



การทำนายค่าความหนาของชิ้นงานพาราโบลาที่เกิดจากความไม่แน่นอน
ของคุณสมบัติโลหะแผ่นด้วยสมการการถดถอย
Regression Model for Prediction the Thickness of Parabolic Part
Under Uncertainty of Sheet Metal Properties

นายชลากร อุดมรักษาสกุล
นายกชกร วิรัชกุล
นางสาวชลิตา อุดมรักษาสกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงิน งบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ABSTRACT

This research aims to predict the thickness loss of parabolic forming by using hydromechanical deep drawing (HMD) process. The methodology used is the finite element method on the uncertainty of the mechanical properties for 1 mm thickness SPCC sheet metals. The properties consisted of three aspects: strength coefficient (K), strain hardening exponent (n -value), and plastic strain ratio for all three axis (r_0 , r_{45} , and r_{90}). Multiple simulations were completed by randomly selecting K , n , r_0 , r_{45} , and r_{90} values following the distribution obtained from the uniaxial tensile test. The results would be analyzed by using the regression equation to create the equation to predict the thickness loss of the test pieces obtained from the formation process using the K , n , r_0 , r_{45} , and r_{90} variables without the use of finite element method. This would result in a decrease in the simulation time. Based on 30 experiments of uniaxial tensile test, it shows that the sheet metal properties are normally distributed. After that, 60 cases of the five variables were randomly selected to simulate the formation by using the finite element method. Finally, the results obtained from the aforementioned simulation is analyzed and generated into a regression equation. From the comparison between the value predicted from the regression equation and the result obtained from the formation process, it can be seen that the regression equation can effectively predict the thickness loss when the five variables are under the same distribution properties. However, the efficiency will decrease when the values of the five variables are beyond the distribution properties obtained from the experiment. In addition, the uncertainty of mechanical properties of sheet metal in the simulation displays the chances of discovering test pieces with over 40% thickness loss. The simulation resulted in 5 damaged test pieces, accounting for 8.33% of the total process.

(There are a total of 58 pages for this research)

Keywords: Regression equation, hydromechanical deep drawing, finite element method, mechanical properties of sheet metal

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานรูปทรงพาราโบลิก ในการจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนความไม่แน่นอนของ คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นเกรด SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติ 3 ชนิด คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด และอัตราส่วนของ ความเครียดในช่วงพลาสติกทั้งสามแนวแกน (0° , 45° และ 90° กับแนวแกนรีด) โดยทำการจำลอง หลาย ๆ ครั้ง จากการสุ่มค่า K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ตามลักษณะการกระจายตัวที่ได้จากการทดสอบ แรงดึงแกนเดียวด้วยชิ้นงานทดสอบที่มากพอ สุดท้ายนำผลลัพธ์ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ การถดถอยเพื่อสร้างสมการสำหรับการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วย ตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} โดยไม่ต้องผ่านการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่งผล ให้ลดเวลาในการจำลองการขึ้นรูป จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวทั้งหมดจำนวน 30 ครั้งต่อ แนวแกนรีด พบว่าค่าคุณสมบัติของโลหะแผ่นมีการกระจายตัวแบบปกติ จากนั้นทำการสุ่มค่าของทั้ง 5 ตัวแปรตามลักษณะการกระจายตัวทั้งหมด 60 กรณี เพื่อนำไปทำการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบ ไฟไนต์เอลิเมนต์ สุดท้ายนำผลลัพธ์จากการจำลองดังกล่าวมาวิเคราะห์และสร้างเป็นสมการถดถอย จากการเปรียบเทียบค่าทำนายที่ได้จากสมการถดถอยกับผลจากการจำลองการขึ้นรูป พบว่าสมการ ถดถอยสามารถทำนายค่าการสูญเสียความหนาได้มีประสิทธิภาพเมื่อค่าของทั้ง 5 ตัวแปร อยู่ภายใต้ คุณสมบัติการกระจายตัวเหมือนกัน และจะลดประสิทธิภาพลงเมื่อค่าของทั้ง 5 ตัวแปร อยู่นอกเหนือ คุณสมบัติการกระจายตัวที่ได้จากการทดสอบ นอกจากนี้การใช้ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติทางกล ของโลหะแผ่นในการจำลองยังทำให้ทราบถึงโอกาสที่พบชิ้นงานที่ได้รับความเสียหายจากการสูญเสีย ความหนาเกิน 40% จากการจำลองพบว่าจะเกิดชิ้นงานเสียหายจำนวน 5 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 8.33

(งานวิจัยนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 58 หน้า)

คำสำคัญ : สมการถดถอย กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานโปรแกรม LS-DYNA สำหรับการวิเคราะห์การจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ให้ความอนุเคราะห์การใช้งานโปรแกรม MiniTab ในการวิเคราะห์ทางสถิติ และงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณวิจัยในลักษณะบูรณาการ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการให้กำลังใจ แก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอขอบพระคุณบูรพคณาจารย์ทุกท่าน ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชานับตั้งแต่วัยเยาว์วิญญวณกระทั่งทุกวันนี้

ชลากร อุดมรัชสาสกุลม

กชกร วิรัชกุล

ชลิตา อุดมรัชสาสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ	6
2.2 ทฤษฎีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	7
2.3 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	17
2.4 ทฤษฎีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ	24
2.5 การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 แนวความคิดงานวิจัย	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	42
4.1 การจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	42
4.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลด้วยสมการถดถอย	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ประวัติผู้วิจัย	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1-1	ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการศึกษา	5
2-1	ชนิดของเอลิเมนต์	13
2-2	รายละเอียดชิ้นงานทดสอบโลหะแผ่นตามมาตรฐาน ASTM E8	18
2-3	ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานในประเภทต่าง ๆ	18
3-1	ตัวอย่างข้อมูลความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการคำนวณ	34
3-2	ตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงจากการคำนวณ	34
3-3	ค่าของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว	36
3-4	ผลการทดสอบลักษณะการกระจายตัวของ 5 ตัวแปร	37
3-5	การกำหนดแรงจับยึดและแรงดันในรูปแบบของเวลา	40
3-6	การกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของพื้นที่	40
4-1	ผลการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90}	42
4-2	ข้อมูลคุณสมบัติทางกลและลักษณะการกระจายตัวของโลหะแผ่นเกรด SPCC	43
4-3	ผลการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
4-4	เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการพยากรณ์	47
4-5	ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียความหนาแน่นระหว่างค่าทำนายจากสมการถดถอยกับการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	47
4-6	เปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการทำนายด้วยสมการถดถอยในช่วง	49
4-7	เปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการทำนายด้วยสมการถดถอยนอกช่วง	50
4-8	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของสมการถดถอย (4-2)	50

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2-1	การแบ่งประเภทของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ	7
2-2	กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแอคทีฟ	7
2-3	การรักษาสมดุลของวัตถุในกรณีมีแรงภายนอกมากระทำ	9
2-4	การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์	9
2-5	เอลิเมนต์ 1 มิติ	11
2-6	การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ	11
2-7	เอลิเมนต์ 2 มิติ	11
2-8	การใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ	12
2-9	เอลิเมนต์ 3 มิติ	12
2-10	การใช้เอลิเมนต์ 3 มิติ	12
2-11	เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน	13
2-12	ขั้นตอนพื้นฐานของการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์	14
2-13	แบบจำลอง CAD	14
2-14	การกำหนดภาระแรงกระทำต่อจุดจับยึด	15
2-15	การแบ่งแบบจำลอง CAD ออกเป็นเอลิเมนต์	15
2-16	การทดสอบแรงดึงแกนเดียว	17
2-17	มาตรฐาน ASTM E8 ในการทดสอบ	18
2-18	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด	19
2-19	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุจากการรับแรงดึง	20
2-20	กราฟของความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม	21
2-21	ลักษณะการคอดตัวของชิ้นงานทดสอบ	21
2-22	กราฟความสัมพันธ์ที่บ่งบอกจุดเค้นครากอย่างชัดเจน	23
2-23	กราฟความสัมพันธ์ที่ไม่ปรากฏจุดเค้นคราก	23
2-24	การแบ่งช่วงการเสียรูปของวัสดุ	23
2-25	การเตรียมชิ้นงานทดสอบความเป็นไอโซโทรปิกของวัสดุ	24
2-26	กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน	25
3-1	แนวความคิดงานวิจัย	31
3-2	ขนาดชิ้นงานพาราโบลิคในงานวิจัยนี้	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3-3	แบบจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ	33
3-4	การหาค่าความแข็งแรงสูงสุด	33
3-5	คุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติกของวัสดุ	35
3-6	ตัวอย่างการทดสอบความเข้ากันกับกฎยกกำลัง	35
3-7	ตัวอย่างการหาค่าของตัวแปร r	35
3-8	การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า K ด้วยหลักการ Anderson Darling	37
3-9	การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า n ด้วยหลักการ Anderson Darling	37
3-10	การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_0 ด้วยหลักการ Anderson Darling	38
3-11	การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_{45} ด้วยหลักการ Anderson Darling	38
3-12	การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_{90} ด้วยหลักการ Anderson Darling	38
3-13	ขั้นตอนการเป่าโป่งของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ	39
3-14	ขั้นตอนในการขึ้นรูปของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ	39
3-15	ค่าแรงดันและแรงจับยึดในการจำลองการขึ้นรูป	40
3-16	แบบจำลองการขึ้นรูปสำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยน้ำ	41
4-1	ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมรถยนต์มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ส่งผลให้ตลาดโลหะแผ่นและการแปรรูปโลหะแผ่นเติบโตควบคู่กันไปด้วย ดังนั้นอุตสาหกรรมโลหะแผ่นจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบันอย่างมาก ซึ่งในอุตสาหกรรมนี้มีกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Process) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์ (Product) ต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ในครัวเรือน และชิ้นส่วนของเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้เกิดกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นประเภทใหม่เพื่อขจัดข้อจำกัดบางประการที่พบในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบดั้งเดิม (Conventional Deep Drawing) กระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้คือ กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ (Hydromechanical Deep Drawing: HMD)

กระบวนการที่ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดมาจากกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบดั้งเดิม นั่นคือกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ ทั้งนี้เพื่อแก้ไขการคอดตัวเฉพาะบริเวณ (Localized Necking) หรือการฉีกขาด (Tearing) เกิดขึ้นได้ง่ายในกระบวนการนี้ อันเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient; μ) ต่ำในบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างหัวกด (Punch) และโลหะแผ่น (Blank) ส่วนกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำจะเกิดความเสียดทานที่สูงกว่า เนื่องจากคุณสมบัติของของเหลวมีความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Hydrostatic) ทำให้โลหะแผ่นยึดตัวได้ดีขึ้นและความเค้นที่กระทำต่อโลหะแผ่นมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้กระบวนการดังกล่าวจึงเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Limit Drawing Ratio: LDR) มากกว่ากระบวนการลากขึ้นรูปลึกจาก 1.8 เป็น 2.8 [1] นอกจากนี้การขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิกหรือชิ้นงานที่ซับซ้อนด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแบบดั้งเดิม (Deep Drawing) ต้องการขึ้นรูปซ้ำ (Redraw) ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ซึ่งต่างจากกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยน้ำสามารถขึ้นรูปได้ภายใน 1 ขั้นตอน [2] ด้วยเหตุผลที่ว่ามานี้ทำให้กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำนั้นถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ถูกออกแบบให้มีรูปร่างที่ลึกและซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น

วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming Simulation) โดยไม่ต้องทำการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นมาจริงหรือแม้กระทั่งทำการทดลอง (Trial) ซึ่งประโยชน์ของวิธีการจำลอง

การขึ้นรูปคือ ทราบถึงถึงพฤติกรรมของการของโลหะแผ่น ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย [3] โดยความถูกต้องของผลลัพธ์ในการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นจำเป็นต้องมีข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากที่สุด ซึ่งข้อมูลที่มีความสำคัญดังกล่าวคือ คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น (Sheet Metal Properties) ในช่วงพลาสติก (Plasticity) หรือในช่วงการเสียรูปแบบถาวรนั่นเอง ซึ่งในช่วงดังกล่าว จะถูกนำไปทดสอบความเข้ากันกับกฎยกกำลัง (Power Law) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความ แข็งแรง (Strength Coefficient: K) เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening Component: n) และอัตราส่วนของความเครียดในช่วงพลาสติก (Plastic Strain Ratio: r) ทั้งสาม แนวแกนในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์แลงฟอร์ด (Lankford Coefficients) อันได้แก่ 0° , 45° และ 90° กับแนวแกนรีด เนื่องจากสมบัติของโลหะแผ่นในช่วงนี้มีสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทางการรีด (Anisotropy Material) ไม่ขึ้นกับความหนาของแผ่นโลหะตามเกณฑ์ของฮิลล์ (Hill) [4] และแลง ฟอร์ด (Lankford) [5]

การทดสอบแรงดึงแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) เป็นการทดสอบที่นิยมใช้กันอย่าง กว้างขวางในการหาค่าคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น ภายใต้มาตรฐานสากลรองรับ (American Society for Testing and Materials: ASTM) การทดสอบแรงดึงแกนเดียวเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ ของความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Relationship) ในโลหะแผ่นภายใต้แรงที่มากกระทำ ต่อชิ้นงานเพียงแกนเดียว (Uniaxial) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของโลหะแผ่นชนิดนั้น ๆ [6] จากการศึกษาปัญหาการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัจจุบัน พบว่าผู้วิจัยส่วนใหญ่จะไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอน (Uncertain) คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่น อันเนื่องมาจาก ความแตกต่างของกรรมวิธีในการผลิตของแต่ละผู้ผลิต (Suppliers) หรือแม้กระทั่งโลหะแผ่นจากม้วน (Roll) เดียวกันก็มีคุณสมบัติทางกลไม่เหมือนกัน (ส่วนกลางม้วนโลหะแผ่นมีคุณสมบัติทางกลคงที่มากที่สุดเพราะเครื่องจักรในการผลิตเริ่มมีการทำงานที่เข้าสู่สภาวะเต็มประสิทธิภาพของเครื่อง) โดยนิยม ใช้ข้อมูลทั้ง 5 ตัวแปร ซึ่งประกอบค่า K, n, r_0 , r_{45} และ r_{90} .ในรูปแบบของค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทน ของพฤติกรรมของการขึ้นรูปของโลหะแผ่นชนิดนั้น ๆ โดยไม่คำนึงถึงความเปราะบางที่เกิดขึ้น ทำให้ ผลลัพธ์จากการจำลองการขึ้นรูปขาดความน่าเชื่อถือ (Unreliable) เมื่อนำไปใช้ในงานจริงซึ่งอาจพบ การขึ้นรูปที่เสียหายในบางชิ้น [7] แต่การจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติ ทางกลของโลหะแผ่นมีข้อด้อย คือ เสียเวลาในการจำลองการขึ้นรูปมากเนื่องจากจำเป็นต้องทำการ จำลองหลายกรณี โดยแต่ละกรณีจำเป็นต้องใช้เวลานานมากในการคำนวณผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์

จากกรณีศึกษาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจทำการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนา (Thinning) ในการ จำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานพาราโบลา โดยใช้ โลหะแผ่นเกรด AISI 1008 (JIS G 3141 SPCC) ความหนา 1 มิลลิเมตร (mm) โดยทำการจำลอง

หลาย ๆ ครั้ง จากการสุ่มค่า K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ตามลักษณะการกระจายตัวอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติโลหะแผ่น สุกท้ายนำผลลัพธ์ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอย (Regression Model) เพื่อสร้างสมการสำหรับการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} โดยไม่ต้องผ่านการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่งผลให้ลดเวลาในการจำลองการขึ้นรูป ซึ่งต้องการเวลามากในการวิเคราะห์ปัญหา อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกในการนำไปใช้งาน เพราะการพยากรณ์ด้วยสมการการถดถอยสามารถนำไปใช้งานได้ทุกคน โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นความรู้เฉพาะด้านที่ต้องการความเชี่ยวชาญสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างสมการการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิกหลังจากการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90}

1.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิกจากการพยากรณ์ด้วยสมการถดถอยกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้การทดสอบแรงดึงแกนเดียวในการหาคุณสมบัติของโลหะแผ่น

1.3.2 ใช้โลหะแผ่นเกรด SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการทดสอบเท่านั้น

1.3.3 โลหะแผ่นในการทดสอบมาจากเหล็กม้วนเดียวกัน และลัดตเดียวกันเท่านั้น

1.3.4 ใช้โปรแกรม LS-DYNA Version 5.7 ในการจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปชิ้นงานผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาสภาพปัญหาการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัจจุบัน

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 ทดสอบคุณสมบัติของโลหะแผ่น และทดสอบการเข้ากันด้วยกฎยกกำลัง

1.4.4 ทดสอบลักษณะการกระจายตัวและสุ่มค่าของทั้ง 5 ตัวแปร

1.4.5 จำลองการลากขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.6 สร้างสมการการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิกด้วยการวิเคราะห์สมการการถดถอย

1.4.7 เปรียบเทียบค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิคจากการพยากรณ์ด้วยสมการกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

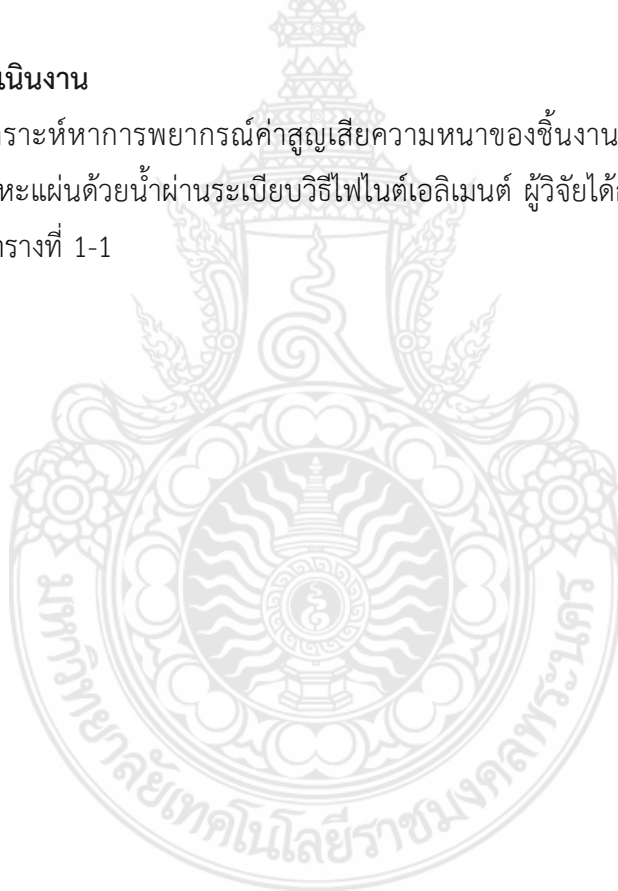
1.5.1 เป็นฐานข้อมูลของการลากขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิคด้วยน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีอื่น ๆ

1.5.2 ลดเวลาสำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.3 ทราบความน่าเชื่อถือของคุณภาพชิ้นงานพาราโบลิคในการจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำในกรณีที่ว่าวัสดุมีความเป็งงเบนคุณสมบัติเชิงกลในลักษณะเดียวกัน

1.6 แผนการดำเนินงาน

ในการวิเคราะห์หาการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิคโดยการจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้กำหนดแผนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1-1



ตารางที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินงานและระยะเวลาการดำเนินการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559										
	พ.ย. – ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	
1. ศึกษาสภาพปัญหาการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัจจุบัน	↔											
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↔	↔										
3. ทดสอบคุณสมบัติของโลหะแผ่น และทดสอบการเข้ากันด้วยกฎยกกำลัง			↔	↔								
4. ทดสอบลักษณะการกระจายตัวและสุ่มค่าของทั้ง 5 ตัวแปร				↔	↔							
5. จำลองการลากขึ้นรูปด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์						↔	↔					
6. สร้างสมการการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิคด้วยการวิเคราะห์สมการการถดถอย								↔	↔			
7. เปรียบเทียบค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิคจากการพยากรณ์ด้วยสมการกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์										↔	↔	
8. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ												↔

บทที่ 2

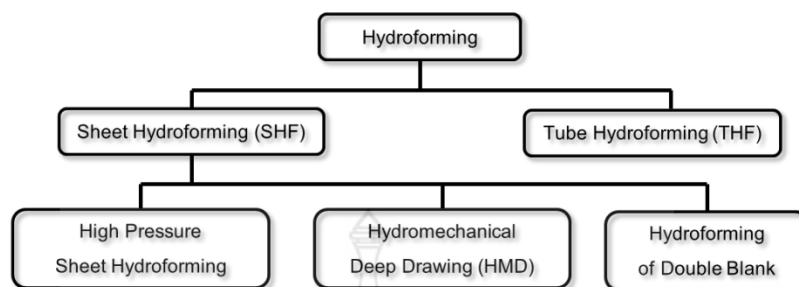
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ รวมไปถึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎีกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ
- 2.2 ทฤษฎีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 2.3 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึงแกนเดียว
- 2.4 ทฤษฎีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ
- 2.5 การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

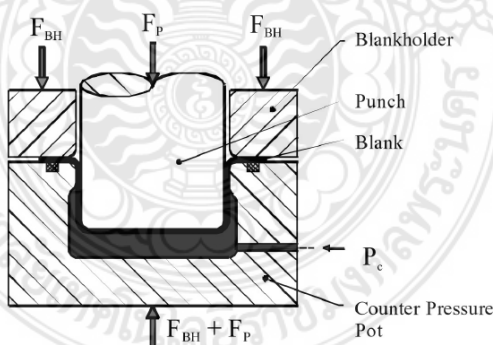
2.1 ทฤษฎีกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ

ในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปโลหะมีการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีความเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะกระบวนการลากขึ้นรูปแบบดั้งเดิมนั้นมีข้อจำกัดหลายประการจึงเป็นเหตุให้เกิดการพัฒนากระบวนการขึ้นมาใหม่ นั่นคือกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยน้ำ (Hydroforming) โดยแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะทั่วไป คือ ใช้คุณสมบัติของของเหลวที่มีความดันเท่ากันทุกทิศทุกทางเป็นสื่อกลาง (Medium Pressure) ที่ถูกใส่ในเคาน์เตอร์พอท (Counter Pot) ซึ่งนำมาแทนที่ของตาย ทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ด้วยการใช้จำนวนแม่พิมพ์และขั้นตอนการขึ้นรูปน้อยลง เนื่องจากมีของเหลวเป็นตัวกลางในการรับและถ่ายเทแรงกดของพื้นซ์ โดยกระบวนการนี้จะแบ่งประเภทออกตามวัสดุเริ่มต้นในการขึ้นรูป ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ประเภท คือ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ (Sheet Hydroforming) และการขึ้นรูปท่อด้วยน้ำ (Tube Hydroforming) [8] โดยการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำสามารถแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิด คือ การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำโดยใช้แรงดันสูง (High Pressure Sheet Hydroforming) การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบลากขึ้นรูป และการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำโดยใช้โลหะแผ่นคู่ (Hydroforming of Double Blank) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 [9] ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบลากขึ้นรูป



ภาพที่ 2-1 การแบ่งประเภทของการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ [9]

กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำถูกนำไปใช้กับโลหะแผ่นทนแรงดึงสูง (High Strength Steel Sheet) ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะแผ่นชนิดนี้คือ ความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ มีความแข็งแรงสูง เปราะ และมีน้ำหนักเบา โดยการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำเป็นกระบวนการที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อกลาง เนื่องจากคุณสมบัติของของเหลวมีความดันเท่ากันทุกทิศทุกทางและต่อเนื่องตลอดการขึ้นรูป ทำให้โลหะแผ่นยึดตัวได้ดีขึ้นและความเค้นที่กระทำต่อโลหะแผ่นมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้กระบวนการดังกล่าวจึงเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปมากกว่ากระบวนการลากขึ้นรูปลึก ซึ่งกระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยแบ่งตามการควบคุมแรงดันของของเหลว ซึ่งประกอบไปด้วยแบบพาสซีฟ (Passive) และแบบแอคทีฟ (Active) โดยงานวิจัยนี้สนใจกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแอคทีฟ ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ชุดแรงดัน (Pressure Intensifier) ในการสร้างแรงดันตามความต้องการในขณะการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2-2 [10]



ภาพที่ 2-2 กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำแบบแอคทีฟ [10]

2.2 ทฤษฎีการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

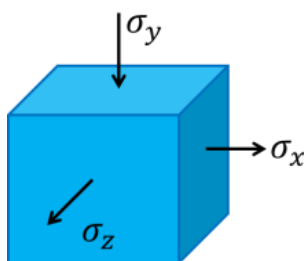
2.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีความก้าวหน้าไปมาก เนื่องจากมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของสินค้า หนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เทคโนโลยีวิศวกรรมคำนวณ หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้เป็น การนำหลักการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง

มาใช้ประโยชน์ผ่านซอฟต์แวร์ในรูปแบบการจำลองการขึ้นรูป โดยการจำลองนี้มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการออกแบบงานในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ช่วยลดระยะเวลาการออกแบบ และใช้วัสดุน้อยที่สุด ทำให้เกิดการเพิ่มศักยภาพและลดต้นทุนในการผลิต แต่ผลิตภัณฑ์ยังคงไว้ซึ่งความแข็งแรง หลีกเลี่ยงการลองผิดลองถูกที่เคยใช้กันในอดีตโดยสิ้นเชิง และตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ทันเวลา ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ นับตั้งแต่การเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างรถยนต์ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ล้ออัลลอยด์ การออกแบบโครงสร้างรถยนต์ลดแรงหน่วงจากอากาศขณะขับเคลื่อน การคำนวณสภาวะการไหลของอากาศในกล่องเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อระบายความร้อนให้ได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการจำลองสถานการณ์จากการระเบิดของทุ่นระเบิดใต้น้ำที่อาจมีผลต่อโครงสร้างเรือรบ

ปัญหาทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ที่ถูกเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับปัญหานั้น ๆ โดยการขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นปัญหาเกี่ยวกับพลศาสตร์ของแข็งในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ซึ่งสมการนี้ปัญหาเพื่อหาคำตอบหรือผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ทำได้ยากหรืออาจจะหาคำตอบไม่ได้เลยด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปที่เรียกกันว่าระเบียบเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) ดังนั้นจึงก่อให้เกิดวิธีหาคำตอบในรูปแบบผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) และวิธีการหาคำตอบนี้มีที่นิยมคือระเบียบเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method: FDM) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากระเบียบวิธีนี้เหมาะกับงานด้านกลศาสตร์ของแข็งในการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ในการเสียรูปของโลหะแผ่นผ่านเอลิเมนต์ที่ได้ทำการแบ่งไว้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมโดยการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ไปเป็นสมการเชิงพีชคณิต (Algebraic Equations) แล้วนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานการจำลองขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นการวิเคราะห์วัสดุทั้งในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic) และการเสียรูปแบบถาวร (Plastic) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานในการรักษาสมดุลของวัตถุในกรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำในทุกทิศทุกทาง ดังแสดงในภาพที่ 2-3 และเขียนแทนด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (1) ถึง (3) โดยการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวภายใต้การเสียรูปจำนวนมาก (Large Deformation) หรือในช่วงการเสียรูปแบบถาวร (ในช่วงตั้งแต่จุดเค้นครากไปจนถึงจุดแรงดึงสูงสุด) ของโลหะแผ่น โดยมีเงื่อนไขการของพื้นผิวสัมผัสของโลหะแผ่น พันซ์ ดาย และแผ่นจับยึดในรูปแบบของแรงปฏิกิริยา (Reaction Force) และแรงเสียดทาน (Friction Force)



ภาพที่ 2-3 การรักษาสสมดุลของวัตถุในกรณีมีแรงภายนอกกระทำ

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y = 0 \quad (2)$$

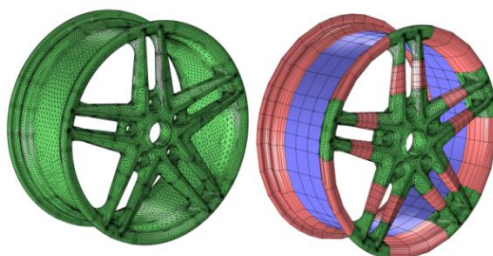
$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \quad (3)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นในแต่ละแนวแกน

τ คือ ความเค้นเฉือนในแต่ละแนว

2.2.2 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]

ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งสำหรับการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่น จะประกอบไปด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกันและมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นที่เหมาะสม (มีค่าของตัวแปรแตกต่างกันจำนวนมาก) อีกทั้งการจำลองการขึ้นรูปยังเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งไปตามลักษณะต่าง ๆ ตามรูปร่างของปัญหานั้น ๆ จากที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการหาค่าตอบหรือผลเฉลยแบบแม่นยำเกี่ยวข้องกับค่าตัวแปรต่าง ๆ เป็นจำนวนอนันต์ค่าส่งผลให้ในทางปฏิบัติไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ ดังนั้นจึงทำการแปลงผลเฉลยแม่นยำทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่ามาเป็นค่าโดยประมาณในรูปแบบจำนวนนับได้ (Finite) ผ่านการแบ่งรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ที่มีขนาดต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2-4 ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ทำให้ผลเฉลยโดยประมาณที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหามากขึ้น



ภาพที่ 2-4 การแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์

การหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยการแปลงค่าผลเฉลยแม่นยำตรงเริ่มต้นจากการแบ่งพื้นที่ (วิเคราะห์แบบ 2 มิติ) หรือปริมาตร (วิเคราะห์แบบ 3 มิติ) ของรูปร่างปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ ออกเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งถูกเรียกว่าเอลิเมนต์ ซึ่งเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกนั้นจะถูกสร้างสมการที่มีความสอดคล้องกับตำแหน่งในแต่ละเอลิเมนต์ และในแต่ละเอลิเมนต์ก็จะมีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเกิดการเชื่อมโยงกันจนก่อให้เกิดระบบสมการเชิงอนุพันธ์รวมหรือระบบสมการชุดใหญ่ของรูปร่างปัญหา หรืออธิบายอีกในรูปแบบคือ การนำเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งทั้งหมดมาประกอบรวมจนกลายเป็นรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ โดยความถูกต้องผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์หรือการทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ได้ สอดคล้องใกล้เคียงกับรูปร่างปัญหาจริงมากที่สุด ความละเอียดในการแบ่งมีความเพียงพอต่อปัญหา และความเหมาะสมในการระบุเงื่อนไขขอบเขตมาประยุกต์ใช้ในระบบสมการรวม

2.2.3 ข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

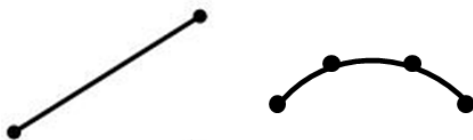
- 2.2.3.1 เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อน
- 2.2.3.2 ไม่มีข้อจำกัดในด้านการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาวิเคราะห์
- 2.2.3.3 ประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบจริง
- 2.2.3.4 สามารถจำลองรูปแบบปัญหาได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก โดยให้ความสนใจในส่วนของการสูญเสียรูปของโลหะแผ่นมากกว่าองค์ประกอบส่วนอื่น ๆ

2.2.4 ชนิดของเอลิเมนต์ (Element Type) [9]

ปัญหาอย่างหนึ่งที่สำคัญและพบบ่อยครั้งมากที่สุดในการแก้ไขปัญหามานทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การใช้ชนิดของเอลิเมนต์ที่ไม่เหมาะสมกับปัญหา เนื่องจากชนิดของเอลิเมนต์มีผลโดยตรงกับเวลาทั้งในรูปแบบของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) เวลาในการคำนวณ (Solving Time) และเวลาในการแสดงผล (Post Processing Time) มีผลต่อปริมาณพื้นที่ของการใช้หน่วยความจำหลัก (Memory Usage for Solving) และหน่วยความจำสำรอง (Disk Usage for Solving) ของคอมพิวเตอร์ รวมถึงความใกล้เคียงของรูปร่างของปัญหาจริง จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่า การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของผลเฉลยในการวิเคราะห์ โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของเอลิเมนต์ออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- 2.2.4.1 เอลิเมนต์ 1 มิติ มีลักษณะประกอบด้วย 2 จุดต่อ (Node) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ซึ่งเอลิเมนต์ชนิดนี้มีรูปแบบง่ายที่สุด และเหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหามานด้านโครงสร้างงานที่มีการวางตัวตามแนวยาวในลักษณะเป็นท่อ และงานรับแรงบิด ส่วนเอลิเมนต์ 1 มิติ แบบ 4 จุดต่อ เหมาะกับการวิเคราะห์การโก่งของคาน โดยการเลือกใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ โดยขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติเพิ่ม มีข้อเสียคือต้องการความไม่สมจริงตรงบริเวณจุดต่อของ

โครงสร้าง และไม่สามารถแสดงการกระจายตัวของความเค้นบริเวณจุดต่อได้ ส่วนข้อดีคือ ใช้พื้นที่หน่วยความจำ เวลาในการเตรียมข้อมูล และเวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า

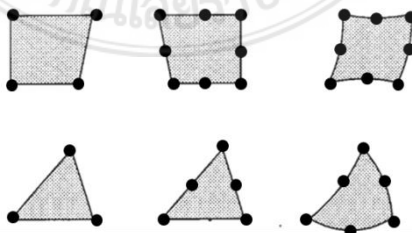


ภาพที่ 2-5 เอลิเมนต์ 1 มิติ



ภาพที่ 2-6 การใช้เอลิเมนต์ 1 มิติ

2.2.4.2 เอลิเมนต์ 2 มิติ เป็นเอลิเมนต์ที่แสดงบนแนวแกน x และ y ในลักษณะของเอลิเมนต์ด้านตรงหรือโค้งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างชิ้นงานจริง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามจำนวนจุดต่อ คือรูปแบบสามเหลี่ยม (Triangle) ที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ และรูปแบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) ที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ ดังแสดงในภาพที่ 2-7 โดยเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากให้ผลเฉลยที่ดีกว่า เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาทางจาลองรูปร่างแบบพื้นผิว (Surface) โดยความหนาของชิ้นงานเป็นคุณสมบัติที่ต้องกำหนดเพิ่ม ซึ่งความหนาอาจกำหนดให้มีค่าคงตัวหรืออาจจะเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้ ข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดนี้คือ แก้ไขปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้มากกว่าเอลิเมนต์ 1 มิติ ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับเอลิเมนต์ 3 มิติ และผลที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำสูงอีกด้วย

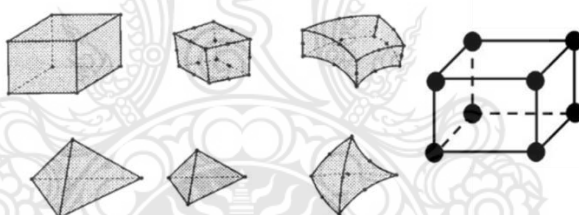


ภาพที่ 2-7 เอลิเมนต์ 2 มิติ

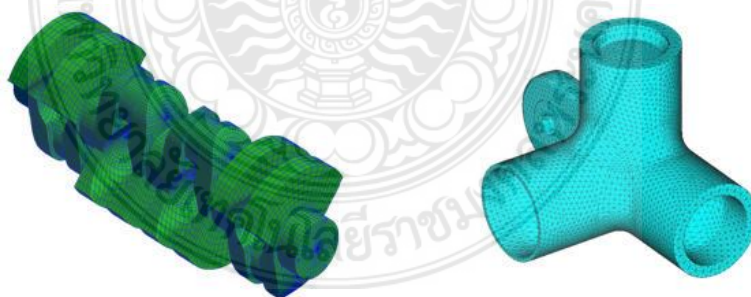


ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 2 มิติในการวิเคราะห์ปัญหาพื้นผิว

2.2.4.3 เอลิเมนต์ 3 มิติ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทรงลูกบาศก์ (ประกอบด้วย 8 จุดต่อ) และทรงปริมาตร (ประกอบด้วย 4 จุดต่อ) ดังแสดงในภาพที่ 2-9 เอลิเมนต์ 3 มิติ เป็นเอลิเมนต์ที่แก้ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็งได้หลายรูปแบบ แต่ต้องแลกด้วยการใช้หน่วยความจำ จำนวนมาก รวมทั้งใช้เวลาในการคำนวณวิเคราะห์นาน โดยชนิดของเอลิเมนต์ทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปรวมอธิบายไว้ในตารางที่ 2-1



ภาพที่ 2-9 เอลิเมนต์ 3 มิติ









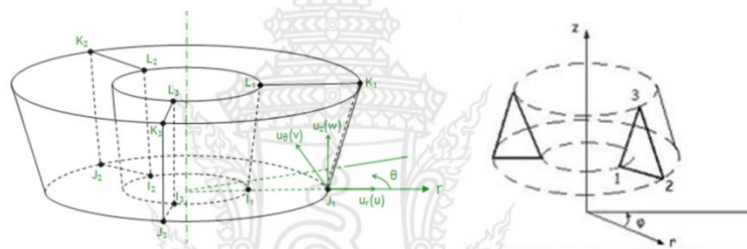
ภาพที่ 2-10 ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 3 มิติในการวิเคราะห์ปัญหารูปทรง

นอกจากเอลิเมนต์ทั้ง 3 ประเภทที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Element) ดังแสดงในภาพที่ 2-11 ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์กับปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกน เนื่องจากสามารถทำการพิจารณาเพียง 1 ใน 4 ส่วนของปัญหาเท่านั้น (การวิเคราะห์

ปัญหาทั้งชิ้นงานเป็นการเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการ) แต่สามารถให้ผลเฉลยโดยประมาณที่ถูกต้องเหมือนเดิม ทำให้ลดภาระในการคำนวณลง

ตารางที่ 2-1 ชนิดของเอลิเมนต์

Type	Actual Models	Finite Element Expressions (Geometric Properties Defined by Nodes)	Additional Requirements (Actual Volume Calculation)
1D	 Rod (Truss) Beam	 Length (L)	Area (A, cross-sectional shape) → $V = L \times A$
2D	 Shell, Plane Stress, Plane Strain, Axisymmetric, etc	 Area (A)	Thickness (t) → $V = A \times t$
3D	 Solid	 Volume (V)	None (volume calculation possible)



ภาพที่ 2-11 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน

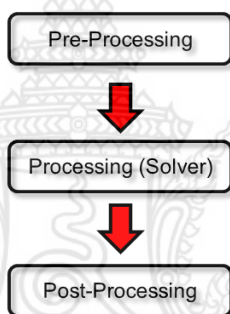
2.2.5 ไฟน์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (Finite Element Software) [12]

การนำคอมพิวเตอร์ช่วยในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering; CAE) เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมในด้านการวิเคราะห์คำนวณทางด้านวิศวกรรมที่อ้างอิงกับข้อมูลของ CAD เพื่อจำลองสถานะการทำงาน และคำนวณหาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์ภายใต้สถานะการทำงานที่กำหนดสื่อสารระหว่างผู้ใช้ผ่านกราฟิกของคอมพิวเตอร์ สำหรับการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนซึ่งยากเกินไป หรือเป็นไปไม่ได้ที่จะแก้ปัญหาเพื่อทำนายพฤติกรรมของชิ้นส่วนนั้น ๆ

โปรแกรม CAE สามารถใช้ได้กับคอมพิวเตอร์เกือบทุกประเภท ขึ้นอยู่กับความต้องการในสมรรถนะที่จะนำมาใช้งานหรือความเร็วในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับกราฟิกคอมพิวเตอร์ วิศวกรออกแบบ ใช้เครื่องมือ CAE ที่มีวัตถุประสงค์ทั่วไปเพื่อการคำนวณ และเครื่องมือเฉพาะสำหรับบางอุตสาหกรรม วิธีในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม 1 ปัญหา บ่อยครั้งต้องการเครื่องมือ CAE หลายเครื่องมือ การสื่อสารของข้อมูลระหว่างเครื่องมือในโปรแกรมเหล่านี้เป็นการทำลายของการประยุกต์ใช้ โดยส่วนใหญ่ ปกติข้อมูลจะถูกส่งในลักษณะที่เป็นมาตรฐานของการแลกเปลี่ยนข้อมูลหรือการเก็บในฐานข้อมูล

ปัญหาสำคัญของผู้ใช้ซอฟต์แวร์ส่วนใหญ่คือ ไม่เข้าใจถึงที่มาที่ไปของผลลัพธ์ที่ถูกวิเคราะห์มา ผ่านการแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ ทำให้เกิดความไม่แน่ใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้มา อีกทั้ง ความสับสนในการเลือกใช้ซอฟต์แวร์ซึ่งในปัจจุบันมีมากมายหลายโปรแกรม ซึ่งในแต่ละโปรแกรมก็มี หน้าตาและการใช้งานที่แตกต่างกัน แม้ว่าในแต่ละซอฟต์แวร์จะมีความแตกต่างกันมากเพียงใดก็จะมี หลักการพื้นฐานที่เหมือนกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2-12

2.2.5.1 กระบวนการขั้นต้น (Pre-Processing) คือ การเตรียมข้อมูลก่อนส่งไปยังส่วน ของกระบวนการวิเคราะห์เพื่อทำการคำนวณหาผลลัพธ์ต่อไป ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การสร้างแบบจำลอง (CAD Model) การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ (Material Property) การกำหนดภาระแรงกระทำและเงื่อนไขขอบเขต (Load & Constraint) และการสร้างแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-12 ขั้นตอนพื้นฐานของการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์

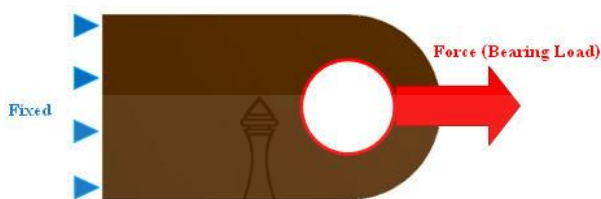
ก) การสร้างแบบจำลองเป็นการสร้างรูปแบบ CAD ที่มีรูปร่างเหมือนกับ ปัญหาที่ทำการวิเคราะห์จริงเพื่อทดแทนรูปร่างของชิ้นงานจริง ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 แบบจำลอง CAD

ข) การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ (Material Property) โดยกำหนดค่าให้ มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ หรือฐานข้อมูลของบริษัทซอฟต์แวร์ เป็นต้น

ค) การกำหนดภาระและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากส่วนหนึ่ง เนื่องจากการกำหนดสถานะที่เข้ามากระทำกับชิ้นงาน ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ในการคำนวณ ดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 การกำหนดภาระแรงกระทำต่อจุดจับยึด

ง) การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นขั้นตอนการแบ่งแบบจำลอง CAD ออกเป็นเอลิเมนต์ (การสร้างเมช) ดังแสดงในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 การแบ่งแบบจำลอง CAD ออกเป็นเอลิเมนต์

2.2.5.2 กระบวนการวิเคราะห์ (Processing หรือ Solver) เป็นขั้นตอนการประมวลผลจากข้อมูลที่ถูกส่งมาจากกระบวนการขั้นต้น โดยจะพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้รับเป็นปัญหาประเภทใด เช่น ปัญหาการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ปัญหาของแข็ง (Solid Mechanics) และปัญหาการไหล (Fluid Dynamics) เป็นต้น เมื่อทราบลักษณะของปัญหาแล้วซอฟต์แวร์ก็ทำการสร้างสมการต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับปัญหานั้น ๆ รวมเข้ากับขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนดจนกลายเป็นระบบสมการรวม สุดท้ายทำการแก้ปัญหาวเคราะห์ระบบสมการรวมที่ได้มา ซึ่งระยะเวลาในการประมวลผลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น จำนวนเมชที่สร้าง ลักษณะของปัญหาที่แก้ และประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

การขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยความไม่เชิงเส้นของรูปทรงเรขาคณิต (Geometry Non-Linear) การเสียรูปขนาดใหญ่ (Large Deformation) และการเคลื่อนที่ในปริมาณมาก (Large Displacement) ปัญหาไม่เชิงเส้นของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Non-Linear) เกิดจากการไหลของโลหะแผ่น (Material Flow) ทำให้พื้นที่ในการจับยึดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และปัญหาไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Material Non-Linear) นั่นคือการเสียรูปที่อยู่ในช่วงพลาสติก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้การคำนวณระบบสมการ

ในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) ตลอดการขึ้นรูป ซึ่งกระบวนการนี้ถูกเรียกว่า การคำนวณแบบรวมเวลา (Time Integration) และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

ก) วิธีการคำนวณแบบ Implicit Time Integration Method เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการคืบตัวของโครงสร้าง (Elastic Structure Analysis) ที่มีการคำนวณแบบขั้นตอนเดียว (Single Step) และปัญหาการดีดกลับ (Spring Back) ที่ใช้จำนวนขั้นตอนเวลาตั้งแต่ 1-25 เป็นต้น หรือจะบอกได้ว่าวิธีการคำนวณนี้เหมาะกับปัญหาที่มีจำนวนขั้นตอนเวลา (Time Step) ไม่มาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\text{Number of Time Step} = \frac{\text{Terminate Time}}{\text{Time Step}} \quad (4)$$

ข) วิธีการคำนวณแบบ Explicit Time Integration Method เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีขั้นตอนเวลาจำนวนมาก ในแต่ละขั้นตอนเวลาคำนวณได้เร็วและใช้หน่วยความจำระยะสั้นน้อย ทำให้วิธีนี้มีข้อจำกัดด้านเสถียรภาพ (Stability) และจำเป็นต้องกำหนดความเร็วของเครื่องมือ (Tooling) ให้มากกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณการดีดตัวได้ แต่วิธีการนี้มีการคำนวณที่เร็วขึ้น และเหมาะกับแก้ปัญหาที่มีจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์ที่สัมผัสกันจำนวนมาก โดยมีหลักการในการคำนวณคือ การรักษาสมดุลดังแสดงในสมการที่ (5) ส่วนสมการที่ (6) เป็นการไม่คำนึงถึงการสลายพลังงาน (Damping) ที่เกิดขึ้นมาจากแรงที่เกิดจากความเร็วคงที่ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

$$[M]a + [C]v + [K]x - F = 0 \quad (5)$$

$$[M]a + [K]x - F = 0 \quad (6)$$

โดยที่ F คือ แรงภายนอกจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

$[M]a$ คือ แรงเนื่องจากมวลมีความเร่ง (Inertia Force)

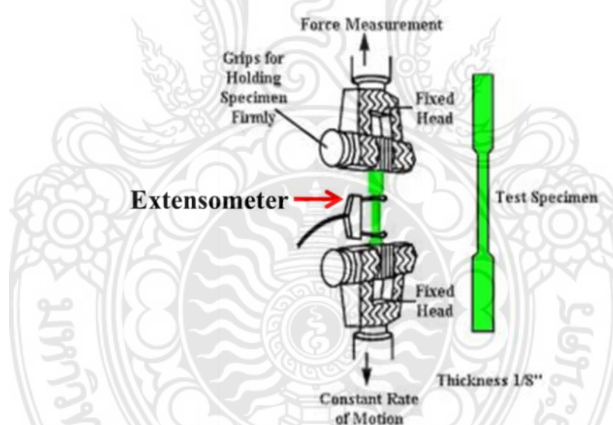
$[C]v$ คือ แรงเนื่องจากการสลายพลังงาน (Viscous Damping)

$[K]x$ คือ แรงเนื่องจากการต้านทานวัสดุช่วงอีลาสติก (Internal Force)

2.2.5.3 กระบวนการขั้นสุดท้าย (Post-Processing) เป็นขั้นตอนในส่วนของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมจะทำการแสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ (เป็นตัวเลขจำนวนมาก) ในลักษณะของกราฟิก (Computer Graphics) ในลักษณะสีต่าง ๆ ตามขนาดของตัวเลขผ่านบนจอคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้รวดเร็วและลึกซึ้ง อีกทั้งยังเป็นเหตุให้เกิดความคิดริเริ่มใหม่ ๆ จากการเห็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบภาพและสีสำหรับการแก้ไขรูปร่างของชิ้นงาน

2.3 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึงแกนเดียว [13]

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ขึ้นทดสอบตามแบบมาตรฐานสากลรองรับ แต่ขณะเดียวกันสามารถใช้ขึ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้นได้ โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึง (การยืด) ในแนวแกนด้วยแรงแบบคงที่ (Static Load) จนกระทั่งมีการเสียรูปแบบถาวรเกิดขึ้น (Plastic Deformation) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Tensile Test) ข้อมูลทั่วไปที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ร้อยละการยืด (Percent Elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ขีดจำกัดแบบสัดส่วน (Proportional Limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent Reduction in Area) ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) จุดจำนน (Yield Point) และความแข็งแรงจำนน (Yield Strength) เป็นต้น กระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM มีหลายมาตรฐาน ยกตัวอย่างเช่น E8 สำหรับวัสดุโลหะ D638 สำหรับวัสดุพลาสติก D2343 สำหรับ วัสดุโฟเบอร์ D897 สำหรับวัสดุทาก D987 สำหรับวัสดุกระดาษ และ D412 สำหรับวัสดุยาง เป็นต้น

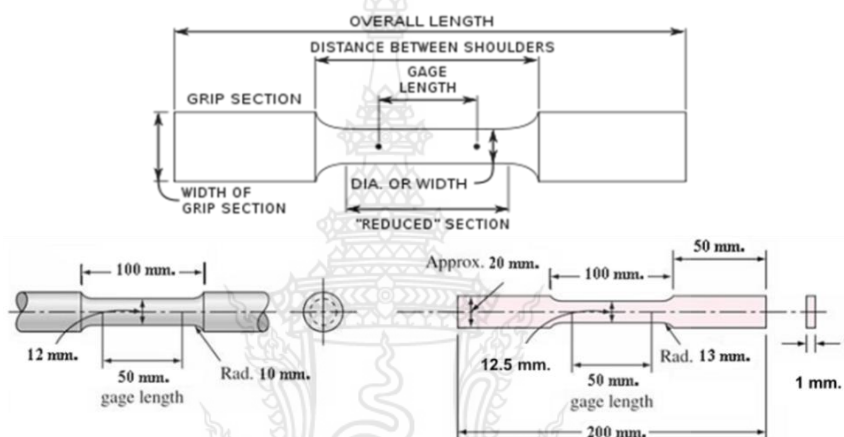


ภาพที่ 2-16 การทดสอบแรงดึงแกนเดียว

2.3.1 ชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8 เป็นการทดสอบสำหรับวัสดุโลหะ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ด้วยวัสดุเป็นทรงกระบอกหรือโลหะแผ่นที่มีลักษณะและขนาดดังแสดงในภาพที่ 2-17 ส่วนในตารางที่ 2-2 แสดงรายละเอียดลักษณะและขนาดของชิ้นงานทดสอบแบบโลหะแผ่น โดยความยาวของเกจ (Gauge Length; L_0) จะถูกกำหนดให้เป็นค่าตามมาตรฐานสากล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_0) หรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (A_0) สามารถคำนวณได้ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-3 ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบควรทำการกลึงขึ้นรูปหรือตัดชิ้นงานทดสอบก่อน ส่วนการอบชุบ (Heat Treatment) ควรทำในขั้นตอนสุดท้าย

เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาก่อนการทดสอบ อีกทั้งป้องกันรอยตำหนิ เช่น การเกิดชั้นผิวออกไซด์ขึ้นบนชิ้นงาน (Oxide Scale) จากการอบอ่อน หรือการแตกหักก่อนเวลาอันควร (Premature Failure) เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้น (Concentrate Stress Concentration) ในบริเวณรอยตำหนิ เป็นต้น หากสนใจสมบัติพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือเรียกว่าการเพิ่มความแข็งที่ผิวชิ้นงาน (Surface Hardening) ในกรณีนี้ควรนำชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนนำไปทดสอบแรงดึงแกนเดียวเพื่อที่ว่าผลการทดสอบของชิ้นงานที่สนใจนั้นจะรวมถึงสมบัติพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว



ภาพที่ 2-17 มาตรฐาน ASTM E8 ในการทดสอบ

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดชิ้นงานทดสอบโลหะแผ่นตามมาตรฐาน 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+Raduis _{min}
Grip Section	50
Width of Grip Section	20

ตารางที่ 2-3 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานในประเภทต่าง ๆ

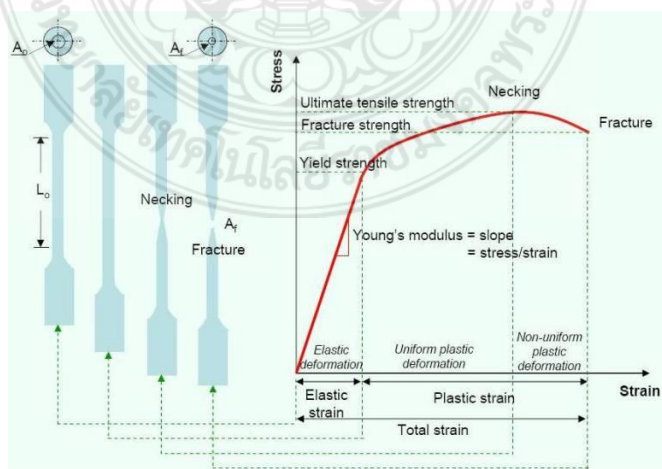
Type of Specimen	United State (ASTM)	Great Britain	Germany
Sheet; $L_0 / \sqrt{A_0}$	4.5	5.65	11.3
Rod; $L_0 / \sqrt{D_0}$	4	5	10

2.3.2 คุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติก

ลักษณะการเสียรูปของโลหะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ การเสียรูปแบบคืนตัวหรือยืดหยุ่น (Elastic Deformation) และการเสียรูปแบบถาวร โดยการเสียรูปในช่วงแรกของโลหะคือการเสียรูปแบบคืนตัว ซึ่งเป็นการเสียรูปเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ โดยการเสียรูปแบบนี้จะมีขนาดการเสียรูปเพียงเล็กน้อยเนื่องจากในขณะที่เกิดการเสียอะตอมของโลหะจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในปริมาณที่ไม่มาก ดังนั้นเมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำต่อโลหะอะตอมจะเคลื่อนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้โลหะจะสามารถคืนตัวกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นได้ ส่วนการเสียรูปแบบถาวรคือ การที่โลหะเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนไม่สามารถกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอะตอมของโลหะเกิดการเคลื่อนออกจากตำแหน่งเดิมไปมากในขณะเสียรูปแบบนี้ และไม่สามารถเคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งเดิมได้แม้ไม่มีแรงภายนอกกระทำแล้วก็ตาม ดังนั้นการเสียรูปแบบถาวรนี้จึงมีความสำคัญมากต่อการขึ้นรูป เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานหลังการขึ้นรูป รวมทั้งยังสำคัญต่อผลลัพธ์ในการจำลองการขึ้นรูป ซึ่งคุณสมบัติทางกลช่วงการเสียรูปแบบถาวรหรือช่วงพลาสติกประกอบไปด้วยค่า K , n และ r ทั้ง 3 แนวแกน โดยค่า K และ n เป็นคุณสมบัติที่บอถึงความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ ส่วนค่าของ r_0 , r_{45} และ r_{90} เป็นการทดสอบความเป็นไอโซโทรปิก (Isotropy) ของโลหะแผ่น นั่นคือการบ่งบอกการไหลของโลหะในการขึ้นรูปมีความเท่ากันทุกทิศทาง

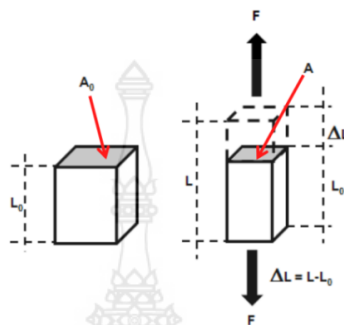
2.3.2.1 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress and Engineering Strain)

ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวจะเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Relationship) ดังแสดงในภาพที่ 2-18 นั่นคือข้อมูลของแรง (ความเค้น) ที่ทำการดึงชิ้นงานทดสอบให้ยืดออก (ความเครียด) จนเกิดการเสียรูปแบบถาวร



ภาพที่ 2-18 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด

จากภาพที่ 2-18 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปแบบของความเค้นและความเครียด ต่อมาทำการคำนวณหาความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-19 และหาความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมได้จากสมการที่ (7) และ (8)



ภาพที่ 2-19 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุจากการรับแรงดึง

$$s = \frac{F}{A_0} \quad (7)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (8)$$

โดยที่ s คือ ความเค้นทางวิศวกรรม

F คือ แรงดึง

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

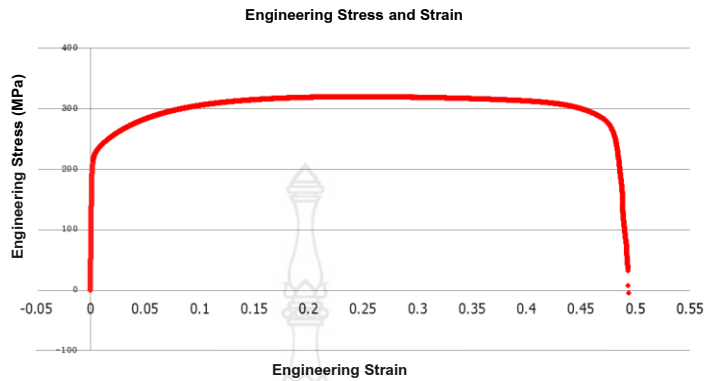
ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

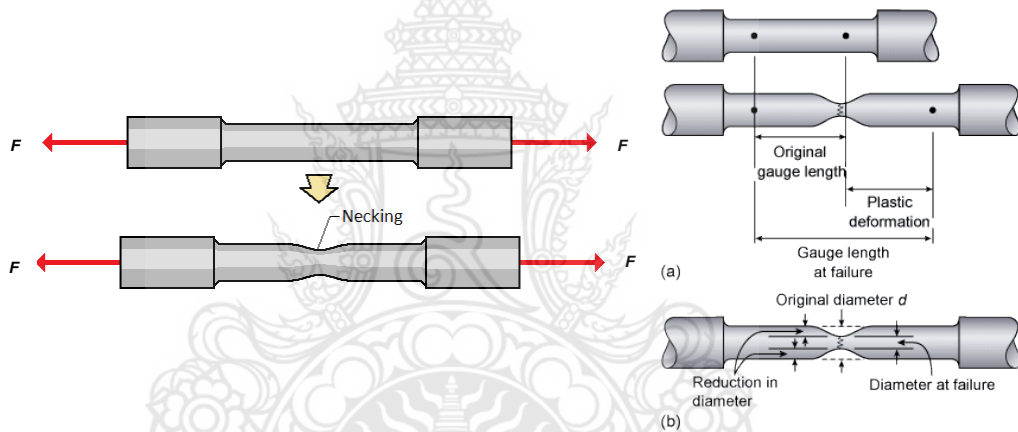
L คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน

ภาพที่ 2-20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการคำนวณเพื่อนำมาหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) นั่นคือจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม ซึ่งเมื่อความเครียดเลยจุดนี้ไปแล้วจะเกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเฉพาะบริเวณอย่างรวดเร็ว หรือเรียกว่าการเกิดคอดตัว (Necking) ดังแสดงในภาพที่ 2-21 ความเค้นในช่วงนี้จะเริ่มลดลงในขณะที่ความเครียดยังคงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแตกหัก จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมถูกคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งแตกต่างจากความเป็นจริงที่พื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเริ่มต้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทุกขณะในการทดสอบ ทำให้ความเค้นที่ได้ต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ทำให้ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปที่แท้จริงของ

วัสดุได้ ดังนั้นจำเป็นต้องหาค่าความเค้นและความเครียดจริง (True Stress and Strain) ของวัสดุที่เกิดขึ้นจริงจากการทดสอบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 2-20 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม



ภาพที่ 2-21 ลักษณะการคอดตัวของชิ้นงานทดสอบ

2.3.2.2 ความเค้นและความเครียดจริง

ความเค้นและความเครียดจริงเป็นการคำนวณโดยใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจริงตลอดเวลาในแต่ละขณะของการทดสอบ ซึ่งแตกต่างจากความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่ใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ โดยความเค้นและความเครียดจริงสามารถหาได้จากสมการที่ (9) และ (10)

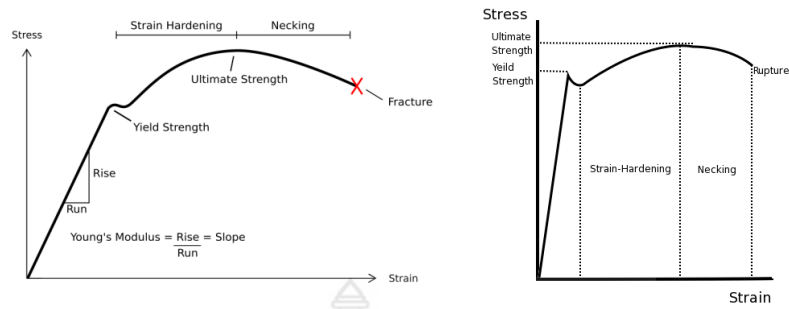
$$\sigma = s(1 + e) \tag{9}$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \tag{10}$$

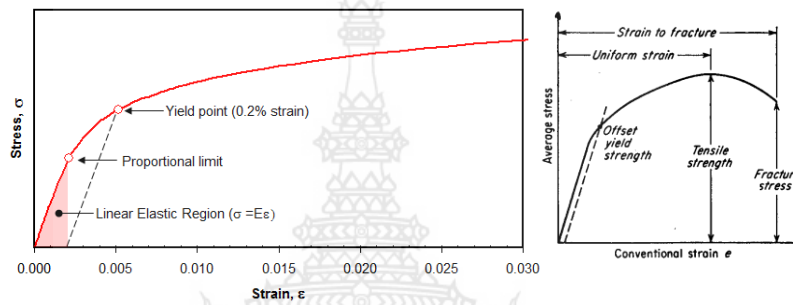
- โดยที่ σ คือ ความเค้นจริง
- s คือ ความเค้นทางวิศวกรรม
- ϵ คือ ความเครียดจริง
- e คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและความเครียดจริงสามารถแบ่งช่วงการเสียรูปได้เป็น 2 ช่วง โดยเริ่มจากหาจุดเค้นคราก (Yield Point) ซึ่งเป็นจุดที่บ่งบอกถึงจุดเริ่มต้นของการเสียรูปแบบถาวร โดยจุดเค้นครากนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อวิศวกรรมด้านโครงสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย โดยจุดเค้นครากมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ จุดเค้นครากที่สังเกตจุดได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2-22 โดยส่วนใหญ่จะพบในโลหะที่มีโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ (Body Center Cubic; BCC) เช่น เหล็กกล้าหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นต้น และจุดเค้นครากแบบไม่ปรากฏจุดที่แท้จริงอย่างชัดเจน เนื่องจากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงค่อนข้างมีความต่อเนื่อง ดังแสดงภาพที่ 2-23 ซึ่งพบในอลูมิเนียม และเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการรีดปรับผิวด้วยลูกกลิ้ง (Skin Pass Rolling) และวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face Center Cubic; FCC) และวัสดุที่มีโครงสร้างผลึก BCC บางประเภท เช่น โลหะแผ่นเกรด SPCC เป็นต้น

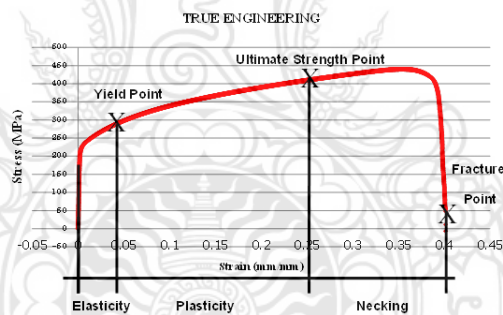
การหาจุดเค้นครากแบบไม่ปรากฏจุดที่แท้จริงอย่างชัดเจนสามารถหาได้จากการใช้วิธีการทดแทน (Offset Method) ซึ่งเป็นการหาจุดเค้นครากทดแทน (Offset Yield) โดยเริ่มจากลากเส้นตรงให้ขนานและใกล้เคียงกับกราฟเป็นเส้นตรง (Proportional Limit) ของเส้นโค้งความเค้นและความเครียด จากนั้นเลื่อนเส้นตรงที่ได้ลากไว้ก่อนหน้าขึ้นไปที่ระยะห่าง 0.2% ของความเครียดไปตัดกับกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดจริงโดยค่าความเค้นตรงจุดตัดกันเรียกว่าค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ที่ 0.2% จากวิธีการทั้งหมดนี้ทำให้ทราบจุดเค้นครากและสามารถแบ่งช่วงคุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติกหรือการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุได้ โดยช่วงการการเสียรูปแบบนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่จุดเค้นครากที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดจริงไปจนถึงจุดความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม หรือเรียกช่วงการเสียรูปนี้ว่าการเสียรูปแบบสม่ำเสมอ (Uniform Plastic Deformation) ส่วนหลังจากจุดความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุจะเกิดการคอดตัว หรือเรียกว่าการเสียรูปแบบไม่สม่ำเสมอ (Un-uniform Plastic Deformation) และช่วงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดเค้นครากเป็นคุณสมบัติทางกลช่วงอีลาสติกของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 2-24 โดยคุณสมบัติทางกลช่วงการเสียรูปแบบสม่ำเสมอของวัสดุเป็นความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดจริงที่ใช้ในการหาค่าของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 2-22 กราฟความสัมพันธ์ที่บ่งบอกจุดเค้นครากอย่างชัดเจน



ภาพที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ที่ไม่ปรากฏจุดเค้นคราก



ภาพที่ 2-24 การแบ่งช่วงการเสียรูปของวัสดุ

2.3.2.3 ช่วงการเสียรูปถาวรแบบสม่ำเสมอ (Uniform Plastic Deformation)

การเสียรูปในช่วงนี้เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการหาค่าของ K และ n ได้จากการทดสอบความเข้ากัน (Correlation) กับกฎยกกำลังดังสมการที่ (11) และค่า r หาทั้งหมด 3 แนวแกน คือ 0°, 45° และ 90° กับทิศทางของแนวแกนรีด ดังแสดงในภาพที่ 2-25 และสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (12)

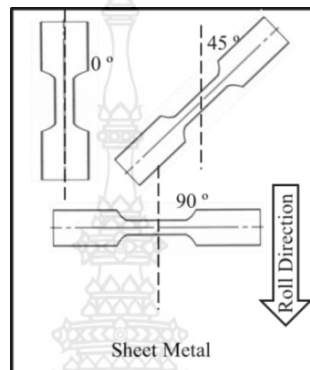
$$\sigma = K \epsilon^n \tag{11}$$

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t \tag{12}$$

โดยที่ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

- r คือ อัตราส่วนของความเครียดในช่วงพลาสติก
- σ คือ ค่าความเค้นจริง
- ε คือ ค่าความเครียดจริง
- ε_w คือ ค่าความเครียดจริงในแนวความกว้าง
- ε_t คือ ค่าความเครียดจริงในแนวความหนา



ภาพที่ 2-25 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความเป็นไอโซโทรปิกของวัสดุ

การหาค่าคุณสมบัติทางกลตามมาตรฐานต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าความเค้นครากต้องใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อวัสดุหนึ่งชนิด ในการหาค่าเฉลี่ยของค่าความเค้นครากตามมาตรฐาน ASTM E8M-93 สำหรับการหาค่า K และ n จำเป็นต้องใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อวัสดุหนึ่งชนิด สำหรับการหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 ตัวแปรตามมาตรฐาน ASTM E646-91 และในการหาค่า r_0 , r_{45} และ r_{90} จำเป็นต้องใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 15 ชิ้นต่อวัสดุหนึ่งชนิด เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าทั้ง 3 ตัวแปรตามมาตรฐาน ASTM E 517-92a เป็นต้น

2.4 ทฤษฎีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Distribution) [14]

การแจกแจงความน่าจะเป็น หมายถึง การแสดงความน่าจะเป็นของค่าที่เป็นไปได้ทุกค่าของตัวแปรสุ่มในรูปแบบตาราง รูป กราฟ และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ โดยการแจกแจงความน่าจะเป็นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง และการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการแจกแจงที่นิยมและถูกใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด และการแจกแจงนี้เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มต่อเนื่องที่รู้จักกันดี

การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ หรือการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) น่าจะเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นที่สำคัญที่สุด เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ในธรรมชาติมีการแจกแจงปกติหรือใกล้เคียงปกติ และทฤษฎีต่าง ๆ ในทางสถิติมักตั้งอยู่บนพื้นฐานการแจกแจงนี้ โดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม X บนการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ

ปกติ ดังแสดงในสมการที่ (13) ส่วนภาพที่ 2-26 แสดงกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม X โดยคุณสมบัติของการแจกแจงปกติมีดังนี้

2.4.1 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นมีรูปแบบโค้งเป็นรูปประฆังคว่ำ (Bell Shape)

2.4.2 เส้นโค้งมีลักษณะความเป็นสมมาตร (Symmetric) โดยมีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็นจุดแบ่งครึ่งเส้นโค้ง

2.4.3 ค่าเฉลี่ย ฐานนิยม (Mode) และมีมัธยฐาน (Median) มีค่าเท่ากัน

2.4.4 ระยะ 1 เท่า 2 เท่า และ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) จะได้พื้นที่ใต้โค้งที่ถูกปิดกั้นด้วยเส้นตั้งฉากเท่ากับ 68%, 95.45%, และ 99.73% ของพื้นที่ทั้งหมดตามลำดับ

2.4.5 พื้นที่ใต้โค้งปกติทั้งหมดเท่ากับ 1

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (13)$$

$$\text{โดยที่ } E(X) = \mu$$

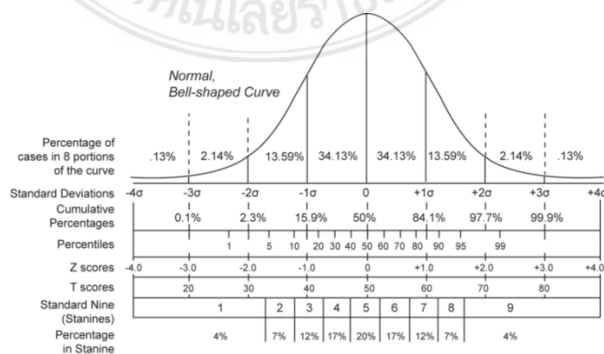
$$\text{Var}(X) = \sigma^2$$

$$\pi = 3.1414159$$

$$e = 2.71828$$

การหาความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ เริ่มจากทำการแปลงตัวแปรสุ่ม X แทนที่ด้วยตัวแปรสุ่ม Z ซึ่งมีการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ด้วยค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ย μ และความแปรปรวน σ^2 จากนั้นทำการเปิดตารางความน่าจะเป็นสะสมผ่านกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน หรือคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$P(X \leq x) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right) = P(Z \leq z) \quad (14)$$



ภาพที่ 2-26 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน

การสุ่มเลข (Random Number) คือ ค่าของตัวแปรสุ่มบนการแจกแจงความน่าจะเป็น หรือ การสร้างค่าที่ไม่แน่นอนโดยใช้หลักการทางสถิติหรือในรูปแบบความน่าจะเป็น ซึ่งความน่าจะเป็น ได้มาจากการทดลองและข้อมูลในอดีต ซึ่งการสุ่มเลขจะประกอบไปด้วยสมบัติเชิงสถิติ 2 ประการ คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นเอกรูป $U(0,1)$ และความเป็นอิสระต่อกันในเชิงสถิติ โดยการแจกแจง ความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการแจกแจงที่นิยมและถูกใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการสุ่มเลข บนการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการจำลองตัวแปรสุ่ม X ที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติดังสมการที่ (13) ด้วยพารามิเตอร์การกระจายตัว μ และ σ^2 และถูกเขียนแทนด้วย สัญลักษณ์ $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ถ้าตัวแปรสุ่ม X มีฟังก์ชันความหนาแน่นสามารถพิสูจน์ได้ว่า [15]

สำหรับ $X \sim N(\mu, \sigma^2)$

$$E(X) = \mu$$

$$Var(X) = \sigma^2$$

$$\gamma_1 = 0$$

$$\gamma_2 = 3$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร

σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของประชากร

γ_1 คือ สัมประสิทธิ์ความเบ้ (Coefficient of Skewness)

γ_2 คือ สัมประสิทธิ์ความหรือสัมประสิทธิ์ภาวะยอดมน (Coefficient of Kurtosis)

2.5 การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) [16]

การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) เป็นวิธีการทางสถิติสำหรับหาตัวแบบ ที่เหมาะสมและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยที่ต้องกำหนดหรือทราบค่าของตัวแปรหนึ่งไว้ล่วงหน้า เรียกตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าไว้ล่วงหน้าว่า ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) หรือตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controlled Variable) หรือตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) ใช้สัญลักษณ์ X และเรียกตัวแปรที่ต้องการประมาณหรือ พยากรณ์ว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หรือตัวแปรกระทบ (Effect Variable) หรือตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ใช้สัญลักษณ์ Y เช่น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งและอุณหภูมิในการดำเนินการ การวิเคราะห์ความถดถอยสามารถใช้ เพื่อสร้างตัวแบบเพื่อทำนายผลผลิตที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตัวแบบนี้เพื่อหาระดับอุณหภูมิที่ทำให้ผล ผลิตมากที่สุดเรียนอุณหภูมิในการดำเนินการว่าตัวแปรอิสระ และเรียกผลผลิตของผลิตภัณฑ์ว่าตัวแปรตาม

2.5.1 ตัวแบบเส้นถดถอยของประชากร

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

โดยที่ x_i คือ ตัวแปรอิสระ

Y_i คือ ตัวแปรตาม

β_0 คือ ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุดตัดบนแกน Y (Y - Intercept) หรือ ค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์

β_1 คือ ความชัน (Slope) ของเส้นตรง เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย เรียกว่า β_1 สัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression Coefficient) โดยที่ค่าของ β_1 อาจมีค่าเป็นบวก ลบ หรือ ศูนย์

2.5.2 ความหมายของค่า β_1

2.5.2.1 $\beta_1 > 0$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า X ลดลง Y ก็จะลดลงด้วย

2.5.2.2 $\beta_1 < 0$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะลดลง แต่ถ้า X ลดลง Y ก็จะเพิ่มขึ้น

2.5.2.3 β_1 มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

2.5.2.4 β_1 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก

2.5.2.5 β_1 มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันปานกลาง

2.5.2.6 $\beta_1 = 0$ หมายถึง X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

2.5.3 ความแม่นยำของการพยากรณ์ (Accuracy)

ความแม่นยำของการพยากรณ์ในแต่ละวิธีจะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการพยากรณ์ จึงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าความแม่นยำที่ต้องการการเปรียบเทียบว่า วิธีการพยากรณ์แบบใดจะให้ค่าความแม่นยำสูงกว่ากัน โดยใช้เลขดัชนีเป็นตัววัด ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

2.5.3.1 ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation; MAD) คือ ค่าดัชนีจะหาได้จากสูตรดังนี้

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - F_i|}{n} \quad (16)$$

2.5.3.2 ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Sum of Square Error; MSE) คือ ค่าดัชนีจะหาได้จากสูตรดังนี้

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - F_i)^2}{n} \quad (17)$$

2.5.3.3 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน (Mean absolute percent error, MAPE) คือ ค่าดัชนีจะหาได้จากสูตรดังนี้

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - F_i}{X_i} \right| \times 100 \quad (18)$$

โดยที่	<i>MAD</i>	คือ	ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย
	<i>MSE</i>	คือ	ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย
	<i>MAPE</i>	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน
	X_i	คือ	ค่าสังเกตที่เวลา i
	F_i	คือ	ค่าพยากรณ์ที่เวลา i
	n	คือ	จำนวนข้อมูล

โดยปกติแล้วจะนิยมใช้วิธี *MSE* มากกว่า *MSD* เพราะให้ค่าความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่า การเลือกวิธีการพยากรณ์ใด ๆ จะดูจากดัชนีที่ให้ค่าต่ำสุดจากการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการพยากรณ์ต่าง ๆ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 10 งานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติทางกลของวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่น และการจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดต่างๆ ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

Radi [17] ศึกษาวิธีการ Adaptive Surface Method ในการหาความน่าเชื่อถือของเกณฑ์การผิดพลาด ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการรวมวิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับวิธีการความน่าเชื่อถือลำดับที่หนึ่ง โดยไม่แน่นอนคุณสมบัติทางกลที่ประกอบด้วยค่าความเค้นจุดเค้นครากและค่าโมดูลัสยังและค่าแรงจับยึด สุดท้ายใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โลเพื่อยืนยันผลของวิธีการ Adaptive Surface Method

Jansson [18] ทำการวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของความหนาที่สูญเสียไปในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้ความไม่แน่นอนคุณสมบัติทางกลที่ประกอบด้วยค่าความเค้นจุดเค้นครากและค่า R อีกทั้งยังใช้ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตย์ทั้ง 3 ผิวสัมผัส ผ่านการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นด้วยการจำลองแบบมอนติคาร์โลเพื่อยืนยันผลการทดลอง

Kim, et al. [19] ศึกษาผลกระทบของความเบี่ยงเบนคุณสมบัติในช่วงพลาสติกโลหะแผ่นของค่า n และ R ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic) ด้วยการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานท่อด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการใช้วิธีความน่าเชื่อถืออันดับหนึ่ง (First Order

Reliability Method; FORM) ในการประเมินผลกระทบต่อเส้นโค้งการขึ้นรูปจำกัด (Forming Limit Curve; FLC) และใช้วิธีการแบบจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ในการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมิน

Ryoichi [20] ทำการวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของเส้นโค้งการขึ้นรูปจำกัดโดยใช้ความไม่แน่นอนคุณสมบัติทางกลที่ประกอบด้วยค่า K ทั้ง 3 แนวแกน และค่า n ซึ่งค่าความเชื่อมั่นของความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งแบบ Stress Base และ Strain Base ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FORM และแบบจำลองของ Marciniak-Kuczynski (M-K Model)

Wong and Wagoner [21] อิทธิพลของรูปทรงมุมของแม่พิมพ์ต่อความลึกในการลากขึ้นรูปลึกของชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมผ่านการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของโลหะแผ่น จากการวิจัยพบว่าการเลือกรัศมีของมุมมีผลต่อความลึกในการลากขึ้นรูปลึกสูงสุด และยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่น ๆ ในกระบวนการอีก เช่น แรงที่ใช้หน่วงของดรอปิด ระยะห่างช่องว่างของแม่พิมพ์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราความไวของความเครียด (Strain Rate Sensitivity: m) ค่า r และค่า n สุดท้ายผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดผลเสียได้มากกว่าตำรา

Wang et al. [22] ศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยยับย่นบริเวณพื้นผิวเพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบอิทธิพลของรูปร่างในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากการทำนายการเกิดรอยยับย่นในอุตสาหกรรมมีความสำคัญมาก โดยรอยยับย่นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย ผู้วิจัยจึงใช้วิธีเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ (Backpropagation) เพื่อมาทำการวิเคราะห์และทำนายโอกาสที่จะเกิดรอยยับย่นบริเวณพื้นผิว จากการทดลองพบว่าเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายโอกาสได้ค่อนข้างแม่นยำ

Zhao and Wang [23] ใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า พร้อมกับใช้ฟังก์ชันการฝึกสอนแบบ LM (Levenberg and Marquardt) ในการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการลากขึ้นรูปลึกของในงานวิจัยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดสอบจริง สุดท้ายนำผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับมาเปรียบเทียบกับเทคนิคใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นจากการรวมกันของเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Evolutionary Neural Network: GA-ENN) จากการวิจัยพบว่าการทำนายผลการทดลองมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

Padmanabhan et al. [24] ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นขึ้นงานด้วยสแตนเลส ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยที่สำคัญ คือ รัศมีของแม่พิมพ์ แรงกดยึดโลหะแผ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในการทดลองใช้การจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ (Taguchi Technique) ในการพยากรณ์อิทธิพล

ของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการ โดยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิถูกนำไปใช้ในการระบุหาความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการ จากการวิจัยพบว่ารัศมีแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปมากที่สุด รองลงมาคือแรงกดยึดโลหะแผ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลน้อยสุด ตามลำดับ

Verlinder et al. [25] ทำการประเมินต้นทุนในการผลิตชิ้นงานโลหะแผ่นด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุนาม (Multiple Regression Analysis; MRA) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลจาก CAD ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยพหุนามและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม สุดท้ายนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย 2 วิธีมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประเมินต้นทุน จากการเปรียบเทียบพบว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพในการประเมินที่ดีกว่า

Singh and Gupta [26] นำเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine; SVM) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองเป็นฐานข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบเพื่อทำนายความหนาของชิ้นงานรูปถ้วยหลังจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกด้วยน้ำ จากการวิจัยพบว่าการทำนายด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีความแม่นยำสูงกว่าการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนของบทถัดไปผู้วิจัยจะอธิบายการนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้ศึกษามาในบทนี้ นำไปประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้



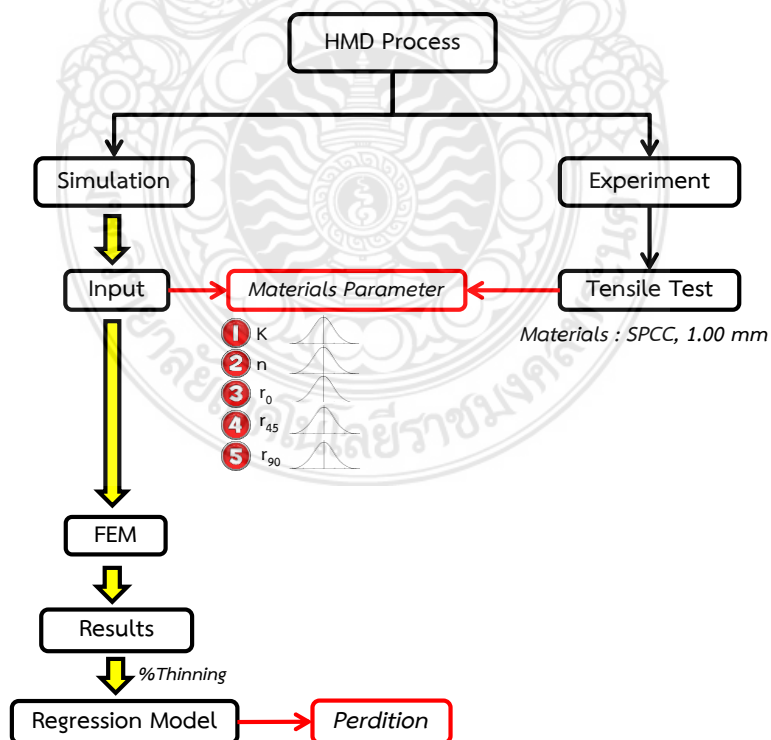
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนั่นก็คือ การสร้างสมการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิก หลังจากการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} โดยใช้โลหะแผ่นเกรด SPCC และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสมการที่สร้างขึ้นกับผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งรายละเอียดในบทนี้ประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

- 3.1 แนวความคิดงานวิจัย
- 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 แนวความคิดงานวิจัย

ผู้วิจัยได้สร้างแนวความคิดสำหรับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แนวความคิดงานวิจัย

จากภาพที่ 3-1 แสดงแนวทางในการทำวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิคในการจำลองการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนความไม่แน่นอนของคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นเกรด SPCC ความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งโลหะแผ่นเกรดดังกล่าวนี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.2%) แบบรีดเย็นตามมาตรฐาน JIS G 3141 ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรงต่ำ ทำให้เหมาะสมสำหรับงานขึ้นรูปทั่วไป และมีผิวเรียบและละเอียดส่งผลให้ชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปจึงมีความสวยงาม อีกทั้งมีราคาถูกอีกด้วย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานคร่าว ๆ ดังนี้คือ ทำการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หลาย ๆ ครั้ง จากการสุ่มค่า K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ตามลักษณะการกระจายตัวอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติโลหะแผ่นหลาย ๆ ค่า สุดท้ายนำผลลัพธ์ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอย เพื่อสร้างสมการสำหรับการพยากรณ์ค่าสูญเสียความหนาของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปด้วยตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} โดยไม่ต้องผ่านการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่งผลให้ลดเวลาในการจำลองการขึ้นรูป

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การจำลองการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบชัดโดยการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก

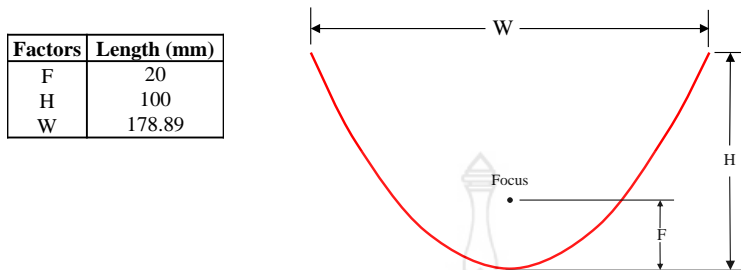
3.2.1 กระบวนการขั้นต้น

การเตรียมข้อมูลก่อนกระบวนการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การสร้างแบบจำลอง การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การกำหนดภาระแรงกระทำและจุดจับยึด และการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

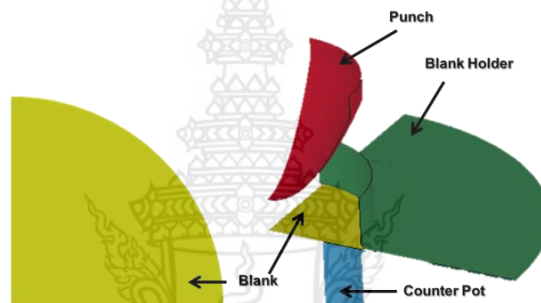
3.2.1.1 การสร้างแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างรูปแบบจำลองเอลิเมนต์ประเภทระนาบพื้นผิว (Surface) เพื่อจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิคที่มีลักษณะและขนาดดังแสดงในภาพที่ 3-2 โดยกระบวนการที่ทำการจำลองคือ กระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำที่มีองค์ประกอบไปด้วย ฟันซ์ ดาย แผ่นจับยึดชิ้นงาน เคาน์เตอร์พอท และโลหะแผ่นความหนา 1 มิลลิเมตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ในลักษณะ 1/4 เนื่องจากมีความสมมาตรรอบแนวแกน ทั้งนี้เพื่อลดเวลาในการจำลองลง ดังแสดงในภาพที่ 3-3 [27]

3.2.1.2 คุณสมบัติของโลหะแผ่นจากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM E8 ด้วยชิ้นงานทดสอบที่มาจากการทำมุม 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา กับแนวแกนรีดจำนวนแนวแกนรีดละ 30 ชิ้น รวมทั้งสิ้นทั้งหมด 90 ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะผ่านการพล็อตลงในกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการคำนวณ

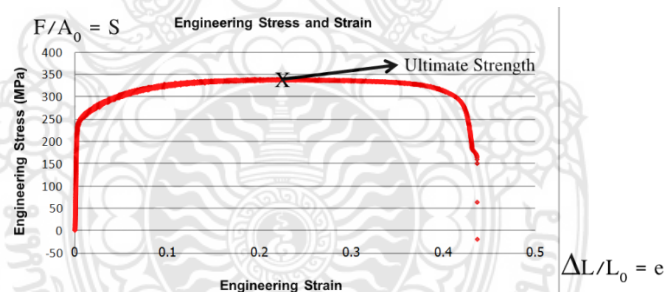
ด้วยสมการที่ (7) และ (8) ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3-1 จากกราฟความสัมพันธ์นี้ทำให้ทราบค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength หรือ Tensile Strength) ดังแสดงภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-2 ขนาดชิ้นงานพาราโบลิกในงานวิจัยนี้ [27]



ภาพที่ 3-3 แบบจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ



ภาพที่ 3-4 การหาค่าความแข็งแรงสูงสุด

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (7) และ (8) จะเห็นว่าค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบเป็นค่าเดียวที่ถูกใช้ในการคำนวณตลอดการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในการทดสอบ ทำให้ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปที่แท้จริงของโลหะแผ่นได้ ดังนั้นจึงต้องคำนวณโดยใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเกจที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะของการเสียรูปในการทดสอบไปคำนวณ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (10) ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3-2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์เป็นความเค้นและความเครียดจริงเพื่อทำการหาจุดเค้นครากทดแทนด้วยวิธีการแบบกำหนดระยะห่าง 0.2% (หรือเรียกว่าค่าความเค้นพิสูจน์ที่ 0.2%) ของความเครียด ในกรณีที่กราฟความสัมพันธ์ไม่แสดงจุดเค้นครากอย่างชัดเจน (จุดเค้นครากจริง)

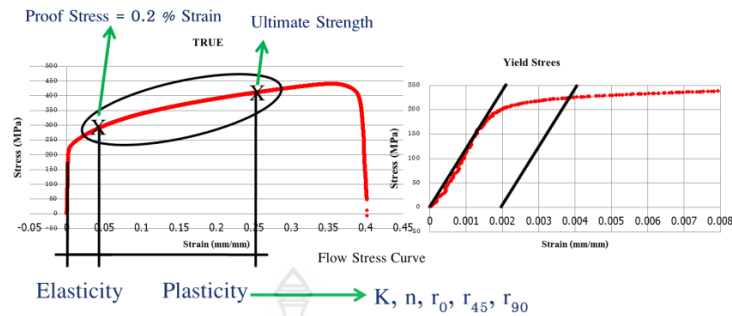
สุดท้ายนำค่าจุดเค้นครากและจุดค่าความแข็งแรงสูงสุดมาทำการแบ่งช่วง ทำให้ทราบถึงช่วงการเสียรูปอย่างถาวรของวัสดุที่แสดงในภาพที่ 3-5

ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างข้อมูลความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการคำนวณ

Engineering Stress; s (MPa)	Engineering Strain; e (%)
0	0
0.102997284	1.33447E-06
4.796743974	0.000116225
6.197452899	0.00013254
10.31243856	0.00017713
15.17761099	0.000215459
20.45571477	0.000251244
25.34067388	0.000278525
30.22039231	0.000304425
:	:
29.53660206	0.423628763

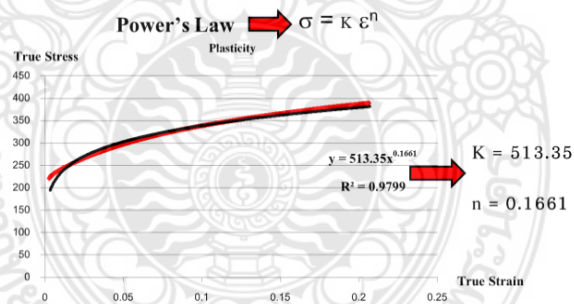
ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงจากการคำนวณ

Engineering Stress; s	True Stress; σ	Engineering Strain; e	True Strain; ϵ
0	0	0	0
0.102997284	0.102997421	1.33447E-06	1.33447E-06
4.796743974	4.797301475	0.000116225	0.000116218
10.31243856	10.31426521	0.00017713	0.000177114
15.17761099	15.18088114	0.000215459	0.000215436
20.45571477	20.46085415	0.000251244	0.000251213
25.34067388	25.34773188	0.000278525	0.000278486
30.22039231	30.22959215	0.000304425	0.000304379
:	:	:	:
29.53660206	42.04915625	0.423628763	0.353209079

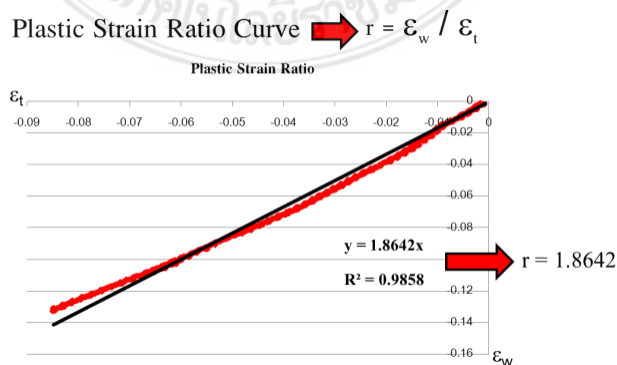


ภาพที่ 3-5 คุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติกของวัสดุ

พฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรของโลหะแผ่นเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นทำการหาค่า K และ n จากการทดสอบกับกฎยกกำลังดังแสดงในสมการที่ (11) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3-6 ส่วนค่า r ของทั้ง 3 แนวแกน (0 องศา 45 องศา และ 90 องศา) กับทิศทางของแนวแกนรีด) สามารถหาได้จากการทดสอบการเข้ากันกับสมการที่ (12) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3-7 ในการหาค่า K, n และ r จากชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 90 ชิ้น จะได้ค่า $K_0, K_{45}, K_{90}, n_0, n_{45}, n_{90}, r_0, r_{45}$ และ r_{90} อย่างละ 30 ค่า แต่สำหรับวัสดุประเภท 36 หรือพารามิเตอร์ของ Barlat-Lian ไม่ต้องการค่า K_{45}, K_{90}, n_{45} และ n_{90} , ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการในการจำลองการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ใช้เพียง 5 ตัวแปร คือ K, n, r_0, r_{45} และ r_{90} ดังแสดงในตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างการทดสอบความเข้ากันกับกฎยกกำลัง



ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างการหาค่าของตัวแปร r

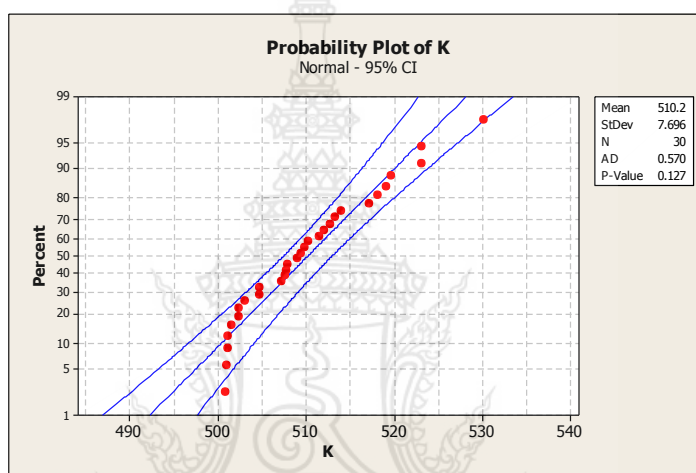
ตารางที่ 3-3 ค่าของตัวแปร K, n, r_0 , r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียว

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}
1	506.07	0.166	1.755	1.253	2.076
2	528.53	0.165	1.899	1.221	2.086
3	500.06	0.164	1.855	1.236	2.084
4	517.91	0.166	1.858	1.219	2.232
5	507.41	0.154	1.895	1.309	2.243
6	506.73	0.161	1.794	1.242	2.080
7	502.33	0.174	1.818	1.259	1.995
8	511.76	0.160	1.899	1.302	2.025
9	506.28	0.152	1.852	1.235	2.193
10	499.96	0.161	1.791	1.194	2.128
11	507.72	0.165	1.848	1.201	2.010
12	505.98	0.151	1.854	1.175	2.143
13	511.03	0.154	1.838	1.209	2.091
14	513.24	0.155	1.899	1.241	2.118
15	514.19	0.161	1.846	1.186	2.129
16	509.93	0.152	1.758	1.220	2.015
17	499.12	0.157	1.925	1.242	2.189
18	510.68	0.159	2.027	1.259	2.179
19	496.85	0.157	1.832	1.208	2.088
20	514.40	0.159	1.844	1.263	2.196
21	508.95	0.162	1.805	1.272	2.185
22	507.10	0.148	1.852	1.338	2.204
23	508.93	0.155	1.754	1.218	2.278
24	505.56	0.148	1.792	1.212	2.231
25	517.55	0.160	1.872	1.274	2.114
26	507.93	0.154	1.830	1.159	2.046
27	514.25	0.164	1.812	1.210	2.160
28	532.79	0.156	1.834	1.273	2.104
29	510.60	0.155	1.925	1.352	2.289
30	522.30	0.157	1.831	1.239	2.269
Mean	510.20	0.158	1.85	1.24	2.14

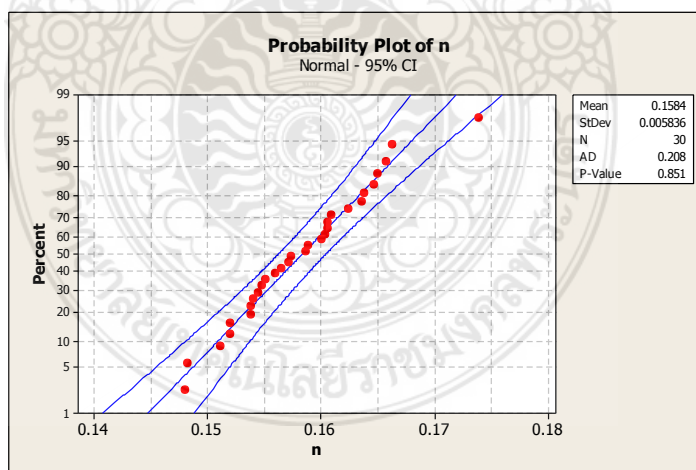
หลังจากทำการคำนวณหาค่าของทั้ง 5 ตัวแปรแล้ว ผู้วิจัยทำการทดสอบลักษณะการกระจายตัวของแต่ละตัวแปร โดยทั้ง 5 ตัวแปร พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปกติ (ใช้หลักการทดสอบของ Anderson Darling) ซึ่งพิจารณาจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 และผลการทดสอบการกระจายตัวทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3-4 และภาพที่ 3-8 ถึง 3-12

ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบลักษณะการกระจายตัวแบบปกติของ 5 ตัวแปร

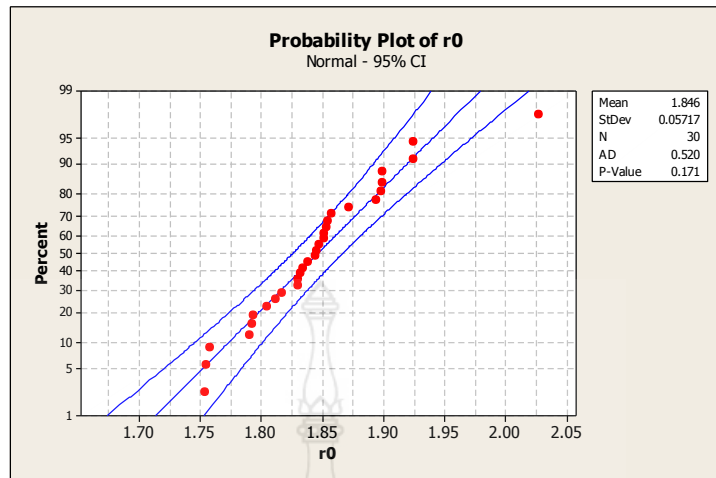
Parameter	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}
P-Value	0.127	0.851	0.171	0.307	0.650



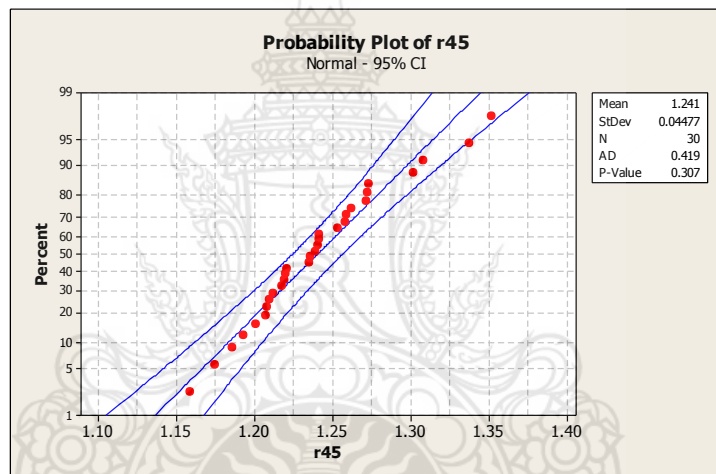
ภาพที่ 3-8 การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า K ด้วยหลักการ Anderson Darling



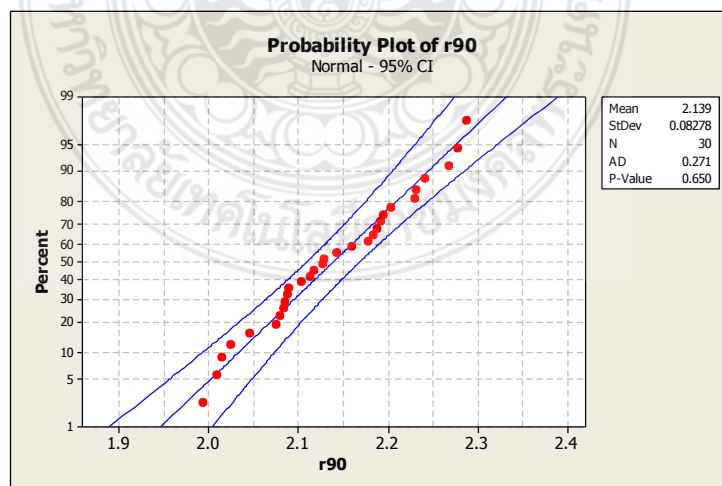
ภาพที่ 3-9 การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า n ด้วยหลักการ Anderson Darling



ภาพที่ 3-10 การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_0 ด้วยหลักการ Anderson Darling



ภาพที่ 3-11 การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_{45} ด้วยหลักการ Anderson Darling



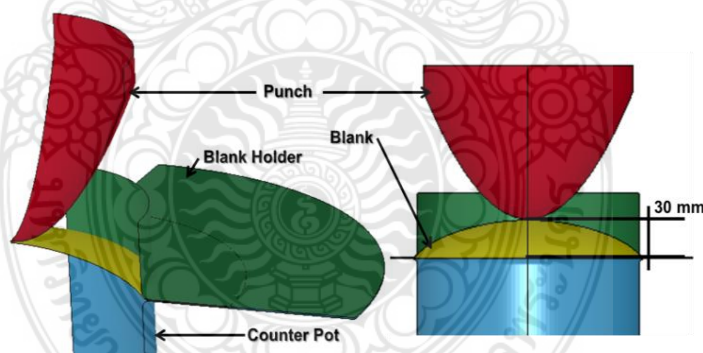
ภาพที่ 3-12 การทดสอบลักษณะการกระจายตัวของค่า r_{90} ด้วยหลักการ Anderson Darling

3.2.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการกำหนดพารามิเตอร์ในการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วยค่าแรงดันของน้ำและแรงจับยึดชิ้นงาน โดยกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำมีลักษณะการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ [28]

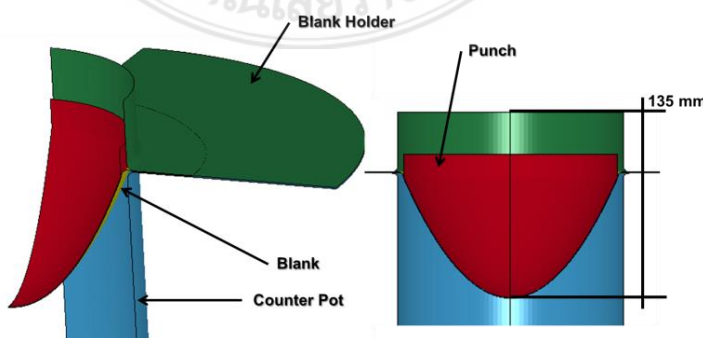
ก) ขั้นตอนการเป่าโป่ง (Pre-Bulge) คือ กระบวนการก่อนการขึ้นรูป ซึ่งเป็นการใช้แรงดันทำให้โลหะแผ่นเกิดการเสียรูปเบื้องต้นในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการขึ้นรูป (ช่วง Stroke ตั้งแต่ 0- 30 มิลลิเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 3-13 ซึ่งในขั้นตอนนี้มีการกำหนดแรงจับมีค่าเท่ากับ 26 ตัน (Ton) ส่วนแรงดันมีค่าเท่ากับ 6 เมกะปาสคาล (Megapascal; MPa)

ข) ขั้นตอนในการขึ้นรูป (Forming) คือ ขั้นตอนที่พินช์เคลื่อนที่ลงมาทำการขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นระยะทาง 105 มิลลิเมตร (Stroke ตั้งแต่ 30-135) ดังแสดงในภาพที่ 3-14 และมีการกำหนดแรงจับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จาก 26 ตัน ในช่วงเป่าโป่งไปจนถึง 56 ตัน ในช่วงการขึ้นรูป โดยค่าแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 6 MPa และเพิ่มไปจนถึง 50 MPa ในขั้นตอนการขึ้นรูป

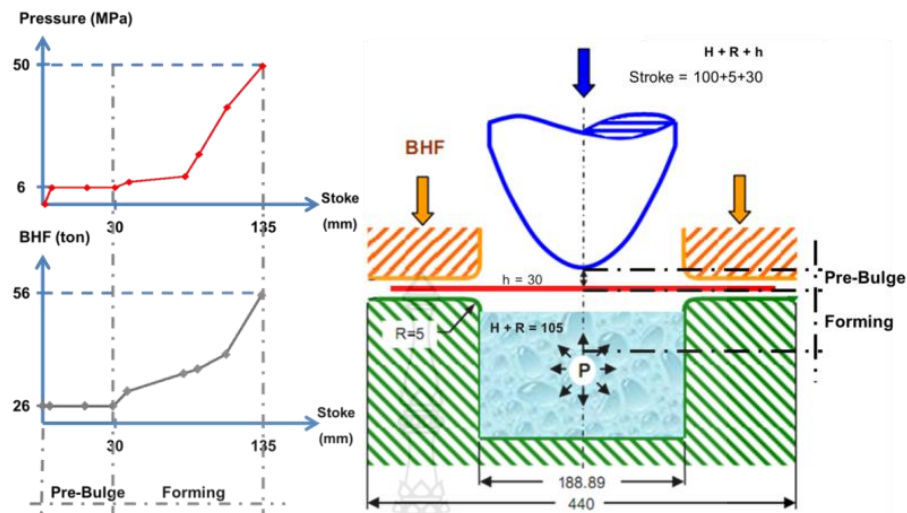
โดยการกำหนดค่าแรงดันของน้ำและแรงจับยึดชิ้นงานในรูปแบบของกราฟถูกแสดงในภาพที่ 3-15 และในรูปแบบของขั้นตอนเวลาได้ดังตารางที่ 3-5 สุดท้ายความเร็วในการเคลื่อนที่ของพินช์มีค่าเท่ากับ 7,000 มิลลิเมตรต่อวินาทีดังตารางที่ 3-6 โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของพินช์มีขนาดเกินความเป็นจริงเสมอ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจน [28]



ภาพที่ 3-13 ขั้นตอนการเป่าโป่งของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ [28]



ภาพที่ 3-14 ขั้นตอนในการขึ้นรูปของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ [28]



ภาพที่ 3-15 ค่าแรงดันและแรงจับยึดในการจำลองการขึ้นรูป [28]

ตารางที่ 3-5 การกำหนดแรงจับยึดและแรงดันในรูปแบบของเวลา [28]

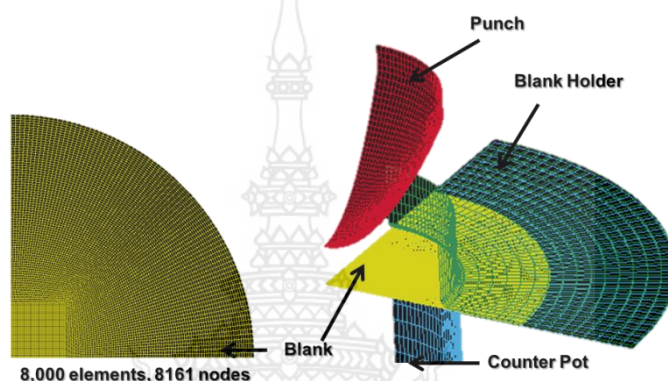
Time (s)	Pressure (MPa)	BHF (Ton)
0	0.00	0.00
0.006	6.00	26.00
0.01	6.00	26.00
0.012	8.00	30.00
0.02	10.00	34.80
0.022	18.00	36.00
0.026	35.00	40.00
0.031	50.00	56.00

ตารางที่ 3-6 การกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของพินซ์ [28]

Time (s)	Velocity (mm/s)
0.010000000	0
0.011753247	7,000
0.029285714	7,000
0.031038961	0

3.2.1.4 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้เมชมีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมทุกองค์ประกอบของกระบวนการลากขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำ โดยโลหะแผ่นประกอบด้วยเมชทั้งหมด 8,000 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดต่อทั้งหมด 8,161 จุด ซึ่งเอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบเชลล์ (Shell Element) ตามแบบของ Belytschko Tsay ส่วนพินซ์ เคาน์เตอร์พอท และแผ่นจับยึดชิ้นงาน กำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Material Model) สูดทำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตย์ (μ_s)

ซึ่งในกระบวนการนี้จะประกอบไปด้วย 3 พื้นผิวสัมผัส นั่นคือ บริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับพื้นที่ บริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับเคาน์เตอร์พ็อต และบริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับแผ่นจับยึดชิ้นงาน และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตยในการจำลองนี้เป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตยในบริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับพื้นที่มีค่าเท่ากับ 0.12 บริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับเคาน์เตอร์พ็อตและบริเวณพื้นที่สัมผัสของโลหะแผ่นกับแผ่นจับยึดชิ้นงานมีค่าเท่ากันคือ 0.06 ดังแสดงในภาพที่ 3-16 [27]



ภาพที่ 3-16 แบบจำลองการขึ้นรูปสำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยน้ำ

3.2.2 กระบวนการวิเคราะห์

เป็นขั้นตอนหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านการวิเคราะห์ผ่านระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม LS-Dyna เวอร์ชัน 5.6.1

3.2.3 กระบวนการขั้นสุดท้าย

เป็นขั้นตอนของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ โดยโปรแกรมจะทำการแสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ (เป็นตัวเลขจำนวนมาก) ในลักษณะของกราฟิกสีต่าง ๆ ตามขนาดของตัวเลข ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลิก โดยพิจารณาจากตำแหน่งบริเวณที่มีการสูญเสียค่าความหนามากที่สุด (Maximum Thinning) ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ (% Thinning) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (19)

$$\text{Thinning (\%)} = \frac{\text{Original Thickness} - \text{Thickness After Stretching}}{\text{Original Thickness}} \times 100 \quad (19)$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะทำการเสนอผลการดำเนินงานวิจัย โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์สร้างสมการถดถอย สำหรับการทำนายการสูญเสียความบางที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานพาราโบลิก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำนายกับการจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

- 4.1 การจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 4.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลด้วยสมการถดถอย

4.1 การจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่แท้จริงจำเป็นต้องการข้อมูลจำนวนที่มากพอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลทั้งหมด 90 ชิ้นงานทดสอบ (แนวแกนรีดละ 30 ชิ้นงานทดสอบ) เพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของคุณสมบัติทางกลที่เกิดจากความไม่แน่นอนของการผลิตในแต่ละครั้ง นำค่าตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ที่ได้จากการคำนวณจากผลการทดสอบแรงดึงแกนเดียว ตัวแปรละ 30 ค่า มาทำการทดสอบการกระจายตัวด้วยหลักการ Anderson Darling ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวแปร มีการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากพิจารณาค่า P-Value ในการทดสอบการกระจายตัวด้วยวิธีการ Anderson Darling มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นคุณสมบัติทางกลช่วงพลาสติกของโลหะแผ่นเกรด SPCC ทั้ง 5 ตัวแปร มีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปกติ โดยคุณสมบัติการกระจายตัวของข้อมูลและผลการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90}

Type	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}
Mean	510.20	0.158	1.85	1.24	2.14
SD	7.57	0.0057	0.056	0.044	0.081
P-Value	0.127	0.851	0.171	0.307	0.650

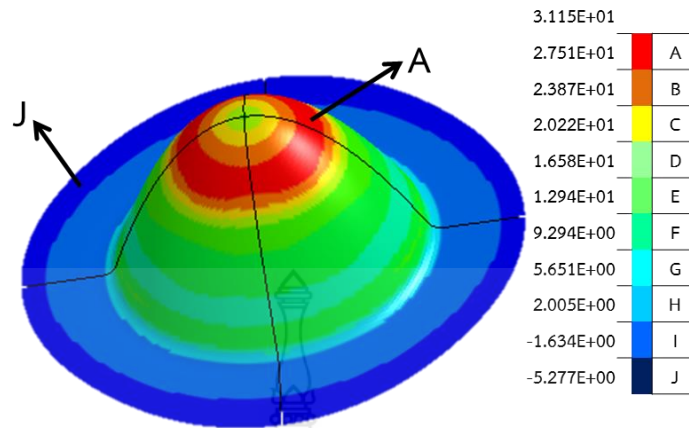
จากตารางที่ 4-1 พบว่าโลหะแผ่นเกรด SPCC ที่นำมาทดสอบมีความเป็นแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) นั่นคือการไหลของวัสดุขณะขึ้นรูปไม่เท่ากันในทุกทิศทาง เนื่องจากค่า r ของทั้ง 3 แนวแกน (r_0 , r_{45} และ r_{90}) ที่ได้จากการคำนวณมีค่าไม่เท่ากัน

ขั้นตอนการวิจัยต่อไปคือ การสุ่มค่าตามลักษณะการกระจายของแต่ละตัวแปร ซึ่งจากการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลของทั้ง 5 ตัวแปร เป็นการกระจายตัวแบบปกติที่มีตัวแปรสุ่ม X ดังสมการที่ (11) และมีพารามิเตอร์ของคุณสมบัติการกระจายเป็น μ และ σ^2 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลคุณสมบัติทางกลและลักษณะการกระจายตัวของโลหะแผ่นเกรด SPCC สำหรับการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4-2 โดยพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนในช่วง $\pm 3\sigma$ (6 Sigma) เนื่องจากเป็นการแปรผันโดยธรรมชาติของกระบวนการและนำไปสู่ความเชื่อมั่นที่ 99.73%

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลคุณสมบัติทางกลและลักษณะการกระจายตัวของโลหะแผ่นเกรด SPCC

Material :	AISI 1008 (JIS G 3141 SPCC)
Blank diameter :	320 mm
Blank thickness :	1.0 mm
Depth :	105 mm
Young's modulus :	207,000 MPa
Poisson's ratio :	0.28
Strength coefficient (K) :	$X \sim N(510.20, 22.70^2)$
Strain hardening component (n) :	$X \sim N(0.158, 0.0172^2)$
r_{00} :	$X \sim N(1.85, 0.1686^2)$
r_{45} :	$X \sim N(1.24, 0.1321^2)$
r_{90} :	$X \sim N(2.14, 0.2442^2)$

จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พิจารณาจากตำแหน่งที่มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความหนามากที่สุดของชิ้นงาน ดังแสดงตัวอย่างการจำลองในภาพที่ 4-1 จากตัวอย่างการจำลองการขึ้นรูปนี้ ใส่ค่า K เท่ากับ 520.2 MPa, n มีค่าเท่ากับ 0.1859, r_0 มีค่าเท่ากับ 1.95, r_{45} มีค่าเท่ากับ 1.21 และ r_{90} มีค่าเท่ากับ 2.33 จะได้มีค่าการสูญเสียความหนามากที่สุดเท่ากับ 31.15% ในบริเวณแนวยอดโดมของชิ้นงาน ซึ่งพิจารณาได้จากแถบสีที่แสดงบอกถึงระดับการสูญเสียความหนาที่เกิดขึ้นจากการจำลองการขึ้นรูป ตัวเลขที่มีค่าเป็นบวกหมายถึงการสูญเสียความหนาส่วนตัวเลขที่ติดลบบ่งบอกว่าเกิดการเพิ่มความหนาของโลหะแผ่น โดยในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการขึ้นรูปโดยใช้ค่าคุณสมบัติโลหะแผ่น (ทั้งหมด 5 ตัวแปร) ที่ได้จากการสุ่มค่าตามลักษณะการกระจายตัวตามคุณสมบัติการกระจายตัวดังแสดงในตารางที่ 4-2 และผลที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมด 60 กรณี ดังในตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4-3 ผลการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning
1	474.81	0.1362	1.841	1.251	1.845	38.03
2	494.83	0.1307	1.832	1.323	2.091	36.43
3	530.98	0.1896	1.793	1.128	2.547	30.90
4	551.55	0.1812	2.014	1.292	2.258	30.02
5	497.64	0.124	1.554	1.376	2.031	37.87
6	494.14	0.1457	2.028	1.262	2.042	35.29
7	535.49	0.1721	2.076	1.288	2.051	31.46
8	559.10	0.1687	1.994	1.299	2.072	30.72
9	485.82	0.1344	1.805	1.231	1.722	38.01
10	557.96	0.184	1.814	1.503	2.381	28.45
11	480.77	0.1396	1.805	1.125	2.204	37.22
12	534.22	0.1708	1.948	1.319	2.115	31.39
13	529.78	0.1862	2.061	1.224	2.213	30.79
14	494.51	0.1271	1.983	1.437	2.065	35.94
15	472.63	0.146	1.691	1.188	2.544	36.54
16	540.08	0.1957	1.802	1.352	1.978	29.43
17	489.06	0.1398	1.645	1.163	2.107	37.05
18	473.57	0.1362	1.677	1.123	2.259	38.20
19	533.03	0.1804	1.578	1.349	2.183	30.69
20	480.31	0.1338	1.624	1.258	2.055	37.82
21	545.89	0.1817	1.792	1.087	2.472	31.21
22	477.57	0.1422	1.471	1.351	2.301	36.91

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning
23	489.03	0.1274	1.990	1.272	2.331	36.67
24	477.34	0.1423	1.841	1.276	1.602	38.46
25	541.57	0.1700	1.720	1.403	2.263	30.56
26	491.39	0.1268	2.095	1.126	2.149	37.52
27	523.28	0.1729	1.691	1.294	2.248	31.76
28	541.32	0.1572	1.893	1.288	2.327	31.87
29	520.71	0.1636	1.777	1.011	2.342	33.89
30	534.65	0.1399	1.925	1.093	2.475	34.49
31	480.03	0.1469	1.789	1.272	2.013	36.26
32	515.74	0.1778	2.221	1.188	1.989	32.42
33	541.33	0.1762	1.629	1.149	2.295	31.81
34	516.97	0.1537	1.811	1.392	1.592	34.27
35	477.21	0.1484	1.995	1.116	2.334	36.13
36	484.21	0.1698	1.873	1.352	2.167	33.15
37	520.62	0.1575	1.801	1.204	2.258	33.27
38	484.47	0.1507	1.757	1.219	1.993	36.12
39	506.59	0.1656	1.865	1.148	1.676	34.78
40	558.23	0.1790	1.733	1.327	1.750	30.45
41	532.11	0.1254	1.901	1.172	2.272	36.02
42	458.39	0.1120	1.951	1.336	1.524	99.45
43	450.81	0.1150	1.454	1.365	2.728	97.15
44	447.93	0.1190	1.908	1.153	2.810	40.51
45	451.51	0.1212	1.741	1.474	1.785	48.96
46	444.12	0.1188	1.946	1.452	2.116	44.58
47	503.38	0.1639	1.981	1.253	2.239	33.19
48	512.59	0.1568	1.871	1.119	2.102	34.50
49	507.61	0.1584	1.991	1.272	2.066	33.70
50	519.52	0.1723	1.993	1.162	2.126	32.62
51	513.19	0.1685	1.832	1.136	2.148	33.42
52	502.57	0.1534	1.941	1.232	2.074	34.48
53	501.68	0.1747	1.782	1.212	2.151	32.87
54	505.03	0.1657	1.802	1.184	2.122	33.75

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning
55	509.12	0.1654	1.933	1.169	2.103	33.64
56	512.37	0.1591	1.821	1.248	2.110	33.65
57	528.08	0.1663	1.882	1.217	2.202	32.47
58	523.31	0.1674	1.942	1.192	2.167	32.69
59	521.03	0.1542	1.862	1.293	2.078	33.27
60	493.12	0.1574	1.822	1.212	2.209	34.66
\bar{x}	510.20	0.158	1.85	1.24	2.14	33.62

4.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลด้วยสมการถดถอย

จากการทดลองพบว่า การใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติโลหะแผ่นเพียงค่าเดียวในการจำลองการขึ้นรูป จะได้ผลลัพธ์เพียงค่าเดียว (33.62%) ในการเป็นตัวแทนของคุณสมบัติโลหะแผ่น ซึ่งค่าดังกล่าวไม่สามารถเป็นตัวแทนของความเป็ยงเบนเกิดขึ้นจริงได้ จะเห็นได้จากผลการจำลองในตารางที่ 4-3 ที่เกิดจากการใช้ความเป็ยงเบนของคุณสมบัติโลหะแผ่นในการจำลองทั้งหมด 60 กรณี พบว่าเกิดการฉีกขาดบนชิ้นงานจากการสูญเสียความหนาเกิน 40% [27] จำนวน 5 กรณี คิดเป็น (5/60) 8.33% ซึ่งต่างจากการใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติโลหะแผ่นที่บ่งบอกว่าการขึ้นรูปนั้นเป็นการขึ้นรูปที่ดี แต่ในความเป็นจริงแล้วอาจเกิดการฉีกขาดที่บางชิ้นงานในการปฏิบัติงานจริงอันเนื่องมาจากความเป็ยงเบนของคุณสมบัติโลหะแผ่นที่เกิดขึ้น ต่อจากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์สมการถดถอยตามสมการต้นแบบ (15) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการที่ (4-1) ซึ่งสมการดังกล่าวนี้มีค่า R^2 และค่า R_{adj}^2 น้อยมาก นั่นคือ 39.15% และ 33.51% ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการตัดกรณีที่สมการไม่สามารถทำนายค่าการสูญเสียความหนาได้ใกล้เคียง ซึ่งประกอบไปด้วยกรณีที่ 42 และ 43 ทำให้ได้สมการถดถอยใหม่ดังสมการที่ (4-2) และส่งผลให้ค่า R^2 และค่า R_{adj}^2 เพิ่มมากขึ้น สุดท้ายตัดกรณีที่สมการถดถอยใหม่ทำนายค่าแล้วได้ค่าผิดพลาดมากนั่นคือ กรณีที่ 45 และ 46 จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยใหม่ได้ดังสมการที่ (4-3) และสรุปค่า R^2 และค่า R_{adj}^2 อีกทั้งค่าความถูกต้องของการพยากรณ์ในตารางที่ 4-4

$$Thinning = 119.2 - 0.1067K - 201.98n - 7.361r_0 + 13.584r_{45} - 0.324r_{90} \quad (4-1)$$

$$Thinning = 85.2 - 0.0636K - 86.2n - 0.99r_0 + 0.35r_{45} - 1.63r_{90} \quad (4-2)$$

$$Thinning = 82.0 - 0.0447K - 84.3n - 1.48r_0 - 4.89r_{45} - 1.43r_{90} \quad (4-3)$$

สุดท้ายนำสมการถดถอยที่ได้ทั้งหมด 3 สมการ ไปทำนายค่าการสูญเสียความหนาทั้งหมด 60 กรณี และนำค่าที่ทำนายได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียความหนาที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการพยากรณ์

สมการ	R^2 (%)	R_{adj}^2 (%)	MAD	MSE	MASE (%)
(4-1)	39.15	33.51	4.94	87.13	11.22
(4-2)	87.9	86.7	0.76	1.53	2.10
(4-3)	98.6	98.5	0.05	0.01	0.74

ตารางที่ 4-5 ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียความหนาระหว่างค่าทำนายจากสมการถดถอยกับการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning			
						FEM	(4-1)	(4-2)	(4-3)
1	474.81	0.1362	1.841	1.251	1.845	38.03	43.86	38.88	37.83
2	494.83	0.1307	1.832	1.323	2.091	36.43	43.78	37.71	36.71
3	530.98	0.1896	1.793	1.128	2.547	30.9	25.47	29.57	30.53
4	551.55	0.1812	2.014	1.292	2.258	30.02	25.75	29.30	29.57
5	497.64	0.124	1.554	1.376	2.031	37.87	47.60	38.50	37.41
6	494.14	0.1457	2.028	1.262	2.042	35.29	38.63	36.33	35.56
7	535.49	0.1721	2.076	1.288	2.051	31.46	28.80	31.37	31.31
8	559.10	0.1687	1.994	1.299	2.072	30.72	27.67	30.21	30.57
9	485.82	0.1344	1.805	1.231	1.722	38.01	43.11	38.56	37.82
10	557.96	0.184	1.814	1.503	2.381	28.45	28.78	28.71	28.13
11	480.77	0.1396	1.805	1.125	2.204	37.22	40.96	37.62	37.46
12	534.22	0.1708	1.948	1.319	2.115	31.39	30.53	31.60	31.43
13	529.78	0.1862	2.061	1.224	2.213	30.79	25.76	30.25	30.45
14	494.51	0.1271	1.983	1.437	2.065	35.94	44.95	37.98	36.31
15	472.63	0.146	1.691	1.188	2.544	36.54	42.05	37.16	36.66
16	540.08	0.1957	1.802	1.352	1.978	29.43	26.50	29.46	29.28
17	489.06	0.1398	1.645	1.163	2.107	37.05	41.78	37.41	37.25
18	473.57	0.1362	1.677	1.123	2.259	38.2	43.35	38.41	38.19
19	533.03	0.1804	1.578	1.349	2.183	30.69	31.82	31.11	30.97
20	480.31	0.1338	1.624	1.258	2.055	37.82	45.32	38.61	37.81

ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning			
						FEM	(4-1)	(4-2)	(4-3)
21	545.89	0.1817	1.792	1.087	2.472	31.21	24.95	29.41	30.82
22	477.57	0.1422	1.471	1.351	2.301	36.91	46.30	37.84	36.60
23	489.03	0.1274	1.990	1.272	2.331	36.67	43.13	37.79	36.91
24	477.34	0.1423	1.841	1.276	1.602	38.46	42.72	38.59	37.45
25	541.57	0.1700	1.720	1.403	2.263	30.56	32.70	31.21	30.84
26	491.39	0.1268	2.095	1.126	2.149	37.52	40.29	37.86	37.72
27	523.28	0.1729	1.691	1.294	2.248	31.76	32.80	32.15	32.02
28	541.32	0.1572	1.893	1.288	2.327	31.87	32.41	32.02	32.18
29	520.71	0.1636	1.777	1.011	2.342	33.89	30.53	32.77	34.03
30	534.65	0.1399	1.925	1.093	2.475	34.49	33.77	33.59	34.60
31	480.03	0.1469	1.789	1.272	2.013	36.26	41.81	37.42	36.44
32	515.74	0.1778	2.221	1.188	1.989	32.42	27.31	32.07	32.07
33	541.33	0.1762	1.629	1.149	2.295	31.81	28.67	30.65	31.70
34	516.97	0.1537	1.811	1.392	1.592	34.27	38.04	35.18	34.19
35	477.21	0.1484	1.995	1.116	2.334	36.13	37.98	36.68	36.46
36	484.21	0.1698	1.873	1.352	2.167	33.15	37.10	34.87	33.58
37	520.62	0.1575	1.801	1.204	2.258	33.27	34.15	33.48	33.70
38	484.47	0.1507	1.757	1.219	1.993	36.12	39.98	36.85	36.29
39	506.59	0.1656	1.865	1.148	1.676	34.78	32.96	34.55	34.69
40	558.23	0.1790	1.733	1.327	1.750	30.45	28.12	30.17	30.44
41	532.11	0.1254	1.901	1.172	2.272	36.02	38.27	35.38	35.87
42	458.39	0.1120	1.951	1.336	1.524	99.45	50.89	42.46	40.51
43	450.81	0.1150	1.454	1.365	2.728	97.15	54.79	41.23	39.47
44	447.93	0.1190	1.908	1.153	2.810	40.51	48.10	40.40	39.49
45	451.51	0.1212	1.741	1.474	1.785	48.96	53.16	41.95	39.31
46	444.12	0.1188	1.946	1.452	2.116	44.58	52.71	41.93	39.22
47	503.38	0.1639	1.981	1.253	2.239	33.19	34.07	33.90	33.45
48	512.59	0.1568	1.871	1.119	2.102	34.5	33.47	34.20	34.67
49	507.61	0.1584	1.991	1.272	2.066	33.7	34.97	34.38	33.85
50	519.52	0.1723	1.993	1.162	2.126	32.62	29.45	32.31	32.63
51	513.19	0.1685	1.832	1.136	2.148	33.42	31.60	33.14	33.57

ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

No.	K	n	r ₀	r ₄₅	r ₉₀	% Thinning			
						FEM	(4-1)	(4-2)	(4-3)
52	502.57	0.1534	1.941	1.232	2.074	34.48	36.35	35.15	34.76
53	501.68	0.1747	1.782	1.212	2.151	32.87	33.03	33.40	33.23
54	505.03	0.1657	1.802	1.184	2.122	33.75	33.94	33.97	33.99
55	509.12	0.1654	1.933	1.169	2.103	33.64	32.42	33.67	33.80
56	512.37	0.1591	1.821	1.248	2.110	33.65	35.20	34.14	33.98
57	528.08	0.1663	1.882	1.217	2.202	32.47	31.15	32.26	32.53
58	523.31	0.1674	1.942	1.192	2.167	32.69	30.73	32.46	32.72
59	521.03	0.1542	1.862	1.293	2.078	33.27	35.62	34.01	33.69
60	493.12	0.1574	1.822	1.212	2.209	34.66	37.11	35.30	34.93

จากตารางที่ 4-4 จะพบว่า สมการถดถอย (4-3) ให้ค่าการทำนายได้ใกล้เคียงกับการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุดสองลงมาคือ สมการถดถอย (4-2) และลำดับสุดท้ายคือ สมการถดถอย (4-1) ซึ่งพิจารณาจากค่า MAD, MSE และ MASE ที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2-15) ถึง (2-17) แต่เมื่อนำทั้ง 3 สมการมาทำนายผลเปรียบเทียบกับค่าจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า สมการถดถอย (4-3) ทำนายค่าได้ใกล้เคียงที่สุดเฉพาะในกรณีที่ค่าการสูญเสียความหนามีค่าไม่เกิน 40% เท่านั้น แต่สำหรับสมการถดถอย (4-2) มีการทำนายค่าได้แม่นยำน้อยกว่าสมการถดถอย (4-3) แต่สมการนี้สามารถทำนายค่าการสูญเสียความหนามีค่ามากกว่า 40% ได้ดีกว่า จากนั้นทำการสุ่มค่าตัวแปร K, n, r₀, r₄₅ และ r₉₀ ใหม่แต่ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด $(K \sim N(510.20, 22.70^2), n \sim N(0.158, 0.0172^2), r_0 \sim N(1.85, 0.1686^2), r_{45} \sim N(1.24, 0.1321^2)$ และ $r_{90} \sim N(2.14, 0.2442^2)$) ทั้งหมด 10 กรณี และนอกช่วงอีก 10 กรณี เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการถดถอยอีกครั้ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ถูกแสดงในตารางที่ 4-6 และ 4-7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการทำนายด้วยสมการถดถอยในช่วง

No.	K	n	r ₀	r ₄₅	r ₉₀	% Thinning	
						FEM	(4-2)
1	482.59	0.1795	1.48	1.31	2.08	33.49	34.64
2	538.61	0.1446	1.62	1.27	2.18	33.64	33.77
3	498.54	0.1562	1.79	1.29	2.63	33.46	34.42
4	513.48	0.1715	1.72	1.28	2.02	32.51	33.21
5	478.76	0.1531	1.78	1.21	2.25	35.62	36.55
6	543.99	0.1641	1.78	1.22	2.26	31.72	31.44

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning	
						FEM	(4-2)
7	482.48	0.1586	1.84	1.27	1.92	34.99	36.34
8	495.5	0.1756	1.98	1.03	1.82	34.75	33.98
9	530.74	0.146	1.97	1.36	2.04	33.15	34.06
10	527.98	0.1663	1.88	1.21	2.2	32.47	32.26

ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการทำนายด้วยสมการถดถอยนอกช่วง

No.	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}	% Thinning	
						FEM	(4-2)
1	580.53	0.2127	2.35	1.5	2.92	25.77	23.38
2	580.53	0.2127	2.35	1.5	1.31	29.16	26.01
3	580.53	0.2127	2.35	0.92	2.92	28.7	23.18
4	580.53	0.2127	1.3	1.5	2.92	26.16	24.42
5	580.53	0.2127	1.3	1.5	1.31	26.85	27.05
6	580.53	0.2127	1.3	0.92	2.92	29.66	24.22
7	580.53	0.1094	2.35	0.92	2.92	35.71	32.08
8	580.53	0.1094	2.35	0.92	1.31	56.81	34.71
9	580.53	0.1094	1.3	0.92	2.92	40.8	33.12
10	443.64	0.1094	2.35	0.92	2.92	41.09	40.79

จากการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการทำนายด้วยสมการถดถอยในช่วงและนอกช่วง ดังตารางที่ 4-6 และ 4-7 พบว่าสมการถดถอยสามารถทำนายค่าการสูญเสียความหนาด้วยค่าคุณสมบัติทางกลในช่วงได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมือนเดิม แต่ในกรณีใช้ค่าคุณสมบัติทางกลนอกช่วงทำนายผลจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของสมการถดถอยลดน้อยลงทั้งในด้านค่าการสูญเสียความหนาและโอกาสพบชิ้นงานเสียหายดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของสมการถดถอย (4-2)

ประเภท	โอกาสพบชิ้นงานเสียหาย (%)		MAD
	FEM	สมการ (4-2)	
ในช่วง	8.33	8.33	0.76
นอกช่วง	30	10	5.21

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวกับการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะที่พบหลังจากการทำวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การสรุปผลการดำเนินงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ดังนี้ คือ

5.1.1 จากการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสุ่มค่าของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ทั้งหมด 60 กรณี พบว่าขึ้นงานเกิดการฉีกขาดอันเนื่องจากการสูญเสียความหนาเกิน 40% ทั้งหมด 5 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ (5/60) 8.33 ซึ่งต่างจากการใช้ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ตัวแปร แทนพฤติกรรมการขึ้นรูปของโลหะแผ่น จากการจำลองประเภทนี้จะได้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้และได้เกิดการเสียหายที่ชิ้นงาน (Thinning = 33.62%) ด้วยเหตุนี้ทำให้การจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกลขาดความน่าเชื่อถือ เมื่อในการปฏิบัติงานจริงอาจพบชิ้นงานที่เสียหายบางชิ้น อันเนื่องมาจากชุดแม่พิมพ์มีความไวต่อคุณสมบัติของโลหะแผ่น ดังนั้นการจำลองการขึ้นรูปด้วยการสุ่มค่าของตัวแปร K , n , r_0 , r_{45} และ r_{90} ตามลักษณะการกระจายตัวเป็นทางเลือกที่ดีกว่าวิธีการจำลองด้วยวิธีเดิม (ใช้ค่าเฉลี่ย) เพื่อให้ทราบถึงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อชิ้นงานได้

5.1.2 จากการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติโลหะแผ่นเกรด SPCC ในลักษณะการกระจายแบบปกติทั้งหมดจำนวน 60 กรณี นำค่าการสูญเสียความหนาทั้งหมดที่ได้จากการจำลองดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการถดถอย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สมการถดถอยทั้งหมด 3 สมการ เนื่องจากการสูญเสียความหนบางช่วงมีการสูญเสียแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) ทำให้สมการที่ (4-1) มีค่า R^2 และค่า R_{adj}^2 ต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องตัดข้อมูลบางตัวออกเพื่อนำมาสร้างสมการถดถอยใหม่ จากสมการถดถอยทั้ง 3 สมการ จะได้สมการที่ (4-3) มีความแม่นยำที่สุด ลองลงมาคือสมการที่ (4-2) ส่วนสมการที่ (4-1) ให้ความแม่นยำในการทำนายน้อยที่สุด แต่สมการที่ (4-3) มีความแม่นยำน้อยลงเมื่อค่าการสูญเสียความหนามีค่าเกิน 40% ซึ่งในส่วนของสมการที่ (4-2) สามารถทำนายได้แม่นยำมากกว่าในช่วงดังกล่าว ดังนั้นเลือกใช้สมการที่ (4-2) ในการ

ทำนายค่าการสูญเสียความหนา เนื่องจากมีความสามารถในการทำนายในภาพรวมได้ดีกว่าสมการอื่น

5.1.3 การทำนายค่าการสูญเสียความหนาโดยใช้คุณสมบัติทางกลในแต่ละตัวแปรที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติที่อยู่ในช่วงซึ่งประกอบไปด้วย $K \sim N(510.20, 22.70^2)$, $n \sim N(0.158, 0.0172^2)$, $r_0 \sim N(1.85, 1.686^2)$, $r_{45} \sim N(1.24, 0.1321^2)$ และ $r_{90} \sim N(2.14, 0.2442^2)$ มีความแม่นยำใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองผ่านระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนในกรณีที่ใช้ค่าคุณสมบัติทางกลมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติที่อยู่นอกช่วง พบว่าค่าความแม่นยำในการทำนายค่าการสูญเสียความหนาลดน้อยลง ดังนั้นสมการถดถอยจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดก็ต่อเมื่อค่าตัวแปรต้นที่ใช้อยู่ในช่วงข้อมูลที่ถูกลำนำไปใช้ในการสร้างสมการถดถอยนั้น

นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้สมการถดถอยในการทำนายค่าการสูญเสียความหนาของชิ้นงานยังช่วยในการลดเวลาที่ใช้ในการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองทั้งหมด 60 กรณี ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ $(60 \times 75) 4,500$ นาที หรือ 75 ชั่วโมง แต่ในกรณีที่ใช้สมการถดถอยใช้เวลาน้อยกว่ามาก ดังนั้นการใช้สมการถดถอยจะช่วยประหยัดเวลาในการจำลองการขึ้นรูปผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ปริมาณมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทำนายค่าการสูญเสียความหนาของชิ้นงานพาราโบลาที่เกิดจากลักษณะการกระจายตัวของคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นในลักษณะเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะอื่น ๆ

5.2.2 ทหาวิธีการใหม่ในการสร้างสมการหรือแบบจำลองเพื่อทำนายได้ตลอดช่วงของค่าการสูญเสียความหนา เนื่องจากบางช่วงมีการสูญเสียความหนาเป็นแบบเชิงเส้น และบางช่วงเป็นแบบไม่เชิงเส้น

5.2.3 ควรเปลี่ยนค่าดัชนีชี้วัดใหม่ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ค่าการสูญเสียความหนามากที่สุดซึ่งในแต่ละกรณีค่าดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในบริเวณที่ต่างกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์อาจเกิดการผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

- 1 Zhang S.H., Jensen M.R., Nielsen K.B., Danckert J., Lang b L.H., Kang D.C., “Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups”, Journal of Materials Processing Technology Volume 142, (2003) : 544-550, 2003.
- 2 Zhang, S.H., et al. “Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation.” International Journal of Machine Tools and Manufacture. (2000) : 1479-1492.
- 3 ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- 4 Hill,R., The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Press, 1950.
- 5 คู่มือการใช้งานโปรแกรม PAM STAMP.
- 6 Dorel Banabic, Sheet Metal Forming Processes, Springer
- 7 สิทธิชัย แสงอาทิตย์. การทดสอบวัสดุ. เอกสารคำสอนรายวิชาวัสดุวิศวกรรม. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545.
- 8 Muammer Koc, Hydroforming for Advanced Manufacturing, Woodhead Publishing. 2008
- 9 Schmoeckel,D. , “Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media.” Manufacturing Technology, (1999) : 497-513.
- 10 ธารสิน อินทรกำธรชัย และสุวัฒน์ จีระเชียรนาถ. “การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยน้ำกับอุตสาหกรรมขึ้นส่วนยานยนต์.” การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ. ครั้งที่ 2, 2011.
11. เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ, 2541.
12. ปราโมทย์ เดชะอำไพ และสุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช. ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายพร้อมซอฟต์แวร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
13. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การทดสอบแรงดึง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

14. กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
15. มานพ วราภักดิ์. การจำลอง (Simulation). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
16. สายชล สินสมบูรณ์ทอง. สถิติวิศวกรรมสถิติวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
17. Radia,B., El Hamib,A., “Reliability Analysis of the Metal Forming Process” Mathematical and Computer Modelling. (2007) : 431–439.
18. Janssona,T., Nilsson, L., Moshfegh,R. “Reliability analysis of a sheet metal forming process using Monte Carlo analysis and metamodels” Journal of Materials Processing Technology (2008) : 255–268.
19. Kim, J., et al. “Statistical evaluation of forming limit in hydroforming process using plastic instability combined with FORM.” Int. J Adv Manuf Technol. (2009) : 53-59.
20. Ryoichi Chiba, Hiroshi Takeuchi, and Ryo Nakamura., Forming-limit prediction of perforated aluminum sheets with square holes, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, (2015) : 391-404.
21. Wong and Wagoner. “Corner Design in Deep Drawn Rectangular Parts.” Society of Automotive Engineers, (1997) : 39-55.
22. Wang, J., et al. “A Neural Networks Approach to Investigating the Geometrical Influence on Wrinkling in Sheet Metal Forming.” Materials Processing Technology. (2000) : 215-220.
23. Zhao and Wang. “Parameter Identification by Neural Network for Intelligent Deep Drawing of Axisymmetric Workpieces.” Materials Processing Technology. (2005) : 387-391.
24. Padmanabhan, R., et al. “Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless Steel.” Finite Elements in Analysis and Design. (2007) : 1062-1067.
25. Verlinden, B., et al. “Cost Estimation for Sheet Metal Parts Using Multiple Regression and Artificial Neural Networks: A Case Study.” International Journal of Production Economics. (2008) : 484-492.

26. Singh and Gupta. “Application of Support Vector Regression in Predicting Thickness Strains in Hydro-Mechanical Deep Drawing and Comparison with ANN and FEM.” CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. (2010) : 66-72.
27. Intarakumthornchai, T., et al “FEA Based Optimization of Blank Holder Force and Pressure for Hydromechanical Deep Drawing of Parabolic Cup Using 2-D Interval Halving and RSM Method.” Engineering Journal (EJ). (2010) : 15-32.
- 28 กชกร วิรัชกุล. “การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการขึ้นรูปชิ้นงานพาราโบลิกที่เกิดจากเบี่ยงเบนของคุณสมบัติโลหะแผ่น” การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ 2554



ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นายชลากร อุดมรักษาสกุล
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Chalakorn Udomraksasakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
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)

ผู้ร่วมวิจัยวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นาย กชกร วิรัชกุล
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Kotchakorn Wiratchakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
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 สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2544
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 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)

ผู้ร่วมวิจัยวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นางสาวชลิดา อุดมรักษาสกุล
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Miss. Chalida Udomraksasakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
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)

