

บทที่ 2

แนวความคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

ในส่วนของทฤษฎีที่จำเป็นต้องศึกษาให้แน่ชัดเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัย จำแนกได้เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งจะต้องทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่องานและต่อตัวแปรผันตามที่จะทำการวัดค่าในการทดลองในครั้งนี้

2.1 แนวคิด

เนื่องจากกรรมวิธีการกดรีดขึ้นรูปโลหะ (Ironing) ยังไม่เป็นที่แพร่หลายและยังไม่ค่อยมีการศึกษามากนักในประเทศไทย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะนำไปเผยแพร่ในสถานประกอบการและภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งกรรมวิธีการกดรีดขึ้นรูปโลหะ นั้นยังเป็นกรรมวิธีการอีกกรรมวิธีการหนึ่งที่มาจากการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เพราะกรรมวิธีการกดรีดขึ้นรูปโลหะนั้นสามารถทำการลากขึ้นรูปชิ้นงานให้มีความลึกมากกว่าการลากขึ้นรูป แบบทั่วไป ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวัสดุ SPCC, SUS304, SUS430, SPCEN, ทองเหลือง และอลูมิเนียม เพื่อที่จะได้ทราบถึงค่าในการทดลองการกดรีดขึ้นรูปโลหะว่าเปอร์เซ็นต์ความหนาของผนังชิ้นงานลดลงได้สูงสุดกี่เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม และสถานประกอบการในปัจจุบัน ดังนั้นจึงเกิดความคิดที่จะนำคุณสมบัติของการลดขนาดความหนาของผนังชิ้นงาน และเพิ่มความลึกของชิ้นงานของวัสดุที่ใช้ในการทดลองโดยใช้กรรมวิธีการกดรีดขึ้นรูปโลหะ

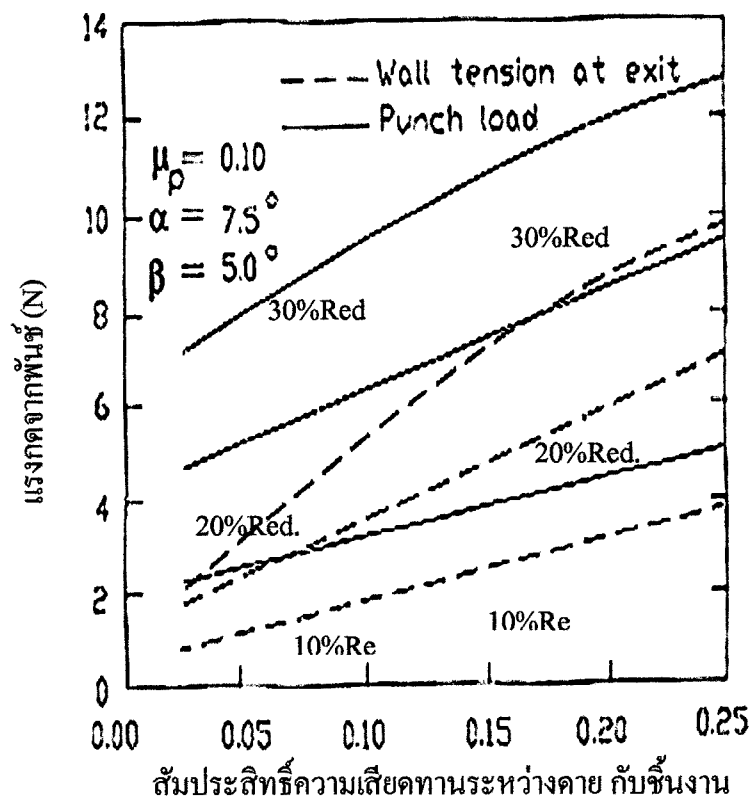
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้แบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

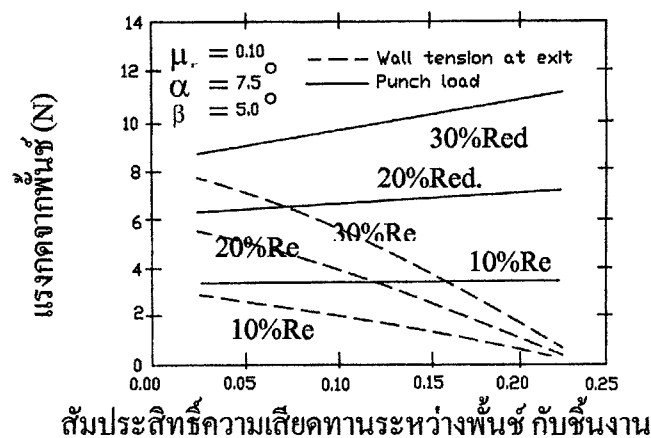
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแรงที่ใช้ในกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน

Chang และ Wang [8] ได้ศึกษารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์กรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงานโดยใช้วิธี Slab Method ซึ่งเป็นสมการที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนภาพที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous Deformation) และพิจารณาปรากฏการณ์ การคืนตัวในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Recovery) ของตัวหลังกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน เพื่อทำนายแรงกดของพunch (Punch Load) และสัมประสิทธิ์ความเสียหายโดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

นอกจากนั้นยังได้วิเคราะห์อิทธิพลของมุมไหลเข้าแม่พิมพ์ อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และการคืนตัวในช่วงยืดหยุ่นของชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อ อัตราส่วนการลดความหนาผนังสูงขึ้นจะทำให้แรงกดจากพื้นที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจาก พื้นที่ผนังด้านข้างของถ้วยที่ถูกบีบอัดด้วยผิวของคายในแนวรัศมีมีพื้นที่ที่มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณในการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของถ้วยสูงขึ้น ส่งผลให้แรงกดจากพื้นที่สูงขึ้นตามอัตราส่วนการลดความหนาผนังด้วยเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างคายกับชิ้นงาน ที่มีผลต่อแรงดึงในผนังชิ้นงาน (Wall Tension at Exit) พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างคายกับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Error! Not a Valid Link. เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 2.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดจากพื้นที่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นที่กับชิ้นงาน พบว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นที่กับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกดจากพื้นที่สูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน แต่แรงดึงในผนังชิ้นงานกลับมีค่าลดลงดังภาพที่ 2.2 ดังนั้นในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกรรมวิธีลดความหนาผนัง ควรใช้สารหล่อลื่นระหว่างคายกับชิ้นงาน เพื่อลดความเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป และไม่ควรใช้สารหล่อลื่นระหว่างพื้นที่กับชิ้นงาน

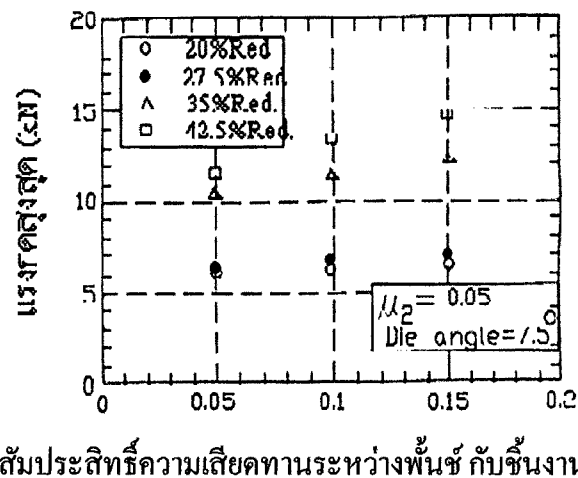


ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดจากพื้นที่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างคายกับชิ้นงาน [8]

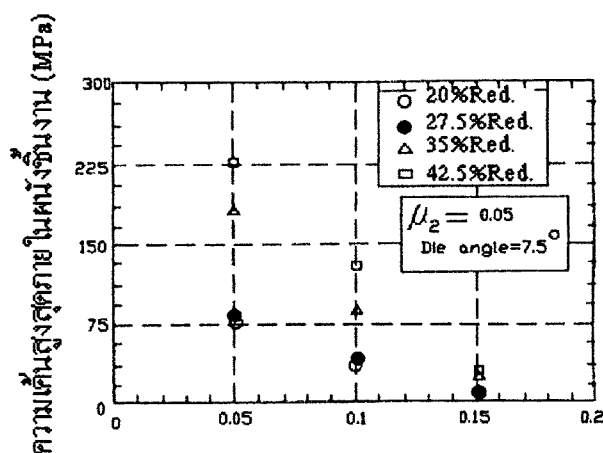


ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดจากพunch กับสัมประสิทธิ์ความเค้นระหว่าง พunch กับ ชิ้นงาน [8]

Tufekci และคณะ [14] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน โดยใช้ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Deform 2d) เพื่อใช้ในการพิจารณาอิทธิพลของสัมประสิทธิ์ความเค้นระหว่างพunch กับชิ้นงาน แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป (Maximum Punch Load) ความเค้นสูงสุดภายในผนังชิ้นงาน (Maximum Axial Stress) อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน และอิทธิพลของมุมคาย (Die Angle) ซึ่งมีมุม 7.5 องศาและ 10 องศา จากผลการทดลองพบว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความเค้นระหว่างพunch กับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกดจากพunch สูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกันดังภาพที่ 2.3 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความเค้นระหว่างพunch กับชิ้นงานที่มีผลต่อความเค้นสูงสุดภายในผนังชิ้นงานพบว่าสัมประสิทธิ์ความเค้นระหว่างพunch กับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเค้นสูงสุดภายในผนังชิ้นงานมีค่าที่ลดลงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และ Wang [8]



ภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความเค้นพunch กับ ชิ้นงาน [14]



สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับชิ้นงาน

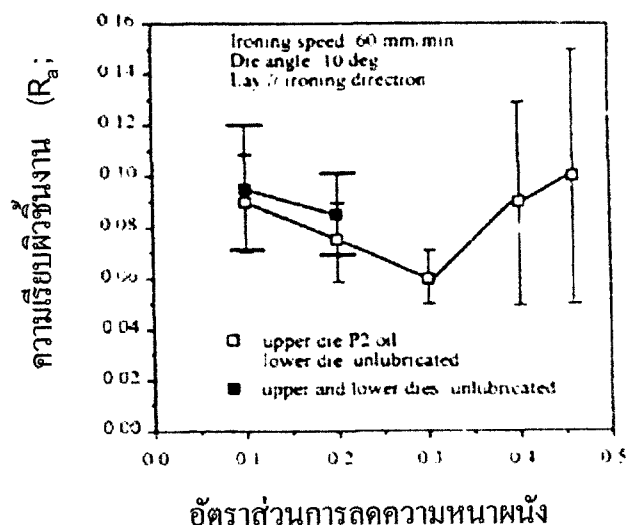
ภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดภายในชิ้นงาน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับชิ้นงาน [14]

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของมุมคาย ที่มีผลต่อแรงขึ้นรูปชิ้นงานพบว่ามุมคายที่เหมาะสมประมาณ 10 องศา จะใช้แรงในการลดความหนาผนังที่น้อย และความเค้นสูงสุดภายในผนังชิ้นงานก็จะน้อยด้วยเช่นกัน แต่เมื่อมุมคายที่น้อยหรือมากกว่ามุมคายที่เหมาะสมจะใช้แรงในการลดความหนาผนังที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากมุมคายมากแรงส่วนใหญ่จะเป็นผลมาจาก Redundant Work ที่พยายามทำให้เนื้อของวัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่มุมคายน้อยแรงส่วนใหญ่จะเป็นผลมาจากความเสียดทานของพื้นผิวสัมผัสระหว่างคายกับชิ้นงาน และพื้นผิวกับชิ้นงาน เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของคู่วัสดุสัมผัสทั้งสองระหว่างพื้นผิวกับชิ้นงาน และคายกับชิ้นงานมีพื้นที่เพิ่มขึ้น

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเรียบผิวของชิ้นงาน

Kuan และ Wei [9] ได้ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดความหนาผนังชิ้นงาน ด้วยการเปลี่ยนสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน ความเร็วที่ใช้ในการลดความหนาผนัง และการจัดวางทิศทางการหล่อลื่น (Transverse or Longitudinal Ironing) แนวการรีดของการลดความหนาผนังชิ้นงาน วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียม A1050-O ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยใช้เงื่อนไขในการทดลองดังนี้ ความเรียบผิวคายด้านบน(Upper Die) $R_a = 0.039 \mu\text{m}$ ความเรียบผิวคายด้านล่าง(Lower Die) $R_a = 0.038 \mu\text{m}$ และความเรียบผิวชิ้นงานเริ่มต้น $R_a = 0.14 \mu\text{m}$ ซึ่งคายด้านบนและคายด้านล่างทำมาจากวัสดุ SKD 11 ความแข็ง 60 HRCให้ความเร็วในการลดความหนาผนังอยู่ระหว่าง 0.0167 ถึง 19 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งใช้สารหล่อลื่นบนผิวสัมผัสระหว่างคายตัว

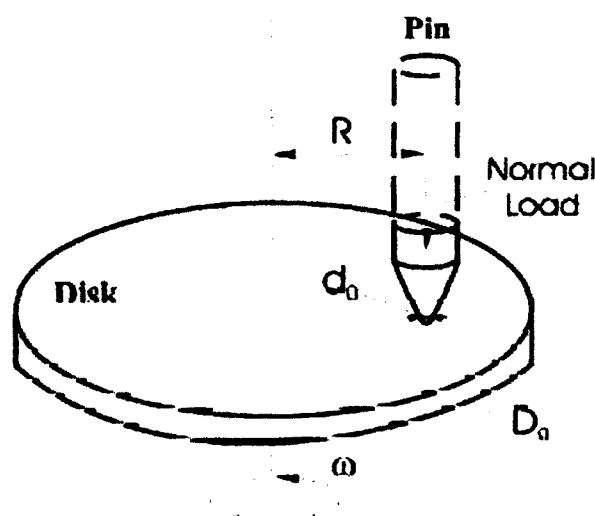
บนกับชิ้นงาน และไม่ใช่สารหล่อลื่นบนคานตัวล่างกับชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเรียบผิวชิ้นงานดีขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน จนกระทั่งถึงอัตราส่วนการลดความหนาผนังที่ 30% หลังจากนั้นความเรียบผิวชิ้นงานที่ได้จะมีแนวโน้มที่หยาบขึ้น ดังภาพที่ 2.5



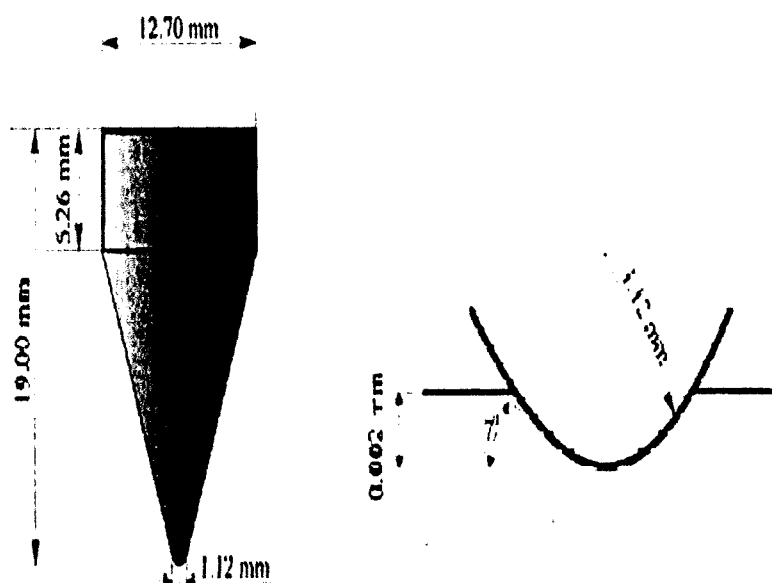
ภาพที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดความหนาผนังกับความเรียบผิวชิ้นงาน[9]

Deng และ Lovell [10] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแรงกด (Normal Load) สารหล่อลื่น ความเร็วในการกลิ้งไถ และความเรียบผิวของแผ่นงาน ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้งไถระหว่างผิวที่แข็ง (Tool Or Die) กับผิวที่อ่อน (Work Piece) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือพิน ออน ดิสก์ (Pin On Disk) ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งพินทำมาจากวัสดุเกรด 1045 ลักษณะส่วนปลายเป็นรูปคล้ายเข็มมีมุม 26 องศา ความกว้าง 1.12 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.7 และแผ่นงานเป็นอลูมิเนียม A1100 ในการทดลองได้ทาสารหล่อลื่นบนแผ่นงานให้สม่ำเสมอเมื่อแรงกดจากพิน 100 กรัม กระทำบนแผ่นงาน ความลึกที่วัดได้จะเท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร แผ่นงานหมุนด้วยความเร็ว 5 และ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที และมีความเรียบผิว 0.5109, 0.6933 และ 0.7744 μm (ระยะ Cut – Off ยาว 3 มิลลิเมตร) โดยใช้แรงกดที่เปลี่ยนแปลง 14 ค่าระหว่าง 5 – 250 กรัม ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะพิจารณาถึงค่า Shear Factor (τ_s) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นสัมผัส (Contact Pressure) ต่อความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ของแผ่นงาน ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการทดลองพบว่าค่าของ Shear Factor ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือระยะที่ 1 Shear Factor มีค่าน้อยกว่า 1 ระยะที่ 2 มีค่าระหว่าง 1 – 1.7 และระยะที่ 3 มีค่ามากกว่า 1.7 ซึ่งประสิทธิภาพความเสียดทานที่ได้ในช่วงที่ 1 และ

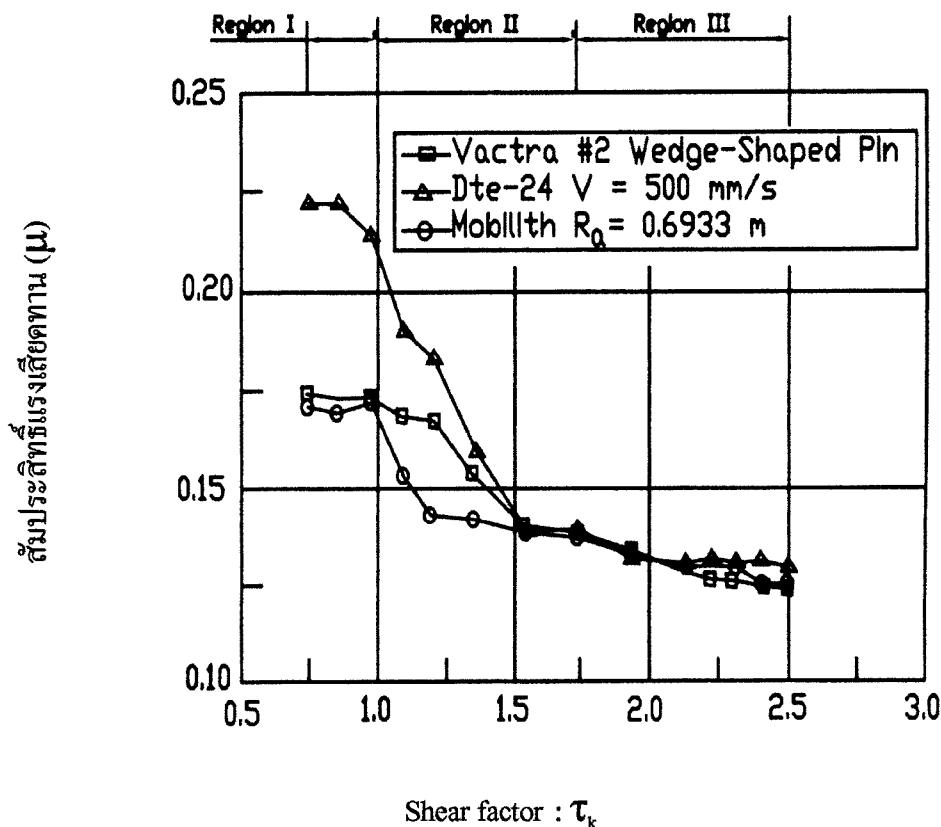
ช่วงที่ 3 เกือบจะคงที่ดังรูป 2.8 เมื่อพิจารณาระยะที่ 2 แรงกดสัมผัส (Contact Pressure) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกดจากพินที่กระทำต่อแผ่นงาน (Normal Load) ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายค่อยๆ ลดลงมากกว่า 50% เนื่องจากแรงกดจากพินจะเข้าไปใกล้ความต้านทานแรงเฉือนของแผ่นงาน ทำให้บริเวณบางส่วนของยอดแหลมเริ่มเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งการเปลี่ยนรูปจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งยอดแหลม (Asperity) ทุกยอดอยู่ในสภาวะการเปลี่ยนภาพที่เท่ากันทุกตำแหน่ง เมื่อ Shear Factor เพิ่มขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่าพื้นที่สัมผัสจริง (Real Contact) กับพื้นที่ผิวทั้งหมด (Apparent Contact) จะเท่ากัน ($\tau_k = 1.7$) และในบริเวณนี้ความต้านทานการลื่นไถลของยอดแหลมจะน้อยกว่า ความต้านทานการเคลื่อนที่



ภาพที่ 2.6 แสดงวิธีการทดลองโดยใช้PIN กดลงบนแผ่นงาน [10]

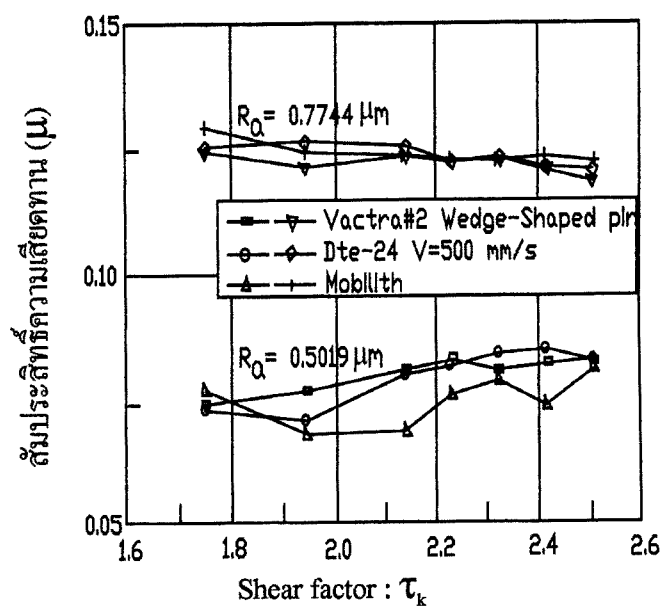


ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะการกดของPIN ที่กดลงบนแผ่นงาน [10]

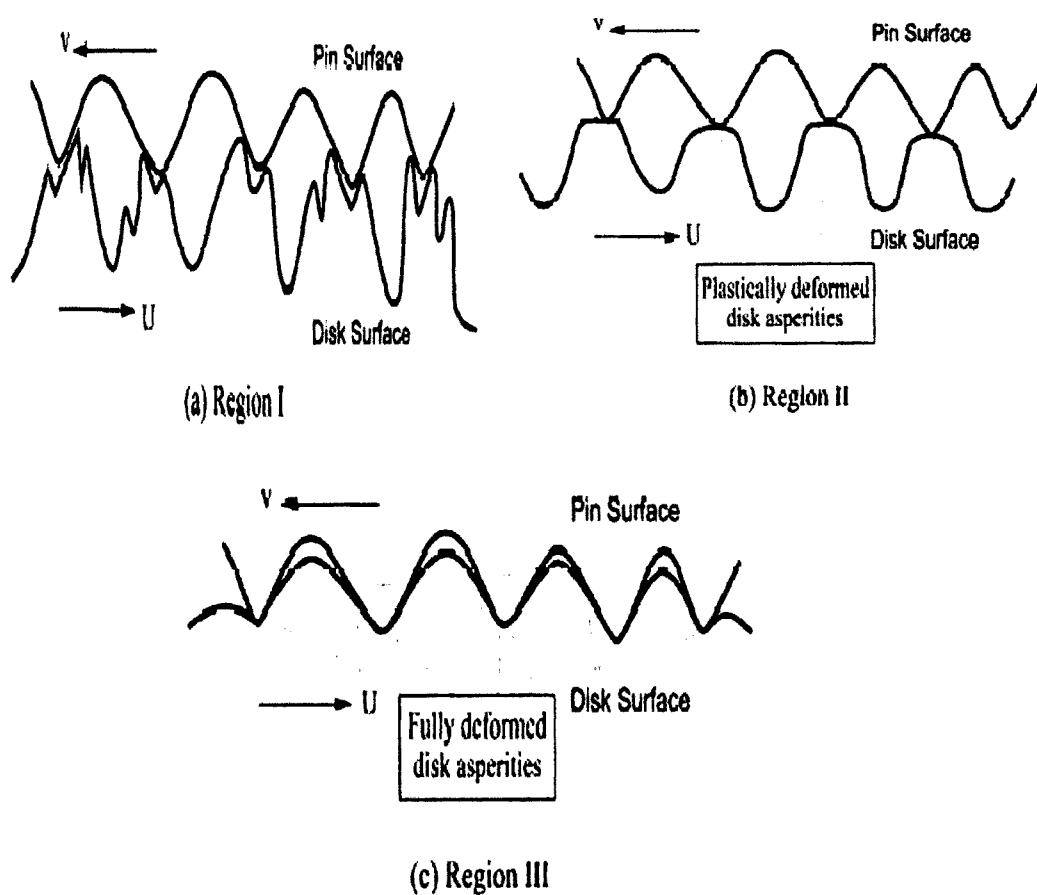


ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการเฉือน กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน[10]

เมื่อพิจารณาอิทธิพลความเรียบผิวของแผ่นงาน ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยการเปลี่ยนแปลงความเรียบผิวของแผ่นงาน 2 ค่าคือ $R_a = 0.5019 \mu\text{m}$ และ $R_a = 0.7744 \mu\text{m}$ จากผลการทดลองพบว่าความเรียบผิวที่ $R_a = 0.5019 \mu\text{m}$ จะทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงมากกว่า 50% ของความเรียบผิวแผ่นงานที่ $R_a = 0.7744 \mu\text{m}$ ดังภาพที่ 2.9 อธิบายได้ว่าองค์ประกอบความเสียดทาน (Component of Friction) ของแผ่นงานที่มีความเรียบผิว (Surface Roughness) ที่หยาบ เมื่อแผ่นงานเริ่มหมุน แรงกดจากพินจะพยายามเอาชนะการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของชิ้นงาน และความเสียดทานสถิตย์ภายในวัสดุในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนระหว่างความเค้นสัมผัส (Contact Pressure) ต่อความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ของแผ่นงานมีค่าที่สูงขึ้น หลังจากนั้นพินเคลื่อนที่ไปยัง (Plowing Motion) ตำแหน่งที่ 2 ความเค้นสัมผัส (Contact Pressure) ต่อความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ของแผ่นงานจะทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรที่ยึดแหลมเท่ากันทุกผิวสัมผัส ดังภาพที่ 2.10 เมื่อพินเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องไปยังตำแหน่งที่ 3 จะทำให้ความต้านทานการลื่นไถลของยอดแหลมที่น้อยกว่า ความต้านทานการเคลื่อนที่ นั่นหมายความว่าค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้ลดน้อยลง



ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวบนแผ่นงาน กับตัวประกอบการเฉือน [10]



ภาพที่ 2.10 แสดงความแตกต่างของพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งสองระหว่าง พิน และแผ่นงาน [10]

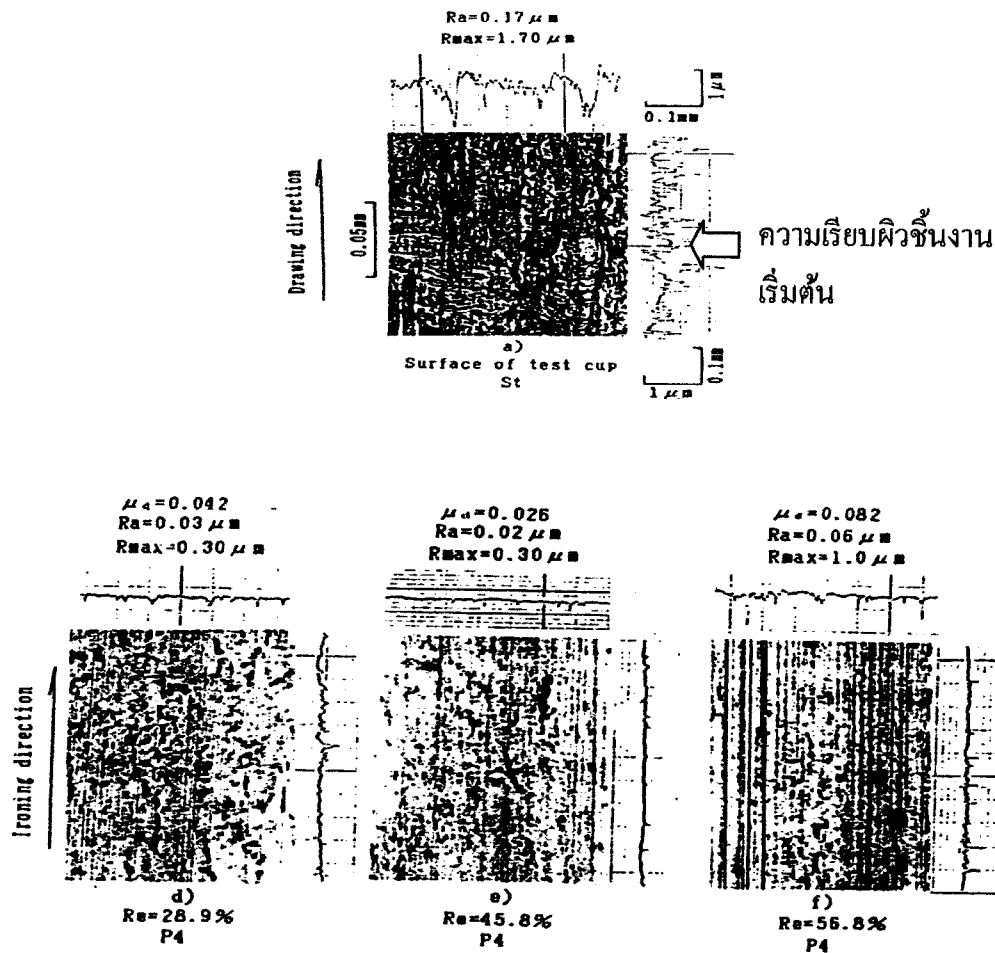
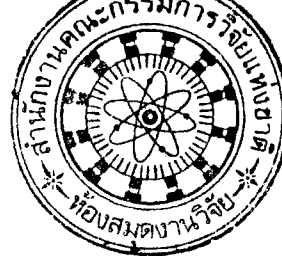
Kawai และคณะ [13] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลความหนืดของสารหล่อลื่น และอัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเครื่องมือ (Tool) กับชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

		วัสดุ	ค่าความ แข็ง	ค่าความเรียบ ผิว	ขนาด
เครื่องมือ	คาย	SKD 11	61 HRC	$R_{\max} = 0.1 \mu\text{m}$	เส้นผ่านศูนย์กลาง 40.50 40.47 40.44 40.41 40.38 มิลลิเมตร
					มุมคาย 8 องศา คายเลนท์ 0.2 มิลลิเมตร
	แผ่น	SKD 11	61 HRC	$R_{\max} = 1 \mu\text{m}$	เส้นผ่านศูนย์กลาง 40.0 40.14 มิลลิเมตร
อัตราส่วนการลดความหนา ผนัง 28.9 ~ 56.8%		ความเร็วในการลดความ หนาผนัง 10 มิลลิเมตร / วินาที		อุณหภูมิห้อง $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$	

ที่มา: หนังสือ Journal of Engineering for Industry หน้า 177

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็น A1100 – O ซึ่งสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้กระจายบนคายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อแผ่นอยู่ในช่องว่างของคาย 20 มิลลิเมตรใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนัง 28.9 45.8 และ 56.8% ตามลำดับ ความหนืดของสารหล่อลื่นมี 3 ลักษณะคือ ความหนืดต่ำ 70.9 Cst ความหนืดปานกลาง 321 Cst และความหนืดสูง 5119 Cst ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่แบบพาราฟิน (Paraffinic Mineral Oil) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนังที่ 45.8% ของสารหล่อลื่นที่มีความหนืดปานกลางจะทำให้ได้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่น้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ 0.026 และชิ้นงานมีความเรียบผิว $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นความเรียบผิวชิ้นงานที่ดีที่สุดของการทดลอง เนื่องจากผิวผนังด้านข้างของชิ้นงานเกิดการเสียดสี และถูกผิวคายบีบอัดในแนวเส้นรอบวงของคายจึงทำให้รอยขรุขระได้ลดลงตามอัตราส่วนการลดความหนาผนัง ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงพื้นผิวด้านข้างชิ้นงานหลังจากผ่านกรรมลดความหนาผนังชิ้นงาน [13]

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว

ในปี 2003 Mitterer [11] ได้ทำงานวิจัยเพื่อที่จะพิจารณากรรมวิธีการเคลือบผิวที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการทำแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยได้ศึกษาสารเคลือบผิวที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบทั้ง 5 ชนิด คือ Tin, Nitriding, Ticon, Tibn, และ Tialn โดยกรรมวิธี Pacvd ผลการทดสอบพบว่า Tin ที่เคลือบผิวด้วยกรรมวิธีนี้มีความเหมาะสมทั้งในแง่การลดแรงเสียดทานในการทำงานและการต้านทานการสึกหรอ อีกทั้งยังสามารถเคลือบผิวแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ดีอีกด้วย

ในปี 2003 Pesch [12] ได้ทำการทดสอบความสามารถของฟิล์มแข็งที่เหมาะสมกับงานดึงงานรีดเหล็กแผ่น โดยใช้วิธีการทดสอบแบบดึงแผ่นเหล็ก (Steel-Strip-Drawing-Test) กับแผ่นเหล็กกล้าผ่านแม่พิมพ์เคลือบสารต่างชนิดและกรรมวิธีการเคลือบผิว คือ Pvd-Tin, Pvd-Tialn, Pvd-Ticon, Tin-Sputterd และ Tin-Arc ได้ผลสรุปว่า Tin-Arc เหมาะสมกับงานรีดเหล็กแผ่นหรือแม่แต่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมดงานวิจัย
วันที่... 31 มี.ค. 2554
เลขทะเบียน... 237115
เลขเรียกหนังสือ...

งานที่มีการขึ้นโลหะของเหล็กแผ่นจำพวกงานลากขึ้นรูปลึกถึงแม้ว่าจะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่าตัวอื่นแต่จะไม่เกิดการหลุดมาเกาะติดของ Zinc จากเหล็กแผ่นและกรรมวิธีนี้สามารถเคลือบผิวสามารถครอบคลุมปกป้องผิวของสารพื้นได้อย่างทั่วถึงและต่อเนื่องกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ

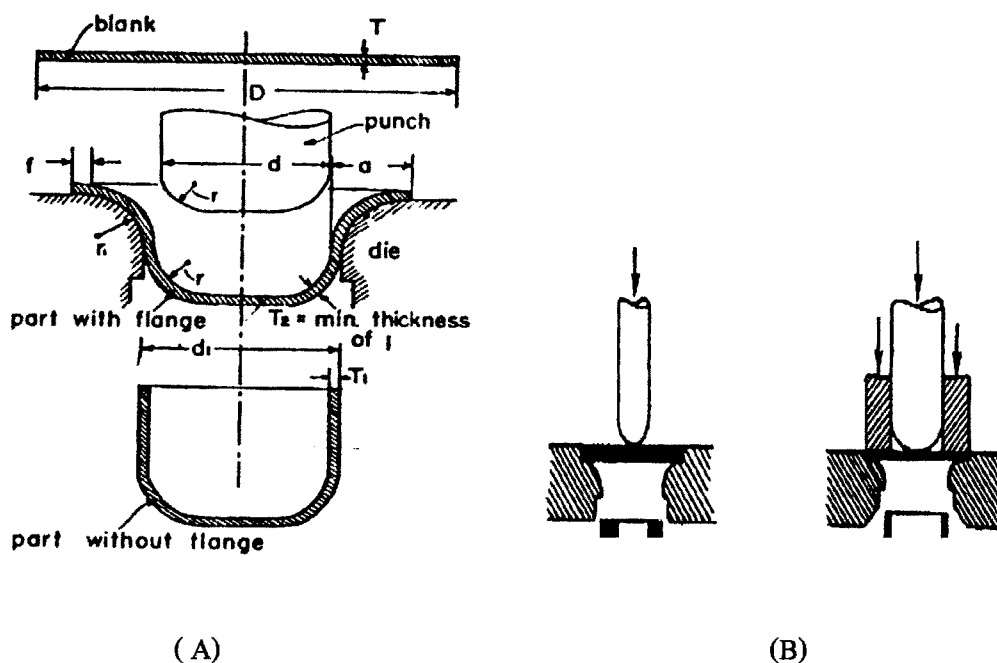
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลากขึ้นรูปลึก

2.3.1 กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

เป็นการลากขึ้นรูปจากโลหะแผ่นโดยการกดแผ่นขึ้นงานเปล่า (Blank) ด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้หรือพินช์ (Punch) ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมียหรือตาย (Die) ซึ่งจะทำให้มีรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามแม่พิมพ์ ส่วนลักษณะการลากขึ้นรูปแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

2.3.1.1 การลากขึ้นรูปโดยไม่ใช้แผ่นจับยึดชิ้นงาน (Drawing Without Blankholder)

2.3.1.2 การลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นจับยึดชิ้นงานในการสร้างแรงกด เพื่อลดการเกิดรอยย่นที่ปากถ้วย (Drawing With a Blankholder)

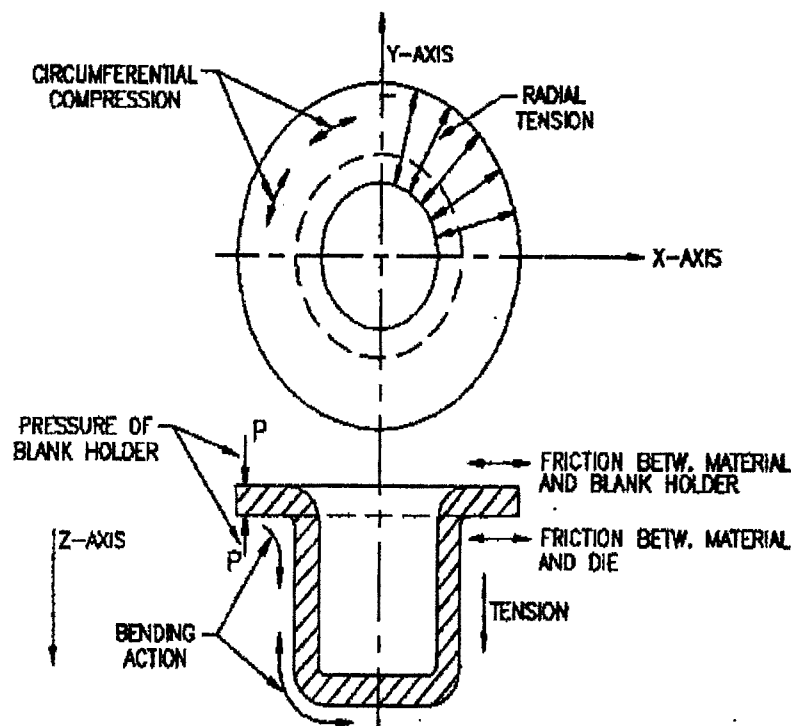


ภาพที่ 2.12 (A) แสดงขั้นตอนการทำงานในกระบวนการลากขึ้นรูป [1]

(B) แสดง การลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นกดชิ้นงานไม่ใช้

การลากขึ้นรูปโดยไม่ใช้แผ่นกดจะเหมาะสมสำหรับการลากขึ้นรูปที่ตื้นๆ และใช้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูป (Drawing Ratio) น้อยกว่า 1.2 จะสามารถหลีกเลี่ยงรอยย่นที่ปากขอบ

ด้วยได้ การลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นกดขึ้นงานจะเป็นลักษณะของกระบวนการที่ใช้กันอยู่อย่างกว้างขวางโดยนอกจากจะไม่ทำให้เกิดรอยย่นแล้ว การเพิ่มแรงกดเพื่อจับยึดบริเวณที่จะเป็นปีกถ้วยไว้ นั้นจะเป็นการควบคุมการไหลตัวของวัสดุให้ไหลตัวได้ดีกว่าอีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถใช้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปได้มากกว่า [2] ในระหว่างการลากขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานเปล่า จะถูกพันธ



เคลื่อนที่ลงมากด ดึงผ่านลงไปในปากตาย ทำให้แผ่นขึ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆเกิดทั้งการดัด

ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก [1]

(Bending) การดัดกลับ (Rebending) และการทำให้ตรง (Straightening Out) การวิเคราะห์สถานะความเค้นที่บริเวณต่าง ๆ ณ ช่วงการลากขึ้นรูปใด ๆ จะมีความสำคัญอย่างมาก นอกจากจะมีผลต่อค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปถ้วยแล้วยังจำเป็นต้องการวิเคราะห์ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับขึ้นงานอีกด้วย และหากทำการพิจารณาสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุแล้ว ตรงบริเวณกันถ้วยที่ถูกพันธเคลื่อนที่ลงมากคนั้นจะเกิดความเค้นดึงในสองแนวแกนขึ้น (Biaxial Tension) อันเนื่องมาจากการดัดที่บริเวณปากของพันธ และบริเวณที่เป็นผนังถ้วยนั้นจะมีสถานะความเค้นเป็นลักษณะระนาบความเครียด (Plane – Strain Tension) เนื่องจากเนื้อวัสดุในบริเวณนี้จะผ่านขั้นตอนการทั้งสามคือการดัด การดัดกลับ และการทำให้ตรง ซึ่งจะเคลื่อนที่สัมพันธ์ไปกับพันธ

ตารางที่ 2.2 ความบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในงานลากขึ้นรูปลึก [3]

ลักษณะรูปร่างที่ ปรากฏบนชิ้นงาน	ความเสียหายที่เกิดขึ้น	สาเหตุที่เกิด ความเสียหาย	แนวทางการแก้ไข
	ลักษณะการแตก ขาดที่บริเวณใกล้กัน ถ้วย	ใช้อัตราการลากขึ้นภาพ ที่สูงเกินไปต่อวัสดุ ชิ้นงานและรูปร่าง แม่พิมพ์	ลดอัตราการลากขึ้น รูปลง
	ลักษณะการฉีกขาด ออกบริเวณกันถ้วย	1. รัศมีคายน้อยเกินไป 2. ช่องว่างระหว่าง แม่พิมพ์ น้อยเกินไป 3. ความเร็วพ่นสูง เกินไป 4. แรงที่ใช้จับยึดแผ่น ชิ้นงานเปล่ามากเกินไป	1. รัศมี คาย และพ่น 2. เพิ่มช่องว่างระหว่าง แม่พิมพ์ 3. ลดความเร็วพ่นลง 4. ปรับแรงจับยึดแผ่น ชิ้นงานให้เหมาะสม
	ลักษณะการเกิดรอย ย่น บริเวณ ขอบ ชิ้นงาน (Wrinkle In The Flange)	1. แรงที่ใช้จับยึดแผ่น ชิ้นงานเปล่า น้อยเกินไป 2. ช่องว่างระหว่าง แม่พิมพ์ น้อยเกินไป 3. รัศมีคายน้อยเกินไป	1. เพิ่มแรงจับยึดแผ่น ชิ้นงาน 2. เพิ่มระยะช่องว่าง ระหว่างแม่พิมพ์ 3. ลดรัศมีคายน้อย
	ลักษณะการเกิดรอย ย่น บริเวณผนัง ชิ้นงาน (Wrinkle In The Wall)	1. ช่องว่างระหว่าง แม่พิมพ์มากเกินไป 2. รัศมีคายน้อยเกินไป 3. แรงที่ใช้จับยึดแผ่น ชิ้นงานเปล่า น้อยเกินไป	1. ลดระยะช่องว่าง ระหว่างแม่พิมพ์ 2. ลดรัศมีคายน้อย 3. ปรับแรงจับยึดแผ่น ชิ้นงานให้เหมาะสม
	ลักษณะการเกิดคลื่น ที่ขอบชิ้นงาน (Earring)	สมบัติทางกลในแต่ละ ทิศทางการรีดมีค่าไม่ เหมือนกัน	ใช้วัสดุที่มีค่าแอนไอ โซโทรปีต่ำ

2.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการลากขึ้นรูป

ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปอีกนั้นจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ตัวแปรอันเนื่องมาจากการขึ้นรูป และตัวแปรอันเนื่องมาจากแผ่นชิ้นงาน โดยตัวแปรในการลากขึ้นรูปที่เหมาะสมต้องได้จากการทดลองที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีทดสอบของ Swift และ Chung [4] ตัวแปรที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างมากได้แก่

2.3.2.1 ขนาดรัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die Radius, R_d) ซึ่งขนาดดังกล่าวนี้จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป Kurt Lange [5] ได้กล่าวถึงแรงคดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรัศมีของคาน วัสดุสมการที่ 1 ดังนี้

$$F_b = \frac{\pi \cdot \sigma_f \cdot d_m \cdot S^2}{2r_D} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \dots\dots(2.1)$$

เมื่อ

σ_f = ความเค้นไหล (Flow Stress) (Mpa)

d_m = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของพืนซ์ (มิลลิเมตร)

S = ความหนาเดิมของโลหะแผ่น (Sheet Thickness) (มิลลิเมตร)

R_d = รัศมีของบาคาย (Die Radius) (มิลลิเมตร)

F_b = แรงคดงอ (Bending Force) (มิลลิเมตร)

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่ารัศมีของคานมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป Swift และ Chung ได้ศึกษาถึงอิทธิพลจากขนาดของรัศมีคานกับขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่า พบว่ารัศมีของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การลากขึ้นรูปได้ดีขึ้น แต่ถ้ารัศมีแม่พิมพ์ใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดรอยย่นได้อาจสรุปได้ว่า

$R_d \approx 4-8$ เท่าของความหนา จะไม่ส่งผลการเปลี่ยนแปลงความหนาชิ้นงาน

$R_d < 10$ เท่าของความหนา จะทำให้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลง

$R_d \geq 10$ เท่าของความหนา จะมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force)

$R_d \gg 10$ เท่าของความหนา จะทำให้เกิดรอยย่น

R_d เล็กมาก ๆ จะทำให้เกิดลักษณะคอขวด (Necking) ที่บริเวณรัศมีพืนซ์

นอกจากนี้รัศมีของคานยังมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปในแง่การจำกัดอัตราส่วนการดึง

$$R_d = 0.035 [50 + (D - D)] \sqrt{S} \quad [\text{mm.}] \quad \dots\dots(2.2)$$

2.3.2.2 ขนาดรัศมีของพินซ์ ซึ่งไม่มีผลต่อค่าแรงในการลากขึ้นรูป แต่จะทำให้ความหนาของชิ้นงานบริเวณรัศมีก้นถ้วยและผนังถ้วยมีความหนาลดลง หากใช้ค่าน้อยเกินไปอาจเกิดการตัดขาดได้ สามารถคำนวณหาค่าที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 3 [7]

$$R_p = (3 \sim 4) S \quad [\text{mm.}] \quad \dots\dots(2.3)$$

2.3.2.3 การคำนวณค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน (d_0) ในการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการการผลิตเพราะจะหมายถึงความประหยัดเนื่องจากจะต้องการที่จะตัดแผ่นเบงก์และการที่แผ่นเบงก์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้อัตราส่วนการครอว์เพิ่มขึ้นและสามารถทำให้ชิ้นงานแตกได้สามารถคำนวณหาค่าที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 4 [7]

$$d_0 = \sqrt{d_2^2 + 4d_2(h + 0.57r) - 0.56r^2} \quad \dots\dots(2.4)$$

2.3.2.4 แรงสูงสุดที่ใช้ในการลากขึ้นรูป (Maximum Drawing Force, $F_{d, \text{Max}}$) สามารถกำหนดจากประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปร่างโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D_m ดังสมการที่ (5) [3]

$$F_{d, \text{max}} = \pi d_m s_0 \left[1.1 \frac{1.3 s_u}{\eta_{\text{def}}} \left[\ln \frac{D}{d} - 0.25 \right] \right] \quad [\text{N}] \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ

S_u คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

η_{Def} คือ ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูป ซึ่งมีค่าอยู่ในระหว่าง 0.5 ~ 0.7

S_0 คือ ความหนาชิ้นงานเปล่าเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

D_m คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยซึ่งอยู่ระหว่างความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

2.3.2.5 แรงกดของแผ่นจับยึดแผ่นชิ้นงานเปล่า (Blankholder Force, F_{bh}) โดยแผ่นจับยึดนี้จะกดบนชิ้นงานเพื่อช่วยป้องกันการไหลตัวของชิ้นงานผ่านปากคายลงไปในช่วงว่างระหว่างแม่พิมพ์เร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดรอยยับบนชิ้นงาน แรงกดของแผ่นกดชิ้นงานที่เหมาะสมสามารถหาได้จากสมการที่ (6) ด้านล่าง [3]

$$F_{bh} = A_{bh} P_{bh} \quad [N] \quad \text{.....(2.6)}$$

เมื่อ

P_{bh} คือ ความดันบนแผ่นกดขึ้นงาน (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

F_{bh} คือ แรงกดที่แผ่นกดขึ้นงาน (นิวตัน)

A_{bh} คือ พื้นที่ผิวสัมผัส (ตารางมิลลิเมตร)

ความดันที่ต้องการใช้กดที่แผ่นกดขึ้นงานเพื่อป้องกันรอยย่นขึ้นอยู่กับวัสดุขึ้นงาน โดยจะสัมพันธ์กับความหนา และอัตราส่วนการลากขึ้นรูป สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) ต่อไปนี้ [3]

$$P_{BH} = 10^{-3} C \left[(\beta - 1)^3 + \left(\frac{0.005d}{s} \right) \right] s_u \quad [N/mm^2] \quad \text{.....(2.7)}$$

เมื่อ

P_{bh} คือ ความดันบนแผ่นกดขึ้นงาน (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

C คือ ตัวประกอบแรงเฉือนมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ~ 3

β คือ อัตราส่วนการลากขึ้นรูป

โดยแรงกดยึดที่น้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นขึ้นที่บริเวณปีด้วย หากมากเกินไปอาจจะทำให้วัสดุไหลตัวลงไปในคายาก ใช้แรงในการขึ้นรูปมากขึ้นและอาจเกิดการฉีกขาดบริเวณกันด้วยได้

2.3.2.6 ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Clearance) ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอ ที่จะรองรับความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยได้ประมาณช่องว่างแม่พิมพ์ไว้ดังสมการที่ 8 [5]

$$u_z = d_s + 2t + 2c \quad \text{..... (2.8)}$$

เมื่อ

d_s = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่

t = ความหนาชิ้นงาน

c = สัมประสิทธิ์ของการยึดตัว

โดยได้ทำการศึกษานาขนาดช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายที่เหมาะสมไว้ดังนี้ [5]

$$U_d = S + 0.07 \sqrt{10 S} \quad (\text{มิลลิเมตร}) \quad \text{สำหรับ Steel Sheet}$$

$$U_d = S + 0.04 \sqrt{10 S} \quad (\text{มิลลิเมตร}) \quad \text{สำหรับ Nonferrous Sheet}$$

$$U_d = S + 0.02 \sqrt{10 S} \quad (\text{มิลลิเมตร}) \quad \text{สำหรับ High-Temperature Alloys Sheet}$$

และ Aluminum Sheet

เมื่อ U_d = ขนาดช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย

2.3.2.7 ความเสียดทานของโลหะแผ่นกับแผ่นกด (Friction) จะมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป ถ้ามีการใช้สารหล่อลื่นที่ดีและมีการเตรียมผิวคายที่ดีด้วยแล้ว จะช่วยลดแรงในการลากขึ้นรูปได้ ส่วนความเสียดทานที่รัศมีของพื้นซ์จะมีประโยชน์ในด้านช่วยรับแรงกระทำจากผนังถ้วยกลม โดยปกติแล้วที่รัศมีพื้นซ์จะไม่ทำการขัดผิวและไม่ใช้สารหล่อลื่น [1]

2.3.2.8 ขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่าโดยแรงในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มตามขนาดของแผ่นขึ้นงานเปล่าและทำให้ความหนาของโลหะที่ใกล้กันถ้วยบางลงด้วย [1]

2.3.2.9 ความหนาของแผ่นขึ้นงานเปล่าในโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยๆทำให้แรงเสียดทานมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป ทำให้โอกาสที่ถ้วยกลมแตกขาดได้ง่ายขึ้น [1]

2.3.3 ตัวแปรที่เกิดจากแผ่นขึ้นงาน

คุณสมบัติของวัสดุก็มีความสำคัญ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกลจะมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปในระดับหนึ่ง ซึ่งโลหะแผ่นจะมีคุณสมบัติในการลากขึ้นรูปที่ดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับ

2.3.3.1 ความสามารถในการไหลตัว (Drawability) ภายใต้สภาวะความเค้นที่ปีกถ้วย ซึ่งความสามารถในการไหลตัวทำให้เกิดขีดจำกัดในการลากขึ้นรูปเป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุและขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขึ้นงานเปล่าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นซ์โดยสามารถหาขีดจำกัดในการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio, β_{Max}) ได้จากสมการที่ 9 [5]

$$\beta_{Max} = D / d \quad \dots \dots (2.9)$$

เมื่อ

β_{Max} = ขีดจำกัดในการลากขึ้นรูปสูงสุด

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขึ้นงานเปล่า (มิลลิเมตร)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิว (มิลลิเมตร)

2.3.3.2 ความสามารถของโลหะในการต้านทานการเพิ่มความหนาบริเวณผนังถ้วย หรือ เรียกว่า อัตราความเครียดถาวร (Plastic Strain Ratio, R – Value) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะแผ่น ซึ่งจะเกิดความไม่เท่ากันในทุกทิศทางการรีดเหล็กแผ่น (Anisotropy) โดยเป็นอัตราส่วนของความเครียดจริง (True Strain) ในทิศทางความกว้าง (W) กับความเครียดจริงในทิศทางความหนา (T) ดังสมการที่ 10 [5]

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} \quad \dots\dots(2.10)$$

เมื่อ

R คือ อัตราความเครียดถาวร

W_0 คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบก่อนทดสอบดึง (มิลลิเมตร)

W_1 คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบหลังทดสอบดึง (มิลลิเมตร)

T_0 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนทดสอบดึง (มิลลิเมตร)

T_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังทดสอบดึง (มิลลิเมตร)

โดยค่าที่จะทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ คือค่าอัตราความเครียดเฉลี่ย (Normal Anisotropy, $\bar{R}$) ถ้ามีค่ามากจะแสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีแนวโน้มที่จะสามารถขึ้นรูปได้ดี ซึ่งค่า $\bar{R}$ สามารถหาได้จากสมการที่ 11 [5]

$$\bar{R} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad \dots\dots(2.11)$$

เมื่อ

$\bar{R}$ คือ อัตราความเครียดเฉลี่ยถาวร

R_0 คือ ค่าของ R ในทิศทางตามแนวรีด

R_{45} คือ ค่าของ R ในทิศทาง 45 องศาของแนวรีด

R_{90} คือ ค่าของ R ในทิศทาง 90 องศาของแนวรีด

ชิ้นงานที่ผ่านการรีดจะเกิดความเครียดเฉลี่ยถาวรในแนวราบ (Planar Anisotropy) บอกได้ด้วยค่า ΔR เนื่องจากโลหะแผ่นมีความแข็งแรงในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดคลื่นที่ขอบ

ของชิ้นงาน ซึ่งสามารถทำนายค่าได้โดยการวัดผลต่างของค่า R - Value ในแต่ละทิศทางการรีด โลหะแผ่น ค่า ΔR หาได้จากสมการที่ (12) [5]

$$\Delta r = \frac{(r_0 - 2r_{45} + r_{90})}{2} \quad \dots\dots (2.12)$$

เมื่อ

ΔR คือ ความเครียดเชิงถาวรในแนวราบ

$\Delta R = 0$ จะไม่มีลักษณะคลื่นเกิดบนชิ้นงาน

$\Delta R > 0$ จะเกิดคลื่นบนชิ้นงานในแนวแกน 0 องศา และ 90 องศา
กับทิศทางการรีด

$\Delta R < 0$ จะเกิดคลื่นบนชิ้นงานในแนวแกน 45 องศา กับทิศทางการรีด

ดังนั้นความเหมาะสมสำหรับงานการลากขึ้นรูปลึกลงนั้น จะต้องการวัสดุที่มีค่า R สูง และมีค่า ΔR ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด [5] นอกจากนี้ความสามารถในการลากขึ้นรูป ยังสามารถบอกด้วยค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราความเครียดเชิงถาวร กล่าวคือ เมื่ออัตราความเครียดเชิงถาวรมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วย [1]

2.3.3.3 ความเหนียวของแผ่นโลหะ (Ductility of Sheet Metal) เป็นพฤติกรรม การแสดงความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของวัสดุแต่ละประเภท วัสดุที่มีความเหนียวสูงสามารถลากขึ้นรูปได้ดีกว่าวัสดุที่มีความเหนียวต่ำ [1]

2.3.3.4 ความแข็งแรงที่จุดครากตัวของวัสดุ (Yield Strength) ถ้ามีค่าสูงต้องใช้ แรงลากขึ้นรูปสูง เนื่องจากวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรก็ต่อเมื่อแรงที่ใช้มากกว่าแรงที่จุดครากตัว

2.3.3.5 ค่าความชันช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร (Strain Hardening Exponent, N) พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ถ้าค่าความชันมาก หมายความว่าระหว่าง การขึ้นรูปโลหะจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นมาก และหากจะทำการเปลี่ยนแปลง รูปร่างอีกครั้งจะต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อเอาชนะความแข็งดังกล่าว [1]

2.3.4 ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป

เมื่อเลือกใช้อัตราส่วนการลากขึ้นรูปมากขึ้นถ้าเงื่อนไขอย่างอื่นคงเดิมจำเป็นจะต้องใช้แรง ดึงมากขึ้น ส่วนที่เป็นผนังชิ้นงานจะต้องรับแรงส่วนนี้ไว้ให้ได้ เพราะฉะนั้นอัตราส่วนการลากขึ้น

รูปจึงต้องไม่เกินค่าสูงสุดค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูป” (Limiting Drawing Ratio) β_{Max} ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดการฉีกขาดขึ้นที่บริเวณก้นถ้วย การฉีกขาดสามารถเกิดระหว่างและหลังการขึ้นรูปเป็นก้นถ้วย วิธีการเสียหายแบบนี้เรียกว่าการฉีกขาดก่อนกำหนด (Premature Cracks) และอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การฉีกขาดแท้ (Proper Cracks) การแตกขาดก่อนกำหนดมักเกิดขึ้นในบริเวณรัศมีก้นถ้วยพร้อมกับในบริเวณต่อเนื่องระหว่างรัศมีก้นถ้วยกับผนังถ้วย วิธีการเสียหายในกรณีหลังนี้มักเรียกว่า การขาดเหมาะสมที่สุด (Optimal Crack) เนื่องจากในกรณีนี้แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ส่งผ่านมายังบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างเหมาะสม ซึ่งแรงที่ทำให้เกิดการฉีกขาดสามารถคำนวณได้จากสมการ 1 ดังนี้ [3]

$$F_{cr} = \pi d_m s s_u a_{cr} [N] \quad \text{.....(2.13)}$$

เมื่อ

A_{cr} เป็นตัวประกอบการฉีกขาด ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเค้นฉีกขาด

จะพบว่าแรงสูงสุดที่สามารถส่งผ่านจากบริเวณรัศมีก้นถ้วยไปยังผนังก้นถ้วยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเสียดทานระหว่างแผ่นขึ้นงานกับพื้นขั้วมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ตัวประกอบการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ตัวประกอบการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออัตราส่วนของรัศมีพื้นขั้ว ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นขั้ว เพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบการฉีกขาดของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่า 0.95 – 1.30 [3] ในการคำนวณหาขีดจำกัดอัตราส่วนการดึงขึ้นรูปลึกให้แรงดึงขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับแรงดึงที่ทำให้ฉีกขาด และสมมติให้มีค่าเท่ากับความแข็งแรงดึงของแผ่นวัสดุ โดยแรงดึงขึ้นรูปสูงสุดเป็นค่าที่อยู่ในวงเล็บใหญ่ของสมการ 4 แทนค่าแล้วจะได้ดังสมการที่ 14 ดังนี้ [3]

$$F_{d, max} = \pi d_m s \left[1.1 \frac{1.3 s_u}{\eta_{def}} \left[\ln \frac{D}{d} - 0.25 \right] \right] = S_u \quad \text{.....(2.14)}$$

โดย $\eta_{Def} = 0.7$ สำหรับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

จะได้

$$\ln (D/D)_{Max} = 0.74$$

$$\text{หรือ } \beta_{Max} = (D/D)_{Max} = 2.1$$

ค่าขีดจำกัดอัตราส่วนการลากขึ้นรูปเท่ากับ 2.1 ควรใช้กับแผ่นเหล็กกล้าในการทำนายอัตราส่วนการลากขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ทั้งนี้เพราะยังมีตัวแปรอย่างอื่นเกี่ยวข้องอีกมาก ค่า

โดยประมาณของ β_{Max} สำหรับวัสดุ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นอยู่กับคุณภาพ เท่ากับ 2.0–2.05 สำหรับงานพิเศษบางอย่าง อาจต้องการให้ขีดจำกัดการลากขึ้นรูปมีค่าสูงมาก วิธีการทำให้ขีดจำกัดการลากขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นนั้นโดยหลักการแล้วสามารถทำได้โดยหลักการใหญ่ๆ สองวิธีคือ ลดความเค้นดึงที่เกิดขึ้นระหว่างลากขึ้นรูปหรือเพิ่มความต้านทานแรงดึงให้แก่วัสดุระหว่างกระบวนการการคำนวณหาแรงที่ใช้ใน

การกดรีดขึ้นรูป (Ironing Force) จะได้ดังสมการที่ 15 ดังนี้ [3]

$$F_i = C_i \times A \times \left[\frac{S_u}{\eta} \times \frac{1}{1,000} \right] \quad \text{.....(2.15)}$$

เมื่อ

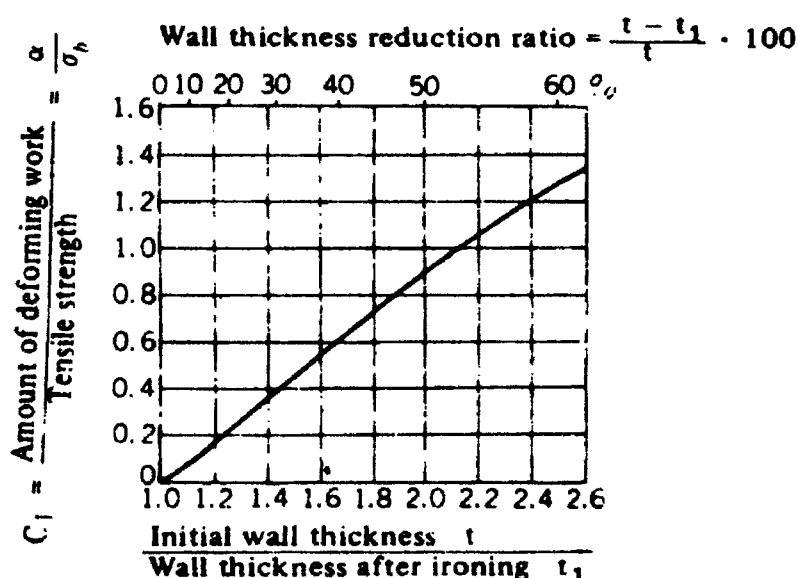
F_i = แรงในการกดรีดขึ้นรูป (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของผนังชิ้นงานภายหลังการกดรีดขึ้นรูป (ตารางมิลลิเมตร)

S_u = ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุทดลอง

η = ค่าประสิทธิภาพของการกดรีดขึ้นรูป มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.8

C_i = ค่าสัมประสิทธิ์ของการกดรีดขึ้นรูป



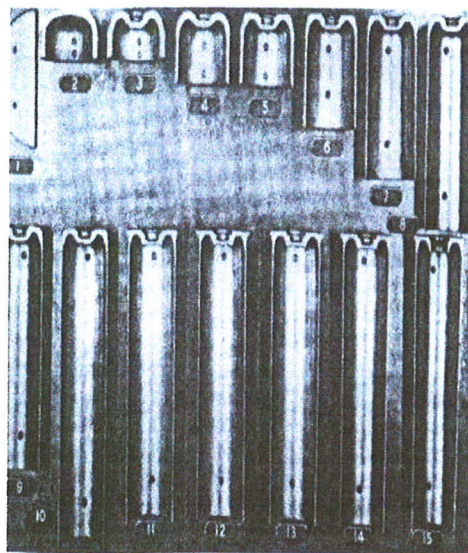
ภาพที่ 2.15 แสดงแผนภูมิของค่าสัมประสิทธิ์ของการกดรีดขึ้นรูป (C_i)

2.3.5 หลักการเบื้องต้นในการลดความหนาผนังชิ้นงาน

การลดความหนาผนังชิ้นงาน (Ironing or Thinning) คือกรรมวิธีในการผลิตถ้วย (Cans) หรือท่อ (Tube) ที่ทำให้ชิ้นงานมีผนังที่บางลงและชิ้นงานมีความสูงเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วการลดความหนาผนังชิ้นงาน ควรทำหลังจากผ่านกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เพราะจะทำให้ลดอัตราเสี่ยงต่อความเสียหายของชิ้นงานลงได้ และยังทำให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้นซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีลดความหนาผนัง เช่น ผลิตภัณฑ์กระป๋องเบียร์ กระป๋องน้ำอัดลม และปลอกกระสุนลูกปืน ดังภาพที่ 2.16

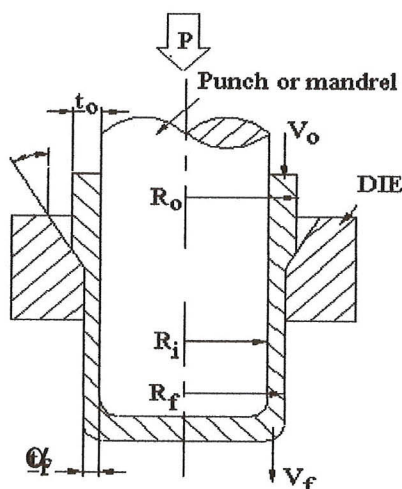


(ก) ผลิตภัณฑ์กระป๋องเครื่องดื่มต่าง ๆ



(ข) ผลิตภัณฑ์ปลอกกระสุนลูกปืน

ภาพที่ 2.16 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน [6]



ภาพที่ 2.17 แสดงกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน [6]

ภาพที่ 2.17 แสดงกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน ซึ่งในการทำงานของกรรมวิธีลดความหนาผนัง เริ่มต้นจากรัศมีของถ้วยภายนอก R_0 และความหนาผนังชิ้นงาน T_0 เมื่อปลายพื้นที่เคลื่อนที่กดลงที่ก้นถ้วย (Cup Bottom) ของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่ก้นถ้วย V_0 จึงทำให้ผนังด้านข้างของชิ้นงานไหลผ่านคาย (Die-Semi Angle) ในขณะที่รัศมีพื้น R_1 คงที่ หลังจากชิ้นงานผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนัง จะมีความหนาสุดท้าย T_f ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการลดความหนาผนัง (Ironing Ratio) และรัศมีภายนอกของชิ้นงานจะลดลง R_f ที่ชิ้นงานไหลออกด้วยความเร็ว V_f ซึ่งความหนาบริเวณก้นถ้วยของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง

2.3.6 หลักการคำนวณกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงาน [6]

กรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงานจะประกอบไปด้วย อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน ความสูงของถ้วยและแรงที่ใช้ในการลดความหนาผนังชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

2.3.6.1 อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน (Wall Thickness Reduction Ratio) [6]

$$\% \text{Red.} = \left[\frac{1 - t_f}{t_0} \right] \times 100 \quad \dots(2.16)$$

เมื่อ $\% \text{Red.}$ = อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงาน

T_0 = ความหนาชิ้นงานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

T_f = ความหนาชิ้นงานสุดท้าย (มิลลิเมตร)

จากสมการที่ 2.1 เป็นสมการที่ใช้ในการหาอัตราส่วนในการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงาน เพื่อให้ทราบว่าชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปแล้วความหนาของผนังจะมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้น และคายต่อไป ซึ่งการใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนังควรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดตัว (Ductility) ของวัสดุชิ้นงาน หากในกรรมวิธีลดความหนาผนังที่ผ่านการขึ้นรูปเพียงหนึ่งขั้นตอน และชิ้นงานมีลักษณะการยืดตัวที่ดี จะใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนังที่ 2 : 1 (50 % ของการลดความหนาผนัง) แต่ในกรณีที่ชิ้นงานผ่านการอบอ่อน (Annealed) อัตราส่วนการลดความหนาผนังจะอยู่ที่ 2.5 : 1 (60 % ของการลดความหนาผนัง) [6]

ในการขึ้นรูปของถ้วยเพื่อให้ได้ความสูงตามต้องการนั้นควรใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนังที่มากกว่า 1 ขั้นตอน เนื่องจากการลดความหนาผนังในขั้นตอนที่หนึ่งชิ้นงานจะเกิดความเครียดตกค้าง (Strain Hardening) ดังนั้นก่อนที่จะถูกลดความหนาผนังในขั้นตอนต่อไป

ชิ้นงานควรผ่านการอบอ่อน (ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงาน) ซึ่งผลรวมของอัตราส่วนการลดความหนาผนังในขั้นตอนสุดท้ายจะได้ดังสมการที่ 2.17

$$\%Red_{it} = \%Red_{i1} \cdot \%Red_{i2} \cdot \%Red_{i3} \dots \dots \dots \%Red_{in} \quad \dots \dots (2.17)$$

เมื่อ $\%Red_{it}$ = อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานทั้งหมด

$\%Red_{i1}$ = อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานในขั้นตอนที่ 1

$\%Red_{in}$ = อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานในขั้นตอนที่ N

ความสามารถของชิ้นงานในการเปลี่ยนรูอย่างถาวร (Plastic Deformation) จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทำงาน ดังเช่นในกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงานเพื่อให้ได้ผนังที่บางที่สุดสามารถแสดงได้ในรูปแบบของอัตราส่วนการลดความหนาผนังดังสมการที่ 2.17 ในกรณีที่ชิ้นงานผ่านการอบอ่อนมาแล้วการเรียงตัวของอะตอมจะเกิดผลึกใหม่ขึ้นมา จึงทำให้ชิ้นงานสามารถเพิ่มการยึดตัวได้ดีขึ้น นั่นก็หมายความว่าสามารถขึ้นรูปได้โดยใช้เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานที่สูงขึ้น

2.3.6.2 ความสูงชิ้นงาน

กรรมวิธีลดความหนาผนังของชิ้นงานจะทำให้ความสูงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งความสูงหลังการขึ้นรูปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$h_1 = \frac{h_o(D - d_1)t_o}{(D - d_o)t_f} \quad \dots \dots (2.18)$$

เมื่อ H_1 = ความสูงชิ้นงานสุดท้าย (มิลลิเมตร)

H_o = ความสูงชิ้นงานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ บวกกับความหนาทั้งสองข้างของถ้วย (มิลลิเมตร)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางของคาน (มิลลิเมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่ได้จากกรรมวิธีลากขึ้นรูปลึก (มิลลิเมตร)

2.3.6.3 การคำนวณแรงของกรรมวิธีลดความหนาผนัง [7]

โดยปกติกรรมวิธีลดความหนาผนังชิ้นงานจะไม่มีแรงกดจากแผ่นเปล่า(BlankHolder) เนื่องจากไม่มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงาน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ

ชิ้นงานจึงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพินซ์ ซึ่งแรงในการลดความหนาผนังประกอบไปด้วย 3 แรง คือ แรงดึง P_d ที่ส่งผ่านไปสู่วัสดุด้านข้างของถ้วย แรงของความเสียดทาน F ที่เกิดขึ้นระหว่าง ผิวสัมผัสของแม่พิมพ์กับผิวของถ้วย และแรงเฉือนของชิ้นงานที่เกิดจากรีดันแดนท์ (Redundant Shearing; P_r) หากมุมคาย (Die – Angle) ลดลงแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความเสียดทาน ระหว่างผิวสัมผัสคายกับชิ้นงาน และพินซ์กับชิ้นงานเพิ่มขึ้น

กรณีของถ้วยก่อนผ่านกรรมวิธีลดความหนาผนังบาง (Thin – Walled Cup) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.19 จากการวิเคราะห์เงื่อนไขการสมดุล [7]

$$-Dh / H = D\sigma_x / [\sigma_x + P(1+B)] \quad \text{.....(2.19)}$$

$$\text{ซึ่ง } B = (\mu_1 - \mu_2) \cot \alpha \text{ และ } \sigma_x + P = (2 / \sqrt{3}) Y^*$$

เมื่อ H = ความหนาผนังของถ้วยของเอลิเมนต์ที่อยู่ในบริเวณเปลี่ยนรูป

σ_x = ความเค้นของผนังด้านข้างของถ้วย บนแกนตามทิศทางการเคลื่อนที่ของพินซ์

P = แรงปฏิกิริยาที่ตั้งฉากกับผิวของพินซ์หรือผิวของคาย

μ_1 = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวของผนังด้านข้างของถ้วยกับผิวของคาย

μ_2 = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวของผนังด้านข้างของถ้วยกับผิวของพินซ์

Y^* = ความเค้นดึงครากเฉื่อยบนแกนตามแนวการดึง (Uniaxial Tension)

Y_o = ความเค้นเฉือนจุดครากที่ทางเข้าของคาย

α = มุมเอียงของคาย (Die – Angle)

ทำการอินทิเกรตระหว่างในช่วงค่าของ $H = H_o$ และ $H = H$ จะได้สมการที่แสดงในรูปแบบของความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress)

$$(\sqrt{3}) \sigma_{xf} / (2 Y_o) = (1 + B) [1 - (H / H_o)^B] / B \quad \text{.....(2.20)}$$

เมื่อ σ_{xf} = ความเค้นตามแนวแกนการเคลื่อนที่ของพินซ์

แรงดึง P_d หรือแรงในการลดความหนาผนังจะได้รับโดยการหาค่า σ_{xf} เมื่อ $H = H_1$

$$P_d = 2 \pi R_o H_1 \sigma_{xf} \quad \text{.....(2.21)}$$

แรงของความเสียดทานคือ

$$F = 2 \pi R_o \left(\int_0^1 \mu_2 P D x \right) \quad \text{.....(2.22)}$$

$$Dw_0 = \int_0 K \tan \theta \, 2 \pi R_0 \, Dx \, Dy \quad \text{.....(2.24)}$$

หรือ

$$Dw_0 = (1/2) \pi R_0 H_0 Y_0 \tan \alpha \, Dx \quad \text{.....(2.25)}$$

งานที่บิดเบี้ยวเป็นส่วนประกอบอันหนึ่งของแรงเฉือนขึ้นงานที่เกิดจากรีดันแดนท์ หรือแรงของบริเวณขึ้นงานที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยแรงเฉือน อยู่ ณ ทางเข้าของคาย และกำหนดให้งานของการบิดเบี้ยวอยู่ในรูปแบบของแรงคังนี้คือ

$$Dw_0 = P'_R (H_0 / H_1) \, Dx \quad \text{.....(2.26)}$$

จากสมการที่ (2.25) และ (2.26)

$$P'_R = (1/2) \pi R_0 H_1 Y_0 \tan \alpha \quad \text{.....(2.26)}$$

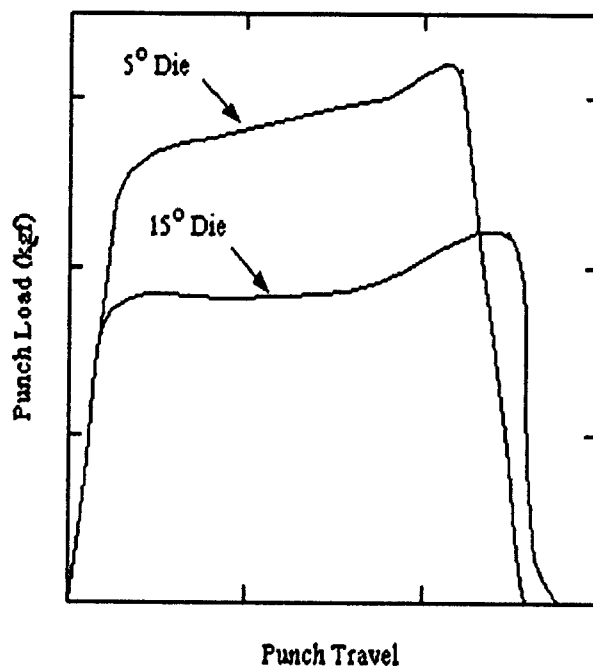
และลักษณะคล้ายกันจะได้แรงที่ใช้ในการ Unshearing ซึ่งอยู่ ณ ทางออกของคาย คือ

$$P''_R = (1/2) \pi R_0 H_1 Y_1 \tan \alpha \quad \text{.....(2.27)}$$

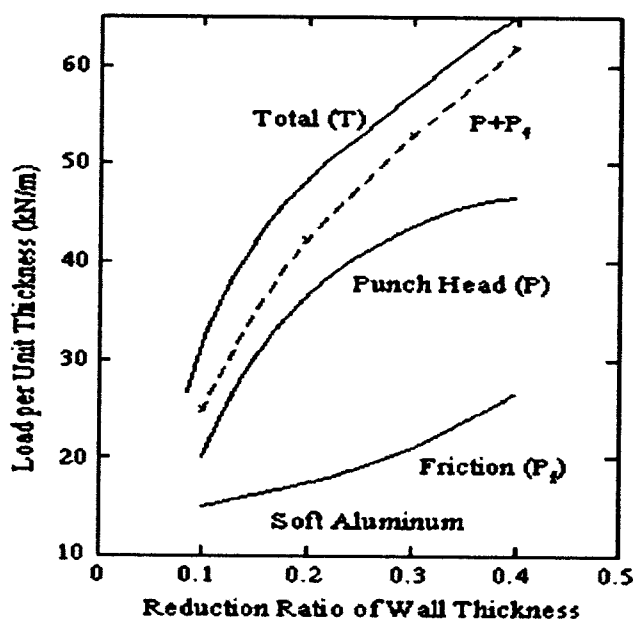
โดยที่ Y_1 คือความแข็งแรงดึงครากของวัสดุที่ผ่านการลดความหนาผนังของคาย ดังนั้นแรงทั้งหมดของแรงเฉือนขึ้นงานที่เกิดจากรีดันแดนท์ จะได้จากผลรวมของสมการที่ (2.26) กับ (2.27)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงของแรม (Ram) กับระยะการเคลื่อนที่ของแรม ของกรรมวิธีลดความหนาผนังดังแสดงในภาพที่ 2.20 กรรมวิธีลดความหนาผนังเป็นกรรมวิธีที่มีการกดอัดผนังด้านข้างของขึ้นงาน เพื่อเอาชนะการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุขึ้นงาน ดังนั้นแรงรวมที่ใช้ในการขึ้นรูป (Total Forces) จึงเพิ่มสูงขึ้นตามระยะการเคลื่อนที่ของพั่นซ์ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.20 พบว่าแรงที่ใช้ในการลดความหนาผนังขึ้นงาน ได้มาจากแรงของความเสียดทานระหว่างผิวด้วยกับขึ้นงาน ผิวด้วยกับพั่นซ์ และแรงที่ใช้ในการเอาชนะการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของขึ้นงาน (Punch Load) เมื่อรวมแรงทั้งสองนี้เข้าด้วยกัน จะเป็นแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงาน (สังเกตได้จากเส้นประ) แต่ในกรรมวิธีลดความหนาผนังของขึ้นงาน แรงทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปจะเป็นเส้นทึบดังภาพที่ 2.21 ดังนั้นค่าที่แตกต่างระหว่างเส้นทึบกับเส้นประเนื่องจากผลของรีดันแดนท์ โดยผลของรีดันแดนท์ที่เกิดจากบริเวณของขึ้นงานที่ถูกขึ้นรูปโดยแรงเฉือนซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแล้วทำให้เอลิเมนต์ใด ๆ ของขึ้นงานมีการเปลี่ยนรูปเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ดังภาพที่

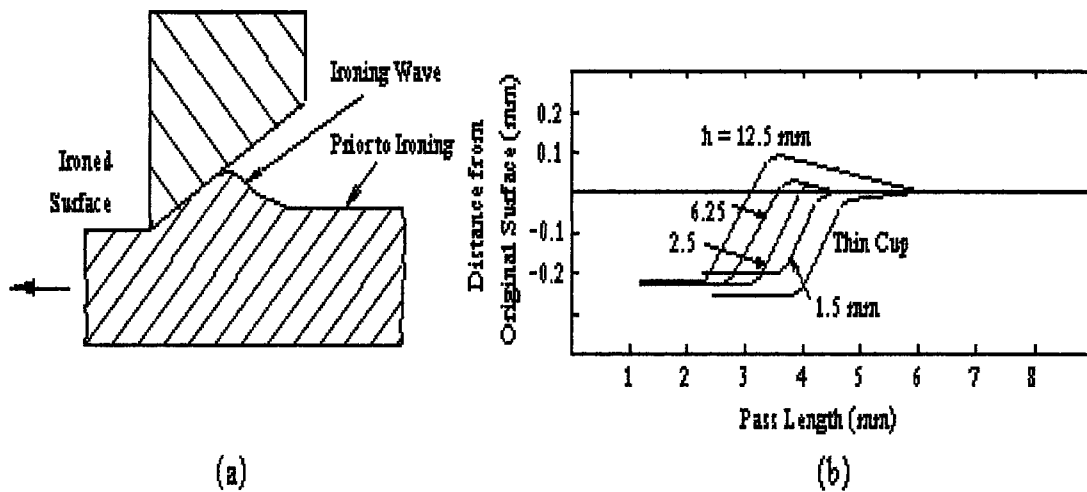
2.20 หลังจากทีอ์ลิเมนต์ไหลผ่านช่วงบริเวณดังกล่าวอ์ลิเมนต์จะกลับมามีสภาพเดิมอีกครั้งโดยที่พื้นที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูปผนังชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรนั้นจะเกิดคลื่น (Ironing Wave) ในการลดความหนาผนัง ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกรรมวิธีดึงลวด (Wire Drawing) และกรรมวิธีขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing)



ภาพที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ของพื้นที่ในกรรมวิธีลดความหนาผนัง [7]

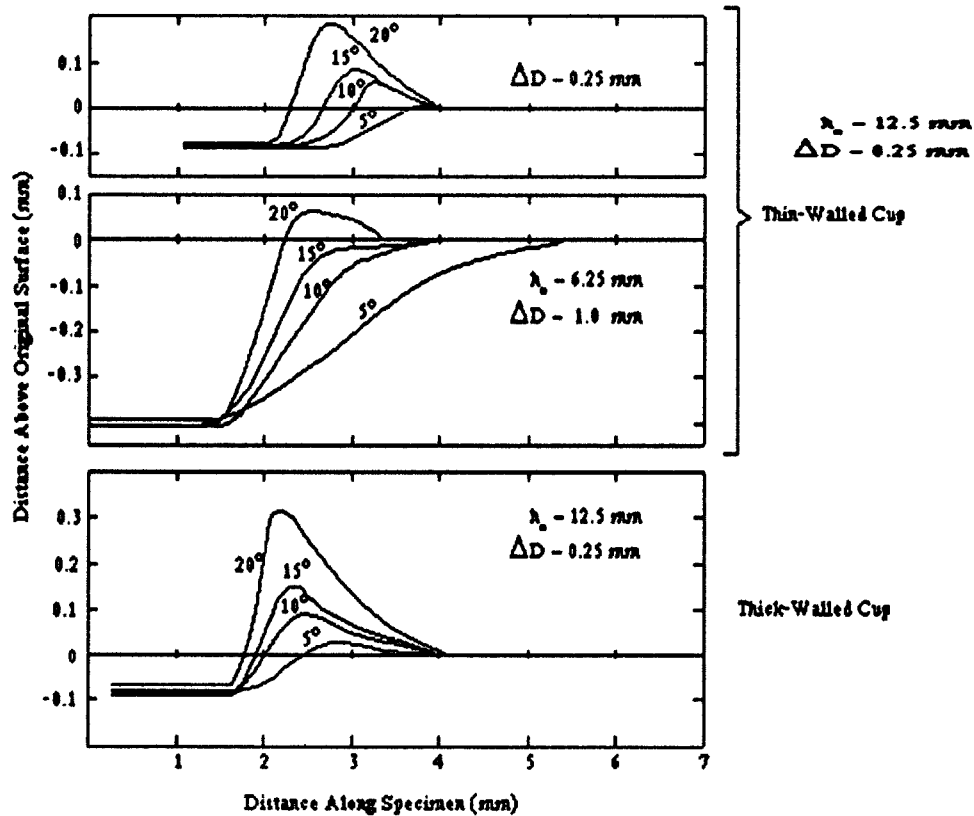


ภาพที่ 2.21 แสดงส่วนประกอบของแรงในกรรมวิธีลดความหนาผนังขึ้นงาน [7]



ภาพที่ 2.22 แสดงลักษณะการเกิด Ironing Wave ในระหว่างการลดความหนาผนังชิ้นงาน

- (A) ลักษณะการเกิดคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนัง (Ironing Wave)
 (B) การเกิดคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนัง ที่มุมของคายเท่ากับ 15 องศา โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยที่เปลี่ยนแปลงไป (Reduction In Diameter; ΔD) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร [7]

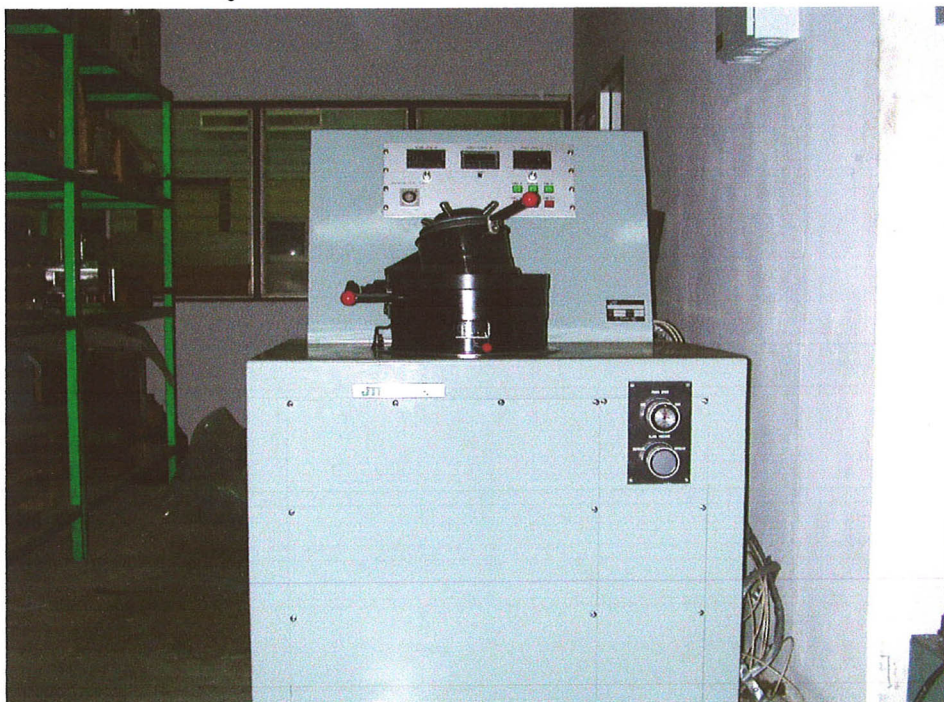


ภาพที่ 2.23 แสดงอิทธิพลมุมของคาย และการเกิดความหนาของคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนัง [7]

ปรากฏการณ์เกิดคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนัง จะพบว่าคลื่นที่เกิดขึ้นในระหว่างการลดความหนาผนัง จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนการลดความหนาผนังชิ้นงานที่มาก หรือเมื่อมุมของด้ามมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเกิดคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนังชิ้นงาน ยังมีความสัมพันธ์กับความหนาผนังของถ้วยซึ่งถ้วยที่มีผนังหนามาก (Thick-Walled Cups) การเกิดคลื่นในระหว่างการลดความหนาผนัง จะมีขนาดใหญ่กว่าถ้วยที่มีความหนาผนังบาง (Thin-Walled Cups)

2.3.7 เครื่องทดสอบโลหะแผ่น (Universal Sheet Metal Testing Machine Sas-350d)

เป็นเครื่องสำหรับทดสอบการขึ้นรูปด้วย ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิกส์ ขนาดกำลัง 35 ตัน (350 กิโลนิวตัน) โดยสามารถปรับแรงกดแผ่นจับ ยึดชิ้นงานได้ถึง 100 กิโลนิวตัน ปรับความเร็วของพื้นที่ได้ถึง 150 มิลลิเมตร/นาที ปรับระยะขึ้นรูปได้ถึง 90 มิลลิเมตร ยี่ห้อ JT Tohsi ของบริษัท JT Tohsi Inc.Co., Ltd. รุ่น SAS - 350D จากประเทศญี่ปุ่น พร้อมเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล และบันทึกข้อมูลในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงเครื่องทดสอบโลหะแผ่น

แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญจะเป็นการแสดงแนวความคิดในการที่จะจัดทำโครงการให้มีประสิทธิภาพการทดลองที่โดยรวมทั้งมีการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆมาประกอบการพิจารณา การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ให้มีประสิทธิภาพในการทดลองให้ได้ค่าที่แม่นยำ