

การทำนายความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์
ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

Formability Prediction of Automotive Parts
Using Forming Limit Diagrams

สวัสดิ์ โสตามุข^{1*} วิชิต บัวแก้ว¹ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน² สุวัฒน์ จีระธีรนาถ³

¹โครงการความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ. องครักษ์ จ. นครนายก 26120
โทร 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 E-mail: sawad_sdm@yahoo.com vichitb@swu.ac.th
²วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงบางซื่อ เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2913-2500 ต่อ 6437, 0-1692-0689 โทรสาร 0-2587-4356 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th
³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-6500 ต่อ 4360 โทรสาร 0-2564-6370 E-mail: suwatj@mtec.or.th

Sawad Sodamuk^{1*} Vichit Buakeaw¹ Suparerk Sirivedin² Suwat Jirathearnat³

¹Srinakharinwirot University and Chulachomklao Royal Military Academy Jointed Graduated Program
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkarak Nakhonnayok 26120,
Thailand. Tel: 0-2664-1000 Ext 2055, Fax: 0-3732-2609, E-mail: sawad_sdm@yahoo.com vichitb@swu.ac.th
²College of Industrial Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. Bangsue Dusit Bangkok 10800
Thailand. Tel: 0-2913-2500 ต่อ 6437, 0-1692-0689 Fax: 0-2587-4356 E-mail: ssv@kmitnb.ac.th
³National Metal and Materials Technology Center, 114 Thailand Science Park, KlongLuang, Pathumthani 12120
Thailand. Tel: 0-2564-6500 Ext 4360, Fax: 0-2564-6370, E-mail: suwatj@mtec.or.th

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนวัสดุในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยใช้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram, FLD) เพื่อประเมินความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทย โดยการใช้เหล็กแผ่น SPCC และ SPCEหนา 0.8 มม. สร้าง FLD ด้วยการขึ้นรูปกิริตวงกลมบนแผ่นแบลงก์ทดสอบโดยวิธีกัดกรดด้วยไฟฟ้า เปลี่ยนขอบของแผ่นแบลงก์ด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน ขึ้นรูปบนเครื่องเพรสไฮดรอลิคด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นซ์ 100 มม. กระทั่งเกิดรอยคอดและรอยแตก วัดการเปลี่ยนรูปของกิริตวงกลมเป็นเปอร์เซ็นต์ ความเครียดหลักและความเครียดรอง นำ FLD มาประยุกต์ใช้ขึ้นรูปตัวถังรถยนต์ด้านใน ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสอง

แตกต่างกัน เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดรองในขณะที่เกิดการคอดสูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้มากกว่า แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและผลลัพธ์ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract:

The aim of this research is to study the effect of steel sheets produced by different manufacturers upon their forming limit. This work used forming limit diagram (FLD) to determine the formability of different trade marks steel sheets SPCC and SPCE, which have the same thickness of 0.8 mm. These two steel sheets are commonly used to produce automotive parts in Thai automotive industry. The circular marks were formed onto the

surface of blank sheet using electro-etching technique. Subsequently, the blank sheet was continuously formed a hemispherical-dome shape by hydraulic press machine with a 100-mm punch. The pressing process was stopped when local necking and cracks were observed on the surface. The deformations of circular marks were accurately measured to obtain the percentages of major and minor strains. Afterward, this process was repeated again for different semi-dome's radii in order to produce FLD. The FLDs, obtained from this experiment, were used to determine the forming limit of the automotive inner-parts. The results were found that FLDs of SPCC and SPCE are slightly different. It has been found that SPCE has the values of major and minor strains higher than SPCC. In other words, it indicates that SPCE has better formability than SPCC. The FLDs of both steel sheets have predicted failure in forming process consistent with the real experiment and finite element result.

Keywords: Forming Limit Diagram, Forming Limit Curve,
Sheet Metal Forming, Formability, Automotive Inner-Part.

1. บทนำ

แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในปริมาณมากโดยมีคุณภาพที่เหมือนกันและมีต้นทุนการผลิตต่ำ องค์ประกอบที่ทำให้แม่พิมพ์มีคุณภาพดีคือการออกแบบต้องดี ถูกต้องและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นก่อนจะมีการผลิตแม่พิมพ์ออกมา ควรจะมีการทดลองและประเมินผลที่เป็นระบบจนแน่ใจว่าชิ้นงานมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสามารถใช้งานได้ ซึ่งการประเมินที่ใช้กับงานขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นในโปรแกรมการวิเคราะห์จะมีการประเมินโดยใช้ FLD อยู่แล้ว ซึ่งสร้างจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุกับสมการที่ใช้ในโปรแกรม แต่ขีดจำกัดการขึ้นรูป(Forming Limit) ของวัสดุแต่ละชนิดไม่ได้ขึ้นอยู่กับการคำนวณเพียงเท่านั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆอีกหลายอย่างที่เป็นตัวแปรทำให้ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุไม่ตรงกับความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุจริงๆ เช่นกรรมวิธีการผลิต เกณฑ์ขอบเขตความเครียด คุณสมบัติทางโลหะวิทยาและสารฝังใน ทำให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนได้ จึงจำเป็นต้องสร้าง FLD จากการทดลองของแต่ละวัสดุขึ้นมาใช้ใหม่ ซึ่งชาญ ถนัดงาน[1] กล่าวว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นและ Banabic, D.; et al.[2] ยังกล่าวว่าใช้สำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ แต่ Hecker, S.S.[3] กล่าวว่าวัสดุแตกต่างกันเส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLC) ใช้วิเคราะห์ร่วมกันไม่ได้ทำให้ผลลัพธ์ไม่ตรงกับความเป็นจริง พร้อมกับเสนอแนะวิธีการหา FLC ที่ได้

มาตรฐานซึ่งจากการศึกษา FLC ตาม ASTM E 2218-02(Standard test method for determining forming limit diagram.)[4] นับว่าเหมาะสม สามารถวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจริงก่อนมีการสร้างแม่พิมพ์ ช่วยให้การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการ Tryout ชิ้นงาน

2. ทฤษฎี

การขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์นั้น ชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก(Plastic Zone) ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติของโลหะแผ่นคือ Strain Hardening Exponent(n), Strength Coefficient(K), ซึ่งมีความสำคัญกับเส้นโค้งความเค้นจริง-ความเครียดจริงของวัสดุ สามารถประมาณโดยกฎกำลัง(Power Law)

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถหาได้โดยการขึ้นรูปกริดวงกลมบนแผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบก่อน แล้วจึงนำมาขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม ทำให้วงกลมเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี หลังจากนั้นจึงหาความเครียดหลักโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก(d_1) และเส้นผ่านศูนย์กลางรอง(d_2)ของวงรี เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกริดวงกลมเดิม(d_0) ซึ่งสามารถหาความเครียดหลัก(Major Strain) (ε_1) และความเครียดรอง(Minor Strain) (ε_2) ได้จากสมการ

$$\varepsilon_1 = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(d_2 - d_0)}{d_0} \times 100 \quad (3)$$

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปมีประโยชน์มากในการวินิจฉัยปัญหาที่แท้จริงและแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยนำแผ่นชิ้นงานที่ทำกริดวงกลมไว้แล้วมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ต้นแบบระหว่างการทดลองแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิต จากนั้นจึงวัดความเครียดเฉพาะแห่งที่ใกล้บริเวณความเสียหาย หรือจุดที่สงสัยแล้วนำไปเปรียบเทียบกับ FLD ซึ่งมีประโยชน์สองประการคือ ประการแรก สามารถจำแนกจุดที่มีแนวโน้มจะมีปัญหาและสามารถประเมินความรุนแรงของปัญหาได้ แม้ว่าจะยังไม่เกิดความเสียหายถ้าความเครียดที่วัดได้มีค่าใกล้เส้นโค้งความเสียหายก็อาจเกิดความเสียหายในการผลิต เพราะเครื่องมือสึกหรอและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, การหล่อลื่น, แนวของเครื่องมือหรือความหนาและคุณสมบัติแผ่นวัสดุ ประการที่สอง เหตุผลในการเปรียบเทียบความเครียดที่วัดได้กับ FLD ก็คือทำให้สามารถจำแนกแยกแยะปัญหาได้ ค่าต่ำสุดของ

ε_1^* เกิดขึ้นเมื่อเป็นความเครียดในระนาบ ดังนั้นถ้าการเปลี่ยนรูปในบริเวณวิกฤติใกล้เคียงกับความเครียดในระนาบแล้ว การเปลี่ยนแปลงเครื่องมือหรือสารหล่อลื่นจะได้ผลประโยชน์จากการดรอว์หรือการดึงยืดขึ้นรูปได้มากขึ้น การหล่อลื่นที่ดีขึ้นและการล็อกที่ขอบ (Lock Bead) น้อยลงช่วยให้การดรอว์ดีขึ้น ส่วนการดึงยืดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นได้โดยใช้ดรอว์บีด

วิธีขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลม Taylor, B. [5] กล่าวว่าให้ผลได้ดีกว่าโอลเซนและอีริคเซน ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ Granzow, W.G. [6] กล่าวว่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและกรรมวิธีการผลิตเหล็ก ดังนั้นแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสามารถคำนวณได้จากสมการของ Hosford, William F. [7] การคอดเฉพาะแห่ง (Localized Neck)

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1+\rho} \quad (4)$$

การคอดขยาย (Diffuse Necking)

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1+\rho+\rho^2)}{(1+\rho)(2\rho^2-\rho+2)} \quad (5)$$

$$\text{โดย } \rho = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

และความเครียดในระนาบ (Plane Strain) ซึ่งเป็นการประมาณโดยสมการของ Hosford, William F. [7]

$$FLD_0 = \frac{n}{0.21} (23.3 + 14.4t) \quad (6)$$

t คือความหนาแผ่นโลหะ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

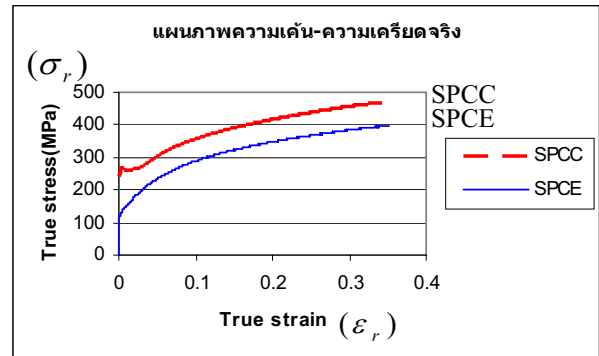
3.1 ตัดแผ่นขึ้นทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติทางกล ตารางที่ 1 นำข้อมูลสร้าง True Stress-True Strain ตามรูปที่ 1

3.2 ตัดแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อขึ้นรูปโดมขนาด 200×200 มม. และตัดขอบด้านข้างรัศมี 40,50,57.5,65,72.5 และ 80 มม. ตามลำดับ ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้วิจัย

วัสดุหนา	σ_y (MPa)	k (MPa)	n	r_0	r_{45}	r_{90}
0.8 มม.						
SPCC	267.24	589.36	0.21	1.20	1.08	1.85
SPCE	152.37	534.30	0.27	2.59	2.06	3.19

จากตารางที่ 1, σ_y คือความเค้นที่จุดคราก (Yield), k คือสัมประสิทธิ์ความต้านการดึง, n คือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วย

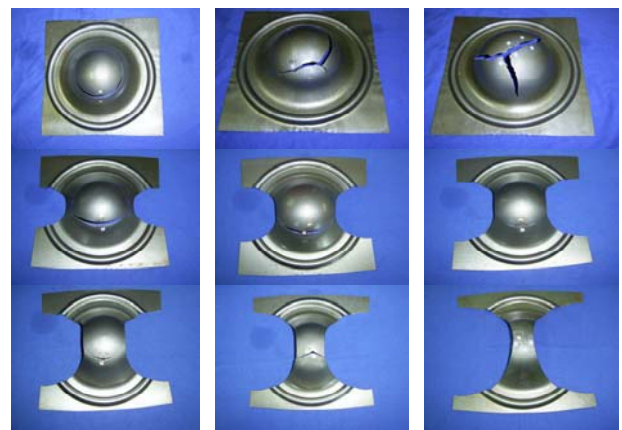
ความเครียด, r_0 คือแอนไอโซทรอปิกตามแนวทิศทางการรีด, r_{45} คือแอนไอโซทรอปิกทำมุม 45 องศา กับแนวทิศทางการรีด, r_{90} คือแอนไอโซทรอปิกทำมุม 90 องศา กับแนวทิศทางการรีด



รูปที่ 1 แผนภาพ True Stress-True Strain ของวัสดุ

3.3 ขึ้นรูปกริดวงกลมขนาด 2.5 มม โดยใช้กรัดกัดด้วยไฟฟ้าบนแผ่นแม่เหล็กทดสอบ

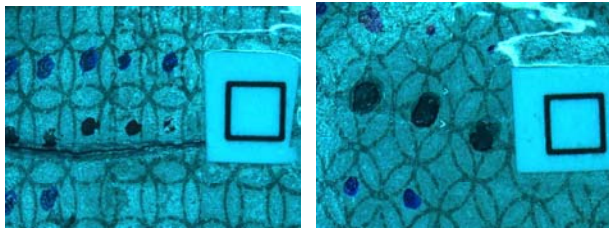
3.4 ขึ้นรูปด้วยเครื่องเพรสไฮดรอลิกโดยใช้แม่พิมพ์รูปโดมครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. กระทั่งเกิดรอยคอดรอยแตก ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขึ้นรูปทดสอบที่ขึ้นรูปโดมบนแผ่นแม่เหล็กขนาด 200×200 มม. และตัดขอบข้างรัศมี 40,50,57.5,65,72.5 และ 80 มม. ตามลำดับ

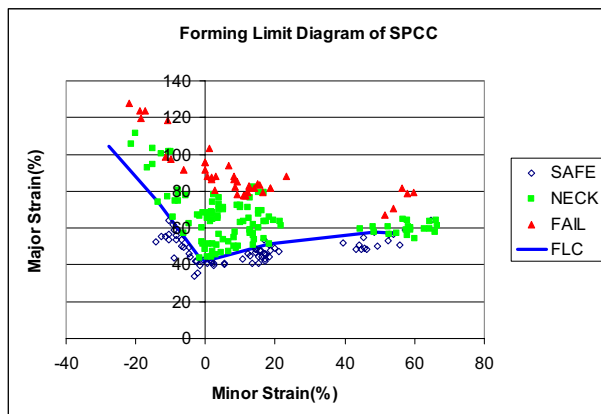
จากรูปที่ 2 แผ่นเต็ม (Full Blank) ในขณะขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม จะเกิดการดึงยืดขึ้นรูป (Stretching) สองแกนและเปลี่ยนการหล่อลื่นโดยใช้น้ำมันขึ้นรูป แผ่นโพลิเอทที่สิ้น แผ่นยางแข็ง น้ำมันมะพร้าวและไม่ใช่สารหล่อลื่น ทำให้เกิดด้านขวาของ FLD ส่วนด้านซ้ายของ FLD จะใช้การเปลี่ยนรูปด้านข้างของแผ่นแม่เหล็กทดสอบเพื่อให้เกิดการยืดแกนเดียวเหมือนการทดสอบแรงดึง (Uniaxial Tension), $\varepsilon_2 < 0$ โดยเหล็ก SPCC รัศมี R57.5-R80 และ SPCE รัศมี R40-R80 มีค่าลบ

3.5 กริดวงกลมเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี วัดความเครียดหลัก (ϵ_1) และความเครียดรอง (ϵ_2) ตามรูปที่ 3

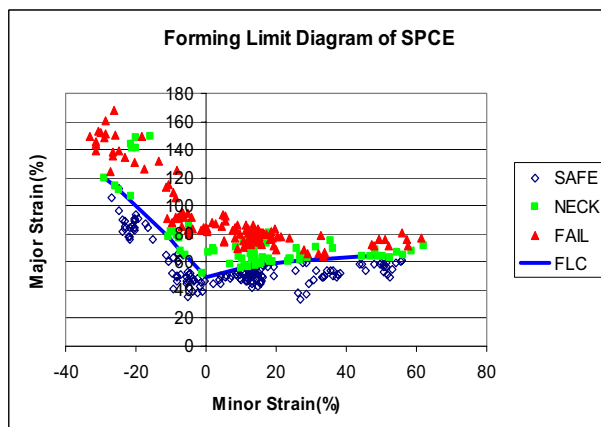


รูปที่ 3 กริดวงกลมเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นวงรี ด้านยาวเป็นความเครียดหลัก (ϵ_1) ด้านสั้นเป็นความเครียดรอง (ϵ_2)

3.6 นำความเครียดมาพล็อตกราฟ ได้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปตามรูปที่ 4-5, $\triangle$ (สีแดง) เกิดความเสียหาย (Fail), $\square$ (สีเขียว) เกิดรอยคอด (Neck), $\diamond$ (สีสว่าง) คือจุดดี (Safe)

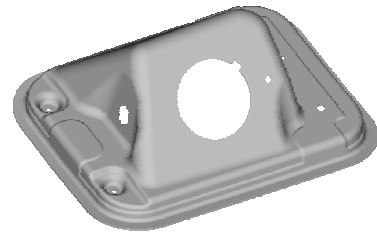


รูปที่ 4 แสดง FLD ของเหล็ก SPCC ตามมาตรฐาน JIS G 3141 ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5 แสดง FLD ของเหล็ก SPCE ตามมาตรฐาน JIS G 3141 ที่ได้จากการทดลอง

3.7 ขึ้นรูปชิ้นงานจริงซึ่งเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ตามรูปที่ 6 ตัวถังรถยนต์ด้านใน (HOUSING FUEL TANK PIPE) โดยแบ่งการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็น 5 ขั้นตอนคือ Draw1, Draw2, Trim, Pierce-Rest และ Pierce-C Pierce ซึ่งในที่นี้จะวิเคราะห์เฉพาะ Draw1, Draw2 เท่านั้น



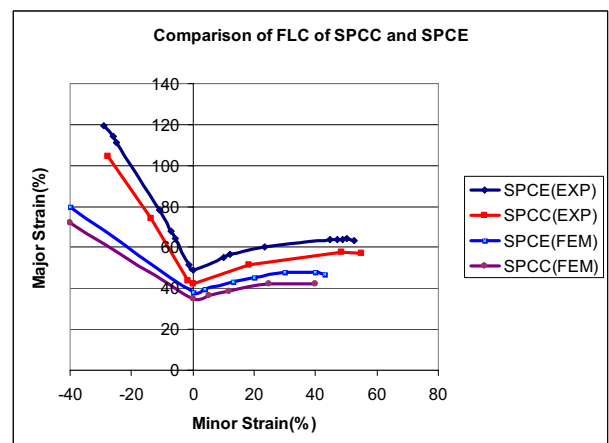
รูปที่ 6 แสดงรูปร่างชิ้นงานตัวถังรถยนต์ด้านในที่ใช้เปรียบเทียบกับ FLD ที่ได้จากการทดลอง

3.8 เปรียบเทียบขีดจำกัดการขึ้นรูปของชิ้นงานกับ FLD ที่ได้จากการทดลอง โดยการตีกริดวงกลมบนแผ่นแปลงก์ของชิ้นงานและขึ้นรูปด้วยเครื่องเพรสไฮดรอลิก นำความเครียด (Strain) พล็อตลงใน FLD ถ้าต่ำกว่าเส้น FLC ถือว่าปลอดภัยชิ้นงานไม่เสียหาย

3.9 เปรียบเทียบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) กับโปรแกรม Autoform 3.26

4. ผลการวิจัย

4.1 การสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจากการทดลองของเหล็ก SPCC และ SPCE ได้ความเครียดในระนาบ (FLD₀) เท่ากับ 42 และ 49% ตามลำดับ ส่วนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Keeler ได้ FLD₀ เท่ากับ 35 และ 38% ตามลำดับ รูปที่ 7



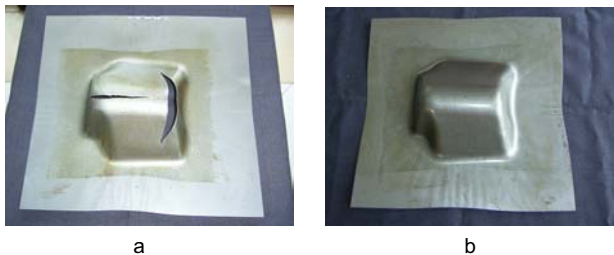
รูปที่ 7 เปรียบเทียบ FLC จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็กเกรด SPCC และ SPCE

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า FLC ที่ได้จากการทดลองมีความเครียดในระนาบ(FLD₀) สูงกว่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสองวัสดุ โดยเหล็ก SPCC สูงกว่า 7% และเหล็ก SPCE สูงกว่า 11% จึงทำให้การขึ้นรูปจริงสามารถขึ้นรูปได้มากกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

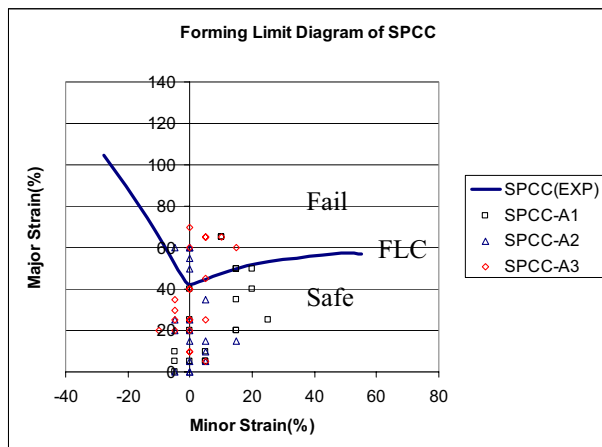
4.2 ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง

4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 (Draw1) เหล็ก SPCC เกิดความเสียหาย แต่เหล็ก SPCE สามารถขึ้นรูปได้ ตามรูปที่ 8a และ 8b ตามลำดับ และเปรียบเทียบความเครียดในชิ้นงานกับ FLD ที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ชิ้นงาน A1 เหล็ก SPCE ใน Step1 ความเครียดกระจายอยู่ในแนว Plane Strain และด้านซ้ายซึ่งไม่เหมือนเหล็ก SPCC ใน Step เดียวกัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเกิดการดรอว์ความหนาไม่ลดลง ความเครียดไม่สูงมาก โลหะไหลได้ดี รอยย่นไม่เกิดตรงที่ขึ้นรูปแต่จะเกิดบริเวณขอบเพียงเล็กน้อย

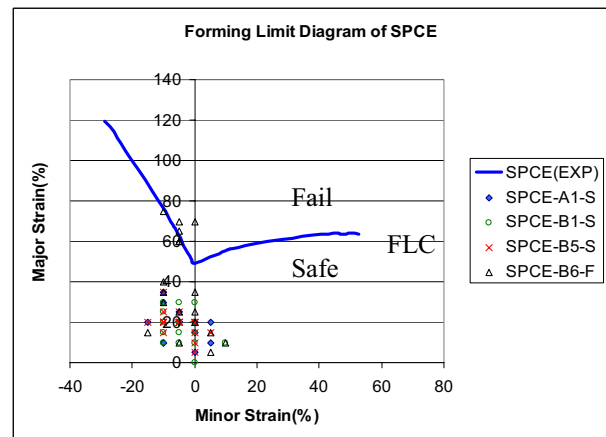
4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 (Draw2) เหล็ก SPCE สามารถขึ้นรูปได้ดี และทำให้แตกโดยเพิ่มแรงกดของ Blank Holder และระยะStroke ตามรูปที่ 11a และ 11b ตามลำดับ และเปรียบเทียบความเครียดในชิ้นงานกับ FLD ที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 10



รูปที่ 8 ขั้นตอนที่ 1 (Draw1) ชิ้นงาน a เหล็ก SPCC เกิดความเสียหาย, ชิ้นงาน b เหล็ก SPCE สามารถขึ้นรูปได้



รูปที่ 9 ขั้นตอนที่ 1 เหล็ก SPCC เกิดความเสียหายทั้งสามชิ้นงาน ชีตจำกัดความเครียด(Limit Strain) เกินเส้นโค้ง FLC



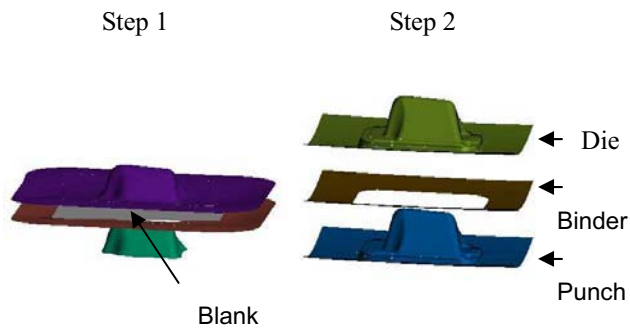
รูปที่ 10 ขั้นตอนที่ 2 (Draw2) ชิ้นงาน B1, B5 ของเหล็ก SPCE สามารถขึ้นรูปได้ B6 ของเหล็ก SPCE เกิดความเสียหาย

จากรูปที่ 10 เหล็ก SPCE ชิ้นงาน A1 คือ การ Draw ใน Step 1 ชีตจำกัดการดรอว์ยังต่ำกว่า FLC มาก ชิ้นงาน B1 การ Draw ใน Step 2 ใช้แบล็กโฮลเดอร์(BH)=10 (ความดันเกจของเครื่องเพรส) ส่วนชิ้นงาน B5 ใช้ BH=45, Stroke=30 (ระยะการจับของแบล็กโฮลเดอร์) ชิ้นงานไม่เสียหาย เมื่อเพิ่ม BH=50, Stroke=30 ในชิ้นงาน B6 เกิดความเสียหาย



รูปที่ 11 ขั้นตอนที่ 2 (Draw2) รูป a คือชิ้นงาน B1 สามารถขึ้นรูปได้, รูป b คือชิ้นงาน B6 เกิดความเสียหาย

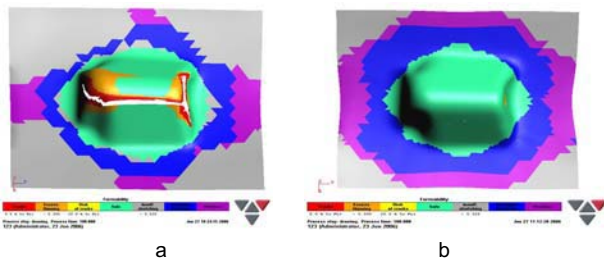
4.3 การเปรียบเทียบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Autoform 3.26 ลักษณะเมช(Mesh)เป็น Automesh แบบสามเหลี่ยมตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยระบบ Incremental แบบ Single Action ออกแบบแม่พิมพ์ใช้ขั้นตอนแบบ Multi Step ป้อนข้อมูลวัสดุจากตารางที่ 1 ผลจากการคำนวณความสามารถในการขึ้นรูป (Formability)และแผนภาพชีตจำกัดการขึ้นรูป(FLD)เปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง



รูปที่ 12 ลักษณะการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ใน Step ที่ 1 และ Step ที่ 2

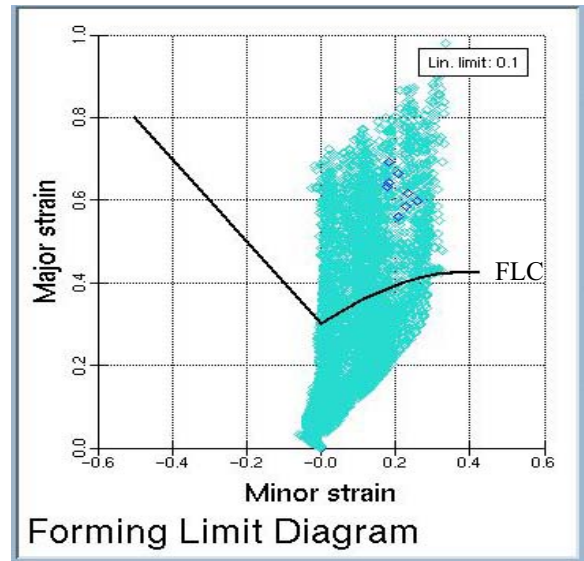
จากรูปที่ 12 ในโปรแกรม Autoform การขึ้นรูปแบบ Multi Step จะใช้แม่พิมพ์หลายชุด แต่ใช้แผ่นแม่พิมพ์ตัวเดียวกัน ขึ้นรูปต่อเนื่องกันไป แผ่นแม่พิมพ์อยู่บน Binder, Die จะอยู่บนสุดถัดลงมาเป็น Binder และ Punch ตามลำดับ การเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ Punch จะอยู่กับที่ Die จะเคลื่อนที่ลงมากดแผ่นแม่พิมพ์กับ Binder ด้วยแรงกดความดันเท่ากับ 5 MPa ซึ่งทำให้รอยย่นเกิดเหมือนชิ้นงานจริง หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ลงมาขึ้นรูปกับ Punch จนหมดระยะ Stroke

4.3.1 เหล็ก SPCC จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Autoform พบว่าเกิดความเสียหายในแนวด้านบนและด้านข้างสองด้าน ตามรูปที่ 13a ซึ่งชิ้นงานจริงเสียหายตามด้านข้างแต่เมื่อลดแรงเสียดทานโดยใช้พลาสติก(โพลีเอททีลีน) ทำให้รอยแตกตามรูปที่ 8a เกิดแนวเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(13a) ความเครียดกระจายบริเวณ Plane Strain และด้านขวาของ FLD ตามรูปที่ 14

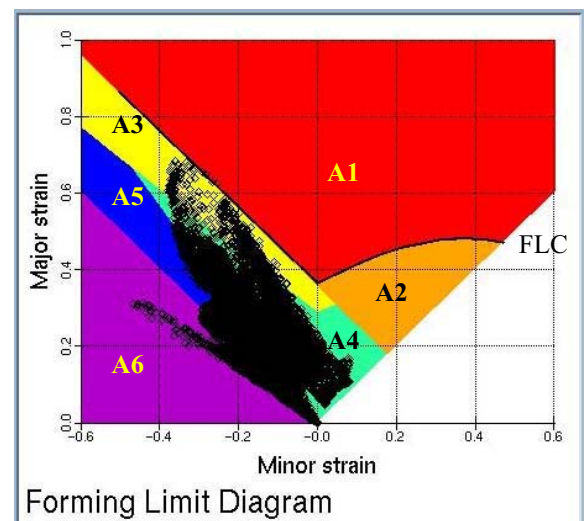


รูปที่ 13 รูป a คือการวิเคราะห์ด้วย FEM ของเหล็ก SPCC ใน Step ที่ 1 และรูป b เหล็ก SPCE ใน Step ที่ 1

4.3.2 เหล็ก SPCE ใน Step ที่ 1 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Autoform พบว่าบริเวณที่ขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปได้ดี บริเวณขอบเกิดรอยย่นเล็กน้อย ตามรูปที่ 13b, ความเครียดกระจายบริเวณ Plane Strain และด้านซ้ายของ FLD ใน Step ที่ 2 ความเครียดไม่เกินเส้น FLC กระจายบริเวณ Plane Strain และด้านซ้ายของ FLD ตามรูปที่ 15 บริเวณขอบเลื้อนเข้ามาเหมือนชิ้นงานจริงเนื่องจากใช้ดรอว์บีดในการวิเคราะห์ด้วย รอยย่นเกิดบริเวณขอบเพียงเล็กน้อย

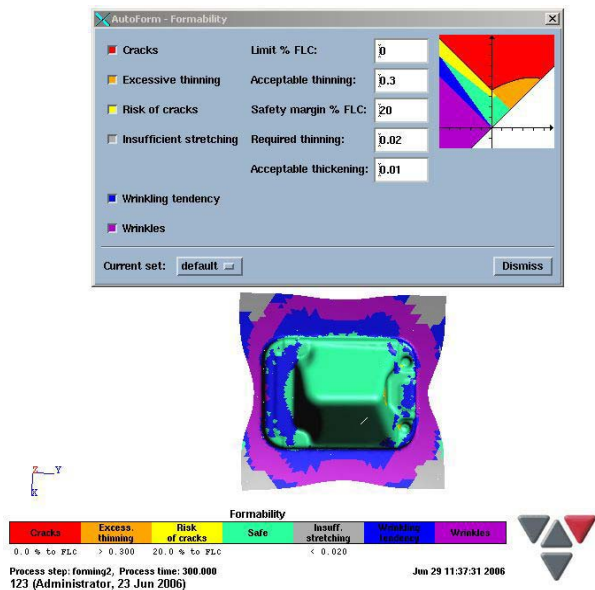


รูปที่ 14 การวิเคราะห์ด้วย FEM ของเหล็ก SPCC ใน Step ที่ 1 ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD)



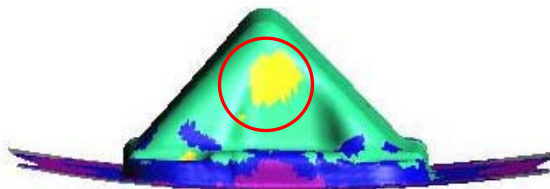
รูปที่ 15 การวิเคราะห์ด้วย FEM ของเหล็ก SPCE ใน Step ที่ 2 ด้วยแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป(FLD)

จากรูปที่ 14 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เหล็ก SPCC ใน Step ที่ 1 เกิดการยืดในขณะขึ้นรูปจนชิ้นงานเกิดความเสียหาย และรูปที่ 15 เหล็ก SPCE ใน Step ที่ 1-2 ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ ความเครียดกระจายอยู่บริเวณใต้เส้นโค้ง FLC ซึ่งบริเวณ A1(สีแดง) เกิดการแตก(Cracks), A2(สีส้ม)เกิดการบางที่ยอมรับได้(Acceptable thinning), A3(สีเหลือง)ความเสี่ยงที่จะเกิดการแตก(Risk of Cracks), A4(สีเขียว)การขึ้นรูปที่ปลอดภัย(Safe), A5(สีน้ำเงิน)แนวโน้มที่จะเกิดการย่น(Wrinkling Tendency), A6(สีม่วง)เกิดการย่น(Wrinkling) ซึ่งชิ้นงานจริงเกิดการย่นรอบ ๆ ปีกของชิ้นงาน



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ Formability ของเหล็ก SPCE ใน Step ที่ 2 เปรียบเทียบกับชิ้นงาน

จากรูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่แนวโน้มความเสียหายจากการวิเคราะห์เกิดขึ้นที่ด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นงานตามรูปที่ 17 ซึ่งสอดคล้องกับชิ้นงานจริงในรูปที่ 11b



รูปที่ 17 แนวโน้มความเสียหายกับชิ้นงานที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วย FEM ของเหล็ก SPCE ใน Step ที่ 2

5. สรุปผลการวิจัย

เส้นโค้งขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองมีลักษณะคล้าย ๆ กัน แต่ตำแหน่งแตกต่างกันโดย SPCE สูงกว่า SPCC ผลจากการทดลองขึ้นรูปโดมครึ่งทรงกลม จะได้ FLC สูงกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพราะว่าในโปรแกรมจะคำนึงถึงความปลอดภัยของชิ้นงานมากกว่าการขึ้นรูปจริง บางครั้งการขึ้นรูปชิ้นงานจริงอาจจะไม่เสียหายก็ได้ ด้านซ้ายของ FLD จะชันกว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากว่าชิ้นงานจริงมีการดรอว์ได้มากกว่า กริดวงกลมยึดตัวในแนวความเครียดหลัก (ϵ_1) สูงมาก การเลือกกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปของ Safe และ Neck ในแผ่นแบล็ก

ทดสอบที่ $\epsilon_2 < 0$ เพื่อความปลอดภัยควรจะห่างกันมากกว่า 1-1.5 เท่าของวงกลมกริดที่เปลี่ยนรูปโดยพิจารณาจากการบางของวัสดุด้วยการเลือกกริดวงกลมที่เปลี่ยนรูปจะต้องมีความชัดเจนจากการเกิดรอยคอด รอยแตกและจุดปลอดภัย รวมทั้งการวัดเปอร์เซ็นต์ความเครียด (Strain) จะต้องมีความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด จะทำให้ได้ FLC ที่ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงมากที่สุด

เหล็ก SPCE มีความเครียดหลักและความเครียดรองสูงกว่า SPCC จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานจริง(Automotive Part) สามารถขึ้นรูปได้มากกว่าทั้งในการลากขึ้นรูป(Drawing)และการดึงยืดขึ้นรูป(Stretching) เหล็ก SPCC จากการขึ้นรูปจริงจะเกิดความเสียหายบริเวณ Plane Strain และด้านขวาของ FLD ซึ่งเกิดจากการดึงยืดขึ้นรูป ส่วนเหล็ก SPCE จะเกิดความเสียหายบริเวณ Plane Strain และด้านซ้ายของ FLD ซึ่งเกิดจากการดรอว์ ทั้งสองวัสดุสอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปทั้งสองสอดคล้องกับความสามารถและความเสียหายในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขีดจำกัดความเครียด(Limit Strain)ที่ปลอดภัยอยู่ต่ำกว่าเส้น FLC ส่วนที่เกิดความเสียหายขีดจำกัดความเครียดอยู่เหนือเส้น FLC

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย คุณธนสาร อินทรกำธรชัย คุณสุธี โอพารฤทธิ์นันท์ คุณอรุณพล พลาศรีย์ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก ปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 80 ตัน ขอขอบคุณบริษัทไทยรุ่งยูเนี่ยนคาร์ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้วิจัย แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานและเครื่องเพรสไฮดรอลิคขนาด 300 ตัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญ ถนัดงาน. (2547). เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [2] Banabic, D.; et al. (2000). Formability of metallic materials. Germany: Springer
- [3] Hecker, S.S. (1975). Simple technique for determining forming limit curves. Sheet metal industries, pp. 671-676. Los Alamos University
- [4] Standard test method for determining forming limit diagram. (2005). Annual book of ASTM Standards, section 3, volume 03.01 pp.1252-1266. Philadelphia: ASTM International.
- [5] Taylor, B. (1988). Formability Testing of Sheet Metals. Metal Handbook. Volume 14 Forming and Forging. 9th ed. Ohio 44073: ASM International Handbook Committee.

[6] GranZow, W.G.; Armco.; & Inc. (1990). Sheet Formability of steel. Metal Handbook. Volume 1 Properties and Selection: Iron, Steel, and High-Performance Alloys. 10th ed. Ohio 44073: ASM International Handbook Committee

[7] Hosford, William F.; & Caddell, Robert M. (1993). Metal Forming: Mechanics and metallurgy. 2nd ed. USA: PTR Prentice, Englewood Cliffs, N.J. 07632