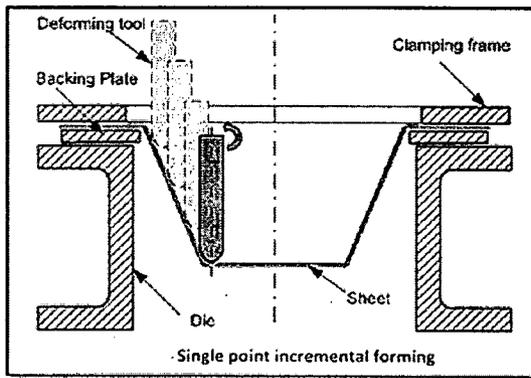


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวความคิด

จากการค้นคว้าพบว่าในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้อุปกรณ์ขึ้นรูป รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่นโลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยในปัจจุบันนี้ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆในการทำงานที่จะต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการ สำหรับโครงการนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุด จะทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุทองเหลืองแผ่น ซึ่งเป็นโลหะแผ่นที่มีความสามารถในการขึ้นรูปในลักษณะต่างๆได้สูงและนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทในปัจจุบัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปของโลหะแผ่น เช่น มุมที่ใช้ในการขึ้นรูป, ความเร็วในการเดินของอุปกรณ์, ความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์ รวมไปถึง โครงสร้างจุลภาคที่มีผลจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบลักษณะการขึ้นรูปที่เกิดขึ้น พร้อมวิเคราะห์ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้น ในส่วนของความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นโลหะ, ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของโลหะแผ่นทองเหลืองที่ผ่านการขึ้นรูปและ โครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่น และยังเป็นทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตในการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบลูกโซ่ด้วยการสัมผัสเป็นจุดต่อไป ซึ่งมีลักษณะการทำงาน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [2]

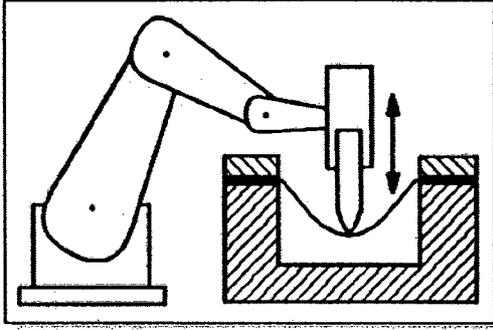
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะต่าง ๆ

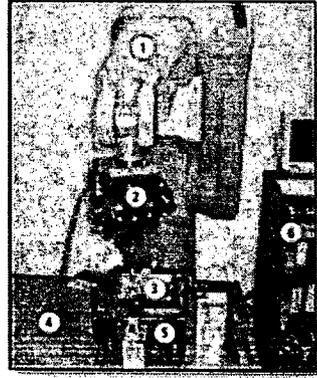
มีกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นหลายๆแบบที่ใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ด้วยกรรมวิธีนี้ ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อ เทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบเดิม โดยบางส่วนของกระบวนการที่จะกล่าวถึง จะมีลักษณะการทำงานพื้นฐานที่คล้ายคลึงกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยจะกล่าวถึงภาพรวมโดยย่อของทางเทคนิคของ กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

2.2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป

การกดขึ้นรูปเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องที่เก่าที่สุด การกด หมายถึง การทำให้โลหะต่างๆ ให้เป็นรอยนูนขึ้นคล้ายๆ กรรมวิธีการปั๊ม ในอดีตการกดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องกระทำด้วย ที่ต้องอาศัยความชำนาญ ความสามารถเฉพาะ ต้องใช้เทคนิคของช่าง แต่ละคน แต่ในปัจจุบัน กระบวนการดุนขึ้นรูปโลหะ ได้มีการนำเทคโนโลยี CNC และเทคโนโลยีการใช้หุ่นยนต์มาควบคุมในการทำงาน ในการเคลื่อนที่ไปในจุดต่างๆ แล้วทำการกด ลงบนพื้นผิวโลหะที่ถูกทำการจับยึด ในแต่ละขั้นตอน ของการทำงานที่ถูกกำหนด ดังรูปที่ 2.2



(ก) ลักษณะของการกดขึ้นรูป

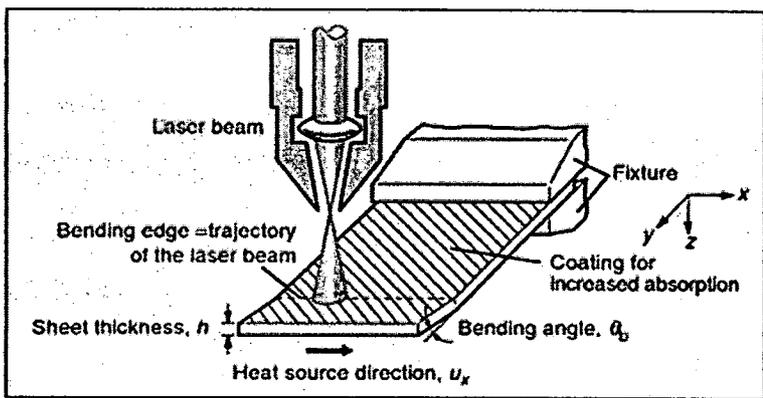


(ข) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

รูปที่ 2.2 กระบวนการกดขึ้นรูป [2]

2.2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์

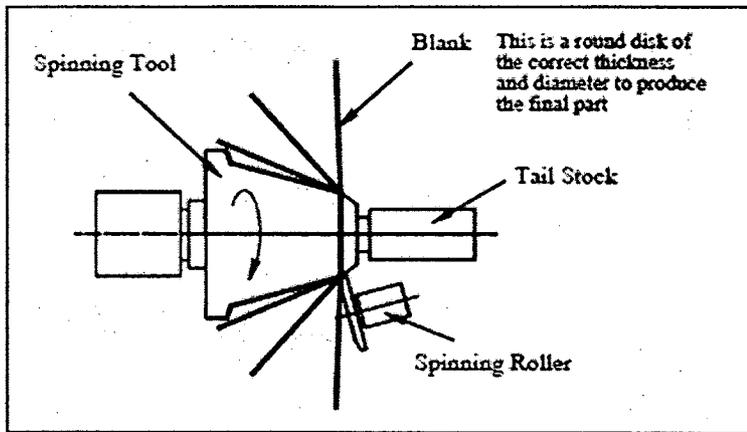
การขึ้นรูปวัสดุด้วยเลเซอร์ หรือ Laser Forming ถือเป็นกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางกลและทางความร้อน (Thermo-mechanical Forming Process) โดยหลักการของ (Laser Forming) คือการฉายลำแสงเลเซอร์ลงบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดความเครียดบนพื้นผิวแผ่นโลหะที่ถูกจับยึด ด้วยความร้อนจากการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจะเกิดการโค้งงอของวัสดุ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยแสงเลเซอร์ [2]

2.2.4 กระบวนการปั้นขึ้นรูป

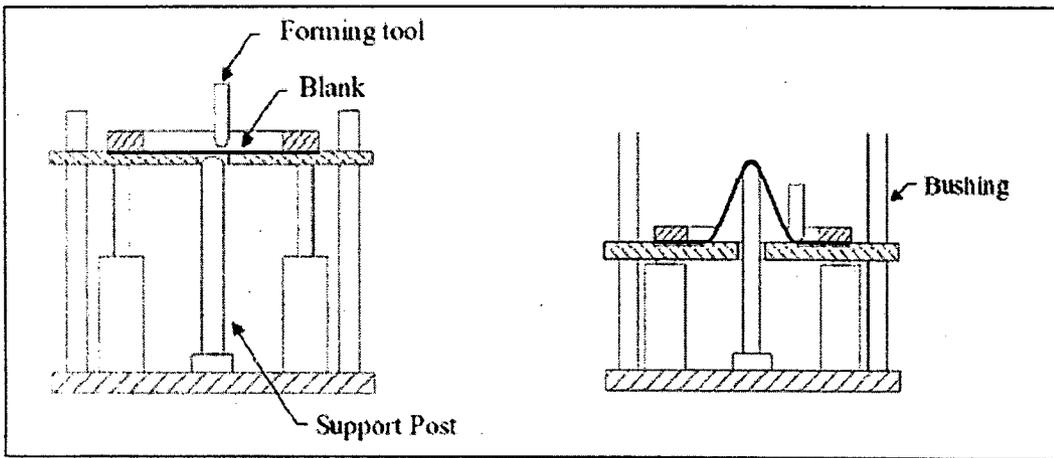
การขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโพรงในรูปทรงต่างๆ การขึ้นรูปจะเริ่มต้นโดยการนำแผ่นขึ้นงานกลม (Blank) มาติดกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ให้มีจุดศูนย์กลางตรงกันแล้วจึงนำศูนย์ท้ายแท่น มากดให้แผ่นขึ้นงานแนบสนิทกับแม่พิมพ์สปินนิ่ง ขั้นต่อไปจะหมุนแม่พิมพ์สปินนิ่งทำให้แผ่นขึ้นงานและศูนย์ท้ายแท่นหมุนตามไปด้วย หลังจากนั้นจึงนำลูกกลิ้งมารีดแผ่นขึ้นงานให้แนบไปตามแม่พิมพ์สปินนิ่ง แผ่นขึ้นงานจะค่อยๆ ถูกขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในบริเวณเล็กๆ ที่ลูกกลิ้งสัมผัสกับแผ่นขึ้นงานตามการเคลื่อนที่ของแผ่นขึ้นงานรอบๆ แกนการหมุนของแม่พิมพ์สปินนิ่ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการปั้นขึ้นรูป [2]

2.2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง (Incremental Sheet Forming Process)

ในปี 1994 ได้มีพัฒนาโดย Matsubara กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการใช้การกระตุ้งยันจากด้านล่างโดยให้แผ่นขึ้นงานทดสอบถูกจับยึดบนแท่นที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ โดยตรงกลางของแผ่นขึ้นงานจะถูกรองรับ โดย แท่นรองรับหรือทูล และมันจะถูกควบคุมความเร็วในการหมุนโดยเครื่องจักร CNC และแท่นที่ใช้จับยึดขึ้นงานก็จะถูกกดลงสู่ด้านล่างตามระยะที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 2.5 โดยกรรมวิธีนี้สามารถผลิตขึ้นงานได้ทั้งในลักษณะที่มีรูปทรงสมมาตร และรูปทรงไม่สมมาตร[2]

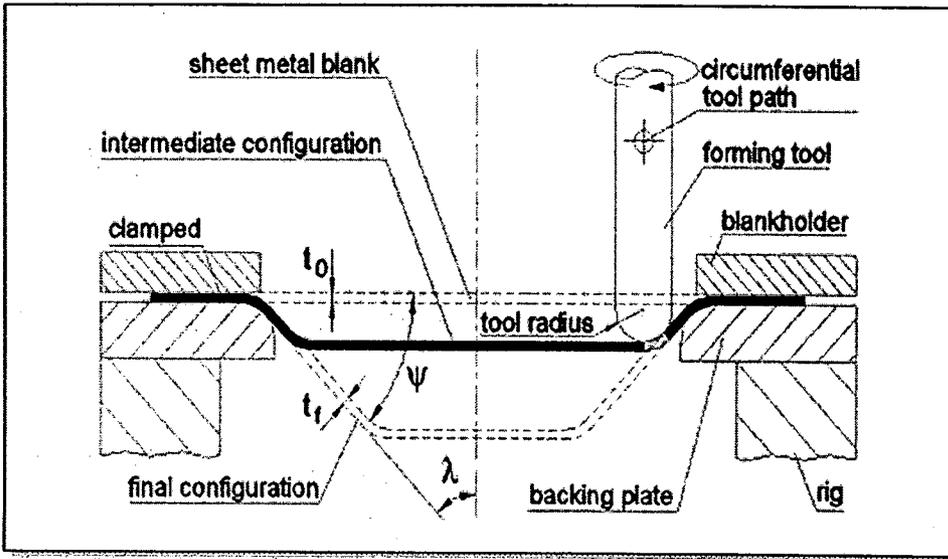


รูปที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง [2]

โดยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องได้ถูกพัฒนากระบวนการทำงานออกไปใน 3 ลักษณะ คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยสัมผัสเป็นจุด (The Single Point Incremental Forming), กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยมีทูลเคลื่อนที่รองรับ (The Incremental Forming with Counter Tool) และ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (The Two Point Incremental Forming) โดยในส่วนต่อไปจะเป็นการนำเสนอลักษณะการทำงาน ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง ทั้ง 3 ลักษณะ

2.2.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด

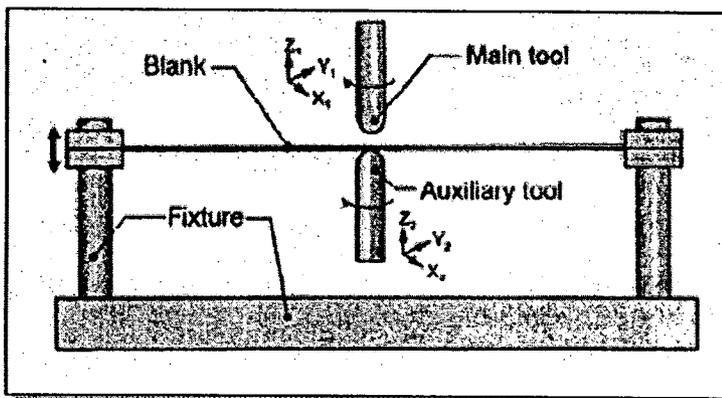
กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดเป็นลักษณะการทำงานแนวใหม่ในการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง โดยมีลักษณะคล้ายกับการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป และการดึงขยายชิ้นงาน ซึ่งมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรอีกด้วย โดยแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดโดยชุดจับยึดและถูกกดขึ้นรูปโดยหัวกดลงไปทำให้เกิดการเสียรูปถาวรเฉพาะจุด บนแผ่นโลหะ โดยใช้ทูล รูปทรงกระบอกที่มีปลายเป็นรัศมีโค้งและหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดและทำการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการทำงานที่ถูกกำหนดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [3] โดยในจุดที่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรนั้นเป็นพื้นที่เล็กๆที่เกิดจากการสัมผัสกันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับพื้นผิวของแผ่น โลหะซึ่งก่อให้เกิดความเค้นกดขึ้นเป็นผลให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด [2]

2.2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ที่ไม่มีการใช้แผ่นรองยึดด้านล่างและใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปเสริมในด้านล่างของแผ่นชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันอุปกรณ์ขึ้นรูปหลัก ดังรูปที่ 2.7



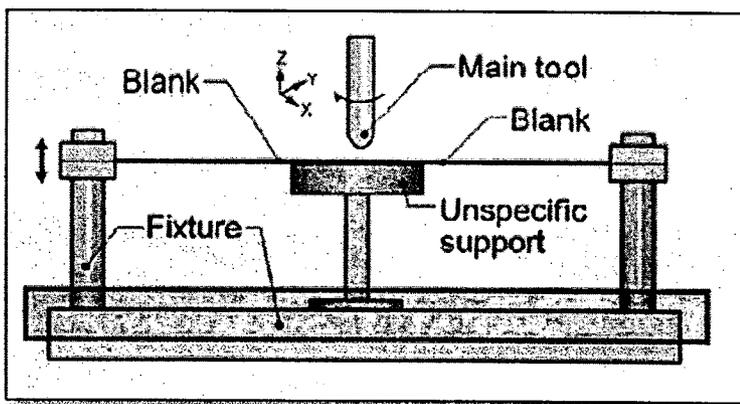
รูปที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบมีทูลเคลื่อนที่รองรับ [2]

2.2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแผ่นชิ้นงานจะถูกจับยึดบนชุดสวมจุดที่สามารถปรับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวแกน Z โดยใช้ทูลในการขึ้นรูปที่มีรูปร่างในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด โดยให้ทูลทำการกดลงบนของแผ่นชิ้นงานด้านบนจากบนลงล่างตามลักษณะรูปทรงของชิ้นงานที่กำหนด โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ถูกแบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของ แม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไป คือ แบบแม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน, และ แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน

2.2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ แผ่นรองหลัง ในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด เพียง แต่มันจะทำการรองรับเฉพาะพื้นที่ที่ถูกกำหนดของแผ่นชิ้นงาน และกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงของรูปทรงของชิ้นงาน ในลักษณะของงานที่มีการขึ้นรูปด้วยรูปทรงที่ไม่ตรงตามแบบทางเรขาคณิต อีกทั้งยังสามารถนำ แม่พิมพ์รองรับเฉพาะส่วน ไปผลิตชิ้นงานอื่นๆ ที่มีความคล้ายคลึงได้ต่อไปอีกด้วย มีลักษณะการทำงาน ดังรูปที่ 2.8



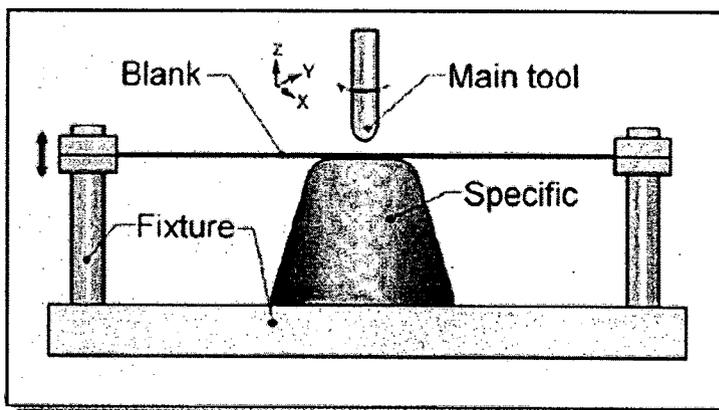
รูปที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด (แม่พิมพ์เฉพาะส่วน) [2]

2.2.10 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน)

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุด ในแบบ (แม่พิมพ์รองรับเต็มส่วน)

สามารถเรียกได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องในลักษณะนี้ ไม่อยู่ในแนวทางการทำงาน ที่จะไม่ใช้แม่พิมพ์ในการ แต่มันก็ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงในการขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมาก เนื่องจาก ในขณะที่ทำการขึ้นรูป แผ่นงานจะถูกบังคับโดยทูลให้ขึ้นรูปไปตามกับขนาดแม่พิมพ์ที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่

2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องแบบสัมผัสสองจุดแบบแม่พิมพ์เต็ม [2]

2.2.11 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการกดขึ้นรูป

ทองเหลือง (Brass) คือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานการกัดกร่อน และมีความสามารถในการขึ้นรูปและคุณสมบัติอื่น ๆ ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรม จะมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40% เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะมากขาดความเหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองต่างๆไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็น แท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrough Copper Alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast Copper) ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพ ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล มักจะ

กล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้[4]

1) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสีไม่เกิน 5% (95 Cu-5 Zn) มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Gilding metal ใช้ทำเหรียญ

2) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 10% (90 Cu-10 Zn) มีชื่อเรียก Commercial bronze หรือ บรอนซ์ ทางการค้าความจริงเป็นทองเหลือง คุณสมบัติและการใช้งานคล้ายคลึงกับ Gilding metal

3) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 12.5% (85.5 Cu-12.5 Zn) มีชื่อเรียก Jewelry bronze หรือ ทองเหลืองทำเครื่องประดับ

4) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 15% (85 Cu-15 Zn) มีชื่อเรียก Red Brass หรือ ทองเหลืองแดง

5) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 20% (80 Cu-20 Zn) มีชื่อเรียก Low brass หรือ ซึ่งไม่หมายถึงทองเหลืองชั้นคุณภาพต่ำตามความหมาย

6) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 30% (80 Cu-30 Zn) มีชื่อเรียก Cartridge brass หมายถึงทองเหลืองที่ใช้ทำปลอกกระสุนปืน ทำท่อที่ต้องอาศัยการอัดขึ้นรูป(Extrusion)

7) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 35% (65 Cu-35 Zn) มีชื่อเรียก Yellow brass หมายถึงทองเหลืองที่มีสีค่อนข้างจัด คุณสมบัติและการใช้งานใกล้เคียงกับ Cartridge brass

8) ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 40% (60 Cu-40 Zn) มีชื่อเรียก Muntz metal คงจะเป็นชื่อทางการค้า

2.2.12 วัสดุที่ใช้เป็นเครื่องมือในการกดขึ้นรูป

เหล็กกล้าเครื่องมือมาตรฐาน JIS เกรด SKD 11 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ธาตุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และ โมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ ในระดับสูง และโครงสร้าง เเทมเปอร์มาร์เทนไซด์ ภายหลังการชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) ซึ่งมีคุณลักษณะทั่วไป ดังตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของ

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมากและมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่น ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นๆ (Significant Characteristics) ดังนี้

- 1) มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมาก
- 2) มีความเหนียวแกร่งพอใช้
- 3) ชุบแข็งได้ดี มีความสามารถในการชุบแข็งสูงมาก และชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้
- 4) ต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี
- 5) เกิดการบิดงอเล็กน้อยมากหลังการชุบแข็ง
- 6) ต้านทานการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ต่ำ
- 7) สามารถทำไนไตรดิงหลังการชุบแข็งได้
- 8) สามารถเคลือบผิวด้วยเทคนิคพีวีดีได้

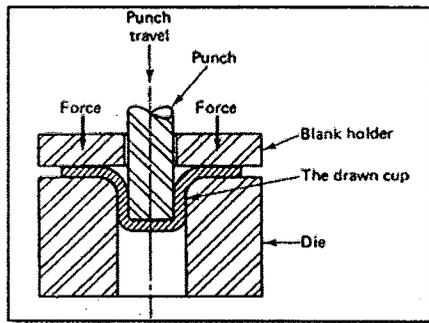
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทั่วไป (General Characteristics) ของเหล็ก JIS SKD 11 หรือเหล็ก DIN 1.2379

ส่วนผสมทางเคมี (% wt.)	C	Cr	Mo	V
		1.55	12.0	0.7
AISI	D2			
JIS	SKD - 11			
DIN	1.2379 / x 155CrVMo12 - 1			
สภาพจำหน่าย	อบอ่อนความแข็งสูงสุด 250 HB			
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็ง และอบคืนตัว 58 - 62 HRC			

2.2.13 ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing operation)

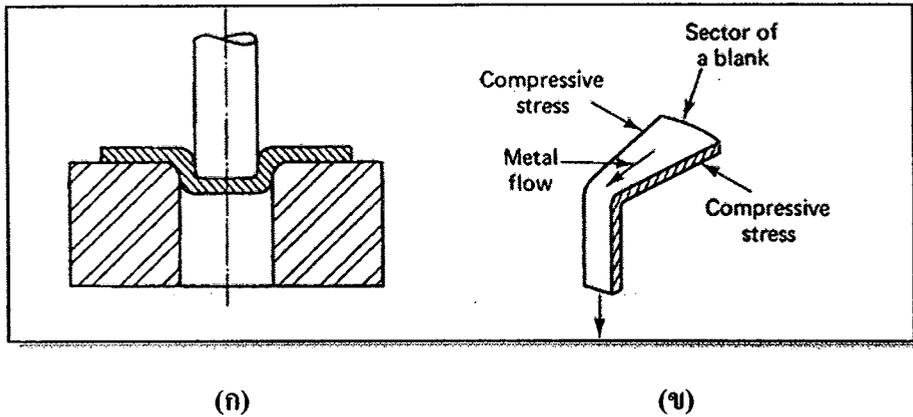
การดึงขึ้นรูปลึกเป็นกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รูปถ้วย หรือรูปเปลือกที่มีขอบสูง จากโลหะแผ่น ดังแสดง ในรูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยชุดแม่พิมพ์ ที่มีขอบพื้นที่และคายเป็น

รัศมีโค้ง ($R > t$) เมื่อมีแรงกดกระทำที่ แผ่นโลหะชิ้นงานผ่านพื้นที่ แผ่นโลหะชิ้นงานจะไหลเข้าสู่ช่องเปิดตามแนวรัศมีเข้าหาศูนย์กลางและเปลี่ยนรูป จากแผ่นเป็นชิ้นงานรูปเปลือก การศึกษาในเรื่องของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกเป็นเรื่องที่ซับซ้อน การที่จะทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้นนั้นจะแบ่งออกเป็นการศึกษาส่วนของกระบวนการ และในที่นี้เราจะกล่าวถึงการศึกษาส่วนของกลไกการขึ้นรูปในการขึ้นรูปลึก



รูปที่ 2.10 แนวคิดพื้นฐานในการดึงขึ้นรูปลึก [5]

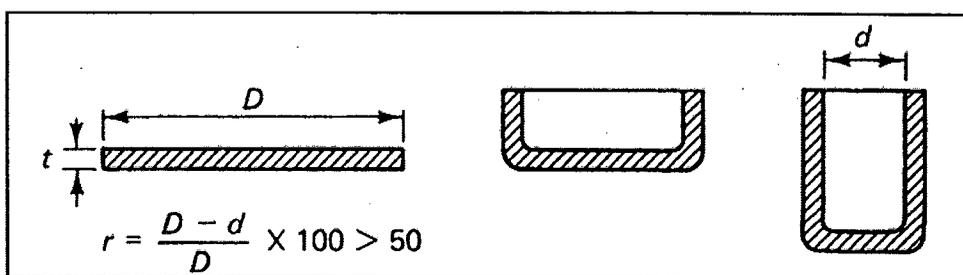
กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (Mechanics of Deep Drawing) เมื่อพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นกระบวนการ จากรูปที่ 2.11(ก) แผ่นวัสดุจะเริ่มถูกตัดที่บริเวณรัศมีขอบคาย และเมื่อเพิ่มภาระกระทำที่ตัวพื้นที่ให้มากขึ้น ทำให้แผ่น โลหะที่ถูกตัดบริเวณรัศมีคายจะถูกดึง (หรือคดกลับ) ให้เป็นเส้นตรงอยู่ระหว่างช่องว่างของพื้นที่และคาย เกิดเป็น ผนังหรือเปลือกของชิ้นงานรูปถ้วยเตี้ย ๆ หลังจากนั้น แผ่นโลหะที่อยู่ด้านนอกจะเริ่ม ไหลเข้าช่องเปิดคายมากขึ้น แต่เนื่องจากที่ผิวด้านล่างของแผ่น โลหะที่สัมผัสอยู่กับผิวคายทำให้เกิดแรงเสียดทานต้านทานการไหลของแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.11 กลไกการดึงขึ้นรูปลึก (ก) ช่วงแรกของการดึงขึ้นรูปซึ่งจะเกิดเฉพาะการตัด
(ข) บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในระหว่างกระบวนการ [6]

จากกลไกดึงที่กล่าวกระบวนการดึงขึ้นรูปประกอบไปด้วยช่วงการรับภาระลักษณะต่างๆ กันของแผ่นโลหะ คือ ช่วงการตัด ช่วงการดึงให้ตรง (หรือการตัดกลับ) ส่งผลให้การเสียรูปอย่างถาวรของแผ่นโลหะเกิดขึ้นไม่เท่ากัน จากรูปที่ 2.11(ข) แผ่นโลหะที่บริเวณปีก (หรือขอบชิ้นงาน) ก่อนไหลเข้าสู่ช่องเปิดตายจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวง ในขณะที่ส่วนที่ไหลผ่านบาดายจะมีความหนาลดลงเนื่องจากความเค้นแรงดึงในแนวรัศมี ส่วนที่บางที่สุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของผนัง ด้วยเหตุนี้ถ้าในระหว่างกระบวนการดึงขึ้นรูป ชิ้นงานมักจะเสียหายจากการฉีกขาดที่บริเวณ ผนัง ก้นถ้วยเป็นส่วนใหญ่

ในอุตสาหกรรมการผลิตถ้าต้องการชิ้นงานรูปถ้วยที่มีคุณภาพดี ไม่มีการฉีกขาดจะใช้ค่า r น้อยกว่า 50% ในกรณีที่ต้องการดึงขึ้นรูปลึกมาก (ค่า r มากกว่า 50%) จะทำการดึงขึ้นรูปสองครั้ง จากรูปที่ 2.12 ชิ้นงานที่ได้จากการดึงขึ้นรูปครั้งแรกจะใช้ค่า r ต่ำกว่า 50% จากนั้นจึงนำมาดึงขึ้นรูปซ้ำ ครั้งที่สองจะกำหนดที่ 20% และครั้งที่ 3 จะกำหนดที่ 13% ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ต้องการดึงขึ้นรูปซ้ำมากกว่า 3 ครั้ง ขึ้นไป ต้องนำชิ้นงานไปทำการ อบอ่อนทุกๆ 2 ครั้ง การดึงขึ้นรูป เสมอเพื่อขจัดผลจากความเครียดแข็ง และหลีกเลี่ยงการแตกร้าว และเสียหายของ ผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 การดัดขึ้นรูป และการดัดขึ้นรูปซ้ำ เมื่อค่า $r > 50\%$ [5]

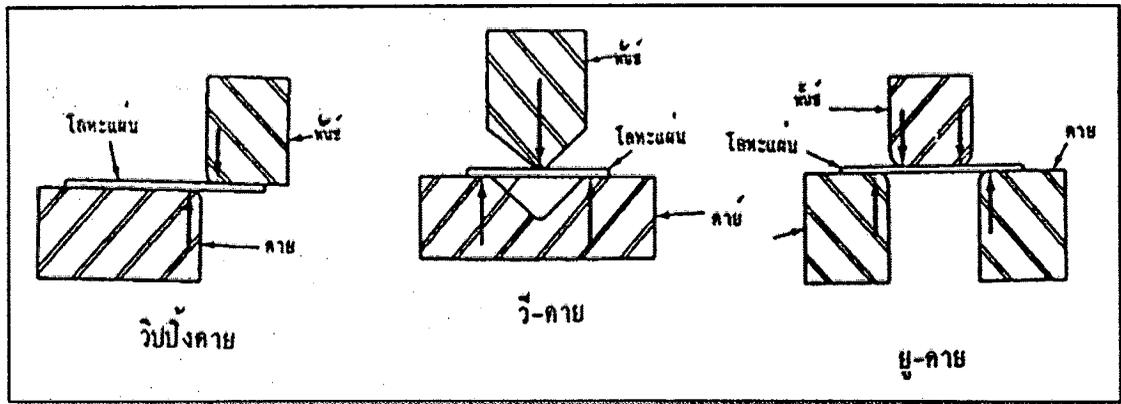
2.2.14 ทฤษฎีการขึ้นรูปงาน โลหะแผ่นโดยการดัดงอ [7]

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่า ขบวนการงอขึ้นรูป (bending) เป็นการทำที่ง่ายที่สุดที่ใช้ร่วมกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้โดยใช้เครื่องมือง่ายๆ ภายในบ้านก็ทำได้ ขบวนการงอขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลายๆ ขบวนการของขบวนการงอขึ้นรูปโดยการดัดงอ ซึ่งขบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปขึ้นงานที่ใช้ในบพนี้ ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการตัดขึ้นรูป (cutting) และขบวนการลากขึ้นรูป (drawing) เป็นอย่างมาก

1) ทฤษฎีการงอ (Bending Theory)

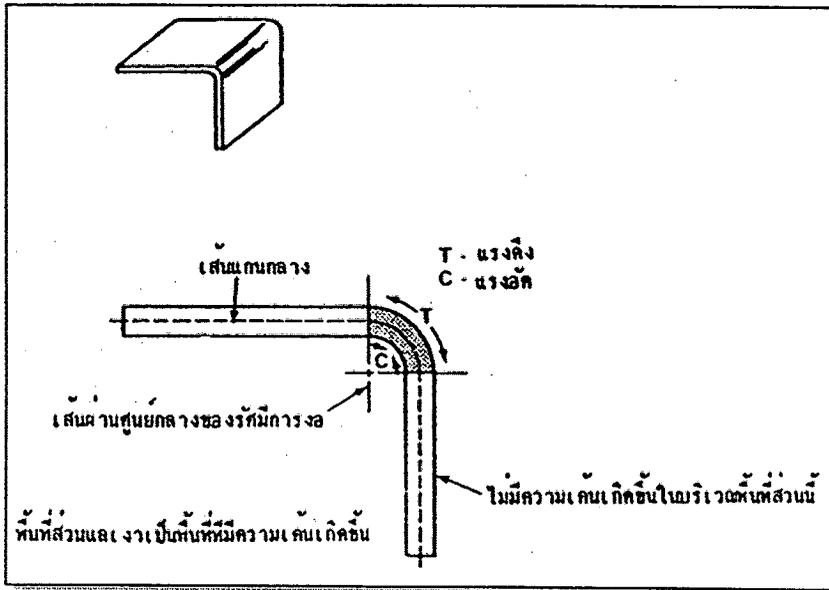
ในการขึ้นรูปโลหะโดยการงอขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงานทั้งนี้ เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้นเมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการงอจะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อยๆ ลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโลหะนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยึดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วย จากรูปที่ 2.13 นั้น เป็นการแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการงอบนคานชนิดต่างๆ กัน สำหรับวี-คาน (V-die) นั้นเราจะพบว่ามี การแผ่กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วน ยู-คาน (u-die) และวีปีง-คาน

(Wiping-die) นั้นนิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมาก และยู-คาย มักจะนิยมเรียกว่า ซาเน็ล คาย (channel die)



รูปที่ 2.13 แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการงอขึ้นรูป [7]

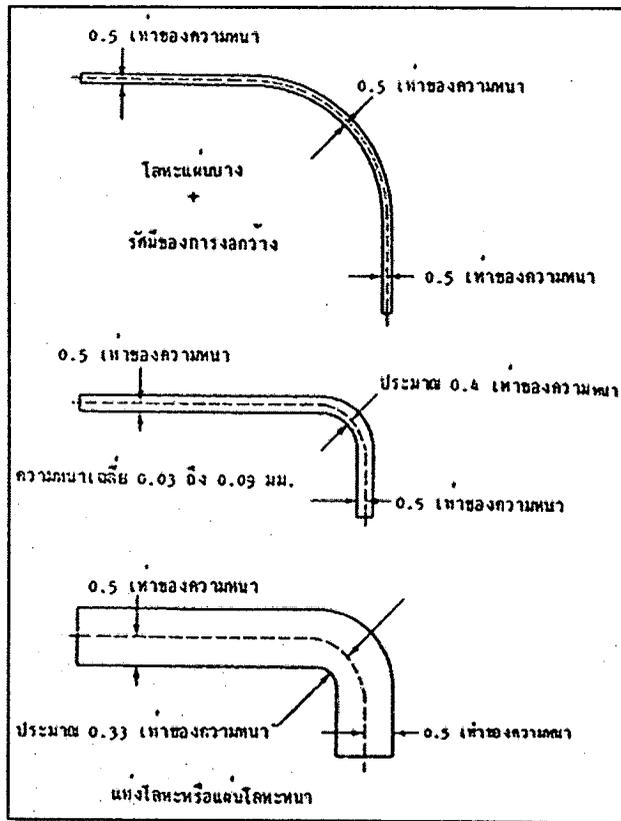
การงอ (bending) นั้นมีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้นจะไม่มี ความเค้นเกิดขึ้นเลย จากรูปที่ 2.14 นั้น เป็นการแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการงอมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการงอจะยืดออกแสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการงอจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการงอมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการงอ แต่ถ้ามีรอยย่น (wrinkle) ปรากฏขึ้นมันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการงอ



รูปที่ 2.14 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ [7]

2) เส้นแกนกลาง (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าที่ชิ้นงานนั้น ได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่งและอีกด้านหนึ่งนั้น ได้เกิดความเค้นอัดขึ้นตรงข้ามของส่วนทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุดตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อยๆ ลดลงๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์คือไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีมีความเค้นเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า “เส้นแกนกลาง” (neutral axis)



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งของเส้นแกนกลาง [7]

3) การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

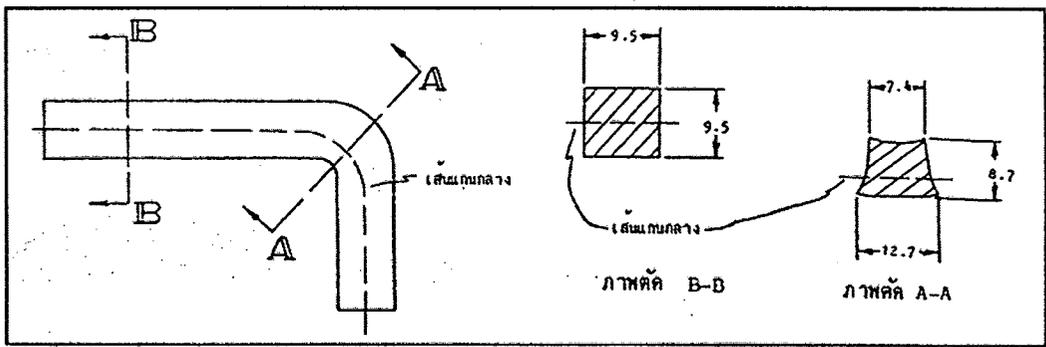
เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราอ่อนได้มีความเค้นเกิดขึ้นซึ่งมันจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่อ่อนมีขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.15 จากรูปเป็นการแสดงถึงการบิดงอของแท่งโลหะเมื่อได้รับการงอ

ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการดัดงอ มีดังต่อไปนี้

- ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมางอจะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก และจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านกว้างมากขึ้น

• ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมางอจะมีการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมากและไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เมื่อเรางอโลหะแผ่น โอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยยุบจะปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเรางอโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้เพราะว่าอัตราความกว้างน้อยต่อความหนามากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้าน การอัดตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การไหลของโลหะและการบิดงอ [7]

ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่างๆ คือ

- เมื่อรัศมีของการงอ (bend of radius) ยาวขึ้นจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- มุมของการงอ (degree of bend) แคบจะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- ถ้าเป็นการงอช่วงแคบ (narrow bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก
- ถ้าเป็นการงอช่วงกว้าง (wide bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- ถ้าเป็นโลหะแข็งจะมีการไหลตัวของโลหะทางด้าน การดึงตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย

• ถ้าเป็นโลหะที่อ่อนจะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการอัดตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยร่นได้ง่าย

2.2.15 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการดึง (Mechanical properties tension)

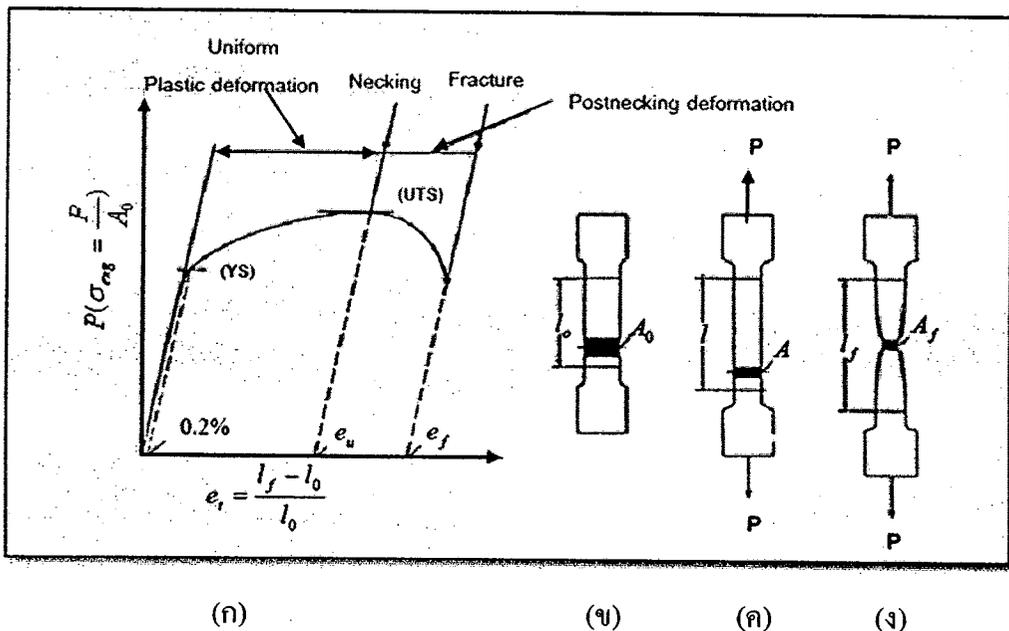
สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือ ความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรง มีหลายประเภทเช่น แรงใช้งาน (Service Load) แรงสถิต (Static Load) เป็นต้น

1) การทดสอบการดึง (Tension Test)

วิธีการหาสมบัติวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบการดึง (Tension Test หรือ Tensile Test) เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป จึงต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ASTM Standard E8 หรือมาตรฐานอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยสากล

2) เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Curve)

ในระหว่างการทดสอบการดึง ทั้งโหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืด จากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการกระจัด (Force-displacement Diagram) ดังรูปที่ 2.17 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า ที่ทดสอบในอุณหภูมิปกติ



รูปที่ 2.17 การทดสอบการดึง (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว (ข) ชิ้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม (ค) เปลี่ยนรูปอย่างพลาสติก - สม่าเสมอในช่วงความยาวทดสอบ

และ (ง) การคอดและขาด [2]

3) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm²

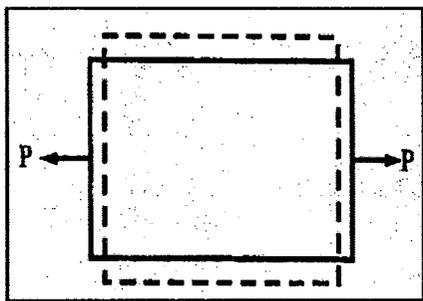
P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m² หรือ mm² หรือ

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดยในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

- ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่

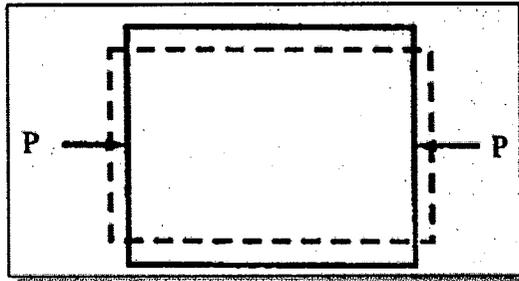
ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แรงดึง (Tensile) [2]

- ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับ

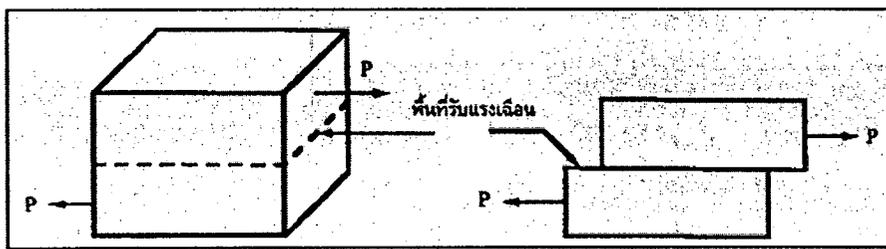
พื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แรงกด (Compression) [2]

- ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนาน

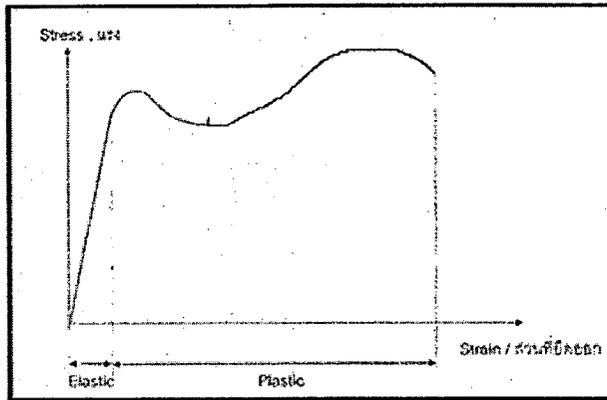
กับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูป มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือนดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แรงเฉือน (Shear) [2]

2.2.16 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) ดังรูปที่ 2.21 การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ



รูปที่ 2.21 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ [2]

1) การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยึดเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

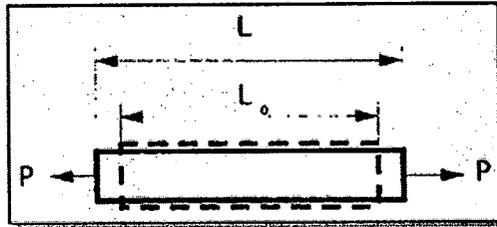
วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดจำกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดจำกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่า ความเครียดกึ่งยืดหยุ่นจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 2.22 ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ 2.2

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ e = ความเครียดเชิงเส้น
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_0$)
 L_0 = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



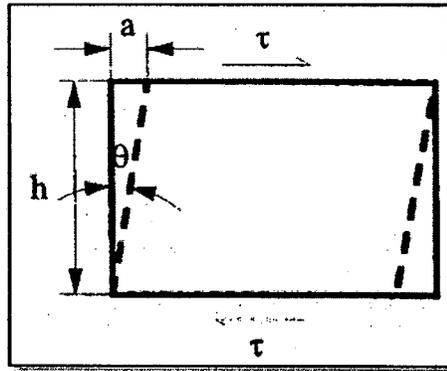
รูปที่ 2.22 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) [2]

- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำ

มีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังรูปที่ 2.23 ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการที่ 2.3

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.3)$$

เมื่อ γ = $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)
 a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)
 h = ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ = มุมที่เปลี่ยนไป

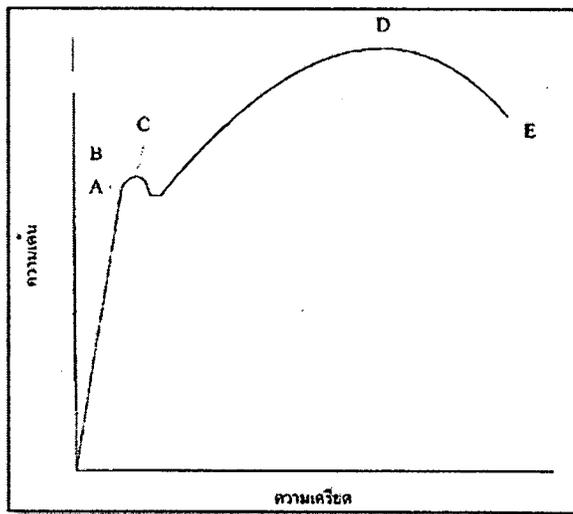


รูปที่ 2.23 ความเครียดเฉือน (Shear Strain) [2]

จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

2.2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.24 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.24 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [6]

2.2.18 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material)

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่ วัสดุได้รับแรงมากระทำจนเกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูนแรง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม ก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

1) สลิว (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย

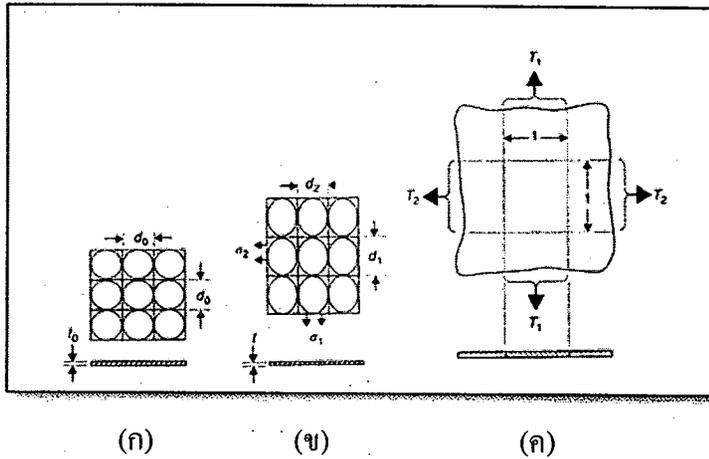
2) ทวินนิ่ง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากกระชากหรือ แนวของผลึกเกิดการถูกเฉือน ให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือเหมือนกันโดยที่ ทิศทางการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

3) ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรง มาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง

2.2.19 การวัดค่าอัตราความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นในระนาบความเค้น (Deformation of Sheet in Plane Stress) ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane stress) พิจารณา (Work hardening)

ของวัสดุ ซึ่งเข้ากำลังประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปใน จากรูปที่ 2.25 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 ดัง

รูปที่ 2.25 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนไปเป็นวงรี แกนของ Major คือ d_1 แกนของ Minor คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.25 (ข) ส่วนความหนา คือ t ดังรูปที่ 2.25(ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2



รูปที่ 2.25 ลักษณะตารางวงกลมกริดบนโลหะแผ่น (ก) ขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปกริดวงกลม (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างจะเปลี่ยนเป็นรูปวงรี ขนาดของแกนหลักคือ d_1 และขนาดแกนรอง คือ d_2 (ค) การดึง, T, หรือแรงส่งผ่านต่อหน่วยความกว้าง [6]

ค่าความเครียดสูงสุดของความเครียดหลักและความเครียดรองสามารถกำหนดโดยการวัดความเครียดบนแผ่นโลหะด้วยการใช้ กริดวงกลม โดยการพล็อตความเครียดหลักสูงสุดลงมาถึงความเครียดหลักต่ำสุด ซึ่งหาได้จากกริดวงกลมเปลี่ยนรูปเป็นวงรีที่เกิดการคอดและการแตกหลังการยืดแบบสองแกน โดยการพล็อตเส้นโค้งรอบๆบริเวณการดึงและการคอดโดยใช้การทดสอบทางเชิงกลที่แตกต่างกันอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานหลังการขึ้นรูป เกิดจากการคำนวณหาอัตราส่วนของรูปร่างวงกลมกริดที่เปลี่ยนตามแนวแกน ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\% \text{ ความเครียดหลัก} = \frac{\text{ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนหลักเดิม}}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}} \times 100$$

(Major strain)

$$\% \text{ ความเครียดตรง} = \frac{(\text{ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป} - \text{ความยาวแกนรองเดิม}) \times 100}{\text{ความยาวแกนหลักเดิม}}$$

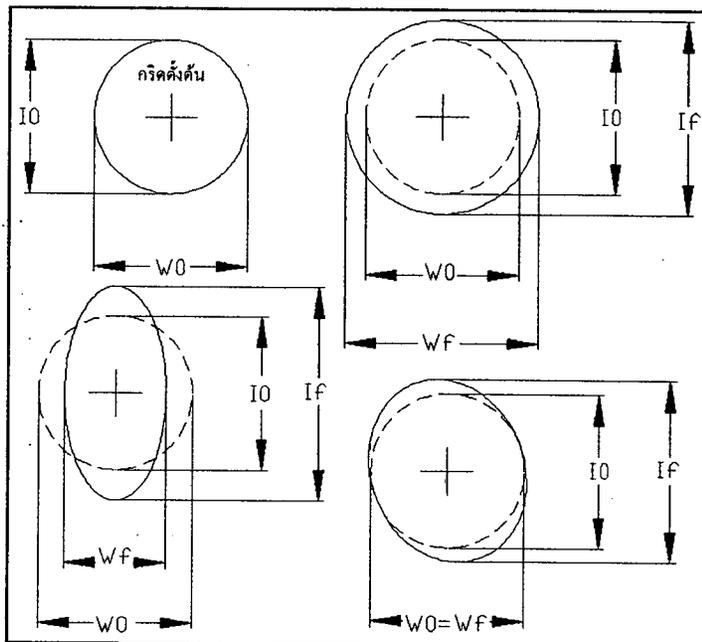
(Major strain)

โดย I_0 = ความยาวแกนหลักเดิม

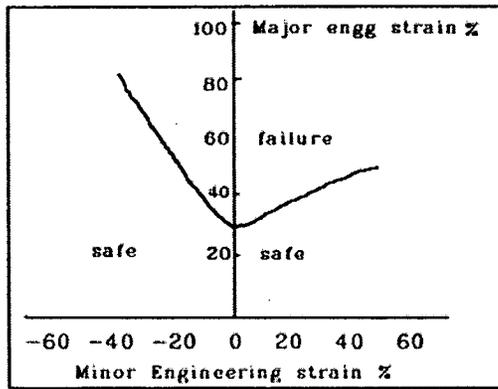
I_f = ความยาวแกนหลักที่เปลี่ยนไป

W_0 = ความยาวแกนหลักเดิม

W_f = ความยาวรองหลักที่เปลี่ยนไป

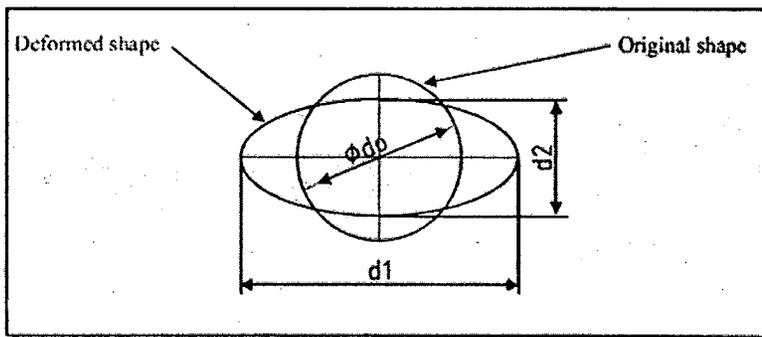


รูปที่ 2.26 การวัดอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดหลักและอัตราเปอร์เซ็นต์ความเครียดตรง โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป [6]



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างแผนภาพแสดงขีดจำกัดการขึ้นรูป [6]

ความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain) ความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายของกระบวนการเพื่อใช้ในการตรวจสอบกรณีของการเกิดแบบต่างๆวิเคราะห้ในพื้นที่วิกฤติของชิ้นงานหลักจากทำการขึ้น ดังรูปที่ 2.28 และเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.7)



รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงของกริดวงกลม

ค่าความเครียดหลัก (Major strain)

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.4)$$

ค่าความเครียดรอง (Minor strain)

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.5)$$

ค่าความเครียดที่ความหนา (Thickness strain)

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t_2}{t_0} \quad (2.6)$$

ค่าความเครียดเทียบเท่า (Equivalent strain)

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (2.7)$$

2.2.20 อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Factor in Fluencing the FLD)

อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปมีเส้นโค้งเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูปได้ถูกต้องและเที่ยงตรง ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จึงต้องระมัดระวังและปรับให้เข้าหากันกับการขึ้นรูปจริงในชิ้นส่วนอุตสาหกรรม[8]

1) ความหนาแผ่นโลหะนอกจากการใช้แผ่นโลหะคุณภาพสูงแล้ว การแก้ปัญหาอย่างง่ายที่สุดสำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ไม่ประสบความสำเร็จก็คือการเพิ่มความหนาแผ่นโลหะ

2) ขนาดกริด (Grid size) กริดวงกลมเริ่มต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ความเครียดที่วัดคือค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงบนระยะทางที่เท่ากับค่า d ดังนั้นในบริเวณใกล้เคียงของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น (Strain gradient) สามารถแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงขนาดกริดให้เล็กลงเพื่อกำหนดแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป การศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางบนค่าที่หาได้ของความเครียดหลักและ ความเครียดรองรับใช้รัศมีของกริดช่วง 0.5 - 5 mm. ผลลัพธ์ยืนยันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกริดวงกลมมีอิทธิพลอย่างมากกับความเครียดที่หาได้ในทิศทางของความเครียดที่สะสมเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ความเครียดที่อยู่ข้างๆ อาจหาได้โดยไม่ยอมรับทั้งหมด

3) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ทั้งหมดมีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสิ้น แต่สมบัติหลักๆที่สำคัญคือ ค่า n , r , m , เป็นต้น

4) ตัวแปรเสริมอื่นๆ (Other parameters) นอกจากอิทธิพลที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอิทธิพลอื่นๆ ที่มีผลกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน และอื่นๆ

2.2.21 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation) [9]

โครงสร้างจุลภาค หมายถึง โครงสร้างขนาดรูปร่างของเกรน (grain) และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่กระจายผสมอยู่ในโลหะสามารถส่องขยายดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายตั้งแต่ 50 เท่าขึ้นไป

ไปขึ้นงานทดสอบจะถูกเตรียมด้วยการตัดด้วยแผ่นตัด โดยห้ามมิให้โดนความร้อนระหว่างการตัด มากเกินไปหรือใช้แรงกดตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเสียรูป เพื่อสะดวกในการจับขึ้น ทดสอบมาทำการขัดให้ผิวเรียบจะมีการหล่อด้วยพลาสติกให้หุ้มขึ้นทดสอบแล้วจึงนำไปขัด กระดาษทรายและสารขัดละเอียดจนให้เกิดเป็นผิวมัน จากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมีทำให้เป็นรอย โครงสร้างที่ขอบเม็ดเกรนขึ้นหรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องแสง ไฟฟ้าไปกระทบผิวขึ้นทดสอบและสะท้อนออกมาแตกต่างกัน การมองตรวจสอบวิธีนี้จะให้ข้อมูล เกี่ยวกับโครงสร้างของเม็ดเกรนจากขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน เช่น เกรนหยาบหรือละเอียด การ เกิดระนาบคู่ (twin plane) รูปเข็ม รูปทรงกลมการแผ่กระจายและการเรียงตัวของเม็ดเกรน เช่น เทกซ์เจอร์ (texture) จากการรีด การแยกตัวของเม็ดเกรน

1) การหาประเภทของเม็ดเกรน โครงสร้างเม็ดเกรนจากการหล่อ การอบอ่อน ชุบ แข็ง การอบชุบ โชนคาร์บอน โชนไนไตรด์ โชนความถี่ของความแข็ง การเปลี่ยนรูปและการก่อตัวใหม่ที่เม็ดเกรน เช่น ในขณะขึ้นรูปขณะเย็น และการตกผลึกใหม่ ประเภทการแยกตัวและรูปร่างการแยกตัวของโครงสร้างที่เป็นอโลหะ

2) การวิเคราะห์โครงสร้างที่แปรสภาพ เช่น โครงสร้างแนวเชื่อมที่มีโชนโครงสร้างเปลี่ยนแปลง (transition structure zone)

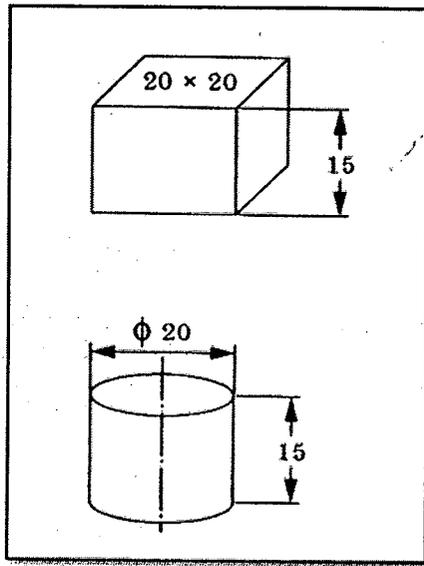
3) การวิเคราะห์ตำหนิของโครงสร้าง เช่น โชนแข็งที่ได้รับความร้อนมากเกินไป การแยกตัว การลดคาร์บอนบนผิวเหล็กในช่วงจุลภาค: รอยร้าวจุลภาค รู้อากาศ การฝังในของอโลหะที่ไม่พึงประสงค์ (เช่น ซี้ตะกรัน) การหาอัตราของรูพรุน (degree of porosity) ในชิ้นส่วนเล็กๆ หรือ สลักชั้นซ้อน

4) การวิเคราะห์การแปรสภาพของโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง ใช้หาขั้นของการขึ้นรูป (degree of forming) ในวัสดุที่กึ่งสำเร็จรูปพรรณที่ขึ้นรูปในขณะเย็นและของขึ้นส่วน ตามมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ที่ได้จัดแบ่งมาตรฐานกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ไว้ ดังนี้ กำลังขยาย (magnification) 50 : 1 100 : 1 200 : 1 500 : 1 1000 : 1 กำลังขยาย 50 : 1 (50 เท่าลงมา) สำหรับโครงสร้างมหภาค (macrostructure) กำลังขยาย 100 : 1 ใช้วิเคราะห์หากการฝังในของอโลหะ (เช่น การกระจาย การแยกตัวของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเทา รีวรอยซี้ตะกรัน (slag streak) ในเหล็กกล้า สำหรับกำลังขยาย 500 : 1 และกำลังขยาย 1000 : 1 จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเป็นพิเศษ

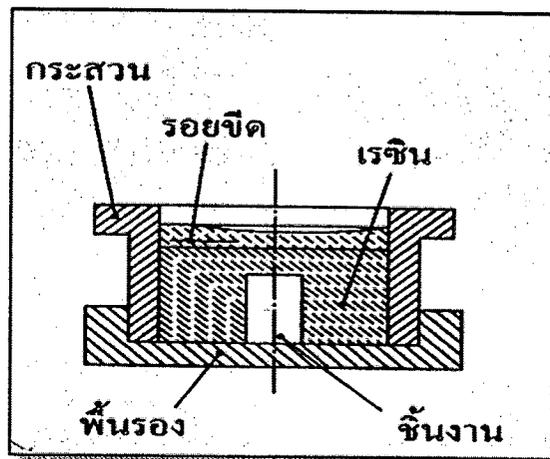
2.2.22 การเตรียมขัดผิวขึ้นงานทดสอบ

การเตรียมจะกระทำโดยการตัด กรณีเป็นวัสดุแท่ง (เหล็กกล้า โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก) ด้วยการใช้น้ำกัดหรือเลื่อยตัด หล่อเย็นด้วยน้ำหรือน้ำมันหล่อเย็น กรณีโลหะแผ่นให้ตัดขวางกับ

แนวเชื่อม กรณีเหล็กกล้าชุบแข็ง เหล็กหล่อให้ใช้แผ่นตัดทำจากคอร์รันดัม ขนาดชิ้นงานมีขนาด ดังรูปที่ 2.29 สำหรับชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 mm โลหะแผ่นหนาต่ำกว่า 10 mm หรือชิ้นงานเล็กจะต้องมีการหล่อเรซินหุ้มชิ้นงานให้มีขนาดโตขึ้นพอเหมาะกับการจับ โดยโตประมาณเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ดังรูปที่ 2.30 เรซินที่ใช้ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ชนิด คือ เรซินและสารทำให้แข็ง (hardener) โดยนำมาผสมเข้าด้วยกัน (เรซินจะเหลวผสมสารให้แข็ง จะเป็นของเหลวหรือของแข็ง) โดยเวลาแข็งตัวจะอยู่ระหว่าง 6 ถึง 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.29 ขนาดชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุดภาค [9]



รูปที่ 2.30 การเทเรซินหุ้มชิ้นทดสอบ [9]

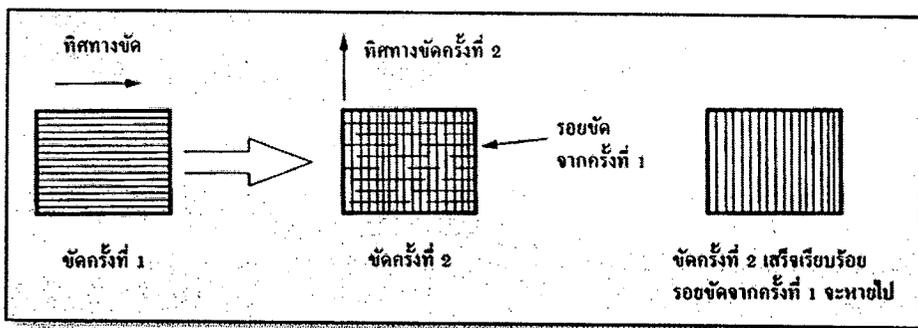
ตารางที่ 2.2 เรซินที่ใช้ในการเทหุ้มยึดขึ้นทดสอบที่สำคัญ

ชนิดเรซิน	การจับยึด ชิ้นงาน	การหดตัว	ความแข็ง	เวลาแข็งตัว	สีที่มองเห็น
อีพอกซี	ดีมาก	ต่ำ	แข็งมาก	ช้าถึงช้าปาน กลาง	ใส สีเหลือง ฟางข้าว
โพลีเอสเตอร์	ดี	ปานกลาง	ปานกลาง	ช้าถึงช้าปาน กลาง	ใสสว่าง เหมือนน้ำ
อะครีลิก	ดี	สูง	ปานกลาง	ช้า	ไม่โปร่งแสง

หมายเหตุ สำหรับในห้องปฏิบัติการ จะนิยมใช้เรซินอีพอกซี

2.2.23 การขัดผิวละเอียด (Fine Grinding)

การขัดชิ้นงานจะใช้กระดาษทรายขัดเหล็ก (ทำด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์) เม็ดเบอร์ 220, 320, 40 และ 600 ตามลำดับ ขัดด้วยน้ำโดยในกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้ายจะต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงาน แล้วหมุนชิ้นงานไป 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไป ดังรูปที่ 2.31

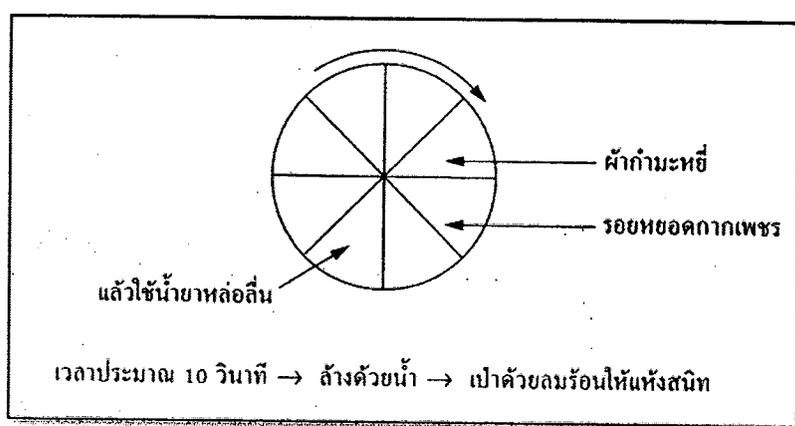


รูปที่ 2.31 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [9]

ในการขัดจะขัดบนแท่นที่มีความเรียบ เช่น บนแผ่นกระจกหนา (หากผิวไม่เรียบจะทำให้ภาพจากการวิเคราะห์โครงสร้างผิดพลาดได้) จนปราศจากผิวรอยข่วนเล็กๆ กระดาษทรายขัดผิวและวิธีการที่กล่าวมานี้ ใช้ในการขัดผิว สำหรับโลหะเหล็ก โลหะที่มีทองแดงเป็นหลัก แมกนีเซียม แมกนีเซียมเจือ และส่วนเจือจากตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี

2.2.24 การขัดผิวมัน (Polishing)

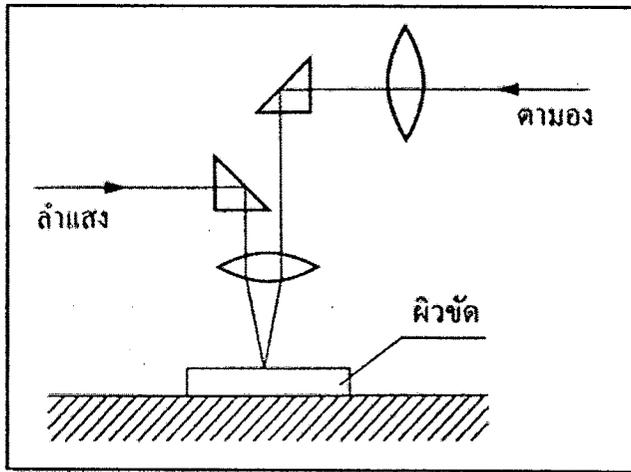
หลังจากขัดกระดาษทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดบนผ้าสักหลาด เป็นงานหมุนขับด้วยมอเตอร์ (polisher) ความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที สารที่ใช้ในการขัดประกอบด้วย น้ำยาหล่อลื่น (เป็นส่วนผสมของน้ำ 400 ซีซี น้ำมันซลูเบิด (soluble) 10 ซีซี กรณีที่เป็นเหล็กแข็งจะใช้เพสต์กากเพชร (diamond pastes) ที่มีขนาดเม็ด 0,1 ถึง 0,4 μm หยอดลงบนงานขัดก่อน แต่โดยปกติจะนิยมใช้ผงขัดอะลูมินา (aluminium oxide) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) โครมิกออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ หล่อลื่นด้วยน้ำ ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 2.32 การใส่สารขัดบนผ้าสักหลาด [9]

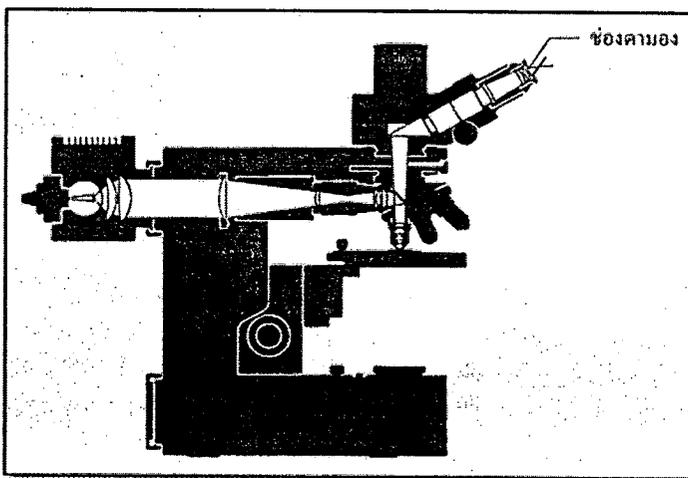
ผงอะลูมินาที่ใช้โดยทั่วไปจะมีขนาดเม็ดระหว่าง 0,3 – 1,5 μm เป็น α -อะลูมินา ใช้ขัดในตอนเริ่มต้น เมื่อจะขัดผิวเรียบสำเร็จจะใช้ γ -อะลูมินาที่มีขนาดเล็กประมาณ 0,05 μm การกัดผิวงานด้วยกรด (etching) หลังการขัดมันแล้วจะนำมาล้างทำความสะอาดด้วยเอทิล หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 96% แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นจะนำชิ้นงานทดสอบมาทำการกัดผิวด้วยกรด กรดจะกัดผิวงานเป็น 2 ลักษณะ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

1) กัดกรดตำแหน่งขอบเม็ดเกรนให้เป็นร่อง (เป็นบริเวณที่เม็ดเกรนทุก 2 เม็ดมาชนกัน) ดังนั้นลำแสงที่ฉายตกกระทบในร่องจึงเกิดเป็นเงาดำ (ไม่สะท้อนกลับ) เป็นเส้นขอบเม็ดเกรนให้เห็นปรากฏในช่องตามอง ดังรูปที่ 2.33

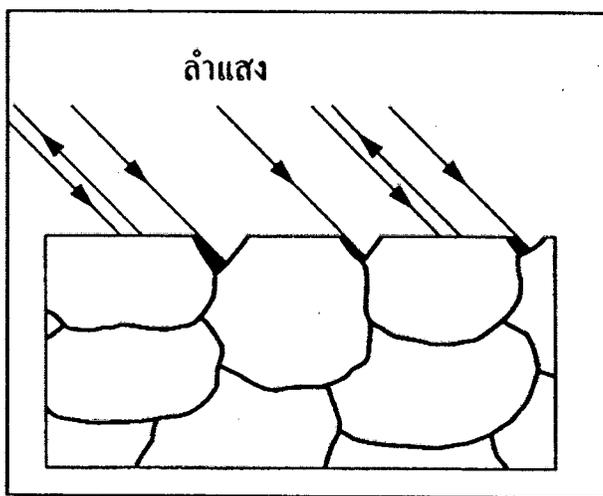


รูปที่ 2.33 หลักการฉายแสงและการมองในกล้องจุลทรรศน์ [9]

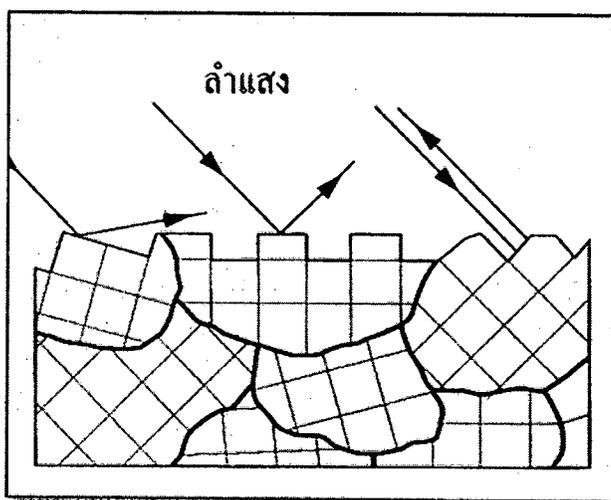
2) การกั้ดตำแหน่งผิวหน้าเม็ดเกรนทำให้เกิดสีต่างกัน ในเม็ดเกรน ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจาก สารกั้ดผิวจะทำให้เกิดออกไซด์ชั้น และก็เป็นไปได้ที่ทุกเม็ดเกรนถูกทำให้เกิดความหยาบ ทำให้การ สะท้อนของลำแสงแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.34 แสดงลำแสงที่ฉายในกล้องจุลทรรศน์ตามหลักรูปที่ [9]



รูปที่ 2.35 การกั้ดตำแหน่งขอบเม้ดเกรน [9]



รูปที่ 2.36 กรดกั้ดตำแหน่งผิวหน้าเม้ดเกรน [9]

จึงสรุปได้ว่าการใช้กรดกั้ดผิวงานจะทำให้สามารถมองเห็นโครงสร้างพื้นฐาน (matrix) ของเม้ดเกรนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ผิวทดสอบบางชนิด เช่น เหล็กหล่อเทาจะไม่มีกรดกั้ดกรดบนผิว เนื่องจากในบางครั้งไม่มีความจำเป็นที่จะดูโครงสร้างพื้นฐาน แต่ต้องการดูชนิดหรือรูปร่างและขนาดของเกล็ดกราไฟต์เท่านั้น

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของกรดที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน ASTM [10]

composition			Proceduer	Copper or copper alloy
FeCl ₃ , g	HCL,mL	H ₂ O,mL	Immersion or swabbing ; etch	Coppers, brasses, bronzes, aluminum
5	50	100	lightly	Bronze ; darkens β
20	5	100	Or by successive	phase in brass; gives
25	25	100	light etches to	contrast following
1	20	100	required results	dichromate and other
8	25	100		etches
5	10	100		

2.2.25 การวัดขนาดความโตเม็ดเกรน

ขนาดความโตเม็ดเกรนมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ เช่น ความแข็ง ความเค้นครากและ ความต้านแรงดึงด้วยเหตุนี้ความรู้เกี่ยวกับขนาด และการกระจายของเม็ดเกรนจึงสามารถบ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างมาก ส่วนมากแล้วจะมีการหาค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดเกรน เพื่อพัฒนาวิธีการมาตรฐานต่อไป

1) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบวงกลม ดังรูปที่ 2.37 (ก) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ขัดผิวแล้วที่เขียนวงกลมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง D และมีพื้นที่วงกลม $A = \pi \times D^2 / 4$ จากนั้นจะมีการนับจำนวนเม็ดเกรนเต็มรูปที่อยู่ในวงกลมและจำนวนเม็ดเกรนที่ถูกเส้นรอบวงลากผ่าน n_R คำนวณ $p = 0.67$ เป็นจำนวนรวม $Z = n + 0.67 n_R$ ที่เม็ดเกรนอยู่ในพื้นที่วงกลม ภาพที่เห็นมีกำลังขยาย V จะได้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดเม็ดเกรน ดังสมการที่ 2.8

$$\bar{A} = \frac{A \times 10^6}{V^2 \times Z} = \frac{A \times 10^6}{V^2 (0.67n_R + n)} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.8)$$

เมื่อ A มีหน่วย mm^2 ค่าเฉลี่ยของความโตเม็ดเกรน คือ d คำนวณจาก

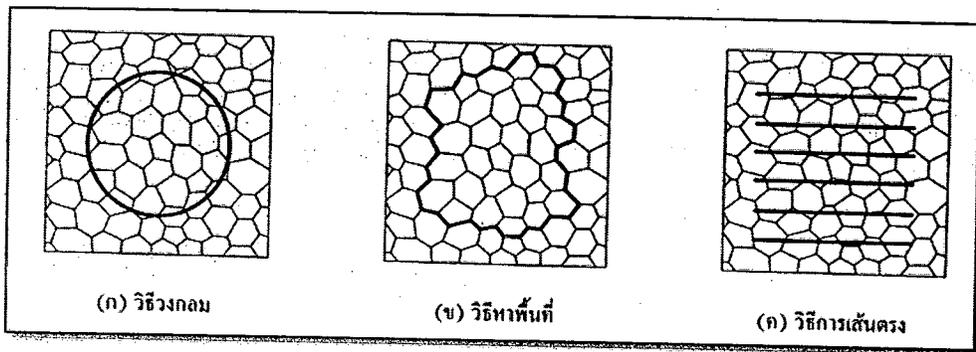
$$d = \sqrt{\bar{A}} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.9)$$

2) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบหาพื้นที่ ดังรูปที่ 2.37 (ข) จะมีการขีดเส้นตามแนวช่วงของเม็ดเกรนที่มีมุมเป็นเหลี่ยมเกือบเป็นมุมฉาก และขนาดพื้นที่ A จะหาด้วยวิธีการระนาบเลขาคณิต (plane geometry) จากจำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกขีดด้วย n จะสามารถคำนวณพื้นที่เฉลี่ยของเม็ดเกรน \bar{A} ได้ ดังสมการที่ 2.10

$$\bar{A} = A \times 10^6 / n \cdot V \quad (2.10)$$

n = จำนวนของเม็ดเกรน

V = กำลังขยาย (เท่า)



รูปที่ 2.37 การหาขนาดความโตเม็ดเกรน [9]

จากสมการที่ (2.10) สามารถนำไปแทนใน (2.9) เพื่อหาขนาดความโตเม็ดเกรนได้

3) วิธีการหาขนาดความโตเม็ดเกรน จากรูปที่ 2.37(ค) จะมีการขีดเส้นตรงความยาว L (mm) ตามจำนวนเม็ดเกรน Z ต่อตารางนิ้ว จำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกเส้นตรงตัดผ่าน n_x และกำลังขยาย V จะได้สมการความโตเม็ดเกรน ดังสมการที่ 2.11

$$d = L \times Z \times 10^3 / (n_x - 1) V \quad [\mu\text{m}] \quad (2.11)$$

L = ความยาวของขีดเส้นตรง

Z = จำนวนเม็ดเกรน ต่อตารางนิ้ว

V = กำลังขยาย (เท่า)

โดยปกติจะใช้วิธีลากเส้นตรง 5 ถึง 10 วิธีเส้นตรงที่ลากผ่านเม็ดเกรนส่วนใหญ่จะไม่ตัดผ่านส่วนที่ยาวที่สุดของเม็ดเกรน ด้วยเหตุนี้ค่าเฉลี่ยที่ได้จะเล็กกว่าความเป็นจริง สมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ได้พัฒนาวิธีการพิเศษที่ใช้ในการหาขนาดความโตเม็ดเกรนโดยใช้จำนวน Z ต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า เป็นพื้นฐานในการจัดแบ่งขนาดความโตของเม็ดเกรน โดยเบอร์เกรด N = ขนาดความโตเม็ดเกรน (ASTM) จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13

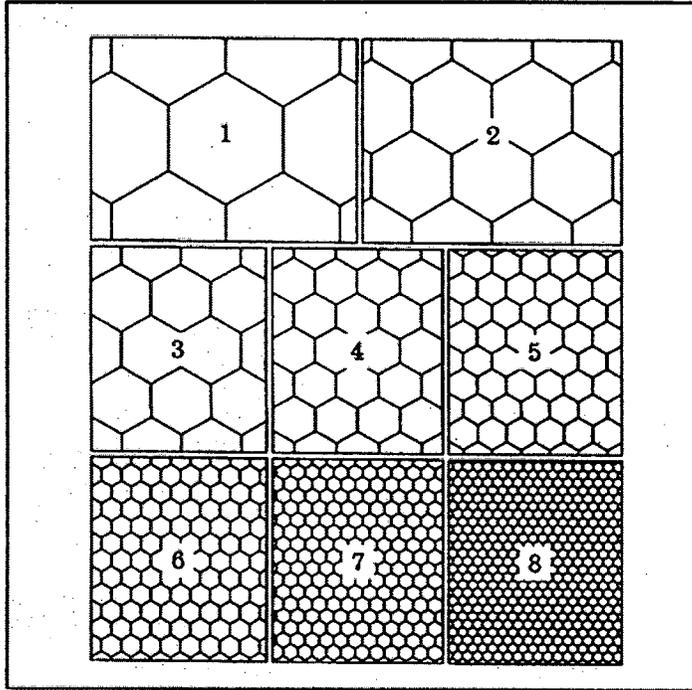
$$Z = 2^{n-1} \quad (2.12)$$

$$N = (\lg Z / \lg 2) + 1 \quad (2.13)$$

ตารางที่ 2.4 การกำหนดขนาดความโตของเม็ดเกรนตาม ASTM และจำนวนเม็ดเกรนต่อ mm^2

ขนาดความโตของเม็ดเกรน ตาม ASTM Type		จำนวนเม็ดเกรน ต่อ ตร.นิ้ว ขยาย 100 เท่า Z	จำนวนเม็ดเกรน (บนผิวขัดจริง) ต่อ mm^2
เม็ดเกรนหยาบ	-1	0,25	4
	0	0,50	8
	1	1	16
	2	2	32
	3	4	64
	4	8	428
	5	16	256
เม็ดเกรนละเอียด	6	32	512
	7	64	1024
	8	128	2048
	9	256	4096
	10	512	8192
	11	1024	16384
	12	2048	32768

จากตารางที่ 2.3 จะรวมขนาดเบอร์ความโตของเม็ดเกรนและจำนวนเม็ดเกรนต่อตารางนิ้วและตารางมิลลิเมตร mm^2 เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.38 จะแสดงขนาดความโตของเม็ดเกรนตามเบอร์ต่างๆ ด้วยการเปรียบเทียบกับกำลังขยาย 100 เท่าของชิ้นงานที่ขัดผิว [9]



รูปที่ 2.38 การหาขนาดความโตเม็ดเกรนตามเบอร์ของ ASTM [9]

ขนาดของเม็ดเกรนที่มองเห็นจากการขัดผิวมันจะขึ้นอยู่กับ การเลือกของพื้นที่ตัดมาทำการขัดผิวของวัสดุแล้วแต่ตำแหน่งของเม็ดเกรนที่อ้างอิงพื้นที่ที่ถูกตัดในการส่องกล้องขยาย โครงสร้างที่จะสามารถเปรียบเทียบได้ตามรูปมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.38

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบใหม่ และยังมีปัจจัยต่างๆ ในการทำงานที่จะต้องศึกษา เพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพและเป็นระเบียบแบบแผนในการทำงาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการ

ทำงานของกระบวนการ โดยมีงานวรรณกรรมที่น่าสนใจในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ดังนี้

P.A.F.Martin , N.Bay , M Skjoedt , M.B Silva [11] ได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์รูปแบบ การขึ้นรูปขึ้นพื้นฐานของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และอธิบายผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยที่ในเวลา สองถึงสามปีที่ผ่านมา โดยใช้พื้นฐานรูปแบบในการวิเคราะห์ แบบ membrane โดยมีแรงเสียดทานในหลายแนวแกนในแนวระนาบ

Kathryn Jackson ,Julian Allwood [12] ได้ทำการศึกษา ลักษณะของกลศาสตร์ในการขึ้นรูปของกระบวนการขึ้นรูป แบบต่อเนื่อง โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และ กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสสองจุด และนำผลต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบกัน

F.Micari , G.Ambrogio , L.Filice [13] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ ความเที่ยงตรงของรูปร่างและขนาดในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด โดยพบว่า ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปกับสัดส่วนความหนาของวัสดุ ที่แปรผันกัน มีผลต่อ ความเที่ยงตรงของรูปร่างและขนาดที่ได้ทำการขึ้นรูป

Joost Duflou, Yasemin Tunckol ,Alex Szekeres, Paul Vanherck [14] ได้ทำการทดลองศึกษา การวัดแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด ด้วยปัจจัยในลักษณะต่างๆเช่นระยะการกดในแนวแกน Z,ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ,ความหนาของวัสดุ, มุมในการขึ้นรูป,รูปทรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและสารหล่อลื่นประเภทต่างๆ

J.Kopac , Z.Kampus [15] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องกัด CNC ในกระบวนการขึ้นรูป และควบคุมเส้นการเดินทางของอุปกรณ์ที่ใช้การขึ้นรูปโดยระบบ Computer aids Manufacturing พบว่า อุปกรณ์จับยึดในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง ควรเปลี่ยน ไปโดยมีความสัมพันธ์กันกับรูปร่างพื้นฐานที่ทำการออกแบบไว้และ แสดงถึงความสัมพันธ์ของมุมในการขึ้นรูปที่มีผลต่อความลึกของ ชิ้นงาน อีกด้วย

J. Jeswiet [16] ได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด และได้นำระบบ คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต มาช่วยในกระบวนการทำงาน ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

L. Fratini G Ambrogio, R Di Lorenzo, L. Filice, F. Micari [1] ได้ศึกษาการเลือกใช้วัสดุแผ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเครียดแข็งและ ค่าเปอร์เซ็นต์ การยึดตัวของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุด

M. Durante, A. Formisano, A. Langella, F. Mimola Capece Minutolo [17] ได้ทำการศึกษาถึงทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ ของกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยการสัมผัสเป็นจุดด้วยการกำหนดตัวแปรในการทดสอบด้วย ความเร็วละทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ พบว่าความเร็วในการหมุนของอุปกรณ์มีผลต่อค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะแผ่น