

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการที่เป็นปัญหาสำคัญ ได้แก่ การเกิดรอยย่น การฉีกขาดบนผิวชิ้นงาน และรูปทรงไม่เป็นไปตามต้องการ โดยเฉพาะการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่สมมาตร ปัญหาเหล่านี้มีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ลักษณะของชิ้นงานต้นแบบ การกำหนดขนาดของแรงจับยึดชิ้นงานที่ไม่เหมาะสม และการกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์ เช่น การกำหนดครีมีพันธ์และคาย การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะมีประโยชน์อย่างมากในการลดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูกของกระบวนการ เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูปโลหะทำให้ทราบถึงลักษณะพฤติกรรมการไหล การเสียรูปของโลหะตลอดจนสามารถคาดการณ์จุดเสียหายที่น่าจะเกิดขึ้นหลังจากการขึ้นรูปได้ ในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นพิจารณาถึงการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นเพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้จำเป็นต้องเข้าใจกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของกระบวนการและการวิเคราะห์จะได้อธิบายดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์

K. Lange (1985) ได้จำแนกวิธีการของการขึ้นรูปโลหะ โดยอาศัยพื้นฐานของอิทธิพลของความแตกต่างในส่วนของประสิทธิภาพความเค้นที่มีผลต่อการเสียรูปของโลหะ และกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์นั้นจัดอยู่ในประเภทของการขึ้นรูปโดยการดึงและการอัด โดยสามารถจำแนกกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์ได้โดยอาศัยลักษณะของการดึงขึ้นรูปได้ 3 ประเภท คือ

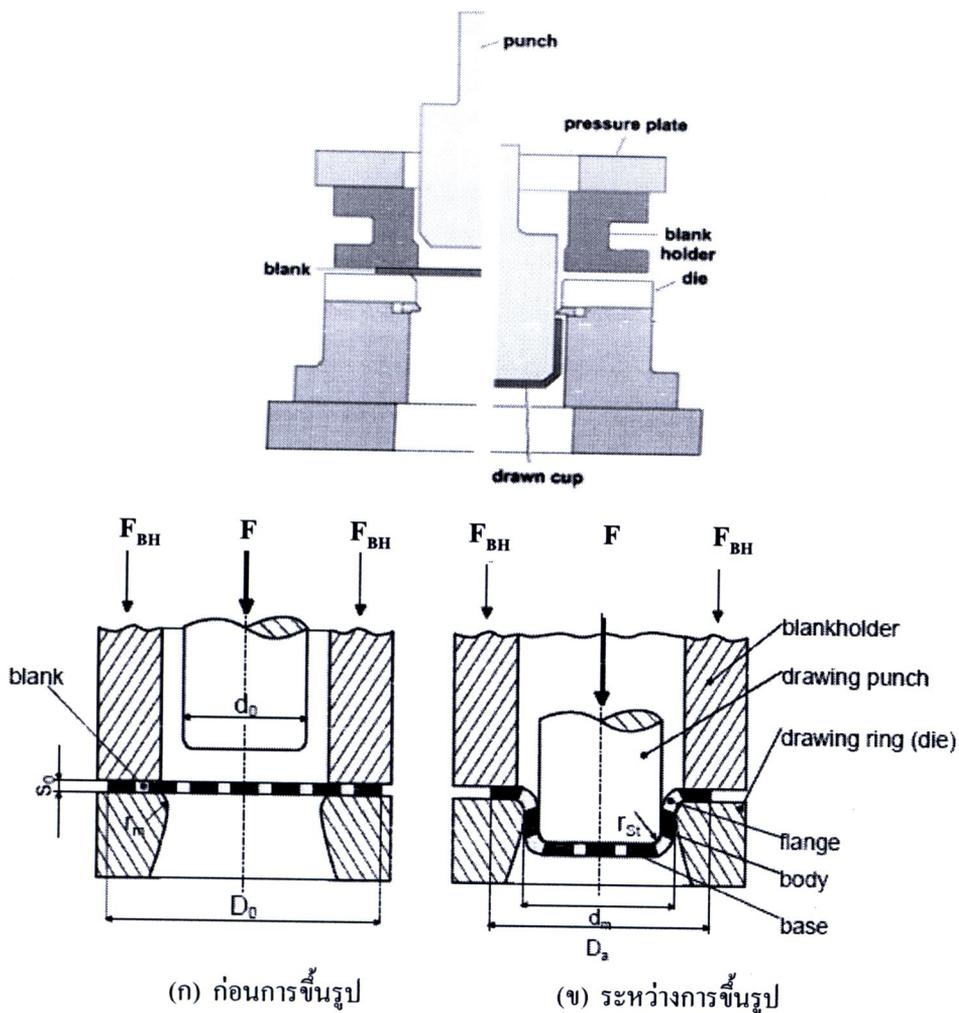
- 1) การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์โลหะ (Deep drawing using dies)
- 2) การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันจากของไหล (Deep drawing using a working medium)
- 3) การขึ้นรูปโดยไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้น (Deep drawing by energy activation)

จุดประสงค์ของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์ คือ การแปรสภาพโลหะแผ่นเรียบให้เป็นรูปถ้วยหรือลักษณะที่เป็นเปลือกหอยโดยไม่มีรอยตะเข็บบนผิวชิ้นงาน ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนจะพบว่าโลหะแผ่นที่นำมาขึ้นรูปอาจมีรูปร่างลักษณะไม่ได้ตามที่ต้องการ เช่น เกิดรอยย่น มักจะเกิดในบริเวณพื้นที่ที่มีค่าความเครียดอัดตัวสูง ๆ และการฉีกขาดมักเกิดขึ้นในบริเวณที่โลหะแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างทันทีทันใดเป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูป

วารุณี เปรमानนท์ (2552) ได้อธิบายองค์ประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึงค์ดึงขึ้นรูปโดยเริ่มต้นจากแผ่นโลหะรีดเย็นหรือรีดร้อนทำการตัดให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โลหะแผ่นที่นำมาขึ้นรูปมักเป็นกลุ่มของวัสดุเหนียวที่มีความสามารถยึดตัวได้ดี กระบวนการทำงานส่วนใหญ่ทำที่อุณหภูมิห้อง แม่พิมพ์ที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปลึงค์โลหะแผ่นอาจทำเป็นแม่พิมพ์เดี่ยว แม่พิมพ์ผสม แม่พิมพ์ต่อเนื่อง หรือแม่พิมพ์แบบส่งผ่าน ขึ้นอยู่กับขนาด

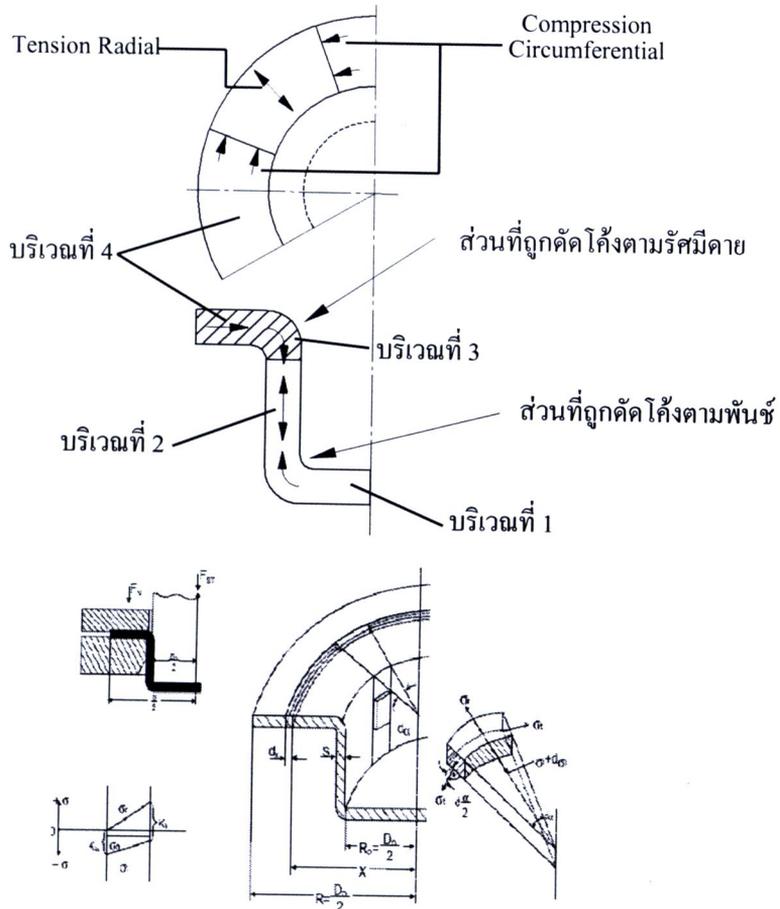
และลักษณะของชิ้นงาน ขนาดของเครื่องปั๊ม ปริมาณการผลิต หรือองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการผลิต องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกได้แสดงในภาพที่ 2.1 จากภาพแสดงถึงองค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกและลักษณะแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปและระหว่างการขึ้นรูป ส่วนที่สัมผัสโดยตรงกับแผ่นชิ้นงานเปล่า มีอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนของ พันช์ ดาย และ แผ่นจับยึดชิ้นงาน ขณะทำการขึ้นรูปแรงจากเครื่องปั๊ม (F) จะถูกส่งผ่านมายังพันช์เพื่อดันให้โลหะแผ่นไหลตัวเคลื่อนเข้าไปในช่องดาย ขณะเดียวกันก็มีแรงจับชิ้นงาน (F_{BH}) เพื่อควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่น



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึกและลักษณะของแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปและระหว่างการขึ้นรูป

2.1.2 พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะแผ่น

พฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่นดังแสดงในภาพที่ 2.2 แรงกดจากพันธจะส่งผ่านมาที่บริเวณกันด้วย (บริเวณที่ 1) ส่งผลให้เกิดการดัดโค้งของแผ่นโลหะ 2 บริเวณ คือ ส่วนโค้งตามรัศมีพันธ (บริเวณที่ 2) และส่วนโค้งตามรัศมีคาย (บริเวณที่ 3) เมื่อพันธเคลื่อนที่ลึกลงส่วนของแผ่นโลหะที่เป็นผนังด้วยในแนวตั้งจะทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงที่กระทำที่กันด้วยไปยังบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (ส่วนของปีกถ้วย (Flange) และส่วนโค้งตามรัศมีคายที่แรงกดดังแสดงในภาพที่ 2.2)



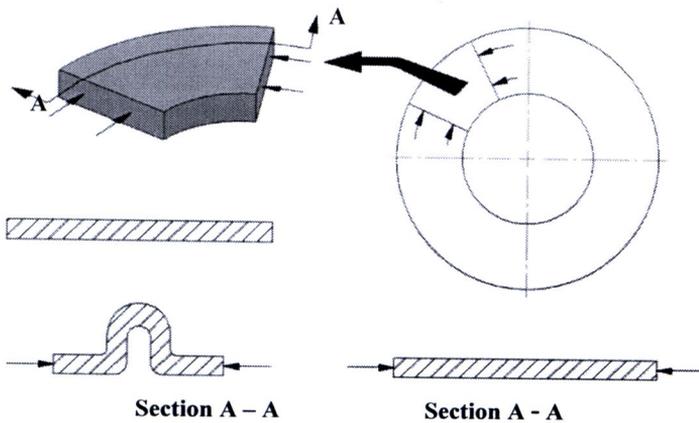
ภาพที่ 2.2 พฤติกรรมและทิศทางการไหลตัวของโลหะแผ่นของกระบวนการดัดขึ้นรูป

บริเวณที่ 1 ส่วนของกันด้วยแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปเกิดขึ้น พันธจะพาเนื้อโลหะส่วนนี้เคลื่อนที่ตามเข้าไปในช่องว่างคาย และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นโลหะบริเวณนี้น้อยมาก

บริเวณที่ 2 ส่วนของแผ่นโลหะที่ถูกดัดโค้งตามรัศมีพันธ และผนังด้วยในแนวตั้งที่ผ่านการเปลี่ยนรูปที่สมบูรณ์มาแล้ว แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ส่งผ่านแรงจากกันด้วยทำให้เกิดความเค้นดึงในแนวแกนส่งผลให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการยืดตัวและเกิดการบางลงของแผ่น โลหะ บางกรณีก็เกิดการฉีกขาดขึ้นที่บริเวณนี้

บริเวณที่ 3 เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรในส่วนที่ถูกดัดโค้งตามรัศมีคาย

บริเวณที่ 4 ส่วนของปีกถ้วยเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุดบริเวณนี้เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากปริมาตรของเนื้อโลหะที่มีมากที่ขอบด้านนอกของแผ่นเปล่าพยายามเบียดเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างคายตามแรงดึงจากพันธ์ และเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีที่เกิดจากการดึงของพันธ์ การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวของวัสดุเนื่องจากการเบียดหรือการอัดตัวในแนวเส้นรอบวงจะทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมีและเกิดการต้านการไหลตัว (แรงเสียดทาน) มักจะพบว่าแผ่นโลหะที่บริเวณนี้จะมีความหนาเพิ่มมากขึ้น หรือเกิดการยุบ เนื่องจาก การอัดตัวในแนวเส้นรอบวง ทำให้เกิดการขยายออกใน 2 แนวแกน คือขยายออกตามแนวรัศมีและขยายออกตามแนวความหนาของแผ่นโลหะ ในบางกรณี เช่น โลหะแผ่นบาง เมื่อค่าความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงสูงขึ้น จะเกิดการโค้งตัวแทนที่จะหนาขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 กรณีนี้จะพบปัญหาการยุบบนปีกถ้วยร่วมด้วย



ภาพที่ 2.3 กลไกที่ทำให้ปีกขึ้นงานหนาขึ้นและเกิดการยุบ

2.1.3 แรงในการจับยึดชิ้นงาน

ขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปจะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่บริเวณปีกของถ้วย การใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานกดบนบริเวณนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยยุบซึ่งขนาดของแรงกดที่ใช้ต้องมีความเหมาะสม ถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดรอยยุบบนปีกและเกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงกดบนแผ่นจับยึดชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพื้นที่ขึ้นมาเล็กน้อย ขนาดของแรงดันในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$P_{BH} = 10^{-3}C \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005d_0}{T} \right] \sigma_u \quad (2.1)$$

โดย	P_{BH}	คือ	แรงดันในการจับยึดชิ้นงาน (นิวตันต่อตารางเมตร)
	β	คือ	อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป
	d_0	คือ	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่า (มิลลิเมตร)
	T	คือ	ความหนาของแผ่นโลหะ (มิลลิเมตร)

σ_u คือ ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ
(Ultimate Tensile Strength, นิวตันต่อตารางเมตร)

C คือ ค่าคงที่มีค่าระหว่าง 2-3

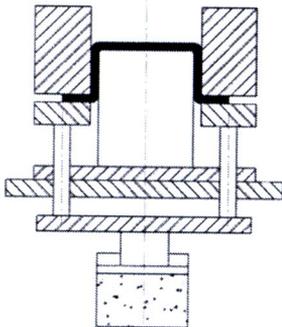
ดังนั้น แรงในการจับยึดชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$F_{BH} = P_{BH} \times A_{BH} \quad (2.2)$$

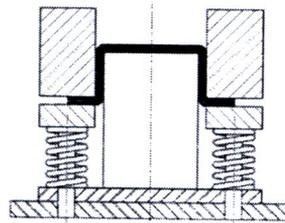
โดย F_{BH} คือ แรงในการจับยึดชิ้นงาน (นิวตัน)

A_{BH} คือ พื้นที่บริเวณปีกที่แผ่นจับชิ้นงานกอดอยู่ (ตารางมิลลิเมตร)

แรงดันที่ใช้ในการจับยึดชิ้นงานจะถูกส่งแรงมาจากคายนกชั้นที่อยู่ใต้โบลสเตอร์ของเครื่องปั๊มผ่านแกนส่งแรงดัน (Cushion Pin) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ก) การทำงานของคายนกชั้นสามารถควบคุมให้คงที่และสามารถปรับตั้งได้ แรงในการจับยึดชิ้นงานที่กระจายบนแผ่นจับยึดชิ้นงานและจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อแผ่น โลหะถูกดึงให้ไหลเข้าไปในช่องคายนกก็จะเหลือพื้นที่บริเวณปีกลดลงทำให้แรงจับยึดน้อยลง ในขณะที่ภาพ 2.4 (ข) แสดงการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้สปริงในการสร้างแรงจับยึดชิ้นงาน ยิ่งระยะขยุบของสปริงมากแรงในการจับยึดก็จะเพิ่มสูงขึ้น แรงในการจับยึดชิ้นงานที่เกิดจากการดันของสปริงจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่บริเวณปีกด้วยเหลือน้อยลง



(ก) แรงจับยึดชิ้นงานที่ส่งมาจากคายนกชั้น



(ข) แรงจับยึดชิ้นงานที่ส่งมาจากสปริง

ภาพที่ 2.4 ลักษณะการจับยึดแผ่นชิ้นงานเปล่าแบบส่งกำลังจากคายนกชั้นและจากสปริง

2.1.4 อัตราส่วนการดึงขึ้นรูป

ความยาก-ง่ายในการดึงขึ้นรูปสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป หาได้จากอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\text{Drawing Ratio } (\beta) = \frac{d_0}{d_1} \quad (2.3)$$

โดย	β	คือ	ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio)
	d_0	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่า
	d_1	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ์

อัตราส่วนในการดึงขึ้นรูปสูง หมายถึง การขึ้นรูปที่รุนแรง และมีโอกาสเกิดการฉีกขาดหรือเกิดการย่นสูง วัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดึงขึ้นรูปได้ไม่เท่ากัน คุณสมบัตินี้เรียกว่า ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio) อย่างไรก็ตามค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูปไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเพียงอย่างเดียว ความหนาที่เปลี่ยนไปทำให้ค่า β_{max} เปลี่ยนแปลงไปได้ด้วย คือ ยิ่งวัสดุมีความหนามากขึ้น โอกาสในการดึงขึ้นรูปได้สำเร็จก็เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโลหะแผ่นหนาจะทนต่อการฉีกขาดและทนต่อการย่นได้ดีกว่าโลหะแผ่นบาง นอกจากนั้นค่าความหยาบของผิวคาย ผิวของแผ่นจับชิ้นงาน การหล่อลื่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปก็มีผลโดยตรงต่อค่า β_{max} กล่าวคือ ผิวของแม่พิมพ์และแผ่นจับชิ้นงานที่เรียบ รวมถึงการหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ำ ทำให้โลหะแผ่นไหลตัวได้ง่าย จึงมีค่า β_{max} สูงกว่ากรณีขึ้นรูปภายใต้ผิวคายและแผ่นจับชิ้นงานไม่เรียบและการหล่อลื่นไม่มีประสิทธิภาพ

2.1.5 ระยะช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Tool Clearance)

ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ หมายถึง ช่องว่างที่อยู่ระหว่างพันธ์และคายดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยทั่วไปจะมีขนาดกว้างกว่าความหนาเริ่มต้นของโลหะแผ่นเล็กน้อย การออกแบบระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ใหญ่เกินไปจะทำให้รูปร่างของถ้วยบริเวณปากถ้วยด้านบนขยายออกหลังการขึ้นรูป ไม่เป็นทรงกระบอกที่สมบูรณ์ ในขณะที่การใช้ช่องว่างแม่พิมพ์ที่เล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดการรีดลดความหนาผนังที่บริเวณขอบด้วยด้านบน และต้องเพิ่มแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งอาจทำให้เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานได้ ค่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดของวัสดุชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.4

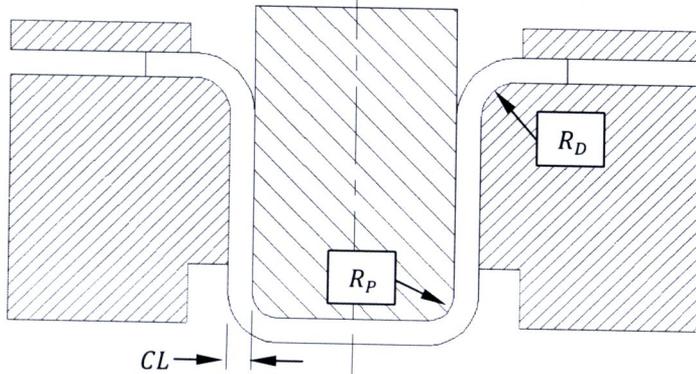
$$CL = T + 0.07\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.4 \text{ ก})$$

$$CL = T + 0.02\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม} \quad (2.4 \text{ ข})$$

$$CL = T + 0.04\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็กอื่น ๆ} \quad (2.4 \text{ ค})$$

$$CL = T + 0.20\sqrt{10T} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอุณหภูมิสูง} \quad (2.4 \text{ ง})$$

โดย	CL	คือ	ระยะช่องว่างแม่พิมพ์
	T	คือ	ความหนาของแผ่นโลหะเปล่า



ภาพที่ 2.5 ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ รัศมีพินซ์ และรัศมีคาย

ค่าระยะช่องว่างที่แนะนำนี้ใช้สำหรับงานรูปถ้วยทรงกระบอกที่มีลักษณะสมมาตรรอบแนวแกน ส่วนงานรูปทรงอื่น ๆ เช่น ถ้วยสี่เหลี่ยม บริเวณที่เป็นมุมรัศมีควรมีระยะช่องว่างระหว่างพินซ์และคายมากกว่าบริเวณที่เป็นแนวตรงเนื่องจากมีปริมาณของเนื้อวัสดุที่จะไหลเข้ามากกว่า

2.1.6 รัศมีพินซ์และรัศมีคาย

การกำหนดรัศมีคายดังแสดงในภาพที่ 2.5 ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยและความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีคายที่มีขนาดใหญ่จะช่วยให้แผ่นโลหะไหลตัวง่ายขึ้น ลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม รัศมีคายที่มีขนาดใหญ่ก็ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการจับยึดแผ่นโลหะ และเพิ่มโอกาสในการเกิดรอยร่นบนปีกถ้วยดังนั้นจึงต้องออกแบบรัศมีคายให้มีขนาดพอเหมาะ Oehler และ Kaiser (1973) แนะนำวิธีการหาค่ารัศมีคายที่เหมาะสม ดังสมการที่ (2.4)

$$R_D = 0.035[50 + (d_0 - d_1)]\sqrt{T} \quad (2.4)$$

โดย R_D คือ รัศมีคาย
 R_P คือ รัศมีพินซ์

ขณะที่ Sellin (1931) แนะนำค่ารัศมีคายที่เหมาะสมดังสมการที่ (2.5)

$$R_D = (5 - 10) \times T \quad (2.5)$$

ส่วนรัศมีพินซ์ R_P ควรจะใหญ่กว่ารัศมีคายประมาณ 3-5 เท่า ค่ารัศมีพินซ์ต้องไม่เล็กกว่ารัศมีคาย เนื่องจากอาจทำให้เกิดการกดฉีกเนื้อโลหะให้แยกจากกันเหมือนกับแม่พิมพ์ตัดเฉือนได้

2.1.7 การดึงขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตร

วารุณี เปรमानนท์ (2552) กล่าวว่าชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เช่น รูปถ้วยสี่เหลี่ยม หรือถ้วยวงรี ความเสียหายที่เกิดขึ้นคือ เกิดรอยร่นที่ปีกถ้วย เกิดรอยฉีกขาดที่บริเวณมุมรัศมีพินซ์ หรือรอยฉีกขาด

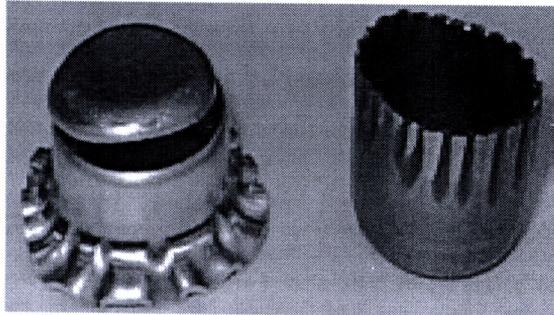
ที่เกิดจากการไหลตัวไม่เท่ากันที่บริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน ที่บริเวณส่วนปีกของชิ้นงานกล่อ่งสี่เหลี่ยม โดยเฉพาะขอบปีกตรงบริเวณรัศมีโค้งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการ โกงตัวและเกิดรอยย่น ได้มากที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงมาก และบริเวณรัศมีมุมโค้งเกิดความเค้นดัดด้วย ทำให้การไหลตัวช้ากว่าบริเวณขอบเส้นตรงของถ้วย จึงทำให้เนื้อวัสดุเกิดรัศมีมุมโค้งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการ โกงตัวหรือเกิดรอยย่น ดังนั้น การดัดขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการดัดขึ้นรูปที่สูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ในบางครั้งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณรัศมีมุมโค้งที่ก้นถ้วย และรัศมีที่ปากของถ้วยสี่เหลี่ยม เพราะบริเวณนี้จะเกิดความเค้นดัดที่สูง และความหนาของชิ้นงานบริเวณนี้ก็จะลดลงด้วย จึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย

จากงานวิจัยของ K. Lange (1985) ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดัดขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนรูปของแผ่น โลหะขึ้นกับความหนาของวัสดุและอัตราส่วนการขึ้นรูป (กรณีของแผ่น โลหะเปล่าและหน้าตัดพื้นที่ ไม่กลมคิดค่าอัตราส่วนการดัดขึ้นรูปจากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางว่าเป็นวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากัน) สำหรับการดัดขึ้นรูปที่ใช้อัตราส่วนการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 2.0 สำหรับแผ่น โลหะบาง ($d_0/T > 25-40$) นั้นจะมีความไวต่อการเกิดรอยย่นมาก เพราะมีโมเมนต์ความเฉื่อยในการต้านการ โกงตัวและการเกิดรอยย่นต่ำ จึงต้องการแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานที่มากกว่าแผ่น โลหะที่มีความหนามาก สำหรับแผ่น โลหะหนา ($d_0/T < 25$) โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยย่นได้ยาก ทำให้สามารถดัดขึ้นรูปได้โดยไม่ต้องใช้แผ่นจับชิ้นงาน และวัสดุที่มีค่า r_m (Normal anisotropy) ที่ต่ำ จะต้องใช้แรงกดของแผ่นจับชิ้นงานที่สูง และแรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่า เพลนนาร์ แอนไอโซโทรปี (Planar anisotropy) Δr สูงขึ้นด้วย ดังนั้น การแก้ปัญหาการ โกงตัวหรือการเกิดรอยย่นสามารถแก้ไขโดยการ ใช้รัศมีมุมโค้งของพื้นที่และคายใหญ่ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้วัสดุมีการไหลตัวได้ง่ายขึ้น หรือโดยการเลือกใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่น โลหะกับผิวของแม่พิมพ์ให้มีการ ไหลตัวได้ง่ายขึ้น และยังสามารแก้ไขปัญหการเกิดรอยย่นได้โดยการนำตัวครอบปิด (Drawbead) เข้ามาช่วยเพื่อกักการไหลตัวของวัสดุที่บริเวณในแนวตรงให้มีการไหลตัวที่ช้าลงหรือไหลตัวเท่ากับบริเวณขอบปีกตรงรัศมีโค้ง ซึ่งมีกรไหลตัวที่ช้าอยู่แล้ว

2.2 ข้อบกพร่องในงานดัดขึ้นรูปลึก

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการดัดขึ้นรูปลึกบ่งบอกถึงการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการที่ไม่เหมาะสม เช่น แรงในการจับยึดชิ้นงาน และความเร็วของการขึ้นรูป การกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์เช่น รัศมีแม่พิมพ์ การหล่อลื่น การขัดผิวแม่พิมพ์ และการติดตั้งครอว์บีค รายละเอียดของข้อบกพร่องหลัก ๆ วารุณี เปรมาพันธ์ (2552) ได้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การเกิดรอยย่นที่ปีกถ้วยหรือผนังถ้วย



ภาพที่ 2.6 การเกิดรอยย่นของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.6 รอยย่นจะเกิดจากความเค้นแรงอัดที่เกิดในแนวเส้นรอบวงที่ปีกถ้วย ในขณะที่เนื้อโลหะบริเวณนั้นถูกดึงให้ไหลตัวลงในปากคายนและรอยย่นนี้จะไม่สามารถรีดให้หมดไปได้ เมื่อพันธะเคลื่อนที่ลงจึงพาเอาแผ่นโลหะที่ย่นนี้ไหลลงไปเป็นส่วนของผนังถ้วย สาเหตุอาจเกิดจาก

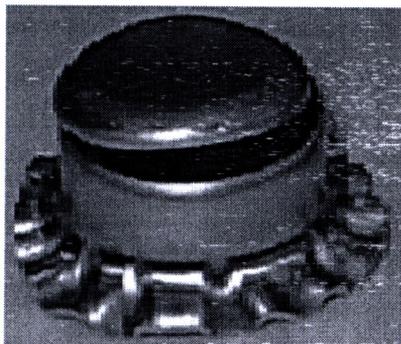
1) ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (β) สูงเกินไป แก้ไขได้โดยการลดขนาดแผ่นโลหะเปล่า (ในกรณีที่แผ่นโลหะเปล่ามีขนาดใหญ่เกินจำเป็น) หรือออกแบบขั้นตอนการทำงานใหม่ (ให้เพิ่มขั้นตอนในการดึงขึ้นรูปเพื่อลดความรุนแรงในการทำงาน)

2) แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานไม่เพียงพอ แก้ไขได้โดยการเพิ่มแรงกด

3) ผิวหน้าคายนหรือแผ่นจับชิ้นงานไม่ได้ระนาบ แก้ไขได้โดยการปรับระนาบ

4) รัศมีคายนใหญ่เกินไป (พื้นที่ในการจับยึดที่ปีกถ้วยน้อย) แก้ไขโดยการลดรัศมีคายน

2.2.2 เกิดการฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันธ



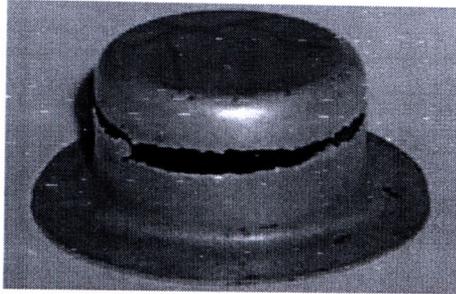
ภาพที่ 2.7 การฉีกขาดที่ก้นถ้วยบริเวณเหนือรัศมีพันธ

บริเวณผนังตรงทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงจากพันธไปดึงให้ชิ้นงานบริเวณปีกถ้วยเกิดการเปลี่ยนรูปและไหลลงไปในช่วงว่างคายน จึงเกิดความเค้นแรงดึงสูง ถ้าค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงเกินค่า

ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุก็จะทำให้เกิดการฉีกขาดดังแสดงในภาพที่ 2.7 ดังนั้น สาเหตุที่เป็นไปได้และวิธีการแก้ไขดังนี้

- 1) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป ให้แก้ไขโดยการเพิ่มแรงกด
- 2) เกิดความเสียหายสูงระหว่างผิวชิ้นงานบริเวณปีกถ้วยและผิวหน้าคाय รวมถึงรัศมีคाय และระหว่างผิวชิ้นงานและผิวหน้าแผ่นจับชิ้นงาน แก้ไขได้โดยการปรับผิวหน้าคाय แผ่นจับชิ้นงาน และรัศมีคाय ให้เรียบ รวมทั้งใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อลดค่าความเสียหาย
- 3) ค่าอัตราส่วนการดึงขึ้นรูป (β) สูงเกินไป ให้แก้ไขโดยการลดขนาดแผ่นโลหะเปล่า (ในกรณีที่แผ่นโลหะเปล่ามีขนาดใหญ่เกินจำเป็น) หรือออกแบบขั้นตอนการทำงานใหม่ (ให้เพิ่มขั้นตอนในการดึงขึ้นรูปเพื่อลดความรุนแรงในการทำงาน)

2.2.3 เกิดการตัดขาดรอบพื้นที่บริเวณระหว่างรัศมีพินซ์และรัศมีคाय



ภาพที่ 2.8 การฉีกขาดรอบพื้นที่

จากรูปที่ 2.8 พินซ์จะไม่ทำหน้าที่ในการพาชิ้นงานให้ไหลลงในปากคायแต่จะทำหน้าที่ในการตัดเฉือนแทน ซึ่งสาเหตุที่เป็นไปได้และวิธีการแก้ไขคือ

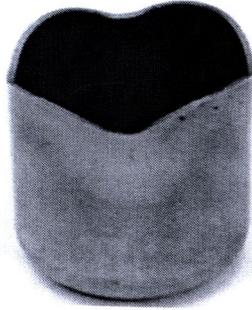
- 1) รัศมีพินซ์และคायเล็กเกินไป แก้ไขได้โดยการเพิ่มรัศมีของพินซ์และคाय
- 2) ใช้แรงกดแผ่นจับชิ้นงานสูงเกินไป แก้ไขได้โดยการลดแรงกด
- 3) ความเร็วในการทำงานสูงเกินไป แก้ไขได้โดยการปรับตั้งความเร็วให้เหมาะสม

2.2.4 ผิวเปลือกส้มหรือผิวโลหะไม่มันเงา

ผิวของแผ่น โลหะที่ผ่านการรีดจนมันเงาตอนเป็นแผ่น โลหะเปล่าจะหายไปเมื่อเกิดการขีดตัวภายใต้การดึงขึ้นรูปและเกิดลักษณะของผิวที่ด้านไม่สะท้อนแสงจนกระทั่งเห็นเป็นผิวเปลือกส้ม ส่วนที่เห็นได้ชัดเจนคือบริเวณผนังถ้วยด้านนอกส่วนที่เหนือรัศมีพินซ์โดยเป็นบริเวณที่เกิดการขีดตัวมากที่สุด ลักษณะที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อความสวยงามของผิวด้วยทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในขั้นตอนการขัดผิวเพื่อกำจัดผิวเปลือกส้มนี้ ออกไป การแก้ไขเพื่อลดปัญหานี้ทำได้โดยใช้วัสดุที่มีขนาดเกรนเล็ก แล้วทำการอบคืนตัวให้มีความแข็งค่อนข้างสูงจะช่วยให้ได้ผิวที่เรียบขึ้นแต่ต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากจะทำให้ความสามารถในการไหลตัวของวัสดุลดลง และมีโอกาสเกิดการฉีกขาดได้ง่าย

สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ	
ทบสมชงานวิจัย	
วันที่.....	12 ส.ค. 2556
เลขทะเบียน.....	208877
เลขเรียกหนังสือ.....	

2.2.5 เอียร์ริง (Earing)



ภาพที่ 2.9 การเกิดเอียร์ริงของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.9 จะเกิดความไม่สม่ำเสมอของขอบด้วยเป็นหูขึ้นมา 4 หู หรือที่เรียกว่า เอียร์ริง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ เพราะต้องเพิ่มขั้นตอนในการตัดส่วนนี้ออก ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ รวมถึงความหนาของผนังด้วยจะไม่เท่ากัน เอียร์ริงเกิดจากสมบัติทางด้านทิศทางของวัสดุ ความสูงของเอียร์ริงจะเพิ่มขึ้นเมื่อโลหะแผ่นมีค่าเพลนาร์ แอนไอโซโทรปี Δr สูง การคำนวณค่าเพลนาร์ แอนไอโซโทรปี หาได้จากสมการที่ (2.6)

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

โดย Δr คือ เพลนาร์ แอนไอโซโทรปี

r_0, r_{45}, r_{90} คือ ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติกของวัสดุในทิศทาง 0 45 และ 90 องศา ของแนวการรีด ตามลำดับ

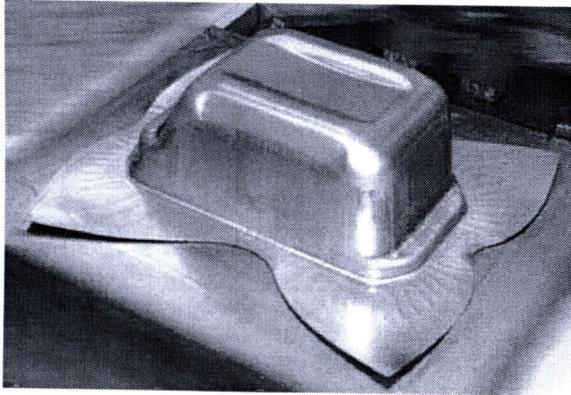
วัสดุที่มีค่า $\Delta r = 0$ จะไม่เกิดเอียร์ริง และได้ขอบด้วยที่เสมอเท่ากัน ความสูงที่ไม่สม่ำเสมอจากเอียร์ริงจะเพิ่มมากขึ้นตามค่า Δr ซึ่งเป็นไปได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ

Δr เป็นค่าบวก หมายถึง ด้านที่ตัดทั้ง 4 ด้านเป็นแนว 45 องศา กับแนวรีด

Δr เป็นค่าลบ หมายถึง ด้านที่ตัดทั้ง 4 ด้านเป็นแนวขนานและตั้งฉากกับแนวรีด

จากที่กล่าวมาข้างต้น การเกิดเอียร์ริงเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุ ไม่สามารถแก้ไขโดยการปรับพารามิเตอร์ในการออกแบบแม่พิมพ์ได้ ในการแก้ปัญหาทำได้โดยเผื่อขอบด้วยไว้ให้มากเพื่อตัดส่วนที่เกิดความไม่สม่ำเสมอออกก็จะได้ชิ้นงานที่ได้ตามต้องการ

2.2.6 รอยขีดข่วนบนผนังถ้วย (Scratching หรือ Galling)



ภาพที่ 2.10 รอยขีดข่วนบนผนังถ้วย

จากภาพที่ 2.10 รอยขีดข่วนบนผนังถ้วยด้านนอกเกิดจากประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นที่ลดลง ทำให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงของผิวชิ้นงานและแม่พิมพ์ แรงดันที่สูงขึ้น รวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของสารหล่อลื่นลดลง หรือหนีออกจากผิวสัมผัส เมื่ออนุภาคบางส่วนของแผ่นโลหะชิ้นงานจะหลุดติดอยู่บนผิวแม่พิมพ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะทะลุผ่านชั้นของสารหล่อลื่น และขีดผิวของแผ่นโลหะชิ้นต่อ ๆ ไปให้เป็นรอยได้ ดังนั้น สาเหตุและวิธีการป้องกันปัญหานี้คือ

- 1) เลือกวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม คือ เป็นวัสดุที่เกิดการเชื่อมได้ดีกับวัสดุชิ้นงาน ให้แก้ไขโดยการเลือกชนิดของวัสดุให้เหมาะสม หรือใช้วิธีการเคลือบผิวแม่พิมพ์
- 2) สารหล่อลื่นทำงานได้ไม่สมบูรณ์ ให้แก้ไขโดยเลือกสารหล่อลื่นที่มีองค์ประกอบในการต้านทานแรงดันสูง (Extreme pressure additives) หรือในกรณีที่เกิดความร้อนสูงก็ต้องมีองค์ประกอบของน้ำอยู่ในสารหล่อลื่นเพื่อช่วยในการระบายความร้อน (ต้องระวังองค์ประกอบในสารหล่อลื่นที่อาจกัดกร่อนวัสดุชิ้นงานด้วย)

2.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่ใช้ในไฟไนต์เอลิเมนต์

A. Le Port et al. (2009) ได้ทำการศึกษาหาค่าความเหมาะสมของการขึ้นรูปไททานเนียมให้เป็นรูปถ้วย ด้วยกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกสำหรับอุตสาหกรรมการบิน โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปของกระบวนการ โดยกำหนดให้วัสดุเป็น แอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) และคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปวัสดุในช่วง อีลาสติก-พลาสติก โดยเกณฑ์การครากของฮิลล์ (Hill's criterion) และผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับการทดลองจริง สรุปได้ว่าผลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสมสำหรับการอธิบายกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของไททานเนียมและการใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram, FLD) สามารถทำนายความเป็นไปได้และหาความเหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูป

ไมตรี กลมรัตนพิบูลย์ (2550) ทำการศึกษาปัญหาการการฉีกขาดและรอยร้าวในงานขึ้นรูปโลหะโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดแบบจำลองของวัสดุเป็นแบบ Transversely Anisotropic elastic-plastic สำหรับเอลิเมนต์แบบแผ่น โดยใช้เกณฑ์การครากของฮิลล์ (Hill's criterion) โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คือ โปรแกรม HYPERFORM V.8 ผลที่ได้สามารถลดขั้นตอนของกระบวนการผลิต และการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ที่ใช้ขนาดของชิ้นงานเริ่มต้นและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม

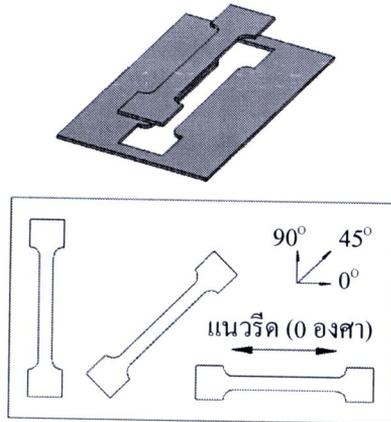
จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการดึงขึ้นรูปด้วยการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์การกำหนดพฤติกรรมของวัสดุจะกำหนดเป็น พลาสติกแอนไอโซโทรปี (Plastic Anisotropy) และใช้ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์ (Hill) วิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการดึงขึ้นรูปพลาสติก พฤติกรรมของวัสดุพลาสติกแอนไอโซโทรปี (Plastic Anisotropy) และ ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 พลาสติกแอนไอโซโทรปี

พลาสติกแอนไอโซโทรปีเป็นพฤติกรรมที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลตัวของวัสดุ ขณะทำการขึ้นรูปและความสามารถในการขึ้นรูป ในการหาพฤติกรรมแอนไอโซโทรปีสามารถทำได้โดยการทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM (1998) โดยพิจารณาพฤติกรรมในแต่ละทิศทางการรีดของโลหะความสามารถในการปรับแรงและการยืดตัวจะไม่เท่ากัน ในแต่ละทิศทาง ค่าความสามารถในการยืดตัวหรือหดตัวของแต่ละทิศทางแสดงโดย ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio, r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\text{Width Strain}}{\text{Thickness Strain}} \quad (2.7)$$

โดย	r	คือ	ค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio) ของวัสดุ
	ϵ_w	คือ	ความเครียดในทิศทางความกว้างของชิ้นงานทดสอบ $\epsilon_w = \ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)$
	w_1	คือ	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบหลังดึง
	w_0	คือ	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง
	ϵ_t	คือ	ความเครียดในทิศทางความหนาของชิ้นงานทดสอบ $\epsilon_t = \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)$
	T_1	คือ	ความหนาของชิ้นงานทดสอบหลังดึง
	T_0	คือ	ความหนาของชิ้นงานทดสอบก่อนดึง



ภาพที่ 2.11 ลักษณะการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงตามทิศทางกรรริดโลหะแผ่น

ในหลักการของแอนไอโซโทรปีของวัสดุ คือ คุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยของค่า r ในแต่ละทิศทาง (0° , 45° , 90°) และ นำค่า r ในแต่ละทิศทาง ไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (2.8)$$

โดย r_m คือ Normal Anisotropy

2.3.2 ทฤษฎีสภาพพลาสติกของฮิลล์

William F. Hosford (1993) ได้กล่าวว่า ฮิลล์ ได้เสนอการพิจารณาพลาสติกแอนไอโซโทรปี โดยไม่คำนึงถึงรูปผลึกเดิม โดยสมมติว่าวัสดุเอกพันธ์แสดงคุณลักษณะ โดยแกนไอโซโทรปี 3 แกนตั้งฉากกันคือ x , y และ z ซึ่งคุณสมบัติสมมาตรสองหน้า (ระนาบ x - y , y - z และ z - x คือระนาบสมมาตร) ในแผ่นรีดมักใช้ทิศทาง x , y และ z เป็นทิศทางรีด ทิศทางขวางการรีด และทิศทางความหนาตามลำดับ ทฤษฎีนี้ยังสมมติว่า ความต้านแรงดึงครากและแรงกดครากในทิศทางที่กำหนดมีค่าเท่ากันเกณฑ์การครากแอนไอโซโทรปิกที่เสนออยู่ในรูปสมการที่ (2.9)

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.9)$$

โดย $2f(\sigma_{ij})$ คือ ฟังก์ชันการคราก (ใช้ได้กับวัสดุที่เป็นแอนไอโซโทรปิกและไอโซโทรปิก)

F, G, H, L, M และ N คือ ค่าคงที่ (แสดงคุณลักษณะแอนไอโซโทรปิก)

และเมื่อกำหนดให้ $F = G = H$ และ $L = M = N = 3F$ สมการนี้ลดรูปลงเป็นเกณฑ์ของฟอนมิเชส ดังนั้นสมการที่ (2.9) เขียนใหม่ได้เป็น

$$F \left[(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 \right] + 6F(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) = 1 \quad (2.10)$$

หรือ

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 + 6\tau_{xy}^2 = \frac{1}{F} \quad (2.11)$$

โดย F, G และ H สามารถหาได้จากการทดสอบการดึง เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการดึงในแนวแกน x และ X เป็นค่าความเค้นดึงคราก โดยกำหนดให้

$$\sigma_x = X$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = 0$$

และในทำนองสมการความเค้นดึงครากในแนวแกน y และ Z โดย Y และ Z เป็นค่าความเค้นดึงครากในทิศทาง y และ Z ลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.9) จะได้ความเค้นดึงครากในแนวแกน x, y และ Z เป็นดังนี้

$$X^2 = \frac{1}{(G+H)} \quad (2.12 ก)$$

$$Y^2 = \frac{1}{(H+F)} \quad (2.12 ข)$$

$$Z^2 = \frac{1}{(F+G)} \quad (2.12 ค)$$

จากสมการที่ (2.12) นำมาเขียนใหม่เพื่อหาค่า F, G และ H จะได้

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \quad (2.13)$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (2.14)$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \quad (2.15)$$

ในกรณีที่เป็นโลหะแผ่นจะไม่สามารถหาค่าของ Z ได้ นั่น นักฎการไหลหรือสมการความสัมพันธ์ช่วงพลาสติกความเค้นและความเครียด ดังแสดงในสมการที่ (2.16) เข้ามาช่วยในการหาค่า Z โดยที่ L, M และ N สามารถหาได้จากการทดสอบการเลื่อน

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.16)$$

จาก ∂f ในสมการที่ (2.9) หาสมการอนุพันธ์ของสมการที่ (2.16) ได้กฎการไหล ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)] \\ d\varepsilon_y &= d\lambda [F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)] \\ d\varepsilon_z &= d\lambda [F(\sigma_z - \sigma_y) + G(\sigma_z - \sigma_x)] \\ d\varepsilon_{yz} &= d\varepsilon_{zy} = d\lambda L \tau_{yz} \\ d\varepsilon_{zx} &= d\varepsilon_{xz} = d\lambda L \tau_{zx} \\ d\varepsilon_{xy} &= d\varepsilon_{yx} = d\lambda L \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

ในการหากฎการไหลสำหรับความเครียดเฉือน $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y$ และ $d\varepsilon_z$ ต้องเขียนเกณฑ์การครากของสมการที่ (2.9) ใหม่ เพื่อให้พจน์ของความเค้นเฉือนปรากฏในรูป

$$L(\tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2) + M(\tau_{zx}^2 + \tau_{xz}^2) + N(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2)$$

มีฉะนั้นแล้วอนุพันธ์ย่อยจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้ไม่ได้คือ $d\varepsilon_{yz} = 2d\lambda L \tau_{xy}$ และ $d\varepsilon_{zy} = 0$ ฯลฯ สังเกตว่าสมการที่ (2.17) คือ $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ แสดงว่าปริมาตรคงตัว พิจารณา การทดสอบการดึงในทิศทาง x อีกครั้งหนึ่ง แทนค่า $\sigma_x = X$ และ $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ในสมการที่ (2.17)

$$d\varepsilon_x = d\lambda(H + G)X \quad (2.18ก)$$

$$d\varepsilon_y = -d\lambda(H)X \quad (2.18ข)$$

$$d\varepsilon_z = -d\lambda(G)X \quad (2.18ค)$$

เนื่องจากอัตราส่วนความเครียดสำหรับการทดสอบการดึงในทิศทาง X นิยามว่า

$$R = R_0 = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x}$$

โดย R_0 คือ อัตราส่วนความเครียดในทิศ 0 องศาเทียบกับแกน X

ดังนั้น จากสมการที่ (2.18) จะได้

$$R = \frac{H}{G} \quad (2.19)$$

และในการทำงานเดียวกัน นิยามให้ $P = R_{90}$ คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางแกน y นิยามว่า

$$P = R_{90} = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z}$$

เมื่อ $\sigma_y = Y$ และ $\sigma_x = \sigma_z = 0$ และจากสมการที่ (2.18) จะได้

$$P = \frac{H}{F} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) แทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้ค่าความเค้นดึงคราก Z ในแนวแกน Z ของโลหะแผ่นดังสมการที่ (2.21)

$$Z = X \sqrt{\frac{P(1+R)}{(P+R)}} \quad (2.21ก)$$

$$Z = Y \sqrt{\frac{R(1+P)}{(P+R)}} \quad (2.21ข)$$

สำหรับเงื่อนไขการกระทำของแรงที่ทำในแนวแกน x, y และ Z เป็นความเค้นหลัก Hill's yield criterion นำมาเขียนให้อยู่ในรูปของ R และ P โดยกำหนดให้ $\tau_{yx} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0$ และจากสมการที่ (2.9) และ (2.12) จะได้สมการใหม่เป็น

$$R(\sigma_y - \sigma_z)^2 + P(\sigma_z - \sigma_x)^2 + RP(\sigma_x - \sigma_y)^2 = P(R + 1)X^2 \quad (2.22)$$

และจากกฎการไหลจะได้สมการดังนี้

$$d\varepsilon_x = R(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_z) \quad (2.23ก)$$

$$d\varepsilon_y = \frac{R}{P}(\sigma_y - \sigma_z) + R(\sigma_y - \sigma_x) \quad (2.23ข)$$

$$d\varepsilon_z = \frac{R}{P}(\sigma_z - \sigma_y) + R(\sigma_z - \sigma_x) \quad (2.23ค)$$

จากการประยุกต์สมการ ถ้าวัสดุสมมาตรรอบแกน Z (แอนไอโซโทรปิกบนระนาบ) $R = P = Q$ และ $F = G, N = 3G, L = M$ สำหรับแรงที่กระทำที่ความเค้นหลักอยู่ในแนวแกน Z นั่นคือ $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ และให้ความเค้นหลักในแนวแกน x และ y ให้ทับกับหรืออยู่ในแนวเดียวกัน ดังนั้น $\tau_{yz} = 0$ เมื่อกำหนดให้ $P = R$ จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) ได้สมการเป็นดังนี้

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + R(\sigma_y - \sigma_z)^2 = (R + 1)X^2 \quad (2.24)$$

และ

$$d\varepsilon_x = (R + 1)\sigma_x - R\sigma_y - \sigma_z \quad (2.25ก)$$

$$d\varepsilon_y = (R + 1)\sigma_y - R\sigma_x - \sigma_z \quad (2.25ข)$$

$$d\varepsilon_z = 2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \quad (2.25ค)$$

สำหรับกรณีของแรงที่กระทำเป็นแบบความเค้นหลักในระนาบ $\sigma_z = 0$ ดังนั้น
เกณฑ์การครากคือ

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \frac{2R}{(R-1)}\sigma_x\sigma_y = X^2 \quad (2.26)$$

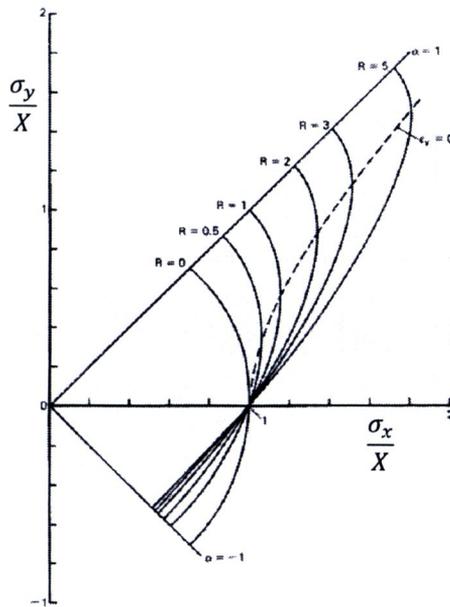
หรือ

$$\frac{\sigma_x^2}{X^2} = \left(1 + \alpha^2 - \frac{2\alpha R}{(R-1)}\right)^{-1} \quad (2.27)$$

โดย α คือ อัตราส่วนความเค้น

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

ถ้านำสมการที่ (2.26) มา Plot เป็นวงรีความยาวแกนหลัก และแกนรองขึ้นอยู่กับ R ดังนั้นเมื่อ $R = 1$ จะได้วงรีมาตรฐานของพอนมิสเชส และสำหรับวัสดุไอโซโทรปิก ค่า $R = 1$ ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กราฟของค่า R ของเกณฑ์การครากเมื่อ $\sigma_z = 0$

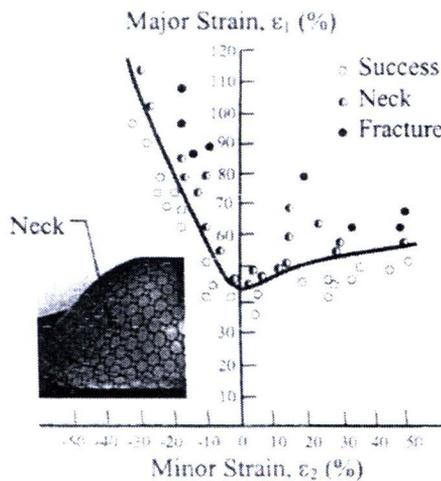
2.4 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ชาญ ถนัดงาม (2547) กล่าวว่าในปัจจุบันนี้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่น แต่อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการใช้งานนั้นต้องมีความรู้และประสบการณ์ทั้งในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอย่างเพียงพอ

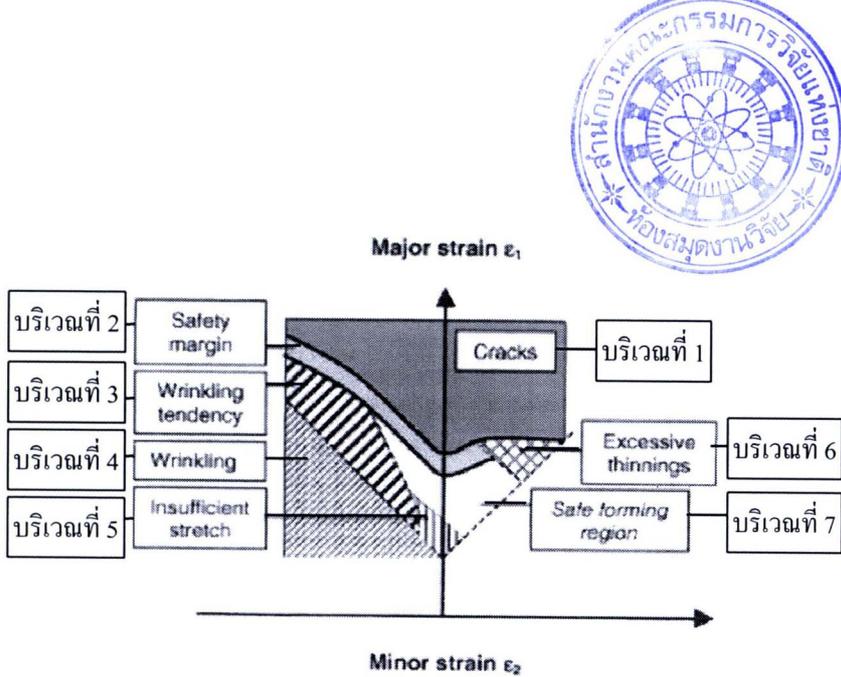
Banabic D. et al. (2000) กล่าวว่า ค่าความเครียดสูงสุดของความเครียดหลัก (ϵ_1) และความเครียดรอง (ϵ_2) สามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดที่เกิดการคอดและการแตกบนแผ่นโลหะด้วยการใช้

กริดวงกลม การวิจัยทางด้านนี้ Keeler เป็นผู้บุกเบิกก่อนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 และเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1965 โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกน (Biaxial stretching, $\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 > 0$) หลังจากนั้น Goodwin ทำการวิจัยในปี ค.ศ. 1968 โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบ ๆ บริเวณการคืบและการกด ($\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 < 0$) โดยใช้การทดสอบเชิงกลที่แตกต่างกัน ดังนั้นแผ่นภาพ Keeler และ Goodwin จึงใช้ร่วมกัน และเรียกว่าแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

ชัยศ นูระฉีพ (2549) กล่าวว่าความเครียดที่พบในบริเวณที่มีการคอคอดเฉพาะแห่งสามารถหาได้โดยการทดลองด้วยโพลดที่กระทำในวิธีที่ต่างกัน เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือการพิมพ์หรือกัดกริดวงกลม ลงบนแผ่นโลหะก่อนนำมาขึ้นรูป วงกลมเหล่านี้บิดเบี้ยวไปเป็นวงรีระหว่างการขึ้นรูป หลังจากนั้นจึงหาความเครียดหลักโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลักและเส้นผ่านศูนย์กลางรองของวงรี ความเครียดนี้อาจเขียนในรูปของความเครียดจริง หรือความเครียดวิศวกรรม และค่าความเครียดของวงกลมที่มีการคอคอดทั้งหมดหรือบางส่วนถือว่าเป็น “เสียหาย” ส่วนความเครียดของวงกลมที่ห่างออกไปจากนี้ถือว่าเป็น “ปลอดภัย” เมื่อลงจุดความเครียดเหล่านี้ก็สามารถสร้างแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 2.13 และพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นโลหะที่อยู่บนแผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 แผ่นภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป



ภาพที่ 2.14 พฤติกรรมการยืดตัวของแผ่น โลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

จากภาพที่ 2.14 แสดงพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่น โลหะที่อยู่บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป โดยที่ บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะมีการฉีกขาด บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะเกิดการฉีกขาดที่ยอมรับได้ บริเวณที่ 3 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะเกิดการรอย่น บริเวณที่ 5 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง บริเวณที่ 6 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะมีความหนาแน่นน้อยเกินไป และบริเวณที่ 7 เป็นบริเวณที่แผ่น โลหะปลอดภัยไม่เกิดการ ฉีกขาดและรอย่น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชัยยศ บุรณะชีพ (2549) ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่นและการขึ้นรูปขึ้นงานจริงกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขึ้นงานสำหรับการวิจัยนี้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์จากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หนา 0.6 มิลลิเมตร พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการย่นสำหรับการวิจัยนี้คือ ความเร็วในการขึ้นรูป รัศมีดกด แรงจับยึดชิ้นงาน และช่องว่างระหว่างพินซ์กับด้าย ใช้เครื่องปั๊มขนาด 300 ตัน ในการขึ้นรูปและใช้โปรแกรม HYPERWORK V.7 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลการวิจัยพบว่า พฤติกรรมการย่นของการขึ้นรูปขึ้นงานจริงและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน หลังจากวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นจากการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปขึ้นอยู่กับ แรงจับยึดชิ้นงานมากกว่า รัศมีดกด และช่องว่างระหว่างพินซ์และด้าย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการย่นของชิ้นงานขึ้นรูปได้

Nakamachi (1996) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการขึ้นรูปขึ้นงานยานยนต์ เพื่อศึกษาและทำนายผลการขึ้นรูปโลหะกับวัสดุโลหะแผ่นความหนา 0.81 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกันในแต่ละทิศทางจากการรีด และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขึ้นรูปจริง จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองและทำนายความเสียหายได้จริง

สถาพร ชาดาคม (2546) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเข้ามาช่วยในการผลิตชิ้นส่วนแท่นรองเครื่องยนต์ โดยการนำเอาข้อมูลทางด้านกรอกแบบซึ่งเป็นลักษณะ 3 มิติ (Surface modeling) นำมาแบ่งเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral elements) และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ (Boundary condition) ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้คือ JSC 440W-45/45 ความหนา 1.8 มิลลิเมตร และใช้โปรแกรม PAMSTAMP เข้ามาช่วยจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นจนได้ผลที่ดีที่สุดและนำผลดังกล่าวไปใช้ขึ้นรูปจริง ผลการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่อง پرسขนาด 100 ตัน กำหนด Die Cushion Stroke 250 มิลลิเมตร ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าความเค้นสูงสุดที่ 0.458 บาร์ ความหนาของชิ้นงานอยู่ระหว่าง 1.4 – 2.6 มิลลิเมตร ไม่พบปัญหาการฉีกขาด มีเพียงรอยย่นบางจุดสามารถลดขั้นตอนการขึ้นรูป จาก 2 ขั้นตอน เหลือเพียงขั้นตอนเดียว

2.6 สรุป

จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) องค์ประกอบหลักที่สำคัญของแม่พิมพ์ในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกประกอบไปด้วย พันช์ ดาย แผ่นจับยึดชิ้นงาน และแผ่นชิ้นงานเปล่า โดยต้องกำหนดเงื่อนไขของแม่พิมพ์ให้เหมาะสม ซึ่งได้แก่การกำหนดรัศมีพันช์ รัศมีดาย ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ และแรงในการจับยึดชิ้นงาน จึงจะได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
- 2) การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมการแปรรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกกันอย่างแพร่หลายและได้มีการพัฒนาทั้งในด้านทฤษฎี วิธีการประยุกต์ใช้ รวมไปถึงการพัฒนาโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปลึก โดยเฉพาะ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากที่สุดเป็นการลดการลองผิดลองถูกของกระบวนการ
- 3) จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกและทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง