นรูปสูงสุดหาได้จากสมการ 2.1 และประยุกต์ใช้กับการดึงขึ้นรูปทรงที่ไม่สมมาตร [2] ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$F_d = \pi \times D_m \times S_o \left[ 1.1 \frac{1.3 \times S_u}{\eta_{def}} \left[ \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.1)$$

$$F_d = \frac{Sy+Su}{2} \times L_t \times S_0 \quad (2.2)$$

$F_d$ = แรงขึ้นรูป (N)

$D_m$ = ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน

$S_y$ = ความเค้นจุดคราก (N/mm²)

$S_u$ = ความเค้นสูงสุด (N/mm²)

$L_t$ = ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)

$S_0$ = ความหนาของวัสดุ (mm)

2) แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holding Force : BHF) ปีกของชิ้นงานที่ลากขึ้นรูปจะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยย่นเนื่องจากการโก่งตัวของวัสดุรอยย่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกด ซึ่งแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงาน $P_{BH}$ จะกดลงบนแผ่นของปีกชิ้นงานขณะทำการลากขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ $A_{BH}$ ดังนั้นการคำนวณแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงาน [2] หาได้จากสมการที่ 2.3

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \tag{2.3}$$

$F_{BH}$ = แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน

$A_{BH}$ = พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน

$P_{BH}$ = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงาน

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยย่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนา และอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.4 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกด โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป $\beta$ = 2.0 และใช้วัสดุที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) $S_u$ เท่ากับ 100 200 400 และ 600 N/mm² ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟแสดง ดังแสดงในภาพที่ 2.15 โดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ $\frac{S_0}{d_0}$

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times S_u \left[ (\beta - 1) + \frac{0.005 \times d_0}{S_0} \right] \tag{2.4}$$

$P_{BH}$ = แรงกดดันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด

C = ค่าคงที่

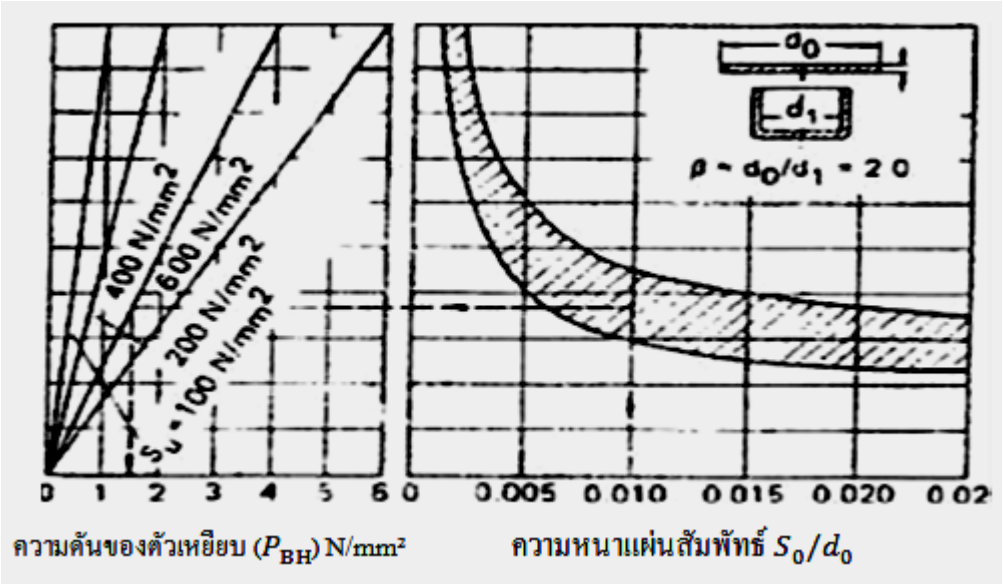
$S_u$ = ความต้านแรงดึง

$\beta$ = อัตราส่วนการขึ้นรูป

$d_0$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน

$d_1$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพั้นซ์

$S_0$ = ความหนาของชิ้นงาน




ภาพที่ 2.15 ค่าแรงดันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการลากขึ้นรูปครั้งแรก [2]

3) ระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance) ในทางปฏิบัติเพื่อกำหนดระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มักจะกำหนด โดยรูปสมการที่ได้มาจากการทดลอง สมการเหล่านี้อนุญาตให้ใช้ได้แต่เพียงการดึงขึ้นรูปลึกที่มีชิ้นงานเป็นรูปร่างกลม โดยไม่มีการรีดของเนื้องาน (Ironing)

$$U_D = S_0 + 0.07\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \tag{2.5}$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับอลูมิเนียม} \tag{2.6}$$

$$U_D = S_0 + 0.04\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่นๆ} \tag{2.7}$$

$$U_D = S_0 + 0.02\sqrt{10 \times S_0} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอุณหภูมิ} \tag{2.8}$$

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงต้านที่ผิวของแม่พิมพ์ระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance) ในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปถ้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle Cup Drawing) ดังนั้นช่องระหว่างพั้นซ์ กับ ดาย จะต้องมากกว่าความหนาของโลหะซึ่งส่วนที่มากกว่านี้มีค่าประมาณ 7-20% ของความหนาชิ้นงานตรงส่วนมุมทั้ง 4 ด้านจะต้องมีระยะเผื่อช่องว่าง (Clearance) มากส่วนทางด้านตรงนั้นระยะเผื่อช่องว่างจะมีค่าน้อยโดย [2]

$$C = t \ (\%\text{ความเผื่อ}) \tag{2.9}$$

$$\text{Die size} = \text{D work} \tag{2.10}$$

$$\text{Punch size} = \text{D work} - (2t+2c) \tag{2.11}$$

**ตารางที่ 2.1** ค่าพิกัดความเผื่อสำหรับงานลากขึ้นรูป [8]

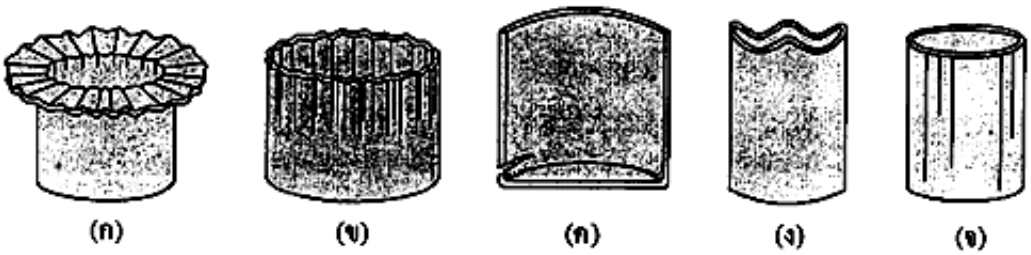
| Thickness, 1 (in.) | First Draw (%) | Second Draw (%) |
|---|---|---|
| Up to 0.015 | 7-9 | 8-10 |
| 0.016 - 0.050 | 8-10 | 9-12 |
| 0.051 - 0.125 | 10-12 | 12-14 |
| Over 0.025 | 12-14 | 15-20 |

จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นตัดเปล่า (Blank) เพิ่มขึ้นระยะเผื่อช่องว่างจะเพิ่มขึ้นด้วยและสำหรับการขึ้นรูปครั้งต่อๆ ไป ระยะเผื่อช่องว่าง (Clearance) ก็ต้องเพิ่มขึ้นอีก

2.2.4 ปัญหาในการขึ้นรูป

ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึกก็คือความไม่สมบูรณ์หรือเกิดความเสียหายบนชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.16 เป็นตัวอย่างความเสียหายในชิ้นงานขึ้นรูปลึก คือ

รอยย่นที่ปีก รอยย่นที่ผนัง ชิ้นงานฉีกขาด เกิดรอยติ่ง และผิวเสีย ตามลำดับ ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจเกิดเพียงกรณีเดียวหรือเกิดร่วมกันก็ได้ โดยความเสียหายต่างๆสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้




ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างการเกิดความเสียหายบนชิ้นงานขึ้นรูปลึก [3]

1) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) ขณะที่โลหะแผ่นถูกกดลึกลงไปในแม่แบบจะพบว่าเส้นรอบรูปของโลหะแผ่นที่บริเวณปีกของชิ้นงานจะลดลงทำให้เกิดความเค้นกดขึ้นในเนื้อวัสดุในกรณีที่โลหะแผ่นมีความหนาไม่เพียงพอความเค้นกดนี้จะมีค่าสูงมาก ทำให้เนื้อวัสดุจะบีบเข้าหากันจนเกิดเป็นรอยย่น การแก้ปัญหาการเกิดรอยย่นสามารถกระทำได้โดยใช้ชุดกดยึดแผ่นออกแรงกดตั้งฉากกับบริเวณปีกของชิ้นงานไว้เพื่อให้โลหะแผ่นแนบติดกับแม่แบบตลอดกระบวนการขึ้นรูปลึก แต่แรงที่ใช้ยึดแผ่นกดนี้จะต้องไม่สูงเกินไปมิฉะนั้นจะทำให้โลหะแผ่นฉีกขาดได้ การแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งคือการขึ้นรูปซ้ำ (Redrawing) โดยการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะค่อยๆ ลดขนาดความกว้างและเพิ่มความลึกของชิ้นงานจนได้รูปร่างชิ้นงานสุดท้ายตามความต้องการ

2) การเกิดรอยคอด (Necking) เมื่อหัวกดขึ้นรูปกดโลหะแผ่นให้ไหลเข้าไปในแม่แบบแล้วโลหะแผ่นในบริเวณส่วนล่างของชิ้นงานจะทำหน้าที่ดึงโลหะแผ่นบริเวณปีกของชิ้นงานให้ไหลตามเข้ามาในแม่แบบด้วย เมื่อพิจารณาผลจากแรงเสียดทานและแรงดึงเพื่อทำให้จะพบว่าโลหะแผ่นในส่วนที่เป็นผนังของชิ้นงานจะได้รับแรงดึงค่อนข้างสูงโดยเฉพาะส่วนที่ต่อจากส่วนโค้งของหัวกดขึ้นรูปเนื้อวัสดุในบริเวณนี้เกิดความเค้นดึงสูงสุดซึ่งจะส่งผลให้ความเครียดทั้งในทิศทางความหนาและความกว้างของแผ่นมีค่ามากขึ้นแต่เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง ความเครียดส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นในทิศทางของความหนาทำให้บริเวณนี้เริ่มมีความหนาลดลง ซึ่งเมื่อสังเกตที่ผิวของชิ้นงานจะพบว่าที่บริเวณดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นรอยคอดเนื่องจากการที่มีความหนาน้อยกว่าในบริเวณอื่น หากการขึ้นรูปลึกยังดำเนินการต่อไปความเครียดในทิศทางความหนาก็จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ความหนาลดลงเรื่อยๆ จนสุดท้ายเนื้อวัสดุในบริเวณนี้จะขาดออกจากกันเกิดเป็นรอยฉีกขาด (Tearing)

3) การเกิดรอยติ่ง (Earring) ความเสียหายในกรณีนี้จะสังเกตได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วที่บริเวณขอบมีชิ้นงานไม่เท่ากัน ความเสียหายในลักษณะนี้มีสาเหตุหลักมาจากวัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปมีคุณสมบัติเชิงแอนไอโซทรอปีโดยเฉพาะแอนไอโซทรอปีในระนาบ (Planar Anisotropy) นั้นคือโลหะแผ่นมีความสามารถในการขึ้นรูปในที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทางจึงทำให้โลหะแผ่นในแต่ละตำแหน่งยืดออกไม่เท่ากัน ดังนั้นโลหะแผ่นที่มีค่าแอนไอโซทรอปีในระนาบสูงจะเกิดรอยติ่งได้มากกว่า การป้องกันการเกิดความเสียหายจากสาเหตุนี้ควรเปลี่ยนไปใช้โลหะแผ่นที่มีค่าแอนไอโซทรอปีในระนาบต่ำ นอกจากนี้ความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมโลหะแผ่นก่อนการขึ้นรูป แรงกดยึดแผ่นที่ไม่สม่ำเสมอหรือการติดตั้งชุดอุปกรณ์ผิดพลาดทำให้เกิดระยะเยื้องศูนย์ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยติ่งบนชิ้นงานได้เช่นกัน

4) การเกิดผิวเสีย (Surface Fail) ความบกพร่องในกรณีนี้จะเกิดขึ้นทีผิวของชิ้นงาน โดยมีรูปแบบของความบกพร่องได้หลายกรณี เช่น เกิดรอยขีด (Scratched) รอยถลอก (Galling) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผิวสัมผัสต่างๆ ของชุดอุปกรณ์หยาบหรือมีการหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสไม่เพียงพอ หรือเกิดผิวส้ม (Orange peel) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติภายในเนื้อวัสดุเองทำให้ชิ้นงานมีผิวหยาบ

5) การเกิดผิวโป่ง (Bulging) เป็นการเกิดความบกพร่องที่บริเวณผนังของชิ้นงานจะไม่เรียบเสมอกันซึ่งมีสาเหตุมาจากระยะห่าง (Clearance) ระหว่างหัวกดขึ้นรูปและแม่แบบมากเกินไป

2.2.5 สมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูป (Mechanical Properties and Formability) การเลือกวัสดุเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างควรเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติกลางๆ ระหว่างสมบัติที่ต้องการในชิ้นงานกับสมบัติในการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานช่วงกว้างๆ ควรมีสมบัติดังนี้

1) ความต้านทานแรงคราก (Yield Strength) ความต้านแรงครากของแผ่นเหล็กเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการขึ้นรูปและความแข็งแรงหลังการขึ้นรูป พฤติกรรมการครากหลายๆชนิดสังเกตจากแผ่นเหล็ก เมื่อเกิดการยืดที่จุดครากเป็นค่าที่ต่ำที่สุดระหว่างการครากที่ไม่ต่อเนื่อง ในการขึ้นรูปแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป ความต้านแรงคราก 240 MPa หรือมากกว่ามีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการดีดกลับที่มากเกินควรและเกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุที่มีความต้านแรงครากน้อยกว่า 140 MPa อาจจะมีผลกับชิ้นงานได้ ซึ่งมีระดับความแข็งแรงได้เพียงพอเหล็กแผ่นที่มีความแข็งแรงสูงๆ สามารถปรับปรุงการขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อทำให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่เหมาะสม

2) การยืดรวม (Total Elongation) เป็นการวัดชิ้นทดสอบการดึง โดยวัดความยาวเกจ (Gauge Length) ภายหลังเกิดการแตกหัก การยืดเป็นการคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของความยาวทดสอบเดิม ซึ่งปกติ 50 มม. (อาจจะใช้ความยาวทดสอบ 200 มม. สำหรับโลหะเกรดแข็งแกร่ง) ชิ้นทดสอบโลหะแผ่น โดยปกติจะใช้ทดสอบการดึงช่วงความยาวทดสอบสั้นๆด้านข้างขนานหน้าตัดจะลดลง แต่หน้าตัดจะลดลงเป็นลักษณะเรียวเพียงเล็กน้อยบางครั้งใช้ควบคุมตำแหน่งการเกิดรอยคอดและรอยแตกหัก

**ตารางที่ 2.2** สมบัติเชิงกลของแผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น [9]

| ชนิด | ลักษณะพิเศษ | ความเค้นคราก (MPa) | การยืดตัวใน 50 mm (%) | ความแข็ง (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. ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเกรดธรรมดา โดยทั่วไปการยืดตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำปกติจะอยู่ที่ 35 ถึง 45 เปอร์เซนต์ในความยาวเกจ (Gauge Length) 50 มม. ค่าที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่า

3) การยืดสม่ำเสมอ (Uniform Elongation) การยืดรวมของแผ่นชิ้นทดสอบแรงดึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือ การยืดสม่ำเสมอ และหลังการยืดสม่ำเสมอสำหรับวัสดุที่เป็นไปตามความสำคัญของกฎกำลัง ($\sigma = K\varepsilon^n$) การยืดสม่ำเสมอวัดในความเครียดจริงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับ

เลขชี้กำลัง การทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ภายหลังการยืดสม่ำเสมอเกิดขึ้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดและความไวของอัตราความเครียด ทั้ง 2 ชนิด ของโลหะต่อความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคอดความเครียดและอัตราส่วนความเครียดภายในรอยคอดจะมีค่ามากกว่าบริเวณภายนอก เมื่อการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่ามากขึ้นวัสดุจะถึงจุดต้านทานแรงได้น้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านความหนาลดลงซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนรูปบริเวณด้านนอกของรอยคอด

4) การยืดที่จุดคราก (Yield Point Elongation) เป็นส่วนหนึ่งของการยืดรวมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการคราดแบบไม่ต่อเนื่องที่ความเค้นคราก ต่อด้วยการก่อรูปของรอยร้าวที่พื้นผิว ซึ่งรู้จักกันว่าเส้นลือเดอร์ หรือ ริ้วคราก ซึ่งเป็นการแสดงข้อผิดพลาดในวิธีใช้หลายอย่างของโลหะแผ่น การยืดที่จุดครากระหว่างการทดสอบแรงดึงที่ไม่ปรากฏให้เห็น จะแสดงให้เห็นเส้นลือเดอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป

การยืดที่จุดครากส่วนใหญ่จะต้องมีเศษแทรกในธาตุเจือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนหรือไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้เหล็กที่มีสารแทรกต่ำจะไม่แสดงออกการยืดที่จุดคราก สามารถระงับได้โดยการอบคืนตัวรอบๆแผ่นโหละขณะทำการกดเว้นเสียแต่ไนโตรเจนมีส่วนผสมของธาตุอื่น (ปกติอลูมิเนียม) เหล็กกล้าจะมีความแข็งขึ้นหลังจากมีการเก็บไว้นานๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆในการเก็บ) เหล็กกล้าที่มีการเปลี่ยนตามอายุสามารถใช้ในการขึ้นรูปได้ดีที่สุด

5) อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio) ค่า r มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง ($\varepsilon_w$) ต่อความเครียดจริงในแนวความหนา ($\varepsilon_t$) ของความเครียดช่วงพลาสติกในโลหะแผ่นบริเวณการยืดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง เกี่ยวข้องกับความสามารถของดรอว์ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนา (Thinning) ในการดรอว์วัสดุบริเวณริมขอบชิ้นงานจะเกิดการยืดในทิศทางเดียว แนวรัศมี ในทิศทางตั้งฉาก (แนวเส้นรอบวง) ค่า r สูงแสดงว่าวัสดุมีคุณสมบัติการดรอว์ได้ดี

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w/w_o)}{\ln(t/t_o)} \qquad (2.13)$$

$r$ = อัตราส่วนความเครียดพลาสติก

($\varepsilon_w$) = ความเครียดจริงในแนวความกว้าง

($\varepsilon_t$) = ความเครียดจริงในแนวความหนา

อัตราส่วนความเครียดพลาสติกเกี่ยวข้องกับการกำหนดทิศทางโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งค่าจะเปลี่ยนไปตามทิศทางการทดสอบ (สัมพันธ์กับทิศทางการรีด) ในโลหะที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ค่าเฉลี่ย $r_m$ (บางครั้งเรียกว่า $\bar{r}$) แทนด้วยแอนไอโซทรอปิกในแนวตั้งฉากของแผ่นเหล็ก ค่า r ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามทิศทางของแผ่นวัสดุในการดรอว์ขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้นี้จะทำให้ผนังของถ้วยสูงไม่เท่ากัน เหตุการณ์ที่เกิดนี้เราเรียกว่ารอยติ่ง(Earring) ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักวัดค่า r เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปี้ตั้งฉากเฉลี่ย $R_m$ (Normal Anisotropy) และแอนไอโซทรอปี้ระนาบ ค่า $\Delta r$ (Planar Anisotropy)

สมบัติของ $r_m$ มีนิยามว่า

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \qquad (2.14)$$

$r_m$ = แอนไอโซทรอปีตั้งฉาก
$r_0$ = แอนไอโซทรอปิกตามแนวทิศทางการรีด
$r_{45}$ = แอนไอโซทรอปิกทำมุม 45 องศากับแนวทิศทางการรีด
$r_{90}$ = แอนไอโซทรอปิกทำมุม 90 องศากับแนวทิศทางการรีด

เมื่อตัวห้อยที่อ้างถึงคือมุมระหว่างแกนชิ้นทดสอบการดึงกับทิศทางการรีดแผ่นวัสดุเหล็กรีดร้อนและรีดเย็นอบคืนตัวอุณหภูมิสูงคือแอนไอโซทรอปิกทั่วไป ($r_m$ = 1.0 ) เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ (ริมม์สตีล) ปกติมี $r_m$ เท่ากับ 1.2 แต่อาจจะมีค่าสูงขึ้นแล้วแต่กรณีพิเศษเช่นผลิตภัณฑ์ที่มีแมงกานีสละซัลเฟอร์ผสมอยู่ต่ำๆ เหล็กกล้าเนื้อแน่น (อลูมิเนียมคิลล์สตีล) จะมีแอนไอโซทรอปิก $r_m$ เท่ากับ 1.6 หรือค่าอาจจะสูงกว่า (สูงถึง 2.5) ซึ่งได้มาโดยควบคุมส่วนประกอบและขบวนการผลิตขีดจำกัดค่าสูงสำหรับเหล็กกล้าเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.0 ถึงแม้ว่าค่าใกล้ 3.0 จะได้ใช้นานๆครั้ง เหล็กกล้า (Interstitial Free Steel) จะมี $r_m$ ประมาณ 2.0 ค่า $r_m$ ใช้ทำนายความสามารถในการดรอว์ขึ้นรูปโลหะ

แอนไอโซทรอปี้ในระนาบ ค่า $\Delta r$ มีนิยามว่า

$$\Delta_r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{2} \qquad (2.15)$$

$\Delta_r$ = แอนไอโซทรอปีระนาบ

$r_m$ เป็นค่าที่กำหนดความลึกเฉลี่ย(ความสูงของผนัง) ของการดรอว์ลึกที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ $\Delta r$ เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของรอยติ่ง วัสดุที่มีค่า $r_m$ สูงและค่า $\Delta r$ ต่ำในขณะเดียวกันทำให้มีความสามารถในการดรอว์ที่เหมาะสม

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อนมีค่า $r_m$ ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์รีดเย็น (Cold –Rolled Rimmed Steel) มีค่าในช่วง1.0 ถึง 1.4 เหล็กกล้าเนื้อแน่นรีดเย็นกำจัดออกซิเจน (Cold-Rolled Aluminium -Killed Steel, Deoxidized) มีค่าในช่วง 1.4 ถึง 2.0 เหล็กกล้า (Interstitial Free Steel) มีค่าในช่วง 1.8 ถึง 2.5 และอะลูมิเนียมเจือมีค่าในช่วง 0.6 ถึง 0.8 ค่า $r_m$ สูงสุดในทางทฤษฎีสำหรับเหล็กกล้าเฟอร์ไรต์ (Ferritic Steel) คือ 3.0

6) เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent) n คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริงและความเครียดจริงเมื่อมีการพล็อตบนค่าลอการิทึมเป็นการกำหนดโดยขึ้นอยู่กับความเค้นไหล (Flow Stress) บริเวณจุดคราก บนระดับความเครียด ในวัสดุค่า n มีค่าสูงความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเครียด ซึ่งควรจะระวังการกระจายความเครียดที่เพิ่มขึ้นในบริเวณความเครียดและความเค้นที่ไหลที่ต่ำกว่า ค่า n ที่สูงจะเป็นตัวชี้ว่ามีความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรงสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความหมายตามสมมุติฐานของสมการ

$$\sigma = K\varepsilon^n \qquad (2.16)$$

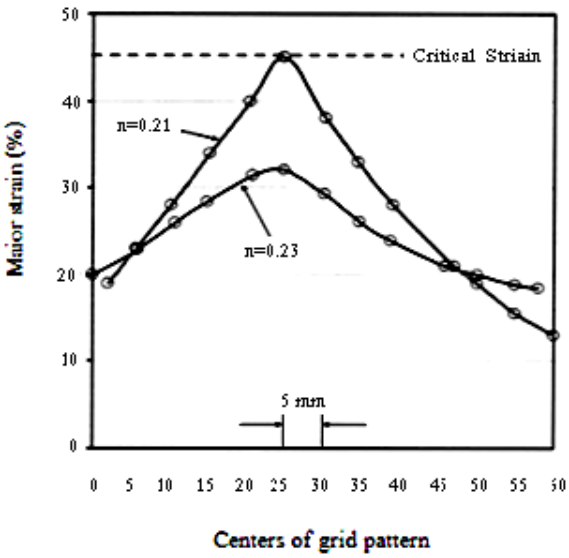
K = สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ

n = เลขชี้กำลังทำให้แข็งของความเครียด

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่า n โดยทั่วไปประมาณ 0.22 ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่ยุ่งยากซับซ้อน ค่าที่สูงกว่า (ขึ้นไปถึง 0.26) จะระบุถึงความสามารถในการดึงยืดขึ้นรูปได้ดี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์โดยทั่วไปค่า n เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าเนื้อแน่นมีการรีดที่ดีกว่าหลังการประกันอายุและมีค่าน้อยกว่า บางครั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีกระบวนการผลิตไม่เพียงพอสำหรับความสามารถในการขึ้นรูป โดยเฉพาะเกรดรีดร้อนจะมีค่า n ต่ำ เท่ากับ 0.10 แต่เกรดที่มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า n มากกว่า 0.14

ผลของค่า n ที่แตกต่างสำหรับการกระจายความเครียดในบริเวณวิกฤตชิ้นงานขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กด้วยค่า n ที่ต่ำ (0.21) อาจจะเกิดการบางและ

รอยแตกที่มากเกินควรในบริเวณวิกฤต การขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมือนกันทุกประการจากแผ่นที่มีค่า n สูง (0.23) หลายครั้ง จะเกิดความแข็งขึ้นในพื้นที่วิกฤตถ่ายทอดความเครียดไปยังพื้นที่ที่อยู่ใกล้กันดังนั้น ควรหลีกเลี่ยงอาจทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างการขึ้นรูป




ภาพที่ 2.17 การกระจายความเครียดสำหรับผลของค่า n ที่แตกต่างกันในบริเวณวิกฤต [9]

2.2.6 การเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation)

การเปลี่ยนรูปถาวร(Plastic Deformation) เป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบการขึ้นรูปโลหะในอดีตสมการเชิงคณิตศาสตร์ต่างๆ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของโลหะในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรมักจะเป็นสมการที่ซับซ้อนยากที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงของการขึ้นรูปโลหะ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีหาคำตอบหรือผลเฉลยของการเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

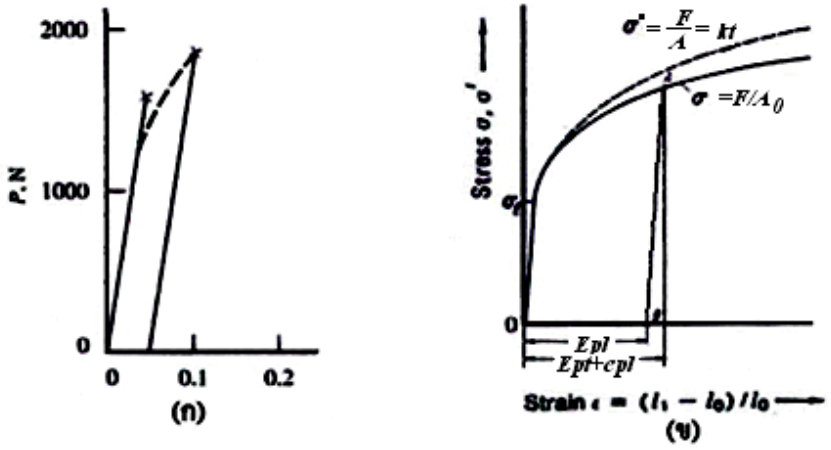
การศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของโลหะเราจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงกลของโลหะเหล่านั้นเป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกลในช่วงที่เรียกว่า พลาสติก ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือเลือกใช้และการเลือกกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่เหมาะสม ประหยัด มีประสิทธิภาพ มีคุณภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเราจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการยืดตัวของโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกหักและฉีกขาดในขณะการขึ้นรูปซึ่งจะเป็นการประหยัดวัสดุและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตด้วย จากการขึ้นรูปชิ้นงานหรือ การเปลี่ยนรูปของโลหะดังกล่าวมักเรียกรวมๆ ว่า การแตกหัก (Failure) ซึ่ง

อาจจะมีสาเหตุเนื่องจาก ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจมีหลายทิศทาง เนื้อของวัสดุหรือโลหะที่ใช้ทำชิ้นงานอาจจะไม่สม่ำเสมอ หรืออาจมีสิ่งเจือปน หรืออาจมีรอย ร้าวเดิมอยู่แล้ว ลักษณะของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น แรงกระแทก แรงกระทำซ้ำๆ แรงสลับไป-มา และแรงที่กระทำเป็นช่วงระยะเวลายาวนาน เป็นต้น อัตราการยืดตัวของวัสดุและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงเกินขีดจำกัดของวัสดุ การเสียดทานระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป และ การไหลตัวของวัสดุถูกจำกัดเป็นต้น

จากสาเหตุต่างๆเหล่านี้จำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์กระบวนการ วิธีขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกลของวัสดุอย่างละเอียด การเปลี่ยนรูป (Deformation) ของโลหะนั้นจะแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือการเปลี่ยนรูปที่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งเราเรียกว่า ครีพ (Creep) และการเปลี่ยนรูปที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) และการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Plastic)

1) การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและในช่วงพลาสติก ขณะที่วัสดุถูกแรงภายนอกมากระทำวัสดุจะเริ่มยืดตัวทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม การเปลี่ยนรูปของวัสดุอาจจะจำแนกออกเป็นสองลักษณะที่กล่าวมาแล้วคือ การเปลี่ยนรูปในลักษณะยืดหยุ่น และการเปลี่ยนรูปในลักษณะถาวรหรือพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) ในขณะที่ชิ้นงานถูกแรงกดภายนอก P กระทำเราสามารถวัดขนาดของแรง P และการยืดตัวของชิ้นงานแล้วนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ข) ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นคือขณะเพิ่มแรง P วัตถุจะยืดตัวและถ้าลดแรง P วัตถุจะหดตัวสู่สภาพเดิมทันที ส่วนในรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกนี้ถ้าเอาแรง P ออกวัสดุจะไม่คืนสภาพเดิมหรือกล่าวอีกในหนึ่งคือวัสดุเปลี่ยนรูปไปจากเดิมและความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความเค้นคร่ากของวัสดุ ดังนั้นจากรูปจะเห็นว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุจะประกอบด้วยสองส่วน คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงพลาสติกนี้จะไม่เป็นเส้นตรงและขณะที่ความเค้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยความเครียดจะเพิ่มสูงขึ้นมาก [4]

ส่วนพฤติกรรมหรือคุณสมบัติเชิงกลของโลหะในช่วงยืดหยุ่น เช่น ขีดจำกัดส่วน (Proportional Limit) , ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) , ความเค้นคราก (Yield Stress) , และคุณสมบัติเชิงกลในช่วงพลาสติก เช่น การคราก (Yielding) , ความเครียดแข็ง (Strain Hardening) , ความเค้นสูงสุด (Ultimate Stress) , และความเค้นขาด (Fracture Stress)




ภาพที่ 2.18 การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก [4]

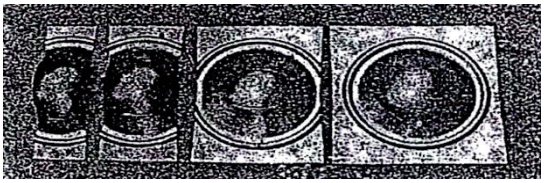
โลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปมักจะเป็นโลหะที่สามารถยืดตัวได้มากก่อนที่จะขาด ซึ่งเราเรียกว่าโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า, ทองแดง, อลูมิเนียม เป็นต้น ส่วนโลหะที่ยืดตัวได้น้อยเราจะเรียกว่า โลหะเปราะ เช่น เหล็กกล้าความเค้นสูงที่ใช้ทำตะไบ เหล็กหล่อสีเทา เป็นต้น และความสามารถในการยืดตัวของโลหะมักจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืด

2) ครีพ จากที่กล่าวมาแล้วในสภาวะอุณหภูมิปกติความเค้นที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปถาวรได้จะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความเค้นครากของวัสดุนั้น อย่างไรก็ตามวัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรได้โดยที่แรงหรือความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุและขนาดของแรงที่มีค่าเท่าเดิมตลอดในช่วงเวลานานๆ ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกินอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุจากการทดสอบเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา ณ ระดับอุณหภูมิต่างๆ โดยทั่วไปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเปลี่ยนรูป (Creep Rate) จะสูงขึ้นด้วย [4]

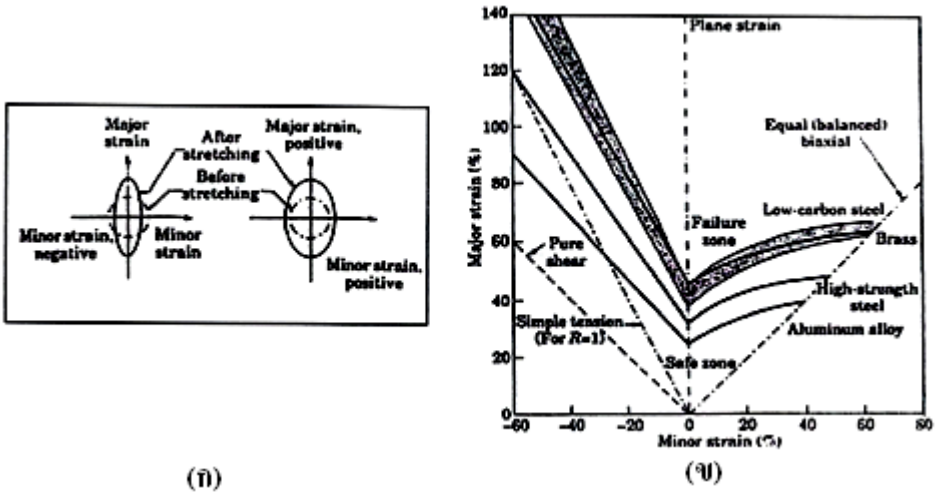
3) กราฟขีดจำกัดในการขึ้นรูป (Forming Limit Diagrams FLD) เป็นการพัฒนาขบวนการตรวจสอบการขึ้นรูปโดยการยืดและการหาค่าความสามารถในการถูกขึ้นรูปของโลหะ โดยทำลายบนโลหะแผ่นเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-5 มม. ด้วยวิธีพิมพ์ลายหรือกัดลายด้วยวิธีทางเคมีแล้วนำแผ่นชิ้นงานไปยืดด้วยพั้นซ์จะพบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวงกลมเกิดขึ้นและทำการวัดขนาดของวงกลมตรงกับบริเวณที่เกิดการฉีกขาด [4]

เพื่อที่จะพัฒนาความรู้ทางด้านการยืดตัวในโลหะแผ่นที่ถูกขึ้นรูปจึงทำการทดลองตัดชิ้นทดสอบที่มีความกว้างหลายๆขนาด ดังแสดงในรูปที่ 2.18 เป็นชิ้นงานทดสอบสี่เหลี่ยม (นับจาก

ทางขวามือ) เป็นแบบการยืดสองทิศทางเท่ากัน ในทางตรงกันข้ามชิ้นทดสอบที่หน้าแคบ (อยู่ด้านซ้ายสุด) เป็นแบบยืดตัวทิศทางเดียว หลังการทดสอบเราสามารถนำข้อมูลไปสร้างเป็นกราฟขีดจำกัดในการขึ้นรูป (Forming Limit Diagrams) ดังแสดงในภาพที่ 2.18 และ 2.19



ภาพที่ 2.19 ผลการทดสอบกับความกว้างโลหะแผ่นขนาดต่างๆ [4]




ภาพที่ 2.20 กราฟของการดึงของวัสดุ [4]

เพื่อที่จะสร้างความสัมพันธ์ความเครียดในแนวแกนหลักและแกนรองถูกวัดจากการเปลี่ยนรูปของวงกลมโดยสังเกตได้ว่ารูปวงกลมจะเปลี่ยนเป็นวงรี แกนหลักของวงรีแทนด้วยทิศทางและขนาดของการยืด โดยจะถือการยืดตัวเป็นค่าบวกในกราฟความสัมพันธ์นี้ส่วนแกนรองของวงรีแทนด้วยขนาดของการยืดหรือหดในทิศทางขวาง ความเครียดในแกนรองสามารถเป็นได้ทั้งลบและบวก อันเนื่องมาจากการยืดตัวของวัสดุถ้ามีการยืดตัวในทิศทางหลักมากจะทำให้วัสดุเกิดการหดตัวในแนวแกนรอง (Poisson's Effect) จะถือว่าแกนรองมีค่าความเครียดเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าการยืดตัวเกิดขึ้นในทั้งสองแกนจะทำให้วงกลมยืดออกทั้งสองทางจนกลายเป็นวงรีที่มีด้านแกนรองยาวกว่าวงกลมเดิมจะถือว่าแกนรองมีค่าความเครียดเป็นบวก ในการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ของวงกลมเดิม

กับพื้นที่ของวงกลมใหม่บนแผ่นโลหะ ทำให้เราหาความหนาของโลหะแผ่นที่เปลี่ยนไปได้ เนื่องจากกฎของทรงปริมาตรโดยสังเกตจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบรูปชาม จากข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ จากชิ้นทดสอบนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนหลักและแนวแกนรองจะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.19 ในกราฟแสดงขอบเขตของบริเวณการยืดตัวที่ทำให้เกิดการฉีกขาด และบริเวณปลอดภัยในการขึ้นรูป เช่น ที่แกนหลักและแกนรองเป็น 40% จะพบว่าบริเวณที่ไม่ได้เกิดการฉีกขาดของชิ้นทดสอบเลย แต่ในทางกลับกันความเค้นของชิ้นทดสอบอลูมิเนียมอัลลอยที่แกนหลัก 80% และแกนรอง 40% จะพบว่าอยู่ในบริเวณที่จะทำให้เกิดการฉีกขาดดังตัวอย่าง ในรูปสังเกตในวงกลมจะเกิดการฉีกขาด

กราฟในภาพที่ 2.19 นั้นแสดงถึงเส้น FLD ของวัสดุหลายตัวเส้นที่อยู่เหนือขึ้นไปแสดงถึงเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการขึ้นรูปสูง จากกราฟนี้จะเห็นว่าถ้าเกิดความเครียดเป็นลบต่ำกว่า 20% ลงมามีโอกาสเกิดการฉีกขาดน้อยมาก นั่นก็หมายความว่าการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปจะพยายามทำให้ความเค้นในแกนรองที่เกิดเป็นลบโดยออกแบบเครื่องมือพิเศษเพิ่มเติม การเปลี่ยนความหนาของของการขึ้นรูปงานทดสอบพบว่าเส้น FLD มีแนวโน้มสูงขึ้นนั่นหมายความว่าการเพิ่มความหนาของโลหะแผ่นจะทำให้การไหลตัวลงแม่พิมพ์ที่มีรัศมีของปากดายเล็กอาจทำให้เกิดการฉีดขาดบริเวณที่ปากดายได้ ความเสียดทานและการหล่อลื่นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการฉีกขาดของชิ้นงาน ถ้ามีการหล่อลื่นดีความเครียดที่เกิดขึ้นก็จะเกิดอย่างสม่ำเสมอ การเกิดรอยตำหนิต่างๆ บนพั้นช์และดายก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด

2.2.7 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียดนิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกของรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese Industrial Standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.4 SPCC เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอัดโลหะ ยกเว้นอัดขึ้นรูปลึกมาก (Sever Deep-Drawing) ผิวของเหล็กแผ่นเหล่านี้จะแบ่งออกเป็นชนิดด้าน (Dull Sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดผิวหยาบ และผิวเรียบ (Bright Sheet) ซึ่งรีดจากลูกรีดละเอียด SPCC เป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเกรดเหล็ก (Steel Grade) ตามมาตรฐาน JIS G3141:1996 (Cold reduced carbon steel sheet and strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial Quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing Quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE ซึ่งเป็น (Deep Draw Quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก

**ตารางที่ 2.3** เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) [6]

| 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 2.4** เหล็กแผ่นรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล [6]

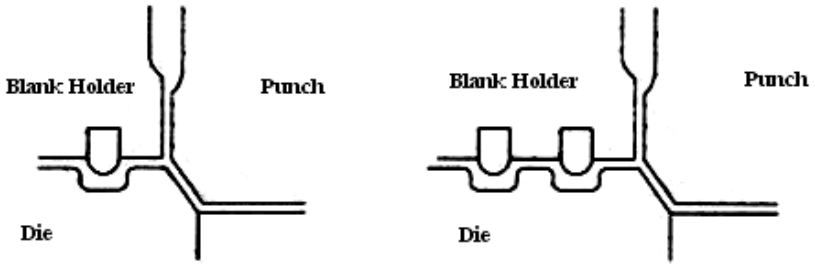
| Symbol of quality | Tensile strength ($N/mm^2$) | Elongation % | | | | | | Tensile test piece |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Discrimination according to nominal thickness (mm) | | | | | | | |
| | 0.25 or over | 0.25 to 0.40 | 0.40 to 0.60 | 0.60 to 1.00 | 1.0 to 1.60 | 1.60 to 2.50 | 2.50 to 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 | |

2.2.8 ดรอว์บีด (Draw Bead)

การควบคุมแรงกดแบลงค์โฮลเดอร์ที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดการย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะทำให้แผ่นโลหะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนก้นของชิ้นงานถูกพั้นซ์ดันฉีกขาดแต่ถ้าแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์มากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอว์บีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง

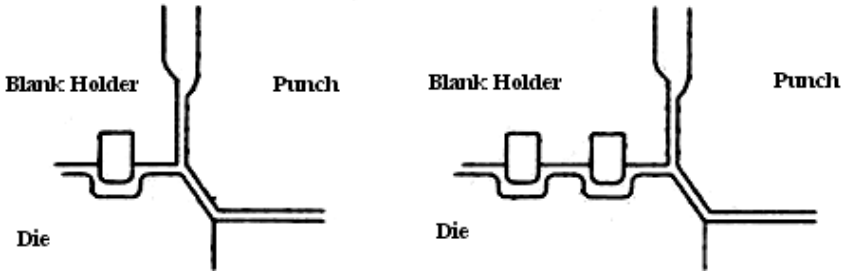
ดรอว์บีดมีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในดาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูปนอกจากนั้นยังช่วยลดแรงกดของแบลงก์โฮลเดอร์และเป็นตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะการติดตั้งดรอว์บีดสามารถติดตั้งที่ของแบลงก์โฮลเดอร์และร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่ดาย [5]

1) ปลายมนโค้ง (Round Bead) ปลายโค้งมนมีทั้งแบบเดี่ยว (Single bead) ใช้กับการขึ้นรูปโดยทั่วไปที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลของโลหะในขณะขึ้นรูป และแบบคู่ (Double Bead) ใช้ในกรณีที่ Single Bead ไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้เพียงพอ



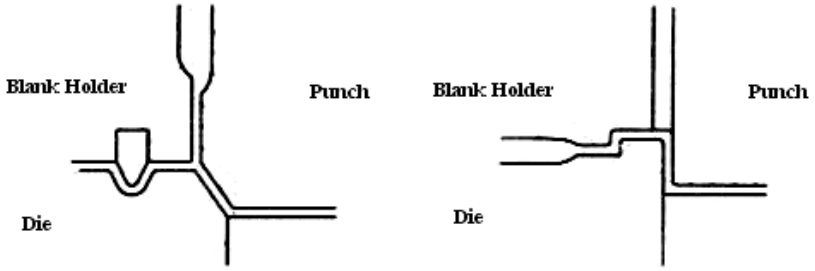

ภาพที่ 2.21 แบบชนิดของ Bead ปลายมนโค้ง[5]

2) แบบสี่เหลี่ยม (Square bead) สามารถควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้มากกว่า Double type และแบบคู่ (Double bead) ควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้ดีกว่า 3 แบบที่กล่าวมา




ภาพที่ 2.22 แบบชนิดของ Bead สี่เหลี่ยม

3) แบบสามเหลี่ยม (Three Angle Bead) จากรูปที่ 2.17 (ก) แบบสามเหลี่ยม (Three Angle Bead) และรูปที่ 2.22 (ข) ใช้ในการขึ้นรูปที่ไม่ต้องการให้โลหะเกิดการไหลตัวในระหว่างการขึ้นรูป




ภาพที่ 2.23 แบบสามเหลี่ยมและแบบไม่ไหลตัว [5]

2.2.9 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือก๊าซ ของเหลว สารกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน และสามารถรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีน้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) [6]

1) น้ำมันแร่ เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นภายใต้บรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือ ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) และกากคาร์บอน (Carbon Residual) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบ พวกพาราฟินนิก (Paraffinic) มักจะมีไขสูง ต้องผ่านกระบวนการขจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ปกติจะมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อขจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนดี

2) น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมักมีความอยู่ตัวทางเคมีต่ำ เกิดเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งราคาก็จะแพงขึ้นมาก จึงหมดความนิยมไป ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก และใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เป็นตัวเติมเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น เพื่อเพิ่มความลื่นและความสามารถในการเข้ากับน้ำ เป็นต้น

3) น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป แต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำ เป็นผลให้น้ำมันแร่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือ ใช้ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำและสูงกว่าน้ำมันแร่ นอกจากนี้น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากับน้ำได้และไม่ติดไฟ มีการระเหยต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามน้ำมันสังเคราะห์จะมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันแร่เมื่อนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันสังเคราะห์ยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

4) สารหล่อลื่นของแข็ง เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการรับแรงกดแนวตั้งได้ดีและในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเลื่อนไถลไปได้อย่างง่าย ในชั้นผิวเมื่อมีแรงกระทำในแนวราบหรือเมื่อเกิดแรงเฉือน สารหล่อลื่นของแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนที่และจะช่วยปกป้องการเสียดสีระหว่างผิวโลหะทำให้ช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี รวมถึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำด้วย สารหล่อลื่นของแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันคือ กราไฟต์ โมลิบดินั่มไดซัลไฟด์ และแผ่นพลาสติก

**ตารางที่ 2.5** ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่น [6]

| สารหล่อลื่น | สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน |
|---|---|
| 1. แผ่นพลาสติกใสพอลีเอททีลีนหนา 0.10 มิลลิเมตร | 0.112 |
| 2. แผ่นพลาสติกใสพอลีเอททีลีนหนา 0.07 มิลลิเมตร | 0.120 |
| 3. น้ำมัน TDN 81 | 0.130 |
| 4. น้ำมัน DRAW 359H | 0.131 |
| 5. น้ำมัน MZA 30 | 0.133 |
| 6. น้ำมัน DRAW 756A | 0.182 |
| 7. น้ำมันมะพร้าว | 0.175 |

**2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

กิตติภัฎ รัตนจันทร์ [3] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีด (Draw Bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-Round Draw Bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้ทราบว่าความสูงของดรอว์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดดายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบลงก์โฮลเดอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

เชษฐ อุทธิยัง [4]ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้สารหล่อลื่นที่มีผลต่อขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึกเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 พบว่ามีปัจจัยหลายตัวแปรทดสอบที่มีอิทธิพลดังนี้ สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลีเอทธีลีนหนา 0.07 และ 0.1 มิลลิเมตร ได้ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.09 ซึ่งจะได้ค่าที่สูงกว่าการใช้สารหล่อลื่นในกลุ่มน้ำมัน ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.03 สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลีเอทธีลีนที่ให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูง จะใช้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำแต่จะได้ผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบ สารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อแรงในการลากขึ้นรูปคือ แรงในการลากขึ้นรูปลึกที่ได้จากการใช้สารหล่อลื่นชนิดแผ่นพลาสติกพอลิเอทธีลีนซึ่งเป็นของแข็งจะใช้แรงในการลากขึ้นรูปน้อยกว่ากรณีที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว เนื่องจากมีเสถียรภาพต่อแรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสูงกว่าน้ำมันจึงทำให้แยกการสัมผัสของแผ่นเปล่า ผิวหน้าดาย และผิวหน้าของแผ่นจับยึดชิ้นงาน จึงไม่เกิดการเกาะติด และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำส่งผลคงไว้ได้แรงในการลากขึ้นรูปต่ำ ผิวชิ้นงานสำเร็จที่ได้หลังจากการลากขึ้นรูปลึกจะมีผิวหยาบมากขึ้นเมื่อเทียบกับผิววัสดุชิ้นงานเริ่มต้น เนื่องจากวัสดุชิ้นงานถูกดัดและดัดกลับ ผิวสัมผัสถูกเคลื่อนที่ภายใต้การถูกดัดงอผ่านรัศมีดายและถูกยืดมากขึ้นทำให้ผิวบางส่วนที่ยอดผิวของเนื้อวัสดุมีความลึกมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่กล่าวถึงผิววัสดุชิ้นงานหลังทำการขึ้นรูป นั้นคือ วัสดุชิ้นงานเมื่อทำการขึ้นรูปจะถูกยืดมากขึ้นและมีความลึกที่ผิวมากขึ้น ทำให้ผิวชิ้นงานหลังการลากขึ้นรูปมีผิวหยาบ น้ำมันหล่อลื่นในงานลากขึ้นรูปลึก มีความหนืดปานกลางและมีสารเพิ่มคุณภาพกัมมะถันที่มาก จะสามารถรับแรงกด

ได้สูง ต้านทานการสึกหรอ ซึ่งจะทำให้ป้องกันการสัมผัสของผิวคู่โลหะได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดอื่น ทำให้ได้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปสูงขึ้น

ศิวกร อ่างทอง [5] ได้ทำการศึกษา เรื่อง A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process ทดลองเพื่อหาจุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายในกรณีต่างๆ ภายใต้ข้อกำหนดเช่น ขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank Size) แรงกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder Force) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดและความสูงของดรอว์บีด (Draw Bead) โดยทำการทดลองการขึ้นรูปผลของแรงที่ใช้ขึ้นรูป แรงใช้ในการกดยึด ความเสียดทานสามารถลดค่าสัมประสิทธิความเสียดทานตามชนิดของสารหล่อลื่น ใช้ดรอว์บีดเพื่อลดการเกิดความเครียด (Strain) ในบางพื้นที่จะเกิดความสมดุลของความเครียด และมีการประยุกต์เพื่อหาค่าของแผ่นตัดเปล่าโดยวิธีประมาณค่ากับรูปทรงของชิ้นงานสำเร็จในรูปทรงต่างๆ

วารุณี เปรมานนท์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีดายในการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) โลหะแผ่นของชิ้นงานรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมตัวแปรที่ทำการศึกษาคือรัศมีดาย ทำการศึกษาอิทธิพลของรัศมีดายที่มีต่อแรงในการขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการกดแผ่นยึดชิ้นงาน ความหนาและคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป ขนาดงานถ้วยสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง คือกว้าง 100 มม. ยาว 100 มม. ลึก 50 มม. ทำจากเหล็กแผ่นเกรด JIS SPCEN หนา 0.8 มม. จัดทำการทดลอง 4 ชุด ได้รูปสำเร็จ คือ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก เมื่อใช้ชุดแม่พิมพ์ที่มีรัศมีดายขนาดใหญ่ พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลงและเมื่อเพิ่มขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานก็จะทำให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปสูงขึ้น โดยที่แม่พิมพ์แต่ละชุดมีช่วงของการจับยึดชิ้นงานอยู่ระยะหนึ่งที่ทำให้การขึ้นรูปสมบูรณ ปราศจากรอยย่นหรือรอยแตก แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงแผ่นจับยึดชิ้นงานด้วยความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยไม่ขึ้นกับรัศมีดาย ผลของความหนาที่แต่ละส่วนบนถ้วยในการจดบันทึกและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแม่พิมพ์แต่ละชุดที่มีรัศมีดายต่างกัน

ชาญศักดิ์ ภัทราพรนันท์ [7] ได้ทำการศึกษาการลากขึ้นรูปกลของสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้แผ่นเปล่าสี่เหลี่ยมความหนา 0.78 มม. ขนาด 235 X 235 มม. โดยที่รัศมีดายที่ใช้มีขนาด 4, 5, 6, 10, 12, 16, 21, 22, 23, 24 และ 25 มม. รัศมีพั้นช์คงที่ เท่ากับ 10 มม. และรัศมีมุมโค้งคงที่ 6 มม. ช่องว่างระหว่างพั้นช์กับดายมีค่าเท่ากับ 0.88 มม. ซึ่งผลการทดลองพบว่า ผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองคือที่รัศมีดาย 4 มม. ไม่สามารถที่จะทำการลากขึ้นรูปได้และที่รัศมีดาย 10, 12, 16 มม. สามารถที่จะทำการลากขึ้นรูปได้เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปในการทดลองกับแรงที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3.38 % และ

ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 7.69 % ดังนั้นผลการจำลองจึงมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองได้