การเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวของสแตนเลส SS304

A Comparison Flow Stress Curve of Hydraulic Bulge Test and Uniaxial Tensile Test of SS304

ชลิดา อุดมรักษาสกุล
กชกร วิรัชกุล
ชลากร อุดมรักษาสกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงิน งบรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) ของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลส (SS 304) ที่มีขนาดความหนาเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะแบ่งขั้นตอนการหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในส่วนที่หนึ่งจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Tensile Test) และในส่วนที่สองจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test: HBT) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ข้างต้น และทำการจำลองการขึ้นรูปของชิ้นงานตัวอย่างผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จากงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อนำผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว กับผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ มาจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมพบว่า การจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น ชิ้นงานจำลองสามารถขึ้นรูปให้มีความสูงได้ถึง 40 มิลลิเมตรก่อนชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาด แต่ในขณะเดียวกัน ถ้าใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว ชิ้นงานดังกล่าวจะสามารถขึ้นรูปได้เพียงประมาณ 15 มิลลิเมตรเท่านั้นหลังจากนั้นชิ้นงานก็จะเกิดการฉีกขาด จากงานวิจัยนี้พอที่จะสรุปเบื้องต้นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยการใช้การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำทำได้ดีกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เนื่องจากสภาพการณ์การขึ้นรูปของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีความใกล้เคียงกับสภาพการณ์การขึ้นรูปจริง

(งานวิจัยนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 56 หน้า)

คำสำคัญ : การทดสอบแรงดึงแกนเดียว การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

The purpose of this research is to find the relation between stress and strain, called as the Flow Stress Curve, for 0.4 mm thickness stainless steel (SS 304). Two main methods are used: the Uniaxial tensile test, and the Hydraulic Bulge Test (HBT). The relation between stress and strain from both methods would then be compared and simulated into cubic-shaped models by using Finite Element method. Results show that sheet metal formation simulated by using the flow stress curve obtained from Hydraulic bulge test can have the height of up to 40 millimeters before the work piece starts to lacerate. On the other hand, if the flow stress curve obtained from Uniaxial tensile test is used, the work piece will only be able to form about 15 millimeters before lacerating. The preliminary summary for this research can be said that the analysis for Hydraulic bulge test gives better results than Uniaxial tensile test, as it has similar conditions to the actual formation process.

(There are a total of 56 pages for this research)

Keywords: Uniaxial tensile test, Hydraulic Bulge Test, finite element method

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้แม่พิมพ์สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานโปรแกรม LS-DYNA สำหรับการวิเคราะห์การจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ ในการทดลอง และงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอขอบพระคุณบูรพคณาจารย์ทุกท่าน ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชานับตั้งแต่ครั้งเยาว์วัยจวบจนกระทั่งทุกวันนี้

ชลิดา อุดมรักษาสกุล
กชกร วิรัชกุล
ชลากร อุดมรักษาสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ของผลการวิจัย	5
1.6 แผนงานการดำเนินงานวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะแผ่น	7
2.2 ทฤษฎีการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว	8
2.3 ทฤษฎีการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	16
2.4 ทฤษฎีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 สภาพปัญหาปัจจุบัน	26
3.2 แนวความคิดของงานวิจัย	30
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	42
4.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	39
4.2 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	42
4.3 ผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูป	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ประวัติผู้วิจัย	54

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย	6
4-1	ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8	39
4-2	ค่าความสูงโดมจาก LVDT และค่าแรงดัน ที่บันทึกผลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ของชิ้นงานที่ 1	43
4-3	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	44

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	3
2-1	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลแรงดึงแกนเดียว	8
2-2	พฤติกรรมของวัสดุที่ได้แสดงออกมา เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ	9
2-3	ลักษณะของความเค้นทั้ง 3 แบบ	10
2-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม	13
2-5	แสดงการคอดตัวของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	13
2-6	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง	15
2-7	วิธีการหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด	16
3-1	แบบแม่พิมพ์การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	29
3-2	แม่พิมพ์การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	29
3-3	แสดงแผนผังแนวความคิดของงานวิจัย	31
3-4	ขั้นตอนการหา FSC จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	32
3-5	ชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	32
3-6	ขั้นตอนการหา FSC จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	33
3-7	เครื่องวัดการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรง	34
3-8	อ่างน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	34
3-9	ชิ้นงานที่ถูกนำไปตีกริดเรียบร้อยแล้ว	35
3-10	ชิ้นงานของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่ทำการแบ่งระดับความสูงต่าง ๆ	35
3-11	ชิ้นงานทำการสแกนแบบ 3 มิติ	36
3-12	จำลองรูปร่าง 3 มิติประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์	37
3-13	เปรียบเทียบ FEM ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวและการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	38
4-1	รูปร่างชิ้นงานก่อนการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	40
4-2	ชิ้นงานทดสอบที่เกิดการเสียรูปแบบผิดปกติ	40
4-3	แบบจำลองชิ้นงานทดสอบในการหารูปร่างที่เหมาะสม	40
4-4	แบบชิ้นงานทดสอบที่ทำการออกแบบใหม่	41
4-5	เครื่องทดสอบแรงดึงแกนเดียว	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-6	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงดึงแกนเดียว	42
4-7	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	46
4-8	กราฟเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว	46
4-9	จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว	49
4-10	จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	49
4-11	จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการเก็บรวบรวมคำสั่งกลาง (Library) ของโปรแกรม	50

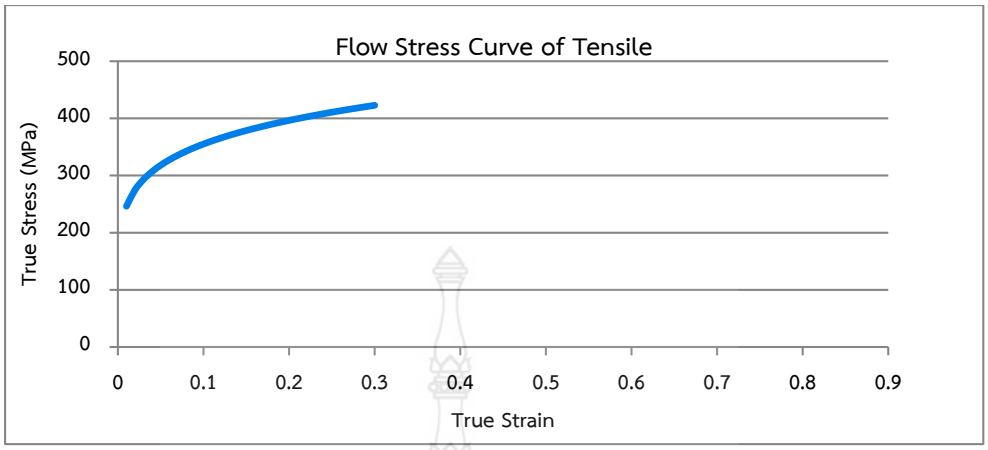
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และเครื่องใช้ในครัวเรือนมักจะนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลสเป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูป เพื่อให้ได้รูปร่างลักษณะตามความต้องการ เนื่องจากเหล็กกล้าประเภทนี้มีความแข็งแรง อายุการใช้งานยาวนาน ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีทั้งในสภาพกรด ด่างและสารละลาย ทนทานต่ออุณหภูมิต่ำและสูง สามารถทำให้ผิวสวยงามได้ด้วยการนำสแตนเลสไปชุบเคลือบ อีกทั้งยังดูแลรักษาทำความสะอาดง่ายเหมาะสำหรับงานที่ต้องการสุขอนามัย อาทิเช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ในงานด้านอาหารและเภสัชกรรม

โดยส่วนใหญ่แล้วกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming Process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่อุตสาหกรรมดังกล่าวนิยมใช้ สำหรับการนำโลหะแผ่นมาทำการขึ้นรูปเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีนั้นมักจะมีปัจจัยหลายประการที่มีผลกระทบกับคุณภาพของชิ้นงาน เช่น รูปร่างของชิ้นงานที่ออกแบบ ชนิดของโลหะแผ่น คุณสมบัติของโลหะแผ่นที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป และรูปร่างของแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น ซึ่งในปัจจุบันผู้ออกแบบนิยมนำวิธีที่รู้จักในชื่อ “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM)” เข้ามาช่วยในการจำลองสภาวะการณ์ขณะทำการขึ้นรูป ส่งผลให้ผู้ออกแบบนั้นสามารถตรวจสอบหาสภาวะการขึ้นรูปที่ดีได้ก่อนที่จะทำการสร้างแม่พิมพ์ หากผู้ออกแบบแม่พิมพ์ไม่ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการจำลองสภาวะการขึ้นรูปแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องทำการออกแบบแม่พิมพ์สร้างแม่พิมพ์จริงขึ้นและทดสอบขึ้นรูปชิ้นงาน (Tryout) เพื่อทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานว่าเป็นไปตามรูปร่างที่ต้องการหรือไม่ หากรูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปถูกต้องตามที่กำหนด จะสามารถนำแม่พิมพ์นั้นไปใช้ในการผลิตจริงได้ แต่ถ้ารูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปนั้นไม่ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับแก้และทดสอบการขึ้นรูปจนกระทั่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีความถูกต้องตามที่ต้องการ ส่งผลทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายและเวลา แต่การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการจำลองสภาวะการขึ้นรูปจะช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกสำหรับการออกแบบและปรับแก้แม่พิมพ์ แต่การที่จะปรับใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้มีการประมวลผลที่ถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่นำเข้าไปประมวลผลจะช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกสำหรับการออกแบบและปรับแก้แม่พิมพ์

แต่การที่จะปรับใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้มีการประมวลผลที่ถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่นำเข้าไปประมวลผล อาทิเช่น รูปร่างของแม่พิมพ์ (Tooling Geometry) พารามิเตอร์ของกระบวนการ (Process Parameters) และคุณสมบัติของโลหะแผ่น (Material Properties) ธนสาร และคณะ [1] นอกจากนั้นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในกระบวนการขึ้นรูปคือ คุณสมบัติของโลหะทางด้านความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) ซึ่งการที่จะขึ้นรูปชิ้นงานให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามที่ต้องการนั้นจะต้องอาศัยคุณสมบัติข้างต้นนี้ ดังนั้นถ้าค่าคุณสมบัติดังกล่าวเป็นค่าถูกต้องแล้ว จะส่งผลทำให้รูปร่างชิ้นงานที่ได้จากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง แต่ในทางตรงกันข้ามหากค่าคุณสมบัติดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง จะส่งผลทำให้รูปร่างชิ้นงานจากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง สุวัฒน์ [2] สำหรับค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้น นิยมหาด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ตามมาตรฐานสากลรับรองของการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ (American Society for Testing and Materials : ASTM) แต่จากงานวิจัยของชลิดา [3] ที่ทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมีค่าประมาณ 0.3 ของความเครียดเท่านั้น แต่การจำลองสภาวะการขึ้นรูปนั้นจะต้องการช่วงระดับความเครียดที่มากกว่า 0.3 ดังนั้นหากผู้ออกแบบแม่พิมพ์ต้องการจำลองสภาวะการขึ้นรูปโดยใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวที่มีค่าประมาณ 0.3 ของความเครียดนั้น จะต้องทำการประมาณการค่านอกช่วงของความเครียดที่ได้ (Extrapolation) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการอ้างอิงจากงานวิจัยของกชกร [4] แสดงดังภาพที่ 1-1 พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าระดับความเครียดเท่ากับ 0.3 ซึ่งไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการจำลองสภาวะการขึ้นรูป จึงต้องทำการประมาณค่าความสัมพันธ์นอกช่วงระดับความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว โดยมีการประมาณการนอกช่วงหลายวิธี แต่วิธีที่มักจะนิยมใช้คือกฎยกกำลัง (Power Law) แสดงดังสมการที่ 1 โดยจะต้องนำค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมาแทนในสมการดังกล่าว ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient : K) และค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็ง (Strain Hardening Exponent : n) ในส่วนของค่าความเครียดตั้งแต่ 0.4 ถึง 1.0 นั้นจะแทนค่าประมาณการในแต่ละค่า เพื่อทำการหาค่าความเค้นประมาณการ



ภาพที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \tag{1}$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นจริง (True Stress)

ε คือ ความเครียดจริง (True Strain)

K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

ภายหลังจากการหาค่าความเค้นประมาณการแล้ว จึงนำค่าความเค้นและความเครียดประมาณการที่ได้มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ระดับความเครียดมากกว่า 0.3 ส่งผลให้ค่าความเค้นจากการประมาณการนอกช่วงดังกล่าวคลาดเคลื่อนจากสภาวะการขึ้นรูปจริง นอกจากนั้นยังมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะแผ่นชนิดใหม่ๆ ให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) ทำให้โลหะแผ่นในแต่ละช่วงของความเครียดมีค่า n ที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้การประมวลผลลัพธ์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ค่าความเค้นจากการประมาณการนอกช่วงที่ใช้ค่า n เพียงแค่ค่าเดียวนั้นให้ค่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง หากทำการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนขึ้นรูปจริงด้วยการใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ถูกต้องแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง และยังช่วยให้การออกแบบแม่พิมพ์ง่ายยิ่งขึ้น หากนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ไม่ถูกต้องมาจำลองการขึ้นรูปด้วย

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง นอกเหนือจากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เช่นกันคือ วิธีการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test : HBT) เป็นการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แรงดันน้ำส่งผลให้ชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) Gutscher, et al. [5] ซึ่งมีสภาวะใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงและสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในระดับความเครียดที่มากกกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว นอกจากนั้นโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรก็ยังมีความยากในการขึ้นรูป โดยเฉพาะโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ตาม E8/E8M-09 ของมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials : ASTM) นั้นไม่มีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลส ที่มีขนาดความหนาเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร ทดลองด้วยแม่พิมพ์จากงานวิจัยของชลากร [6] แบ่งขั้นตอนการหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ โดยส่วนแรกจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ในส่วนสุดท้ายจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ข้างต้น และทำการจำลองการขึ้นรูปของชิ้นงานตัวอย่างผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการอ้างอิงผลจากการวิจัยว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เมื่อนำไปทำการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานแล้วจะส่งผลแตกต่างกันหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว กับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของสแตนเลส (Stainless Steel: SS304)

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบการจำลองการขึ้นรูประหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว กับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของสแตนเลส (Stainless Steel: SS304)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลส (Stainless Steel: SS304) ขนาดเท่ากับ 250x250 มิลลิเมตร และมีขนาดความหนาเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตรเท่านั้น

1.3.2 แม่พิมพ์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

1.3.3 แม่พิมพ์มีขนาดรัศมีเท่ากับ 5 มิลลิเมตร

1.3.4 ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องไฮดรอลิคเพรส (Hydraulic Press) ขนาด 200 ตัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษากระบวนการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 ทำการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

1.4.4 ทำการวัดและวิเคราะห์ชิ้นงาน

1.4.5 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1.4.6 ทำการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวและจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

1.4.7 ทำการจำลองการขึ้นรูปของชิ้นงานตัวอย่างผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.8 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ของผลการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test: HBT) กับการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว (Tensile Test)

1.5.2 สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบการขึ้นรูปจริงของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสามารถนำข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบจากงานวิจัยนี้ไปจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

1.6 แผนงานการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	**ระยะเวลา 12 เดือน**											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษากระบวนการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	↔	↔										
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		↔	↔									
3. จัดหาวัสดุและทดสอบแรงดึง		↔	↔									
4. ทำการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานจริง				↔	↔	↔						
5. ทำการวัดและวิเคราะห์ชิ้นงาน							↔	↔	↔	↔		
6. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง								↔	↔	↔	↔	
7. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย											↔	↔

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของบทที่ 2 จะได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว และการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ รวมถึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อหลัก ๆ ประกอบด้วยดังนี้

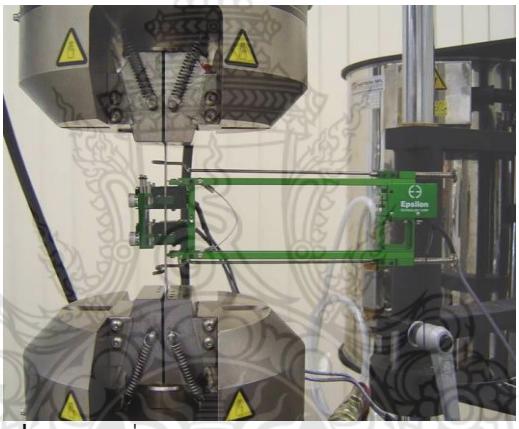
2.1 ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะแผ่น
2.2 ทฤษฎีการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว
2.3 ทฤษฎีการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ
2.4 ทฤษฎีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming Process)

กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการแปรเปลี่ยนโดยการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบ (Material) โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป (Forming Tool) ซึ่งในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวกับโลหะนั้น ส่วนใหญ่กระบวนการผลิตจะเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุดิบให้มีรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการ ทำให้ภายในเนื้อวัสดุเกิดความเค้นสูงหรือแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุสูง ประกอบกับขณะขึ้นรูปวัสดุมีสถานะเป็นของแข็งส่งผลทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น จะต้องมีความแข็งแรงและมีคุณภาพสูง เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์เกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการขึ้นรูปรวมถึงเครื่องจักรจะต้องมีความสามารถในการส่งแรงได้มากเพียงพอที่จะทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปโลหะนี้มีต้นทุนการผลิตที่สูง ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งโลหะแผ่นถูกนำมาผลิตโดยกรรมวิธีทางการผลิตได้มากมาย อาทิเช่น กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) กระบวนการพับขึ้นรูป (Bending Process) กระบวนการตัดเฉือน (Blanking Process) กระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Stamping Process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ (Sheet Hydroforming Process) โดยงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป [2, 3]

2.2 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกลที่มีมาตรฐานและเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดคือ การทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Tensile Test) โดยการทดสอบดังกล่าวเป็นขั้นตอนการทดสอบที่ไม่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปการทดสอบแรงดึงแกนเดียวนิยมใช้กับชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ตามมาตรฐานสากล นอกเหนือจากนั้นยังสามารถนำชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะรูปแบบอื่นมาทดสอบได้ โดยผู้ทดลองต้องทราบค่าความยาวและพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น การทดสอบแรงดึงแกนเดียวเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุวิธีหนึ่งภายใต้สภาวะการดึงยืดในทิศทางเดียวด้วยแรงคงที่ (Static Load) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลแบบแรงดึงแกนเดียว (Universal Tensile Test) จนชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แสดงดังภาพที่ 2-1 [7]

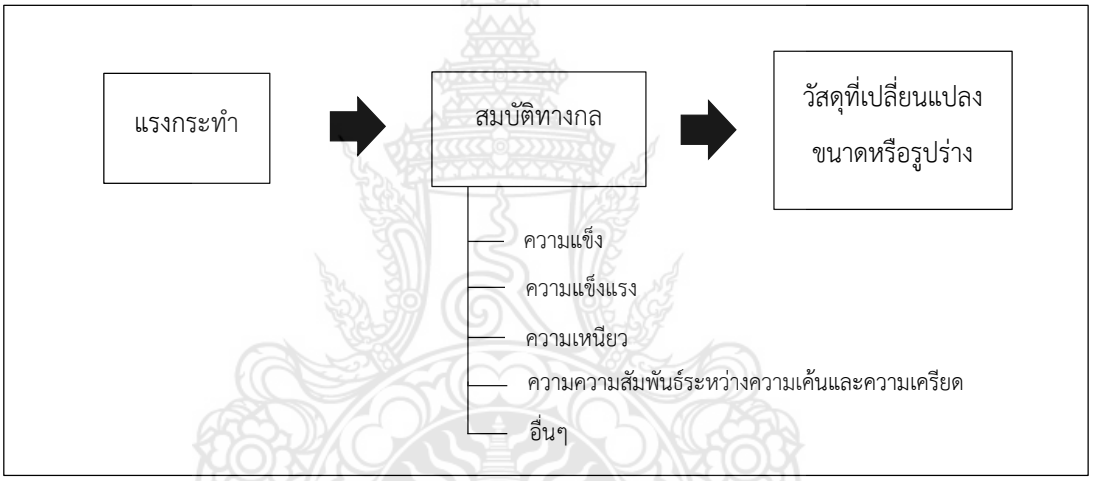


ภาพที่ 2-1 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลแรงดึงแกนเดียว

2.2.1 คุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติก

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการขึ้นรูปคือ คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งการขึ้นรูปโลหะโดยทั่วไปจะต้องพิจารณาคุณสมบัติทางกลของโลหะ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่ได้แสดงออกมา เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุแล้ววัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร อาทิเช่น ความเหนียว (Ductility) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) ดังภาพที่ 2-2 การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ รูปแบบที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบคืนตัว (Elastic Deformation) เกิดในขณะที่วัสดุถูกแรงภายนอกมากระทำแล้ววัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างไปจากเดิม แต่เมื่อปล่อยแรงกระทำภายนอกนั้นออกจากวัสดุแล้ว วัสดุเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างกลับมาอยู่ในสภาพเดิมหรือใกล้เคียงเดิมก่อนที่วัสดุจะได้รับแรงกระทำ ในส่วนรูปแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร (Plastic Deformation) เกิดขึ้นในขณะที่วัสดุถูกแรงจากภายนอกมากระทำแล้ววัสดุเกิด

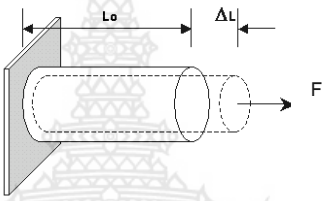
การเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างไปจากเดิมเมื่อปล่อยแรงกระทำภายนอกนั้นออกจากวัสดุแล้ว วัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างกลับมาอยู่ในสภาพเดิมหรือใกล้เคียงเดิมก่อนได้รับแรงกระทำ นั่นหมายความความว่าวัสดุจะมีขนาดหรือรูปร่างเป็นไปตามสภาพขณะที่ถูกแรงภายนอกมากระทำ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุจึงมีความสอดคล้องกันเป็นหนึ่งในคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างนั้นประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้ ค่า r_0, r_{45}, r_{90} K และ n ค่าพารามิเตอร์ r_0, r_{45} และ r_{90} หรือที่เข้าใจกันในชื่อคุณสมบัติความเป็นไอโซโทรปี้ (Isotropy) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้การขึ้นรูปโลหะแผ่นมีความเท่ากันทุกทิศทาง ส่วนค่าพารามิเตอร์ K และ n นั้นเป็นคุณสมบัติที่แสดงออกถึงความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุชนิดนั้นๆ ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในลำดับต่อไป



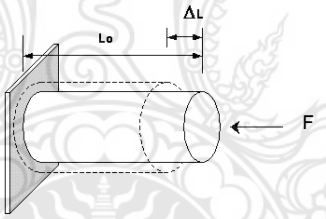
ภาพที่ 2-2 พฤติกรรมของวัสดุที่ได้แสดงออกมา เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ

2.2.1.1 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ซึ่งเป็นการทดสอบวัสดุในสภาวะแรงดึงคงที่ในทิศทางเดียว แรงดึงกระทำกับวัสดุจนกระทั่งวัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางกลของวัสดุ ความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นความเค้นที่เกิดจากการที่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับวัสดุ ซึ่งแรงกระทำจะกระจายแรงสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ แล้ววัสดุจะมีแรงต้านทานพยายามต้านแรงกระทำจากภายนอก เพื่อรักษาให้วัสดุมีขนาดหรือรูปร่างคงเดิมหรือเพื่อไม่ให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ ลักษณะของแรงภายนอกที่มากระทำกับวัสดุจะมีด้วยกันอยู่ 3 ลักษณะ ได้แก่ ความเค้นดึง (Tensile Stress) ความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นเฉือน (Sheer Stress) ความเค้นดึงและความเค้นอัดเป็นความเค้นที่ถูกแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเค้นเฉือนเป็นความเค้นที่ถูกแรงกระทำกับวัสดุในทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัด ดังภาพที่ 2-3 แสดงความเค้นดึง ความเค้นอัด และความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงดึง

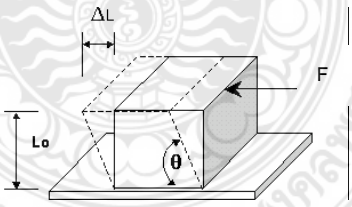
แรงอัด และแรงเฉือนที่กระทำกับวัสดุ ความเค้นดึงเกิดเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด แล้วชิ้นงานเกิดการยืดตัวเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2-3 (ก) ความเค้นอัดเกิดเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด แล้วชิ้นงานเกิดการหดตัวเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2-3 (ข) และความเค้นเฉือนเกิดเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำกับวัสดุในทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัด แล้วชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นมุมบิด ดังภาพที่ 2-3 (ค) ในงานวิจัยนี้จะใช้แรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ จึงทำให้เกิดความเค้นดึง สามารถหาค่าความเค้นทางวิศวกรรมที่เกิดขึ้นกับวัสดุได้แสดงดังสมการที่ (2-1)



(ก) แรงกระทำดึงวัสดุในทิศทางตั้งฉาก จึงเกิดความเค้นดึงขึ้น



(ข) แรงกระทำอัดวัสดุในทิศทางตั้งฉาก จึงเกิดความเค้นอัดขึ้น



(ค) แรงกระทำเฉือนวัสดุในทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัด จึงเกิดความเค้นเฉือนขึ้น

ภาพที่ 2-3 ลักษณะของความเค้นทั้ง 3 แบบ

$$s = \frac{F}{A_0} \tag{2-1}$$

โดยที่

s คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

F คือ แรงภายนอกที่มากระทำกับพื้นที่หน้าตัด

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น

จากสมการที่ 2-1 ค่าความเค้นที่คำนวณออกมามีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.^{2}) หรือพีเอสไอ (psi) เนื่องจากอยู่ในหน่วยของระบบยูเอส (U.S.) จึงต้องมีการเปลี่ยนหน่วยจากพีเอสไอ (psi) เป็นหน่วยนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa) ซึ่งเป็นหน่วยระบบเอสไอ (SI) สามารถแปลงหน่วยได้ดังนี้

1 psi = 6.89 x 10^3 Pa

10^6 Pa = 1 megapascal = 1 MPa

10^3 psi = 1ksi = 6.89 Mpa

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุ เมื่อวัสดุถูกแรงจากภายนอกมากระทำกับวัสดุนั้นเรียกว่า ค่าความเครียด ซึ่งค่าความเครียดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะแรกเป็นความเครียดยืดหยุ่นหรือคืนตัว (Elastic Strain) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุแล้วปล่อยแรงกระทำนั้นออกจากวัสดุ วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างกลับมาอยู่สภาพเดิมก่อนได้รับแรงมากระทำ ลักษณะสุดท้ายเป็นความเครียดถาวร (Plastic Strain) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจากภายนอกมากระทำกับวัสดุแล้วปล่อยแรงกระทำนั้นออกจากวัสดุ วัสดุจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างกลับมาอยู่สภาพเดิมก่อนได้รับแรงมากระทำหรือวัสดุแต่จะอยู่ในสภาพที่ขนาดและรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเดิม ซึ่งค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวเป็นค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามลักษณะของแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ ดังนี้ ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) และความเครียดเฉือน (Shear Strain) ซึ่งงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับความเครียดเชิงเส้นที่คำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุหารด้วยขนาดวัสดุเริ่มต้น ดังสมการที่ 2-2 ที่ค่าความเครียดไม่มีหน่วย

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{2-2}$$

โดยที่

e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)

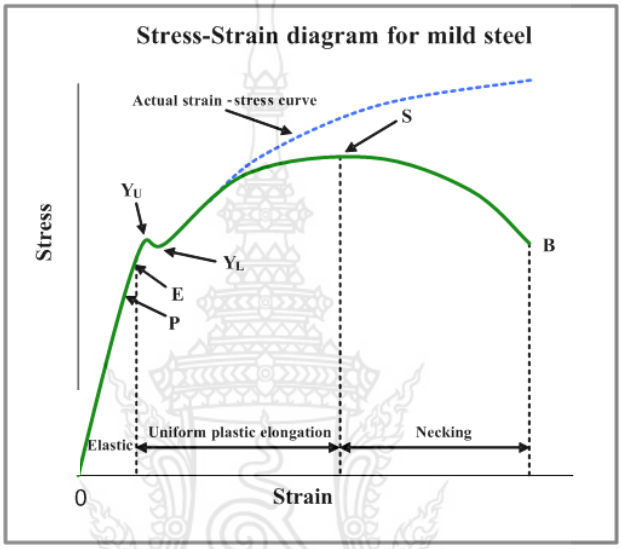
โดยที่ (ต่อ)

l_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

l คือ ความยาวชิ้นงานทดสอบหลังการดึง

การทดสอบแรงดึงแกนเดียวเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม ด้วยการออกแรงกระทำดึงชิ้นงานทดสอบหรือวัสดุอย่างช้า ๆ จนกระทั่งชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างยืดตัวออกจนถึงจุดพี (จุด P) ดังภาพที่ 2-4 โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงนี้มีสัดส่วนคงที่เป็นเส้นตรงเป็นไปตามกฎของฮุค (Hook's Law) จุด P นี้เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) ซึ่งตั้งแต่เริ่มออกกระทำกับวัสดุจนกระทั่งถึงจุด P ช่วงนี้เป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นหรือคืนตัว (Elastic Behavior) หากปล่อยแรงกระทำออกในช่วงนี้วัสดุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างจะกลับมาอยู่สภาพเดิมก่อนได้รับแรงมากระทำ แต่เมื่อเพิ่มแรงกระทำกับวัสดุหรือชิ้นงานต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีสัดส่วนที่ไม่เป็นเส้นตรงแต่จะแสดงออกมาอยู่ในรูปของเส้นโค้งต่อจากเส้นตรงในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างแบบคืนตัว โดยช่วงเล็กๆ บริเวณกราฟเส้นตรงแล้วต่อมาเป็นเส้นโค้งนี้วัสดุหลายชนิดที่ยังคงสามารถเปลี่ยนรูปร่างแบบคืนตัวได้เล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง นั่นคือจุด E หรือจุดพิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ที่เป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดที่จะทำให้วัสดุหรือชิ้นงานไม่เกิดการแปรรูปถาวร แต่เมื่อออกแรงกระทำกับวัสดุจนกระทั่งผ่านจุดพิกัดยืดหยุ่นแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) หรือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับมาอยู่ในสภาพเดิมได้ เรียกว่าจุดนี้ว่า จุดคราก (Yield Point) ซึ่งจุดครากนี้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กันชนิดของวัสดุ ในส่วนจุด Y_U นี้เรียกว่า จุดครากบน (Upper Yield) และในส่วนจุด Y_L นี้เรียกว่าจุดครากล่าง (Lower Yield) เป็นช่วงที่ความเค้นไม่เพิ่มขึ้นแต่ความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อออกแรงกระทำอย่างต่อเนื่องกับวัสดุผ่านจุดครากบนและจุดครากล่าง จนถึงจุดที่วัสดุสามารถรับแรงกระทำกับวัสดุได้สูงสุด หรือเป็นจุดที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่วัสดุหรือชิ้นงานจะสามารถทนได้โดยยังไม่เกิดการแตกหัก ณ จุดเอส (S) เรียกจุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) หรือที่นิยมเรียกว่าค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) จากนั้นเมื่อออกแรงกระทำอย่างต่อเนื่องต่อจากจุด S จะพบว่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุหรือชิ้นงานทดสอบจะเริ่มลดลงเฉพาะบริเวณอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่จุด S จนถึงจุด B ก่อนที่วัสดุจะเกิดการแตกหักเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการคอดตัว (Necking) แสดงดังภาพที่ 2-5 ซึ่งช่วงการคอดตัวค่าความเค้นจะลดลงแต่ค่าความเครียดยังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบหรือวัสดุเกิดการแตกหัก การคำนวณความเค้นทางวิศวกรรมถูกกำหนดให้ใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบตลอดการคำนวณ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นมีค่ามากกว่าความเป็นจริงในช่วงที่พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเกิดการคอดตัว ทำให้ค่าความเค้นทางวิศวกรรมที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง เช่นเดียวกันกับค่า

ความเครียดทางวิศวกรรมที่ใช้ค่าความยาวเกจของชิ้นงานเริ่มต้นตลอดเวลาการคำนวณทุกช่วงเท่านั้น ไม่ได้ใช้ค่าความยาวที่เกิดขึ้นจริง ส่งผลให้ค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปวัสดุที่แท้จริงได้ ดังนั้นการหาค่าความเค้นและความเครียดจึงจะต้องทำการหาจากค่าความเค้นและความเครียดจริง (True Stress and Strain) ที่เกิดขึ้นจริงขณะช่วงเวลาใดใดในการทดสอบ ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 2-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

ภาพที่ 2-5 แสดงการคอดตัวของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

2.2.1.2 ความเค้นและความเครียดจริง (True Stress and True Strain) เมื่อต้องการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวนั้น ถ้าทำการหาจากความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม จะทำการคำนวณโดยใช้ความยาวเกจชิ้นงานและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบเริ่มต้น จึงทำให้ค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริงนั้นเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง เพราะหากพิจารณาความเค้นภายหลังรับแรงดึงสูงสุดหรือจุดความต้านทานแรงดึงสูงสุดแล้ว พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็วและค่าความเค้นจะมีค่าลดลง ซึ่งในความเป็นจริงขณะทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียวในช่วงพลาสติกนั้น ความยาวเกจและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาใด ๆ จึงทำให้ค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จากการคำนวณที่มีค่าตรงกับความเป็นจริง ดังสมการที่ 2-3 และ 2-4 แล้วนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) แสดงดังภาพที่ 2-6

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

หรือ

$$\sigma = s(1+e) \tag{2-3}$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นจริง (True Stress)

F คือ แรงภายนอกที่มากระทำกับพื้นที่หน้าตัด

A คือ พื้นที่หน้าตัดจริงในแต่ละช่วงการทดสอบ

s คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

หรือ

$$\varepsilon = \ln(1+e) \tag{2-4}$$

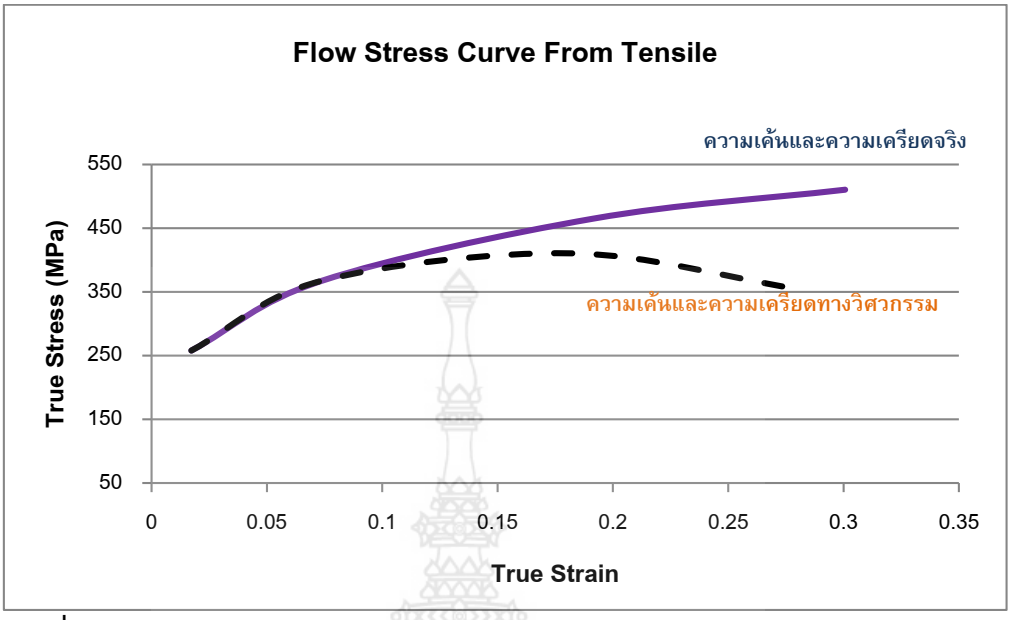
โดยที่

ε คือ ความเครียดจริง (True Strain)

l_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

l คือ ความยาวชิ้นงานทดสอบหลังการดึง

e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)



ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง

จากภาพข้างต้นที่แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง แสดงถึงความแตกต่างของค่าความสัมพันธ์ทั้งสองแบบ ซึ่งค่าที่ใช้ในการจำลองการขึ้นรูปและการพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุจะใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงแล้ว และนอกจากสมการที่ 2-3 และ 2-4 ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดจริงยังมีอีกหนึ่งสมการที่นิยมใช้คือ สมการกฎยกกำลัง (Power Law) โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ในการประมาณค่านอกช่วงระดับความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว และการที่จะนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูปและการพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุนั้นจะทำให้อยู่ในรูปแบบของสมการกฎยกกำลัง ดังสมการที่ 2-5

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \tag{2-5}$$

โดยที่

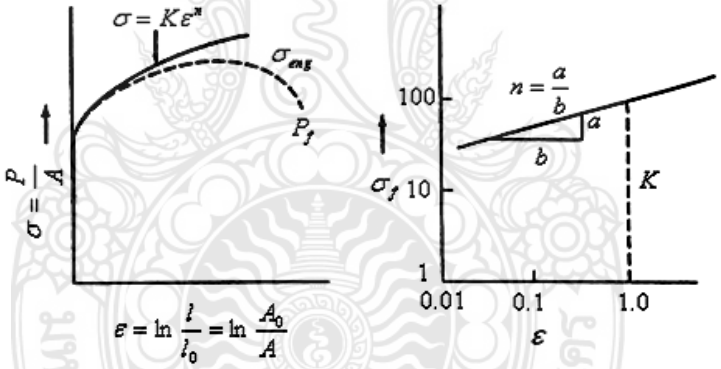
σ คือ ความเค้นจริง (True Stress)

ε คือ ความเครียดจริง (True Strain)

K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

2.2.1.3 ช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรสม่ำเสมอ (Uniform Plastic Deformation) เป็นพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุในช่วงพลาสติก ในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างถาวรสม่ำเสมอโลหะแผ่นจะมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยที่วัสดุยังไม่เกิดการคอดตัว ซึ่งค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent : n) จะหาได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยการพิจารณาความชันของเส้นโค้ง เมื่อนำมาพล็อต (Plot) ลงบนค่าลอการิทึม แสดงดังภาพที่ 2-7 ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่ง่ายสำหรับการคำนวณและการบันทึกมากกว่าการพล็อตลงบนสเกลล็อก-ล็อก นั่นคือ การหาความเข้ากัน (Correlation) ของสมการกฎยกกำลังกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะได้ค่า K และค่า n ซึ่งค่า n นั้นแสดงถึงความสามารถในการขึ้นรูป หากค่า n มีค่าน้อยแสดงว่าวัสดุที่ใช้นี้มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ไม่ดี และถ้าหากค่า n มีค่ามากแสดงว่าวัสดุที่ใช้นี้มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี ด้วยเหตุนี้ค่า n จึงเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดของวัสดุมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือรูปร่างอย่างง่าย ในส่วนของค่า K นั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient : K) เป็นค่าความเค้นเมื่อค่าความเครียดที่มีค่าเท่ากับ 1



(ก) (ข)

(ก) พล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลงบนค่าลอการิทึม

(ข) พล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลงบนสเกลล็อก-ล็อก

ภาพที่ 2-7 วิธีการหาค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

2.3 ทฤษฎีการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test: HBT)

Gutscher, et al. [5], [8] การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงระดับความเครียดที่สูงกว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นถูกจัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นประเภทหนึ่งในการหาความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ของวัสดุ ด้วยการนำโลหะแผ่นมาขึ้นรูปจนมีลักษณะเป็นรูปโดมครึ่งทรงกลมที่มีการใช้ดาย (Die) แต่ไม่มีการใช้พันช์ (Punch) ในขณะทำการขึ้นรูป

แต่จะใช้น้ำในการขึ้นรูปโดมด้วยการอาศัยแรงกระทำจากแรงดัน ส่งผลให้สภาวะการทดสอบอยู่ในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง ภายใต้เงื่อนไขการเกิดค่าความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย แม่พิมพ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่าความหนาของโลหะแผ่นมาก และชิ้นงานจะรักษารูปร่างทรงกลมตลอดขณะขึ้นรูป การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนี้ ไม่สามารถทำการหาความเค้นจริงและความเครียดจริงตามสมการที่ 2-3 และ 2-4 ที่เป็นสมการหาค่าความเค้นจริงและความเครียดจริงจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวได้ เนื่องจากสมการดังกล่าวเป็นการคำนวณภายใต้สภาวะแรงดึงแกนเดียว แต่การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเป็นการทดสอบขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทาง Gutscher, et al. จึงเสนอทฤษฎีสำหรับการหาค่าความเค้นและความเครียดจริงด้วยทฤษฎีของแผ่นบาง (Membrane Theory) ซึ่งเป็นสมการเทียบเคียงในการหาค่าความเค้นและความเครียด แสดงดังสมการที่ 2-6

$$\frac{\sigma_1}{R_1}+\frac{\sigma_2}{R_2}=\frac{p}{t} \tag{2-6}$$

โดยที่

σ_1 คือ ค่าความเค้นหลัก แนวแกนหลัก

σ_2 คือ ค่าความเค้นหลัก แนวแกนรอง

R_1 คือ ค่ารัศมีโดมหรือทรงกลมที่เกิดขึ้นขณะขึ้นรูปในแนวแกนหลัก

R_2 คือ ค่ารัศมีโดมหรือทรงกลมที่เกิดขึ้นขณะขึ้นรูปในแนวแกนรอง

p คือ แรงดัน

t คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

จากการรักษารูปร่างของชิ้นงานให้มีความเป็นทรงกลมอย่างสมบูรณ์แบบ จะทำให้รูปร่างของชิ้นงานจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นสมมาตรรอบแกน (Axis-symmetric) ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความเค้นหลักทั้งสองแนวแกนมีค่าเท่ากัน $(\sigma_1=\sigma_2)$ และส่งผลให้รัศมีของโดมขณะทำการขึ้นรูปมีค่าเท่ากันอีกด้วย $(R_1=R_2)$ ดังนั้นสมการที่ (2-6) จึงสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสมการที่ (2-7) ได้ดังนี้

$$\sigma=\frac{pR_d}{2t_d} \tag{2-7}$$

โดยที่

σ คือ ค่าความเค้นหลัก

R_d คือ ค่ารัศมีโดมที่เกิดขึ้นขณะขึ้นรูป

p คือ แรงดัน

t_d คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

สำหรับในการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นจะไม่มีแรงจากภายนอกเข้ามากระทำในขณะขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความเค้นโดยเฉลี่ยจะเกิดขึ้นบนผิวโดมในแนวตั้งฉาก (Average Normal Stress : σ_n) สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (2-8)

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(-p+0) = -\frac{1}{2}p \tag{2-8}$$

โดยที่

σ_n คือ ค่าความเค้นโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนผิวโดมในแนวตั้งฉาก

p คือ แรงดัน

หลังจากนั้นจึงนำสมการมาคำนวณหาค่าตามเกณฑ์พฤติกรรมการไหลในช่วงพลาสติกของเทรสก้า (Tresca's Plastic Flow Criterion) เพื่อทำการหาค่าเทียบเคียงความเค้นจริงหรือความเค้นประสิทธิภาพ (Effective Stress) โดยสามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ แสดงได้ดังสมการที่ (2-9) และ (2-10) ตามลำดับ

$$\bar{\sigma} = \sigma_{Max} - \sigma_{Min} = \frac{pR_d}{2t_d} - \frac{-p}{2} \tag{2-9}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{p}{2}\left(\frac{R_d}{t_d}+1\right) \tag{2-10}$$

โดยที่

$\bar{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นจริง (Effective Stress)

σ_{Max} คือ ค่าความเค้นหลัก ที่มีค่ามากที่สุด

σ_{Min} คือ ค่าความเค้นหลัก ที่มีค่าน้อยที่สุด

R_d คือ ค่ารัศมีโดมที่เกิดขึ้นขณะขึ้นรูป

p คือ แรงดัน

t_d คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

โดยในส่วนของการหาค่าความเครียดจริงหรือความเครียดประสิทธิภาพนั้น (Effective Strain) สามารถคำนวณโดยใช้ความหนาบริเวณยอดโดมของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมาทำการเทียบเคียงได้ แสดงดังสมการที่ (2-11)

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_t = -\ln\left(\frac{t_d}{t_0}\right) = \ln\left(\frac{t_0}{t_d}\right) \quad (2\text{-}11)$$

โดยที่

$\bar{\varepsilon}$ คือ ค่าความเครียดจริง (Effective Strain)

ε_t คือ ค่าความเครียดในแนวความหนาของโลหะ

t_0 คือ ค่าความหนาเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

t_d คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

จากสมการที่ (2-9) และ (2-10) ถ้าสามารถทำการหาค่า R_d , t_d , t_0 และ p ได้ตลอดช่วงของการขึ้นรูปแล้ว จะส่งผลทำให้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ แต่การหาค่า $R_{d(Experiment)}$ และ $t_{d(Experiment)}$ ในขณะขึ้นรูปช่วงใด ๆ จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำและการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นเป็นเรื่องที่ยากและมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอแนวความคิดในการหาค่า R_d และ t_d ในเชิงเรขาคณิต โดยการคำนวณหาค่า R_d จะนิยมใช้การคำนวณที่ได้จากสมการของพันกิ้น (Dome Radius of Panknin : $R_{d(Panknin)}$) Panknin แสดงดังสมการที่ (2-12)

$$R_{d(Panknin)} = \frac{(\frac{d_c}{2} + R_c)^2 + h_d^2 - 2R_c h_d}{2h_d} \quad (2\text{-}12)$$

โดยที่

$R_{d(Panknin)}$ คือ ค่ารัศมีรัศมีโดมที่คำนวณจากสมการของพันกิ้น

R_c คือ ค่ารัศมีความโค้งของแม่พิมพ์

d_c คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปากแม่พิมพ์

h_d คือ ความสูงของโดมขณะขึ้นรูป

ส่วนการคำนวณหาค่าความหนายอดโดม สามารถคำนวณได้จากหลายสมการ ซึ่งสมการที่ถูกนิยมนำมาใช้ ได้แก่ สมการความหนายอดโดมของฮิล (Dome Thickness of Hill : $t_{d(HL)}$) Hill หรือสมการความหนายอดโดมของชาร์กาบาร์ตี้และอเล็กซานเดอร์ (Dome Thickness of Chakrabarty and Alexander : $t_{d(CK)}$) Chakrabarty, et al. แสดงดังสมการที่ (2-13) และ (2-14) ตามลำดับซึ่งชาร์กาบาร์ตี้และคณะได้นำเสนอแนวความคิดเพิ่มเติมจากสมการคำนวณ $t_{d(HL)}$ ว่า ควรที่จะนำค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวเข้ามาร่วมพิจารณาจึงจะทำให้ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ $t_{d(Experiment)}$ มากกว่าสมการ $t_{d(HL)}$

$$t_{d(HL)} = t_0 \left(\frac{1}{1+(\frac{2h_d}{d_c})^2} \right)^2 \quad (2\text{-}13)$$

โดยที่

$t_{d(HL)}$ คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดมที่คำนวณจากสมการของฮิล

t_0 คือ ค่าความหนาเริ่มต้น

t_d คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

d_c คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของปากแม่พิมพ์

h_d คือ ความสูงของโดมขณะขึ้นรูป

$$t_{d(CK)} = t_0 \left(\frac{1}{1+(\frac{2h_d}{d_c})^2} \right)^{2-n} \quad (2\text{-}14)$$

โดยที่

$t_{d(CK)}$ คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดมที่คำนวณจากสมการของชาร์กาบาร์ตี้และอเล็กซานเดอร์

t_0 คือ ค่าความหนาเริ่มต้น

t_d คือ ค่าความหนาบริเวณยอดโดม

d_c คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของปากแม่พิมพ์

h_d คือ ความสูงของโดมขณะขึ้นรูป

n คือ ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

โดยเมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทั้งหมดแล้ว หลังจากนั้นจึงนำมาทำการคำนวณ เพื่อหาความเค้นจริงและความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ แต่การนำค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในงานจริงนั้นจะต้องจัดให้อยู่ในรูปแบบของสมการกฎยกกำลังเหมือนกับสมการกฎยกกำลังที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวข้างต้น แสดงดังสมการที่ (2-5) แต่เนื่องจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะเป็นการใช้พารามิเตอร์เฉพาะในการเทียบเคียงเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าว สมการกฎยกกำลังจึงมีรูปแบบแสดงดังสมการที่ (2-15)

$$\overline{\sigma} = K\overline{\varepsilon}^{n} \tag{2-15}$$

โดยที่

$\overline{\sigma}$ คือ ความเค้นจริง (True Stress)

$\overline{\varepsilon}$ คือ ความเครียดจริง (True Strain)

K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

จากที่กล่าวมาสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test : HBT) นั้นจะใช้แรงดันน้ำในการขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปลงสภาพไปในทุกทิศทางด้วยแรงดันที่กระทำกับผิวโลหะที่เท่ากัน ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจะมีค่าความเค้นที่สูงมาก จึงส่งผลให้ต้องปรับใช้แรงดันของน้ำที่สูงขึ้นในการขึ้นรูป ส่งผลทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้นั้นมีค่าความเค้นที่สูงกว่าค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เพราะเนื่องจากโลหะแผ่นที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีคุณสมบัติความเป็น Anisotropy หรือมีอิทธิพลของค่า r เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจากเหตุผลนี้ทางผู้วิจัยจึงต้องทำการปรับลดค่า r ออกจากค่าความเค้นจริง ซึ่งสามารถที่จะปรับลดค่า r ได้จากสมการที่ (2-16)

$$\overline{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{r_m + 1}}\sigma_{biaxial} \tag{2-16}$$

โดยที่

$\overline{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นจริงที่ทำการปรับลดค่า r แล้ว (Effective Stress)

$\sigma_{biaxial}$ คือ ค่าความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

r_m คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของความเครียดในช่วงพลาสติก

เมื่อทำการปรับลดอิทธิพลค่า r แล้ว จากนั้นนำค่าความเค้นจริงที่ได้มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แล้วทำการหาความเข้ากันระหว่างค่าความสัมพันธ์ที่ได้กับกฎยกกำลัง

2.4 ทฤษฎีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Least Square Regression and Coefficient of Determination)

ปราโมทย์ และนิพนธ์ [9] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Square Regression) โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Regression) โดยเริ่มจากทำการวัด

ค่าเพื่อหาความผิดพลาดที่น้อยที่สุดของความเข้ากันได้ระหว่างค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับกฎยกกำลัง แสดงดังสมการที่ (2-17) ในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2) เป็นค่าที่วัดความแปรผันทั้งหมดของ y ที่สามารถจะอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า y จะถูกกำหนดด้วยค่า x มากหรือน้อยเพียงใด โดยจะทำการพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างความผันแปรและความผันแปรทั้งหมดใน y ดังสมการที่ (2-18)

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - g\left(x_i\right) \right]^2 \tag{2-17}$$

โดยที่

E คือ ค่าความผิดพลาด

y_i คือ ค่าของข้อมูลวัดจริง

$g(x_i)$ คือ ฟังก์ชันที่ต้องการหาความเข้ากันได้

n คือ จำนวนข้อมูลวัดจริง

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[y_i - g\left(x_i\right) \right]^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \bar{y} \right)^2} \tag{2-18}$$

โดยที่

R^2 คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

y_i คือ ค่าของข้อมูลวัดจริง

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลวัดจริง

$g(x_i)$ คือ ฟังก์ชันที่ต้องการหาความเข้ากันได้

n คือ จำนวนข้อมูลวัดจริง

จากสมการที่ได้แสดงข้างต้น โดยปกติแล้วค่า R^2 จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 $(0 \le R^2 \le 1)$ ซึ่งถ้าหากค่า R^2 ที่ได้มีค่าเข้าใกล้เคียง 1 นั่นหมายความว่าค่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหากค่า R^2 เข้าใกล้เคียง 0 นั่นแสดงว่าค่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ไม่ดี หรือกล่าวได้ว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ไม่ดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gutscher, et al. [5] ได้ทำการศึกษาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยใช้การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เพื่อประเมินหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนี้จะเป็นการทดสอบในลักษณะของทิศทาง 2 แนวแกน ซึ่งจะทำให้ความเครียดมีค่าสูงสุดก่อนเกิดการคอดตัว รวมไปถึงค่าความเค้นที่ได้จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากโลหะที่มีคุณสมบัติเป็น Anisotropy ดังนั้นจึงต้องทำการปรับลดค่า r ซึ่งค่าความสัมพันธ์ที่กล่าวมาจะมีค่ามากกว่าการทดสอบแบบทดสอบแรงดึงแกนเดียว ส่งผลทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จะมีค่าความเครียดที่สูงการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

Gutscher [8] กล่าวว่าระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจะต้องมีการออกแรงดึงของชิ้นงานให้เป็นไปในทุกทิศทุกทางที่เท่ากัน แต่สำหรับการขึ้นรูปโดยใช้การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น จะมีอิทธิพลของค่า r เข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลทำให้ในระหว่างทำการขึ้นรูปค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูง จึงจำเป็นต้องใช้ความดันที่สูงขึ้นในการขึ้นรูปของชิ้นงานด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับลดอิทธิพลของค่า r โดยทำการปรับค่าความเค้นแสดงดังสมการที่ (2-19)

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{r_m + 1}}\,\sigma_{biaxial} \tag{2-19}$$

โดยที่

$\bar{\sigma}$ คือ ค่าความเค้นจริงที่ทำการปรับลดค่า r แล้ว (Effective Stress)

$\sigma_{biaxial}$ คือ ค่าความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

r_m คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของความเครียดในช่วงพลาสติก

โดยเมื่อทำการปรับลดค่า r แล้ว จากนั้นจึงนำค่าความเค้นจริงที่ได้มาทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แล้วทำการหาความเข้ากันระหว่างค่าความสัมพันธ์ที่ได้กับกฎยกกำลัง

สุวัฒน์ [2] กล่าวไว้ว่า การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว (Tensile Test) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแผ่น เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปของชิ้นงาน โดยทั่วไปจะสามารถเก็บข้อมูลได้ประมาณ 0.30 ของความเครียด ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในการทดสอบขึ้นรูปโลหะแผ่นกระบวนการใหม่ ๆ อาทิเช่น การขึ้นรูปโลหะด้วยน้ำ (Sheet Hydroforming) ที่สามารถขึ้นรูปโดยไม่เกิดการฉีกขาด (Split) ที่มากกว่า 0.30 ของความเครียด ดังนั้นข้อมูลของความเค้นและความเครียดของโลหะแผ่นที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวจึงไม่เพียงพอสำหรับที่จะใช้ทำการวิเคราะห์

การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test) เป็นการทดสอบโลหะแผ่นแบบใหม่เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยลักษณะของการเสียรูปของโลหะแบบ Biaxial Tensile Loading จะส่งผลทำให้เก็บข้อมูลที่ระดับความเครียดประมาณ 0.80 ของความเครียด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปของชิ้นงานมากกว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว

ธนสาร และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการดึง (Strength Coefficient: K) และเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent: n) ของโลหะแผ่นในช่วงพลาสติก ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งการหาค่าทั้ง 2 นี้จะนิยมใช้การทดสอบแรงดึงแกนเดียว และหาค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียวมาเป็นตัวแทน โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเพื่อการหาค่า K และค่า n ในรูปแบบของการกระจายแบบปกติด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับโลหะแผ่นชนิดเกรด SPCC ผลลัพธ์การกระจายตัวของค่า K และ n ในรูปแบบการกระจายแบบปกติ จะนำไปสู่การกำหนดการเบี่ยงเบนของค่า K และ n ในช่วง $\pm 3\sigma$ ว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะแผ่นที่ได้ส่งผลอย่างไรต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยงานวิจัยนี้พบว่าค่าเฉลี่ยของ K และ n มีความสามารถขึ้นรูปชิ้นงานโดยไม่เกิดความเสียหาย กรณีที่ค่า K มีการเบี่ยงเบนในเชิงบวกจะทำให้ชิ้นงานเกิดรอยย่นบริเวณผนัง ในทางตรงกันข้ามจะไม่มีผลต่อความเสียหายของชิ้นงาน และในกรณีที่ค่า n มีการเบี่ยงเบนเป็นไปในเชิงลบจะส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด แต่ถ้าเปลี่ยนแปลงในไปในทางบวกชิ้นงานจะมีคุณภาพดีขึ้น กล่าวคือมีความบางที่น้อยลง

กชกร [4] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานทรงพาราโบลิกในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของการขึ้นรูปชิ้นงานทรงพาราโบลิกในกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ (Hydromechanical Deep Drawing : HMD) ผ่านการจำลองการลากขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้ความเบี่ยงเบนคุณสมบัติทางกลในช่วงพลาสติกของโลหะแผ่นชนิดเกรด AISI 1008 (JIS G 3141 SPCC) ซึ่งจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ชนิด คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient; K) เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Component; n) และอัตราส่วนของความเครียดในช่วงพลาสติก (Plastic Strain Ratio; r) ทั้งสามแนวแกน (0°, 45°, และ 90° กับแนวแกนรีด) ด้วยการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของการกระจายตัวคุณสมบัติของโลหะแผ่น หลังจากนั้นทำการสุ่มค่าของตัวแปร K, n, r_0, r_{45} และ r_{90} ตามลักษณะที่ได้จากการทดสอบ และนำป้อนข้อมูลผ่านการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบหาค่าความบาง (Thinning) ของชิ้นงาน ซึ่งจากการทดสอบ

แบบแรงดึงแกนเดียวจำนวน 30 ครั้งต่อแนวแกนรีด พบว่าค่าคุณสมบัติของโลหะแผ่นมีการกระจายตัวแบบปกติ จากนั้นจึงทำการสุ่มค่าจากการกระจายตัวที่ได้อีกจำนวน 500 ครั้งเพื่อทำการจำลองการขึ้นรูป พบว่า ค่าความบางของชิ้นงานมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติเช่นเดียวกัน และการกระจายตัวลักษณะนี้จึงทำให้ทราบถึงความน่าจะเป็นของการเกิดชิ้นงานที่มีความบางมากกว่า 40% หรือคิดเป็น 1.04%

ชลากร [6] ได้ทำการศึกษาการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test : HBT) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้แรงดันน้ำเพื่อสร้างสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) การทดสอบแบบนี้นอกจากจะให้สภาวะการทดสอบใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงแล้วยังให้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มากกว่าการทดสอบแรงดึงแบบแกนเดียว (Tensile Test) โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษาแม่พิมพ์ที่ได้จัดทำขึ้นสำหรับการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำว่าในขณะขึ้นรูปชิ้นงานที่ทำการทดสอบจะอยู่ในสภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) และรูปร่างของโดมเป็นทรงกลมตลอดการขึ้นรูปหรือไม่ โดยการนำชิ้นงานมาศึกษาคุณลักษณะ 2 ประการ คือ 1) ความเท่ากันของความเค้น (Stress : σ) ตามแนวรีดและขวางแนวรีดผ่านการวัดค่าความเครียด (Strain : ε) ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงรัศมีของกริดวงกลม และ 2) ความกลม ผ่านการวัดรัศมีตามแนวรีดและขวางแนวรีดของโดมที่ได้จากการสแกน 3 มิติ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเครียดในแนวแกนทั้งสองแนวมีค่าเท่ากันทุกระดับของการวัด รวมถึงรัศมีความโค้ง พบว่ารัศมีความโค้งที่ได้มีค่าเท่ากันทั้งสองแนวแกนที่ทุกระดับของการวัด จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะอยู่ในสภาวะแรงดึงสองทิศทางและรูปร่างของโดมมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมตลอดการขึ้นรูป ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแผ่นได้อย่างถูกต้อง

จากที่ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทนี้ ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงหลักการและแนวโน้มในการทำวิจัยเบื้องต้น โดยรายละเอียดและขั้นตอนของการดำเนินงานผู้วิจัยจะนำเสนอและอธิบายในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

แนวความคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลสให้เป็นค่ามาตรฐานที่มีความถูกต้อง เพื่อให้ข้อมูลที่จะนำมาประมวลผลผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความแม่นยำ แทนการใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวที่จะต้องมีการประมาณการนอกช่วงความเครียดที่ได้จากการทดสอบ นอกจากนั้นยังทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ โดยส่วนแรกจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ในส่วนสุดท้ายจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ซึ่งการที่จะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้นมีวิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สภาพปัญหาปัจจุบัน

อุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นในปัจจุบันนิยมประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสภาวะการขึ้นรูปมาช่วยในการออกแบบและพิจารณาแนวโน้มรูปร่างของชิ้นงานก่อนการสร้างแม่พิมพ์จริง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ผู้ออกแบบแม่พิมพ์นิยมใช้ในการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานว่าเป็นไปตามรูปร่างที่ต้องการหรือไม่ หากรูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปถูกต้องตามที่กำหนด จะสามารถนำแม่พิมพ์นั้นไปใช้ในการผลิตจริงได้ แต่ถ้ารูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปนั้นไม่ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับแก้และทดสอบการขึ้นรูปจนกระทั่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีความถูกต้องตามที่ต้องการ ส่งผลทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายและเวลา แต่การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการจำลองสภาวะการขึ้นรูป จะช่วยในลดเวลาการลองผิดลองถูกในการออกแบบและปรับแก้แม่พิมพ์ โดยการที่จะให้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการประมวลผลอย่างถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่นำเข้าไปประมวลผล ซึ่งคุณสมบัติของโลหะแผ่นเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญมาก ธนสาร และคณะ [1] นอกจากนั้นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในกระบวนการขึ้นรูปคือ คุณสมบัติของโลหะทางด้านความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Flow Stress Curve) ซึ่งการที่จะขึ้นรูปชิ้นงานให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามที่ต้องการนั้นต้องอาศัยคุณสมบัติข้างต้นนี้ ดังนั้นถ้าค่าคุณสมบัติดังกล่าวเป็นค่าถูกต้องแล้ว จะส่งผลให้รูปร่างชิ้นงานที่ได้จากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

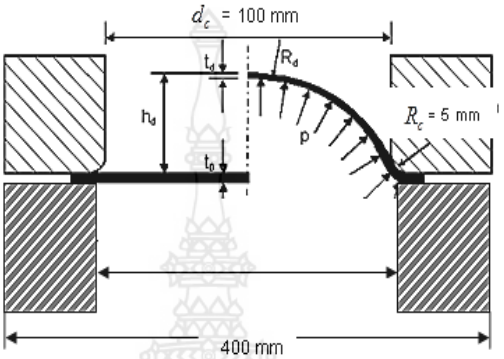
มีความสอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง แต่ในทางตรงกันข้ามหากค่าคุณสมบัติดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง จะส่งผลให้รูปร่างชิ้นงานจากการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง สุวัฒน์ [2] ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้นนิยมหาด้วยวิธีการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ตามมาตรฐานสากลรับรองของการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ (American Society for Testing and Materials : ASTM) แต่จากวิจัยของชลิดา [3] ที่ทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมีค่าประมาณ 0.3 ของความเครียดเท่านั้น แต่การจำลองสภาวะการขึ้นรูปนั้นจะต้องการช่วงระดับความเครียดที่มากกว่า 0.3 ดังนั้นหากผู้ออกแบบแม่พิมพ์ต้องการจำลองสภาวะการขึ้นรูปโดยใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวที่มีค่าประมาณ 0.3 ของความเครียดนั้นจะต้องทำการประมาณการค่านอกช่วงของความเครียดที่ได้ (Extrapolation) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการอ้างอิงจากงานวิจัยของกชกร [3] พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าระดับความเครียดเท่ากับ 0.3 ไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการจำลองสภาวะการขึ้นรูป จึงต้องทำการประมาณค่าความสัมพันธ์นอกช่วงระดับความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว โดยมีการประมาณการนอกช่วงหลายวิธี แต่วิธีที่มักจะนิยมใช้คือกฎยกกำลัง (Power Law) โดยจะต้องนำค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมาแทนในสมการดังกล่าว ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient : K) และค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็ง (Strain Hardening Exponent : n) ในส่วนของค่าความเครียดตั้งแต่ 0.4 ถึง 1.0 นั้นจะแทนค่าประมาณการในแต่ละค่า เพื่อทำการหาค่าความเค้นประมาณการ ส่งผลให้ค่าความเค้นจากการประมาณการนอกช่วงดังกล่าวคลาดเคลื่อนจากสภาวะการขึ้นรูปจริง นอกจากนั้นยังมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะแผ่นชนิดใหม่ๆ ให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ทำให้โลหะแผ่นในแต่ละช่วงของความเครียดมีค่าที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้การประมวลผลลัพธ์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ค่าความเค้นจากการประมาณการนอกช่วงที่ใช้ค่า n เพียงแค่ค่าเดียวนั้นให้ค่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง หากนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ไม่ถูกต้องมาจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไม่สอดคล้องกับการขึ้นรูปจริง

นอกเหนือจากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เช่นกันนั่นคือวิธีการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (Hydraulic Bulge Test : HBT) เป็นการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แรงดันน้ำส่งผลให้ชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงสองทิศทาง (Biaxial) Gutscher, et al. [4] ซึ่งมีสภาวะใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงและสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ

ความเครียดในระดับความเครียดที่มากกกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว นอกจากนั้นโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรก็ยังมีความยากในการขึ้นรูป โดยเฉพาะโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตรตาม E8/E8M-09 ของมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials : ASTM) นั้นไม่มีการกำหนดการมาตรฐานการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะใช้ชุดแม่พิมพ์เดียวกับงานวิจัยของชลากร [5] แม่พิมพ์มีขนาดรัศมีของฟิลเลต (Radius the Fillet of the Cavity : R_c) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter of the Cavity : d_c) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ ซึ่งแม่พิมพ์ชุดนี้จากงานวิจัยของชลากร ได้ทำการประเมินความถูกต้องของแม่พิมพ์ด้วยการทดสอบขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ แล้วนำชิ้นงานมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวแกนหลักและแนวแกนรองของกริดวงกลมที่ได้ทำการตีบนผิวโลหะก่อนการทดสอบขึ้นรูปดังกล่าว และวัดขนาดของรัศมีทรงกลมขณะทำการทดสอบขึ้นรูปเพื่อตรวจสอบว่าขณะที่ชิ้นงานขึ้นรูปอยู่นั้นเกิดสภาวะแรงดึงสองทิศทางและชิ้นงานมีความเป็นทรงกลมหรือไม่ จากการทดสอบสามารถพิสูจน์ว่าชิ้นงานขณะทำการทดสอบขึ้นรูปอยู่นั้นมีสภาวะเป็นไปตามทฤษฎีของแผ่นบางคือ ชิ้นงานขณะทำการทดสอบขึ้นรูปอยู่นั้นจะต้องมีสภาวะ แรงดึงสองทิศทาง ค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย และสามารถรักษารูปร่างทรงกลมตลอดการขึ้นรูปได้ จากการประเมินชุดแม่พิมพ์นี้พบว่า ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งในแนวแกนหลักและแนวแกนรองมีค่าเท่ากัน ($\sigma_1 = \sigma_2$) และสามารถสามารถรักษารูปร่างทรงกลมตลอดการขึ้นรูปได้ ($R_1 = R_2$) ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นจะมีรูปร่างสมมาตรรอบแกน (Axi-Symmetric) ผู้วิจัยจึงใช้แม่พิมพ์ชุดนี้ในการทดสอบ เนื่องจากแม่พิมพ์ชุดนี้มีความถูกต้องตามทฤษฎีที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น จะต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงโดม (h_d) แรงดันน้ำ (p) รัศมีโดม (R_d) และความหนายอดโดม (t_d) ขณะที่ทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ ซึ่งการค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่มีค่าต่อเนื่องแบบเดียวกับค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวเป็นการหาค่าที่มีความยุ่งยากมาก โดยเฉพาะการหาค่ารัศมีโดม (R_d) และความหนายอดโดม (t_d) ขณะขึ้นรูปใด ๆ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการหยุดหรือเบรกการทดสอบเป็นช่วงๆ (Break) ณ ความสูงใด ๆ ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ค่ารัศมีโดม (R_d) และความหนายอดโดม (t_d) ขณะขึ้นรูปใด ๆ ในส่วนค่าความสูงโดม (h_d) แรงดันน้ำ (p) ทำการหาจากเครื่องมือวัดไฮเกจและเครื่องวัดแรงดันน้ำ จึงเป็นผลที่การทดสอบขึ้นรูปจริงแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ในส่วนการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว (Tensile) จะนำชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบความยาวเริ่มต้นของ

ชิ้นงานทดสอบ (l_0) กับความยาวชิ้นงานทดสอบหลังการดึง (l) นอกจากนั้นยังทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (K) และค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็ง (n) จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ข้างต้น โดยจะเสนอแนวความคิดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในลำดับถัดไป

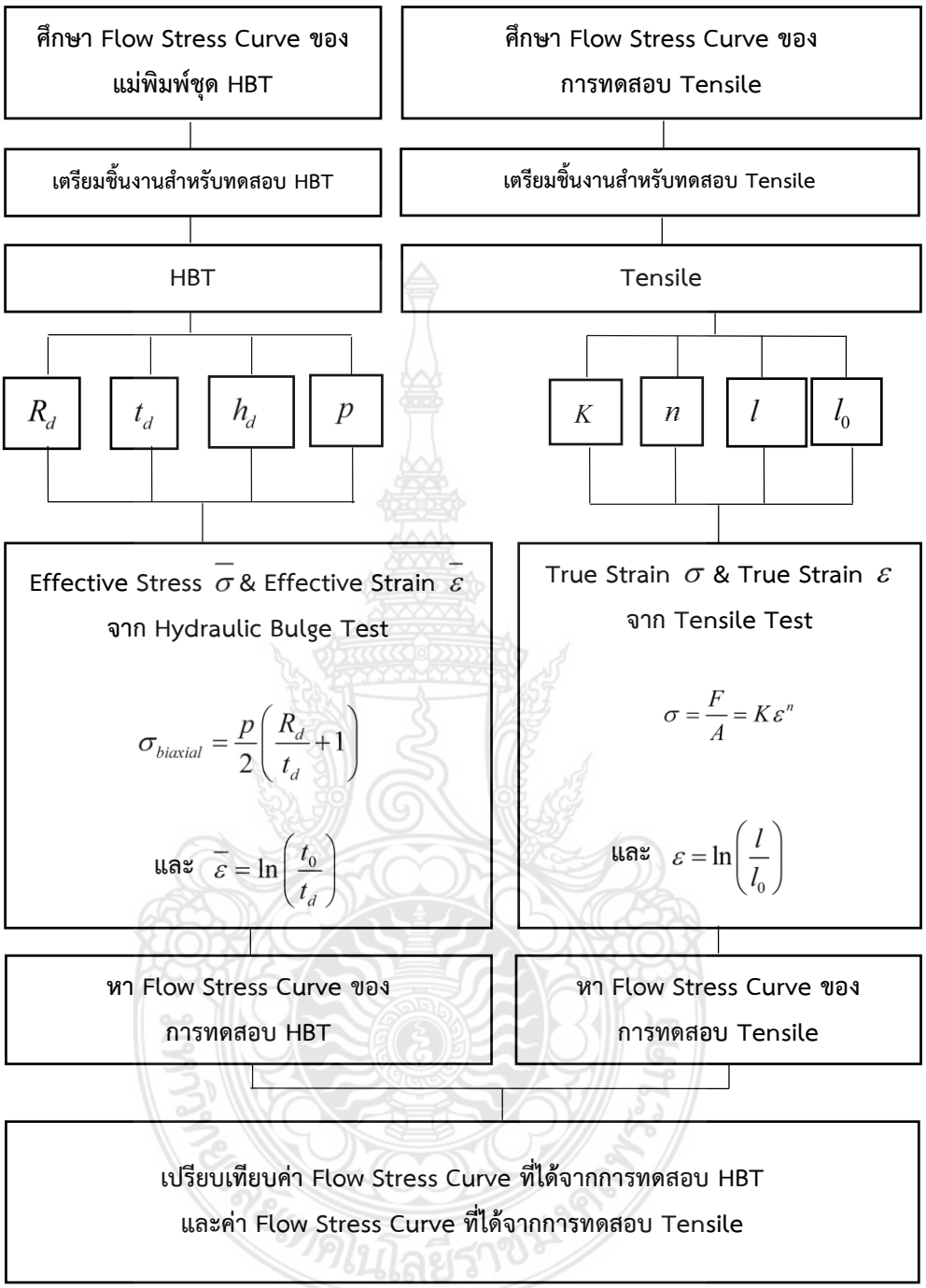


ภาพที่ 3-1 แบบแม่พิมพ์การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (อ้างอิงงานวิจัยชลิดา)

ภาพที่ 3-2 แม่พิมพ์การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

3.2 แนวความคิดของงานวิจัย

แนวความคิดของงานวิจัย เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลส ที่มีขนาดความหนาเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตรให้เป็นค่ามาตรฐานที่มีความถูกต้อง เพื่อให้ข้อมูลที่จะนำมาประมวลผลผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำ แทนการใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวที่จะต้องมีการประมาณการนอกช่วงความเครียดที่ได้จากการทดสอบด้วยสมการกฎยกกำลัง (Power Law) ซึ่งการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น จะต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงโดม (h_d) แรงดันน้ำ (p) รัศมีโดม (R_d) และความหนายอดโดม (t_d) ขณะขึ้นรูปที่จะต้องทำการหยุดการทดสอบเป็นช่วง ๆ ในขณะความสูงใด ๆ เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องจักรไม่สามารถทำการวัดค่ารัศมีโดม (R_d) และความหนายอดโดม (t_d) ขณะที่ทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ ได้ เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ โดยส่วนที่หนึ่งจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ในส่วนที่สองจะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ แสดงดังในภาพที่ 3-3 เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 วิธี และทำการจำลองการขึ้นรูปของชิ้นงานตัวอย่างผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการอ้างอิงผลจากการวิจัยว่า ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เมื่อนำไปทำการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานแล้วจะส่งผลแตกต่างกันหรือไม่ ดังจะอธิบายรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อถัดไป



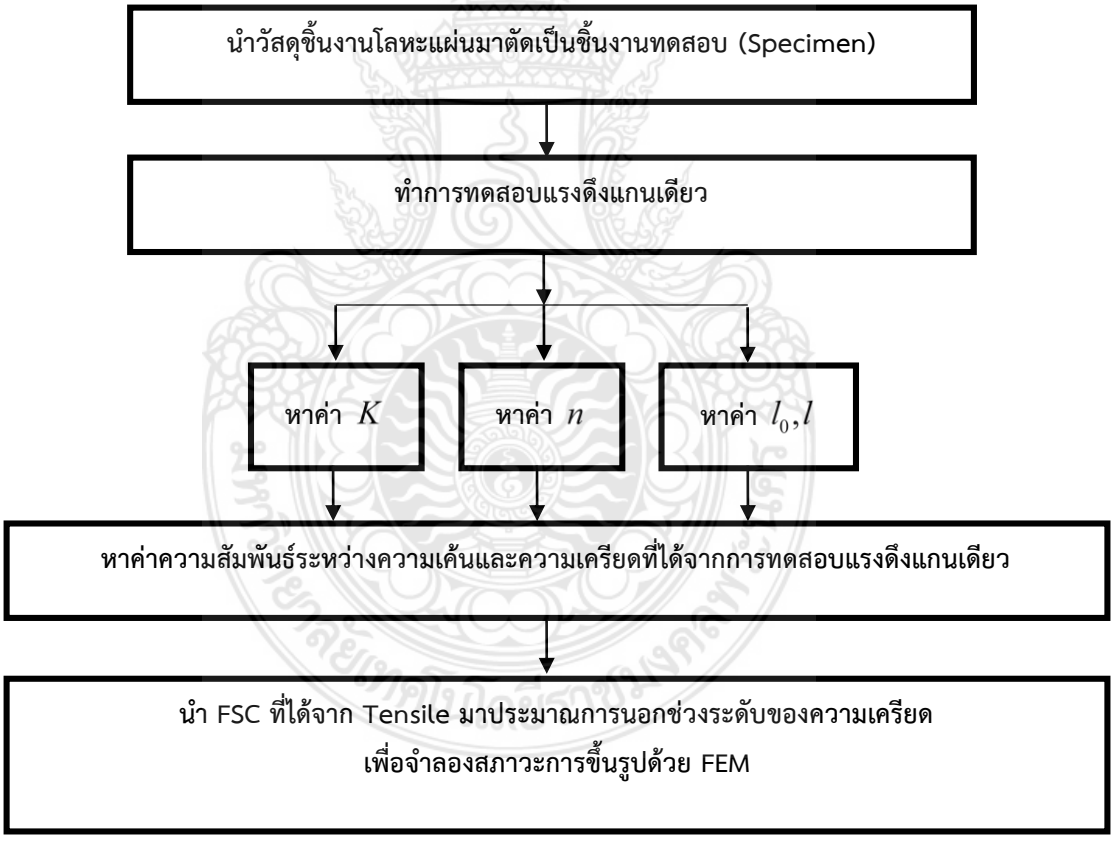
ภาพที่ 3-3 แสดงแผนผังแนวความคิดของงานวิจัย

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในการตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเป็นขั้นตอนในการตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว แสดงดังภาพที่ 3-4 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน โดยเริ่มจากการนำแผ่นสแตนเลสมาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ดังภาพที่ 3-5 แล้วจึงนำชิ้นงานทดสอบมาทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เพื่อหาค่า K , n , l_0, l แล้วหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว จากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมาประมาณการนอกช่วง 0.3 ของความเครียด เพื่อนำค่าความสัมพันธ์มาใช้ในการจำลองสภาวะการขึ้นรูปด้วย FEM

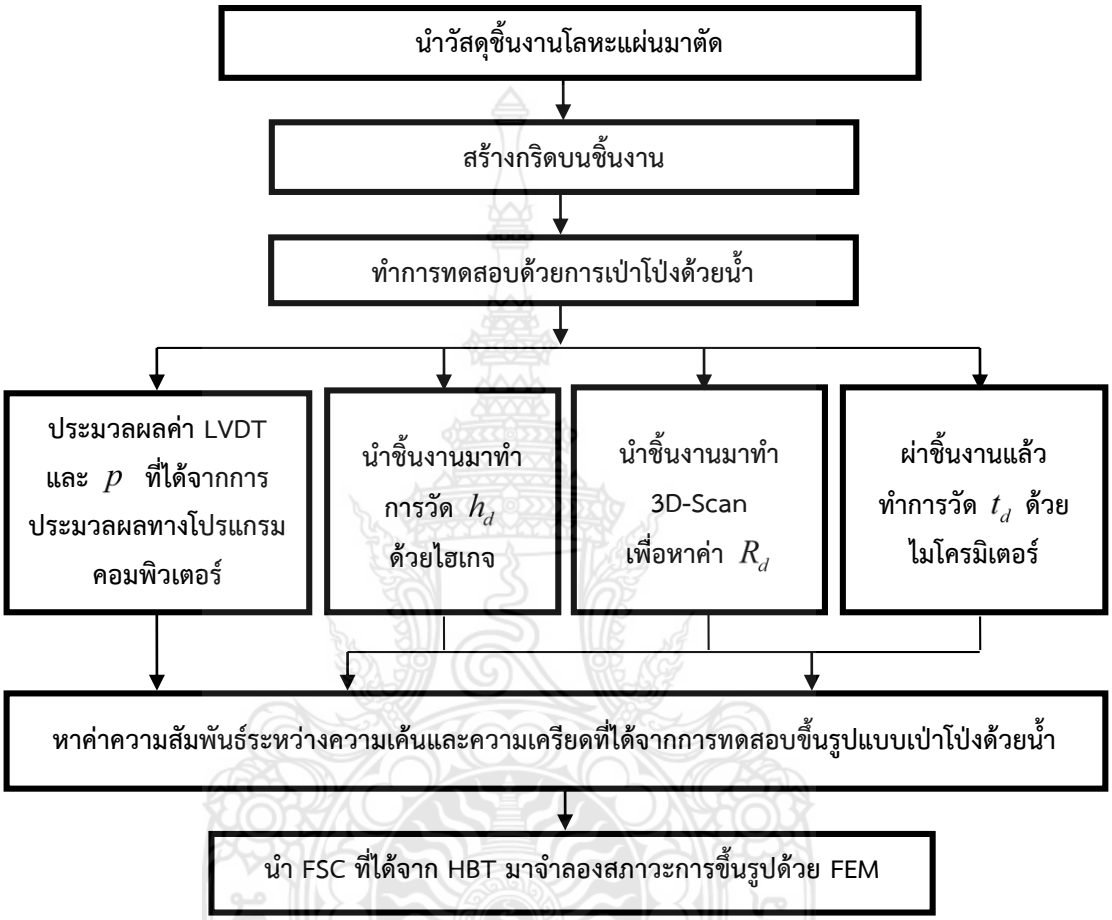


ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการหา FSC จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

ภาพที่ 3-5 ชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

ในส่วนค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนการหา FSC จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

จากภาพข้างต้น เริ่มจากการนำวัสดุที่จะใช้ในการทดสอบ สแตนเลสแผ่นเกรด SS304 ขนาดความหนา 0.4 มิลลิเมตร มาตัดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นให้มีขนาด 250x250 มิลลิเมตร แล้วทำการสร้างกริดบนชิ้นงานก่อนนำไปทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำด้วยเครื่องเพลสไฮโดรลิก (Press Hydraulic Machine) ที่ได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดแรงดันน้ำ (Sensor Pressure) ที่บริเวณด้านล่างของแม่พิมพ์ และเครื่องวัดการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรง (Linear Variable Differential Transformer : LVDT) ที่ติดตั้งบริเวณด้านบนของแม่พิมพ์ นอกจากนั้นด้านล่างของแม่พิมพ์ที่ทำการติดตั้งนั้นเป็นอ่างน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ แสดงดังภาพที่ 3-7 และ 3-8 ตามลำดับ

การทดสอบเริ่มจากการนำชิ้นงานขนาดตามที่กำหนด มาทำการตีกริดบนชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 3-9 แล้วนำชิ้นงานมาขึ้นรูปโดยการใช้แรงดันของน้ำเป็นแรงกระทำกับชิ้นงานให้ชิ้นงานเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนเกิดการแตก จะทำให้ทราบค่าความสูงโดมของชิ้นงานที่ความสูงสูงสุด

เพื่อนำมาทำการแบ่งระยะการหยุดการขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบ เพื่อที่จะหาค่า R_d และค่า t_d ในขณะทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องจักรไม่สามารถนำเครื่องมือใดมาทำการวัดค่าขณะที่ทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ ได้ แต่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นจะต้องเป็นค่าที่มีความต่อเนื่องเช่นเดียวกับค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว ด้วยเหตุนี้จึงทำการแบ่งระดับความสูงในการทดสอบขึ้นรูป ดังภาพที่ 3-10

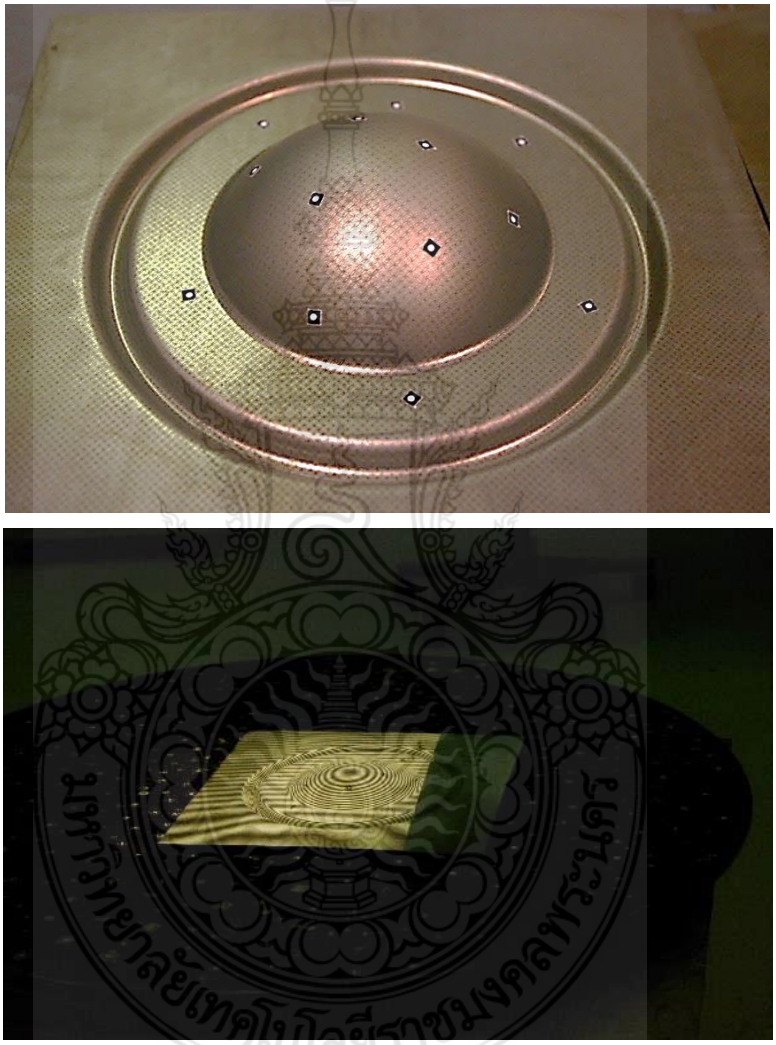
ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรง

ภาพที่ 3-8 อ่างน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ภาพที่ 3-9 ชิ้นงานที่ถูกนำไปตีกริดเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 3-10 ชิ้นงานของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่ทำการแบ่งระดับความสูงต่างๆ

เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเรียบร้อยแล้วหลังจากนั้นจึงนำค่า h_d และการเปลี่ยนระยะเชิงเส้นตรงที่ได้จากการประมวลผลด้วยเครื่อง LVDT ขณะขึ้นรูปใด ๆ มาเทียบกับค่าความสูง (R_d) ที่ได้จากการวัดด้วยไฮเกจ นำชิ้นงานทดสอบมาทำการตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับการนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาทำสแกนแบบ 3 มิติต่อไป (3D-Scan) เพื่อทำการหาค่า R_d ขณะทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ แสดงดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 ชิ้นงานทำการสแกนแบบ 3 มิติ

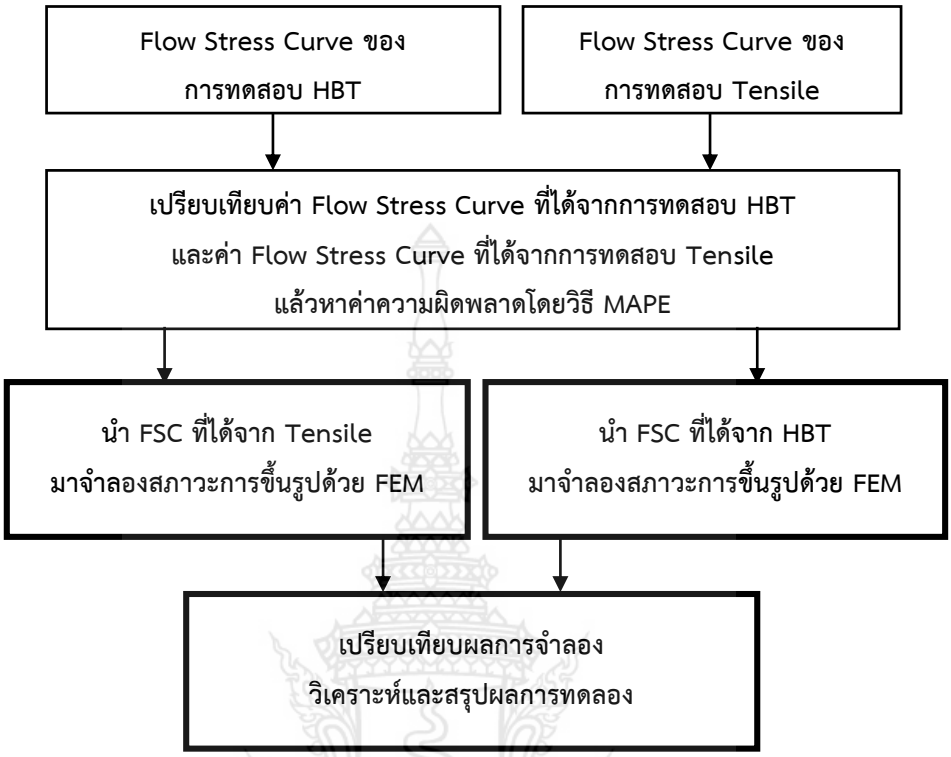
การทำ 3D-Scan เป็นวิศวกรรมการย้อนรอยโดยอาศัยเลเซอร์สแกนเก็บรายละเอียดจากกลุ่มจุด (Point Cloud) ที่ทำการติดบนพื้นผิวชิ้นงานแบบไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน ซึ่งการสแกนนั้นเครื่องสแกนจะทำการหมุนชิ้นงานในมุมต่างๆ เพื่อทำการฉายเลเซอร์เก็บรายละเอียดกลุ่มจุดที่เกิดจากการติดสติ๊กเกอร์บนผิวชิ้นงาน แล้วถ่ายภาพกลุ่มจุดเป็นพื้นที่รูปสามเหลี่ยมจนทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองของชิ้นงานทางคอมพิวเตอร์เป็นรูปร่าง 3 มิติ เพื่อนำไปใช้ประมวลผล ทาง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดค่า R_d ขณะทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ ต่อไป ดังภาพที่ 3-12 จากไฟล์ข้อมูลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการ 3D-Scan พบว่าระนาบของแนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z ของกลุ่มจุดไม่ได้อยู่ในระนาบจุดเริ่มต้น (X , Y , Z = 0, 0, 0) จึงต้องทำการปรับให้กลุ่มจุดดังกล่าวอยู่ในระนาบเริ่มต้นก่อน แล้วจึงใช้การประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการตัดชิ้นงาน เพื่อทำการวัดค่า R_d ขณะทำการขึ้นรูป ณ ความสูงใด ๆ ของชิ้นงานแต่ละชิ้น ด้วยการสร้างวงกลมขึ้นมาเป็นตัวกำหนดในการอ้างอิงวัดค่า R_d จากนั้นทำการตัดชิ้นงานทดสอบจริงด้วยเครื่องตัดโลหะโดยใช้เลเซอร์ (Laser) เป็นกรรมวิธีการตัดโลหะแผ่นที่มีประสิทธิภาพสูง สะดวกรวดเร็ว สามารถทำการตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้แม่นยำ ร่องการตัดมีขนาดเล็กกว่าการตัดแบบใช้เลเซอร์ (Laser) และสามารถตัดสแตนเลสที่มีความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตรได้ เมื่อตัดชิ้นงานแล้วจึงทำการวัด t_d ด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

ภาพที่ 3-12 จำลองรูปร่าง 3 มิติประมวลผลทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.3.3 ขั้นตอนการดำเนินการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์

เมื่อดำเนินงานวิจัยตาม 2 ขั้นตอนข้างต้นแล้ว จะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ข้างต้น มาทำการจำลองการขึ้นรูปของชิ้นงานตัวอย่างผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 เปรียบเทียบ FEM ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว
และการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

บทที่ 3 เป็นการรวบรวมรายละเอียด สภาพปัญหาปัจจุบัน แนวความคิดของงานวิจัย และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองที่จะนำมาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำดังจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานตามแนวความคิดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ลำดับต่อมาจะนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้จากการทดสอบขึ้นรูปแบบแรงดึงแกนเดียวและการทดสอบขึ้นรูปด้วยน้ำ ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากทั้ง 2 ค่าความสัมพันธ์ข้างต้น แล้วจึงทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากวิธีทั้ง 2 ซึ่งจะสามารถอธิบายรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

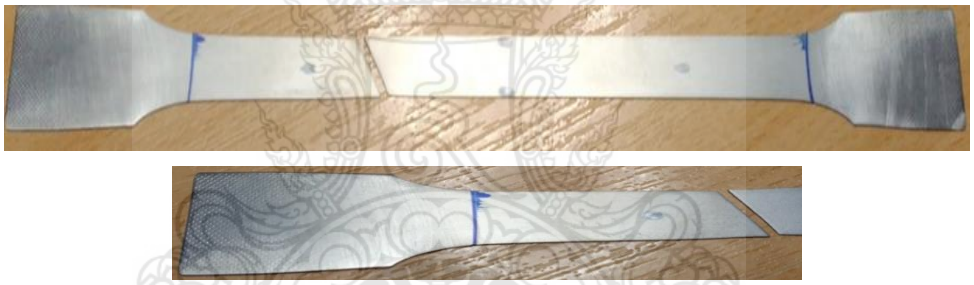
การทดสอบแรงดึงแกนเดียวของวัสดุสแตนเลส SS 304 ขนาดความหนา 0.4 มิลลิเมตร จะทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่า K, n, l_0,l โดยทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Specimen) สำหรับทำการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8 ดังตารางที่ 4-1 มีความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) ในแนวแกนและในแนวขวางแกนเท่ากับ 50 และ 10 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังภาพที่ 4-1 โดยการทดสอบดังกล่าวชิ้นงานทดสอบจะทำการมาร์คจุดเพื่อทำการวัดระยะยืดของชิ้นงาน (Extensometer) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM E8 นั้นไม่มีการกำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบเป็นมาตรฐานการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-1 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8

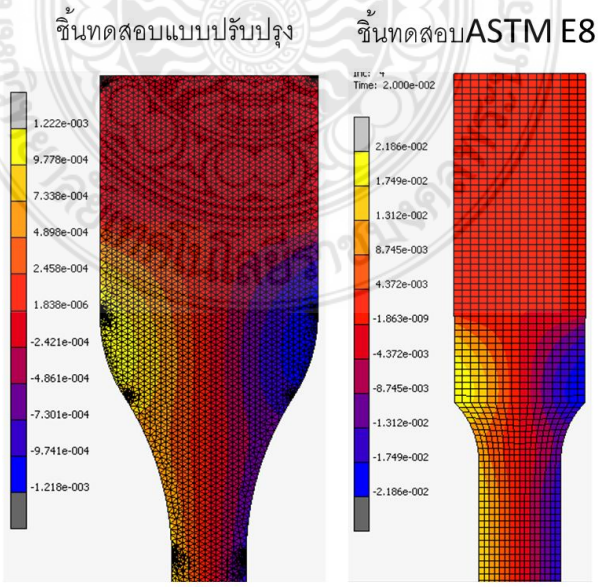
Detail	Standard ASTM E8 (mm)
Gauge Length	50±0.1
Width	12.5±0.2
Thickness	1
Minimum Radius	12
Minimum Overall Length	200
Distance between Shoulders	75+$Radius_{min}$
Grip Section	50
Width of Grip Section	20

ภาพที่ 4-1 รูปร่างชิ้นงานก่อนการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

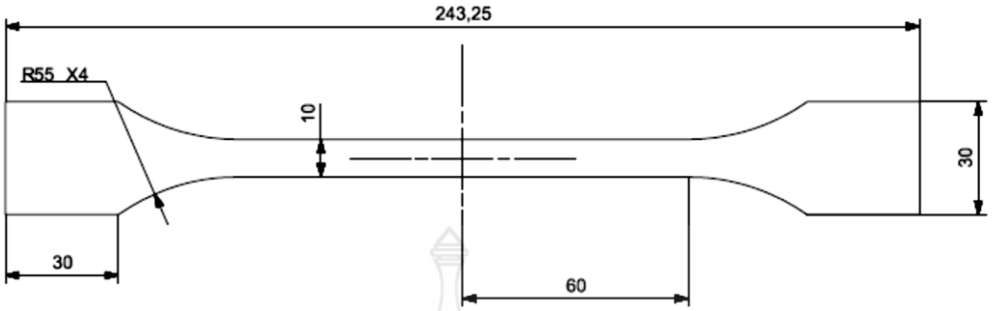
แต่จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวพบว่า ชิ้นงานทดสอบได้มีการเสียรูปที่ผิดปกติคือ เกิดการเสียรูปในบริเวณนอกช่วงความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) หรือบริเวณด้ามจับ (Grip Section) ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณดังกล่าวไหลเข้าไปในบริเวณความยาวของระยะทดสอบด้วย ส่งผลให้เกิดค่าความเค้นที่มากกว่าที่ควรจะเป็น ดังภาพที่ 4-2 จึงได้ทำการออกแบบชิ้นงานทดสอบขึ้นใหม่ โดยการนำระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์มาช่วยในการตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์จากรูปชิ้นงาน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองชิ้นงานรูปร่างเดิมและชิ้นงานที่มีการออกแบบใหม่ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์น้อยกว่าชิ้นงานรูปร่างเดิมมาก จึงทำการตัดเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดตามที่ออกแบบใหม่ แสดงดังภาพที่ 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-2 ชิ้นงานทดสอบที่เกิดการเสียรูปแบบผิดปกติ

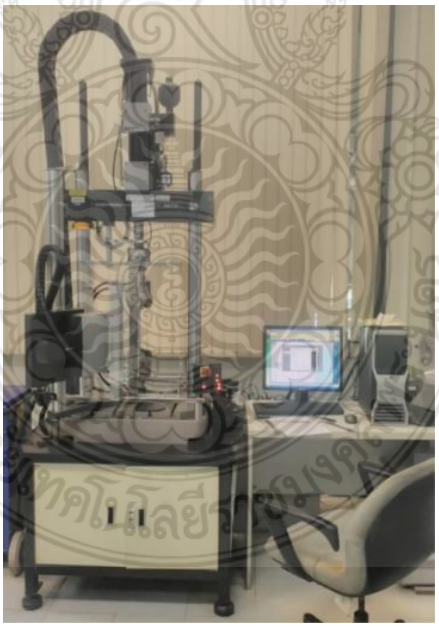


ภาพที่ 4-3 แบบจำลองชิ้นงานทดสอบในการหารูปร่างที่เหมาะสม

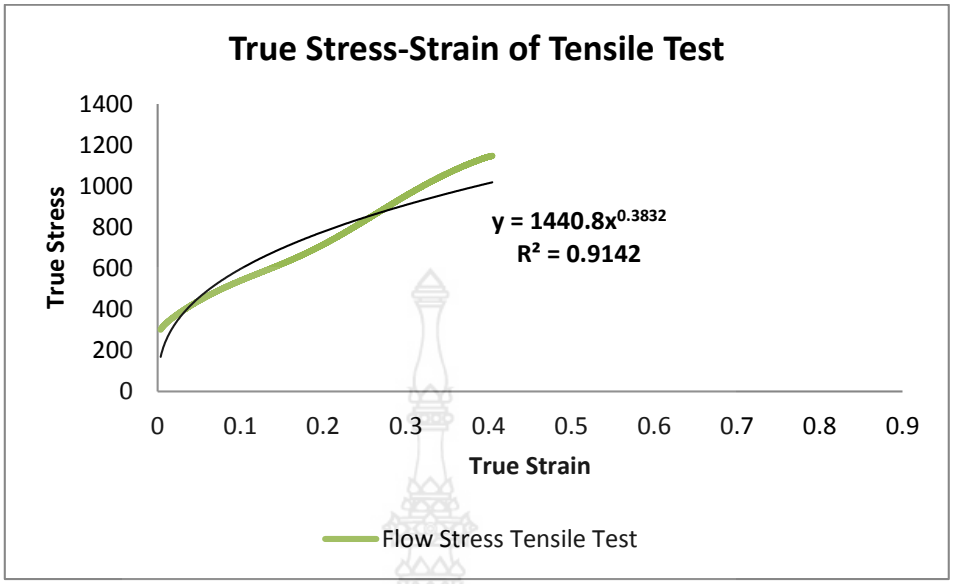


ภาพที่ 4-4 แบบชิ้นงานทดสอบที่ทำการออกแบบใหม่

เมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่ทำการออกแบบใหม่ไปทดสอบแรงดึงแกนเดียว ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแกนเดียวอเนกประสงค์ขนาดแรงดึงสูงสุด 2.5 ตัน ดังภาพที่ 4-5 จากผลการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient : K) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1440.8 ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent : n) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.383 สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียวมีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.4 ดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-5 เครื่องทดสอบแรงดึงแกนเดียว



ภาพที่ 4-6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงดึงแกนเดียว

4.2 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำด้วยเครื่องเพลสไฮโดรลิก ขนาด 200 ตัน การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเป็นทางเลือกหนึ่งในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงระดับความเครียดที่สูงกว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว ด้วยการนำชิ้นงานที่ทำการตัดมาทำการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันน้ำกระทำกับผิวชิ้นงานให้เป็นรูปโดมครึ่งทรงกลม การขึ้นรูปแบบนี้จะมีเพียงดาย (Die) ไม่มีพันช์ (Punch) ในขณะที่ทำการทดสอบเครื่องมือวัดที่ทำการติดตั้งจะบันทึกค่า LVDT และค่าแรงดันของน้ำแล้วนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานแบบเป่าโป่งด้วยน้ำเรียบร้อย จากนั้นจะทำการวัดค่าความสูงโดมแล้วนำมาเทียบกับค่า LVDT และค่าแรงดันของน้ำ เพื่อทำการวิเคราะห์เทียบค่า ดังตารางที่ 4-1 นอกจากนั้นยังทำการหาค่ารัศมีโดมของชิ้นงาน เพื่อให้ทราบค่ารัศมีโดมที่แท้จริง แล้วทำการวัดค่าความหนาบริเวณยอดโดม เมื่อนำค่ารัศมีโดมกับความสูงโดมของชิ้นงานมาหาค่าความสัมพันธ์กันจะทำให้ทราบว่าค่ารัศมีโดมมีค่าผกผันกับค่าความสูงโดม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่ารัศมีโดมมีค่าลดลงก็ต่อเมื่อความสูงของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4-7

ตารางที่ 4-1 ค่าความสูงโดมจาก LVDT และค่าแรงดัน ที่บันทึกผลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ของชิ้นงานที่ 1

เวลา	ความสูงโดมจาก LVDT (mm)	แรงดัน (MPa)
0.00	0	0.205452
0.01	-0.61485	0.242934
0.02	0.03946	0.219264
0.03	-0.06905	0.191646
0.04	-0.01644	0.246882
0.05	-0.06576	0.207426
0.06	-0.15453	0.197562
0.07	0.02631	0.203478
⋮	⋮	⋮
68.84	37.42381	0.211374
68.85	37.32518	0.193614
68.86	37.2923	0.199536
68.87	37.38765	0.215316
68.88	37.34819	0.203478
68.89	37.4271	0.219264
68.9	37.30216	0.199536
68.91	37.35806	0.21729
68.92	37.38107	0.211374
68.93	37.37449	0.221238
68.94	37.1805	0.223206
68.95	37.38765	0.227154
68.96	37.37121	0.213342
68.97	37.36134	0.22518
68.98	37.37778	0.211374
68.99	37.40409	0.215316

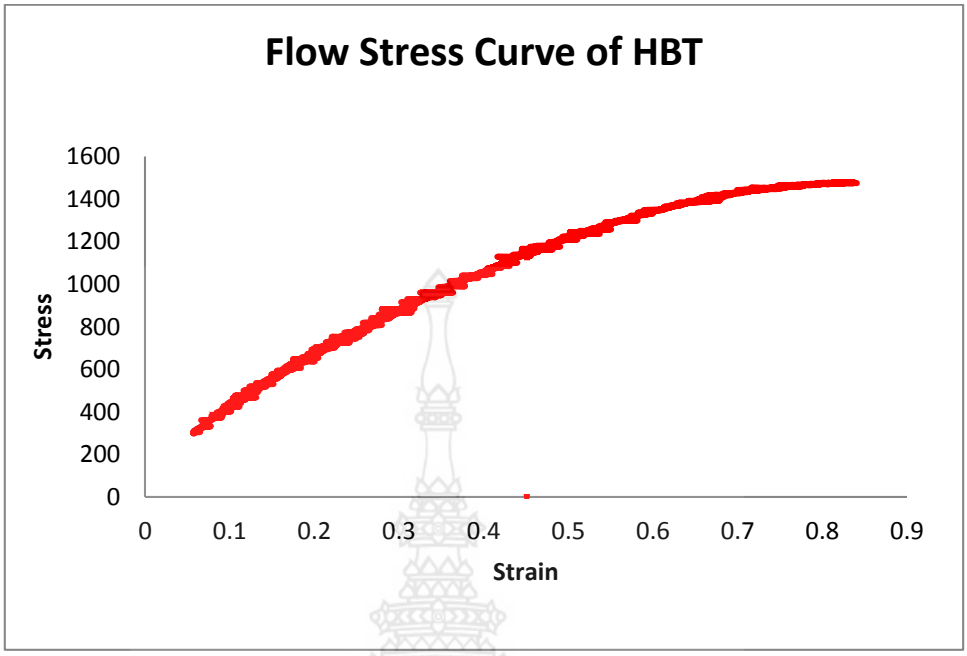
จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดจริงที่ได้จากการเป่าโป่งด้วยน้ำ ดังตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-7 ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.84 จึงทำการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ที่ได้กับกฎยกกำลังและวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Square Regression) เพื่อตรวจสอบว่าชุดข้อมูลที่ทำการบันทึกมามีความน่าเชื่อถือหรือไม่ จากกราฟมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9961 แสดงว่าชุดข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมาก เนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ 1 นอกจากนั้นยังทราบค่า K และ n ที่มีค่าเท่ากับ 1,824 และ 0.6235 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	
ความเค้นจริง	ความเครียดจริง
300.8197182	0.056712914
300.2017947	0.056886466
300.3254546	0.057190893
301.6845855	0.057933375
297.9774207	0.057627060
301.5613015	0.056799724
301.4376416	0.057539647
302.4261688	0.056886466
302.7971484	0.057670791
303.0440922	0.057190893
303.1677521	0.058504151
303.1677521	0.057627060
305.1451823	0.065051888
305.7631058	0.058592262
305.2688422	0.059077602
305.3921262	0.057016896
305.0215225	0.058020940
305.0215225	0.061353322
306.6279731	0.060054290
306.2573694	0.063945306
⋮	⋮
1478.446499	0.826223464
1474.368354	0.820875164
1477.828575	0.816278402
1474.862618	0.827343700

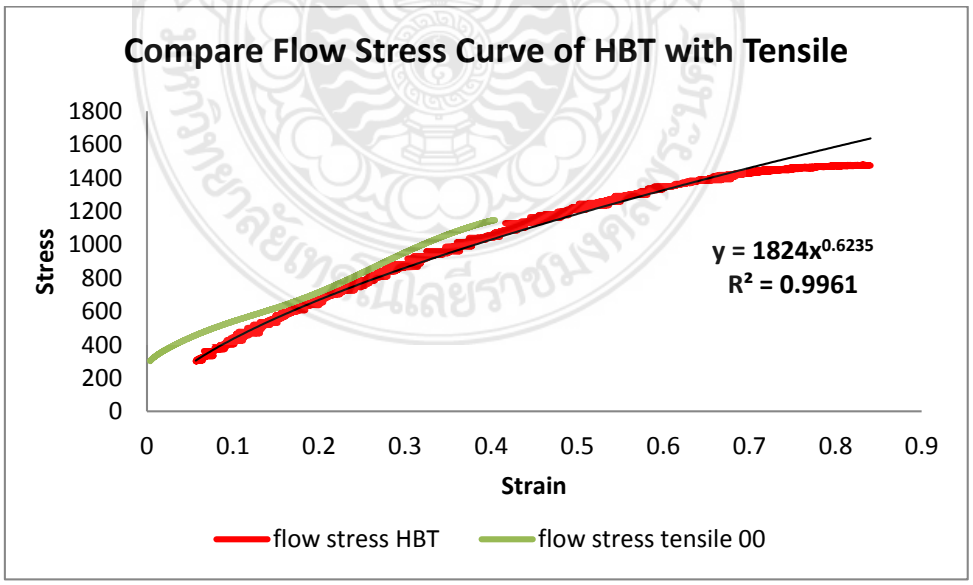
ตารางที่ 4-2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ (ต่อ)

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ	
ความเค้นจริง	ความเครียดจริง
1476.963708	0.819756671
1474.368354	0.821372328
1477.457972	0.817395946
1475.851521	0.831080225
1477.457972	0.814664758
1476.098465	0.821372328
1476.222125	0.827717431
1475.851521	0.819135375
1475.109938	0.815657636
1478.446499	0.825974395
1475.604201	0.827219130
1476.345785	0.829585446
1472.638244	0.821745145
1478.075895	0.822242792
1474.121035	0.832949722
1476.345785	0.818265568
1474.862618	0.824854525
1477.581631	0.836192195
1475.851521	0.831080225
1477.334312	0.824730030
1475.356882	0.837689282
1476.963708	0.837939036
1475.851521	0.831204908
1475.480541	0.827343700
1476.592728	0.834820037
1475.974805	0.832575909
1476.840048	0.828090816
1474.244694	0.827094943
1477.334312	0.829460810
1473.379827	0.836317028
1478.199555	0.830955545
1476.222125	0.837564790
1479.806006	0.831080225
1474.615674	0.840810345



ภาพที่ 4-7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

เมื่อได้กราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียวกับค่าที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ดังภาพที่ 4-8 ทำให้ทราบว่าการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเครียดในระดับความเครียดที่สูงกว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวที่มีระดับความเครียดเพียง 0.4



ภาพที่ 4-8 กราฟเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว

นอกจากนั้นจากกราฟข้างต้นยังพบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่าความเค้นไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบนี้มีความเป็นไอโซโทรปี้ (Isotropy) ซึ่งหมายความว่าโลหะแผ่นที่ใช้ในการทดสอบขึ้นรูปมีความสามารถที่จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเท่ากันทุกทิศทาง ไม่ได้มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดในแนวรีดดีกว่าแนวอื่นๆ จึงปราศจากอิทธิพลค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) ส่วนค่า K เป็นค่าที่ชี้แจงให้ทราบว่าต้องใช้แรงในการทดสอบหรือขึ้นรูปมากหรือน้อย หากค่า K มีค่าที่น้อย แสดงว่าในกระบวนการผลิตจะต้องใช้แรงกระทำในการขึ้นรูปน้อย แต่ถ้าค่า K มีค่าที่มาก แสดงว่าในกระบวนการผลิตจะต้องใช้แรงกระทำในการขึ้นรูปมากเช่นกัน ซึ่งจะช่วยให้ผู้ออกแบบกระบวนการผลิตสามารถวางแผนการใช้ทรัพยากรเครื่องจักรได้ง่ายขึ้นว่า เครื่องจักรที่มีอยู่มีกำลังแรงเพียงพอกับการใช้วัสดุชนิดนี้ในการผลิตหรือไม่ แต่ไม่สามารถชี้เฉพาะเจาะจงถึงความสามารถการขึ้นรูปของโลหะชนิดนั้นๆ ได้ว่าเป็นอย่างไร และจากการสังเกตค่า K จากภาพที่ 4-6 ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวมีค่าประมาณ 1,440.8 และในส่วนค่า K จากภาพที่ 4-8 ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่าประมาณ 1,824 นั้น เนื่องจากการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยกว่าการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำที่ใช้แรงที่มากกว่าในการขึ้นรูป อีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ช่วยแสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปดีหรือไม่ดีคือ ค่า n ที่มีค่าเท่ากับ 0.6235 และเช่นเดียวกันกับค่า K ที่ค่า n ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่ามากกว่าค่า n ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุทดสอบนี้สามารถขึ้นรูปได้ดีกับการขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ เท่ากับ 0.9961 แสดงตามสมการดังนี้

1. สมการกฎยกกำลังของการทดสอบขึ้นรูปแบบแรงดึงแกนเดียว

$$\overline{\sigma} = 1{,}440.8\,\varepsilon^{-0.3832}$$

$$R^2 = 0.9142$$

2. สมการกฎยกกำลังที่ของการทดสอบขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

$$\overline{\sigma} = 1{,}824\,\varepsilon^{-0.6235}$$

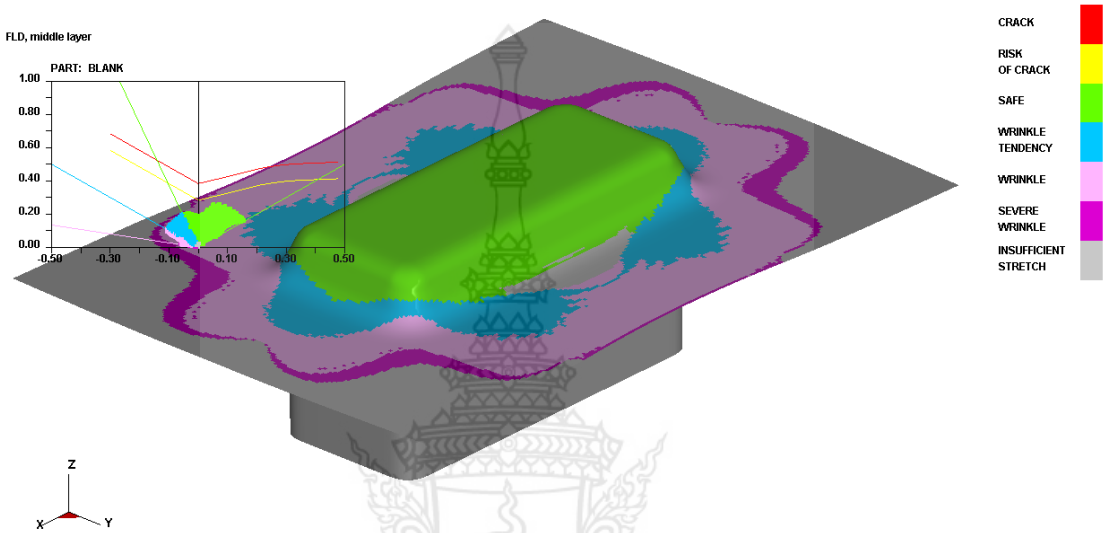
$$R^2 = 0.9961$$

4.3 ผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูป

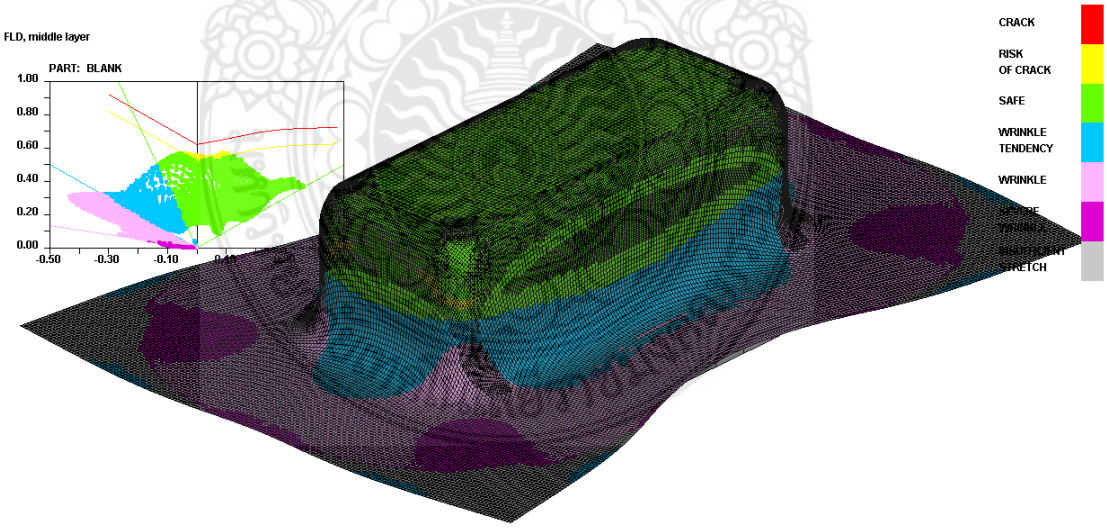
เมื่อทราบผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว กับผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ ที่ให้ค่าระดับความเครียด 0.4 และ 0.84 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าระดับความเครียดที่แตกต่างกันมากประมาณ 0.4 ระดับความเครียด เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบเรียบร้อยแล้ว จึงนำผลที่ได้

จากการทดสอบดังกล่าวมาจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยม เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองดังกล่าวว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นอย่างไร แต่การที่จะนำผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวมาใช้เป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการประมวลผลนั้น ยังมีค่าระดับความเครียดที่ไม่เพียงพอจึงต้องทำการประมาณการค่าความเครียดเพิ่มเติมจาก 0.4 เพื่อให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปต่อไป โดยเริ่มจากผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว มาทำการจำลองสภาพการณ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์เพื่อจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ณ เวลาใด ๆ โดยแบ่งการจำลองการขึ้นรูปออกเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองที่หนึ่ง การจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปด้วยโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์จากผลพารามิเตอร์การทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว พบว่าการจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมนั้นชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ความสูงเพียง 15 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4-9 ส่วนแบบจำลองที่สอง นำผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ มาจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์เช่นกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมสามารถขึ้นรูปมีความสูงเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4-10 และแบบจำลองสุดท้าย เป็นการจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ จากผลพารามิเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่มีบันทึกในระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์อยู่ในส่วนของการเก็บรวบรวมคำสั่งกลาง (Library) ซึ่งบริษัทผู้ออกแบบโปรแกรมจะเป็นผู้เก็บรวบรวมค่าคำสั่งกลางของวัสดุแต่ละชนิด เมื่อทำการจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ทำให้ทราบว่าชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมสามารถขึ้นรูปให้มีความสูงเท่ากับ 35 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4-11 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแผนภาพขีดจำกัดเส้นโค้ง (Forming Limit Diagram : FLD) ดังภาพที่ 4-9 ถึง 4-11 เป็นเกณฑ์การกำหนดความเสียหายในการขึ้นรูป พบว่าจากแผนภาพขีดจำกัดเส้นโค้งแบ่งพื้นที่ออกเป็น 5 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่สีแดง เป็นเส้นที่อยู่บนสุด หากผลการจำลองพื้นที่ของโลหะแผ่นมาอยู่ในบริเวณนี้แสดงว่า พื้นที่โลหะดังกล่าวจะเกิดการฉีกขาดหรือคอดตัวหลังจากการขึ้นรูป ในส่วนพื้นที่สีเหลือง พื้นที่ใต้เส้นสีแดงจนถึงเส้นสีเหลือง หากพื้นที่โลหะบริเวณอยู่ในพื้นที่นี้แสดงว่าหลังการขึ้นรูปพื้นที่ดังกล่าวมีโอกาสที่จะเกิดการคอดตัว พื้นที่สีเขียว เป็นเส้นที่สามนับจากเส้นบนสุด หากพื้นที่โลหะบริเวณอยู่ในพื้นที่นี้แสดงว่า พื้นที่การขึ้นรูปดังกล่าวปลอดภัย อาจจะอยู่ในภาวะยืด ดึงภายหลังการขึ้นรูป ถัดไปเป็นพื้นที่สีน้ำเงิน หากพื้นที่โลหะบริเวณอยู่ในพื้นที่นี้แสดงว่า พื้นที่โลหะดังกล่าวมีแนวโน้มอาจจะเกิดรอยย่นภายหลังการขึ้นรูปได้ และในพื้นที่สุดท้ายคือ พื้นที่สีม่วง หากพื้นที่โลหะบริเวณอยู่ในพื้นที่นี้แสดงว่า พื้นที่โลหะดังกล่าวเกิดรอยย่นภายหลังการขึ้นรูปได้ จากการพิจารณาภาพทั้งสามพบว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีพื้นที่มากกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของ

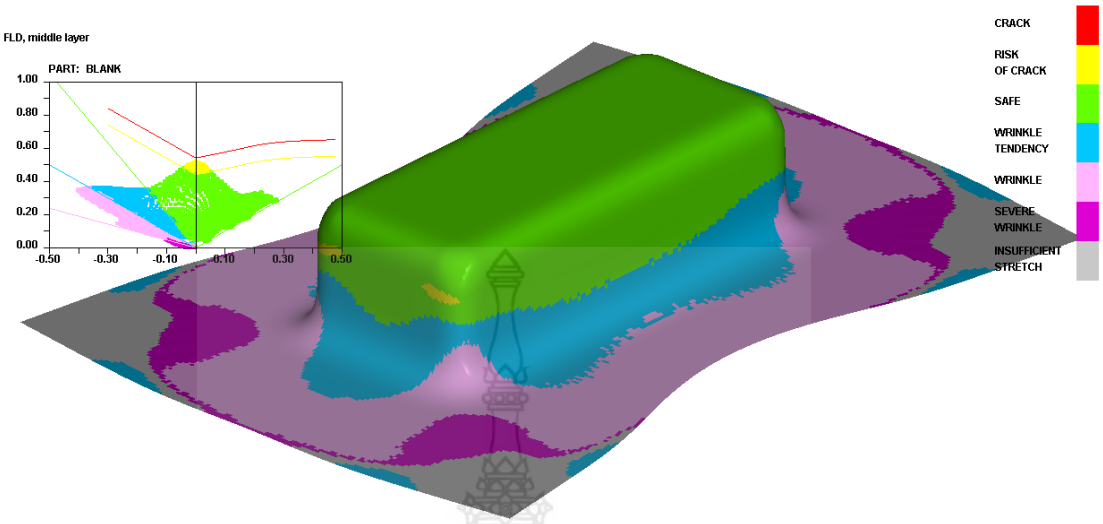
การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว การวิเคราะห์ด้วยการใช้การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำทำได้ดีกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เนื่องจากสภาพการณ์การขึ้นรูปของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีความใกล้เคียงกับสภาพการณ์การขึ้นรูปจริง



ภาพที่ 4-9 จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว



ภาพที่ 4-10 จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ



ภาพที่ 4-11 จำลองสภาพการณ์การขึ้นรูป ด้วยการใช้ค่า Flow Stress Curve ของการเก็บรวบรวมคำสั่งกลาง (Library) ของโปรแกรม

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 นี้จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการสรุปผลการวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะที่จะเป็นประโยชน์ในงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากที่มาและความสำคัญของปัญหา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ขั้นการดำเนินการวิจัย รวบรวมบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบ มาสู่ผลการดำเนินงานวิจัย ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยนี้เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ มีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวของวัสดุสแตนเลส SS 304 ขนาดความหนา 0.4 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นมีความยากในการขึ้นรูป โดยเฉพาะโลหะแผ่นที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน E8/E8M-09 นั้นไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เริ่มแรกผู้วิจัยจึงเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8 ก่อน เมื่อทำการทดสอบจึงพบว่าชิ้นงานทดสอบได้มีการเสียรูปที่ผิดปกติคือ เกิดการเสียรูปในบริเวณนอกช่วงความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) หรือบริเวณด้ามจับ (Grip Section) ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณดังกล่าวไหลเข้าไปในบริเวณความยาวของระยะทดสอบด้วย ส่งผลให้เกิดค่าความเค้นที่มากกว่าที่ควรจะเป็น จึงได้ทำการออกแบบชิ้นงานทดสอบขึ้นใหม่ โดยการนำระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์มาช่วยในการตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์จากรูปชิ้นงาน เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองชิ้นงานรูปร่างเดิมและชิ้นงานที่มีการออกแบบใหม่ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์ที่น้อยกว่าชิ้นงานรูปร่างเดิมมาก จึงทำการตัดเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดตามที่ออกแบบใหม่ ผลการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient : K) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1440.8 ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent : n) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.383 สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึงแกนเดียว มีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.4 แสดงตามสมการดังนี้

สมการกฎยกกำลังของการทดสอบขึ้นรูปแบบแรงดึงแกนเดียว

$$\overline{\sigma} = 1{,}440.8\,\overline{\varepsilon}^{0.3832}$$

$$R^2 = 0.9142$$

ในส่วนการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น โดยใช้แรงดันน้ำกระทำกับผิวชิ้นงานให้เป็นรูปโดมครึ่งทรงกลม การขึ้นรูปแบบนี้จะมีเพียงดาย (Die) ไม่มีพันช์ (Punch) จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่ารัศมีโดมมีค่าผกผันกับค่าความสูงโดม หรือกล่าวอีก

นัยหนึ่งคือ ค่ารัศมีโดมมีค่าลดลงก็ต่อเมื่อความสูงของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่าระดับความเครียดประมาณ 0.84 ซึ่งเป็นค่าระดับความเครียดที่สูงกว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวที่มีระดับความเครียดเพียง 0.4 นอกจากนั้นยังมีค่า K และ n ที่มีค่าเท่ากับ 1,824 และ 0.6235 ตามลำดับ โดยค่า K ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้นมีค่าที่สูงมาก เนื่องจากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำจะใช้แรงที่มากกว่าการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียวในการขึ้นรูป และค่า n เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ช่วยแสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปดีหรือไม่ดี เช่นเดียวกันกับค่า K ที่ค่า n ของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีค่ามากกว่าค่า n ของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว นั่นแสดงว่าวัสดุทดสอบนี้สามารถขึ้นรูปได้ดีกับการขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ อีกทั้งโลหะแผ่นที่ใช้ในการทดสอบขึ้นรูปมีความสามารถที่จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเท่ากันทุกทิศทาง ไม่ได้มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดในแนวรีดดีกว่าแนวอื่นๆ จึงปราศจากอิทธิพลค่าอัตราส่วนความเครียดพลาสติก (r) แสดงตามสมการดังนี้

สมการกฎยกกำลังที่ของการทดสอบขึ้นรูปแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

$$\overline{\sigma} = 1{,}824\,\varepsilon^{-0.6235}$$

$$R^2 = 0.9961$$

โดยเมื่อนำผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว กับผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ มาจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมพบว่า การจำลองสภาพการณ์การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำนั้น ชิ้นงานจำลองสามารถขึ้นรูปให้มีความสูงเท่ากับ 40 มิลลิเมตรได้ แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีพื้นที่มากกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของการทดสอบแบบแรงดึงแกนเดียว การวิเคราะห์ด้วยการใช้การทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำทำได้ดีกว่าการทดสอบแรงดึงแกนเดียว เนื่องจากสภาพการณ์การขึ้นรูปของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีความใกล้เคียงกับสภาพการณ์การขึ้นรูปจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำมีต้นทุนการดำเนินงานค่อนข้างสูง หากมีวิธีการอื่นที่สามารถช่วยทำการหาพารามิเตอร์ของค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ง่ายและมีต้นทุนที่ต่ำลงจะเกิดประโยชน์อย่างยิ่ง

5.2.2 ควรมีการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการคำนวณจากสมการมาทำการเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ

เอกสารอ้างอิง

[1] ธนสาร อินทรกำธรชัย และคณะ. “การหาคุณสมบัติช่วงพลาสติกของโลหะแผ่นเกรด SPCC ด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำและอิทธิพลการเบี่ยงเบนในช่วง 6 ซิกม่า.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการแห่งชาติ, 2010.

[2] สุวัฒน์ จีรเธียรนาถ. การวิจัยและการพัฒนา. เอกสารรายงานประจำปีเอ็มเทค. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2552.

[3] ชลิดา บุญแจ้ง และคณะ. “การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ” การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติครั้งที่ 3 (CIOD 2012). 26 เมษายน 2555, มจพ.

[4] กชกร วิรัชกุล. การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของคุณภาพชิ้นงานพาราโบลิกที่เกิดจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติโลหะแผ่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.

[5] Gutscher, G. Evaluation of formability and determination of flow stress curve of sheet metals with hydraulic bulge test. Degree of Diploma The Ohio State University. Ohio State, 2000.

[6] ชลากร อุดมรักษาสกุล. การประเมินความถูกต้องของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.

[7] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การทดสอบแรงดึง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[8] Gutscher, G., et al. “Determination of formability and flow stress curve for sheet metals using the viscous pressure bulging (VPB) test.” Journal of Materials Processing Technology. (2004) : 1-7.

[9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณะโสภาคย์. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ประวัติผู้วิจัย

<u>หัวหน้าโครงการวิจัย</u>

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นายชลากร อุดมรักษาสกุล
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Chalakorn Udomraksasakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
   สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
   โทร. 0-2913-2424 ต่อ 203 หรือ 121, มือถือ 09594-09549
   E-Mail: u.chalakorn@gmail.com, chalakorn.u@rmutp.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
   วท.บ. คณิตศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
   วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
   ปร.ด. วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (กำลังศึกษา)
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   5.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)
   5.2 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Elements Method)
   5.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

<u>ผู้ร่วมวิจัยวิจัย</u>

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นาย กชกร วิรัชกุล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Kotchakorn Wiratchakul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โทร. 0-2913-2424 ต่อ 233, มือถือ 080-946-7755

E-Mail: wiratchakul.k@gmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2544

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2549

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2554

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

5.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)

5.2 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Elements Method)

5.3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

<u>ผู้ร่วมวิจัยวิจัย</u>

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นางสาวชลิดา อุดมรักษาสกุล
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Miss. Chalida Udomraksasakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
   สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
   โทร. 0-2913-2424 ต่อ 209, มือถือ 092-936-5505
   E-Mail: bo.chalida@gmail.com
4. ประวัติการศึกษา
   วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
   วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
   ปร.ด. วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (กำลังศึกษา)
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   5.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)
   5.2 การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Elements Method)