

บทที่ 2

ทฤษฎีและ/หรือแนวทางการคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติภัฏ รัตนจันทร์ [1] เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอว์บีด (Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกัน เช่นรูปร่างและความสูงของดรอว์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอว์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอว์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอว์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดคายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงของดรอว์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบบล็กโฮลเดอร์ (Blank holder) เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยยับที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะเกิดการฉีกขาดที่ผนังชิ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่าเมื่อผลต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จน้อยมาก

ศิวกร อ่างทอง [2] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Critical Analysis of the Non-Symmetrical Deep Drawing Process ทดลองเพื่อหาจุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายในกรณีต่างๆภายใต้ข้อกำหนด เช่น ขนาดของแผ่นตัดเปล่า (Blank size) แรงกดยึดชิ้นงาน (Blank holder force) สารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดและความสูงของดรอว์บีด (Draw bead) โดยทำการทดลองการขึ้นรูปผลของแรงที่ใช้ขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการกดยึด ความเสียหายสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายตามชนิดของสารหล่อลื่น ใช้ดรอว์บีดเพื่อลดการเกิดความเครียด (Strain) ในบางพื้นที่ที่จะเกิดความสมดุลของความเครียด และมีการประยุกต์เพื่อหาค่าของแผ่นตัดเปล่าโดยวิธีประมาณค่ากับรูปทรงของชิ้นงานสำเร็จในรูปทรงต่างๆ

ศุวัฒน์ จีระเชียรนาถ, ธนสาร อินทรกำธรชัย และวิโรจน์ ลิ้มตระการ [4] (2004 : 79-81) แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการทำงานของโลหะแผ่น วิเคราะห์โดยใช้กริดทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขึ้นรูป โดยพิจารณาผลกระทบจากกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ จุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหา FLD ของโลหะแผ่นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย กรณีศึกษาวัสดุ SPCC หน้า 1 มม. เบื้องต้นศึกษาการทดลองเชิงตัวเลขหา FLD เป็นหลัก เสนอแนะผลการจำลองรูปร่างขึ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลองแสดงผลกระทบของขนาดขึ้นทดสอบและวิถีความเครียดบริเวณที่เกิดแรงเสียความ

2.2 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

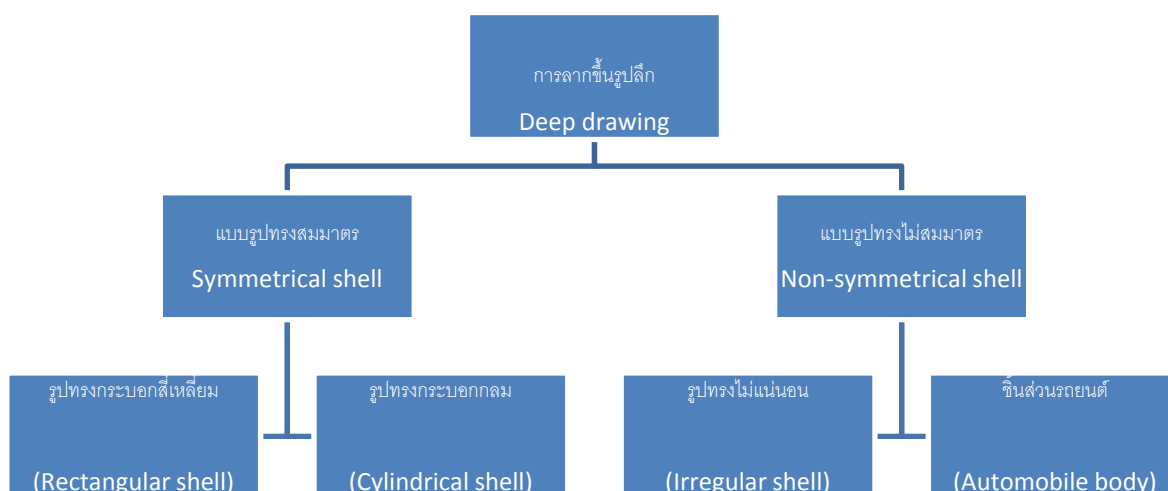
2.2.1 การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ในกระบวนการขึ้นรูปส่วนประกอบคือ พันช์ (Punch) ดाय (Die) และแบลنگ์โฮลเดอร์ (Blank holder) การดึงขึ้นรูปลึกเป็นการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการดึงและการกด โดยที่พันช์เคลื่อนที่กดแผ่นชิ้นงานเข้าไปในดाय เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวงกลม และความเค้นดึงในแนวรัศมี โดยมีแบลنگ์โฮลเดอร์กดที่ขอบ (Flange) ของชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลของเนื้อโลหะ [6]

2.2.2 ครอว์ปีด (Draw bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในดाय และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะขึ้นรูป นอกจากนั้นครอว์ปีดยังช่วยลดแรงกดของแบลنگ์โฮลเดอร์ตลอดจนเป็นตัวรีดโลหะให้มีความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [1]

2.2.3 แรงกดของแบลنگ์โฮลเดอร์ขนาดของแรงกดของแบลنگ์โฮลเดอร์ที่พอเพียงสำหรับป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่นขึ้นได้นั้นหาได้จากการทดลอง (Trial and error) ถ้าขนาดของแรงกดไม่พอจะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะขึ้น ซึ่งรอยย่นเหล่านี้จะทำให้โลหะไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ส่วนก้น (Bottom) ของชิ้นงานก็จะถูกพันช์ดันจนฉีกขาด ในขณะเดียวกันถ้าแรงกดของแบลنگ์โฮลเดอร์มากเกินไป โลหะก็ไม่สามารถที่จะไหลตัวได้เช่นกัน ชิ้นงานก็จะถูกดันจนฉีกขาดอีก [6]

2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ

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



ภาพที่ 2.1 การแบ่งประเภทกลุ่มของการขึ้นรูป [4]

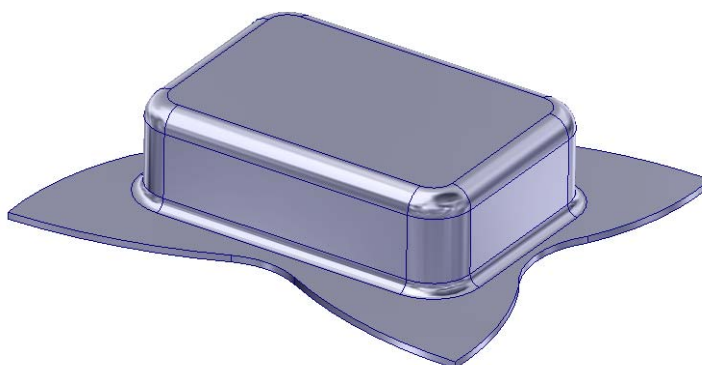
ก. การขึ้นรูปแบบรูปทรงสมมาตร (Symmetrical shell)

การขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งจะประกอบด้วยดาย (Die) พUNCH (Punch) และแผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank holder) การขึ้นรูปลึกจะใช้พUNCHกดลงบนแผ่นเปล่าแบบราบขณะที่มีแผ่นกดยึดชิ้นงานกดยึดก่อนจะมีการเปลี่ยนรูปถาวร [3] จะไปยังกดแผ่นตัดเปล่าเพื่อควบคุมให้ไหลเข้าไปในดายหน้าที่ของแผ่นจะกดยึดชิ้นงานก็คือ ป้องกันการย่นที่ขอบชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอกกลมดังภาพที่ 2.2 และการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 การขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอก

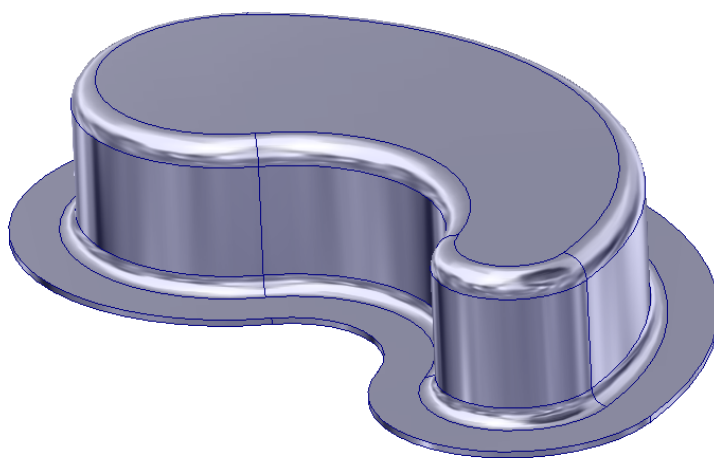
ในการขึ้นรูปลึกรูปทรงแบบสมมาตรทั้งแบบทรงกระบอกกลมและแบบทรงกระบอกสี่เหลี่ยม นั้น จะเห็นได้ว่าจะสามารถควบคุมในการทำให้เกิดความเครียด (Strain) เพื่อเกิดความสมดุลจะเป็นไปได้ง่าย ด้วยรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อนของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.3 ชิ้นงานขึ้นรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

ข. การขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell)

จากการศึกษาในรูปแบบของการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) ในรูปทรงต่างๆ จึงเป็นแนวทางให้การศึกษาการลากขึ้นรูปลึกรูปทรงแบบไม่สมมาตร (Non-symmetrical shell) [4] ซึ่งจะทำให้เกิดจุดบกพร่องตามพื้นที่ที่ได้รับคามเค้น (Stress) ที่แตกต่างกันจึงเป็นไปได้ยากในการที่จะทำให้เกิดความสมดุลของความเครียดด้วยสาเหตุของปัจจัยในตัวแปรมีมากเกินไปจนควบคุมจึงนำไปสู่การเกิดความเสียหายในชิ้นงานเช่น เกิดการฉีกขาด เกิดรอยย่น เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบไม่สมมาตร

จากผลงานวิจัยของ K. Lange ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการลากขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปของแผ่นโลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่นโลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ที่ไม่กลม คิดค่าอัตราส่วนการลากขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการลากขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่นโลหะบาง ($d_0/T > 25-40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยย่นมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการโก่งตัวและการเกิดรอยย่นต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับขึ้นงานที่มากกว่าแผ่นโลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่นโลหะหนา ($d_0/T > 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่นได้ยาก ทำให้สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับขึ้นงาน และวัสดุที่มีค่า r_m (Normal anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดบนของแผ่นจับขึ้นงานที่สูง และแรงกดบนแผ่นจับขึ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุมีค่า Δr (Planar anisotropy) สูงขึ้นด้วย

ดังนั้น การแก้ไขปัญหการโก่งตัวหรือการเกิดรอยย่นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้รัศมีมุมโค้งของพันธ์และคายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือแก้ไขโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดี เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นโลหะกับผิว

ของแม่พิมพ์ให้มีการไหลตัวที่ง่ายขึ้น และยังสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดรอยย่นได้โดยการนำตัวครอร์ปิด เข้ามาใช้เพื่อช่วยกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณขอบปีกในแนวเส้นตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณของปีกตรงรัศมีมุมโค้ง

2.3.1 ปัญหาในการขึ้นรูป[8]

1) การแตกเกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลงก์โลหะได้รับแรงจากการดึงยืดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการขึ้นรูปลึก มากเกินขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุตามสภาพความเครียดที่พึงจะได้รับได้อัตราความเครียดและอุณหภูมิในการดึงยืดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไปเมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอดซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตกการเกิดรอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหายเพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอการแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อนตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบลงก์ (Blanking) และการทริม (Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้นแต่น้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยืดขึ้นรูป [8]

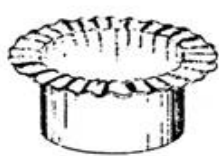
2) การโก่งและการย่นในการขึ้นรูปด้วยพันธักอัดบนแผ่นแบลงก์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยืดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลงก์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กจนทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวงถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่งการโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่นถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลงก์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆ ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน และบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้นถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบลงก์จึงใช้แก้ปัญหการแตกได้

3) การเสียรูปโลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยืดหยุ่นภายในมีการคลายตัวบางส่วนที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นอย่างไรก็ตามในบริเวณที่ได้รับการดัด(Bending)มีการกระจายความเค้นยืดหยุ่นตลอดความหนานี้คือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านในถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ(Springback) การดีดกลับ

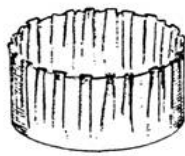
สามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุแต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่นแบลงก์แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

4) โลหะหย่อนเกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่ายปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติในการดัดงอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่นการดัดเป็นลอนแหลมๆมีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยากบางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ทำให้โลหะสัมผัสสรอยนูนทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกันดังนั้นการยืดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสสรอยที่สองโลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อยการเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

5) เนื้อผิวเสียโลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบมักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งานปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยืดที่จุดครากนั่นคือวัสดุยืดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำการเปลี่ยนรูปที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะเรียกว่าเส้นลือเดอร์ (Lueders line) หรือริ้วคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูงอย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสีเหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่มอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเดอร์อย่างชัดเจน



รอยขุ่นที่ปีกถั่ว



รอยขุ่นที่พนักถั่ว



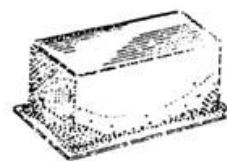
รอยริ้ว



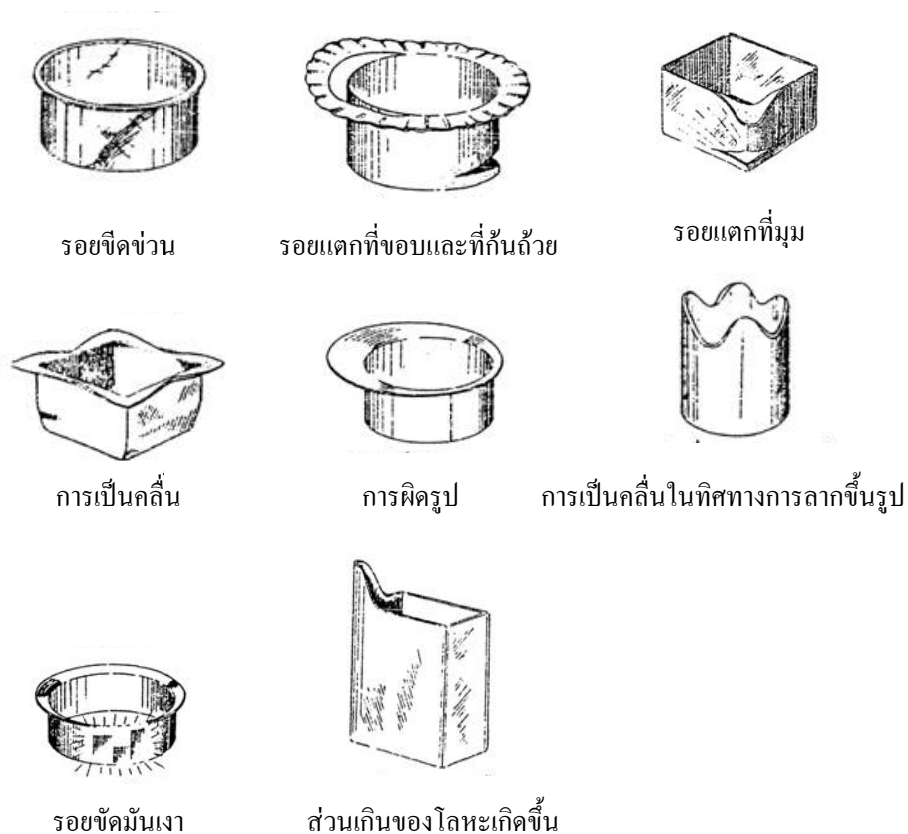
วงแหวนเป็นชั้นตอน



รอยตำหนิจากการลากขึ้นรูป



ผิวเปลือกส้ม



ภาพที่ 2.5 สิ่งบกพร่องที่เกิดกับชิ้นงานดิ่งขึ้นรูป [1]

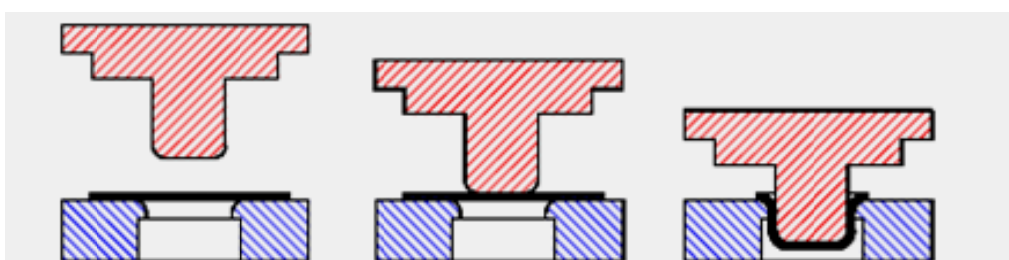
2.3.2 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก

การขึ้นรูปลึกโดยใช้แม่พิมพ์ (Die) การดิ่งขึ้นรูปโดยใช้สื่อแรงดัน (Pressure medium)

การดิ่งขึ้นรูปโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Energy activation)

การแบ่งแม่พิมพ์ตามโครงสร้างของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 4 แบบดังต่อไปนี้

ก. แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน



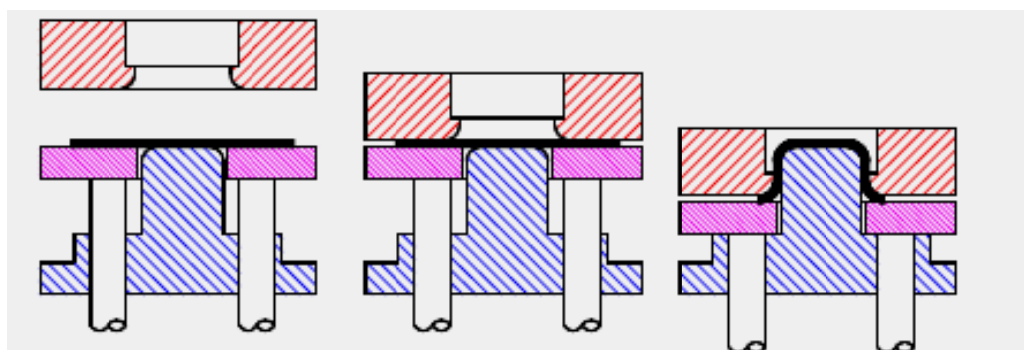
ภาพที่ 2.6 แบบจังหวะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [9]

แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานดังภาพที่ 2.6 และปราศจากรอยย่นที่ชิ้นงานถ้าความต้านทานการโก่งตัวของโลหะแผ่นด้านความเค้นแรงกดที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีได้สูงพอสิ่งนี้จะ เป็นจริงได้เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นงานต่อความหนา คือ d_0 ต่อ s_0 มีค่า 25 ถึง 40 ดังสมการที่ (2.1) ค่าที่น้อยที่สุดเป็นค่าที่สามารถใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป **6** ค่ามากได้ [9]

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

การขึ้นรูปโดยไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานเป็นการใช้เครื่องมือที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ เนื่องจากไม่มีความเสียหายที่เกิดจากแผ่นจับยึดงานจึงทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลงและขอบเขตของอัตราส่วน (**6**) อาจเพิ่มขึ้นสิ่งจำเป็นสำหรับการขึ้นรูปของแม่พิมพ์จังหวะเดียวเมื่อใช้แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ด้ายมีรูปทรงเรขาคณิตลักษณะพิเศษแต่ในการขึ้นรูปที่อัตราส่วนการขึ้นรูป (**6**) น้อยสามารถทำได้ดีกว่าที่ขอบของแผ่นงานจะถูกยกตัวขึ้น

ข. แม่พิมพ์จังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน

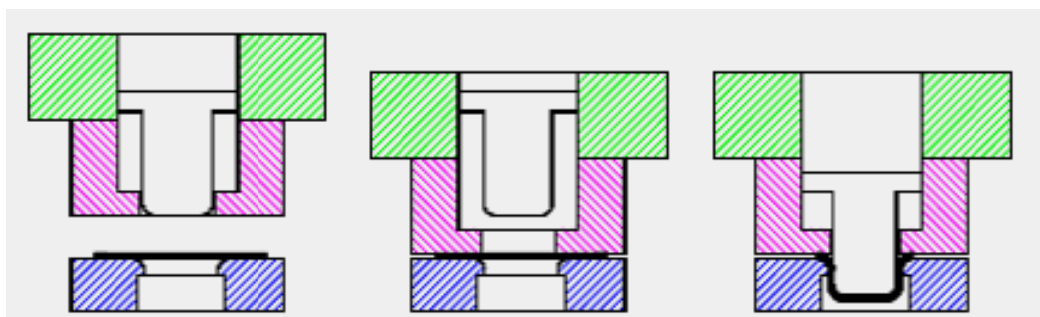


ภาพที่ 2.7 แบบจังหวะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน[9]

แผ่นจับยึดชิ้นงานจะทำควบคู่กันกับด้ายคู่ชั้นในแท่นเครื่องปั๊ม ดังนั้นเมื่อพื้นที่ถูกยึดกับแท่นเครื่องและด้ายถูกยึดติดกับส่วนที่เป็นตัวสไลด์เคลื่อนที่ด้านบนของแม่พิมพ์ในตำแหน่งแรงของแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบน ซึ่งแผ่นชิ้นงานสามารถจะไต่เข้าไปในด้ายได้ในตอนเริ่มต้นของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานและด้ายจะเป็นตัวไปกดแผ่นชิ้นงานเมื่อสไลด์ส่วนบน

เคลื่อนที่ลงมาคายคูชั้นจะส่งแรงด้านข้างผ่านสลักนำไปดันที่นำไปดันที่แผ่นจับชิ้นงานดังนั้น ผลที่เกิดขึ้นแรงในการขึ้นรูปมีแรงต่างกันคือแรงกระหว่งพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงานดังภาพที่ 2.7

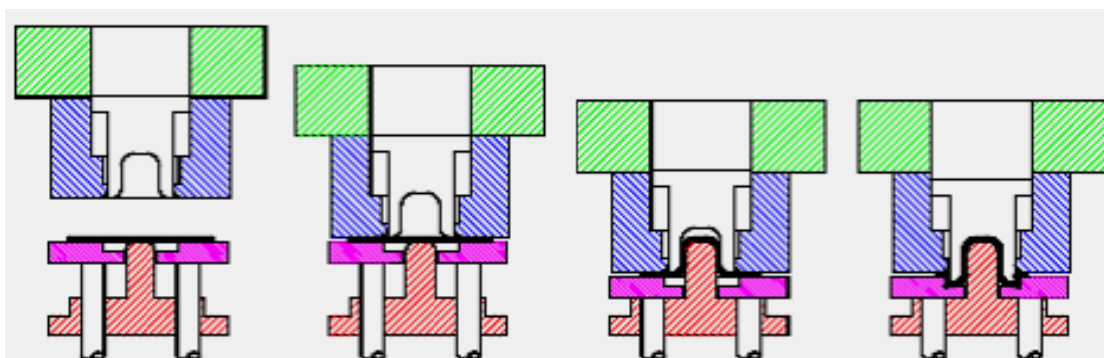
ค. แม่พิมพ์สองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่



ภาพที่ 2.8 แบบสองจังหวะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ [9]

จากภาพที่ 2.8 แผ่นจับยึดชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่งของตัวสไลด์ส่วนเคลื่อนที่ด้านบน ทิศทางการทำงานของแผ่นจับยึดชิ้นงานจะไปในทิศทางเดียวกันกับตัวสไลด์พื้นที่ของเครื่องปั๊ม คายของแม่พิมพ์จะยึดติดแน่นกับแท่นของเครื่องปั๊มการใส่แผ่นขึ้นงานลงไปในคายจะกระทำใน ขณะที่พื้นที่และแผ่น จับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบนในขั้นตอนแรงของการขึ้นรูปแผ่นจับยึด ชิ้นงานจะกดลงบนแผ่นขึ้นงานและในขั้นที่สองพื้นที่จะเคลื่อนตัวลงมาทำการขึ้นรูปต่อไป

ง. แม่พิมพ์สามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานและคายคูชั้น



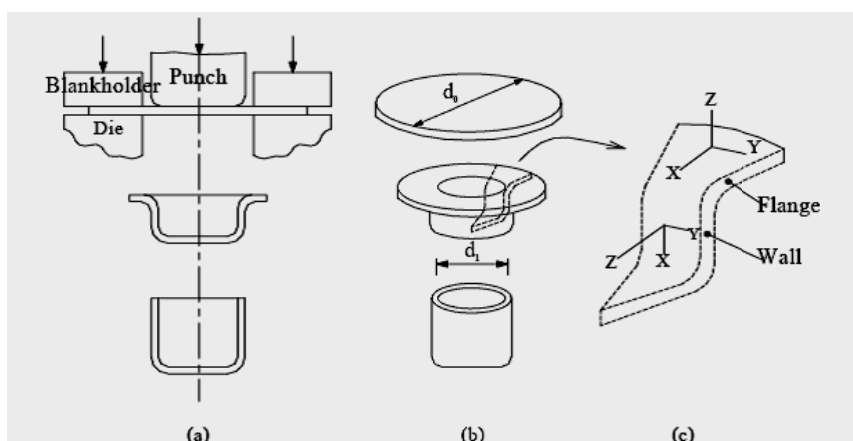
ภาพที่ 2.9 แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวคายคูชั้น [9]

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแม่พิมพ์สองจังหวะ ที่มีตัวสไลด์แผ่นยึด ชิ้นงานเคลื่อนที่กับแม่พิมพ์สามจังหวะที่มีคายคูชั้นเพิ่มขึ้นมาจากภาพที่ 2.9 เมื่อเราใส่แผ่นขึ้นงาน เข้าไปในคายแล้วพื้นที่ และแผ่นจับยึดชิ้นงานรวมทั้งคายคูชั้นจะอยู่ในตำแหน่งบนของแม่พิมพ์

ขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นจับยึดชิ้นงานกับคานาชูชั้นใน ตำแหน่งนี้แม่พิมพ์ส่วนจะเคลื่อนที่ลงมาและเริ่มต้นการขึ้นรูปด้วยพื้นที่ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่แท่นเครื่อง ในจังหวะที่สองตัวสไลด์ของเครื่องปั๊มที่อยู่ด้านบนจะเคลื่อนตัวลงมาและทำการขึ้นรูปลึกซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ชนิดนี้ จะเป็นการขึ้นรูปแบบดึงขึ้นรูปครั้งแรกและดึงขึ้นรูปกลับทางอยู่ในขั้นตอนเดียวกันซึ่งแรงในการดึงขึ้นรูปเป็นผลของแรงที่ต่างกันระหว่างพื้นที่และแผ่นจับยึดชิ้นงาน

2.3.3 การขึ้นรูปลึกรูปทรงกระบอกกลม

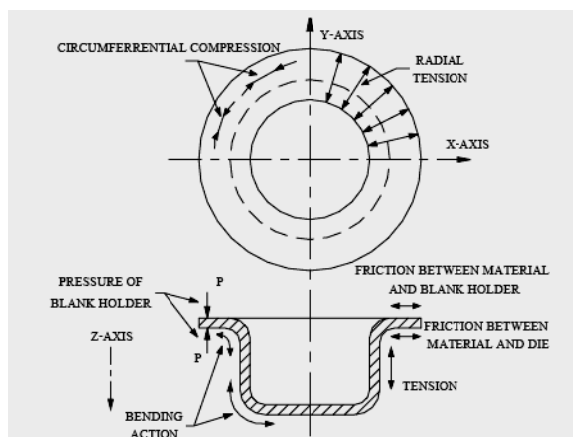
เมื่อพิจารณาการขึ้นรูปลึกด้วยทรงกระบอกกลมดังภาพที่ 2.10 (c) แสดงรูปถ้วยและนิยามระบบแกนพิกัด x y และ z บริเวณที่สำคัญมีอยู่ 2 บริเวณคือบริเวณปากซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุดและบริเวณผนังซึ่งต้องรับแรงที่ทำให้เปลี่ยนรูปที่ขอบได้เพียงพอถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเปล่าใหญ่เกินไปแรงที่ต้องส่งผ่านผนังจะมีค่ามากเกินไปจึงทำให้วัสดุขาดเสียหายได้ สภาพชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้อาจแสดงโดยขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปลึก เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เสียหายในระหว่างการลากขึ้นรูปแผ่นชิ้นงาน เปล่า (Blank) จะถูกพื้นที่เคลื่อนที่ลงมากดถึงผ่านลงไปปากคานาทำให้แผ่นชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆเกิดทั้งการดัด (Bending) การดัดกลับ (Rebending) และการทำให้ตรง (Straightening) การวิเคราะห์สภาวะความเค้นที่บริเวณต่างๆ ระหว่างช่วงการลากขึ้นรูปจะมีความสำคัญอย่างมาก



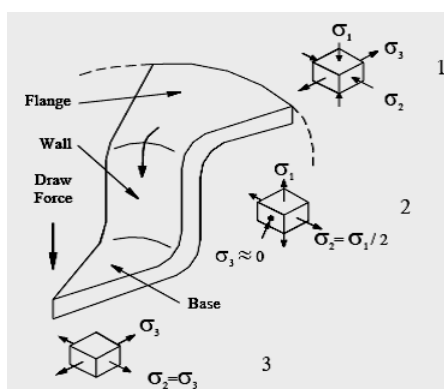
ภาพที่ 2.10 (a) วิธีการลากขึ้นรูปลึก (b) ชิ้นงานทรงกระบอก (c) รูปถ้วยและแกนพิกัด x , y , z [13]

ภาพที่ 2.10 เมื่อพิจารณาสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุแผ่นงานที่บริเวณก้นถ้วยที่พื้นที่เคลื่อนที่ลงมากดนั้นจะเกิดความเค้นดึงในสองแนวแกน (Biaxial tension) เนื่องจากการดัดที่บริเวณปากของพื้นที่และบริเวณผนังถ้วยจะมีสภาวะที่ถูกดึงเกิดความเค้นดึง เนื่องจากวัสดุแผ่น

งานในบริเวณนี้ผ่านขั้นตอนคือการตัดการดัดกลับและการทำให้ตรงซึ่งจะเคลื่อนที่สัมผัสไปกับพื้นที่เป็นตัวบังคับซึ่งไม่ทำให้เกิดการหดตัวในแนวรัศมีที่บริเวณปีกถ่วงนั้นจะเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี (Radial tension) และความเค้นอัดในแนวเส้นรอบรูป (Circumferential compression)

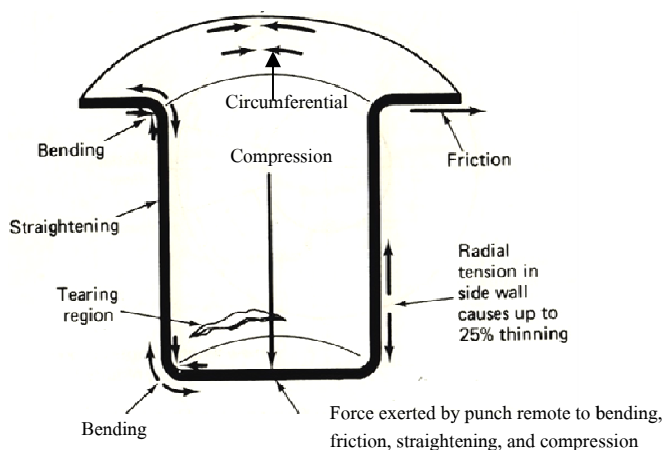


ภาพที่ 2.11 ลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปลึก [13]



ภาพที่ 2.12 สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [13]

ความเค้นที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปลึกมีดังนี้คือความเค้นอัดตามแนวเส้นรอบวง (Hoop compression stress) ความเค้นดัด ความเค้นอัด ความเค้นดึงแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ความเค้นที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปลึก [13]

2.3.4 การขึ้นรูปลึกรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเปลือกทรงปวงรี

ขีดจำกัดการครอว์เปลือกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขึ้นอยู่กับผลกระทบของตัวแปรต่างๆ มากมาย เช่น ชนิดของวัสดุแผ่น ความหนาแผ่นโลหะ ลักษณะรูปร่างที่ขึ้นรูป รัศมีมุมของงาน อัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาวของรูปถ้วย ฯลฯ เพราะว่าขีดจำกัดการครอว์เป็นเรื่องที่ซับซ้อนเกินกว่าจะกำหนดตายตัวได้ จึงมีหลายวิธีการที่พยายามจะอธิบายและกำหนดถึงขีดจำกัดการครอว์ เช่น ในการครอว์เปลือกทรงปวงรีมีการกำหนดค่าว่าถ้าใช้พื้นที่ของแผ่นขึ้นงานไม่มากกว่าสี่เท่าของพื้นที่ หน้าตัดขวางพื้นซ์ สามารถครอว์ได้ภายในครั้งเดียว และสำหรับการครอว์งานเปลือกทรงสี่เหลี่ยมทั่วไปใช้อัตราส่วนระหว่างความสูงเปลือกทรงปวงรีกับรัศมีมุมพื้นซ์เท่ากับ 4-6 เท่า และการครอว์ให้ได้ความสูงรูปถ้วยจากความสัมพันธ์ของความยาวและความกว้างของเปลือกขึ้นงานได้ดังสมการต่อไปนี้ [11]

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

เมื่อ C = ค่าคงที่

เท่ากับ 0.8 เมื่อใช้วัสดุ เหล็กกล้าอะมุน ทองแดง ทองเหลือง

เท่ากับ 0.70-0.75 เมื่อใช้วัสดุ อะลูมิเนียมเจือชนิดอ่อน

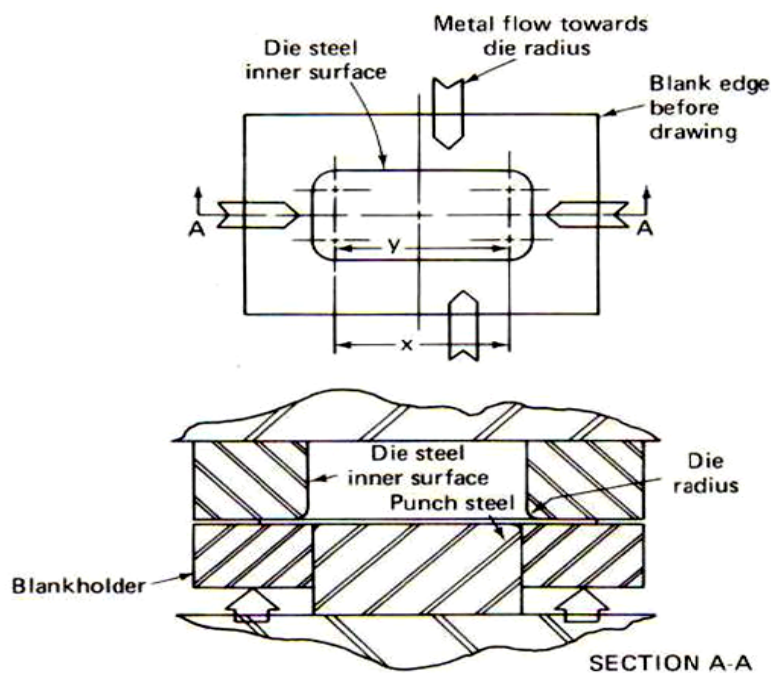
l = ความยาวเปลือกรูปถ้วย

w = ความกว้างเปลือกรูปถ้วย

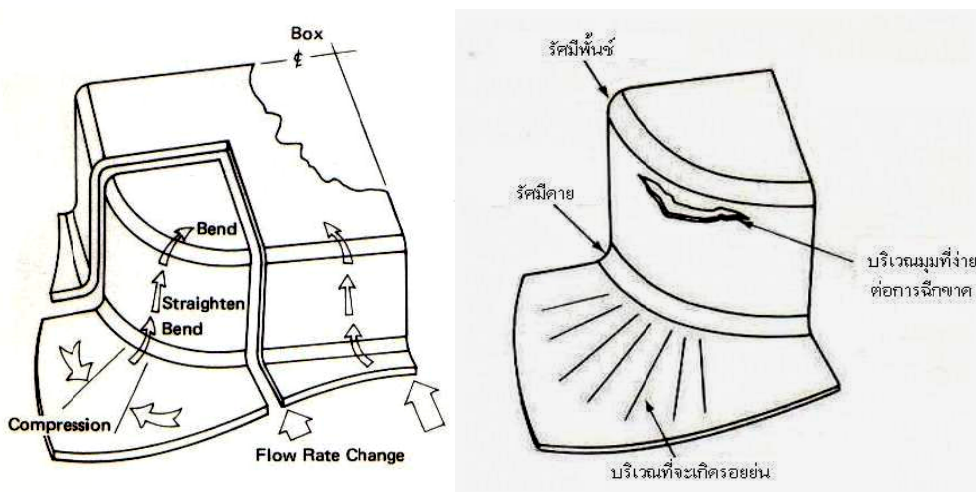
h = ความสูงเปลือกรูปถ้วย

ตารางที่ 2.1 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 2.14 พื้นที่ของความสามารถไหลตัว [13]

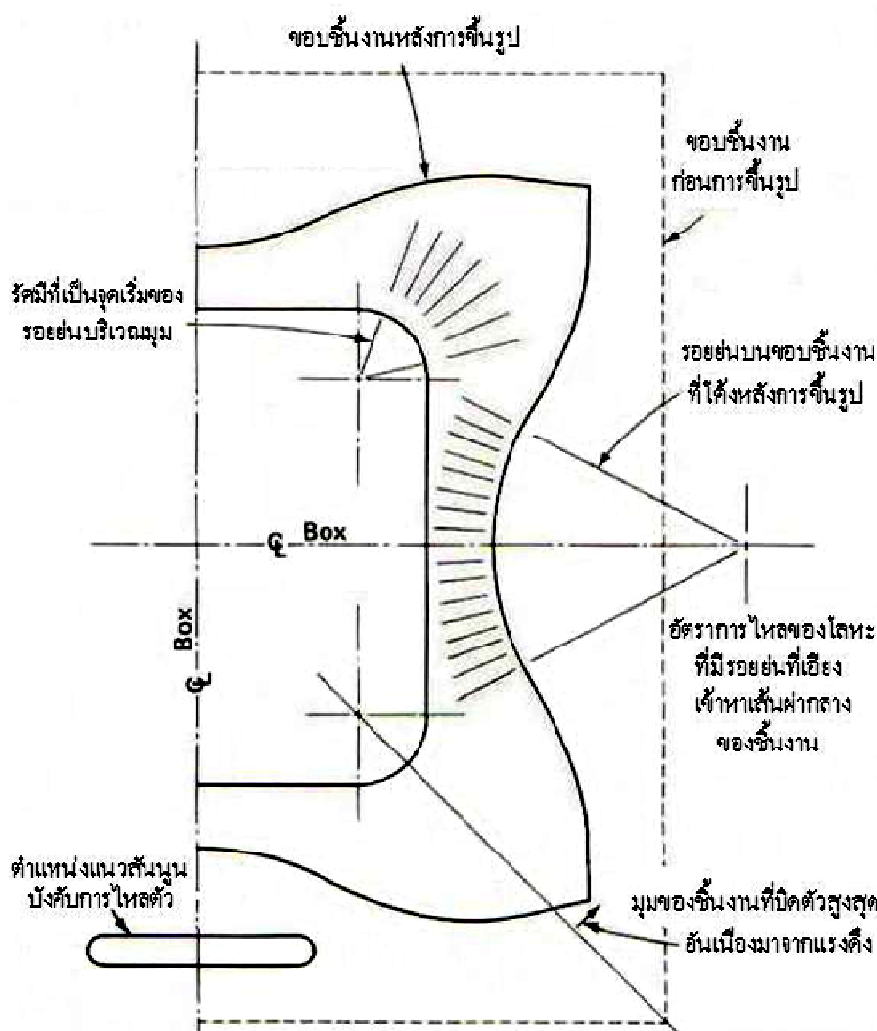


ภาพที่ 2.15 ความเค้นและจุดบกพร่องของโลหะระหว่างการขึ้นรูปลึก [13]

ผลกระทบของรูปร่างผลิตภัณฑ์ และค่าแอนไอโซทรอปีในแนวระนาบกับความสามารถในการขึ้นรูปลึก (Deep draw) เปลือกทรงสี่เหลี่ยมของแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งมีสองปรากฏการณ์ที่สามารถใช้เป็นข้อพิจารณาถึงขอบเขตในการขึ้นรูปลึกคือ

- การไหลตัวของโลหะบริเวณมุมของชุดค้าย

- การป้องกันการเกิดการฉีกขาดที่มุมพื้นซ์โดยการเปลี่ยนรูปร่างของภาคตัดหน้าขวางพื้นซ์



ภาพที่ 2.16 การไหลตัวของโลหะหลังการขึ้นรูป [13]

จุดแรกที่น่ามาพิจารณาของการขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 2.16 ที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน คือ การเปลี่ยนรูปบริเวณหน้าตัดขวางพื้นซ์และการไหลตัวของโลหะที่ไม่สมมาตรกัน ผลที่ตามมา ก็คือเกิดการฉีกขาดซึ่งตาม ปกติจะเกิดที่บริเวณมุมพื้นซ์และโลหะบริเวณที่ไหลตัวเข้าสู่ปากตาย จะเกิดการเปลี่ยนรูปที่เรียกว่าผลจากการคลายความเครียด (Strain relief effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการขึ้นรูปลึก (Deep draw จากการศึกษามากมายและคณะถึงผลกระทบของหน้าตัดขวางของเครื่องมือต่อการขึ้นรูปโดยใช้พื้นซ์ที่มีหน้าตัดต่าง ๆ กันไปเช่นใช้ รศมีมุมพื้นซ์และคายเท่ากันที่ 4, 8, 16 และ 20 มม. ใช้รศมีขอบพื้นซ์และคายเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ศึกษาถึงผลกระทบของความไม่เท่ากันทางคุณสมบัติในทุกทิศทางของโลหะในการ

ขึ้นรูปลึก โดยตัดแผ่นชิ้นงานในแนวเส้นทแยงมุมกับแนวการรีดในการผลิตโลหะแผ่นที่ 0° และ 45° และกำหนดอัตราส่วนระหว่างด้านกว้างแผ่นชิ้นงานกับด้านกว้างพื้นที่ ซึ่งจะใช้ในการหาความสามารถในการขึ้นรูปลึกคือครอว์บีดเพื่อเลือกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

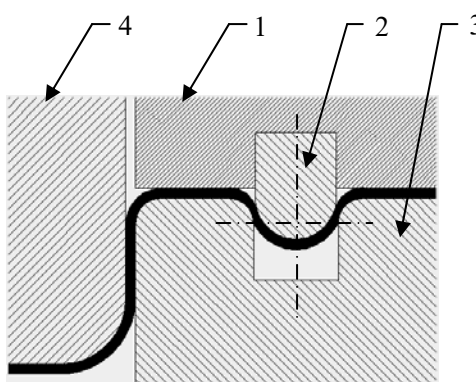
2.3.5 ครอว์บีด (Draw bead)

การควบคุมปริมาณวัสดุที่ถูกดึงเข้าไปในคายเพื่อป้องกันการเกิดรอยย่น หรือรอยย่นน้อยที่สุด ทำได้โดยใช้ครอว์บีดทำหน้าที่จำกัดการเคลื่อนที่ของวัสดุที่จะเข้าไปในคาย ขณะที่วัสดุไหลผ่าน [10]

1) การออกแบบครอว์บีด [1]

แสดงการใช้ครอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปขึ้นส่วนรถยนต์เมื่อเริ่มทำงาน แบล็กโฮลเดอร์ (1) ที่มีครอว์บีด (2) ยึดติดอยู่จะเลื่อนลงมากดแผ่นวัสดุชิ้นงานทำให้แผ่นวัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปไปตามรูปพรรณของครอว์บีดหลังจากที่ แบล็กโฮลเดอร์ประกบสนิทเข้ากับคาย (3) แล้วพื้นที่ (4) ก็จะเลื่อนลงมา เพื่อกดขึ้นรูปชิ้นงานต่อไปดังภาพที่ 2.17

ความเร็วของการไหลของโลหะแผ่นที่อยู่ระหว่างผิวของแบล็กโฮลเดอร์และคาย ขึ้นอยู่กับความลึกในการดึงขึ้นรูป ซึ่งสามารถปรับได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างครอว์บีดกับร่องและรัศมีของร่อง [5]



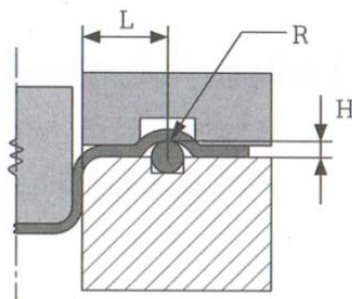
ภาพที่ 2.17 ลักษณะของครอว์บีดในแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป [5]

2) ชนิดของครอว์บีด

ครอว์บีดแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ตามรูปร่างหน้าตัดของครอว์บีดดังนี้

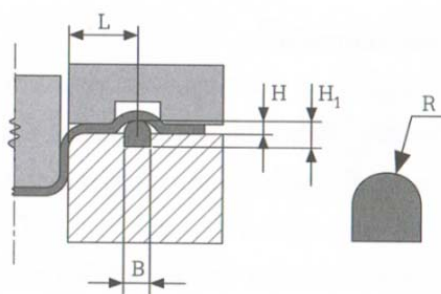
- ครอว์บีดแบบหน้าตัดกลม (Round draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบ คือ รัศมีของครอว์บีด (R) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีดประเภทนี้นิยมใช้ในงานวิจัยเพื่อช่วย

ลดความเสียหาย และร่องรอยที่เกิดจากครอว์บีคบนแผ่นโลหะมีน้อย แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงดังภาพที่ 2.18



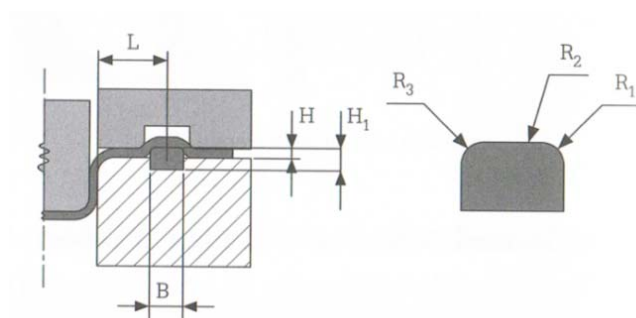
ภาพที่ 2.18 ครอว์บีคแบบหน้าตัดกลม [5]

- ครอว์บีคแบบหน้าตัดครึ่งกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมีของครอว์บีค (R) ความกว้าง ($B = 2R$) ความสูงที่พ้นจากผิวของแผ่นจับชิ้นงานหรือคาย (H) ความสูงของครอว์บีค (H_1) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีคประเภทนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงดังภาพที่ 2.19



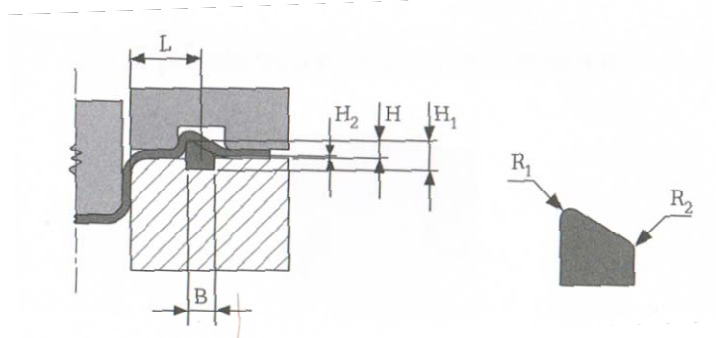
ภาพที่ 2.19 ครอว์บีคแบบหน้าครึ่งตัดกลม [5]

- ครอว์บีคแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3) ความกว้าง (B) ความสูง (H_1, H_2) และระยะห่างจากปากคาย (L) ครอว์บีคแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 2.20



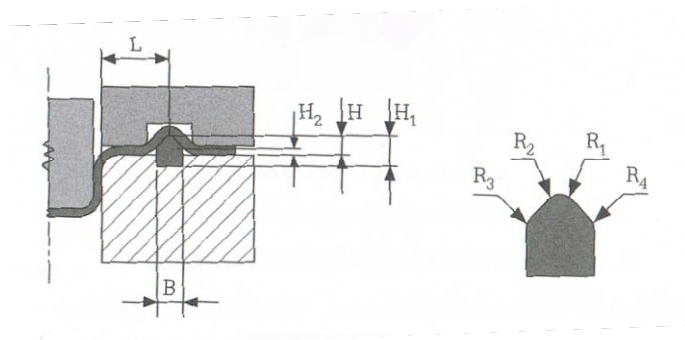
ภาพที่ 2.20 ครอร์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [5]

- ครอร์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Trapeziform draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากดาบ (L) ครอร์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 ครอร์บีดแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [5]

- ครอร์บีดแบบหน้าตัดรูปตัววี (V-shaped draw bead) โดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ รัศมี (R_1, R_2, R_3, R_4) ความกว้าง (B) ความสูง (H, H_1, H_2) และระยะห่างจากปากดาบ (L) ครอร์บีดแบบหน้าตัดรูปตัววีดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ครอว์ปัดแบบหน้าตัดรูปตัววี [5]

2.3.6 คุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดแผ่นกับการขึ้นรูป

1) ความสามารถในการขึ้นรูป (Limiting Draw Ratio : LDR)

ค่า LDR แสดงถึงความสามารถในการขึ้นรูป (Drawability) โดยคิดจากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุดของโลหะแผ่นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด ที่สามารถขึ้นรูปได้โดยขึ้นงานสุดท้ายไม่เกิดความเสียหายได้จาก Swift cup test โดย

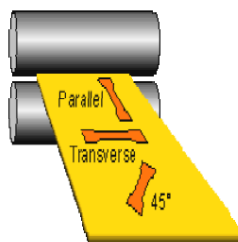
$$LDR = \frac{D}{d} \quad (2.3)$$

2) ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic strain ratio : r value)

ค่า r คิดจากอัตราส่วนของ ความเครียดในด้านกว้าง ($\ln(w/w_0)$) ต่อความเครียดในด้านหนา ($\ln(t/t_0)$) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง [12]

$$r = \frac{\ln \left(\frac{w}{w_0} \right)}{\ln \left(\frac{t}{t_0} \right)} \quad (2.4)$$

คิดจากอัตราส่วนของ ความเครียดในด้านกว้าง ($\ln(w/w_0)$) ต่อความเครียดในด้านหนา ($\ln(t/t_0)$) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ซึ่งค่า r แสดงถึงความต้านทานต่อการหดตัวตามความหนาของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงในทิศทางต่างของโลหะแผ่น [12]

ในเหล็กแผ่นหนึ่งๆ ค่า r ตามทิศทางต่างๆ ของเหล็กแผ่น เช่น ทิศทางตามขนานกับแนวรีด ทิศทางตั้งฉากกับแนวรีดและทิศทาง 45° กับแนวรีดจะไม่เท่ากัน แต่เหล็กที่ขึ้นรูปได้ดีจะมีค่า r_m สูง r_m คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ r ในทิศทางต่างๆ โดย

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.5)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{2} \quad (2.6)$$

ถ้าเหล็กแผ่นที่จะใช้ขึ้นรูปมีค่า Δr สูงจะทำให้วัสดุแปรรูปในทิศทางต่างๆ ไม่เท่ากัน เป็นผลให้ขอบของชิ้นงานหลังการแปรรูปไม่เท่ากันหรือส่วนที่เป็นครีบ (Earring) ทำให้ต้องตัด ออกมากซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อวัสดุ

3) ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent : n)

ค่า n แสดงถึงระดับของความเค้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อโลหะมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นในช่วงการแปรรูปถาวรที่สม่ำเสมอ (Uniform plastic deformation) คือยังไม่เกิดการคอด ดังนั้นโลหะแผ่นที่มีค่า n สูงจะสามารถขึ้นรูปได้ดี โดยความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแปรรูปจะช่วยยับยั้งการแปรรูปเฉพาะบริเวณ (Local deformation) ทำให้วัสดุคอดตัวและขาดที่ปริมาณการแปรรูปสูงขึ้น

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.7)$$

4) ความเร็วของอัตราความเครียด (Strain rate sensitivity : m)

ค่า m แสดงถึงระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแปรรูปของโลหะเร็วขึ้น ทำให้แรงที่ต้องใช้ในการแปรรูปที่ความเร็วต่างๆ แตกต่างกัน ที่ค่าความเครียดและอุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ ความเค้นที่ใช้ในการแปรรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดในการแปรรูปสูงขึ้นดังสมการ

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m |\epsilon, T \quad (2.8)$$

5) แรงของครอว์บีด (Draw bead force)

ในทางปฏิบัติงานปั๊ม (Stamping) โดยทั่วไป เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของขอบของแบลงก์ไปสู่ช่องของแม่พิมพ์ ครอว์บีดมักถูกใช้ในแบลงก์โฮลเดอร์มันประกอบด้วยสันกึ่งทรงกระบอกในส่วนบนของแบลงก์โฮลเดอร์และช่อง ซึ่งเป็นปากกลมในส่วนล่างครอว์บีดทำให้แบลงก์งอและตรง 3 ครั้งขณะที่มันผ่านแต่ละครอว์บีด

การดึงอและการดัดซ้ำๆ ทำให้เกิดแรงเหนี่ยวรั้ง (Restraining) ประกอบกับความเสียดทานที่ผิว วิธีการหนึ่งสำหรับวัดแรงเหนี่ยวรั้ง เนื่องจากการแปรรูปไม่ขึ้นกับผล ของแรงเสียดทานใช้

2.3.7 แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปลึก (Punch force)

แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพินช์ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป สำหรับการลากขึ้นรูปด้วยทรงกระบอก แรงขึ้นรูปสูงสุดหาได้จากสมการ 2.9 และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปขึ้นงานรูปทรงที่ไม่สมมาตรดังสมการที่ 2.10

$$F_{d,max} = \pi \times d_m \times S_0 \times \left[1.1 \frac{1.3xS_u}{\eta_{def}} \left[\ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.9)$$

$$F_d = \frac{S_y + S_u}{2} \times L_t \times S_0 \quad (2.10)$$

2.3.8 แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder pressure)

แรงนี้จะกระทำบริเวณขอบของแผ่นโลหะในขณะที่ทำการลากขึ้นรูปลึก โดยกระทำในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมี เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของเนื้อโลหะไม่ให้เกิดการไหลตัวมากเกินไป เนื่องจากการไหลตัวของเนื้อโลหะที่มากเกินไปจะมีผลต่อการเกิดรอยย่นในบริเวณขอบของชิ้นงาน [3]

แรงคันทันนี้จะกระทำผ่านตัวล็อกชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (Hold down ring) แรงกดนี้จะสัมพันธ์กับความหนา และอัตราส่วนของการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณ ได้แก่

$$P_{BH} = 10^{-3} \times C \times S_u \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 \times d_0}{S_0} \right] \quad (2.11)$$

$$LDR = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.12)$$

2.3.9 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปลึก

สำหรับแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น เป็นโลหะที่ใช้มากในงานปั๊มขึ้นรูป ทั้งนี้เพราะมีผิวเรียบและละเอียด ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีความสวยงาม การที่เรียกว่าแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น นั้น เนื่องจากได้ผ่านกระบวนการรีดเย็นมา ซึ่งการรีดเย็นนั้นก็คือการรีดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำให้อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS G3141 ได้แบ่งเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นเพื่อใช้งานขึ้นรูปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจัดแบ่งประเภท และส่วนผสมทางเคมี [8]

ชั้น	สัญลักษณ์	ลักษณะการใช้งาน	ส่วนผสมทางเคมี (%)				
			C	Si	Mn	P	S
1	SPCC	ใช้งานทั่วไป	0.12 Max.	-	0.50 Max.	0.040 Max.	0.045 Max.
2	SPCD	ใช้งานลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing)	0.10 Max.	-	0.45 Max.	0.035 Max.	0.035 Max.
3	SPCE	ใช้งานลากขึ้นรูปลึกมาก (Extra deep drawing)	0.08 Max.	-	0.40 Max.	0.030 Max.	0.030 Max.

ในสัญลักษณ์ที่แสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าตามมาตรฐาน JIS นั้น ตัวอักษรแต่ละตัวนั้นมีความหมาย ยกตัวอย่างเช่น SPCC

S หมายถึง เหล็กกล้า (Steel)

P หมายถึง แผ่น (Plate)

C หมายถึง รีดเย็น (Cold-rolled)

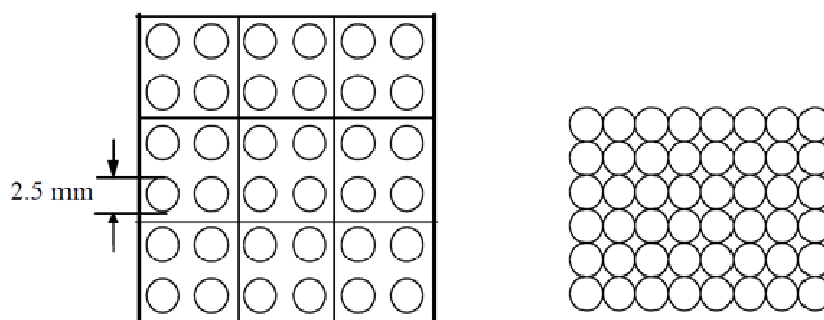
C หมายถึง ทั่วไป (Commercial quality)

2.3.10 การตีกริดและวิเคราะห์กริดวงกลม

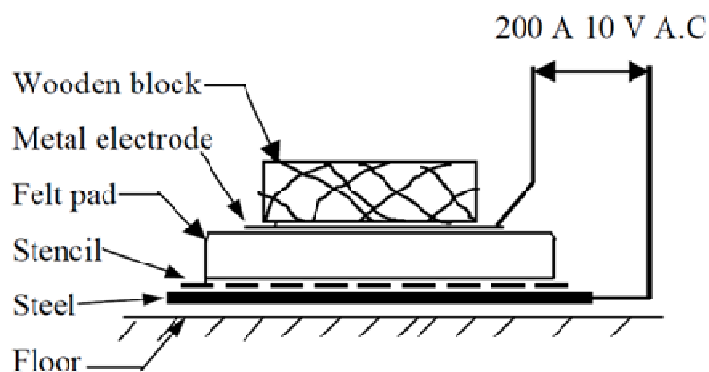
1) การตีกริดด้วยกระแสไฟฟ้า [3]

อาศัยตะแกรง(Stencil) เพื่อให้มันง่ายและใช้แรงดันของไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นรูปแบบของแผ่นชิ้นงานที่ว่างเปล่ามีผ้าขนสัตว์ (Felt pad) วางทับลูกกลิ้งหรือแผ่นทับ (Wooden block) เดินซ้ำๆ ชุมนกับสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ว่างทับทางด้านบนของความว่างแผ่น ตะแกรง และขั้วไฟฟ้าใช้กับแผ่นเหล็ก (Metal electrode) สารเข้าร่วมขั้วไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกับอิเล็กโทรด สามารถปรับกระแสและแรงดันปรับจาก 15 ถึง 200 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับ ขนาดของตะแกรง และความหนาแน่นของเส้นบรรทัด หลังจากให้ทำผ้าขนสัตว์กับขั้วไฟฟ้าเดินซ้ำๆ จนสิ้นสุดแผ่นของแผ่นงาน

สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะทำให้เคลื่อนผ่านตะแกรงและเข้ามาติดต่อบนแผ่นเหล็กของชิ้นงาน การตีกริดโดยใช้กรดให้กัดกร่อน (Electrochemically) ผ่านผ้าสักหลาดที่ต้องเป็นตัวกลางผ่านสารละลายไปยังแผ่นโลหะ [2] ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 รูปแบบของกริดวงกลม [14]



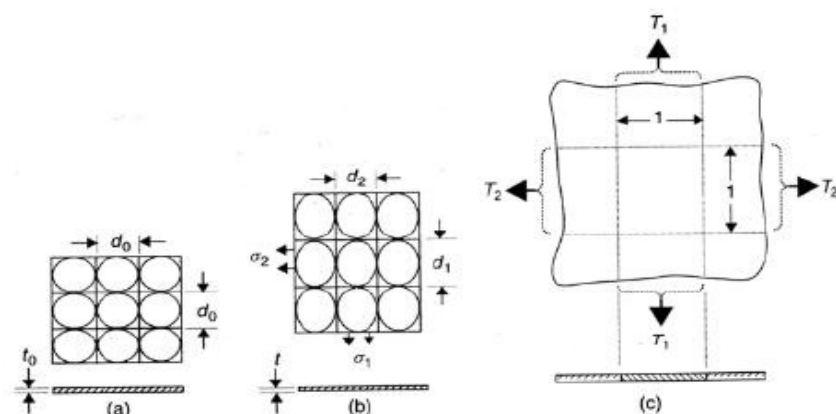
ภาพที่ 2.25 อีเล็กโทรไลต์ [2]

สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเหมาะสมของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าควรจะเป็นซึ่งถูกใช้เป็นชนิดโลหะโดยเฉพาะสารละลายเป็นค่าของสารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะมีส่วนผสมของสารละลายดังนี้

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

2) การวิเคราะห์กริดวงกลม (Analysis of circle grid) [3]

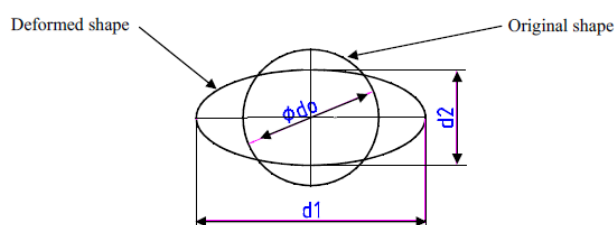
การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น ในระนาบความเค้น (Deformation of sheet in plane stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดังนั้น ในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ d_1 แกนรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนความหนาคือ t ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2 ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด [3]

3) ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆ วิเคราะห์ในพื้นที่วิกฤตของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม [3]

ค่าความเครียดหลัก (Major)

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.13)$$

ค่าความเครียดรอง (Minor)

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.14)$$

ค่าความเครียดที่ความหนา (Thickness strain)

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (2.15)$$

ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (2.16)$$

2.3.11 สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานขึ้นรูปลึก

สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของของเหลว [1]

การหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปลึกไม่ใช่เป็นเพียงการลดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นโลหะกับผิวเครื่องมือเท่านั้น แต่ยังเป็น การลดการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการพอกตัวของเศษโลหะจากแผ่นวัสดุเกาะเป็นจุดเล็กๆ ที่ผิวหน้าของคานและแบลงก์โฮลเดอร์

การพอกเกาะของเศษโลหะนี้มีผลมาจาก ความหยาบผิวของคานและแบลงก์โฮลเดอร์ แรงกดดันระหว่างผิวคู่สัมผัสและการหล่อลื่น มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยขีดข่วนบนผิวงานสำเร็จซึ่งเกิดจากการพอกของเศษโลหะ เมื่อคิดเป็นตัวเงินนั้นมีค่ามหาศาลเลยทีเดียว เช่น การซ่อมเครื่องมือการหุดสายการผลิต เป็นต้น ซึ่งสามารถลดความเสียหายนี้ได้ด้วยการหล่อลื่นที่เหมาะสม

1) สารหล่อลื่นมีความสำคัญต่องานขึ้นรูป โดยมีหน้าที่ดังนี้

- ลดและจำกัดการสัมผัสโดยตรงระหว่างแม่พิมพ์ และโลหะแผ่นแบลงก์และยังลดการสึกหรอ (Wear) และป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนบนโลหะไหลตัว
- ควบคุมความเสียดทาน
- ทำให้การกระจายของความเครียดสม่ำเสมอและเพิ่มระดับการแปรรูปรวมลดความร้อน

2) การเลือกใช้สารหล่อลื่น[9]

สารหล่อลื่นจะใช้ในการลากขึ้นรูปส่วนใหญ่ มันมีตั้งแต่ น้ำมันเครื่องจักรธรรมดา ถึงสารประกอบเม็ดสี (Pigmented compounds) การเลือกสารหล่อลื่นขึ้นกับความสามารถในการป้องกันความเสียหาย การย่น (Wrinkling) การหนีขาดระหว่างขึ้นรูปลึก โดยการใช้ตาม

ระดับความยาก-ง่าย ของการขึ้นรูปและชนิดของโลหะที่นำมาขึ้นรูป นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีกได้แก่

- ความหนืดที่เหมาะสมตลอดช่วงของอุณหภูมิและความดันที่ใช้
- ความเข้ากันได้ทางเคมี และทางกายภาพกับวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปและแม่พิมพ์
- ความง่ายต่อการใช้งาน และการขจัดออก

ไม่มีสารหล่อลื่นใดที่เหมาะสมกับทุกประเภทของงานขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปและแม่พิมพ์ ความแตกต่างในประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นจะขึ้นกับส่วนผสมของพื้นผิว ความหยาบ (Roughness) และลักษณะเนื้อของวัสดุที่ต้องการขึ้นรูปและแม่พิมพ์ และความแตกต่างของความเครียด ในแต่ละขั้นของการขึ้นรูปและอัตราการแปรรูปที่ต่างกัน เช่น การขึ้นรูปแบบการยืดขึ้นรูป (Stretching) จะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เกือบ 100% แต่ในงานเขียนแบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เพียงเล็กน้อย ยิ่งกว่านั้นอัตราที่วัสดุไหลเลื่อนผ่านแม่พิมพ์ยังแตกต่างกันมาก

3) สารหล่อลื่นแข็ง (Solid lubricant)[9]

ปกติชั้นของสารหล่อลื่นแข็งจะถูกแยกด้วยฟิล์มต่างๆ เช่น น้ำ ออกซิเจน หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ มิฉะนั้นก็จะเกิดความเสียหายสูง แต่ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมสารเพิ่มประสิทธิภาพ (Additive) ลงไป

ผิวโลหะปกติเมื่อสัมผัสกันและรับน้ำหนัก จะมีบางจุดที่รับน้ำหนักนี้ เมื่อผิวสัมผัสถูกอัดให้ตะกันที่ผิวบางจุดจนเชื่อมติดกัน ถ้าเราเคลื่อนผิวโลหะชิ้นหนึ่งไปมา รอยเชื่อมนี้ก็จะถูกฉีกออกจากกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ และเราอาศัยแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันกับการลากพาของผิวโลหะทั้งสองช่วยพยุงน้ำหนักนี้ เป็นหลักในการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นแข็งจะอยู่ระหว่างคู่ผิวโลหะที่เคลื่อนไหวย จะช่วยป้องกันการเสียดสีระหว่างผิวโลหะจึงช่วยลดการสึกหรอและการเสียดสี สารหล่อลื่นแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ แกรไฟต์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และพลาสติก สารหล่อลื่นชนิดแข็งที่ใช้ในการทำงานคือ โพลีเอทิลีน

โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว สามารถพับงอได้ดี ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสัณฐานได้ง่ายมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะ

ทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกร้าวได้ง่ายขึ้น เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ตามต้องการ

สมบัติทั่วไปยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำมีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมากทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดีหดรัดแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่ายเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมากผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสงได้ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส

2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางหรือ Two-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นซึ่งเป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียวโดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตามตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางนอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้วยังสามารถศึกษาผลรวม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใดๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวแปรหนึ่งหรือไม่ดังตารางที่ 2.3 เมื่อทำการคำนวณหาค่าต่างๆ ตามสูตรแล้วนำค่าที่ได้มาใส่ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ [13]

		Factor B				รวม	ค่าเฉลี่ย
		1	2		c		
Factor A	1	X_{111} X_{112} ... X_{11n}	X_{121} X_{122} ... X_{12n}		X_{1c1} X_{1c2} ... X_{1cn}	$T_{1.}$	$\bar{X}_{1.}$
	2	X_{211} X_{212} ... X_{21n}	X_{221} X_{222} ... X_{22n}		X_{2c1} X_{2c2} ... X_{2cn}	$T_{2.}$	$\bar{X}_{2.}$
	..			X_{ij1} X_{ij2} ... X_{ijn}		$T_{i.}$	$\bar{X}_{i.}$
	..						
	..						
	r	X_{r11} X_{r12} ... X_{r1n}			X_{rc1} X_{rc2} ... X_{rcn}	$T_{r.}$	$\bar{X}_{r.}$
รวม		$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.j}$	$T_{.c}$	T	
เฉลี่ย		$\bar{X}_{.1}$	$\bar{X}_{.2}$	$\bar{X}_{.j}$	$\bar{X}_{.c}$		$\bar{X}$

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง [11]

แหล่งความแปรผัน	df	SS	MS	F_0
Factor A	r-1	SS_A	$MS_A = SS_A / r - 1$	MS_A / MS_E
Factor B	c-1	SS_B	$MS_B = SS_B / c - 1$	MS_B / MS_E
Error	rc(n-1)	SS_E	$MS_E = SS_E / rc(n-1)$	
รวม	rcn-1	SS_t		

1) การคำนวณ SS_A , SS_B , SS_E และ SS_t

$$SS_t = \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk}^2 - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.17)$$

$$SS_A = \sum_i \frac{T_{i.}^2}{cn} - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.18)$$

$$SS_B = \sum_j \frac{T_{.j}^2}{rn} - \frac{T^2}{rcn} \quad (2.19)$$

$$SS_E = SS_t - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.20)$$

2) สมมติฐาน

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ (ประชากรทั้ง k กลุ่มมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน)

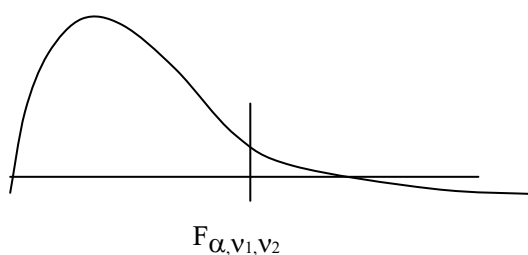
H_1 : ประชากรอย่างน้อย 1 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากันหรืออาจเขียนเป็นดังนี้

3) สถิติที่ใช้ทดสอบ

$$F = \frac{MS_A}{MS_E} \quad ; \text{df} = r-1, rc(n-1) \quad (2.21)$$

$$F = \frac{MS_B}{MS_E} \quad ; \text{df} = c-1, rc(n-1) \quad (2.22)$$

4) อาณาเขตวิกฤตและการสรุปผล



ในทุกการทดสอบสมมติฐานจะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อค่า F_0 ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า F_{α, v_1, v_2} จากตารางเมื่อ V_1 และ V_2 คือ degree of freedom ในการทดสอบนั้นๆ