

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างแม่พิมพ์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำเอาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์มาใช้ในการออกแบบ เพื่อนำพิจารณาลักษณะขนาดแรง หน้าที่ใช้งาน และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ทำขึ้นเอง ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์หาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูป เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวแปรที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ที่จะนำไปพัฒนาปรับปรุงแก้ไขแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### 2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) คือ การแปรสภาพ โลหะจากแบบเรียบให้เป็ปภาชนะรูปถ้วย (shell) การเปลี่ยนสภาพนี้ทำ ได้โดยการกดโลหะแผ่นเรียบด้วยพื้นที่เข้าไปในช่องว่างของตาย ซึ่งรูปแบบอาจเป็นรูปทรงกระบอก รูปกล่องที่มีด้านตรงเอียง และ เป็นเส้นโค้งเป็นต้น [1]

2.1.2 แรงกดขึ้นงาน (Blank holder force) คือ ขนาดของแรงกดของแผ่นกดขึ้นงาน (Blank holder) ที่พอเหมาะสำหรับป้องกันไม่ให้อันงานเกิดรอยย่นหรือขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาด เช่น ถ้าแรงกดมากเกินไปจะทำให้ขึ้นงานเกิดรอยฉีกขาดหรือถ้าแรงกดน้อยเกินไปจะทำให้ ขึ้นงานเกิดรอยย่นได้ [1]

2.1.3 ดรอร์บีด (Draw bead) มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะเข้าไปในตาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูป นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของเบงค์โฮลเตอร์ตลอดจนทำหน้าที่เหมือนกับ ปรับตัวรีดโลหะให้ความเครียด (Strain) ลดลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ [2]

2.1.4 ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม ซึ่งต้องประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ [3]

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการควบคุมการไหลของโลหะแผ่นของดรอร์บีด (Draw bead) ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวต่างกันเช่นรูปร่างและความสูงของดรอร์บีด ความเร็วในการดึงขึ้นรูป สภาพการหล่อลื่นและสมบัติของโลหะแผ่น สำหรับในการวิจัยนี้ใช้ดรอร์บีดที่มีรูปร่างแบบครึ่งทรงกระบอกกลม (Half-round draw bead) โดยมีตัวแปรที่สนใจคือความสูงของดรอร์บีด สภาพการหล่อลื่นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงของดรอร์บีดและการหล่อลื่นมีผลกระทบต่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นที่จะเข้าสู่ช่องเปิดตายเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มความสูงดรอร์บีดให้สูงขึ้นจะต้องใช้แรงกดแบบงกโฮลเตอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่รอยย่นที่เกิดขึ้นจะลดลง ในส่วนของการหล่อลื่นพบว่าเมื่อไม่ใช้สารหล่อลื่นจะไม่สามารถดึงขึ้นรูปได้เพราะจะเกิดการฉีกขาดที่ผนังขึ้นงานก่อน สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปในช่วงที่ใช้ในการทดลองพบว่า มีผลต่อคุณภาพของขึ้นงานสำเร็จน้อยมาก [2]

บุญส่ง จงกลณี ได้ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการลากขึ้นรูปลึกขึ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป 4 ตัวแปร รูปร่างแผ่นเปล่า (Blank geometry) ขนาดแรงกดขึ้นงาน (Blank holding force : BHF) ชนิดของสารหล่อลื่น (Lubricant type) และรูปร่างดรอร์บีด (Draw bead geometry) ในขั้นตอนการทดสอบจะมีการ

บันทึกผลแรงกดขึ้นรูปและแรงกดขึ้นงานในขณะขึ้นรูปทุกครั้ง การวัดผลการทดลองจะนำเอาชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาตรวจสอบความเสียหายและวัดขนาดของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป จากการทดลองพบว่า รูปร่างของแผ่นตัดเปล่า และแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปแล้วยังสามารถลดระดับความเครียดบนชิ้นงานได้อีกด้วย ขนาดของแรงกดขึ้นงานที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นตัดเปล่าและกลไกของแม่พิมพ์ สารหล่อลื่นจะลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานโดยตรง และการใช้ดรอร์บีดที่มีขนาดที่เหมาะสม จะสามารถควบคุมการไหลของแผ่นตัดเปล่าเข้าสู่ดายได้ดี จะทำให้สามารถลดขนาดของความเครียดในบริเวณวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้ดรอร์บีดจะต้องมีการปรับขนาด แผ่นตัดเปล่าให้โตขึ้น เพิ่มแรงกดขึ้นงาน และเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสม [4]

ทวีภัทร บุรณิทธิ,ทัศนชัย ผ่องผาย การขึ้นรูปโลหะแผ่นในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มักเกิดปัญหาการเกิดรอยย่น การฉีกขาด และการสปริงตัวกลับ ทั้งนี้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีการกำหนดค่าตัวแปรกระบวนการผลิตต่างๆ ที่สำคัญเช่น แรงกดของตัวประสานหรือแรงจับยึดแบลงค์ ตำแหน่งของดรอร์บีด และขนาดรูปร่างของแบลงค์ เป็นต้นงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะแผ่นของชิ้นส่วนขวางยึดเครื่องยนต์มาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกดของตัวประสานและตำแหน่งดรอร์บีดแบบต่างๆ ต่อการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีต่อการฉีกขาดและการเกิดรอยย่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบหลัก แผ่นโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เหล็กกล้า JSC440W ที่มีความหนาเริ่มต้น 1 มม. ความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นส่วนนี้ถูกพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญทางด้านความไม่เสถียรทางพลาสติกของแต่ละชนิดโลหะแผ่น ผลจากการศึกษาพบว่าดรอร์บีดสามารถควบคุมการไหลของวัสดุได้ดีกว่าการใช้แรงกดของตัวประสานเพียงอย่างเดียว การเลือกตำแหน่งดรอร์บีดมีความสำคัญ โดยการวางแนวดรอร์บีดอย่างสม่าเสมอนั้นไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปสำหรับกรณีศึกษานี้การใช้ดรอร์บีดแบบ 6 ช่วงตำแหน่งจะสามารถช่วยในการลดปัญหาทั้งการฉีกขาดและรอยย่นได้ดีในกรณีศึกษานี้ [5]

F. Mehmet [6] ได้วิเคราะห์ลักษณะการไหลตัวของโลหะแผ่นในกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยลูก โดยการใช้ดรอปิส ว่าเกิดขึ้นในลักษณะใด และส่งต่อการขึ้นรูปมากน้อยเพียงใด พบว่า การนำดรอร์บีดมาใช้สามารถช่วยให้การไหลของโลหะได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน

M. Samuel [7] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอร์บิสที่ส่งผลต่อการลากขึ้นรูปด้วยลูกโลหะแผ่น ได้พบว่ารูปทรงของดรอร์บีดมีอิทธิพลสูงมากกับการไหลตัวของแผ่นโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปทรงที่มีความโค้งมนจะสามารถพาโลหะไหลได้ดีกว่ารูปทรงเหลี่ยม

H. Naceur [8] ได้หาความเหมาะสมในการออกแบบดรอร์บิสในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยการใช้วิธีการ Inverse Approach (IA) ซึ่งจะทำให้การ Restraining Force ไว้ เพื่อการออกแบบดรอร์บิส

Y. Ghoo [9] ได้นำวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มากใช้ในการออกแบบดรอร์บิสรูปทรงกลมลำดับขั้น และสี่เหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์การไหลตัวและลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นของแผ่นโลหะ

R. Li [10] ได้ศึกษาความเหมาะสมของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น AA 6111-T4 โดยการใช้ดรอร์บิส ทำการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นกับแผ่นโลหะ พบว่าการเพิ่มความสูงตั้งฉากกับแผ่น

โลหะจาก 0-5 มม. สามารถเพิ่มการไหลตัวได้ดี ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างความลึกลับกับแรงกดเหยียบ (Blankholder Force)

Y.Y.Yang [11] ได้ทำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ แบบ Elasto-Plastic ของกระบวนการ Drawbead drawing โดยทำการออกแบบดรอว์บิสรูปทรงกลม และ สี่เหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์แรงกดขึ้นรูป จากอิทธิพลของรูปทรงดรอว์บิส พบว่าการจำลองให้ผลลัพธ์ถูกต้องกับการทดลองอย่างดีเยี่ยม

J.A.Schey [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วต่อดรอว์บิส โดยการจำลอง ด้วยความเร็วช่วง 5 ถึง 240 mm/s ผสมกับน้ำมันพื้นที่ 4.5 ถึง 285 mm<sup>2</sup> เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น และการขึ้นรูป

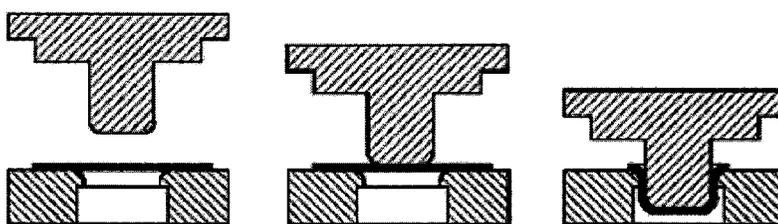
เป็นต้น แต่งานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการออกแบบดรอว์บิสและทำมาจากวัสดุโลหะทั้งสิ้น ซึ่งผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าการใช้ดรอว์บิสช่วยในการควบคุมการไหลตัวของชิ้นงานนั้น ยังขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงาน รูปร่างของดรอว์บิสเอง ซึ่งงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของดรอว์บิสที่ทำมาจากยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR) และยางสังเคราะห์ ที่ผ่านการเสริมแรงด้วยแผ่นโลหะ เปรียบเทียบกับดรอว์บิสโลหะ เพื่อวิเคราะห์การไหลตัว และแรงลากขึ้นรูปของโลหะแผ่นต่างชนิดกันในกระบวนการลากขึ้นรูปถ้วยลึก

## 2.3 ทฤษฎีที่สำคัญ

### 2.3.1 ทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปลึก

การขึ้นรูปลึกโดยใช้ แม่พิมพ์ (Die) การดึงขึ้นรูปโดยใช้สื่อแรงดัน (Pressure medium) การดึงขึ้นรูปโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Energy activation) การแบ่งแม่พิมพ์ตามโครงสร้างของแม่พิมพ์ ลากขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังต่อไปนี้

- 1) แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แม่พิมพ์แบบจันทะเดียวไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [13]

แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และปราศจากรอยย่นที่ชิ้นงาน ถ้าความต้านทานการโค้งตัวของโลหะแผ่นต้านความเค้นแรงกดที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีได้สูงพอ สิ่งนี้จะ เป็นจริงได้เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นงานต่อความหนา คือ  $d_0$  ต่อ  $s_0$  มีค่า 25 ถึง 40 ค่าน้อยที่สุดเป็นค่าสามารถใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta$  ค่ามากได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 [13]

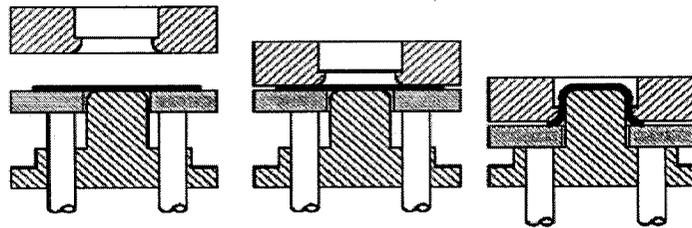
$$\frac{d_0}{s_0} \text{ มีค่าอยู่ระหว่าง 25 ถึง 40} \quad (2.1)$$

$$d_0 = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)}$$

$$s_0 = \text{ความหนาของชิ้นงาน (mm)}$$

การขึ้นรูปโดยไม่มีแผ่นจับยึดงานเป็นการใช้เครื่องมือที่มีโครงสร้างแบบง่าย ๆ เนื่องจากไม่มี ความเสียดทานที่เกิดจากแผ่นจับยึดงานจึงทำให้แรงในการขึ้นรูปลดลง และขอบเขตของอัตราส่วน  $\beta$  อาจเพิ่มขึ้น สิ่งจำเป็นสำหรับการขึ้นรูปของแม่พิมพ์จิงหะเดียวเมื่อใช้แม่พิมพ์ที่ไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ตายมีรูปทรงเรขาคณิตลักษณะพิเศษแต่ในการขึ้นรูปที่อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta$  น้อยสามารถทำได้ดีกว่าที่ขอบของแผ่นงานจะถูกยกตัวขึ้น

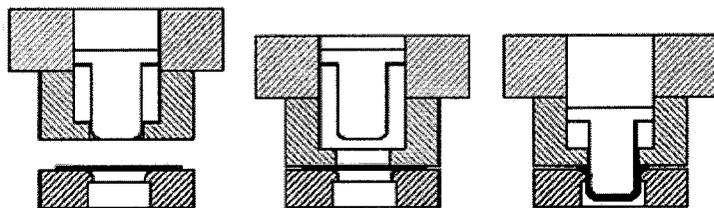
2) แม่พิมพ์จิงหะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แม่พิมพ์แบบจิงหะเดียวมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน [13]

แผ่นจับยึดชิ้นงานจะทำควบคู่กันกับตายคู่ชิ้นแทนเครื่องปั๊ม ดังนั้นเมื่อพินซ์ถูกยึดกับแท่นเครื่องและตายถูกยึดติดกับส่วนปืนตัวสไลด์เครื่องที่ด้านบนของแม่พิมพ์ในตำแหน่งแรงของแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตอนเริ่มต้น ขึ้นรูป แผ่นชิ้นงานและตายสามารถจะใส่เข้าไปในตาย ได้ในตอนเริ่มต้นของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานและตายจะเป็นตัวไปกดแผ่นชิ้นงาน เมื่อสไลด์ส่วนบนเครื่องที่ลงมาตายคู่ชิ้นจะส่งแรงด้านข้างผ่านสลักนำ ไปดันที่นำไปดันที่แผ่นจับชิ้นงาน ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นแรงในการขึ้นรูปมีแรงต่างกัน คือ แรงกดระหว่างพินซ์และแผ่นจับยึดชิ้นงาน

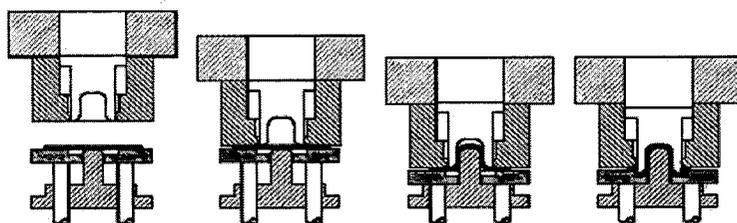
3) แม่พิมพ์สองจิงหะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แม่พิมพ์แบบสองจิงหะมีตัวสไลด์แผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่ [13]

จากรูปที่ 2.3 แผ่นจับยึดชิ้นงานเป็นส่วนหนึ่งของตัวสไลด์ส่วนเคลื่อนที่ด้านบนทิศทางการทำงานของแผ่นจับยึดชิ้นงานจะไปในทิศทางเดียวกันกับตัวสไลด์พื้นซ์ของเครื่องปั๊มตายของแม่พิมพ์จะยึดติดแน่นกับแท่นของเครื่องปั๊ม การใส่แผ่นชิ้นงานลงไปในตายจะกระทำในขณะที่พื้นซ์และแผ่นจับยึดชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งบนในขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นจับยึดชิ้นงานจะกดลงบนแผ่นชิ้นงานและ ในขั้นที่สอง พื้นซ์จะเคลื่อนตัวลงมาทำการขึ้นรูปต่อไป

4) แม่พิมพ์สามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวตายคู่ชั้น (Die cushion) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แม่พิมพ์แบบสามจังหวะมีแผ่นจับยึดชิ้นงานเคลื่อนที่และตัวตายคู่ชั้น [13]

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแม่พิมพ์สองจังหวะ ที่มีตัวสไลด์แผ่นยึดชิ้นงานเคลื่อนที่กับแม่พิมพ์สามจังหวะที่มีตายคู่ชั้นเพิ่มขึ้นมา จากรูปที่ 2.4 เมื่อเราใส่แผ่นชิ้นงานเข้าไปในตายแล้วพื้นซ์และแผ่นจับยึดชิ้นงานรวมทั้งตายคู่ชั้นจะอยู่ในตำแหน่งบนของแม่พิมพ์ ขั้นตอนแรกของการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นจับยึดชิ้นงานกับตายคู่ชั้นในตำแหน่งนี้แม่พิมพ์ส่วนจะเคลื่อนที่ลงมาและเริ่มต้นการขึ้นรูปด้วยพื้นซ์ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่แท่นเครื่องในจังหวะที่สองตัวสไลด์ของเครื่องปั๊มที่อยู่ด้านบนจะเคลื่อนตัวลงมา และทำการขึ้นรูปลึกลงซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ชนิดนี้จะเป็นการขึ้นรูปแบบดึงขึ้นรูปครั้งแรกและดึงขึ้นรูปกลับทางอยู่ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งแรงในการดึงขึ้นรูปเป็นผลของแรงที่ต่างกันระหว่างพื้นซ์และแผ่นจับยึดชิ้นงาน [10]

### 2.3.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการดึงขึ้นรูป

#### 1) แรงในการดึงขึ้นรูป (Punch force)

แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปจะแปรผันไปตามระยะชักของพื้นซ์ สามารถจะกำหนดได้ 2 วิธี คือ การกำหนดสมการจากทฤษฎีการไหลตัวของโลหะ หรือใช้สมการที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลอง ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทราบค่าแรงสูงสุดในการดึงขึ้นรูปจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแรงในการดึงขึ้นรูปที่แสดงถึงแรงสูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและอัตราส่วนการขึ้นรูป ซึ่งจะได้ค่าของ  $d_{F,max} \approx 0.07d_0$  การประมาณการหาแรงในการดึงขึ้นรูปสูงสุดที่ดีแสดงในสมการที่ 2.2 โดยแรงสูงสุดสามารถกำหนดจากประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_m$  ในสมการหมายถึงค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางในถึงเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน  $d_m = d_1 + s_0$  โดย  $\eta_{dfe}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 [14] และประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงไม่สมมาตรดังแสดงในสมการที่ 2.3 [15]

$$F_d = \pi \times d_m \times s_0 \left[ 1.1 \frac{1.3 \times s_u}{\eta_{dfe}} \left[ \ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right] \right] \quad (2.2)$$

$$F_d = \frac{s_y + s_u}{2} \times L_t \times s_0 \quad (2.3)$$

$F_d$	= แรงขึ้นรูป (kN)
$d_m$	= ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางในถึงเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของชิ้นงาน (mm)
$s_0$	= ความหนาของชิ้นงาน (mm)
$s_u$	= ความเค้นสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )
$\eta_{dfe}$	= ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปของโลหะ
$d_0$	= เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)
$d_1$	= ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพินซ์ (mm)
$s_y$	= ความเค้นจุดคราก (N/mm <sup>2</sup> )
$L_t$	= ความยาวรอบรูปทั้งหมด (mm)

## 2) แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blankholder pressure)

ขอบปึกของชิ้นงานที่ดึงขึ้นรูปจะได้รับความเค้นแรงกด ซึ่งเกิดในลักษณะตั้งฉากกับแนวรัศมีเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร่นเนื่องจากการโก่งตัวของวัสดุ รอยร่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน  $P_{BH}$  จะไปกดลงบนแผ่นขอบปึกชิ้นงานขณะทำการดึงขึ้นรูป ถ้าพื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน คือ  $A_{BH}$  ดังนั้นการคำนวณค่าแรงกดที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานดังแสดงในสมการที่ 2.4 [15]

$$F_{BH} = A_{BH} \times P_{BH} \quad (2.4)$$

$F_{BH}$	= แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน (N)
$P_{BH}$	= พื้นที่สัมผัสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน (N/mm <sup>2</sup> )
$A_{BH}$	= แรงกดตันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด (mm <sup>2</sup> )

แรงกดที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงรอยร่นนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุของแผ่นชิ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนาและอัตราส่วนการขึ้นรูปของวัสดุ แรงกดของแผ่นจับยึดชิ้นงานสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการที่ 2.5 ในที่นี้ตัวประกอบค่า C มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เป็นการคำนวณหาค่าแรงกดดังแสดงในสมการที่ 2.4 โดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป  $\beta = 2.0$  และใช้วัสดุที่มีค่า (Ultimate Tensile Strength)  $s_u = 100, 200, 400$  และ  $600$  N/mm<sup>2</sup> ถูกพล็อตขึ้นมาเป็นกราฟโดยสัมพันธ์กันกับค่าความหนาของวัสดุ  $s_0 / d_0$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [15]

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

$P_{BH}$  = แรงกดตันที่ใช้กับแผ่นจับยึดชิ้นงานต่ำที่สุด (N/mm<sup>2</sup>)

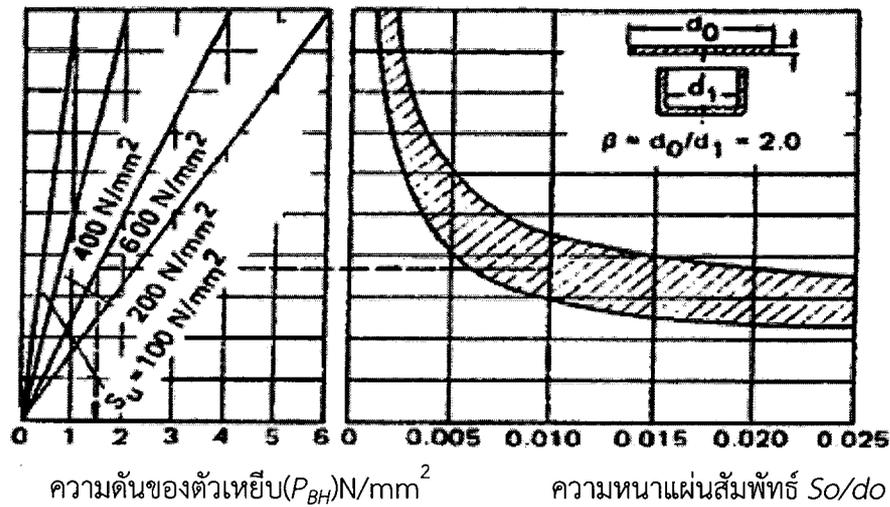
$C$  = ค่าคงที่

$s_u$  = ความเค้นสูงสุด (N/mm<sup>2</sup>)

$\beta$  = อัตราส่วนการลดรูป

$d_0$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแผ่นชิ้นงาน (mm)

$s_0$  = ความหนาของชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 2.5 ค่าแรงกดตันของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ต้องการในการดึงขึ้นรูปครั้งแรก [15]

### 3) ระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ (Die Clearance)

ในทางปฏิบัติเพื่อกำหนดระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มักจะกำหนด โดยรูปสมการที่ได้มาจากการทดลอง สมการเหล่านี้อนุญาตให้ใช้ได้แต่เพียงการดึงขึ้นรูปลึกที่มีชิ้นงานเป็นรูปร่างกลมโดยไม่มีกริดของเนื้องาน (Ironing) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ถึง 2.9

$$u_D = S_0 + 0.07 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นเหล็ก} \quad (2.6)$$

$$u_D = S_0 + 0.02 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับแผ่นอลูมิเนียม} \quad (2.7)$$

$$u_D = S_0 + 0.04 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กอื่นๆ} \quad (2.8)$$

$$u_D = S_0 + 0.02 \sqrt{10 S_0} \quad \text{สำหรับโลหะผสมอลูมิเนียมสูง} \quad (2.9)$$

ถ้าระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์ ( $u_D$ ) มีขนาดใหญ่เกินไป ชิ้นงานไม่สามารถที่จะขึ้นรูปเป็นขนาดของจริงของทรงกระบอกได้ เนื่องจากขอบบนของรูปถ้วยมีขนาดที่แผ่ขยายออกถ้าระยะเผื่อช่องว่างของแม่พิมพ์มีขนาดเล็กเกินไป การกดรีดโลหะ (Ironing) ก็จะเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปมากขึ้น และเพิ่มอันตรายจากการแตกของชิ้นงาน ยิ่งกว่านั้นอาจจะมีการรอยเชื่อม

เย็น (Cold welding) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างตายกับชิ้นงาน ปัญหาสำคัญในการเล็กระยะเมื่อช่องว่างสำหรับตายที่มีสาเหตุมาจากความแปรผันในความหนาของโลหะแผ่นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์กับพอกัดความเผื่อของความหนาเป็นอย่างมาก มันอาจจะทำให้บางส่วนแตกได้ในที่ที่ตรอยอื่น ๆ ขึ้น เมื่อตั้งขึ้นรูปด้วยระยะช่องว่างของตายที่มีขนาดเหมาะสมกับขนาดความหนาของแผ่นงานตามความเป็นจริง ถ้าความหนาของแผ่นงานนั้นเริ่มสูงขึ้นใกล้ขีดจำกัดพิบัติความเผื่อสูงสุด และ ช่องว่างตายที่มีขนาดเล็กเกินไปจะเกิดการรูดตัวของของโลหะขึ้น ซึ่งทำให้ความเป็นไปได้ของการแตกที่ชิ้นงานมีมากขึ้น ถ้าความหนาชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงขีดจำกัดพิบัติความเผื่อค่าต่ำสุดแล้วค่าระยะช่องว่างตายมีขนาดใหญ่เกินไปรอยย่นเป็นจิบก็จะก่อตัวขึ้น

การทำชิ้นงานที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ควรใช้ระยะช่องว่างของตายบริเวณที่มุมมากกว่าบริเวณผนังด้านข้างของชิ้นงาน เพราะว่าบริเวณมุมจะมีการไหลตัวของ เนื้องานอยู่ในวงจำกัด สำหรับการตั้งขึ้นรูปลึกลงกับความหนาที่ผนังของชิ้นงานที่ต้องการลดขนาด (Ironing) ระยะช่องว่างของตายจะมีขนาดเล็กกว่าความหนาของแผ่นงาน [11]

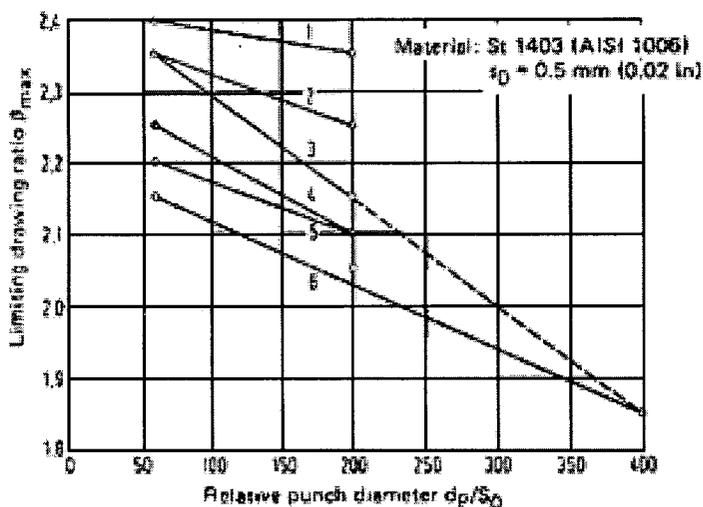
#### 4) ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูป

การกำหนดค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เรียกว่า  $\beta_{\max}$  มันเป็นค่าของการตั้งขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ และขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงาน  $d_0$  และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่  $d_1$  ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\beta_{\max} = \left[ \frac{d_0}{d_1} \right]_{\max} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \beta_{\max} &= \text{ขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุ} \\ d_0 &= \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน (mm)} \\ d_1 &= \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ (mm)} \end{aligned}$$

ค่านี้เป็นค่าที่มีผลกระทบตามค่าตัวแปรหลายตัว สิ่งหนึ่งที่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนความหนากับเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นงานที่มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่  $d_p/s_0$  โดยปกติค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  จะสูงขึ้นถ้าค่าความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่  $d_p/s_0$  มีค่าต่ำลง ดังนั้นการปฏิบัติงานในระบบของการหล่อขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด  $\beta_{\max}$  ด้วย ดังนั้นค่าความเสียหายที่ตายและแผ่นจับยึดชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง แต่สัมพันธ์กับความเสียหายที่พื้นที่มีค่ามากขึ้น จึงสามารถใช้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [11] และตารางที่ 2.1 [4]



รูปที่ 2.6 อัตราส่วนการขึ้นรูป [15]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนการขึ้นรูปสูงสุด [4]

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

### 2.3.3 สารหล่อลื่นในงานดึงขึ้นรูปลึก

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำชิ้นงาน สภาพผิวของวัสดุ รวมทั้งสภาพผิวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ด้วย สารหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปกับงานดึงขึ้นรูปลึก สารที่เป็นตัวผสม ตัวอย่าง เช่น กราไฟต์ ซิงค์ไฟต์ ปูนขาว ซอลก์ ฮาโลเจน และสารประกอบของฟอสฟอรัส หรือเป็นตะกั่วออกไซด์ขาว สารหล่อลื่นที่กล่าวมาถูกใช้ผสมกับน้ำมันเครื่อง เพื่อเป็นส่วนช่วยให้สารเหล่านั้นรวมตัวกันได้เมื่ออยู่ภายใต้แรงกดดันสูง สารหล่อลื่นที่อยู่ในรูปของแข็ง (Solid lubrication) ได้แก่ สารสบู่ (Metal soap) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และ กราไฟต์เหลว (Colloidal graphite) ได้ถูกใช้ในงานดึงขึ้นรูปลึกด้วย สารดังกล่าวมานี้สามารถที่จะปกป้องการสัมผัสโดยตรงระหว่างดาบกับแผ่นชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุจำพวก ออสเทนไนติก ตัวอย่าง เช่น [X 5 CrNi18 9(AISI 304 SS)] สามารถที่จะใช้กระบวนการดึงขึ้นรูปได้โดยปราศจากรอยขีดข่วน เมื่อแม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็กแม่พิมพ์ 210 Cr (AISI D3) เพียงแต่ใช้สารสบู่ (Metal soap) หล่อลื่นเท่านั้น ผิวงานสำเร็จจากการตรวจวัดพิสัยจนแล้วว่า อนุภาคองค์ประกอบที่ผิวของชิ้นงานรูปถ้วยที่ได้ผ่านการดึงขึ้นรูปด้วยสารหล่อลื่นแคดเมียมสเตียเรท (Cadmium stearate) ที่บนแผ่นชิ้นงานชี้ให้เห็นว่าไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างแผ่นงานกับดาบ เมื่อวัสดุที่ใช้กับงานดึงขึ้นรูปแล้วยังปรากฏว่ามีการขึ้นรูปได้ยากลำบาก เช่น การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม หรือขึ้นรูปถ้วยลึก ดังนั้นอาจจำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นช่วย เช่น การเคลือบด้วยฟอสเฟต (Phosphate

coating) ในการเพิ่มการหล่อลื่นของตัวเองเพื่อจะป้องกันการเกิดล้า (Fretting) ส่วนประกอบของการขึ้นรูปกับชิ้นงานที่มีรัศมีด้านล่างขนาดใหญ่มากนั้นจะต้องการสารหล่อลื่นที่จะช่วยคงรูปความหนาไว้ มิฉะนั้นมันอาจจะทำให้ชิ้นงานที่จะขึ้นรูปได้ไม่สม่ำเสมอ ในการดึงขึ้นรูปแผ่นพอลิที่มาจากพลาสติก (PVC, PTFE) สามารถทำให้สำเร็จในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นรูปร่างส่วนประกอบแบบง่ายๆ ของวัสดุที่มีความเหนียวแน่น บางครั้งใช้แผ่นงานที่ทำจาก (Stainless-steel) และเคลือบด้วยพลาสติกฟิล์ม ซึ่งอาจจะเป็นการจุ่ม หรือ การสเปรย์ ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปที่มีค่ามากสามารถใช้ได้ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างรัศมีพื้นที่กับแผ่นงานมีอัตราสูงขึ้น (จากพื้นที่ผิวหยาบ และ พื้นที่บริเวณนี้ไม่มีสารหล่อลื่น) และแรงเสียดทานระหว่างแผ่นงานกับด้ามมีอัตราต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [15]

ตารางที่ 2.2 สารหล่อลื่นที่ใช้กับการดึงขึ้นรูปเหล็ก [15]

วัสดุและโลหะผสม	ขึ้นรูปเย็น	ขึ้นรูปร้อน
อลูมิเนียม	สารละลายสังเคราะห์ MO + FO, E, L ซัสเพนชัน, Wa ซัสเพนชัน, สารละลายของ S	G ซัสเพนชัน (สารแขวนลอย)
ทองแดง	E+FO, MO+FO, S ซัสเพนชัน, Wa ซัสเพนชัน, T ซัสเพนชันและสารละลายสังเคราะห์	ผงสีผสมน้ำมัน (Pigmented pastes) G ซัสเพนชัน
แมกนีเซียม	สารละลาย+FC, MO+FC	G+MoS <sub>2</sub> , S+Wa, T+G
นิกเกิล	E, MO + EP, CI Wa . CC + S	G ซัสเพนชัน MoS <sub>2</sub> ซัสเพนชัน, การเคลือบเรซิน กับ + Sa
โลหะทนไฟ	แผ่นทองแดง	MoS <sub>2</sub> , G ซัสเพนชัน
เหล็กผสมคาร์บอน, โลหะผสมต่ำ	E, S เหลว, Wa , FO + Mo, P, CC + S, MoS <sub>2</sub> หรือ G ในจารบี, สารละลายสังเคราะห์	G ซัสเพนชัน
สแตนเลส	FO + MO, Wa, P, MO + EP,	G ซัสเพนชัน

### 2.3.4 ข้อบกพร่องในระหว่างการขึ้นรูป

การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming) ที่มาจากการผลิตโดยวิธีการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) ในรูปแบบการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) มักจะเกิดความเสียหายแบบการคอคอด (Necking) การฉีกขาด (Tearing) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) และเกิดการสปริงตัวกลับ (Spring back) อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำให้การผลิตขึ้นรูปเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วเมื่อแม่พิมพ์ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบกระบวนการปั๊มขึ้นรูปที่ปราศจากความเสียหายจากกรณีดังกล่าว การเกิดรอยย่นและการฉีกขาด จากการปั๊มขึ้นรูปนั้นมักเป็นปัญหาหลักที่ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกก่อน จากนั้นจึงพิจารณาผลกระทบจากการเกิดสปริงตัวกลับ [5]

ปัญหาหลักที่พบในการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือการแตก การโก่ง (Buckling) และการย่น การเสียรูป (Shape distortion) โลหะหย่อน (Loose metal) และเนื้อผิวเสีย (Undesirable surface textures) เกิดขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโลหะแผ่นนั้นใช้ไม่ได้ผลของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [4]

#### 1) การแตก (Cracking)

เกิดขึ้นเมื่อแผ่นแบลنگ์โลหะได้รับแรงจากการดึงยึดขึ้นรูปหรือแรงเฉือนจากการดรอว์มากเกินไปจนขีดจำกัดความเสียหายของวัสดุ ตามสภาพความเครียดที่พึงจะรับได้ อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ในการดึงยึดเริ่มต้นแผ่นโลหะจะบางลงอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ทั่วไป เมื่อไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปมากทำให้เกิดแถบที่บางเฉพาะแห่งที่เรียกว่าการคอด ซึ่งสุดท้ายทำให้แผ่นโลหะแตก การเกิดรอยคอดโดยทั่วไปถือว่าเป็นความเสียหาย เพราะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่มองเห็นได้และทำให้โครงสร้างอ่อนแอ การแตกจากการเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการลดความหนามาก่อน ตัวอย่างทั่วไปของการแตกลักษณะนี้ก็คือการตัดซอย (Slitting) การแบลنگ์ (Blanking) และการทริม (Trimming) ในการปฏิบัติงานแผ่นโลหะจะถูกเฉือนโดยขอบคมมีดที่ใช้แรงกดในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นโลหะจะทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเสียหายจากการดึงยึดขึ้นรูป

#### 2) การโก่งและการย่น (Buckling and Wrinkling)

ในการขึ้นรูปด้วยพื้นที่กดอัดบนแผ่นแบลنگ์โลหะจะทำให้แผ่นโลหะยึดและดึงผ่านแหวนจับยึดของแผ่นแบลنگ์บริเวณขอบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงทำให้เกิดความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ถ้าความเค้นนี้มีค่าถึงระดับวิกฤติของวัสดุและความหนาจะทำให้เกิดเป็นคลื่นเล็กน้อยซึ่งเรียกว่าการโก่ง การโก่งอาจจะพัฒนาเป็นคลื่นที่มองเห็นได้ชัดเจนจำนวนมากต่อเนื่องกันเรียกว่ารอยย่น ถ้าแรงจับยึดแผ่นแบลنگ์ไม่สูงพอสามารถทำให้เกิดรอยย่นที่ตำแหน่งอื่นๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดกระทันหันและบริเวณที่ไม่มีโลหะไหลเข้ามาหรือสัมผัสเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้ามีรอยย่นมากผิดปกติโลหะอาจพับทบกันสองถึงสามชั้นซึ่งอาจทำให้บริเวณอื่นแตกได้เพราะโลหะไม่สามารถไหลตามปกติได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงจับยึดแผ่นแบลنگ์จึงใช้แก้ปัญหาการแตกได้

#### 3) การเสียรูป (Shape distortion)

โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงยึดหยุ่นและช่วงพลาสติกด้วยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่อเอาแรงภายนอกออกความเค้นยึดหยุ่นภายในมีการคลายตัว บางแห่งที่มีการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ก็ทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในบริเวณที่ได้รับการดัด (Bending) มีการกระจายความเค้นยึดหยุ่นตลอดความหนา นั่นคือความเค้นที่ผิวด้านนอกแตกต่างจากความเค้นด้านใน ถ้ารูปทรงของชิ้นงานไม่สามารถบังคับความเค้นเหล่านี้ไว้ได้ การคลายตัวจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปซึ่งเรียกว่าการเสียรูปหรือการดีดกลับ (springback) การดีดกลับสามารถชดเชยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับสมบัติวัสดุ แต่อาจจะยังคงมีปัญหาหากถ้าแผ่นแบลنگ์แต่ละแผ่นมีสมบัติของวัสดุหรือกรรมวิธีเปลี่ยนแปลง

#### 4) โลหะหย่อน (Loose metal)

เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีมีการเปลี่ยนรูปและไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะมีการเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าออยล์คานนิ่ง (Oil canning) ซึ่งอาจมีบางแห่งยุบหรือนูนจากปกติ ในการดัดดอเป็นมุมแหลมตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปอย่างทันทีในทิศทางเดียวกันเช่น การดัดเป็นลอน

แหลมๆ มีแนวโน้มที่จะทำให้โลหะระหว่างลอนมีการหย่อนเพราะการดึงโลหะข้ามลอนเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก บางครั้งอาจหลีกเลี่ยงปัญหาได้โดยไม่ให้โลหะสัมผัสรอยनुทั้ง 2 รอยในเวลาเดียวกันดังนั้นการยึดเกิดขึ้นก่อนสัมผัสรอยที่สอง โลหะหย่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ในบริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างแบนเรียบหรือมีความโค้งเล็กน้อย การเพิ่มแรงเพื่อควบคุมรอบๆขอบแผ่นแบลงก์ทำให้ปัญหานี้ดีขึ้น

#### 5) เนื้อผิวเสีย (Undesirable surface textures)

โลหะแผ่นที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโลหะมีเกรนหยาบมักจะทำให้เนื้อผิวโลหะไม่เรียบซึ่งเรียกว่าผิวส้ม (Orange peel) ปกติจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่มองเห็นได้ในขณะใช้งาน ปัญหาของผิวที่เกิดขึ้นบนโลหะอีกอย่างหนึ่งก็คือการยึดที่จุดคราก นั่นคือวัสดุยึดตัวออกอีกหลายเปอร์เซ็นต์หลังการครากโดยไม่ต้องเพิ่มแรงกระทำ การเปลี่ยนรูปร่างที่ระดับความเครียดต่ำในโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นมากในลักษณะที่เป็นแถบไม่สม่ำเสมอบนผิวโลหะเรียกว่าเส้นลือเตอร์ (Lueders line) หรือริ้วคราก (Stretcher strains) ความบกพร่องนี้จะหายไปเมื่อมีระดับความเครียดปานกลางและสูง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเกือบทุกชิ้นมีบางบริเวณที่มีระดับความเครียดต่ำ ความบกพร่องนี้ไม่สามารถปกปิดด้วยการพ่นสี เหล็กกล้าผิวบริสุทธิ์ที่ผ่านการบ่ม อะลูมิเนียมและแมกนีเซียมเจือบางชนิดเกิดเส้นลือเตอร์อย่างชัดเจน [4]

### 2.3.5 ชนิดของเหล็กแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูป

เหล็กแผ่นรีดเย็นเป็นโลหะที่ใช้มากในการอัดโลหะ เนื่องจากเหล็กแผ่นชนิดนี้จะถูกรีดเป็นแผ่น ณ อุณหภูมิห้องจึงได้ผิวเรียบและละเอียด นิยมใช้ทำตัวถังส่วนนอกรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องเขียน หรือชิ้นส่วนของเครื่องใช้ที่ต้องการความสวยงาม JIS (Japanese Industrial Standard) ได้กำหนดชนิดของเหล็กแผ่น 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 sheets and strip) ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น (Commercial quality) ใช้สำหรับงานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีเกรดอื่นอีก เช่น SPCD ซึ่งเป็น (Drawing quality) ใช้สำหรับงานขึ้นรูป และ SPCE (Deep draw quality) สำหรับงานขึ้นรูปลึก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [13]

ตารางที่ 2.3 เหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) มาตรฐาน [16]

ชนิด	ส่วนผสม					การใช้งาน
	C	Si	Mn	P	S	
SPCC	<0.12	-	<0.05	<0.040	<0.045	ใช้อัดโลหะทั่วไป
SPCD	<0.10	-	<0.45	<0.035	<0.035	ใช้อัดขึ้นรูป
SPCE	<0.18	-	<0.40	<0.030	<0.030	ใช้อัดขึ้นรูปลึก

ตารางที่ 2.4 เหล็กรีดเย็น (มาตรฐาน JIS) สมบัติทางกล [16]

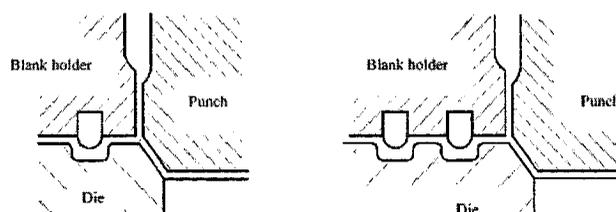
Symbol of quality	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation %						Tensile test piece
	Discrimination according to nominal thickness(mm)							
	0.25 or over	0.25 to 0.4	0.40 to 0.6	0.60 to 1	1.0 to 1.6	1.6 to a 2.5	2.50 or over	
SPCC	270	32	34	36	37	36	36	No.5,in
SPCD	270	34	36	38	39	40	40	rolling
SPCE	270	36	38	40	40	42	42	direction

### 2.3.6 ดรอร์บีด (Draw bead)

การควบคุมแรงกดแบลنگ์ไฮดรอลิกที่ไม่พอเพียง จะทำให้เกิดรอยย่นของโลหะ ซึ่งการย่นนี้จะให้โลหะแผ่นไม่สามารถที่จะไหลตัวได้ ทำให้บริเวณส่วนกันของชิ้นงานถูกพันซ์ตันฉีกขาดแต่ถ้าแรงกดของแบลنگ์ไฮดรอลิกมากเกินไป โลหะก็จะไม่สามารถไหลตัวเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำให้อัตราการไหลของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้แรงที่ใช้ในการกดแต่ละจุดไม่เท่ากันด้วย สำหรับบริเวณที่ต้องการแรงกดมากจะใช้ดรอร์บีดเข้ามาช่วยเพื่อทำให้การไหลตัวของโลหะช้าลง [2]

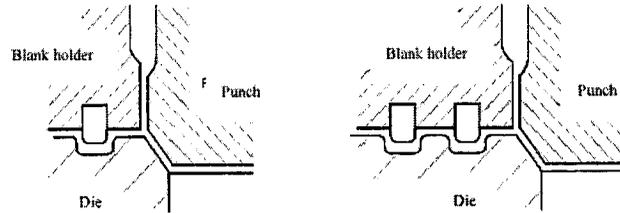
ดรอร์บีดมีหน้าที่ควบคุมการไหลตัวของโลหะที่จะไหลเข้าไปในตาย และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยย่น (Wrinkle) ในขณะที่ขึ้นรูปนอกจากนี้ยังช่วยลดแรงกดของแบลنگ์ไฮดรอลิกและตัวรีดโลหะให้ความเครียดลดลงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปของโลหะ การติดตั้งดรอร์บีดสามารถติดตั้งที่ของแบลنگ์ไฮดรอลิกหรือที่ตายก็ได้แต่ปกตินิยมติดตั้งอยู่ที่ของแบลنگ์ไฮดรอลิก และร่องบีด (Bead) จะอยู่ที่ตาย [1]

1) ปลายโค้งมน (Round Bead) ปลายโค้งมนมีทั้งแบบเดี่ยว (Single bead) ใช้กับการขึ้นรูปโดยทั่วไปที่ต้องการควบคุมอัตราการไหลตัวของโลหะในขณะที่ขึ้นรูป และแบบคู่ (Double bead) ใช้ในกรณีที่ Single bead ไม่สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [1]



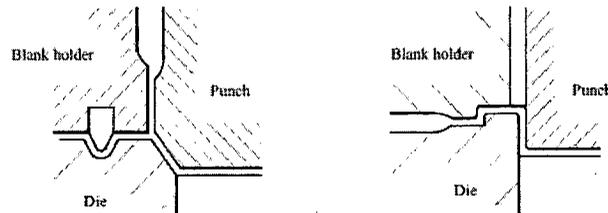
รูปที่ 2.7 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

2) แบบสี่เหลี่ยม (Square bead) สามารถควบคุมการไหลของโลหะได้มากกว่า (Double type) และแบบคู่ (Double bead) ควบคุมอัตราการไหลของโลหะได้ดีกว่า 3 แบบที่กล่าวมา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (ก) แบบเดี่ยว (Single bead) (ข) แบบคู่ (Double bead) [1]

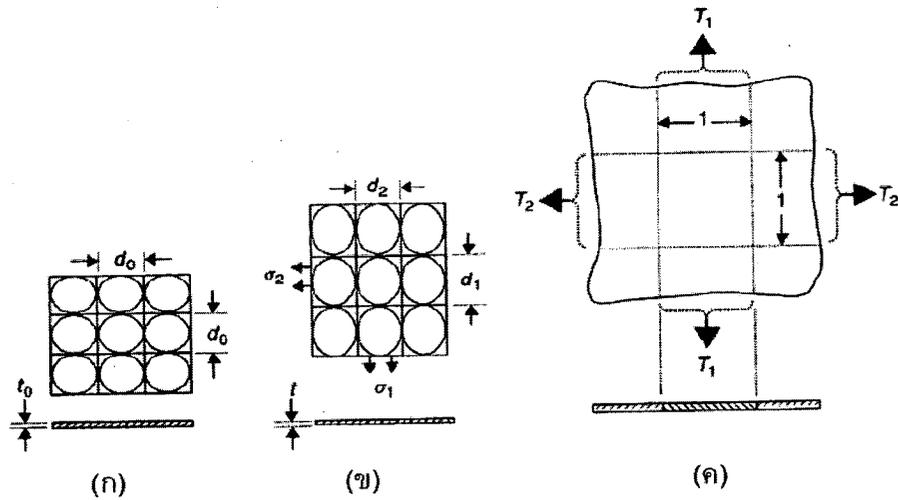
3) แบบสามเหลี่ยม (Three angle bead) จากรูปที่ 2.11 (ก) และแบบไม่ไหลตัว (Lock bead) (ข) ใช้ในการขึ้นรูปที่ไม่ต้องการให้โลหะเกิดการไหลตัวในระหว่างการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 (ก) สามเหลี่ยม (Three angle bead) (ข) แบบไม่ไหลตัว (Lock bead) [1]

### 2.3.7 การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น

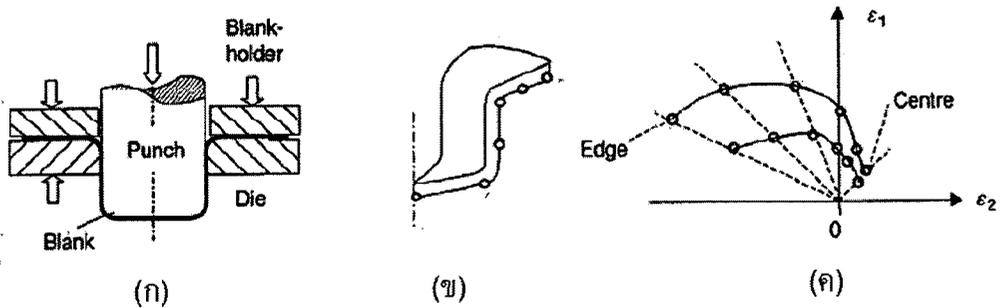
ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening) ของวัสดุ ซึ่งเขากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูป ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา  $t_0$  ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_0$  หรือตารางขนาด  $d_0$  (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนหลัก (Major) คือ  $d_1$  แกนรอง (Minor) คือ  $d_2$  ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) ส่วนความหนา คือ  $t$  ตามที่กรณี (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กรณีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกริด [14]

2.3.8 แผนภาพความเครียด (Strain diagram)

ความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น สามารถวัดได้จากกริดวงกลม แผนภาพความเครียด ตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก การขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ชั้นส่วนย่อยของถ้วยทรงกระบอก แสดงค่าความเครียดที่วัดได้ ผลค่าความเครียดที่ได้จากการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [17]



รูปที่ 2.11 แผนภาพความเครียดตำแหน่งต่างๆ ของถ้วยทรงกระบอก [17]

1) ค่าความเครียดหลัก (Principal strains)

ความเครียดหลักที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการ

$$\epsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} ; \quad \epsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} ; \quad \epsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \tag{2.15}$$

$\epsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก

$\epsilon_2$  = ค่าความเครียดตรง

- $\varepsilon_3$  = ค่าความเครียดที่ความหนา  
 $d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริด  
 $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก  
 $d_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนรอง  
 $t$  = ค่าความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง  
 $t_0$  = ค่าความหนาชิ้นงาน

## 2) อัตราส่วนของความเครียด (Strain ratio)

โดยปกติเส้นแนวความเครียด (Strain Path) ยังคงเป็นสัดส่วนเส้นตรง

$$\beta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\ln \frac{d_2}{d_0}}{\ln \frac{d_1}{d_0}} \quad (2.16)$$

- $\beta$  = อัตราส่วนความเครียด  
 $\varepsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก  
 $\varepsilon_2$  = ค่าความเครียดรอง  
 $d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริด  
 $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก  
 $d_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนรอง

## 3) ความเครียดหนาและความหนา (Thickness strain and Thickness)

จากสมการที่ 2.15 ความเครียดหาได้โดยการวัดความหนาหรือหาได้จากความเครียดหลัก (Major strain) ความเครียดรอง (Minor strain) โดยให้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปที่ปริมาตรคงที่ [17]

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta)\ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.17)$$

- $\beta$  = อัตราส่วนความเครียด  
 $\varepsilon_1$  = ค่าความเครียดหลัก  
 $\varepsilon_3$  = ค่าความเครียดที่ความหนา  
 $t$  = ค่าความหนาชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง  
 $t_0$  = ค่าความหนาชิ้นงาน  
 $d_0$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริด  
 $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกริดเปลี่ยนแปลงในแกนหลัก

### 2.3.9 คุณสมบัติของยาง

ยาง (Rubber) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่มีความยืดหยุ่น สามารถยืดออก หรือสามารถเปลี่ยนขนาดได้มากเมื่อถูกดึง และกลับสู่สภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางมักจะพันกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกการจัดตัวแบบนี้ว่า ออสชันฐาน จากสมบัติพิเศษที่ยืดหยุ่นได้นี้ทำให้บางครั้งเรียกยางว่า “อีลาสโตเมอร์” (Elastomer) เนื้อของยางเป็นพอลิเมอร์ของไอโซพรีน โดยมีไอโซพรีนเชื่อมต่อกันอยู่ตั้งแต่ 1500-15000 หน่วย [18]

#### 1) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำ อเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นตัวผลิตในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็น ของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็กรีตยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วันก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่ อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้งางแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้งางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [18]

- คุณสมบัติของยางธรรมชาติ มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง มีความต้านทานต่อการขัดถูสูง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก ยางดิบละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากตัวยางดิบไม่มีขั้ว และไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะทนต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังทนต่อการกรด และด่างอ่อน แต่จะไม่ทนต่อการกรดและด่างเข้มข้น วัตถุประสงค์การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ไม่ทนต่อโอโซน การกระด้างกระดองสูง อุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -55 - 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บไว้นานๆ จะทำให้งางสูญเสียความยืดหยุ่นลง [19]

- ชนิดของยางธรรมชาติ 8 เกรด คือ ยางแท่งเอสทีอาร์ 5 แอล (STR 5L) ยางแท่ง

เอสทีอาร์ 5 ซีวี 60 (STR 5CV 60) ยางแท่งเอสทีอาร์ 20 (STR 20) ยางแท่ง เอสทีอาร์ 20 ซีวี 60 (STR 20CV 60) ยางskimแท่ง (Skim Block) ยางเครพขาวแท่ง(Pale Crepe) ยางแผ่นผึ่งแห้ง(ADS) และยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS No. 3) โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบวัลคาไนซ์ที่ศึกษา คือ ระบบกำมะถันปกติ เซมิอีวี และอีวี โดยมี N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS) เป็นสารตัวเร่ง จากการคำนวณค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ และพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ โดยสมมติว่าปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่า ค่าพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี และอีวี มีค่าอยู่ในช่วง 21.18 ถึง 39.24 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่ายางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ และจากการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ (ความแข็ง ความทนต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด) พบว่ายางskimจะมีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนบ่มเร็วกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ แต่หลังบ่มเร่งยางแท่งเอสทีอาร์ 5ซีวี 60 จะมีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 [19]

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ [19]

Properties	STR 20	RSS No.3	STR 5L	STR 5CV60	Crepe	STR 20CV60
Tensile strength (MPa)	18.63±2.24	20.64±2.94	20.91±1.24	20.12±1.02	20.85±1.93	18.05±1.87
Tensile strength (MPa) aging	20.19±1.33	18.31±3.03	19.25±0.97	22.65±0.87	17.97±1.97	20.61±1.39
300% modulus (MPa)	5.24±0.16	5.52±0.25	5.44±0.22	5.51±0.34	4.89±0.15	5.07±0.17
300%modulus (MPa) aging	6.34±0.15	6.64±0.20	6.11±0.33	6.48±0.21	5.87±0.27	6.28±0.19
Elongation at break(%)	634±50.68	663±63.38	680±17.24	659±1.44	705±33.92	637±30.75
Elongation at break(%) aging	594±16.82	565±54.11	597±16.57	646±13.62	584±36.32	610±14.81
Tear strength (N/mm)	53.57±3.66	58.97±3.92	52.14±8.79	52.68±4.45	52.76±6.64	51.38±4.79
Tear strength (N/mm) aging	52.71±2.57	52.36±2.53	51.45±1.54	53.95±3.83	50.33±2.03	49.93±2.67
Hardness (Shore A)	51	51	52	54	54	63

## 2) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber : SR)

ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ยางธรรมชาติถือว่าเป็นยุทธปัจจัยเกิดการขาดแคลน และเนื่องจากประเทศในแถบยุโรปและอเมริกาไม่มียางธรรมชาติ จึงทำให้มีการคิดค้นผลิตยางเทียม

ขึ้นมา จากผลผลิตของการกลั่นน้ำมัน ผลการค้นคว้าดังกล่าว จึงได้วางเทียบขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ในปัจจุบันเราใช้น้ำมันปิโตรเลียมในการสังเคราะห์ยางเทียม [15]

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการผลิตมอนอเมอร์(Monomer) ซึ่งมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และการนำมอนอเมอร์หลายๆ มอนอเมอร์มาต่อกันให้ได้เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของมอนอเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวมาเรียงต่อกันก็จะเรียกว่า ยางสังเคราะห์ที่ได้ว่า โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจประกอบด้วยมอนอเมอร์จำนวน 2 ชนิดมาเรียงต่อกัน จะเรียกว่า โคพอลิเมอร์ (Copolymer) [20]

- คุณสมบัติของยางสังเคราะห์ สามารถยืดหยุ่นตัวได้ ทนต่อแรงดึงได้ทนต่อการสึกหรอฉีกขาดได้ ทนต่อน้ำมันแร่ และสารละลายอีกหลายชนิด ทนต่อไขมัน ทนความร้อนได้สูง บางชนิดสูงถึง 200°C ทนต่อการรั่วซึมของแก๊สได้ [19]

- ชนิดของยางสังเคราะห์ยางสังเคราะห์ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะนำเอายางธรรมชาติมาผสมรวมอยู่ด้วย เพื่อต้องการคุณสมบัติที่ดีบางประการของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จะใช้ยางสังเคราะห์ชนิด ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber : CR) ใช้ในการทดลองทำดอร์วีบีด ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber : CR) มีชื่อทางการค้าว่ายางนีโอพรีน (Neoprene) เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของโคโรพรีน (Chloroprene monomer) โมเลกุลของยาง CR สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้ เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยาง CR นอกจากจะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง) ยังมีความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขัดถูสูงอีกด้วย

- การใช้งานยาง CR เกรดที่สามารถตกผลึกได้เล็กน้อยถึงปานกลางจะถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อการติดไฟ ทนต่อน้ำมัน สภาพอากาศ และโอโซน ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง ยางพันลูกกลิ้ง สายพานลำเลียง ยางกันกระแทก และผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานก่อสร้าง

- ความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด (Tensile and tear strength) เนื่องจากยาง CR สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ที่ไม่สามารถตกผลึกได้ (แต่ยังคงต่ำกว่ายางธรรมชาติ) [20]

### 2.3.10 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

#### 1. บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Introduction to Finite Element Analysis)

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [21] ซึ่งต้องประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการปัญหา

ดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน ถึงแม้ว่าการพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [23] นอกจากนี้ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ได้ดังนี้ ความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis , Flow + Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo mechanical Process Analysis) เช่น การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) งานฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ฯลฯ [3]

จากข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพมากก็จริงแต่ที่ว่า ก็ยังพบข้อเสียของการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์เพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหา ซึ่งควรระลึกเสมอทุกครั้งที่มีการใช้ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือ ระเบียบการที่มีหลักการคล้ายคลึงกันคือ อิทธิพลของความเค้นที่ให้ความสำคัญของปัญหา ตัวแปรอื่นอีก ดังเช่น สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นงาน และที่สำคัญคือ การป้อนข้อมูลเข้ากระบวนการ บางทีผลลัพธ์ของปัญหาอาจผิดพลาดถ้าหากป้อนข้อมูลที่ไม่ถูกต้องเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ซึ่งบางที่อาจถูกมองข้ามจากนักวิเคราะห์ หรือบางครั้งสิ่งที่สำคัญยิ่งคือ หลักการในการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีนั้นจะขึ้นอยู่กับทักษะการฝึกฝนของนักวิเคราะห์ โดยนักวิเคราะห์ต้องรู้จักวิเคราะห์ และประมวลผล ซึ่งจะทำให้การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ผลลัพธ์จากการทดลองมีความเป็นไปได้มาก [23]

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการที่สามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Preprocessing) โดยทั่วไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งรูปทรงเรขาคณิตออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ โดยที่เอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด แนนอนที่สุดโหนดนี้จะถูกกำหนดการเคลื่อนที่ และนอกเหนือจากนี้จะต้องทำการกำหนดแรง หรือ ภาระที่มากกระทำกับชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ ในขั้นตอนเตรียมการ การเตรียมแบบจำลองนี้จะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นจำนวนมาก และนอกจากนี้ขั้นตอนเตรียมการบางกระบวนการสามารถรวมกับขั้นตอนออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ [23]

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ข้อมูลต่างๆ เช่นแบบจำลองเอลิเมนต์ เงื่อนไขต่างๆ ฯลฯ ที่ได้ถูกเตรียมการจากขั้นตอนการเตรียมกระบวนการจะถูกนำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการเอง ที่สร้าง และแก้ไขปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต โดยไฟไนต์เอลิเมนต์มีสมการรูปทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ 2.18

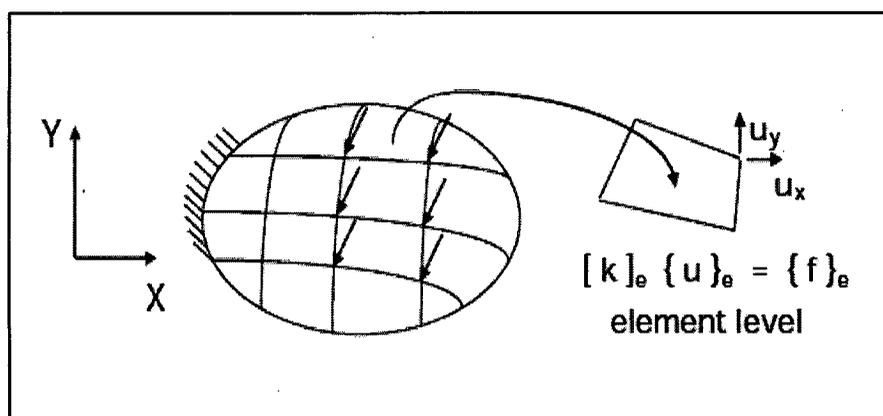
$$\{k\}d = \{f\} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $K =$  ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)

$f =$  ค่าแรงที่มากกระทำต่อเอลิเมนต์

$d =$  ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

เมื่อมีการแทนที่  $d$  และ  $f$  อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้แรงภายนอกที่จุดสำคัญ การสร้างสมการเมทริกซ์  $K$  ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหาที่ถูกกระทำ และเกณฑ์ของการวัด หน่วยที่นำมาประกอบเป็นโครงผูกมัดนี้ช่วยให้เข้าใจประเด็น จุดหมายของโครงสร้างการวิเคราะห์ความเค้นที่ยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Stress Analyses) บางครั้งในรหัสการประมวลเอลิเมนต์ก็มีมากมาย ซึ่งเอลิเมนต์ที่มีความหลากหลายจะมีความเหมาะสมกับรูปแบบปัญหาแต่ละชนิด หลักเกณฑ์ที่เป็นข้อดีของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ปัญหาหลากหลายประเภทสามารถใช้รหัสการประมวลได้ด้วยรหัสเดียวกัน แต่การระบุชนิดของเอลิเมนต์จากคลังเก็บ หรือ ห้องสมุด (library) [23]

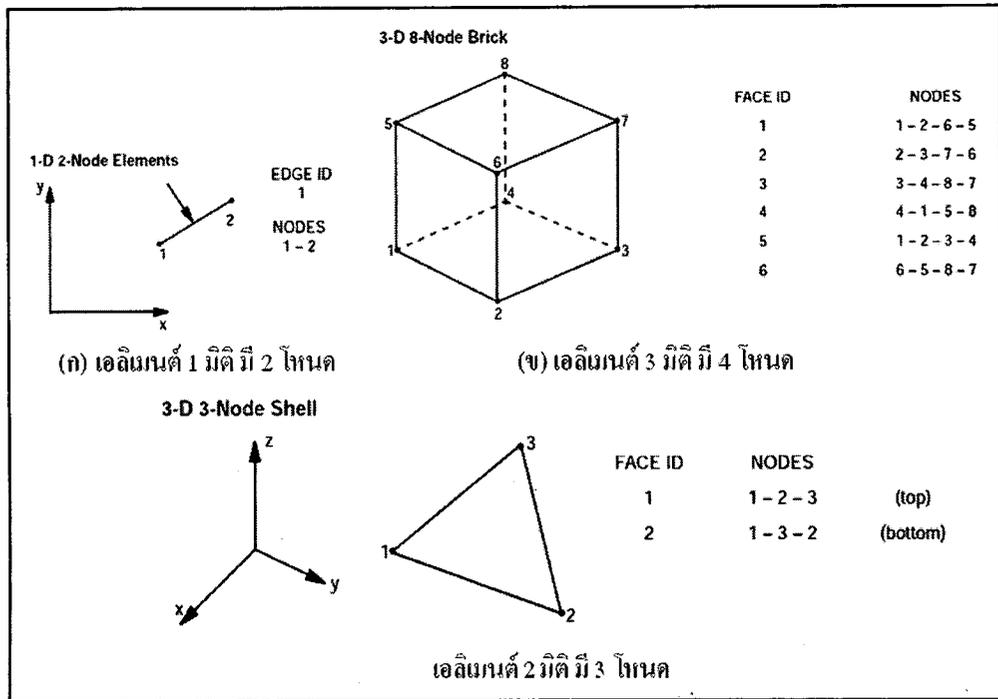


รูปที่ 2.12 ค่าแรงกระทำต่อเอลิเมนต์ ( $f$ ) ที่ทำให้โหนดมีการเคลื่อนที่ ( $U$ ) [23]

3. ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) ก่อนหน้านี้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้ใช้จะต้องพึงเอาใจใส่แถวของตัวเล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยรหัส (Code) การลงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นลงบนแบบจำลองให้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ด้วยวิธีนี้ทำให้พบข้อผิดพลาดได้ง่าย และจุดอันตราย อีกทั้งรหัสที่ทันสมัยจะใช้ภาพกราฟฟิกแสดงเพื่อให้ง่ายต่อการเห็นผลลัพธ์ ซึ่งรูปแบบของการนำเสนอทางกราฟฟิกจะแสดงเป็นระดับชั้นสีของความเค้นจนเต็มบนแบบจำลอง [24]

## 2. โหนด (Node)

โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองค์อิสระโดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์ และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป [25]

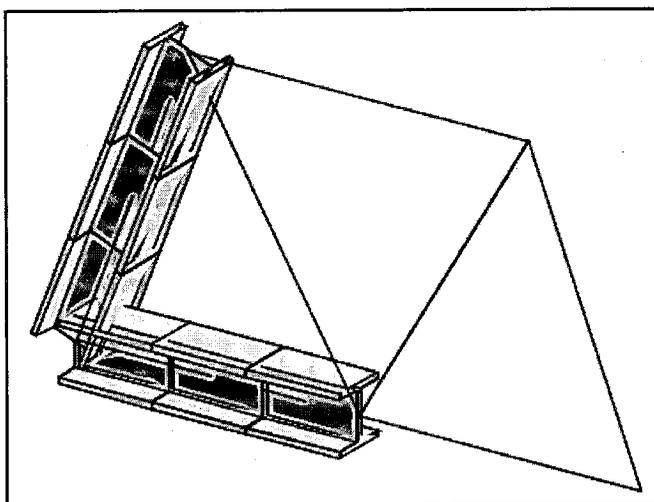


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [26]

### 3. เอลิเมนต์ (Element)

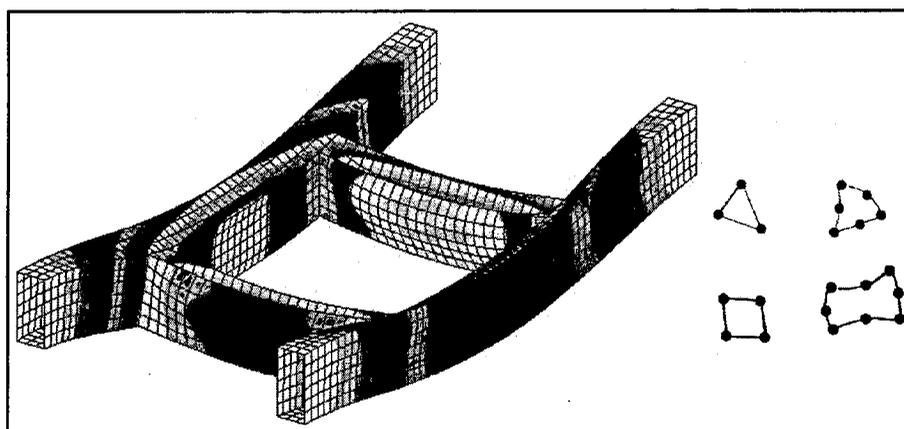
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 – 3 มิติ นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น lumped springs หรือ กลุ่มของจุด เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่ลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวีคูณของโหนดคือ เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (linear elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar element) [25]

1 เอลิเมนต์ 1 มิติ มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัดได้ชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก [26]



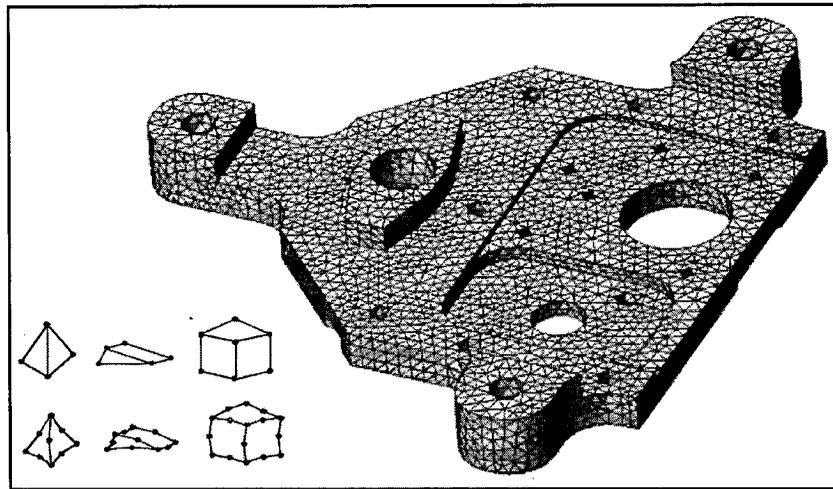
รูปที่ 2.14 การใช้ Beam Element ในงานโครงสร้าง [24]

2 เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin shell) และผนังหนา (Thick Shell) [24]

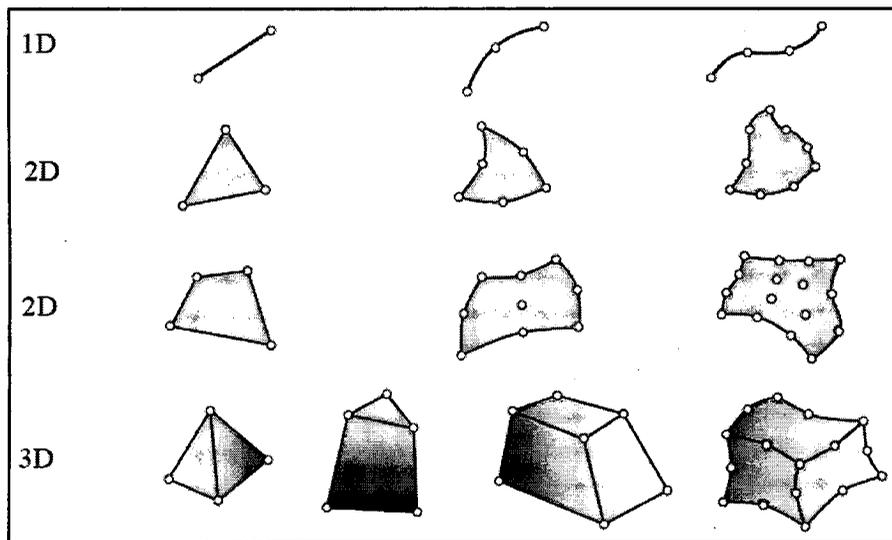


รูปที่ 2.15 การใช้ Shell Element ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง [24]

3 เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไปเอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับการจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว ซึ่งเหมาะกับการคำนวณค่าความถูกต้อง [24]

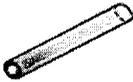
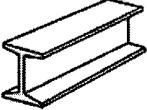


รูปที่ 2.16 การใช้งาน Solid Element ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา [27]



รูปที่ 2.17 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 - 3 มิติ [25]

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหลวมของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการ ออกแบบจำลองขั้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับชั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง [25]

องค์ประกอบ โครงสร้างทางกายภาพ	ชื่อแบบจำลอง ทางพีชคณิต	การทำให้เป็นแบบอย่าง ไฟไนต์เอลิเมนต์
	ท่อน	
	ท่อน , กาน	
	ท้อ	
	ผลึก , พังผืด	
	แผงเงื่อน	

รูปที่ 2.18 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม [25]

รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์โครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ดังตัวอย่างภาพที่ 1.45 เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น Bars, Cables, Beams, Shafts, Spars. [25]

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ ที่มี Large aspect ratio เป็นต้น ควรใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือ อัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวเข้าใกล้หนึ่ง ควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ ในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป [25]

#### 4. การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อมีการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนไปทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการ

เสีयरูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงไปด้วย [27 , 28]

ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่า ชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1 เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) คือจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภท Large Deflection หรือ Large Rotation มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวสูง มี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือวัสดุมีการเสีयरูปร่าง หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation)จนทำให้ค่าความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุ ชิ้นงานสูงขึ้นกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการทั่วไปแบบ Geometric Nonlinear มีดังนี้ [27 , 28 , 29]

$$|K| = \int |B|^T |D| B dV \quad (2.19)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)

$B$  = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกรณี (Small Strain) อย่างเดียว

$D$  = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2 วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าจะมีการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรงกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เรียกว่า Elastic Modulus จะมีค่าคงที่เสมอ แต่ในวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรงออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากกว่าจุด Yield จนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบ Nonlinear ซึ่งจะใช้รูปแบบสมการทั่วไปเหมือนกับสมการที่ แต่ต่างกันที่  $D$  คือความเคลื่อนที่อิสระของโหนดเอลิเมนต์จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และ  $B$  ไม่เป็นกรณี (Small Strain) ดังสมการที่ [27 , 28 , 29]

$$|K| = \int |B|^T |D| B dV \quad (2.20)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าความแข็ง (Stiffness Matrix)

$B$  = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

$D$  = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain) อย่างเดียว

3 การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนไปดังตัวอย่างการดึงสลักกับการหย่อนสายเคเบิลนานๆ หรืออย่างที่ตอมสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลับกันจนทำให้สมบัติวัสดุเปลี่ยนแปลงไปคือ

ความสามารถในการรับแรงเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งจะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [27, 28]

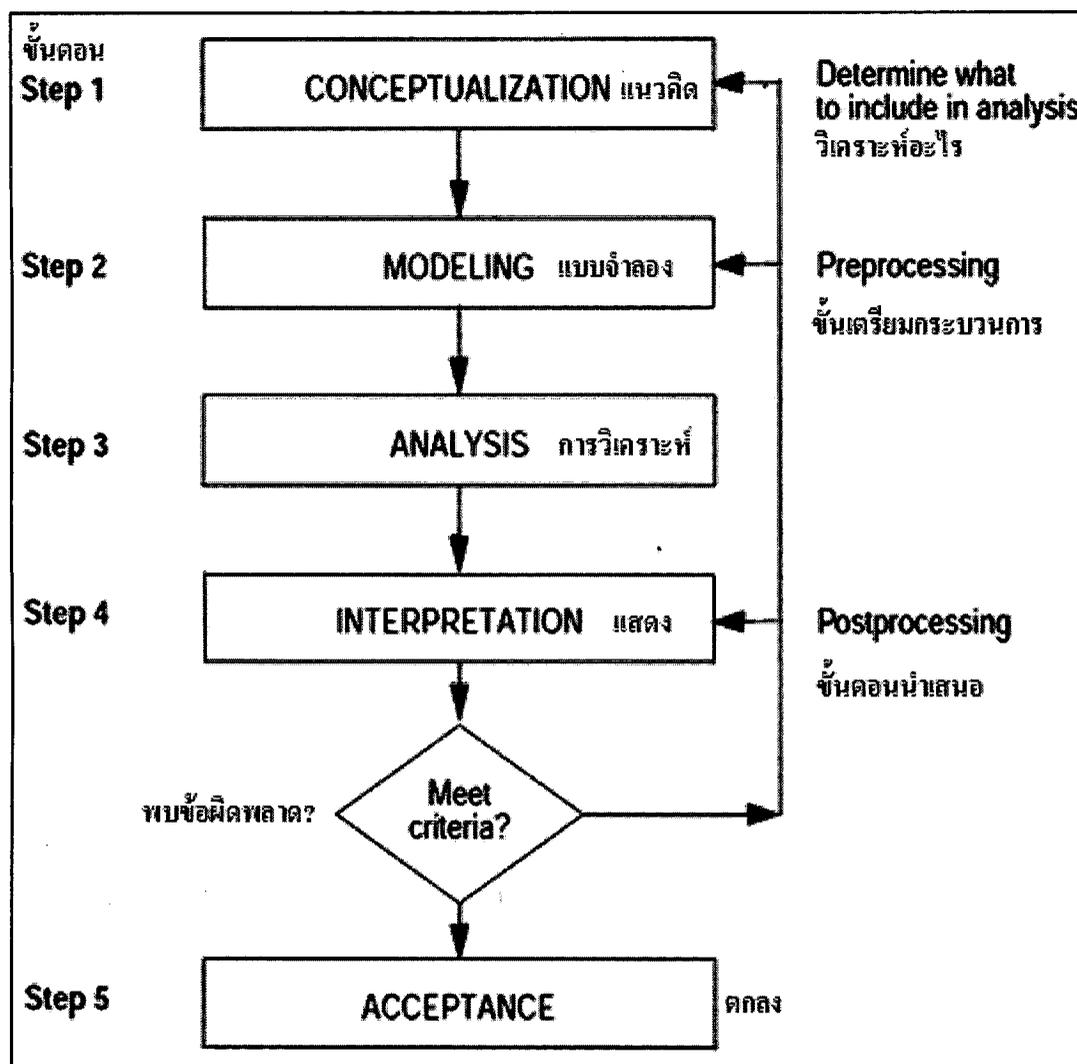
### 5. ประวัติ MSC. Marc Mentat (MSC Marc. Mentat Program)

บริษัท Msc Software (MSC Software Corporation) แรกเริ่มเดิมทีชื่อ MacNeal-Schwendler Corporation มีหน้าที่ที่ได้รับคือการจัดหาจัดส่งซอฟต์แวร์ เครื่องมือทางด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering , CAE) ที่มีความซับซ้อนตั้งแต่ปี 1963 จวบจนถึงปัจจุบัน ทางบริษัท และโปรแกรมได้พัฒนาการจัดจำหน่ายและสนับสนุนด้านโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างที่สมบูรณ์ที่สุดในโลก Nastran เป็นโปรแกรมในเชิงพาณิชย์โปรแกรมแรกที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่เกิดขึ้นโดย MSC Software Corporation ซึ่งโปรแกรมของทางบริษัทมีดังนี้ Nastran , Patran , Adams , MSC Marc , MSC Marc Mentat , MSC Dytran , MSC MVision , MSC Fatigue , MSC Laminate Modeler , MSC SuperForm , MSC SuperForge ฯลฯ ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้ [24]

- 1 Nastran (implicit)
  - การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear Analysis)
  - การแกว่ง การสั่นสะเทือน (Vibration)
  - ความเป็นเลิศด้านพลศาสตร์ (Classic Dynamic)
  - พื้นฐานการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Basic Nonlinear)
- 2 MSC Marc (Implicit)
  - การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นขั้นสูง (Advanced Nonlinear)
  - การตีกลับ (Spring back)
  - งานเชื่อม (Welding)
  - การขึ้นรูปพลาสติก (plastic Forming)
- 3 MSC Dytran (Explicit)
  - การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)
  - ภาชนะพลาสติก (Container)
  - การขึ้นรูป (Forming)
  - การวิเคราะห์ความผิดพลาด (Crash Analysis)
- 4 MSC SuperForm (Implicit)
  - เพื่อวัตถุประสงค์ทั่วไป (General Purpose Bulk)
  - การขึ้นรูป
- 5 MSC SuperForge (Eulerian)
  - การขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D Forging)
- 6 Adams
  - กลศาสตร์การเคลื่อนไหว (Rigid Body Kinematics)

## 6. โปรแกรม MSC. Marc Mentat (MSC. Marc Mentat Program) [26]

กล่าวนำผู้ใช้โปรแกรมกราฟิกส์แบบอินเตอร์เฟสที่ช่วยให้คุณสามารถดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ตั้งแต่แรกเริ่มกระบวนการจนกระทั่งเสร็จสิ้น ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ออกเป็นวงจรดังนี้



รูปที่ 2.19 วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle) [26]

โดยสรุปกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Brief Look at the Finite Element Analysis Process) เพื่อเสริมความเข้าใจของโปรแกรมนั้นจึงต้องพิจารณาถึงวงจรการวิเคราะห์กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนแนะนำให้รู้จักกลไกของโปรแกรม ดังรูปที่ 1.46 แสดงให้เห็นห้าขั้นตอนเกี่ยวกับวงจรของกระบวนการนี้ ในบางครั้งเฉพาะบางกระบวนการเท่านั้นที่ต้องมีการตรวจตราการออกแบบมากกว่า 1 ครั้ง หากผลการทดลองไม่ตรงกับเกณฑ์การออกแบบคุณสามารถย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 (Conceptualization) หรือ ขั้นตอนที่ 2 (Modeling) ซึ่งเป็นช่วงระยะที่แก้ไขปรับปรุงกระบวนการ ดังนั้น 5 ขั้นตอนของวงจรการวิเคราะห์นี้ถือเป็นพื้นฐานของงานวิจัยเล่มนี้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิต เนื้อหาหัวข้อนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ความสนใจไปที่ 2 ขั้นตอนในวงจรการ

วิเคราะห์คือ ขั้นตอนที่ 2 ช่วงการสร้างแบบจำลอง และขั้นตอนที่ 4 ช่วงของผลการทดลอง โปรแกรม Marc มีข้อเด่นคือเป็นเครื่องมือที่ใช้พิสูจน์ปัญหาทางวิศวกรรม ขั้นตอนที่ 2 และ 4 ของวงจรการวิเคราะห์แบบจำลอง และผลลัพธ์การตีความ สำหรับปัญหาทางวิศวกรรม นอกจากนี้โปรแกรม Marc ได้รับการเลือกใช้ตามหลักเกณฑ์ทั้ง 2 ข้อดังนี้

- 1 เพื่อนำหลายวิธีให้คุณในการสร้างแบบจำลองที่มีความยุ่งยาก
- 2 เพื่อแสดงประเภทการวิเคราะห์ที่หลากหลาย และให้คุณคุ้นเคยกับความสามารถ

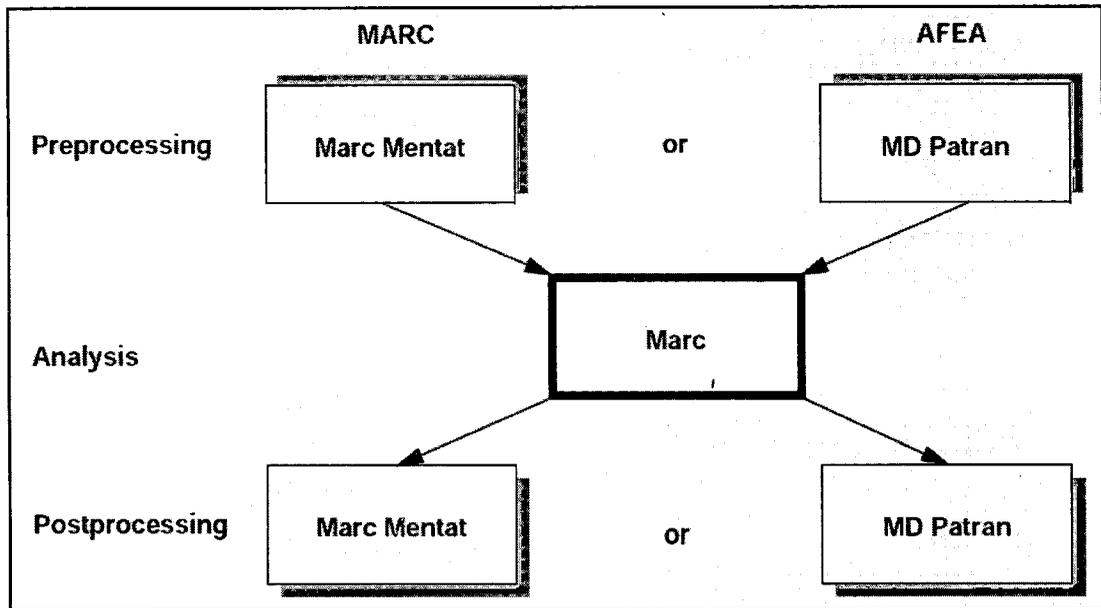
ต่างๆ ของโปรแกรม โปรแกรมจะดำเนินการไปตามวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จ จะแสดงผลแบบกราฟฟิกส์ [26]

การกำหนดเทคนิคแต่ละมิติของวัตถุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง และแสดงผลลัพธ์ ดังนั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีการจัดจำแนกเป็นประเภทตามมิติ และในหลายกรณีความซับซ้อนของแบบจำลองจะสอดคล้องกับมิติ จากนี้คุณสามารถสรุปว่าเมื่อคุณทราบวิธีการแก้ปัญหาแบบ 1 มิติ และ 3 มิติ (One and Three Dimension) อย่างไรก็ตามเอกลักษณ์ที่เป็นคุณสมบัติของวัตถุแบบ 1 มิติ ซึ่งตัวอย่างที่ครอบคลุมรูปแบบของการเชื่อมโยงเครือข่าย (Topology) ดังตัวอย่างเป็นการยากที่จะแสดงเส้นรูปร่างแบบเส้นที่เอลิเมนต์กับชนิดทางเรขาคณิต และการวิเคราะห์ ดังเช่น การถ่ายโอนความร้อน สถิติศาสตร์ พลศาสตร์ นอกจากนี้เนื้อหาวิชาที่ครอบคลุมเกี่ยวกับวัสดุนี้เป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญมาก และง่ายต่อการเข้าถึงเข้าใจต่อผู้ที่ใช้งานเป็นครั้งแรก [26]

## 7. ระบบโปรแกรม Marc (The Marc System) [26]

ระบบของโปรแกรม Marc จะมีชุดโปรแกรมอื่นๆ ที่ช่วยสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมแขนงกลศาสตร์โครงสร้าง การถ่ายเทความร้อน และการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งระบบของโปรแกรมสามารถแสดงดังภาพที่ 1.47 โดยระบบของโปรแกรมประกอบไปด้วยโปรแกรมต่างๆ ดังนี้

- 1 Marc for Analysis
- 2 Marc Mentat หรือ MD Patran for GUI
- 3 Marc and Marc Mentat or MD Patran
- 4 Analyze your structure (Marc)
- 5 Graphically depict the results (Marc and Marc Mentat or MD Patran)



รูปที่ 2.20 ระบบของโปรแกรม Marc [26]