



อิทธิพลของแรงดันของเหลวที่มีต่อแรงลากขึ้นรูปในการลากขึ้นรูปลึก เหล็กคาร์บอนรีดเย็น SPCC ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

ศิริชัย ต่อสกุล^{1*} และ กฤษฎา บรรเทาพิษ²

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันของเหลว ในกระบวนการการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) โดยทำการศึกษาลากขึ้นรูปแผ่นไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ที่มีค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ 61.2-74.8 mm²/s ที่อุณหภูมิ 40°C ที่แรงดัน 3 ระดับ คือ 50, 100 และ 150 บาร์ ทำการศึกษาลากขึ้นรูปด้วยการลากขึ้นรูปลึกชนิดรูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก เหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ผลการทดลองซึ่งเปรียบเทียบกับ

การลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ พบว่าแรงดันของเหลวส่งผลทำให้แรงกดพื้นที่โดยรวมเพิ่มสูงขึ้น แต่แรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อแผ่นทดสอบลดลง โดยในสภาวะแรงดันของเหลวที่เหมาะสม คือที่แรงดัน 100 บาร์ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงานในการทดสอบ และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังชิ้นงานน้อยที่สุดเท่ากับ 6.40%

คำสำคัญ: การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ความหนืดเชิงจลศาสตร์ เหล็กคาร์บอนรีดเย็น

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
² นักวิจัย สายควบคุมและบริหารงานคุณภาพ บริษัท ชูมิกะ โพลีเมอร์ คอมพาวด์ (ประเทศไทย) จำกัด
* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2549-3490, 0-2549-4424 ต่อ 201 อีเมล: sirichai.to@en.rmutt.ac.th



Effect of Liquid Pressure on Drawing Force in the Hydrodynamic Deep Drawing to SPCC Cold Rolled Carbon Steel

Sirichai Torsakul^{1*} and Kitsada Buntaopis²

Abstract

This research is to study the effect of liquid pressure in the hydrodynamic deep drawing process. In the experiment, the hydraulic oil standard grade 68 having kinematics viscosity of 61.2-74.8 mm²/s at temperature of 40°C was used under the different pressure levels of 50, 100 and 150 bar. This study was performed by the cylindrical deep drawing of 0.5 mm thickness steel sheet. The experimental results compared

with the normal deep drawing process. It is found that the liquid pressure increases the total punch force but decreases the drawing force to the blank sample. The liquid pressure at 100 bar with the use of tearing on the workpiece was not apparent and the change of the cup wall thickness was only 6.40% gave the minimum result.

Keywords: Hydrodynamic Deep Drawing, Kinematics Viscosity, Cold Rolled Carbon Steel

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.

² Research and Development, Quality Control Management, Sumika Polymer Compounds (Thailand) Co.,Ltd.

* Corresponding Author, Tel 0-2549-3490, 0-2549-4424 Ext. 201, E-mail: sirichai.to@en.rmutt.ac.th

1. บทนำ

งานขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming) ในปัจจุบันมีกรรมวิธีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ก็มีความแตกต่างกัน การลากขึ้นรูปลึกด้วยกระบวนการการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic Deep Drawing) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น สำหรับการลากขึ้นรูปโลหะที่มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ ในการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวจะใช้ของเหลวที่มีแรงดันสูง เข้ามาช่วยในการขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับการลากขึ้นรูป โดยในขณะที่มีการเคลื่อนตัวของแม่พิมพ์ตัวบนกดลงบนชิ้นงานนั้น ผลที่เกิดขึ้นคือของเหลวซึ่งมีการควบคุมแรงดัน จะทำให้เกิดแรงต้านแรงกดพันซ์ในระหว่างการขึ้นรูป โดยของเหลวที่มีแรงดันจะเคลื่อนตัวอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ส่วนล่างกับผิวของแผ่นโลหะ กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มอัตราส่วนขีดจำกัดการลากขึ้นรูป (Limiting Drawing Ratio, LDR) และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูป [1]-[4]

อนึ่ง ในปี 2004 Joakim Lundqvist [5] ได้กล่าวถึงกระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing คือการลากขึ้นรูปลึก โดยการใช้พันซ์ขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งภายในชุดตายบรรจุด้วยของเหลวที่ควบคุมแรงดันซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ ในขณะที่ทำการขึ้นรูปของเหลวจะเกิดแรงดันที่ตัวชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างตามที่กำหนด ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing โดยของเหลวที่ถูกควบคุมแรงดันจะมีการเคลื่อนที่ในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันที่กระทำกับชิ้นงานต่ำกว่า ในปี 2004-2005 Lihui Lang [6], [7] ทำการศึกษาวิจัยถึงตัวแปรในกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) เป็นวัสดุในการทดลอง สรุปได้ว่าอลูมิเนียม A16016-T4 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่อัตราส่วนการลากขึ้นรูป 2.46 และกระบวนการที่ดีที่สุดของการขึ้นรูปครั้งนี้คือ ระยะห่างระหว่าง Blank Holder กับแม่พิมพ์ คือ 0.98 ถึง 1.035 ของความหนาแผ่นโลหะ ความดัน

ของเหลวภายในอยู่ที่ประมาณ 325 บาร์ ในปี 2010 S. Jamshidifard และคณะ [8] ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของแรงต้านการเคลื่อนที่ของพันซ์ จากแรงดันสถิตของของเหลว (Hydrostatic Counter Pressure) ในกระบวนการ Hydromechanical Deep Drawing โดยทำการลากขึ้นรูปอลูมิเนียม AL6111-T4 พบว่าในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตำแหน่งที่เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพันซ์สูงสุด จะส่งผลทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับชุดเหยียบชิ้นงาน (Blank Holder) ที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันที่เพิ่มสูงขึ้น ในปี 2011 Huiting Wang และคณะ [9] ทำการศึกษารัศมีแรงดัน ที่มีผลต่อกระบวนการ Hydrodynamic Deep Drawing ซึ่งควบคุมทิศทางไหลของของเหลวภายในแม่พิมพ์ พบว่าแรงดันของเหลวเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญ ที่มีผลต่อการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป แรงกดพันซ์และความเค้นที่เกิดขึ้นกับผนังชิ้นงาน โดยแรงดันของเหลวที่เหมาะสม ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของกระบวนการดังกล่าว

ดังนั้นในการศึกษาทดลองครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันของเหลว (Internal Liquid Pressure) ซึ่งเคลื่อนตัวอยู่ภายในของแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Liquid Chamber) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force) และความเสียหายของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [10]

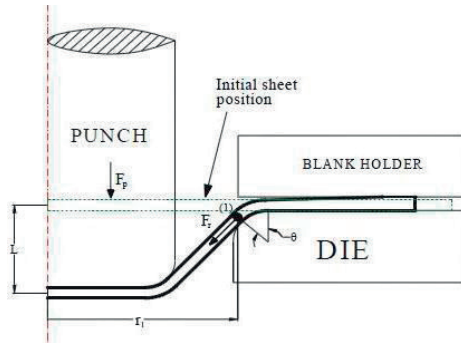
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing)

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ดาย (Die) พันซ์ (Punch) และตัวกดแผ่นชิ้นงาน (Blank Holder Ring)

2.1.1 แรงในการลากขึ้นรูป

แรงกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ การลากขึ้นรูปลึก ซึ่งเกิดจากแม่พิมพ์ตัวกดหรือพันซ์กระทำต่อชิ้นงาน



รูปที่ 1 แรงกดพันซ์ในการขึ้นรูปถ้วย [12]

ในรูปที่ 1 แรงกดพันซ์ในการขึ้นรูปถ้วยทรงกระบอกของกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (FP) โดยที่การคำนวณแรงกดพันซ์ ซึ่งเป็นแรงกดพันซ์ในอุดมคติที่ไม่คำนึงถึงแรงเสียดทาน และการโก่งตัวของวัสดุในขณะทำการลากขึ้นรูปลึก ในการลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 [11]

$$F_p = d \times \pi \times s \times R_m \times n \quad (1)$$

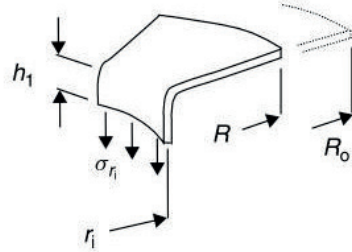
โดย d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของพันซ์ s คือความหนาของแผ่นชิ้นงานในการขึ้นรูป R_m คือความเค้นแรงดึงของวัสดุ และ n คือค่าการปรับค่า (Correction Value) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการขึ้นรูปจริง ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$ ซึ่ง β คืออัตราส่วนการขึ้นรูป D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป และ d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพันซ์ [11]

ตารางที่ 1 ค่าการปรับค่า $n = f(\beta_{actual})$

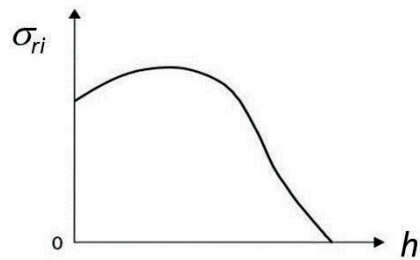
n	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9
$\beta_{actual} = \frac{D}{d}$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8

2.1.2 ความเครียดแข็งตัว (Strain-hardening)

ความเครียดที่เกิดขึ้นบนส่วนของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น ซึ่งเกิดขึ้นจากความเค้นไหลที่กระทำต่อหนึ่งชิ้นงาน (σ_n) จะเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูป ในขณะที่



รูปที่ 2 การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในกระบวนการลากขึ้นรูปในสภาวะปราศจากแรงเสียดทาน ความเค้นไหล (σ_n) มีขนาดเท่ากันทุกจุด [13]

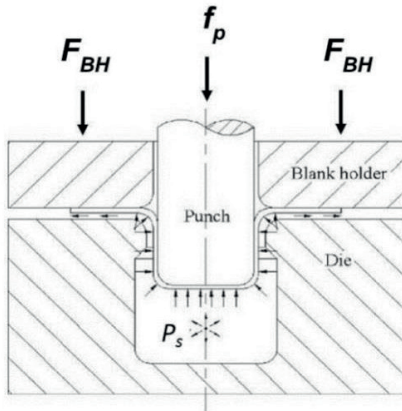


รูปที่ 3 เส้นกราฟของความเค้นในการลากขึ้นรูปเปรียบเทียบกับระยะความลึกของการขึ้นรูป [13]

รัศมีวงนอกของวัสดุแผ่นจะลดลง เนื่องจากโลหะแผ่นจะถูกกดลงไปยังด้านในของตาย รัศมีวงนอก R จะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2 ค่าความเครียดแข็งตัว ซึ่งเกิดจากความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งวัสดุแผ่นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ถ้าสมมติให้ค่าความเค้นที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุแผ่น เป็นความเค้นเฉลี่ย (σ_f)_{av} และไม่คำนึงถึงความหนาที่ไม่เหมือนกันของวัสดุแผ่น จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2 [13]

$$\sigma_{ri} = (\sigma_f)_{av} \ln \frac{R}{r_i} \quad (2)$$

ค่าความเค้นไหล (σ_n) ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งวัสดุเกิดความเครียดแข็งตัว ตามสมการที่ 2 และการลดลงของรัศมีแผ่นชิ้นงาน (R) โดยที่ h คือระยะความลึกของการขึ้นรูป สามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งโดยปกติแล้วความเค้นในขณะ



รูปที่ 4 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว
[14]

การลากขึ้นรูปจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงต้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุด และจะลดลง

2.2 การลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว

การลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว ในรูปที่ 4 การทำงานและส่วนประกอบของระบบการลากขึ้นรูปลึกด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1. ชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Die Sets) และ 2. ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของชุดควบคุมไฮดรอลิก และชุดควบคุมอัตโนมัติ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการลากขึ้นรูปลึก โดยใช้การเคลื่อนที่ของของเหลว นั้น ของเหลวที่มีแรงดันตามการควบคุมจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และไหลออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดันและความเร็วสูง จากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของแรงดันของของเหลว นั้น เกิดขึ้นจากการกดของพื้นที่ในจังหวะของการลากขึ้นรูปลึก [14]

2.3 แรงกดพื้นที่กระทำต่อแผ่นขึ้นทดสอบ

ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก ด้วยการเคลื่อนที่ของของเหลวในสถานะของแรงสูง คำนวณได้ตามสมการที่ 3 [7]

$$f_d = f_p - \frac{1}{4} \pi d_p^2 P_s \quad (3)$$

โดยที่ P_s คือแรงดันของเหลวภายในห้องแม่พิมพ์ f_d คือแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงานในการทดลอง และ f_p คือแรงกดพื้นที่โดยรวมที่เกิดขึ้นจริงในขณะขึ้นรูป

2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุโลหะแผ่น

2.4.1 อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r)

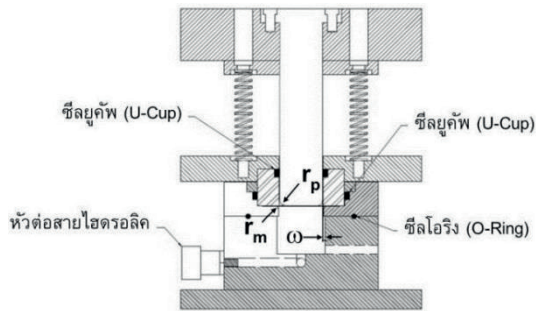
ค่า r มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนความเครียดจริงในแนวความกว้าง ต่อความเครียดจริงในแนวความหนาของความเครียดช่วงพลาสติก ในโลหะแผ่นบริเวณการยืดสม่ำเสมอของการทดสอบการดึง โดยเป็นการวัดความสามารถของวัสดุต่อการต้านทานการลดความหนาในการลากวัสดุ บริเวณริมขอบชิ้นงานจะเกิดการยึดในทิศทางเดียว (แนวนอน) เกิดการกดในทิศทางตั้งฉาก (แนวเส้นรอบวง) ค่า r สูงแสดงว่าวัสดุมีสมบัติการลากได้ดี โดยทั่วไปมักวัดค่า r เฉลี่ยหรือแอนไอโซทรอปีตั้งฉากเฉลี่ย r_m (Normal Anisotropy) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4 [15]

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

เมื่อ r_0 คือค่าอัตราส่วนความเครียดที่มุม 0 องศาของแนวการรีด r_{45} คืออัตราส่วนความเครียดที่มุม 45 องศาของแนวการรีด r_{90} คืออัตราส่วนความเครียดที่มุม 90 องศาของแนวการรีด

2.4.2 เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) คือความชันของเส้นโค้งความเค้นจริง และความเครียดจริง เมื่อมีการพล็อตบนค่าลอการิทึม เป็นการกำหนดโดยขึ้นอยู่กับความเค้นไหล (Flow Stress) บริเวณจุดครากบนระดับความเครียด ค่า n ที่สูงจะเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการดึงยึดขึ้นรูปได้ดี ส่วนของเส้นโค้งที่อยู่ถัดไปจากเส้นตรง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความหมายตาม



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ในการลากขึ้นรูป

สมมติฐานของกฎยกกำลัง (PowerLaw) ตามสมการที่ 5 [15]

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (5)$$

เมื่อ σ คือค่าความเค้นจริง ε คือความเครียดจริง และ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านการดึง (Strength Coefficient)

3. การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1 เครื่องปั๊มและแม่พิมพ์การลากขึ้นรูป

เครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงชนิดวัดแรงกด พร้อมชุดแปลงสัญญาณชุดแม่พิมพ์การลากขึ้นรูปวัสดุทำจากเหล็ก SKD11 ชุบแข็ง 58-60 HRC ซึ่งออกแบบให้ใช้สปริงเป็นอุปกรณ์กดแผ่นทดสอบ โดยในการทดลองติดตั้งสปริงแม่พิมพ์ค่าคงที่สปริง 19.62 N/mm ติดตั้งทั้งหมด 8 ตัว แรงกดขึ้นทดสอบรวม 156.96 N/mm ในตารางที่ 2 สภาวะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 5 แสดงถึงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่ออกแบบสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 2 แม่พิมพ์ในการทดลองการลากขึ้นรูป

รัศมีมุมตาย (r_m)	รัศมีมุมพันธ์ (r_p)	เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางพันธ์	ช่องว่าง แม่พิมพ์ (ω)
2 mm	4.5 mm	45 mm	0.65 mm

จากรูปที่ 5 ของเหลวจากชุดต้นกำลัง จะถูกอัดผ่านหัวต่อสายไฮดรอลิกเข้าสู่ห้องแม่พิมพ์ โดยการควบคุม



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และ (ข) อุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ

แรงดันด้วย ลิ้นควบคุมแรงดันที่ชุดต้นกำลัง ไฮดรอลิก ในขณะที่เครื่องปั๊มเลื่อนลงจนกระทั่งพันธ์ สัมผัสชิ้นงานด้วยระยะ 25 mm จะทำให้สปริงเกิดการอัดตัวเป็นแรงกดรวม 3.92 kN (156.96 N/mm $\times$ 25 mm) ซึ่งก็คือแรงกดหรือแรงเหยียบชิ้นงาน (Blank Holder Force) หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการการลากขึ้นรูปด้วยระยะความลึกของชิ้นงานคงที่เท่ากับ 15 mm โดยการตั้งระยะการกดที่เครื่องปั๊ม

3.2 อุปกรณ์การวัดแรงกดพันธ์

การวัดแรงกดพันธ์ในขณะที่ทำการขึ้นรูป ใช้อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 6 (ก) ที่ติดตั้งเข้ากับกระบอกกดของเครื่องปั๊มอัดระบบไฮดรอลิก และอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ ในรูปที่ 6 (ข) ต่อพ่วงเข้ากับอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน เพื่อแปลงสัญญาณจากแรงดันของน้ำมันให้เป็นแรงกดเป็นพันธ์

3.3 ระบบต้นกำลังไฮดรอลิก

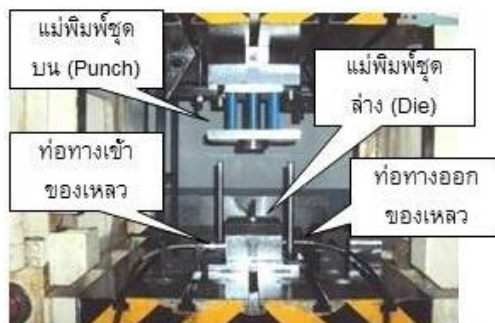
ชุดต้นกำลังและชุดควบคุมระบบไฮดรอลิก แรงดันสูงสุด 700 บาร์ พร้อมชุดควบคุมแรงดันชนิดสกรูหมุนสำหรับปรับตั้งแรงดันของเหลวภายในแม่พิมพ์ ใช้น้ำมันไฮดรอลิกมาตรฐานเกรด 68 ตามมาตรฐาน มอก.977-2551 ค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ 61.2-74.8 mm²/sec [24] เป็นของเหลวในการศึกษาทดลอง

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำมันไฮดรอลิกเกรด 68

ISO 3105 Viscosity Grade	Hydraulic oil 68
Viscosity @ 40 °C mm ² /s	61.2-74.8



รูปที่ 7 ชุดปรับความดัน และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน



รูปที่ 8 แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัดเรียบร้อยแล้ว

3.4 ชิ้นงานในการทดสอบ

ใช้แผ่นเหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141: 2005 [16] ความหนา 0.5 มิลลิเมตร กัดเป็นแผ่นวงกลมด้วยเครื่องกัด CNC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร โดยก่อนการนำไปใช้ในการทดลอง ได้ทำการลบคมตัดของแผ่นทดสอบ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ ได้มาจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z 2201: 1998 [17] แสดงในตารางที่ 4 แสดงถึงค่าความเค้นแรงดึงที่จุดคราก (R_m) และตารางที่ 5 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลซึ่งได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 2201 ของเหล็ก SPCC [17]

R_m (N/mm ²)	n	อัตราส่วนความเครียดพลาสติก		
		r_0	r_{45}	r_{90}
360	0.18	1.017	0.981	1.084

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็ก SPCC [16]

ชนิดเหล็ก	ส่วนประกอบทางเคมี (%)			
	C	Mn	P	S
SPCC	0.15 Max.	0.6 Max.	0.1 Max.	0.05 Max.

4. วิธีการทดลอง

4.1 การติดตั้งแม่พิมพ์และระบบไฮดรอลิก

ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊มอัด 80 ตัน โดยใช้ชุดแคมป์สำหรับยึดแม่พิมพ์กับสล็อตของฐานเครื่องปั๊ม พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ชนิดวัดแรงกดพร้อมชุดแปลงสัญญาณ หลังจากนั้นติดตั้งชุดความคุมไฮดรอลิกเข้ากับแม่พิมพ์ โดยใช้สายท่อทางเดินน้ำมันชนิดรับแรงดันสูงที่ช่องทางเข้าและช่องทางออกของแม่พิมพ์ รูปที่ 8 การติดตั้งสายไฮดรอลิกชนิดทนแรงดันสูงเข้ากับตัวแม่พิมพ์ โดยใช้หัวต่อชนิดแรงดันสูง (High Flow Coupler)

4.2 แรงกดแผ่นขึ้นทดสอบ

จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 แรงกดแผ่นขึ้นทดสอบหรือแรงเหยียบขึ้นงาน ที่ใช้จะเท่ากับ 3.92 กิโลนิวตัน โดยใช้สปริงแม่พิมพ์ที่มีค่าคงที่สปริงตามมาตรฐาน JIS B 5012: 2008 [18]

4.3 การควบคุมความดันภายในห้องแม่พิมพ์

การปรับค่าความดันภายในห้องแม่พิมพ์ เพื่อควบคุมความดันของเหลว ให้ได้ตามค่าการทดลองที่ 50, 100 และ 150 บาร์ ซึ่งเป็นช่วงการทดลองที่ชุดต้นกำลังระบบไฮดรอลิกสามารถอ่านค่าได้ โดยปรับที่ชุดต้นกำลังไฮดรอลิก พร้อมตัวปรับแรงดันชนิดสกรูหมุน ทำการปรับสกรูควบคุมความดันด้านทางเข้าและทางออกของแม่พิมพ์ ซึ่งของเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ และเมื่อน้ำมันไหลออก

จากแม่พิมพ์ ของเหลวจะไหลกลับถึงเก็บ ตามความดันที่ควบคุม ในรูปที่ 8 แม่พิมพ์ที่ติดตั้งบนเครื่องปั๊มอัตราแบบไฮดรอลิก และรูปที่ 7 ชุดปรับแรงดัน และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำมัน

4.4 การทดลองลากขึ้นรูปลึก

ทำการทดลองลากขึ้นรูปลึก เหล็กคาร์บอนรีดเย็นเกรด SPCC รูปถ้วยทรงกระบอกแบบมีปีก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก 45 mm ความสูงรวม 15 mm ขนาดความกว้างของปีก 5 mm โดยเริ่มการทดลองที่แรงดันของเหลว 50, 100 และ 150 บาร์ เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปแบบปกติโดยไม่ใช้แรงดันของเหลว ตารางที่ 6 ตัวแปรในการทดลอง ทำการทดลอง 5 ครั้งการทดลองในแต่ละสภาวะของตัวแปร

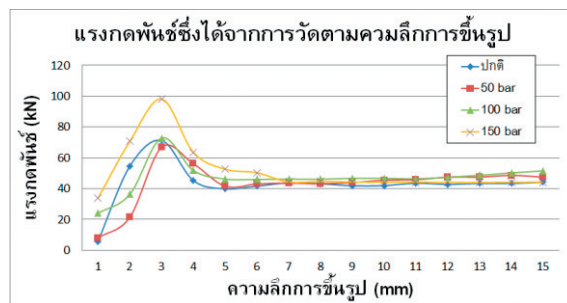
ตารางที่ 6 ตัวแปรในการทดลอง

แรงกด (kN)	ตัวแปรการทดลอง			
	ลากขึ้นรูปลึกแบบปกติ	แรงดันน้ำมัน (bar)		
3.92		50	100	150

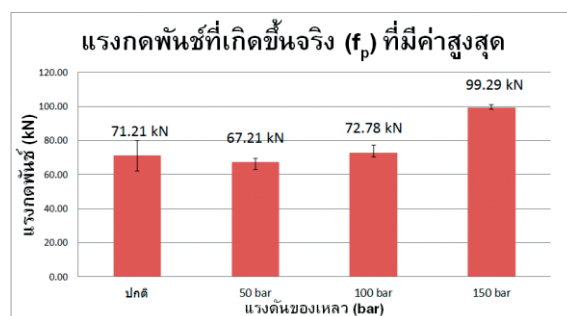
5. ผลการทดลอง

5.1 แรงในกดพันธ์ที่เกิดขึ้นจริงในการลากขึ้นรูป

ผลการทดลองในรูปที่ 9 พบว่าแรงดันของเหลวภายในมีผลทำให้แรงในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปในสภาวะปกติ ซึ่งไม่มีการป้อนแรงดันของเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกดของพันธ์ที่เกิดขึ้นจริง ในการลากขึ้นรูป (f_p) ซึ่งเป็นแรงทั้งหมดที่เครื่องปั๊มอัดใช้ในการขึ้นรูป โดยการทดลองลากขึ้นรูปที่ความดัน 50, 100 และ 150 บาร์ พบว่าการลากขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 150 บาร์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ เนื่องจากแรงดันของเหลวที่สูงมาก จนทำให้เกิดจากฉีกขาดของชิ้นงานอย่างรุนแรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับบทความวิจัยของ Lihui Lang ในปี ค.ศ. 2003 [6] แรงกดพันธ์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผล



รูปที่ 9 แรงกดพันธ์ในการลากขึ้นรูปลึกที่เกิดขึ้นในการทดลองตามระยะการเคลื่อนที่ของพันธ์



รูปที่ 10 แรงกดพันธ์สูงสุดในการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้ของเหลว เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบปกติ

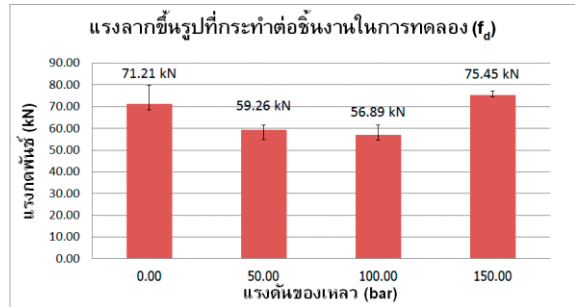
เนื่องมาจากแรงต้านจากแรงดันของเหลวภายในที่เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบการขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 50 บาร์ และ 100 บาร์ กับการขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าแรงกดพันธ์จากการใช้แรงดันของเหลวมีความสม่ำเสมอมากกว่าการขึ้นรูปแบบปกติ เนื่องจากการกระจายตัวของแรงดันของเหลวมีความสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิชาการของ ธนสาร และสุวัฒน์ ในปี พ.ศ. 2554 [19]

แรงกดพันธ์ที่เกิดขึ้นสูงสุด ในระหว่างการลากขึ้นรูปลึก [20] แสดงในรูปที่ 10 พบว่าแรงกดพันธ์มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันของเหลว เป็นผลเนื่องมาจากแรงกดพันธ์พยายามเอาชนะแรงต้านจากแรงดันของเหลวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihui Lang ในปี ค.ศ. 2002 [7] และแรงต้านแรงกดพันธ์จากแรงดันของเหลว นั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนสำคัญต่อชิ้นงานที่ได้

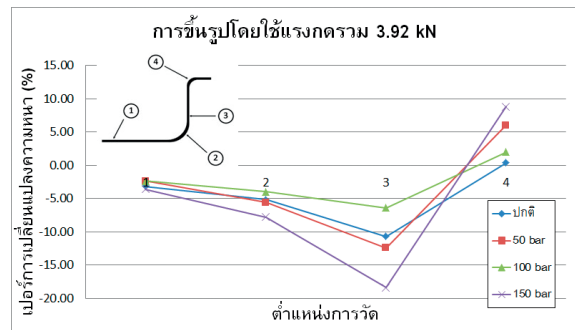
หลังจากการขึ้นรูป และการลากขึ้นรูปที่แรงดัน 150 บาร์ เกิดแรงกดพันธันซ์สูงสุดเท่ากับ 99.29 กิโลนิวตัน แรงกดพันธันซ์ต่ำสุดเท่ากับ 67.21 กิโลนิวตัน ที่การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว 50 บาร์ แรงกดพันธันซ์สูงสุดจากการลากขึ้นรูปลึกลับแบบปกติ เท่ากับ 71.21 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งแรงกดพันธันซ์ดังกล่าวเป็นแรงกดพันธันซ์ ที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูปลึกลับ โดยจะมีค่าที่สูงกว่าแรงกดพันธันซ์ในอุดมคติ ตามสมการที่ 1

5.2 แรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงานในการทดสอบ

ผลการทดลองในรูปที่ 11 แสดงถึงแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน (f_d) ซึ่งเป็นแรงลัทธิที่พันธันซ์กดบนชิ้นงาน โดยการแทนค่าแรงกดพันธันซ์ที่เกิดขึ้นจริง (f_p) ด้วยค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการวัด ตามผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 10 ที่การขึ้นรูปในสภาวะของแรงดัน 50, 100, 150 บาร์ และ ในสภาวะการขึ้นรูปแบบปกติ ซึ่งไม่มีแรงดันของเหลวภายในแม่พิมพ์ ในสมการที่ 3 พบว่าแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการลากขึ้นรูปแบบปกติกับการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว แต่เมื่อเพิ่มแรงดันของเหลวเป็น 150 บาร์ แรงลากขึ้นรูปที่กระทำกับชิ้นงานในการทดลองกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงกดพันธันซ์ที่เกิดขึ้นจริง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงต้านจากแรงดันของเหลวที่ช้ากว่า โดยที่การขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 100 บาร์ มีแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อแผ่นทดสอบต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 56.89 กิโลนิวตัน เนื่องมาจากการขึ้นรูปที่สภาวะแรงดันของเหลว 50 บาร์นั้น แรงต้านการเคลื่อนที่ของพันธันซ์จากแรงดันของเหลว ($P_s = 50$ bar) ไม่สามารถลดแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน (f_d) ได้มากนัก ในขณะที่แรงกดพันธันซ์ที่เกิดขึ้นจริงมีปริมาตรที่สูง ($f_p = 62.21$ kN) โดยขึ้นรูปที่สภาวะแรงดันของเหลว 100 บาร์ สอดคล้องกับชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปมีลักษณะทั่วไปที่ดีที่สุดและไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 11 แรงกดพันธันซ์ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบในการลากขึ้นรูปลึกลับโดยใช้ของเหลว และการขึ้นรูปแบบปกติ



รูปที่ 12 ความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวเปรียบเทียบกับ การลากขึ้นรูปแบบปกติ

ในขณะที่แรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงานในการทดลอง มีค่าสูงสุดอยู่ที่สภาวะของการลากขึ้นรูปลึกลับโดยใช้แรงดันของเหลว 150 บาร์ แรงกดพันธันซ์เท่ากับ 75.45 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงลากขึ้นรูปจากการลากขึ้นรูป แบบปกติเท่ากับ 71.21 กิโลนิวตัน

5.3 ความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน หลังการลากขึ้นรูปลึกลับ [21] โดยทำการผ่าชิ้นงานแล้วใช้ไมโครมิเตอร์ชนิดวัดเป็นจุด (Point Micrometer) วัดที่จุดซึ่งชิ้นงานในการทดสอบถูกแรงกดพันธันซ์กระทำ [22] จากรูปที่ 12 ผลการทดลองความหนาที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป พบว่าที่ตำแหน่งการวัดที่ 3 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุด ในทุกสภาวะของการทดลอง เนื่องมาจากเป็นตำแหน่งของผังกั้นด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่ง



รูปที่ 13 ชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ก) การขึ้นรูปแบบปกติ ข) การขึ้นรูปที่แรงดัน 50 ค) 100 และ ง) 150 บาร์

เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับบทความงานวิจัยของไพบุลย์ ในปี 2551 [23] และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการลากขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวกับการลากขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าของเหลวสามารถลดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปได้ โดยที่บริเวณตำแหน่งการวัดที่ 3 โดยการขึ้นรูปที่แรงดัน 100 บาร์ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยที่สุด เท่ากับ 6.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การขึ้นรูปแบบปกติ มีการเปลี่ยนแปลงความหนาเท่ากับ 10.714 เปอร์เซ็นต์ และการขึ้นรูปด้วยแรงดันของเหลว 150 บาร์ มีการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุด เท่ากับ 18.40 เปอร์เซ็นต์ โดยในสถานะของการขึ้นรูปที่แรงดันของเหลว 150 บาร์ และการขึ้นรูปในสภาวะปกติ การกระจายตัวของความหนาชิ้นงานหลังการขึ้นรูปไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก สภาวะดังกล่าวเกิดแรงกดพันธ (f_p) และแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน (f_d) สูง ส่งผลต่อการไหลตัวของเนื้อโลหะ ในขณะที่ทำการลากขึ้นรูปจนทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ผนังถ้วย

5.4 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

จากผลการทดลองในรูปที่ 13 ชิ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูป ภายใต้สภาวะของแรงดันของเหลวซึ่ง

แตกต่างกันเปรียบเทียบกับกรขึ้นรูปแบบปกติ พบว่าการขึ้นรูปแบบปกติ ชิ้นงานเกินรอยย่นที่ปากถ้วยมากที่สุด และชิ้นงานมีแนวโน้มของการเกิดรอยฉีกขาดที่ผิว มากกว่าการลากขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลว และเมื่อขึ้นรูปโดยใช้แรงดันของเหลวที่ 50, 100 และ 150 บาร์ ตามลำดับ พบว่ารอยย่นที่ปากถ้วยลดลงตามลำดับ เนื่องจากแรงดันของเหลวกระทำต่อชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่ที่การขึ้นรูปด้วยแรงดัน 150 บาร์ ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ผนังถ้วยอย่างรุนแรง ดังที่แสดงในรูปที่ 13 (ง) เนื่องมาจากมีแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงานมากที่สุด

6. สรุป

การลากขึ้นรูปเหล็กเหล็กรับอนรีดเย็น SPCC โดยใช้ของเหลว เปรียบเทียบกับการลากขึ้นรูปแบบปกติ แรงดันของเหลว แรงดันของเหลวส่งผลทำให้แรงกดพันธเพิ่มขึ้น โดยที่การขึ้นรูปเหล็กที่แรงดัน 100 บาร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดลองครั้งนี้ โดยมีแรงลากขึ้นรูป ที่กระทำต่อชิ้นงานในการทดลองเท่ากับ 59.26 กิโลนิวตัน

แรงดันของเหลวทำหน้าที่ เป็นแรงต้านทานแรงกดพันธในขณะทำการขึ้นรูป เมื่อแรงดันของเหลวเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้แรงต้านทานแรงกดพันธสูงขึ้นด้วย ซึ่งแรงต้านดังกล่าว มีผลทำให้แรงลากขึ้นรูปที่กระทำโดยต่อชิ้นงานในการทดลองลดลง โดยการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยแรงดันของเหลว 100 บาร์ ไม่พบรอยฉีกขาดที่ผิวของชิ้นงาน ในขณะที่รอยย่นที่ปากถ้วยเกิดน้อยกว่า การลากขึ้นรูปแบบปกติ ในขณะเดียวกันกับการลากขึ้นรูปเหล็กด้วยแรงดัน 50 บาร์ และการลากขึ้นรูปเหล็กที่แรงดัน 150 บาร์ ชิ้นงานเกิดรอยฉีกขาดที่ผนังถ้วย

การลากขึ้นรูปเหล็กด้วยแรงดันของเหลวที่ 50 บาร์ พบว่ามีแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน 59.26 kN และพบรอยฉีกขาด เนื่องจากแรงต้านจากแรงดันของเหลวไม่เพียงพอ ต่อการลดแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน ในขณะที่การลากขึ้นรูปเหล็กที่แรงดัน 150 บาร์ มีแรงลากขึ้นรูปที่กระทำต่อชิ้นงาน 75.45 kN ส่งผลทำให้ชิ้นงาน

เกิดรอยฉีกขาด เนื่องจากแรงต้านจากแรงดันของเหลว ทำให้แรงกดพื้นที่เกิดขึ้นจริง เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่า แรงต้านแรงกดพื้นที่ในขณะทำการขึ้นรูป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์การทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.H. Lang, "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.167, pp. 191, 2005.
- [2] L.H. Lang, "Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank," *International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application*, vol. 44, pp. 495-502, 2004.
- [3] D. Kang, "A study on hydrodynamic deep drawing equipment," *Journal Materials Processing Technology*, vol. 101, pp. 21-24, 2000.
- [4] D. Schmoedel, C. Hielscher, and R. Huber, "Metal Forming of Tubes and Sheets With Liquid and Other Flexible Media," *Annals of CIRP*, vol. 48/2, pp. 1-20, 1999.
- [5] L. Joakim, "Numerical simulation of tube hydroforming," Ph. D. Thesis, Civil and environmental engineering, Lulea university of technology, pp. 9-11, 2004.
- [6] L.H. Lang, "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy," *Journal Materials Processing Technology*, vol.101, pp. 119-131, 2000.
- [7] L. Lihui, "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, pp. 150-161, 2005.
- [8] S. Jamshidifard, H. Ziaeiipoor, H. Moosavi, and H. Khademizadeh, "Investigation of hydrostatic counter pressure effect on thickness distribution in Hydromechanical deep drawing process with hemispherical punch," in *International Conference on Manufacturing Engineering 2nd*, Constantza, Romania, September 3-5, 2010, pp.160-168.
- [9] W. Huiting, G. Lin, and C. Minghe, "Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, pp. 793-799, 2011.
- [10] D. Ajay and A. Yadav, "Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming," Ph.D. Thesis, Philosophy Engineer, The Ohio State University, pp.193-196, 2008.
- [11] H. Tschaetsch, *Metal Forming Practise*, Verlag Berlin Heidelberg Germany, Springer, 2006, pp. 142-183.
- [12] H. Gharib "Optimization of the blank holder force in cup drawing," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 18, pp. 291-294, 2006.
- [13] Z.D. Marciniak, J.L. and S.J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*, House Jordan Hill Oxford, Butterworth-Heinemann, Second edition, 2002, pp.108-128.
- [14] L.H. Lang, "Hydroforming highlights: sheet



- hydroforming and tube hydroforming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.151, pp. 165-166, 2004.
- [15] Sawad Sodamuk, “Formability Prediction of Automotive Parts Using Forming Limit Diagrams,” Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering), Srinakharinwirot University, pp. 11-14, 2550 (in Thai).
- [16] Standard Cold-reduced carbon steel sheets and strips, JIS G 3141: 2005, Japanese Industrial Standards specifies.
- [17] Test pieces for tensile test for metallic materials, JIS Z 2201: 1998, Japanese Industrial Standards specifies.
- [18] Coiled helical spring for press dies, JIS B 5012: 2008, Japanese Industrial Standards specifies.
- [19] Thanasan Intarakumthornchai, Suwat Jirathearanat, “Sheet Hydroforming Technology for Automotive Part Cluster,” The 2nd Conference on Industrial Operations Development 2011, 2544 (in Thai).
- [20] K. Hyunok “Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.209, pp. 4127-4132, 2009.
- [21] S. Aleksandrovic, “Significance and Limitations of Variable Blank Holding Force Application in Deep Drawing Process,” *Tribology in industry*, vol.27,no. 1-2, pp. 49-54, 2005.
- [22] X.B. Zhag, “Cup-drawing formation of steel sheet with nickel coating by finite element method,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol.17, pp. 37-40, 2007.
- [23] Paiboon Hanmon, “A Study of the Effect of Die Radius in Drawing the Flange Cup of Cold-Rolled Carbon Steel Sheets,” in The 46th Kasetsart University Annual Conference, 2551, pp. 11-18 (in Thai).
- [24] Thai Industrial Standard Hydraulic Fluid-Mineral Oil Base, TIS977-2551, Thai Industrial Standard.