

การศึกษาการชดเชยการดีดกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC

A STUDY ON COMPENSATION OF SPRINGBACK OF S50C AND SPCC STEEL SHEETS



ฉพ.
๒๕๑๓๗
๒๕๔๘

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 60914

วัน,เดือน,ปี.....๕.๕.๕๕...๒๕๔๙

๑๑๕๑๓๕๗๗
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๘

ISBN 974-15-1938-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON COMPENSATION OF SPRINGBACK OF S50C AND
SPCC STEEL SHEETS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1938-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการชดเชยการตีดกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC
นักศึกษา	นาย ภาสกร จำปาเงิน
รหัสนักศึกษา	43062046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ทวี เทศเจริญ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมรศ. จำลอง ปราบแก้ว	

บทคัดย่อ

จากการศึกษาพฤติกรรมการตีดกลับและการชดเชยการตีดกลับ โดยวิธีการพับขึ้นรูปแบบคงรูปที่ ทำให้วัสดุเกิดแรงกดพับจนเกินจุด Yield Strength ซึ่งทำให้วัสดุเกิดการยืดตัว แต่ก็มีความเค้นที่ตกค้างอยู่ซึ่งทำให้วัสดุนั้นตีดกลับมาบางส่วน วัสดุ S50C และ SPCC โดยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะ เป็นการทดสอบโดยวิธีการพับขึ้นรูปตัววี เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบโยก กระบวนการทดสอบเริ่มจากนำเอาชิ้นทดสอบมาตรวจหาคุณสมบัติเชิงกล เช่น ตรวจสอบการรับแรงดึงและการตรวจสอบหาความแข็งแบบร็อกเวลล, แบบวิกเกอร์ ตลอดจนหาสารผสมในเนื้อวัสดุ โดยที่ขนาดของชิ้นทดสอบอยู่ที่ 70 x 50 มิลลิเมตร ทำการพับที่มุมต่าง ๆ ในการทดสอบจะใช้ระบบ Pneumatic เป็นตัวส่งกำลัง, ควบคุมระยะเวลาการพับรวมถึงอัตราความเร็วในการพับ ซึ่งจะทำให้การพับจะเท่ากันทุกช่วงการทดสอบ จากชิ้นทดสอบที่ได้จะนำไปวัดหามุมองศาของการตีดกลับของวัสดุ ผลการทดสอบเหล็กทั้งสองชนิดมีการตีดกลับ หลังจากการพับเหล็กที่มีความเค้นสูงจะเกิดการตีดกลับมาก ถ้าพับให้มุมองศามากขึ้นการเกิดการตีดกลับจะลดลงการพับเหล็กในองศาที่มากกว่าจะได้องศาตามต้องการและเมื่อพับเหล็กเลขจุดแรงดึงสูงสุดจะทำให้ชิ้นงานแตก

Thesis Title A Study on Compensation of Springback of S50C and SPCC Steel Sheets.

Student Mr. Phasakorn Champargoen

Student ID. 43062046

Degree Master Degree

Programme Mechanical Engineering

Year 2005

Thesis Advisor Assoc.Prof.Thavee Teschareon

Thesis Advisor (co.) Assoc.Prof.Chamlong Prabkeao

ABSTRACT

The objective of this research was to study on mechanical action of springback and to recover of springback by means of materials. Standing model which the materials have forced to press bending to exceed Yield strength and then the materials have to stretch and residual stress to take place a partially springback on S50C and SPCC which mostly used in metal shaping industry. The investigation of these used materials V-bending machine with the help of a rocking-type tester. The testing process commenced from testing the mechanical properties of sample materials:(a tensile strength test, a Rackwell, Vicker hardness test) and material mixture analyzing. The dimension of specimens was 70x50 mm, with different angles. The pneumatic system was used as a power transmitter for bending duration and speed controller in order to obtain the steady bendings throughout the test. After that the springback angles of the materials were measured. It was found that both types of specimens had their own springback properties. After the bending process it was found that the higher stress occurred the more increasingly in springback property occurred but the angles increases, the springback property became less. To obtain the angle required, the

specimens bending angles had to exceed bent. But such bending angle exceeded its tensile strength limit, the specimens were broken.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ. ทวี เทศเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และผศ. จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่
ปรึกษาร่วมงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษางานทางการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิ
เมนต์โดยใช้ Program ABAQUS

ขอขอบคุณ อ. ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล อาจารย์ที่ปรึกษางานทางด้านทฤษฎี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือทดสอบการทนต่อแรงดึง

ขอขอบคุณสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือทดสอบการทนต่อแรงกดอัด

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชม
งคล ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือทดสอบหาสารประกอบทางเคมีและเครื่องมือทดสอบอื่นๆ

ภาสกร จำปาเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 งานวิจัยต่างประเทศ	4
2.2.1 งานวิจัยของ Ampere A.Tseng	4
2.2.2 งานวิจัยของ H.-M. Huang S.-D. Liu ^a , S.Jiang ^b	5
2.2.3 งานวิจัยของ Nan Song , Dong Qian , Jian Cao , Wing Kam Liu ^a , Shaofan Li ^b ..	7
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	10
3.1 ความเค้น (Stress)	11
3.1.1 รูปแบบและชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ	12
3.1.1.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)	12
3.1.1.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.1.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)	12
3.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูปร่าง (Strain and Deformation)	13
3.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป	13
3.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป	13
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress – Strain Relationship)	14
3.3.1 ชนิดของ Strain – Stress Curves	15
3.4 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)	16
3.4.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด	19
3.4.1.1 ความเหนียว (Ductility)	19
3.4.1.2 Module of Elasticity	19
3.5 ความแข็ง (Hardness)	20
3.5.1 วิธีในการทดสอบความแข็ง	20
3.5.1.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)	20
3.5.1.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)	21
3.5.1.3 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)	22
3.6 ทฤษฎีการขึ้นรูปงาน โลหะแผ่น โดยการดัดงอ (Forming)	23
3.6.1 ทฤษฎีการงอ (Bending Theory)	24
3.6.2 แกนสะเทิน (Neutral Axis)	24
3.6.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)	26
3.6.4 การเคลื่อนไหวของโลหะระหว่างการขึ้นรูป (Metal Movement)	27
3.6.5 การติดตัวกลับของชิ้นงาน (Springback)	27
3.6.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณค่า Springback	29
3.7 ทฤษฎีการใช้ FEM Model ช่วยในการทำแบบจำลองการพับ	34
3.7.1 การใช้โปรแกรม ABAQUS ช่วยในการทำแบบจำลอง	34
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	35
4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	35
4.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)	35
4.1.2 การทดสอบหาความแข็งของวัสดุ (Hardness Test)	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.3 การตรวจสอบหาสารประกอบของวัสดุ (Composite Test)	36
4.2 วิธีการทดสอบค่าการเกิด Springback	37
4.2.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ	37
4.2.2 วิธีทำการพับวัสดุในการทดสอบ	37
4.2.3 กระบวนการหาองศาการคืนกลับ	38
4.2.4 กระบวนการหาองศาการคืนกลับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
4.2.4.1 FEM Model	39
4.2.4.2 ขั้นตอนการสร้าง Module Part	39
4.2.4.3 ขั้นตอนการสร้าง Module Property	40
4.2.4.4 กำหนดค่า Section ของวัสดุที่ทำการทดลอง	43
4.2.4.5 กำหนดค่า Profile Manager ของวัสดุที่ทำการทดลอง	44
4.2.4.6 ขั้นตอนการสร้าง Module Assembly	45
4.2.4.7 ขั้นตอนการสร้าง Module Step	46
4.2.4.8 ขั้นตอนการสร้าง Module Interaction	47
4.2.4.9 ขั้นตอนการสร้าง Module Load	48
4.2.4.10 ขั้นตอนการสร้าง Module Mesh	48
4.2.4.11 ขั้นตอนการสร้าง Module Job	49
4.2.4.12 ขั้นตอนการสร้าง Module Visualization	50
4.2.4.13 การหาองศาการเกิด Springback จาก Node	51
4.3 วิธีการชดเชยองศาการคืนกลับของวัสดุ	52
4.3.1 วิธีการชดเชยองศาการคืนกลับโดยการทดลอง	52
4.3.2 วิธีการชดเชยองศาการคืนกลับโดยทางทฤษฎี	52
4.3.3 วิธีการชดเชยองศาการคืนกลับโดยการทำแบบจำลอง	52
บทที่ 5 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์	53
5.1 ผลการทดสอบลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	53
5.1.1 ผลการทดสอบหาสารประกอบในเนื้อวัสดุ	53
5.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางด้านความแข็ง	55
5.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางด้านแรงดึง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2 ผลการทดสอบการพับวัสดุและการชดเชยของศาการตีคกลับ	57
5.2.1 ผลการทดสอบหาการตีคกลับของวัสดุทางปฏิบัติ	57
5.2.2 ผลการทดสอบหาการตีคกลับของวัสดุทางทฤษฎี	61
5.2.3 ผลการทดสอบหาการตีคกลับของวัสดุโดยวิธีการทำแบบจำลอง	61
5.2.3.1 ผลการทดสอบการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. โดยวิธีการทำ แบบจำลอง	61
5.2.3.2 ผลการทดสอบการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. โดยวิธีการทำ แบบจำลอง	64
5.2.3.3 ผลการทดสอบการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. โดยวิธีการทำ แบบจำลอง.....	66
5.2.3.4 ผลการทดสอบการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. โดยวิธีการทำ แบบจำลอง	69
5.2.3.5 ค่าความเครียดพลาสติกจุดกึ่งกลาง Element ที่เกิดจากการพับ	71
5.2.4 เปอร์เซ็นต์ค่า Error ของการทดสอบการตีคกลับของวัสดุ	108
5.2.5 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับ	110
5.2.5.1 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm	110
5.2.5.2 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm	115
5.2.5.3 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm	119
5.2.5.4 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm	123
5.2.6 กราฟผลการทดสอบการตีคกลับระหว่างการทดลองกับทฤษฎี	129
5.2.7 ผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับ	137
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	140
6.1 สรุปผลการวิจัย	140
6.2 ข้อเสนอแนะ	141
6.2.1 ปัญหาที่เกิดจากการทำงานวิจัย	141
6.2.2 ทิศทางในการทำงานวิจัยขั้นต่อไป	141

บรรณานุกรม	142
------------------	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. พื้นฐานในการทดสอบแรงดึง	143
ภาคผนวก ข. สารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัย	162
ข-1 ผลการตรวจสอบความแข็งของวัสดุชนิด S50C	163
ข-2 ผลการตรวจสอบความแข็งของวัสดุชนิด SPCC	164
ข-3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุ	165
ข-4 ตารางเปรียบเทียบเกรดเหล็กตามมาตรฐานประเทศต่าง ๆ	166
ข-5 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่าง ๆ	167
ภาคผนวก ค. อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ	168
ค-1 Diagram และชุดอุปกรณ์ Control ระบบการทำงานของระบบ Pneumatic	169
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้ขึ้นประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล	174
ง-1 การศึกษาการชดเชยการคืบกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC	175
ภาคผนวก จ. ตัวอย่างการคำนวณค่าที่ทดสอบ	185
จ-1 การคำนวณหาค่าการเกิดการ Springback	186
จ-2 การคำนวณชดเชยการเกิด Springback	186
ประวัติผู้เขียน	188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดง Condition ในการ Simulation ของวัสดุ	5
2.2 แสดงคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบวัสดุ	5
2.3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ AI 5182 ที่ใช้ในการทดสอบ	8
3.1 มาตรฐานสากลสำหรับวัสดุวิศวกรรมและการทดสอบสมบัติของวัสดุ	11
3.2 แสดงค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	20
4.1 แสดงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	35
5.1 แสดงค่าสารประกอบของวัสดุ S50C	53
5.2 แสดงค่าสารประกอบของวัสดุ SPCC	54
5.3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความแข็งของ S50C และ SPCC	55
5.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SPCC และ SPCC	55
5.5 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ S50C ขนาด 1 mm	57
5.6 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ S50C ขนาด 2 mm	58
5.7 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm	59
5.8 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm	60
5.9 แสดงผลการทดสอบการตีกลับโดยทางทฤษฎี	61
5.10 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา	62
5.11 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา	62
5.12 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา	62
5.13 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา	62
5.14 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา	63
5.15 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา	63
5.16 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา	63
5.17 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา	63
5.18 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา	64
5.19 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา	64
5.20 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา	64
5.21 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา	65
5.22 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา	65
5.23 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา	65

เอกสาร 5.24 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา 65

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.25 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา	66
5.26 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา	66
5.27 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา	66
5.28 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา	66
5.29 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา	67
5.30 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา	67
5.31 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา	67
5.32 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา	67
5.33 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา	68
5.34 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา	68
5.35 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา	68
5.36 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา	68
5.37 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา	69
5.38 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา	69
5.39 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา	69
5.40 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา	69
5.41 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา	70
5.42 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา	70
5.43 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา	70
5.44 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา	70
5.45 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา	71
5.46 แสดงตำแหน่ง Element ที่ทำการวัดค่าความเครียดพลาสติก	71
5.47 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา	72
5.48 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา	73
5.49 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา	74
5.50 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา	75
5.51 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา	76
5.52 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา	77
5.53 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา	78
5.54 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.55 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา ..	80
5.56 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา ..	81
5.57 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา ..	82
5.58 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา ..	83
5.59 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา ..	84
5.60 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา ..	85
5.61 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา ..	86
5.62 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา ..	87
5.63 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา ..	88
5.64 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา ..	89
5.65 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา ..	90
5.66 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา ..	91
5.67 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา ..	92
5.68 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา ..	93
5.69 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา ..	94
5.70 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา ..	95
5.71 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา ..	96
5.72 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา ..	97
5.73 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา ..	98
5.74 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา ..	99
5.75 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา ..	100
5.76 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา ..	101
5.77 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา ..	102
5.78 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา ..	103
5.79 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา ..	104
5.80 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา ..	105
5.81 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา ..	106
5.82 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา ..	107
5.83 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ SPCC ขนาด 1 mm	108
5.84 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ S50C ขนาด 1 mm	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.115 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา.	124
5.116 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา.	125
5.117 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา.	125
5.118 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา.	126
5.119 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา.	126
5.120 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา.	127
5.121 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา.	127
5.122 แสดงค่าการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 และ 2 mm.	128
5.123 แสดงค่าการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 และ 2 mm.	128
ข-4 ตารางเปรียบเทียบเกรดเหล็กตามมาตรฐานประเทศต่าง ๆ	166
ข-5 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่าง ๆ	167



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap	6
2.2 แสดงแรงที่ใช้ในการบีบอัดวัสดุเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap	6
2.3 แสดงความเค้นที่เกิดจากความหนาเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap	7
2.4 แสดงการเกิด Springback ที่มีผลต่อความหนาของ Die Gap	7
2.5 แสดงวิธีที่ใช้ในการทดสอบ	8
2.6 แสดงผลการเกิด Springback ของวัสดุ	8
3.1 แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด	12
3.2 แสดงลักษณะของแรงเฉือน	13
3.3 ลักษณะของความเครียด	14
3.4 แสดงภาพความเค้นความเครียด (Stress – Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	15
3.5 แสดง Stress-Strain Curves ในแบบต่างๆ (a) Perfectly elastic. (b) Rigid, perfectly plastic. (c) Elastic, perfectly plastic. (d) Rigid, linearly strain hardening. (e) Elastic, linearly strain hardening	16
3.6 เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	18
3.7 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น – ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	18
3.8 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล	21
3.9 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล	22
3.10 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	23
3.11 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ	25
3.12 การไหลของโลหะและการบิดงอ	26
3.13 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการงอโลหะ	28
3.14 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback	30
3.15 แสดง Diagrams maximum-shear-stress และ กฎเกณฑ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงาน	30
3.16 แสดงพิกัดสำหรับการวิเคราะห์ระบบการงอ	31
3.17 แสดงความเค้นกระจายช่วง Elastic และ Plastic	32
4.1 แสดงรูปของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง	36
4.2 แสดงเครื่องทดสอบ BAIRD Spectrovac 1000 Model OV4 SERIAL 2054	37
4.3 แสดงเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ	38
4.4 แสดงเครื่อง Profile Projector Model PJ 311	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงรูปแบบของ FEM Model แบบ 3 มิติ	39
4.6 แสดงชื่อชิ้นส่วนต่างๆ ของชิ้นส่วนในการทดสอบ	39
4.7 แสดงรูปชิ้นส่วนต่างๆ ของ Part	40
4.8 แสดงวิธีการหาค่า Stress-Strain บนเส้นกราฟการทดลอง	41
4.9 แสดงค่าของวัสดุชนิด SPCC ที่ได้จากการทดสอบ	42
4.10 แสดงค่าของวัสดุชนิด S50C ที่ได้จากการทดสอบ	43
4.11 แสดงค่าของ Section ของวัสดุ	44
4.12 แสดงถึงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	44
4.13 แสดงจุดอ้างอิงบนชิ้นงานทดสอบ	45
4.14 แสดง Part ต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน	45
4.15 แสดงชื่อของผิวสัมผัสแต่ละด้านของชิ้นงาน	46
4.16 แสดงผิวสัมผัสของการทำงานแต่ละ Step	47
4.17 แสดงการกำหนด Master Surface และ Slave Surface	47
4.18 แสดงการลำดับการทำงานในส่วนของ Boundary Condition	48
4.19 แสดงการแบ่ง Element ของชิ้นทดสอบ	49
4.20 แสดงการ Create Job	49
4.21 แสดงผลที่ได้จากการ Run Program	50
4.22 แสดงค่าความเค้นที่เกิดจากการทำแบบจำลอง	51
4.23 แสดงการหาค่า X , Y ในแต่ละ Node	51
5.1 แสดงกราฟการทดสอบค่า Stress และ Strain ของวัสดุ SPCC	56
5.2 แสดงกราฟการทดสอบค่า Stress และ Strain ของวัสดุ S50C	56
5.3 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10°	72
5.4 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20°	73
5.5 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30°	74
5.6 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40°	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. ที่ 50°	76
5.8 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. ที่ 60°	77
5.9 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. ที่ 70°	78
5.10 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. ที่ 80°	79
5.11 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. ที่ 90°	80
5.12 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10°	81
5.13 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20°	82
5.14 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30°	83
5.15 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40°	84
5.16 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50°	85
5.17 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60°	86
5.18 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70°	87
5.19 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80°	88
5.20 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90°	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10°	90
5.22 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20°	91
5.23 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30°	92
5.24 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40°	93
5.25 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50°	94
5.26 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60°	95
5.27 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70°	96
5.28 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80°	97
5.29 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90°	98
5.30 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10°	99
5.31 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20°	100
5.32 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30°	101
5.33 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40°	102
5.34 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50°	103
5.35 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60°	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70°	105
5.37 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80°	106
5.38 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90°	107
5.39 แสดงค่าการตีคกลับ (Ks) ที่องศาการพับต่าง ๆ ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.	129
5.40 แสดงค่าการตีคกลับ (Ks) ที่องศาการพับต่าง ๆ ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.	129
5.41 แสดงค่าการตีคกลับ (Ks) ที่องศาการพับต่าง ๆ ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.	130
5.42 แสดงค่าการตีคกลับ (Ks) ที่องศาการพับต่าง ๆ ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm.	131
5.43 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทดลอง	132
5.44 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.23	132
5.45 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.24	133
5.46 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPPC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทำไฟไนต์อีลิเมนต์	133
5.47 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทดลอง	134
5.48 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.23	135
5.49 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.24	135
5.50 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทำไฟไนต์อีลิเมนต์	136
5.51 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่องศาต่าง ๆ	137
5.52 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ	138
5.53 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่องศาต่าง ๆ	138
5.54 แสดงองศาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 139

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-1-1 แสดง Diagram ระบบ Pneumatic ของระบบ Control	169
ค-1-2 แสดงเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ	170
ค-1-3 แสดงแผนควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ	170
ค-1-4 แสดงการติดตั้งชุดกระบอก Pneumatic กับเครื่องทดสอบ	171
ค-1-5 แสดงการติดตั้ง Lever Roller-Spring 3/2 กับเครื่องทดสอบ	171
ค-1-6 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดองศาการทดสอบ	172
ค-1-7 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดสอบหาค่าการเกิดการดีดกลับ	172
ค-1-8 แสดงวัสดุที่ได้หลังจากการพับ	173



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการทำผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพ เพื่อการแข่งขันกันทางการตลาดในการพัฒนาการทำผลิตภัณฑ์ให้มีสวยงามและมีความทันสมัย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้มาซึ่งการตลาด แต่จุดหนึ่งซึ่งไม่สามารถที่จะลืมไปได้ คือ การทำการผลิตที่รวดเร็วและมีคุณภาพ ผลการผลิตสามารถออกมาได้เต็มที่ เกิดการเสียหายจากการผลิตน้อย จึงจะทำให้ได้มาซึ่งกำไรจากการผลิต จากการขึ้นรูปโลหะโดยกรรมวิธีที่ไม่ถูกต้อง ไม่มีความรู้ทางกลไกของการขึ้นรูป เป็นผลทำให้เกิดการเสียหายต่อวัสดุเป็นจำนวนมาก การพับวัสดุในทิศทางเดียวกันซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง ทำให้วัสดุไม่สวยงาม อีกทั้งความแข็งแรงจะน้อยลงและยังเสียเวลาในการผลิตด้วย

จากเหตุผลในข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาหาความเป็นไปได้ของพฤติกรรมของวัสดุที่เกิดจากการพับ จึงจะทำให้รู้ถึงลักษณะและพฤติกรรมการติดกลับของวัสดุ ซึ่งจะช่วยนำไปสู่การหาวิธีการชดเชยการติดกลับของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในแวดวงอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการพับขึ้นรูปแบบคงรูปทำให้วัสดุเกิดแรงกดพับจนเกิดการเสียรูป ซึ่งทำให้วัสดุมีการเสียรูปแบบพลาสติกและแบบยืดหยุ่นผสมกัน ทำให้วัสดุนั้นติดกลับมาอย่างไร

1.2.2 ศึกษาการติดกลับของวัสดุและการชดเชยของสากการพับของวัสดุ เพื่อให้ได้มาตามองศาที่ต้องการ โดยการนำองศาการติดกลับมาชดเชย

1.2.3 ทำการเปรียบเทียบกันในทางปฏิบัติ, ทางทฤษฎีและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร

1.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำสมการมาชดเชยในการพับวัสดุ สามารถนำมาใช้ได้หรือไม่

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 การศึกษาการติดกลับของวัสดุ ที่เกิดจากการพับขึ้นรูปแบบคงรูป สามารถที่จะลดการเกิดการติดกลับของวัสดุได้

1.3.2 วิธีการชดเชยการติดกลับของวัสดุเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สำหรับการพับวัสดุแบบขึ้นรูปและสามารถให้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

1.3.3 นำค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุแต่ละชนิดมาคิดหาการเกิดการติดกลับ สามารถทำให้รู้ถึงองศาการติดกลับและสามารถนำมาชดเชยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 การนำไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) มาช่วยในการวิเคราะห์การเกิดการบิดกลับ สามารถเห็นภาพความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นในวัสดุ

1.3.5 การชดเชยของเสาการบิดกลับ จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าและสามารถที่จะให้ค่าใกล้เคียงกับองศาการพับจริงมากที่สุด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 จากการพับวัสดุในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบคงรูป ไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เพราะวัสดุที่ทำการขึ้นรูปไม่เป็นไปตามความต้องการหรือมีความสำเร็จน้อย ทั้งนี้เกิดจากการคืนรูปของวัสดุที่ทำให้เกิดการคืนตัวพยายามกลับสู่สภาพปกติ

1.4.2 ทำอย่างไรที่จะทำให้วัสดุที่ทำการพับขึ้นรูปลดการบิดกลับสู่สภาพปกติหรือการหาวิธีการพับวัสดุให้ได้ตามองศาที่ต้องการ โดยที่ใช้แรงกระทำที่มากกว่าปกติหรือองศาที่มากกว่าเดิม เพื่อเวลาที่วัสดุมีการคืนตัวแล้ววัสดุจะมาอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการ

1.4.3 ทำการทดลองเพื่อหาองศาที่เหมาะสมในการพับวัสดุ โดยมีการเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองทางทฤษฎีและการทำไฟไนต์อีลิเมนต์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ทำการศึกษาการชดเชยการบิดกลับของเหล็กแผ่นชนิด SPCC และ S50C ที่ความหนา 1 และ 2 mm. โดยทำการพับที่ 10 องศาถึง 90 องศา โดยการพับจะเพิ่มองศาการพับทีละ 10 องศา

1.5.2 ทำการทดลองการพับวัสดุ SPCC และ S50C โดยวิธีการพับขึ้นรูป

1.5.3 ทำการศึกษาค่าความแตกต่างองศาการบิดกลับของวัสดุทั้งสองชนิด โดยวิธีการทดลองวิธีทางทฤษฎี และวิธีทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์

1.5.4 ทำการชดเชยของเสาการบิดกลับของวัสดุ SPCC และ S50C โดยวิธีการทดลอง วิธีทางทฤษฎี และวิธีทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 นำวัสดุ SPCC และ S50C ที่ใช้ในการทดสอบมาหาค่าความแข็งของวัสดุ

1.6.2 นำวัสดุมาทำการหาสารประกอบทางเคมีในเนื้อวัสดุ เพื่อดูค่าส่วนประกอบหลักของเนื้อวัสดุทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างไร

1.6.3 นำวัสดุทั้ง 2 ชนิดมาทำการทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกล เช่น Yield Strength , Elastic Modulus และ Plastic Behavior.

1.6.4 ทำการทดลองหับวัสดุ SPCC และ S50C ที่ความหนา 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ และวัดองศาที่ได้จากการหับ

1.6.5 นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าการติดกลับ

1.6.6 ทำการวิเคราะห์การติดกลับด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยนำเอาคุณสมบัติการทดสอบแรงดึงมาใช้ในการวิเคราะห์

1.6.7 ทำการเพิ่มองศาการหับโดยใช้องศาการติดกลับเป็นตัวแปร เพื่อให้ได้องศาที่ใกล้เคียงองศาจริงมากที่สุด

1.6.8 นำค่าที่เกิดจากการติดกลับมาเพิ่มในสมการหาองศาการติดกลับ และค่าที่ได้จะเป็นค่าที่ได้จากการการชดเชยการติดกลับ

1.6.9 นำองศาที่ได้จากการหับโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ที่องศาต่าง ๆ มาหาค่าที่ใกล้เคียงองศาจริงมากที่สุดและทำไฟไนต์อิลิเมนต์หาองศาการหับจริง

1.6.10 นำค่าที่ได้จากการทดลองทางทฤษฎี และการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทำให้ทราบถึงกระบวนการติดกลับของวัสดุ SPCC และ S50C ว่าวัสดุที่มีความเครียดต่างกันจะมีค่าองศาการติดกลับต่างกันอย่างไร

1.7.2 องศาที่ได้จากการติดกลับในส่วนของการทดลอง, ส่วนของทางทฤษฎี และด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ มีค่าแตกต่างกันมากเนื่องมาจากสาเหตุใดบ้าง

1.7.3 กราฟที่ได้จากการชดเชยการติดกลับของวัสดุ SPCC และ S50C ในด้านการทดลองสามารถนำมาใช้งานจริง โดยที่องศาการหับที่เกิดขึ้นเมื่อทำการหับ จากกราฟการชดเชยขององศาการติดกลับทางด้านการทดลอง จะมีค่าผิดพลาดน้อยมากเมื่อทำการเทียบกับทางทฤษฎีและทางด้านไฟไนต์อิลิเมนต์

1.7.4 ทำให้ทราบถึงโครงสร้างของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออยู่ในช่วงของความเครียดพลาสติกโดยการทำไฟไนต์อิลิเมนต์

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแบบคงรูปมีปัญหา จากการทำให้วัสดุขึ้นรูปตามความต้องการ แต่ไม่สามารถที่จะทำได้เพราะวัสดุที่ทำการขึ้นรูปนี้ จะเกิดการคืนกลับเมื่อแรงกระทำ ที่เป็น เช่นนี้เพราะค่าความเค้นที่ตกค้างภายในเนื้อวัสดุ อีกทั้งความเค้นตกค้างที่อยู่ในเนื้อวัสดุแต่ละชนิด มีค่าไม่เท่ากันจึงทำให้การขึ้นรูปมีปัญหา หาก ถ้าสามารถกำหนดขั้นตอนหรือกำหนดสมการในการคำนวณที่จะทำให้กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบคงรูปเป็นไปได้ง่าย และสามารถที่จะทำให้วัสดุมีความสวยงามและเที่ยงตรงมากขึ้นด้วย

2.2 งานวิจัยต่างประเทศ

2.2.1 งานวิจัยของ Ampere A. Tseng

การขึ้นรูปโลหะในอุตสาหกรรม หลังจากทำการพับหรือการทำให้งอด้วยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ จะทำให้เกิดการ Springback เกิดขึ้น ผู้ศึกษาจึงทำการหาวิธีการทำนายการเกิด Springback โดยทำการหาค่าการคืนกลับของชิ้นงาน (Elastic) ในช่วงที่ทำการพับวัสดุ และหาวิธีการชดเชยสำหรับเครื่องจักรคือ การชดเชยของสภาวะการขึ้นรูปหรือรูปแบบของแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ

ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงทำการวิจัยเปรียบเทียบการทำนายหรือการวิเคราะห์การเกิด Springback กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของการพัฒนาสูตรในการวิเคราะห์ ถ้าความน่าเชื่อถือหรือความแม่นยำเป็นจริง ก็สามารถที่จะกำหนดสูตรการวิเคราะห์ได้และจะเป็นประโยชน์มากในการช่วยในการผลิต

ฉะนั้นประเด็นสำคัญของงานวิจัยหลักของผู้ทำการศึกษา คือ การทดลองเกี่ยวกับการ Springback ของวัสดุชนิดแผ่นบางคือ

1) พัฒนาสูตรการวิเคราะห์เพื่อทำนายการ Springback ของ Sheet Metal ภายใต้การ Bending Operation.

2) เพื่อค้นหาค่าประกอบสำคัญ ในการยึดของวัสดุที่อยู่ภายใต้เงื่อนไข และระบบองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับการ Springback.

3) ควบคุมการทดสอบการ Springback ใน V – Shape bend tester และวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

- 4) ใช้การ Springback เพื่อบอกร่องค้ประกอบในการยึดที่หามาได้จากข้อ 2 และเอาไปใส่ในสูตรการวิเคราะห์ที่หามาได้จากข้อที่ 1 เพื่อทำนายการ Springback จากเงื่อนไขในการ Bending.
- 5) เปรียบเทียบข้อมูลการวิจัยเพื่อทำนายผลการวิเคราะห์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างการวิจัยและข้อมูล
- 6) ประเมินข้อสรุป โดยเฉพาะอย่างยิ่งความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องของการทำนายการวิเคราะห์

2.2.2 งานวิจัยของ H. - M. Huang S. - D. Liu^a, S. Jiang^b

ผู้ศึกษาทำการศึกษากับการ Springback ของเหล็กแผ่น ที่ผ่านกระบวนการพับงอโดยการทำนายทางตัวเลขที่เกี่ยวกับ Springback เพื่อให้เกิดความแม่นยำในกระบวนการผลิต โดยการเปรียบเทียบเกี่ยวกับการปฏิบัติ โดยคำนึงถึงความหนาของวัสดุและองศาการโค้งมนของแผ่นทดสอบ และคำนึงถึงสารประกอบที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุด้วยอีกทั้ง Gap ของชุด Die ในการวิเคราะห์

ผู้ทำการศึกษา ซึ่งนำโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์มาช่วยในการทำแบบจำลอง เพื่อทำนายการเกิด Springback ในกระบวนการผลิต อีกทั้งช่วยลดต้นทุนในการผลิต

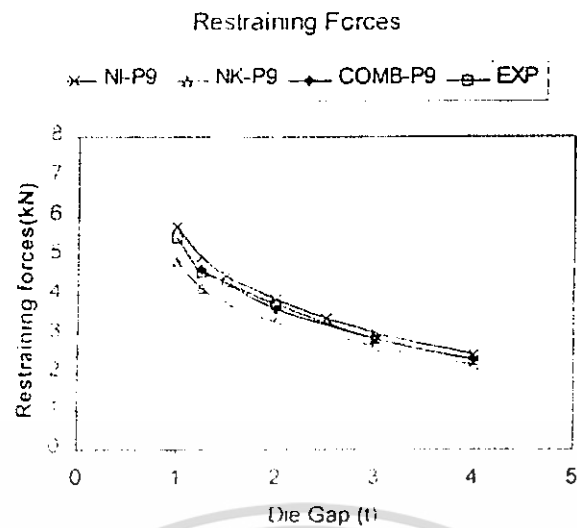
ตารางที่ 2.1 แสดง Condition ในการ Simulation ของวัสดุ

Analysis label	Element	Hardening model	Through thickness
NI-IP	8 node reduced integration shell element S4R	Nonlinear isotropic hardening model ($\beta=1.0$)	9 integration points
NK-IP	8 node reduced integration shell element S4R	Nonlinear kinematic hardening model ($\beta=0.0$)	9 integration points
COMB-IP	8 node reduced integration shell element S4R	A combined nonlinear isotropic/kinematic hardening model ($\beta=0.5$)	9 integration points
NK-CPE8-LA	8 node biquadran plane strain element	Nonlinear kinematic hardening model ($\beta=0.0$)	8 layers
EXP	experimental results		

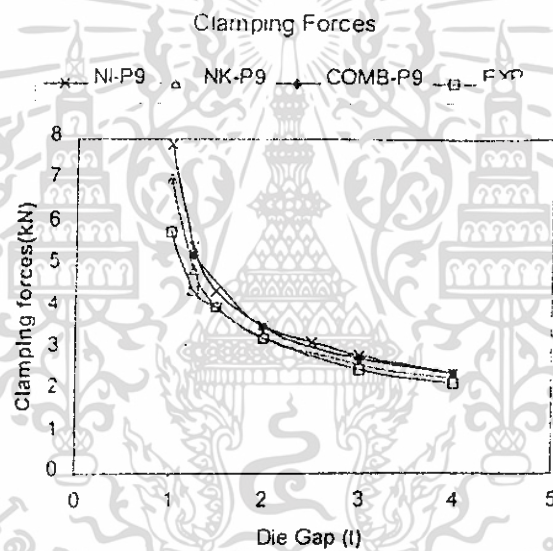
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบวัสดุ

	Thickness (mm)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Total elong (%)	N	R
Rolling direction	0.9	347	454	17.7	0.18	0.73
Transverse direction	0.9	387	466	19.9	0.18	0.94

จากกราฟการทดสอบ จะเห็นว่าเส้นกราฟทั้งทางด้านทดสอบ และทางด้านทฤษฎี เป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

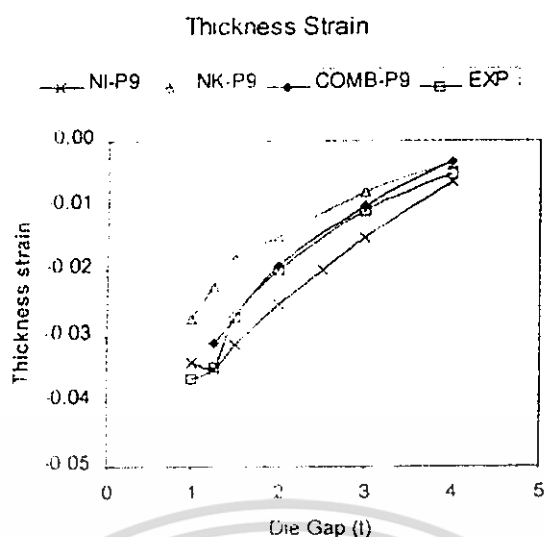


รูปที่ 2.1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap

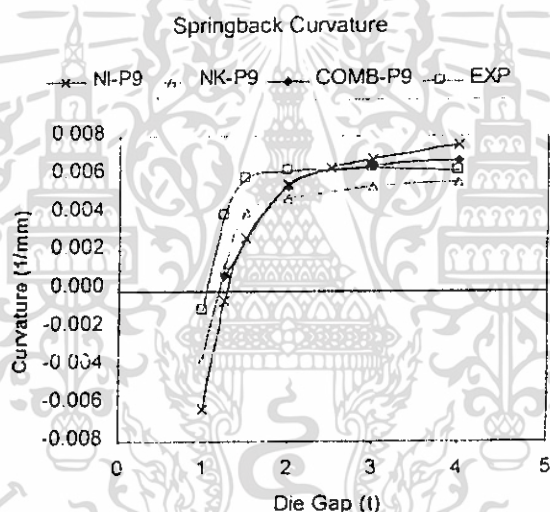


รูปที่ 2.2 แสดงแรงที่ใช้ในการยึดวัสดุเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงความเค้นที่เกิดจากความหนาเปรียบเทียบกับความหนาของ Die Gap



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิด Springback ที่มีผลต่อความหนาของ Die Gap

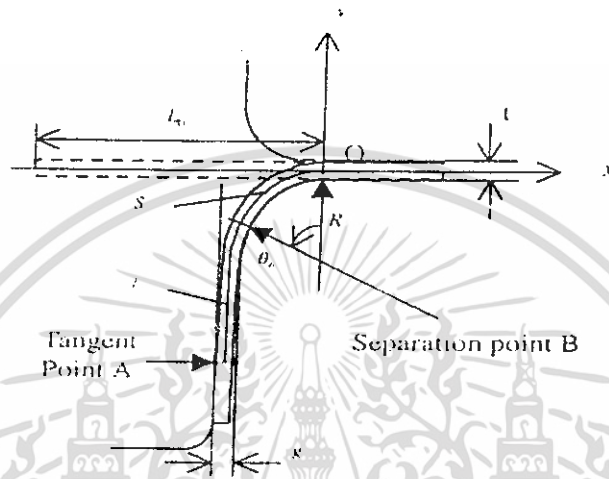
2.2.3 งานวิจัยของ Nan Song, Dong Qian, Jian Cao, Wing Kam Liu^a Shaofan Li^b

วัตถุประสงค์ของผู้ทำวิจัย คือ การหาค่าความน่าเชื่อถือของความแตกต่างในวิธีการเพื่อทำนายการทดลองเรื่อง Straight Flanging Operation กล่าวคือ การควบคุมโดยการทำนายหลักอยู่ที่ การเข้าถึงของข้อมูล เช่น ต้นแบบในการวิเคราะห์ การเลียนแบบในเรื่องของตัวเลขที่ใช้ใน Finite Element Method (FEM) และ The Mesh free Method ใช้ The Reproduction Kernel Particle Method (RKPM) เพื่ออภิปรายการกำหนดตัวอย่างของปัญหา คือ จำนวนและเปรียบเทียบเพื่อทำการทดลอง การวิเคราะห์ด้านตัวเลขจะแสดงการทำนายจาก 3D Mesh free และ FEM 2D Solid Model เพื่อจัดการการทำนายที่ดีที่สุดของการ Springback ให้มากกว่า The Isotropic Hardening Law

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

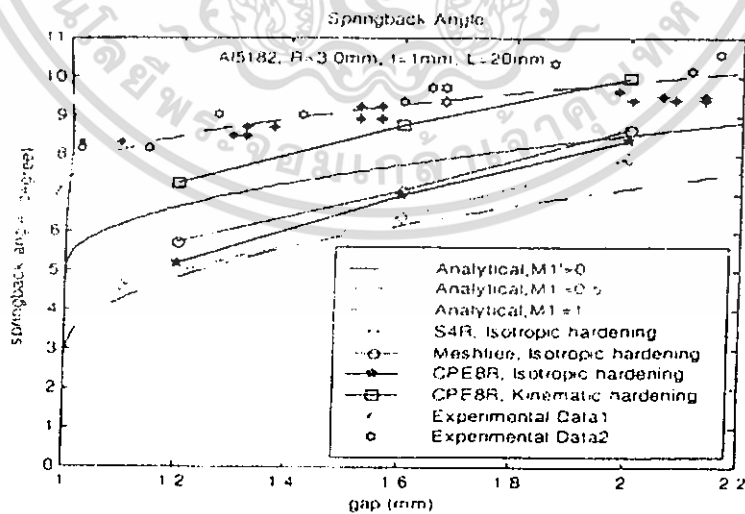
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ AI 5182 ที่ใช้ในการทดสอบ

E	ν	σ_y	K	n
70GPa	0.3	146MPa	592MPa	0.306



รูปที่ 2.5 แสดงวิธีที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบของผู้ทำการทดลองใช้แบบ Punch - Die องค์กรของวัสดุขึ้นอยู่กับองศาของตัว Die กับระยะของ Gap และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ



รูปที่ 2.6 แสดงผลการเกิด Springback ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าทิศทางของการเกิด Springback เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด แต่ค่าที่ได้จากตัวสมการมีค่าที่น้อยกว่าการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง gap ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณ ไม่สามารถที่จะคำนวณหาได้ครอบคลุมตามสภาพความเป็นจริง คือ การแก้ปัญหาการวิเคราะห์ เนื่องจากขาดแคลนความเข้าใจในเรื่องของการกระจาย Stress ให้ตลอด Sheet ซึ่งข้อจำกัดในการวิเคราะห์เพื่อเข้าถึงเกิด จากการใช้เรขาคณิตแบบง่าย ๆ วิธีการคำนวณทางด้านตัวเลขเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความสับสนมาก อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องในเรื่องของตัวเลขเกิดขึ้นจากขาดแคลนวิธีการที่เหมาะสม และส่วนประกอบในการคำนวณที่มีขีดจำกัดที่จะแก้ปัญหา

อีกสิ่งหนึ่งที่นำเป็นห่วง คือ การตีวงจำกัดในเรื่องของอุปสรรคของการใช้ Mesh free Method. ซึ่งเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนาในวิธีการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ผลประโยชน์ของ Meshfree Method คือ สามารถช่วยในเรื่องของต้นแบบที่มีความหลากหลายมากมายชนิด และให้รายละเอียดทางเรขาคณิตที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง เช่น การสัมผัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มเติมในเรื่องของรูปแบบคลื่นจาก Mesh free ค่าโดยประมาณสามารถจับประสิทธิภาพพลังงานของรอยยับและลักษณะการโค้งงอ ดังนั้น ผลลัพธ์ของการ Stress สามารถให้รายละเอียดที่แม่นยำในการเลียนแบบ

วัตถุประสงค์ของกระดาษแผ่นนี้ คือ การเลียนแบบขั้นตอนการ Flanging และ Springback โดยใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ และวิธีการ Mesh free ใช้ The Reproduction Kernel Particle Methods (RKPM) ขั้นตอนการคำนวณการสัมผัสใน RKPM Method และการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ของค่ามุมการ Springback ได้เกิดการพัฒนาค้นคว้าขึ้นนี้ ให้เกิดการเปรียบเทียบของข้อมูลกับผลการทดลองสำหรับ Straight Flanging Process ในการไตสวนอยู่ภายใต้ทิศทางสำหรับเงื่อนไขในเรื่องของความสลับซับซ้อนทางเรขาคณิตและความยุ่งยากของการผิรูปร่าง

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

การเลือกใช้วัสดุจะขึ้นอยู่กับสมบัติ (Properties) ซึ่งผู้ออกแบบมักจะทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการสำหรับผลิตชิ้นส่วนที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุอีกหลาย ๆ ชนิด เพื่อทำการเลือกใช้ให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด หากจะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ โดยละเอียดแล้ว ก็จะมีมากกว่าร้อยอย่างจากการทดสอบในห้องทดลอง และบางอย่างก็เป็นคุณสมบัติเฉพาะ ซึ่งมีขอบข่ายใช้งานที่แคบมาก เราไม่สามารถที่จะอธิบายทั้งหมดได้ในหนึ่งหน่วยเรียน ดังนั้น จะกล่าวเฉพาะสมบัติที่สำคัญที่วิศวกรควรจะต้องรู้และเข้าใจ บางอย่างจะถูกกล่าวถึงในรายละเอียดของการวัดและการแปลค่าทดสอบ

สมบัติทางเคมี (Chemical properties) เป็นลักษณะทางด้านการฟอร์มของวัสดุและลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุ ตัวอย่างของสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ ส่วนผสม (Composition) โครงสร้างผลึกหรือรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอม (Crystal structure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยลักษณะของโครงสร้างจุลภาคจะได้รับการจัดให้ผิวหน้าของวัสดุเรียบและกักรวด เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) จะเห็นแต่ละเฟสและขนาดของเกรน การกัดกร่อน (Corrosion) และลักษณะของสิ่งแปลกปลอมที่ปนอยู่ในส่วนผสม (Include) สมบัติทางด้านเคมีนี้ไม่สามารถมองเห็นหรือสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ส่วนมากจะทำการวัดในห้องทดลอง

สมบัติทางด้านกายภาพ (Physical Properties) เป็นลักษณะของวัสดุที่เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาหรือการสนองตอบเมื่อมีรูปแบบของพลังงานเข้ามากระทำกับวัสดุ สามารถทำการวัดได้โดยไม่ต้องทำลายวัสดุ ตัวอย่างของสมบัติทางด้านกายภาพ ได้แก่ จุดหลอมเหลว (Melting point) เป็นลักษณะการหลอมเหลว เนื่องจากความร้อนหรือแสดงจุดเริ่มแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง สมบัติทางด้านความร้อน ซึ่งจะเกี่ยวกับลักษณะการนำความร้อน (Thermal conductivity) และการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Expansion) สมบัติทางด้านกายภาพอื่น ๆ อีกได้แก่ การนำไฟฟ้า สมบัติทางด้านแม่เหล็ก แสง เสียง และสีที่เรามองเห็น

สมบัติเชิงกล เป็นลักษณะการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำกับวัสดุ สมบัตินี้จะมีความสำคัญอย่างมากในการเลือกใช้วัสดุเพื่อไปออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักร อุปกรณ์ หรือนำไปใช้เป็นวัสดุที่ต้องรองรับแรงกระทำ สมบัติเชิงกลจะเป็นตัวบ่งบอกว่า วัสดุนั้นสามารถรับแรงหรือทนทานต่อแรงกระทำจากภายนอกได้มากหรือน้อยเท่าไร นอกจากนี้สมบัติเชิงกลจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการทำงานหรือใช้งานได้อย่างปลอดภัยของชิ้นส่วนหรือเครื่องจักรนั้นได้ สมบัติเชิงกลที่สำคัญ ได้แก่ ความแข็งแรง (Strength), ความเหนียว (Ductility), ความสามารถในการขึ้น

รูป (Formability) และความแข็งแรง (Rigidity) การที่จะได้ค่าการทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้จะได้จากการทดสอบที่อยู่ในลักษณะการทำลายวัสดุ

วิธีการทดสอบเพื่อนำข้อมูลของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ไปเลือกใช้วัสดุ สำหรับทำการออกแบบหรือผลิตเป็นเครื่องจักร หรืออุปกรณ์ให้เกิดความปลอดภัย สามารถทำได้หลายวิธีการ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของสมบัติเชิงกลรวมทั้งการทดสอบที่สำคัญบางประเภท เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับศึกษาในขั้นต่อไป

ในการทดสอบหรือวัดค่าของสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ จะต้องมียุทธวิธีทดสอบที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานที่เป็นสากลและมีใช้กันในระดับนานาชาติ มีมากมายหลากหลายมาตรฐาน ซึ่งในแต่ละมาตรฐานจะแนะนำวิธีการทดสอบพร้อมกับการแปลค่าความหมายของการทดสอบ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบให้เป็นมาตรฐานอื่น ๆ ได้ด้วย ตัวอย่างของมาตรฐานสากลเหล่านี้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานสากลสำหรับวัสดุวิศวกรรมและการทดสอบสมบัติของวัสดุ

Standard organization	Acronym
American Iron and Steel Institute	AISI
American Society for Testing and Material	ASTM
American Society of Mechanical Engineering	ASME
Society of Automotive Engineering	SAE
Japanese Industrial Standard	JIS
International Standardizing Organization	ISO
Deutsches Institute for Normung e.V (German Institute for standard)	DIN
British Standard Institution	BSI

3.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa , 1 Pa = 1 N/m²) หรือ kgf/mm² หรือ psi (lbf/m²)
 F = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf
 A = พื้นที่หน้าตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น m² หรือ mm² หรือ in²

3.1.1 รูปแบบและชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ

3.1.1.1 ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)

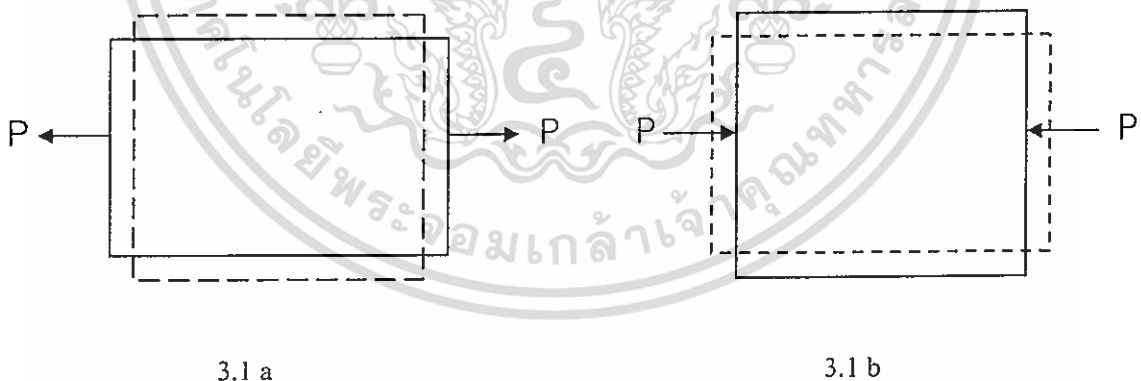
เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 3.1a

3.1.1.2 ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)

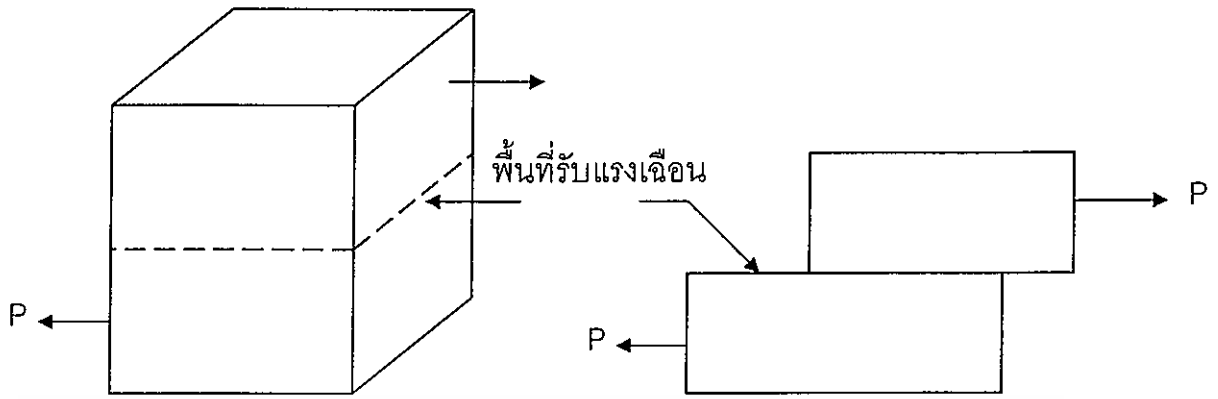
เกิดขึ้นเมื่อมีแรงการกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 3.1b

3.1.1.3 ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)

ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 3.2c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของแรงดึงและแรงกด



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของแรงเฉือน

3.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูปร่าง (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

3.2.1 การเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป

การเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุยังคงรูปร่างเดิมไว้ได้

3.2.2 การเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป

การเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบคงรูป ถึงแม้ว่าแรงกระทำที่ทำต่อวัสดุนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม วัสดุทุกชนิดจะมีรูปแบบการเปลี่ยนรูปร่างทั้งสองแบบ ขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำกับความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุนั้น ๆ

การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่สองลักษณะ คือ แบบแรกเรียกว่าเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ดังรูปที่ 3.3a ค่าความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

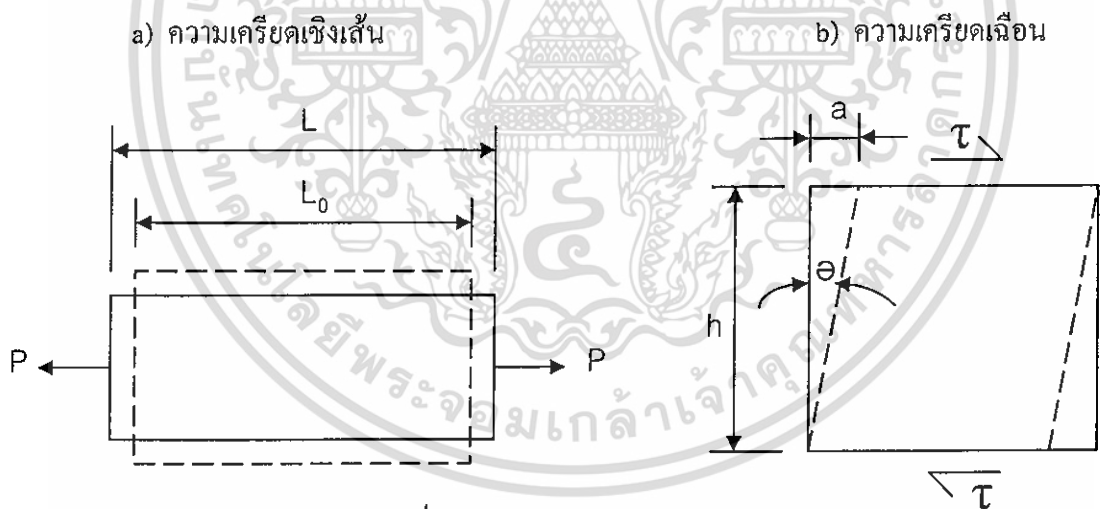
- เมื่อ ε = ความเครียดเชิงเส้น
 ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L - L_0$)
 L_0 = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length

แบบที่สอง คือ แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Share Strain) ใช้วัดความเครียดกรณีแรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน (τ) ดังรูปที่ 3.3b ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (3.3)$$

- เมื่อ γ = $\tan \theta \approx \theta$ (Radian ในกรณีที่เป็นมุมเล็ก)
 a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)
 h = ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ = มุมที่เปลี่ยนไป

ค่าความเครียดทั้งสองแบบ ไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว



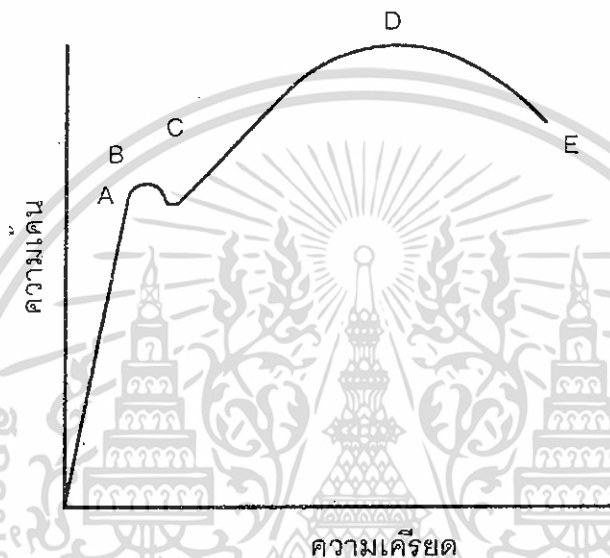
รูปที่ 3.3 ลักษณะของความเครียด

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress – Strain Relationship)

จากประการสำคัญอย่างหนึ่ง ของการออกแบบอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล รวมทั้งงานโครงสร้างต่าง ๆ ต้องคำนึงถึงค่า Stress และ Strain ของวัสดุที่ทำ เพราะค่าเหล่านี้มีผลต่อการทำให้วัสดุเสียรูปแบบคงรูปไปจากความต้องการมากน้อยอย่างไร และจะมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุเป็นอย่างมาก จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากกราฟเส้นโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น-ความเครียด (Stress – Strain Curve) ซึ่งกราฟดังกล่าวสามารถมาจากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก ซึ่งค่าความเค้นกับความเครียดที่ได้ในแต่ละช่วงนั้นเป็นผลมาจากการยืดตัวของวัสดุ ที่เกิดจากการทดสอบแรงดึง สามารถแสดงค่าให้เห็นได้ในรูปที่ 3.4 กราฟแสดงความเค้น – ความเครียดแบบมีจุดคราก นอกจากนี้ ยังแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ด้วย



รูปที่ 3.4 แสดงภาพความเค้น - ความเครียด (Stress – Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

3.3.1 ชนิดของ Strain – Stress Curves

ทุก ๆ Material จะมีความแตกต่างในเรื่องรูปร่างของ Strain – Stress Curves โดยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่มากกระทำในส่วนของการรายละเอียดในภายหลัง บาง Curve ที่เป็นชนิดหลัก ๆ จะถูกแสดงไว้ที่ Fig 3.5 และมีลักษณะดังต่อไปนี้

Perfectly Elastic ที่มีความสมบูรณ์แบบจะต้องมีลักษณะแข็งทื่อไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่แตกง่าย เช่น แก้ว, เซรามิก, และพวกโลหะที่ผสมเหล็ก ซึ่งแสดงไว้เหมือน Curve (รูป 3.5 a) โดยมีข้อจำกัดของ Stress ที่วัสดุสามารถคงรูปได้ หลังจากนั้นจะแตก มีรูปร่างคงที่ ถ้าเป็นอย่างอื่น ก็น้อยมาก

Rigid, Perfectly Plastic ความแข็ง, Elastic Material ที่มีความสมบูรณ์แบบจะมี โดยกำหนดค่าไม่สิ้นสุดของ E . 1 ครั้งของการ Stress จะไปถึงผลของการ Yield Stress ในแกน Y และจะดำเนินไปจนถึงผ่านการทำให้เปลี่ยนรูปร่างที่ระดับ Stress เดิม เมื่อน้ำหนักถูกปลดปล่อย วัสดุจะไปถึงจุดที่มีรูปร่างคงที่ และจะไม่กลับมาคืนสภาพเดิม (รูป 3.5 b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elastic, Perfectly Plastic ที่มีความสมบูรณ์ที่มีความเป็นอันหนึ่งอันเดียว สอง เป็น Elastic ที่มีความแน่นอน และเมื่อผ่านไปถึงจุดหนึ่งจะกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อนำหนักถูกปลดปล่อย (รูป 3.5 c)

Rigid, Linearly Strain Hardening ความแข็ง, แนวเส้น Strain ที่มีความแข็ง, วัสดุต้องการระดับของ Strain ที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่ม Strain ดังนั้น Flow Stress (ความสำคัญของ Stress เพื่อต้องการรักษารูปร่างที่คงที่เมื่อถึง Strain ที่แน่นอน) สูงขึ้นเมื่อ Strain สูงขึ้น จะไม่มี Elastic ที่กลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อไม่มีน้ำหนักอยู่ (รูป 3.5 d)

Elastic, Linearly Strain Hardening แนวเส้น Strain ที่มีความแข็ง (รูป 3.5 e) เป็นค่าโดยประมาณของลักษณะการทำงานวัสดุวิศวกรรมส่วนใหญ่ การปรับปรุง Plastic โดยการแบ่งส่วนของ Curve ให้เอียงลาดลงกับ Strain สูงขึ้น



รูปที่ 3.5 แสดง Stress-Strain Curves ในแบบต่างๆ (a) Perfectly elastic. (b) Rigid, perfectly plastic. (c) Elastic, perfectly plastic. (d) Rigid, linearly strain hardening. (e) Elastic, linearly strain hardening.

3.4 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

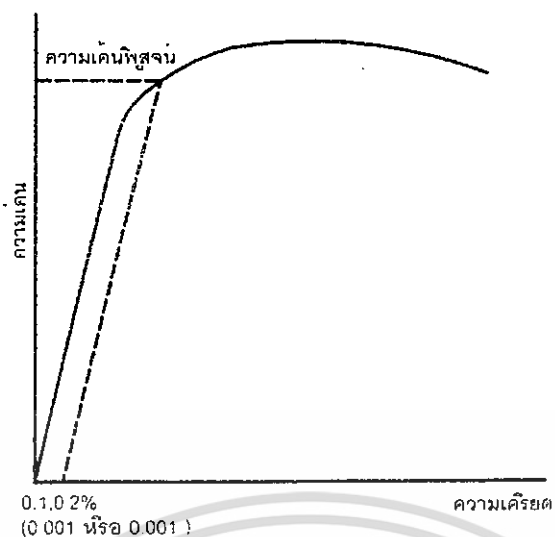
หลักในการทดสอบแรงดึง คือ การนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูป 3.4 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ ชิ้นทดสอบจะเตรียมตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่แสดงไว้ในตาราง 3.1 เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Material), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standard) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ สามารถนำมาเปรียบเทียบหรืออ้างอิงข้อมูลที่เป็นสากล ได้รับการยอมรับทั่วไปในอุตสาหกรรม

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่าเมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limits) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปอีลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นส่วนจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเพิ่มแรงกระทำเข้าไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิสัยยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดระดับความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ว วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก เรียกจุด C นี้ว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะ จะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

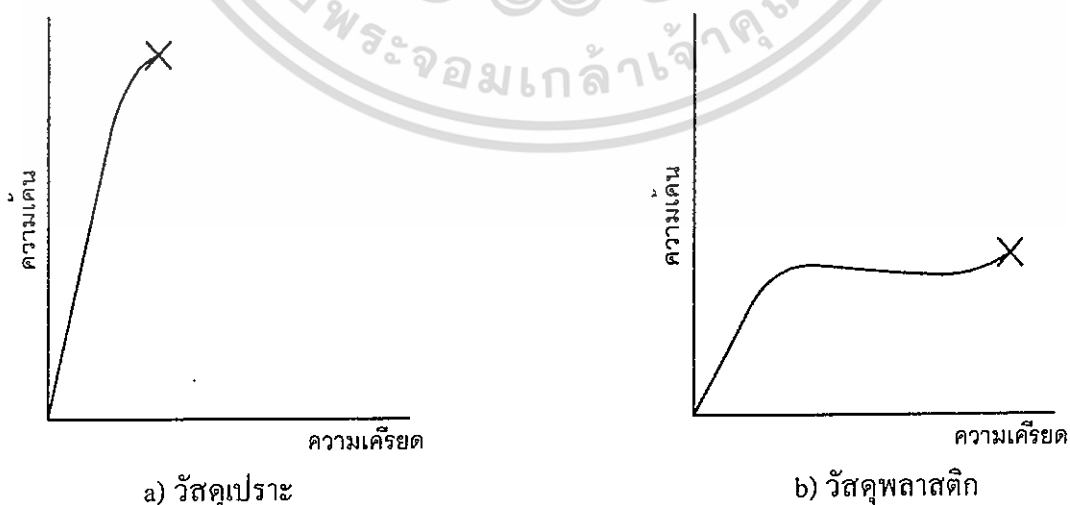
วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10-0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 3.6 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.20% offset

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนั้นค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง



รูปที่ 3.6 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นปะลัย (Rupture Strength) จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุ ก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 3.6 a ทำนองเดียวกัน พวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิกที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติก จะเกิดแตกหักโดยที่ค่าความเค้นสูงสุด ดังรูปที่ 3.6 b



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น - ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด

นอกจากเส้นโค้งความเค้น - ความเครียด จะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นปะลัยแล้ว ยังใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

3.4.1.1 ความเหนียว (Ductility)

ค่าที่ใช้วัดความเหนียวจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดของพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) มีวิธีการหาดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} \quad (\%EI) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (3.4)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกอหลังจากการดึงจนขาด
 L_o = ความยาวของเกอเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง} \quad (\%R.A.) = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (3.5)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติมักใช้ค่า %EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูป หมายถึงว่า ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ, Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

3.4.1.2 Modulus of Elasticity

ภายใต้พิภักัดสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of Elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มีหน่วยเป็น ksi (1 ksi = 1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{FL}{A \Delta L} \quad (3.6)$$

ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือน เรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ซึ่งหาได้จากสมการ ดังนี้

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Fh}{Aa} \quad (3.7)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

Materials	Modulus of elasticity (10^6 psi)	Share Modulus (10^6 psi)
Aluminum alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (Plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ หมายถึงว่าถ้าค่า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นได้มาก ค่า E และ G มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

3.5 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับการจับตัวของอะตอมและ โมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งสูงนั้นคือ พลาสติกและเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์

3.5.1 วิธีในการทดสอบความแข็ง

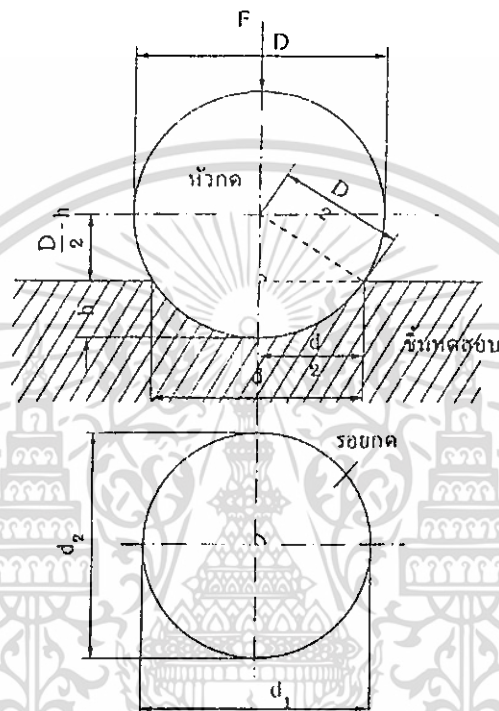
3.5.1.1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรงกด 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาทีเป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

$$Bhn = \frac{F}{(\pi D/2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ Bhn = Brinell Hardness Number มีหน่วยเป็นแรง / หน่วยพื้นที่
- F = แรงที่ใช้กด
- D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลูกบอล (Indenter)
- d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรอยบุ๋ม



รูปที่ 3.8 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล

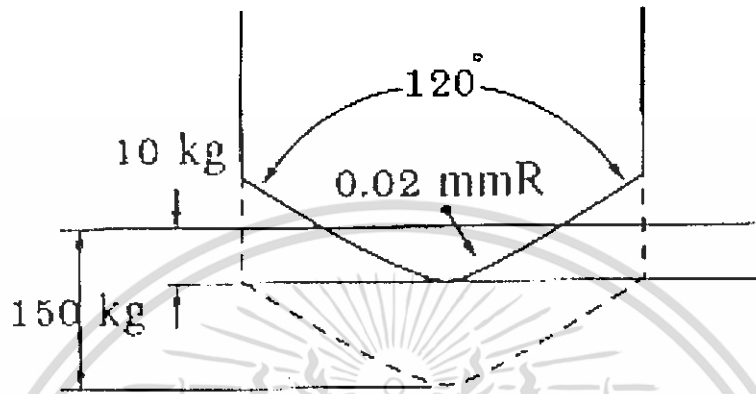
การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

3.5.1.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบบรอกเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งแรงของวัสดุที่มีการทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ่มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.9 การทดสอบความแข็งแบบบรอกเวล

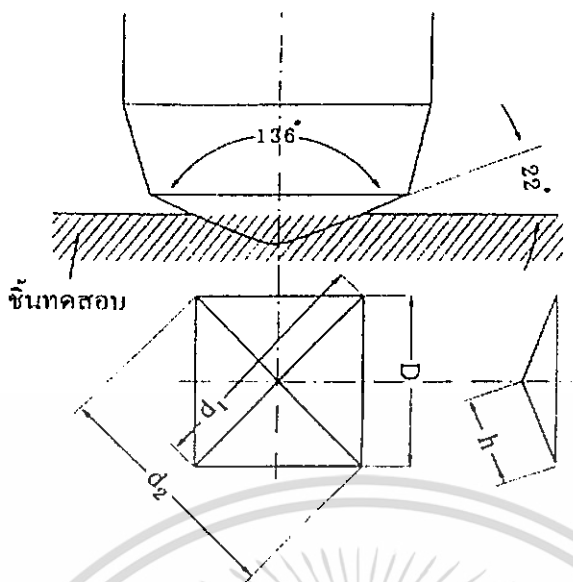
3.5.1.3 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้ คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การคำนวณค่า Vickers Hardness Number (VHN) หรือ Diamond – Pyramid Hardness (DPH) ใช้สูตร

$$HN = \frac{1.8544 F}{D^2} \quad (3.9)$$

โดยที่ F = น้ำหนักที่กด (กก.)
 D = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm.)
 1.8544 เป็นค่า $2 \sin$
 = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชร ซึ่ง = 136°

การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บางและแข็งมาก ๆ



รูปที่ 3.10 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.6 ทฤษฎีการขึ้นรูปงานโลหะแผ่นโดยการดัดงอ (Forming)

ขบวนการในการขึ้นรูปโลหะทั้งหมดนั้นนับว่าขบวนการงอขึ้นรูป (Bending) เป็นขบวนการที่ง่ายที่สุดที่ใช้ทำงานร่วมกับเครื่องปั๊มโลหะ ซึ่งขบวนการงอขึ้นรูปนี้อาจทดลองได้ โดยใช้เครื่องมือง่าย ๆ ภายในบ้านทำก็ได้ ขบวนการงอขึ้นรูปนั้นเป็นขบวนการอันหนึ่งในหลาย ๆ ขบวนการของขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอ ซึ่งขบวนการนี้จะถูกใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาถึงสภาพของการขึ้นรูปขึ้นงาน ขบวนการขึ้นรูปโดยการดัดงอนั้นมีกรรมวิธีที่แตกต่างไปจากขบวนการตัดขึ้นรูป (Cutting) และขบวนการลากขึ้นรูป (Drawing) เป็นอย่างมาก

3.6.1 ทฤษฎีการงอ (Bending Theory)

ในการขึ้นรูปโลหะโดยการงอขึ้นรูปนั้น เราต้องให้แรงแก่ชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานนั้นเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งแรงที่ให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่ทำให้ความเค้นที่เกิดบนชิ้นงานมากกว่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น และจะต้องไม่น้อยกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัดของชิ้นงานนั้น

เมื่อเราให้แรงแก่ชิ้นงานเพื่อทำการงอ จะปรากฏว่าความเค้นของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากบางจุดที่ต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้น และความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะแผ่กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงาน ซึ่งขณะที่แผ่กระจายนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานก็จะค่อย ๆ ลดลงด้วยจนถึงบริเวณที่ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเป็นศูนย์ ซึ่งลักษณะการเกิดความเค้นบนชิ้นงานแบบนี้จะทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงานมากกว่าจะเกิดการฉีกขาด สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโลหะนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะต้องผ่านจุดยึดหยุ่นจำกัดและจุดล้าตัวด้วยการแสดงถึงการเกิดแรงที่ใช้ในการงอบนคานซ์ชนิดต่างๆ กัน สำหรับวี-คานซ์ (V-die) นั้น เราจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่ามีการแผ่กระจายของแรงเกิดขึ้นมากที่สุด ส่วนยู-ค้าย (U-die) และวี่ปิ้ง-ค้าย (Wiping-die) นั้น นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานมาก และยู-ค้าย มักจะนิยมเรียกว่า ชานเนล ค้าย (Channel die)

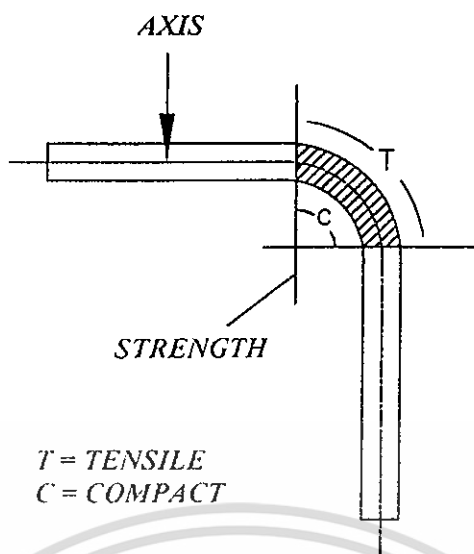
การแผ่กระจายของแรงเมื่อที่ใช้บนค้าย สำหรับขบวนการตัดขึ้นรูปนั้น จะมีขนาดของการแผ่กระจายของแรงเท่ากับขนาดของช่องว่างระหว่างคมตัดของแม่พิมพ์ที่ได้ตั้งเอาไว้ ตามปกติจะมีค่าประมาณ 10 % ของความหนาของชิ้นงาน สำหรับการแผ่กระจายของแรงที่ใช้ในการงอ นั้น จะมีขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานมากกว่าแรงเฉือน ซึ่งขนาดของการแผ่กระจายบนชิ้นงานในการงอนั้นจะมีขนาดเท่ากับความหนาของชิ้นงานบวกกับรัศมีของพื้นที่และรัศมีของค้าย

การงอ (Bending) นั้น มีลักษณะความแตกต่างของการเกิดความเค้นของโลหะเฉพาะที่เท่านั้น ความเค้นที่เกิดเฉพาะที่นี้จะเกิดขึ้นตรงรัศมีของการงอของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่เหลือนั้น จะไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย การแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ผ่านขบวนการงอมาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานนั้นเราจะสังเกตเห็นได้ดังนี้ โลหะที่อยู่ด้านนอกของรัศมีการงอจะยืดออกแสดงให้เห็นว่ามีความเค้นดึงเกิดขึ้น ส่วนโลหะที่อยู่ด้านในของรัศมีการงอจะหดตัวเข้า แสดงให้เห็นว่ามีความเค้นอัดเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการฉีกขาดปรากฏขึ้นระหว่างการงอ มันจะเกิดขึ้นที่ส่วนนอกของการงอ แต่ถ้ามีรอยขุ่น (Wrinkle) ปรากฏขึ้น มันจะเกิดขึ้นที่ด้านในของการงอ

3.6.2 แกนสะเทิน (Neutral Axis)

ทั้งนี้เพราะว่าชิ้นงานนั้น ได้เกิดความเค้นดึงขึ้นที่ด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งนั้น ได้เกิดความเค้นอัดขึ้น การกลับตรงข้ามของความเค้นทั้งสองนี้จะต้องเกิดขึ้นตรงบริเวณใกล้ ๆ เส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะเกิดขึ้นมากที่สุด ตรงบริเวณด้านขอบนอกทั้งสองข้างของความหนาของชิ้นงาน และความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะค่อย ๆ ลดลง ๆ เมื่อระยะห่างเข้ามาใกล้กับเส้นแกนกลางของความหนาของชิ้นงาน ซึ่งที่เส้นแกนกลางของความหนาหรือบริเวณใกล้ ๆ เส้นแกนกลางของความหนาจะมีความเค้นเป็นศูนย์ คือ ไม่เกิดความเค้นขึ้นเลย เส้นที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลยเราเรียกว่า “แกนสะเทิน” (Neutral axis)

ก่อนที่จะมีการงอชิ้นงานนั้นขนาดความยาวที่แท้จริงของชิ้นงานได้ถูกกำหนดไว้แน่นอนแล้ว ดังนั้นความยาวของแกนสะเทินที่เกิดจากการงอชิ้นงานนั้นจะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการงอจะมีความยาวเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันความยาวด้านในรัศมีการงอจะมีความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน เพื่อมาทำการงอได้อย่างไร ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานก่อนที่จะนำมางอนั้น ก็หาได้จากแกนสะเทินของชิ้นงานหลังจากงอแล้วนั่นเอง



รูปที่ 3.11 ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ของการงอ

เมื่อเราทำการงอชิ้นงานครั้งแรกแกนสะเทินจะเกิดขึ้นใกล้กับเส้นแบ่งครึ่งความหนาของชิ้นงาน แต่เมื่อทำการงอต่อไปแกนสะเทินจะเลื่อนเข้ามาทางด้านในหรือด้านที่เกิดการอัดตัว (Compression) ซึ่งมักจะเป็นเช่นนี้เสมอ ยิ่งถ้าเป็นการงอชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ ด้วยแล้ว สำหรับการวัดระยะของแกนสะเทินนั้น จะวัดจากผิวด้านในของรัศมีการงอ หรือด้านที่เกิดการอัดตัวออกไปหาแกนสะเทิน การงอชิ้นงานบาง ๆ จะมีพื้นที่ในการงอ (Bend area) น้อย ซึ่งเมื่อทำการงอแล้ว พื้นผิวด้านนอกรัศมีการงอจะให้ขนาดที่ไม่ถูกต้อง แต่พื้นผิวด้านในของการงอซึ่งถูกอัดติดกับขอบรัศมีการงอจะให้ขนาดที่ถูกต้อง ดังนั้นในการออกแบบค้ำเราจะต้องระวังเรื่องนี้ด้วย

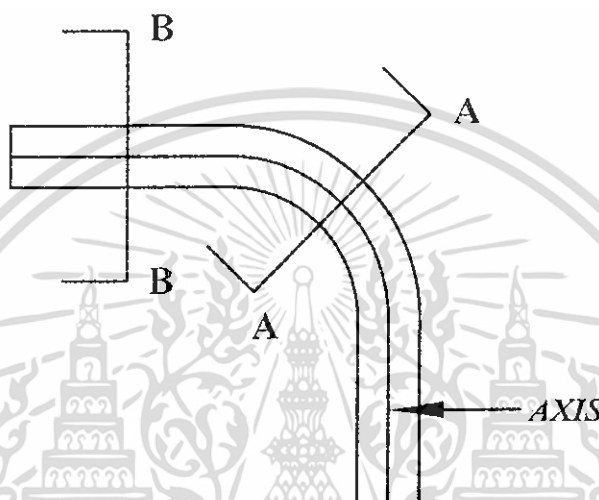
เมื่อทำการงอโลหะแผ่น ระยะของแกนสะเทินจะอยู่ห่างจากด้านที่เกิดการอัดตัวเป็นระยะประมาณ 4/10 เท่าของความหนาของชิ้นงาน

ลักษณะการเกิดของแกนสะเทิน มีดังต่อไปนี้

- ถ้าความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่รัศมีการงอลดลง แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว
- ถ้ารัศมีการงอคงที่ ขณะที่ความหนาของโลหะแผ่นเพิ่มขึ้น แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว
- ถ้ารัศมีการงอและความหนาของโลหะแผ่นคงที่ ขณะที่มุมของการงอได้เพิ่มขึ้น แกนสะเทินจะเลื่อนตัวมาทางด้านที่เกิดการอัดตัว
- ถ้าไม่มีความเค้นเกิดขึ้นบนชิ้นงาน แกนสะเทินจะอยู่ตรงกลางของความหนาของชิ้นงาน

3.6.3 การไหลตัวของโลหะในการขึ้นรูป (Metal Flow)

เพราะว่าโลหะบริเวณที่เราอนั้นได้มีความเค้นเกิดขึ้น ซึ่งมันจะทำให้เกิดการลื่นไหลตัวของโลหะ ความเค้นดึงที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปทำให้ความหนาของชิ้นงานในบริเวณที่งอมีขนาดลดลง ส่วนความเค้นอัดที่ทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะจะไปเพิ่มขนาดความกว้างของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 จากรูป เป็นการแสดงถึงการบิดงอของแท่งโลหะเมื่อได้รับการงอ



รูปที่ 3.12 การไหลของโลหะและการบิดงอ

เมื่อเรางอแท่งโลหะ จะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก แต่ถ้าเป็นการงอโลหะแผ่น การเกิดการบิดงอนี้เกือบจะไม่มีเลย จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อแท่งโลหะได้ถูกงอความเค้นอัด จะทำให้ความกว้างของชิ้นงานบริเวณที่ทำการงอเพิ่มขึ้น 3.2 มม. ซึ่งการไหลตัวของโลหะ เราจะได้ชัดก็ต่อเมื่อความหนาและความกว้างของชิ้นงานเกือบจะเท่ากัน แต่ในโลหะแผ่นนั้นจะไม่ใช่ดังที่กล่าวไว้ ทั้งนี้เพราะว่าความกว้างมากกว่าความหนาของชิ้นงานหลายเท่า ความกว้างที่มากกว่านี้ จะต้านทานการเพิ่มตัวของโลหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัด เมื่อมันไม่สามารถจะเพิ่มทางด้านกรอัดตัวได้ ความเค้นอัดก็จะไปเพิ่มทางด้านกรดึงตัว ซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกัน ซึ่งการที่มันเพิ่มทางด้านกรดึงตัวนี้ จะทำให้ความหนาของชิ้นงานเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ลักษณะของการไหลตัวของโลหะระหว่างการขึ้นรูปโดยการตัดงอ มีดังต่อไปนี้

ถ้าแท่งโลหะได้ถูกนำมางอ จะทำให้เกิดการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก และจะมีการไหลตัวของโลหะทำให้ความหนาของแท่งโลหะลดลงเล็กน้อย แต่จะไปเพิ่มทางด้านความกว้างมากขึ้น

ถ้าโลหะแผ่นได้ถูกนำมางอ จะมีการบิดงอทางพื้นที่หน้าตัดเล็กน้อย แต่ความหนาจะลดลงอย่างมาก และไม่มีการเพิ่มตัวขึ้นทางความกว้างเลย

เมื่อเรางอโลหะแผ่น โอกาสที่จะเกิดการฉีกขาดมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าการมีอัตราความกว้างมากต่อความหนาที่น้อย ส่วนรอยยับที่ปรากฏขึ้นเสมอเมื่อเรางอโลหะแผ่นหรือแท่งโลหะอย่างแรง ทั้งนี้ เพราะอัตราความกว้างน้อยต่อความหนาจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มทางด้านการอัดตัวมากขึ้น

ขนาดของการไหลตัวของโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่าง ๆ คือ

- เมื่อรัศมีของการงอ (Bend of radius) ยาวขึ้น จะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- โลหะที่บางกว่าจะเกิดการไหลตัวของโลหะน้อยกว่า
- มุมของการงอ (Degree of bend) แคบ จะทำให้เกิดการไหลตัวของโลหะน้อย
- ถ้าเป็นการงอช่วงแคบ (Narrow bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีน้อย แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีมาก
- ถ้าเป็นการงอช่วงกว้าง (Wide bend) จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงดึงมีมาก แต่การไหลตัวของโลหะเนื่องจากแรงอัดมีน้อย
- ถ้าเป็นโลหะที่แข็ง จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการดึงตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะฉีกขาดได้ง่าย
- ถ้าเป็นโลหะที่อ่อน จะทำให้มีการไหลตัวของโลหะทางด้านการอัดตัวมาก และทางด้านนี้ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยยับได้ง่าย

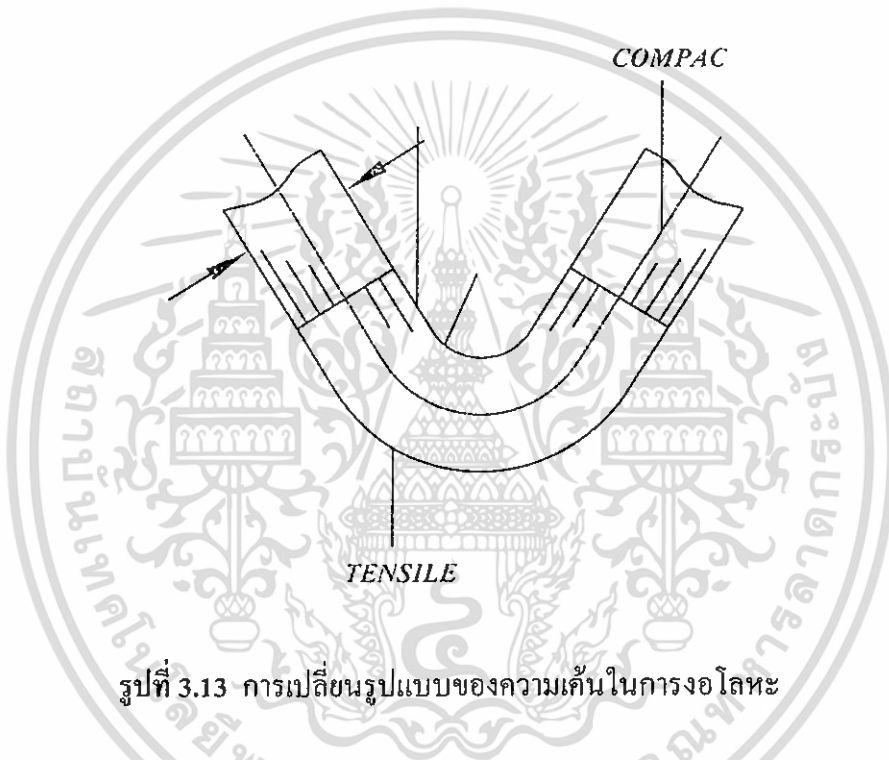
3.6.4 การเคลื่อนไหวของโลหะระหว่างการขึ้นรูป (Metal Movement)

ระหว่างการทำการงอชิ้นงานนั้น พื้นที่ส่วนหนึ่งของแผ่นชิ้นงาน (Blank) ได้ถูกยึดเอาไว้ด้วยแผ่นโลหะที่เราเรียกว่า “แผ่นโลหะกด” พื้นที่ส่วนที่เหลือของชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง ย่อมาแล้วแต่รูปร่างตามที่เรากำลังต้องการ ชิ้นงานจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงด้วยพื้นที่ ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเข้าไปในด้าย การที่ชิ้นงานเคลื่อนตัว (Movement) ผ่านช่องว่างนี้เรียกว่า “การเหวี่ยงตัวของชิ้นงาน” (Swinging) และลักษณะของการเกิดอาการเช่นนี้ เราจะพบเสมอในการงอชิ้นงานในด้ายเท่านั้น ซึ่งลักษณะการเคลื่อนไหวของโลหะนั้น มักจะไม่ปรากฏในขบวนการกดขึ้นรูป (Embossing) ยืดขึ้นรูป (Stretching) และลากขึ้นรูป (Drawing)

3.6.5 การติดตัวกลับของชิ้นงาน (Springback)

เมื่อได้ทำการงอชิ้นงานแล้ว จะมีความเค้นเกิดขึ้นในบริเวณที่ทำการงอ และความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ จะมีความแตกต่างกันคือไม่เหมือนกันทุกจุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการติดตัวกลับของชิ้นงาน ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวด้านนอกของการงอ และจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ

ระยะของชิ้นงานเข้าใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนา ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นศูนย์ที่แกนสะเทิน จากรูปที่ 3.13 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึงและความเค้นอัดในบริเวณที่มีการงอ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่จุด 0 นั้น ความเค้นดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนแกนสะเทิน และค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุด x ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานที่จุด x นี้ จะมีค่าความเค้นดึงเกิดมากที่สุด ในการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้น ในการงอชิ้นงาน เราจะใช้กราฟแสดงความเค้นความเครียดเป็นตัวแสดง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าเป็นการออกแบบงานที่ดีแล้ว ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่จุด x จะต้องน้อยกว่าความแข็งแรงทางดึงสูงสุดของชิ้นงานนั้น ถ้ามีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดขึ้นได้ระหว่างที่มีการงอ



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนรูปแบบของความเค้นในการงอโลหะ

จากรูปที่ 3.13 เราจะเห็นได้ว่า ตรงบริเวณส่วนที่ใกล้กับแกนสะเทินนั้น จะมีความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยึดหยุ่นจำกัด สำหรับโลหะส่วนนี้นั้น ได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็ก ๆ ที่เรียกว่าแถบยึดหยุ่นจำกัด สำหรับโลหะส่วนนี้นั้น ได้ถูกแสดงด้วยแถบเล็ก ๆ ที่เรียกว่าแถบยึดหยุ่น (Elastic band) แถบเล็กนี้จะอยู่ทั้งสองข้างของแกนสะเทิน สำหรับโลหะที่อยู่ห่างไปจากแถบกลางของชิ้นงาน จะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งแรงล้าตัวของชิ้นงานนั้น และที่บริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร เมื่อเราทำการงอชิ้นงานในขณะที่ดึงเอาพื้นซ้อออกไปนั้น ส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็ก ๆ ก็จะพยายามดึงตัวกลับเข้าอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ก็ไม่สามารถจะดึงตัวกลับคืนได้หมด เพราะว่ามี การต้านทานของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลหะอย่างถาวร ดังนั้นจึงมีการติดกลับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การที่โลหะติดตัวกลับนี้เรียกว่า “Springback” การที่โลหะต้องติดกลับก็เพราะว่าต้องการให้อยู่ในภาวะสมดุลย์นั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็นแถบยึดหยุ่นเล็ก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น จะเป็นตัวทำให้เกิดแรงของการตีกลับรอบจุด 0 ดังที่แสดงไว้แล้ว ซึ่งตามความจริงแล้ว ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะ (Plastic deformation) ก็ยังคงมีส่วนที่เป็นความยืดหยุ่นปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งส่วนนี้จะไปเพิ่มแรงในการตีกลับให้มากขึ้น

3.6.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณค่า Springback

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากบทความของ Tseng ซึ่งสมการที่ใช้เป็นการวิเคราะห์ว่าการเสี้ยวรูปในเชิงพลาสติกแบบ Elastic-Perfectly plastic การขึ้นรูปโลหะด้วยการพับขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ (M_{ip}) วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด (M_{unload}) วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการ Springback (K_s) จากรูปที่ 3.14 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด

$$K_s = \frac{\alpha - \Delta\alpha}{\alpha} \quad (3.10)$$

โดยที่

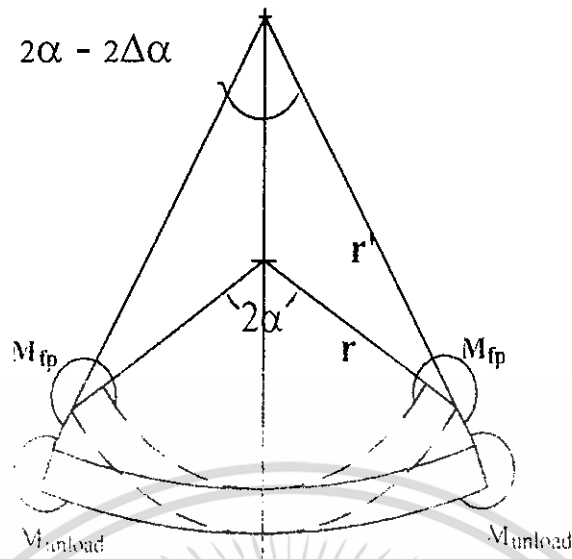
$$K_s = 1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \quad (3.11)$$

K_s = ค่าการเกิด Springback

2α = ค่าองศาการพับขณะที่มีโหลด

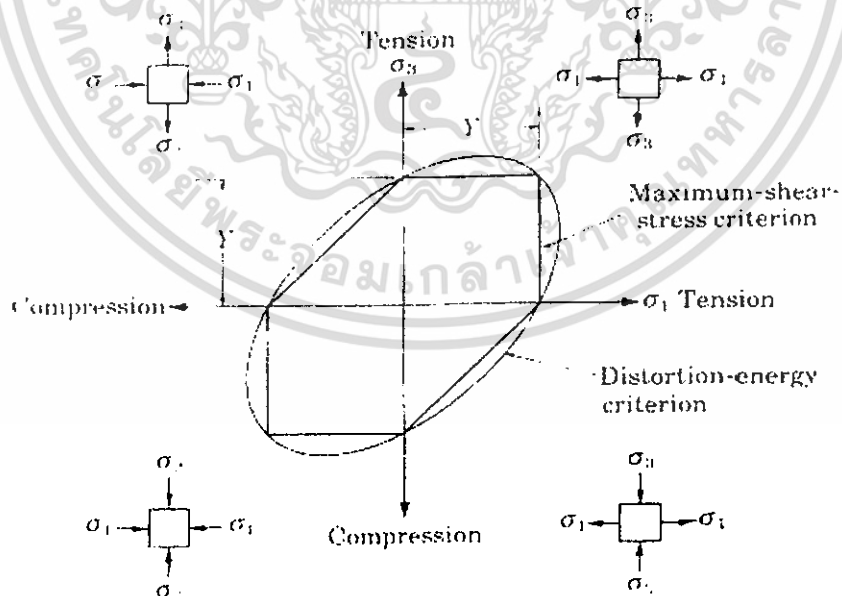
$2\Delta\alpha$ = ค่าองศาที่ได้จากการพับ

จากการพยายามที่จะกลับสู่สภาพปกติ ความเค้นตกค้างส่งผลให้วัสดุเกิดการตีกลับมาบางส่วน ความแตกต่างของครึ่งของมุมการงอที่เกิดจากการ Springback; $\Delta\alpha$



รูปที่ 3.14 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายที่มาโดยการสันนิษฐานให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบ Isotropic จากสถานะการทดสอบการพับและการกดอัดแรงดึงผิว หรือความตึงเครียดที่เกิดจากการโค้งงอของวัสดุ ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงทางด้านความกว้างของวัสดุ σ



รูปที่ 3.15 แสดง Diagrams maximum-shear-stress และ กฎเกณฑ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

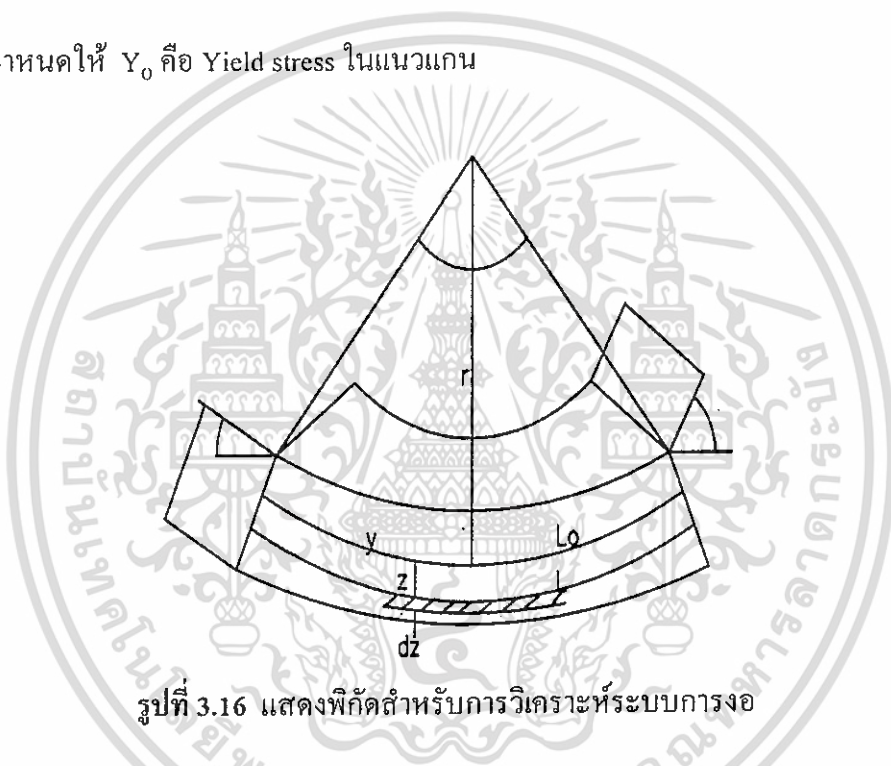
จากกฎเกณฑ์ของสภาวะความตึงเครียด ($\sigma_2 = 0$) สามารถแสดงให้เห็นจากรูปที่ 3.15
 ดังนั้น $\sigma_2 > 0$ $\sigma_3 > 0$ และ σ_2 จะมีค่าเป็น 0 ตลอดเวลาจากความตึงเครียดในแนวราบ เพราะ
 ฉะนั้น $\sigma_{\max} = Y$

โดยที่
$$\sigma_0 = Y' \quad (3.12)$$

Y' = ค่า Yield Stress ที่แนวระนาบ จากสมการ

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y' = 1.15 Y_0 \quad (3.13)$$

กำหนดให้ Y_0 คือ Yield stress ในแนวแกน



รูปที่ 3.16 แสดงพิกัดสำหรับการวิเคราะห์ระบบการงอ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 3.16 ความเค้น σ ความเครียด ϵ ในกระบวนการพับ จะกระจายไป
 ตามแกน Z การวิเคราะห์ค่าของ Elastic - Perfect plastic ของวัสดุ M_{pp} สามารถหาได้จากสมการรูป
 ที่ 3.16

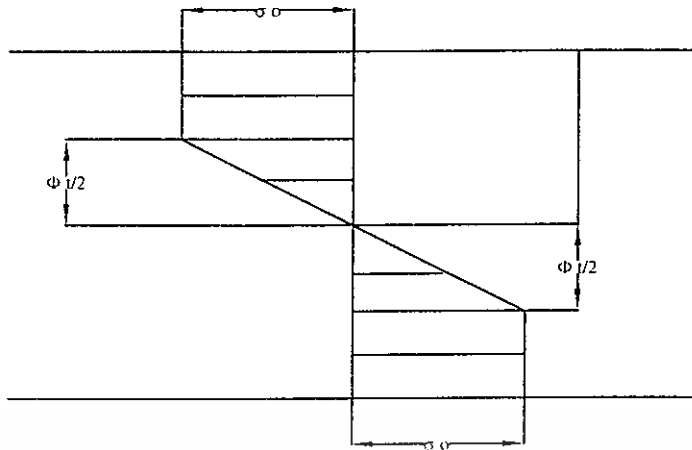
$$\sigma_y = \begin{cases} zE / [r(1-\nu^2)] \\ \sigma_0 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$0 \leq |z| \leq \phi/2 \text{ ถึง } \phi/2 \leq |z| \leq r/2$$

ค่า E คือค่า Young's modulus

ν คือค่า Poisson ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงความเค้นกระจายช่วง Elastic และ Plastic

จากการโค้งงอทำให้เกิดปัจจัยสำคัญที่สามารถ คำนวณสมการได้ดังนี้

$$M_{fp} = 2 \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการความเค้น 3.14 ลงในสมการที่ 3.15

$$M_{fp} = (\sigma_0) \frac{t^2}{4} - \sigma_0^3 \left[\frac{(1 - \nu^2) \left(r_p + \frac{t}{2} \right)^2}{E} \right] / 3 \quad (3.16)$$

โดยที่ $r = r_p + \frac{t}{2}$

r_p = รัศมีของ punch

จากข้อสรุป ความแตกต่างระหว่างการกระทำที่มี M_{fp} และไม่มี M_{unload} จากรูป 3.14 ค่าความแตกต่างของ Springback ที่ได้รับจากความเค้นที่เกิดขึ้น

$$\Delta \varepsilon = \frac{z}{r} - \frac{z}{r'} \quad (3.18)$$

เงื่อนไขความเค้นแนวระนาบภายหลังการให้โหลด $\sigma_y = \frac{\Delta \varepsilon E}{(1 - \nu^2)}$

เมื่อ r' ได้จากความเครียดสุดท้ายหรือหลังจากการเกิด Springback หรือความเครียดที่เกิดขึ้นหลังจากการปลดโหลด เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{unload} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \int_0^{t/2} \Delta \varepsilon z dz$$

$$= \frac{Et^3 (1/r - 1/r')}{12(1-\nu^2)} \quad (3.19)$$

เนื่องด้วยการเคลื่อนตัวของชิ้นทดสอบในสถานะที่ไม่มีโหลด ผลของ Moment, มีค่าเป็นศูนย์ $M_{fp} - M_{unload} = 0$

$$M_{fp} - M_{unload} = Et^3 (1/r - 1/r') / [12(1-\nu^2)]$$

หรือ

$$1/r - 1/r' = 12(1-\nu^2) M_{fp} / (Et^3) \quad (3.20)$$

จากรูปที่ 3.14 องศาการพับ 2α และองศาที่ได้หลังจากการพับ(Springback) $2\alpha - 2\Delta\alpha$ แรงที่เกิดขึ้นหลังจากการปล่อยโหลดออกเป็นการเกิด Springback ฉะนั้น K_s หาได้จาก

$$K_s = (\alpha - \Delta\alpha) / \alpha = r/r' = 1 - r(1/r - 1/r') \quad (3.21)$$

จากสมการที่ 3.20 แทนที่ในสมการที่ 3.21 โดยที่ $r = r_p + \frac{t}{2}$

$$K_s = 1 - \frac{12(1-\nu^2)(r_p/t + 1/2)M_{fp}}{Et^3} \quad (3.22)$$

ฉะนั้น แทนสมการ 3.16 ในสมการ 3.22

$$K_s = 1 - 3(1-\nu^2)(r_p/t + 1/2)(\sigma_0/E) + 4[(1-\nu^2)(r_p/t + 1/2)(\sigma_0/E)]^3 \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.23 ถ้า $t \ll r_p$, ให้ $\nu = 0.366$ และ $Y_0 = 0.866 \sigma_0$, สามารถปรับปรุงสมการได้ดังนี้

$$K_s = 1 - 3(r_p Y_0) / (E t) + 4 [(r_p Y_0) / (E t)]^3 \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ทฤษฎีการใช้ FEM Model ช่วยในการทำแบบจำลองการพับ

3.7.1 การใช้โปรแกรม ABAQUS ช่วยในการทำแบบจำลอง

ขณะที่ทำการพับวัสดุชนิดแผ่นบาง วัสดุเกิดการคดกลับ (Springback) หลังจากที่ทำการพับไปแล้ว ปัญหาที่พบ ทำให้ไม่สามารถที่จะพับวัสดุได้ตามที่ต้องการ ทำอย่างไรจะทราบว่าจะองศาที่ทำการพับจริงไปนั้นควรจะพับไปเท่าใด แล้วจะได้องศาตามที่ต้องการหลังจากการเกิด Springback เมื่อทำการพับไปที่องศานั้น ๆ แล้วการเกิด Springback จะเกิดที่เท่าไร และจะต้องชดเชยเท่าไรจึงจะเหมาะสม อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงความเค้นที่เกิดขึ้นของวัสดุ ในขณะที่ทำการพับและความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงสุดที่บริเวณใด มีขนาดเท่าใด และสามารถนำมาพัฒนาหรือเป็นแนวทางในการพับวัสดุที่ได้องศาตามต้องการ ซึ่งจะทำให้วัสดุนั้นมีความแข็งแรงและสวยงาม



บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

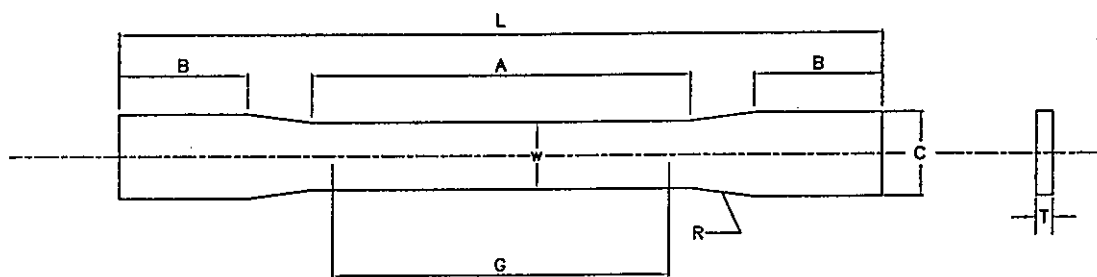
เพื่อพิสูจน์ให้ทราบถึงลักษณะของคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ S50C และ SPCC ก่อนที่จะนำค่าที่ได้นั้นไปเข้าสมการหรือโปรแกรม เพื่อหาค่าการเกิดการ Springback หรือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในองศาต่างๆ ของการพับวัสดุโดยได้จากโปรแกรม

4.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

จากกระบวนการทดสอบหาค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M-91 ซึ่งเป็นการทดสอบค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กชนิดแผ่นบาง โดยขึ้นทดสอบมีขนาด Sub size specimen 6 mm. ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

Dimensions , mm.			
Nominal Width	Standard Speciment		Subsize Specimen
	Plate Type	Sheet Type	
	40 mm	12.5 mm	6 mm
G - Gage length (Notes 1 and 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W - Width (Notes 3 and 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T - Thickness (Note 5)		thickness of material	
R - Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L - Overall length, min (Note 2 and 7)	450	200	100
A - Length of reduced section, min	225	57	32
B - Length of grip section, min (Note 8)	75	50	30
C - Width of grip section, approximate (Notes 4 and 9)	50	20	10



รูปที่ 4.1 แสดงรูปของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

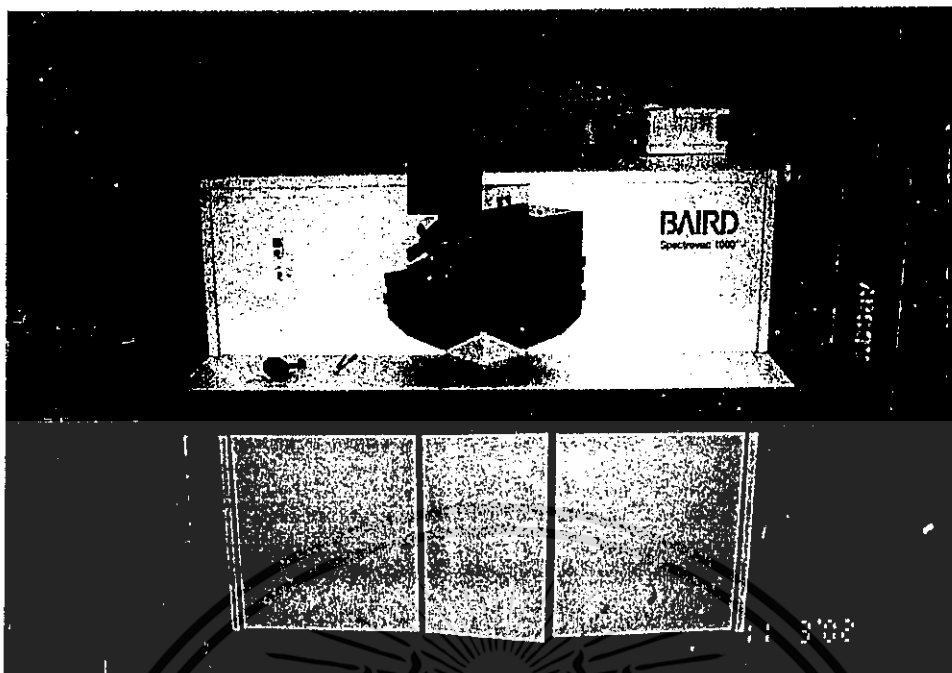
เมื่อได้ตัวอย่างของชิ้นทดสอบแล้ว นำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบ Universal testing machine ของบริษัท Testometric จากประเทศอังกฤษ รุ่น Testometric Micro 500 AX ใช้แรงดึง 10 กิโลนิวตัน, ความเร็วที่ใช้ในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวเกจ 200 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่ใช้ในทดสอบคือ 25 องศาเซลเซียส

4.1.2 การทดสอบหาความแข็งของวัสดุ (Hardness Test)

นำชิ้นงานทดสอบไปทำการทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test) ทั้ง 2 ชนิด คือ S50C และ SPCC โดยใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิด มีฐานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา ใช้แรงกด 150 กิโลกรัม และใช้เวลากด 15 วินาทีแล้วอ่านค่า โดยทำการทดสอบ 5 จุด โดยแต่ละจุดจะมีระยะห่างกันประมาณ 2 ตารางเซนติเมตร นำค่าที่ได้ของแต่ละจุดมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย (จากการทดสอบข้างต้นได้รับความอนุเคราะห์จากกรมวิทยาศาสตร์)

4.1.3 การตรวจสอบหาสารประกอบของวัสดุ (Composite Test)

การตรวจสอบหาคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ S50C และ SPCC เพื่อหาความแตกต่างทางคุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิด เพื่อยืนยันความแตกต่างของวัสดุทั้ง 2 ว่ามีความแตกต่างกันทางคุณสมบัติ โดยวิธีการทดสอบโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนเหลว ฉีดลงบนเนื้อวัสดุเพื่อละลายเนื้อวัสดุแล้วทำการตรวจเช็ค ผลของการทดสอบจะแสดงออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยทำการตรวจสอบทั้งหมด 3 จุด โดยแต่ละจุดจะอยู่ห่างกันประมาณ 2 ตารางเซนติเมตร โดยการทดสอบจะใช้เครื่อง BAIRD Spectrovac 1000 Model OV4 SERIAL 2054 (BAIRD 125 MIDDLESEX TURNPIKE BEDFORD, MA. 01730 FSCM 05234)



รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องทดสอบ BAIRD Spectrovac 1000 Model OV4 SERIAL 2054

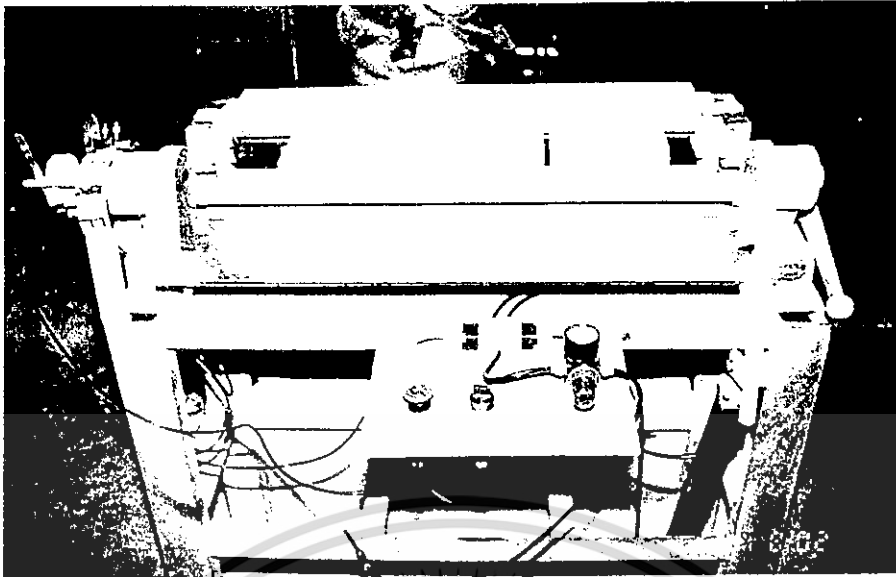
4.2 วิธีการทดสอบหาค่าการเกิด Springback

4.2.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ

การเลือกชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะเลือกวัสดุที่มีค่าความแตกต่างทางด้านความแข็งของวัสดุ โดยการเลือกวัสดุที่มีค่า Carbon แตกต่างกันไปเพราะค่า Carbon จะบ่งบอกถึงความแข็งของวัสดุ เมื่อทำการเลือกวัสดุได้แล้วนำวัสดุไปทำการตัด ทำเป็นชิ้นทดสอบ โดยมีขนาด 50x70 mm. โดยวิธีการเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบนั้นต้องดูว่า วัสดุที่นำมาใช้นั้นรีดมาตามความยาวหรือตามขวาง แต่โดยทั่วไปจะทำการรีดตามความยาวของวัสดุ เพราะว่าการทดสอบจะทำการพับขวางรอยรีด ถ้าทำการพับตามแนวรีดจะทำให้ชิ้นงานในการทดสอบมีการแตกหักได้ง่าย

4.2.2 วิธีการพับวัสดุในการทดสอบ

นำชิ้นวัสดุมาเข้าเครื่องทดสอบโดยเลือกชิ้นงานให้แน่น จากนั้นทำการปรับแรงดันลมที่ 3 bar ที่วัสดุหนา 1 mm. และที่ 6 bar ที่วัสดุหนา 2 mm. แล้วทำการปรับ Limit Switch ไปที่องค์การพับต่าง ๆ ที่ต้องการ ทำการกด Switch เพื่อให้ระบบทำงาน จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกแล้วทำการทดสอบที่องค์การอื่นต่อไป โดยการปรับ Limit Switch ไปที่องค์การนั้น หรือทำการทดสอบที่องค์การเดียวกันซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 4.3 แสดงเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.3 กระบวนการหาองศาการตีกลับ

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบที่ทำการพิบเสร็จแล้ว นำไปเข้าวัดหาองศาที่ได้จากการพิบ เพื่อหาองศาจริงที่ได้จากการทดสอบ ในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบ Profile Projector Model PJ 311 เครื่องทดสอบจะใช้แสงเป็นตัววัด ในการวัดจะนำชิ้นทดสอบวางบนเครื่องตรวจสอบ ทำการปรับตั้งเครื่อง วางชิ้นทดสอบให้ชิดติดกับเส้นตรวจสอบ เมื่อได้แล้วทำการเลื่อนเส้นทดสอบมาอีกด้านหนึ่งของวัสดุ แล้วตั้งให้ใกล้เคียงในการทดสอบข้างต้นแล้วอ่านค่าจากเครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.4 แสดงเครื่อง Profile Projector Model PJ 311

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 กระบวนการทางศาสตร์ที่กลับโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

4.2.4.1 FEM Model

จากการใช้ FEM Model มาช่วยในการคำนวณ ต้องมีการสร้างแบบจำลองการพับขึ้นมา เพื่อทำการแก้ไขปัญหา โดยการคำนึงถึงลักษณะการทำงานจริง



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบของ FEM Model แบบ 3 มิติ

4.2.4.2 ขั้นตอนการสร้าง Module Part

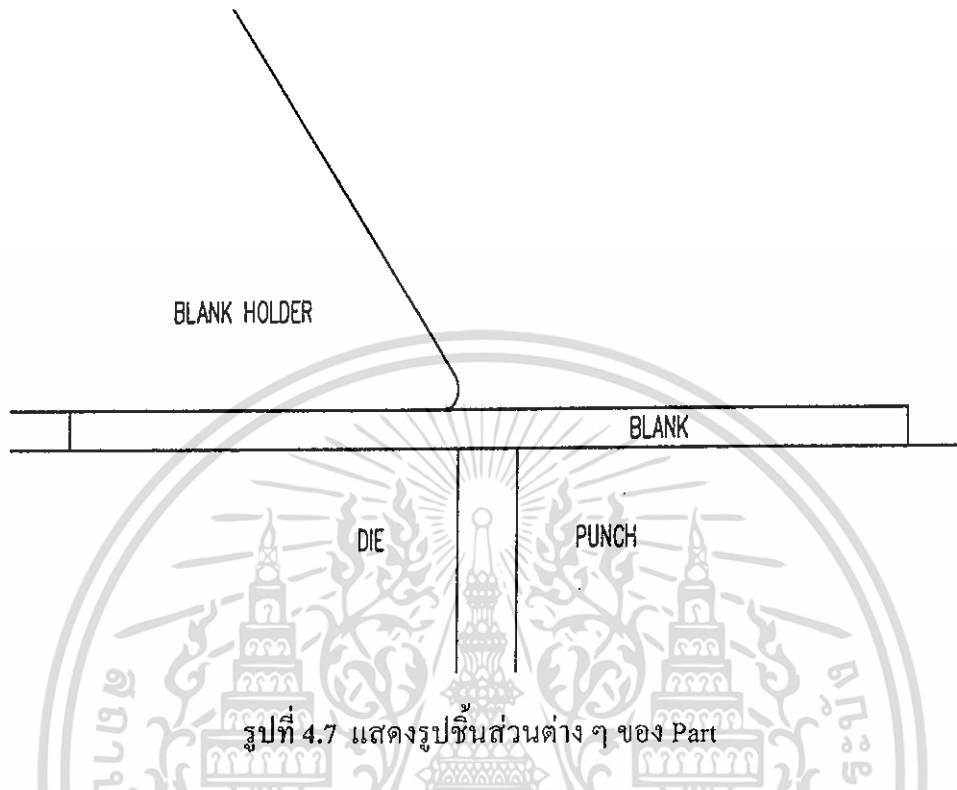
Part Manager		
Name	Description	Status
Blang	2D Deformable	
BlankHolder	2D Analytical Rigid	
Die	2D Analytical Rigid	
Punch	2D Analytical Rigid	

Create... Copy... Rename... Delete... Lock Unlock Dismiss

รูปที่ 4.6 แสดงชื่อชิ้นส่วนต่างๆ ของชิ้นส่วนในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของ Module Part นี้ ได้ทำการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ตาม Model ที่ได้กำหนดไว้ โดยทำการสร้างที่ละชิ้นส่วน ด้วยการสร้างภาพเป็นแบบ 2 มิติ



รูปที่ 4.7 แสดงรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ Part

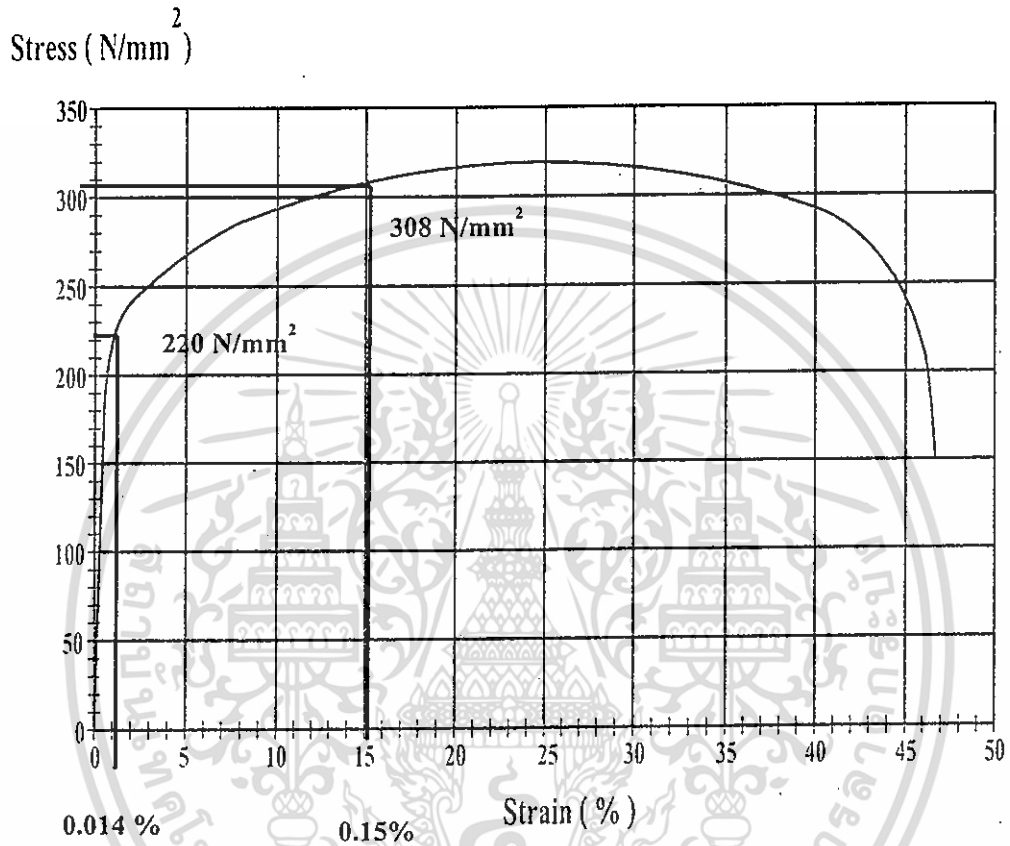
4.2.4.3 ขั้นตอนการสร้าง Module Property

ในส่วนของ Module Property ก่อนที่จะทำในส่วนนี้นั้น ต้องทำการตรวจสอบค่าของวัสดุที่จะทำการทดลองก่อน โดยทำการตรวจสอบหาค่าแรงดึงที่วัสดุสามารถทำได้ โดยค่าที่ได้จะอยู่ในส่วนของ ค่า Stress , Strain

Material	:	SPCC
E	:	21000 N/mm ²
σ_y	:	220 N/mm ²
U	:	0.291
Material	:	S50C
E	:	18200 N/mm ²
σ_y	:	800 N/mm ²
U	:	0.292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่ทำการดึงวัสดุ จะได้กราฟค่าของ Stress และ Strain นำกราฟที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ยบนเส้นกราฟ โดยแต่ละจุดที่แบ่งต้องเท่ากันและทำการหาค่า Stress และค่า Strain บนกราฟที่ทำการแบ่ง จากนั้นทำการใส่ค่าต่าง ๆ ลงใน Property ของโปรแกรม โดยการใส่ค่าจะมีการแบ่งแยกออกอย่างเห็นได้ชัดว่า จะมีในส่วนของ Elastic และ Plastic



รูปที่ 4.8 แสดงวิธีการหาค่า Stress-Strain บนเส้นกราฟการทดลอง

ตัวอย่างจากรูปเป็นการหาค่า Strain จากกราฟระหว่างตำแหน่งที่ 1 จะได้ค่า Strain 0.014% และตำแหน่งที่ 6 จะได้ค่า Strain 0.15%

Figure 4.9: Material Properties for SPCC

A: Elastic Properties

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	21000	0.291

B: Plastic Properties

	Yield Stress	Plastic Strain
1	220	0
2	252	0.031
3	277	0.059
4	287	0.089
5	300	0.119
6	308	0.15
7	314	0.181
8	317	0.213
9	319	0.244
10	318	0.276
11	315	0.307
12	309	0.338
13	302	0.369
14	292	0.4
15	273	0.429
16	293	0.451
17	196	0.463
18	149	0.466

รูปที่ 4.9 แสดงค่าของวัสดุชนิด SPCC ที่ได้จากการทดสอบ

A คือ ค่าของ Elastic

B คือ ค่าของ Plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Edit Material
Name: SPCC

Material Options
Elastic
Plastic

General Mechanical Thermal Other Delete

Elastic
Type: Isotropic Suboptions
 Use temperature-dependent data
Number of field variables: 0
Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	18200	0.292

OK Cancel

A

Edit Material
Name: SPCC

Material Options
Elastic
Plastic

General Mechanical Thermal Other Delete

Plastic
Hardening: Isotropic Suboptions
 Use strain-rate-dependent data
 Use temperature-dependent data
Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	800	0
2	822	0.047
3	836	0.055
4	843	0.063
5	849	0.071
6	853	0.079
7	855	0.088
8	854	0.096
9	851	0.104
10	847	0.112
11	840	0.121
12	831	0.129
13	820	0.136
14	805	0.144
15	789	0.151
16	770	0.158
17	749	0.164
18	726	0.17

OK Cancel

B

รูปที่ 4.10 แสดงค่าของวัสดุชนิด S50C ที่ได้จากการทดสอบ

A คือ ค่าของ Elastic

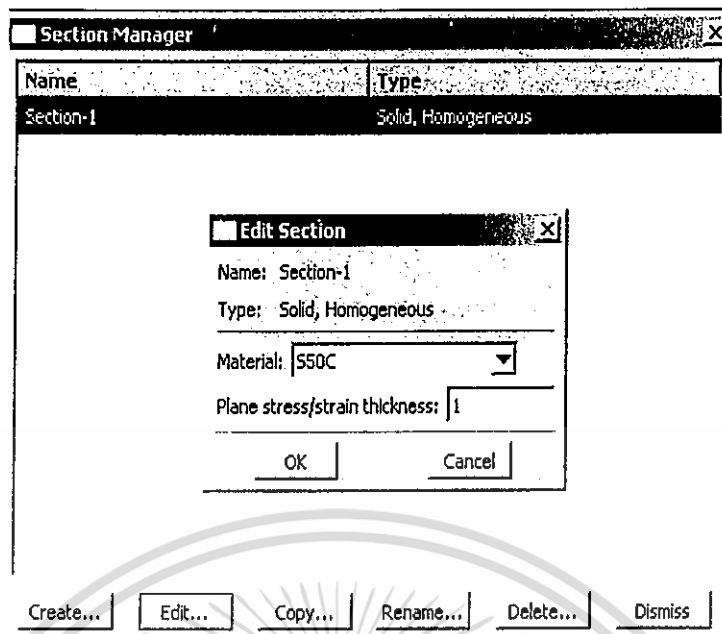
B คือ ค่าของ Plastic

4.2.4.4 กำหนดค่า Section ของวัสดุที่ทำการทดลอง

ทำการกำหนดค่าความหนาของวัสดุ และชื่อของวัสดุที่ทำการทดลองลงในส่วนของ

Section – 1

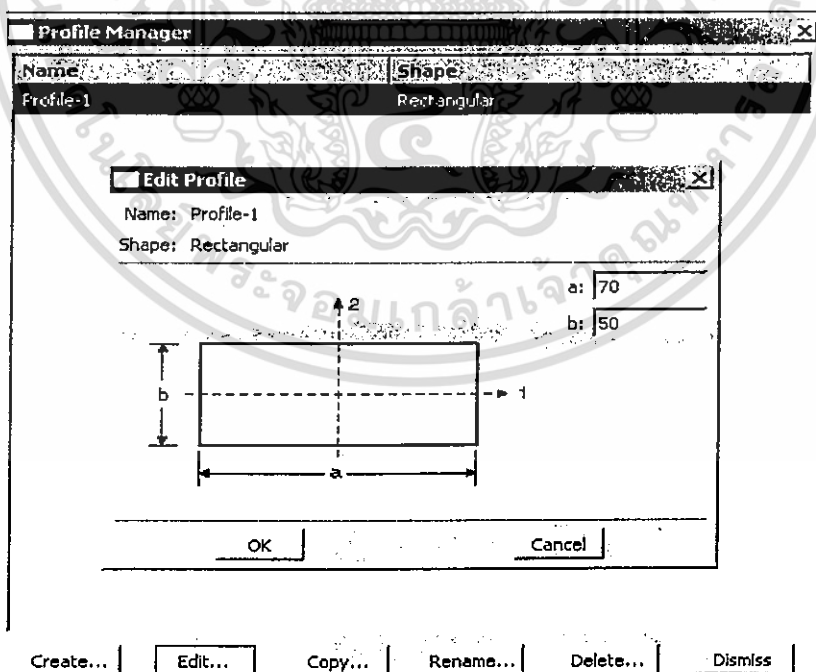
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงค่าของ Section ของวัสดุ

4.2.4.5 กำหนดค่า Profile Manager ของวัสดุที่ทำการทดลอง

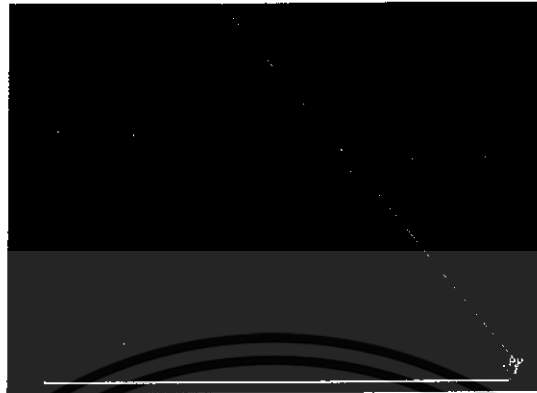
ทำการกำหนดค่าความกว้างความยาวของวัสดุลงในส่วน Profile Manager ในส่วนนี้
ค่าทำการทดสอบแบบ 2D ไม่จำเป็นต้องใส่ค่านี้ลงไป เพราะไม่คำนึงถึงแกน X ในการทดสอบ



รูปที่ 4.12 แสดงถึงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

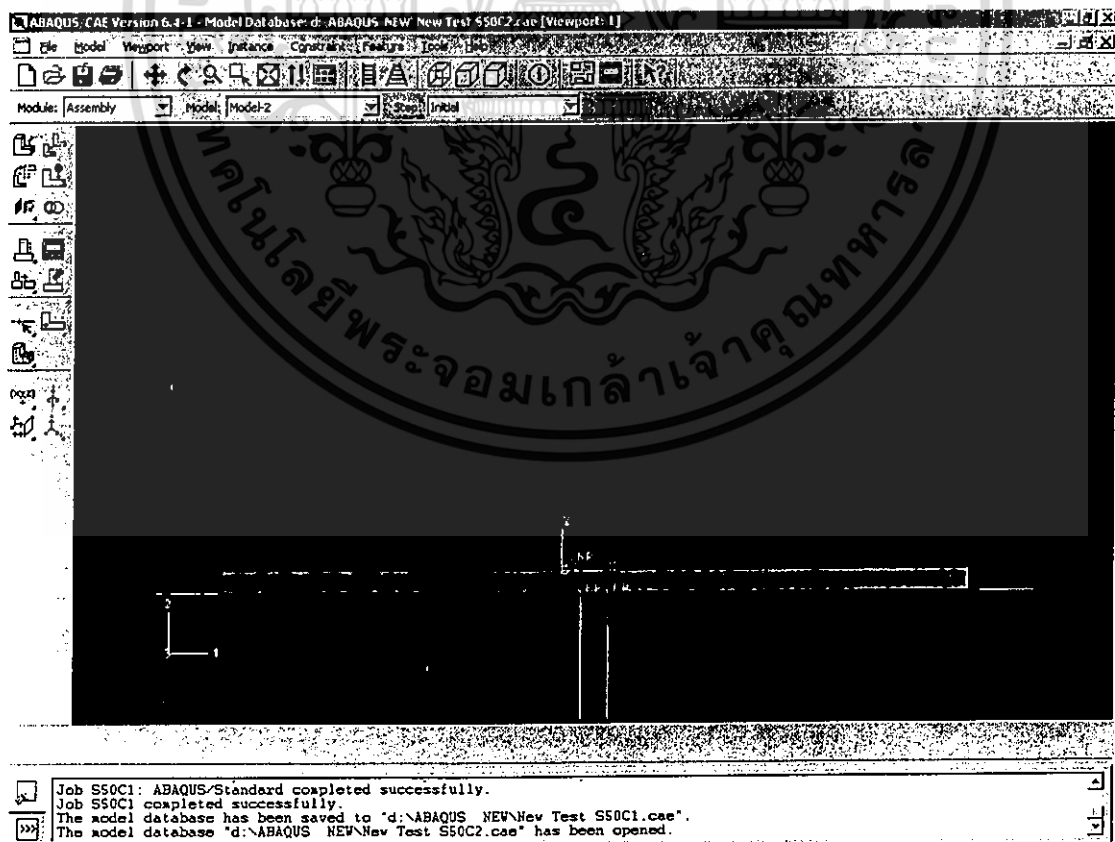
จากนั้นทำการสร้างจุดอ้างอิงบนชิ้นงานทดสอบเพื่อใช้ในการสร้าง Step การทำงานต่อไป



รูปที่ 4.13 แสดงจุดอ้างอิงบนชิ้นงานทดสอบ

4.2.4.6 ขั้นตอนการสร้าง Module Assembly

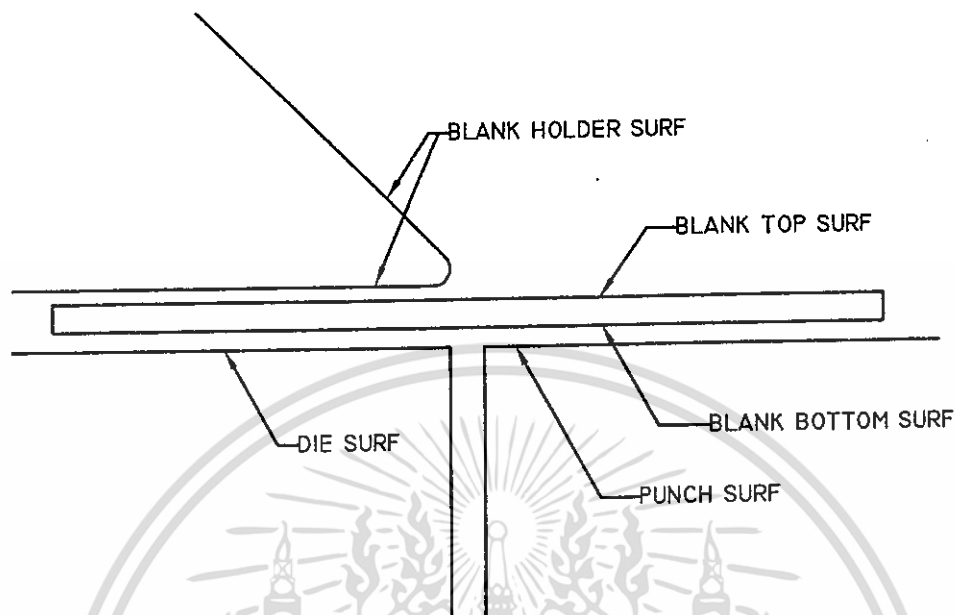
เป็นการนำชิ้นงานที่ทำการสร้างไว้ในส่วนของ Part มาทำการประกอบ ตามรูปแบบที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้



รูปที่ 4.14 แสดง Part ต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการ Set ชื่อผิวชิ้นงานในแต่ละด้าน เพื่อใช้ในการสร้างผิวสัมผัสของชิ้นงาน โดยมีการกำหนดชิ้นงานที่มีผิวสัมผัสกัน



รูปที่ 4.15 แสดงชื่อของผิวสัมผัสแต่ละด้านของชิ้นงาน

4.2.4.7 ขั้นตอนการสร้าง Module Step

จากการวิเคราะห์การทำงานจริง สามารถนำมาวิเคราะห์โดยใช้หลักไฟไนต์อีลิเมนต์ สามารถวิเคราะห์หลักการงานได้ทั้งหมด 5 Step โดยทำการวิเคราะห์เป็นแบบ Static ได้ดังนี้

Step 1

- Fixed Blank , Punch

- เคลื่อนที่ Blank Holder = 0.001

Die = 0.0001 โดยให้ Load ที่ 100

Step 2 Load Holder

Step 3 Release , Blank

Step 4 หมุน Punch Up

Step 5 หมุน Punch Down

4.2.4.8 ขั้นตอนการสร้าง Module Interaction

Interaction Manager							
Name	Initial	MoveHolderDie	LoadHolder	ReleaseBlank	Punch Up	PunchDown	Edit...
DieBotttomBlank	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Move Left
HolderBlankTop	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Move Right
PunchButtomBlank					Created	Propagated	Activate
							Deactivate

Step procedure:

Interaction type: Surface-to-surface contact (Standard)

Interaction status: Created in this step

Create... Copy... Rename... Delete... Dismiss

รูปที่ 4.16 แสดงผิวสัมผัสของการทำงานแต่ละ Step

Edit Interaction	
Name:	DieBotttomBlank
Type:	Surface-to-surface contact (Standard)
Step:	Initial
Master surface:	Die Surf <input type="button" value="Edit Region..."/> <input type="checkbox"/>
Slave surface:	Blank Bottom Surf <input type="button" value="Edit Region..."/> <input type="checkbox"/> <input type="button" value="Switch"/>
Sliding formulation:	<input checked="" type="radio"/> Finite sliding <input type="radio"/> Small sliding
Slave Node Adjustment	
<input type="radio"/> Do not adjust slave nodes	
<input checked="" type="radio"/> Adjust only overclosed nodes	
<input type="radio"/> Adjust nodes within <input type="text"/> units of the master surface	
<input type="radio"/> Adjust slave nodes in set: <input type="text"/>	
Note: Slave node positions will be adjusted to be precisely in contact with the master surface at the beginning of the analysis.	
Interaction property:	Nofric <input type="button" value="Create..."/>
(Contact properties)	
Options:	Interference Fit...
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

รูปที่ 4.17 แสดงการกำหนด Master Surface และ Slave Surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Module นี้ เป็นการกำหนดคุณสมบัติของผิวสัมผัส (Contact Property) จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าผิวสัมผัสของ Part ที่สัมผัสกันมีทั้งหมด 3 จุด

Blank Holder จะสัมผัสกับ Blank

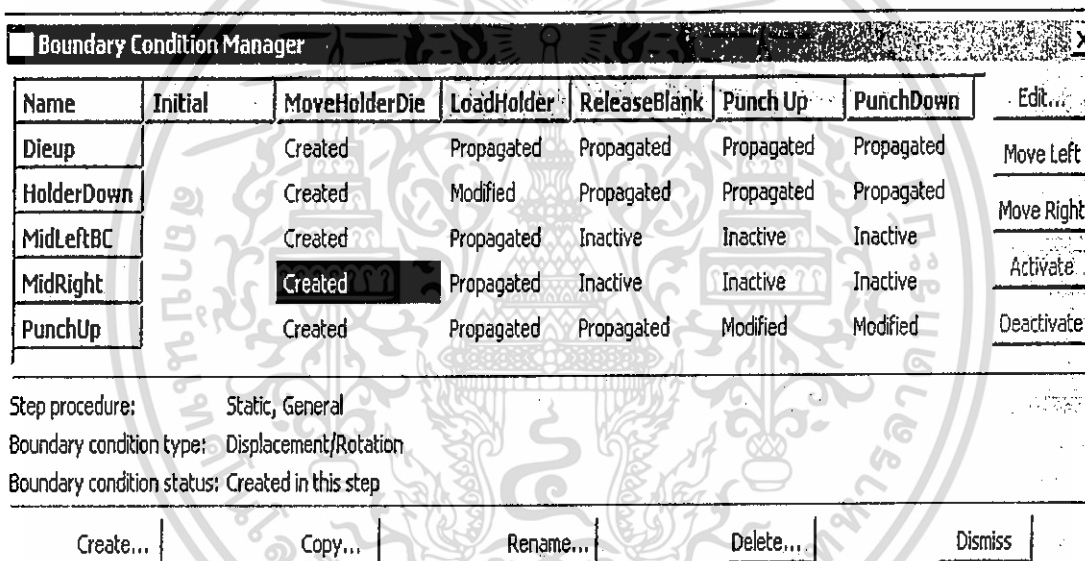
Die จะสัมผัสกับ Blank

Punch จะสัมผัสกับ Blank

จากรูปที่ 4.16 เป็นการกำหนด ผิวสัมผัสของ Part แต่ละชิ้นจะขึ้นอยู่กับ Step การทำงานว่าชิ้นใดจะเป็น “Master Surface” หรือ “Slave Surface”

4.2.4.9 ขั้นตอนการสร้าง Module Load

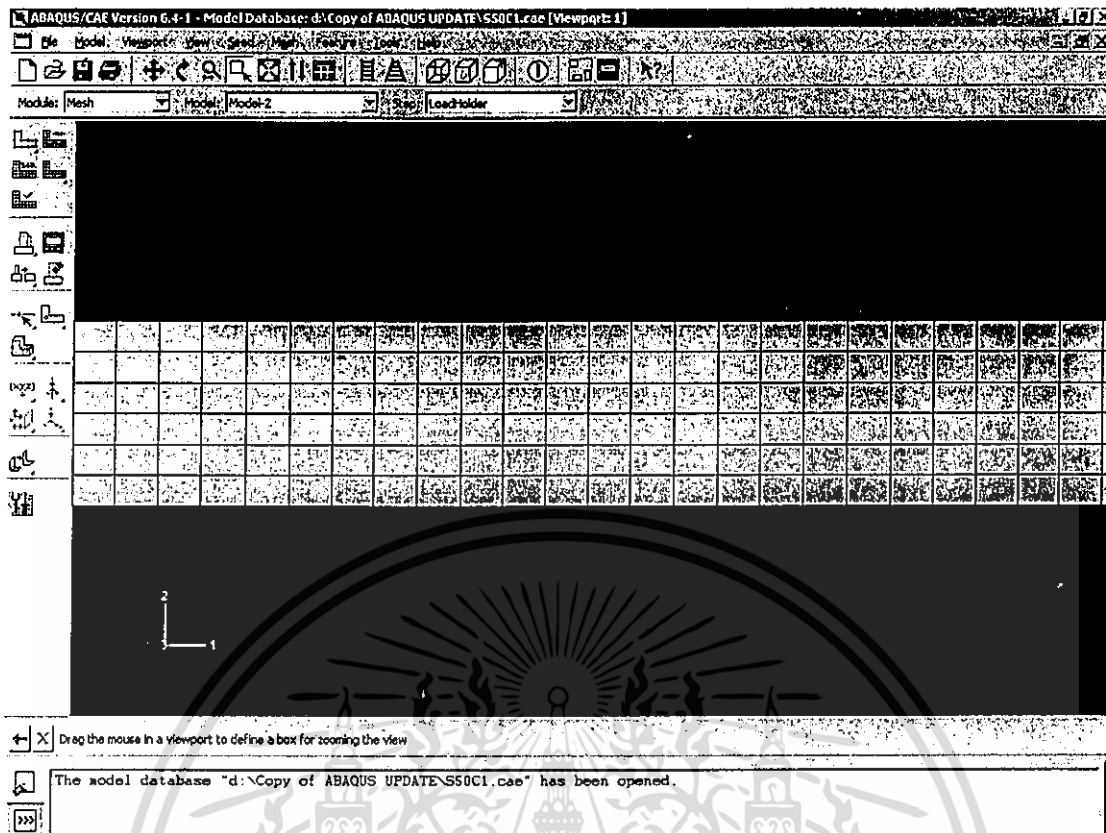
จาก Module นี้เป็นการกำหนด Load ตามการทำงานตาม Step ต่าง ๆ โดยที่วัสดุจะถูกกดทับด้วยแรง 1000 N. และวัสดุจะถูกพับขึ้นตามรัศมีการหมุนของ Punch โดยที่ใช้แรง 10,000 N.



รูปที่ 4.18 แสดงการลำดับการทำงานในส่วนของ Boundary Condition

4.2.4.10 ขั้นตอนการสร้าง Module Mesh

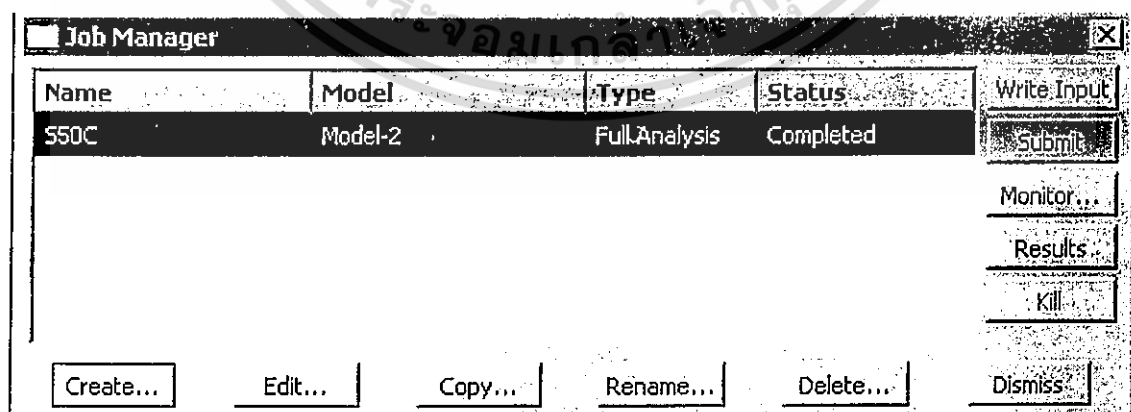
จาก Module นี้เป็น Module ที่ทำการกำหนด Element ในชิ้นงานที่ทำการทดสอบ การกำหนด Element เพื่อแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละ Element การกำหนด Element ที่มีความละเอียดมากจะทำให้สิ่งที่ได้จากการทำแบบจำลอง จะมีความละเอียดมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.19 แสดงการแบ่ง Element ของชิ้นทดสอบ

4.2.4.11 ขั้นตอนการสร้าง Module Job

Module นี้เป็นการสร้าง Job ที่ทำมาทั้งหมดเพื่อทำการ Running Program ว่าที่ทำมาทั้งหมดสามารถที่จะหาผลการทำการทดสอบได้หรือไม่ จากตัว Program สามารถบอกได้ว่าขั้นตอนที่ไปทั้งหมดถูกต้องหรือไม่



รูปที่ 4.20 แสดงการ Create Job

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S50C Monitor [X]

Job: S50C Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LP Inc
1	1	1	1	2	3	1	1	1
2	1	2	0	6	6	1.25	0.25	0.25
2	2	1	0	3	3	1.5	0.5	0.25
2	3	1	0	2	2	1.75	0.75	0.25
2	4	1	0	1	1	2	1	0.25
3	1	1	0	3	3	3	1	1
4	1	2	0	2	2	3.0025	0.0025	0.0025
4	2	1	0	3	3	3.005	0.005	0.0025
4	3	3	1	2	3	3.00523	0.00523438	0.0002343
4	4	1	0	2	2	3.00559	0.00558594	0.0003515
4	5	1	0	1	1	3.00611	0.00611328	0.0005273
4	6	2	0	1	1	3.00631	0.00631104	0.0001977
4	7	1	10	1	11	3.00661	0.00660767	0.0002966

Log | Errors | Warnings | Output

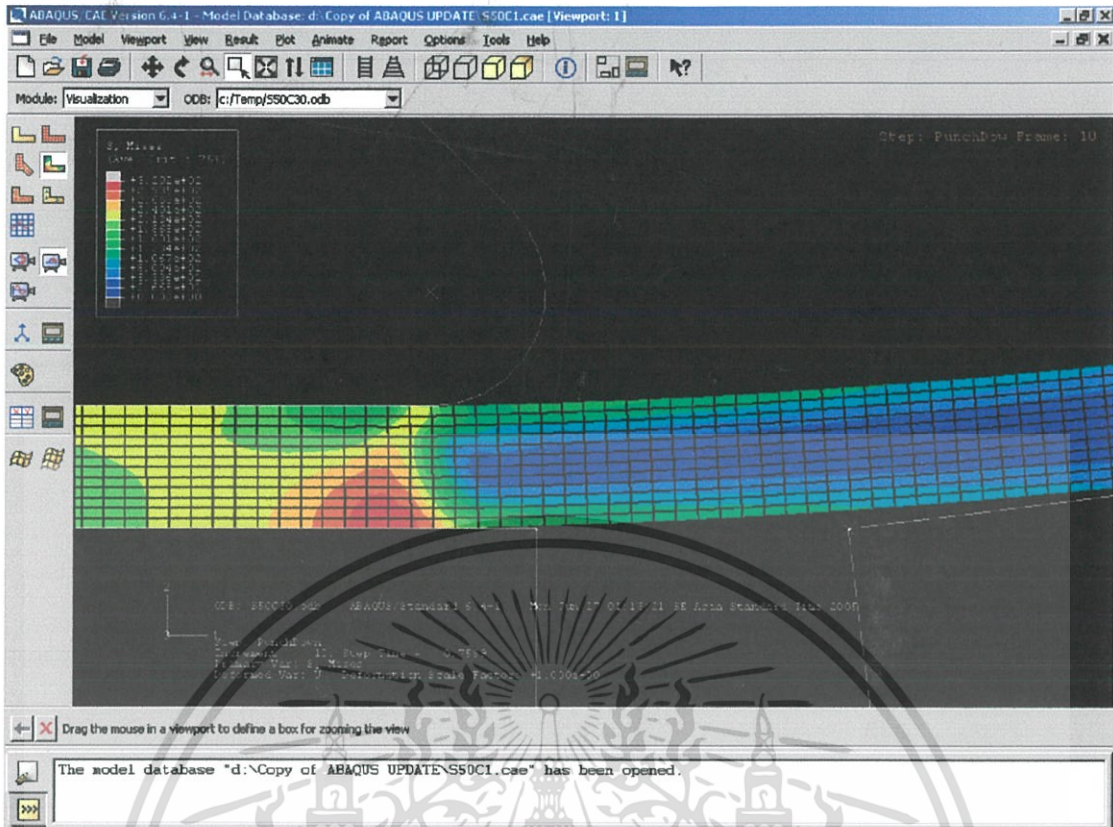
Submitted: Fri Jun 24 10:17:33 2005
 Started: Solver Input File Processor
 Completed: Solver Input File Processor
 Started: ABAQUS/Standard
 Completed: ABAQUS/Standard
 Completed: Fri Jun 24 10:20:08 2005

Kill Dismiss

รูปที่ 4.21 แสดงผลที่ได้จากการ Run Program

4.2.4.12 ขั้นตอนการสร้าง Module Visualization

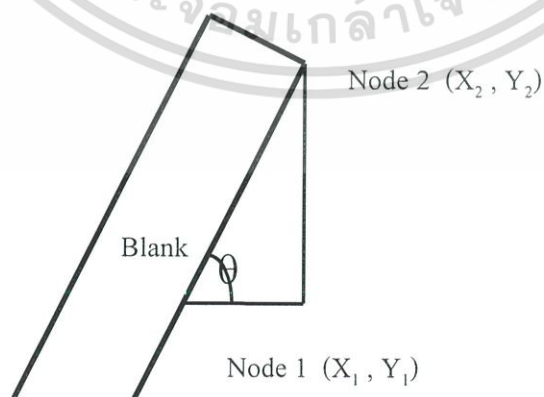
Module นี้เป็นการแสดงผลที่ได้จากการทำแบบจำลอง โดยที่ผลของการทดลองจะออกมาในรูปของกราฟ และในรูปของสีที่เกิดขึ้นจากค่าความเค้นและความเครียด แต่ละสีที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่บอกในแต่ละจุดของ Element



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความเค้นที่เกิดจากการทำแบบจำลอง

4.2.4.13 การหาองศาการเกิด Springback จาก Node

จากการทำแบบจำลอง ต้องทำการหาองศาการดัดกลับของวัสดุ หรือทำการหาองศาของวัสดุที่ทำการพับไปแล้วว่ามีองศาเท่าใด ในทางการทำแบบจำลองนี้สามารถหาได้จากการหาค่า X,Y ในแต่ละ Node ของ Blank จากนั้นนำมาเข้าสมการในการหาองศา



รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่า X , Y ในแต่ละ Node

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการหาค่าการองศาการพับ

$$\tan \theta = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (4.1)$$

4.3 วิธีการชดเชยของศาการติดกลับของวัสดุ

4.3.1 วิธีการชดเชยของศาการติดกลับโดยการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นสามารถนำมาทำการทดลองหาค่าการเกิดศาการติดกลับของวัสดุได้ โดยการเพิ่มองศาการพับเพิ่มขึ้นทีละองศา จนกระทั่งองศาของวัสดุหลังจากการพับมีค่าเท่าที่ต้องการ หรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบซ้ำประมาณ 10 ครั้ง และนำค่าที่ได้มาหาค่าระหว่างที่ได้มาทำการ Interpolate หาค่าระหว่างขององศาที่ทำการพับ

4.3.2 วิธีการชดเชยของศาการติดกลับโดยทางทฤษฎี

วิธีนี้เป็นวิธีที่นำค่าที่ได้จากการคำนวณหาองศาการพับที่ได้ หลังจากการพับไปแล้ว จากนั้นนำค่าองศาของวัสดุมาหาค่าการชดเชยการติดกลับของวัสดุ โดยการใช้ทฤษฎีในการหา โดยวิธีการนำค่าที่ได้มาแทนในสมการต่าง ๆ สมการที่ใช้ คือ สมการที่ 3.11

4.3.3 วิธีการชดเชยของศาการติดกลับโดยการทำแบบจำลอง

จากการทำแบบจำลอง ค่า Error จะสูงมาก การชดเชยของศาการติดกลับโดยการนำค่า Error ที่เกิดจากการทำแบบจำลองมาทำการชดเชยนั้น จะทำให้ได้ค่าที่ยังไม่สามารถนำสรุปได้ว่าถูกต้อง ฉะนั้นการชดเชยที่ทำอยู่ในการทดสอบนี้ คือ การทำ Interpolate หาค่าใกล้เคียงจากการพับ โดยทำการทำแบบจำลองการพับและหาค่าใกล้เคียงมากที่สุด

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดสอบลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

5.1.1 ผลการทดสอบหาสารประกอบในเนื้อวัสดุ

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสารประกอบของวัสดุ S50C

Sample	: S50C			
Alloy	: LAS Mode : PA 6-Mar-2002 Time 16:52			
Burn 1				
Fe 98.3674	C 0.4978	SI 0.2304	Mn 0.7500	P 0.0330
S 0.0151	Ni 0.0095	Cr 0.0230	Mo 0.0041	Cu 0.0061
V 0.0053	Ti 0.0015	Al 0.0224	W 0.0328	Co <0.0000
Sn 0.0015				
Burn 2				
Fe 98.3418	C 0.5069	SI 0.2343	Mn 0.7539	P 0.0343
S 0.0154	Ni 0.0099	Cr 0.0235	Mo 0.0044	Cu 0.0063
V 0.0054	Ti 0.0015	Al 0.0242	W 0.0362	Co 0.0002
Sn 0.0019				
Burn 3				
Fe 98.3491	C 0.4933	SI 0.2337	Mn 0.7582	P 0.0350
S 0.0154	Ni 0.0099	Cr 0.0233	Mo 0.0045	Cu 0.0064
V 0.0054	Ti 0.0015	Al 0.0241	W 0.0379	Co 0.0003
Sn 0.0020				
Average				
Fe 98.3528	C 0.4993	SI 0.2328	Mn 0.7540	P 0.0341
S 0.0153	Ni 0.0098	Cr 0.0233	Mo 0.0043	Cu 0.0063
V 0.0054	Ti 0.0015	Al 0.0236	W 0.0356	Co 0.0001
Sn 0.0018				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสารประกอบของวัสดุ SPCC

Sample	: SPCC			
Alloy	: LAS Mode : PA 6-Mar-2002 Time 16:54			
Burn 1				
Fe 99.5139	C 0.0372	SI 0.0096	Mn 0.2079	P 0.0410
S 0.0180	Ni 0.0165	Cr 0.0467	Mo 0.0052	Cu 0.0081
V 0.0037	Ti 0.0015	Al 0.0535	W 0.0349	Co 0.0005
Sn 0.0018				
Burn 2				
Fe 99.5057	C 0.0396	SI 0.0096	Mn 0.2066	P 0.0413
S 0.0182	Ni 0.0162	Cr 0.0478	Mo 0.0051	Cu 0.0081
V 0.0037	Ti 0.0015	Al 0.0558	W 0.0389	Co <0.0000
Sn 0.0018				
Burn 3				
Fe 99.4909	C 0.0413	SI 0.0095	Mn 0.2094	P 0.0423
S 0.0184	Ni 0.0167	Cr 0.0476	Mo 0.0055	Cu 0.0084
V 0.0038	Ti 0.0015	Al 0.0599	W 0.0411	Co 0.0009
Sn 0.0021				
Average				
Fe 99.5035	C 0.0394	SI 0.0096	Mn 0.2080	P 0.0415
S 0.0182	Ni 0.0167	Cr 0.0473	Mo 0.0053	Cu 0.0082
V 0.0037	Ti 0.0014	Al 0.0564	W 0.0383	Co 0.0005
Sn 0.0019				

จากตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 พบว่าสารประกอบเนื้อวัสดุ SPCC และ S50C ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าสารประกอบใกล้เคียงกันมาก แต่มีอยู่หนึ่งตัวซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก คือ คาร์บอนจะมีมากในวัสดุ S50C ค่าของคาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ จะมีผลทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงมากขึ้น

5.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางด้านความแข็ง

จากรายงานการตรวจสอบผลการทดสอบความแข็งภายในเนื้อวัสดุ ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม ซึ่งยื่นยื่นคำทำนายความแข็งของวัสดุทั้งสองชนิดได้ว่า วัสดุชนิดที่มีค่าคาร์บอนมาก จะทำให้วัสดุมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่มีค่าของคาร์บอนที่เป็นส่วนผสมของวัสดุน้อย จากการตรวจสอบทำให้ทราบว่าวัสดุ S50C มีค่าความแข็งของวัสดุมากกว่าวัสดุ SPCC ค่าความแข็งของวัสดุสามารถดูได้จากตารางการตรวจสอบที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความแข็งของ S50C และ SPCC

ชนิดวัสดุ	เลขที่ปฏิบัติการ	Rockwell Scale C (HRC)	Vicker (HV)	Brinell (HB)
SPCC	WB.598	-	99.7	94.7
S50C	WB.599	26.8	277.86	263.29

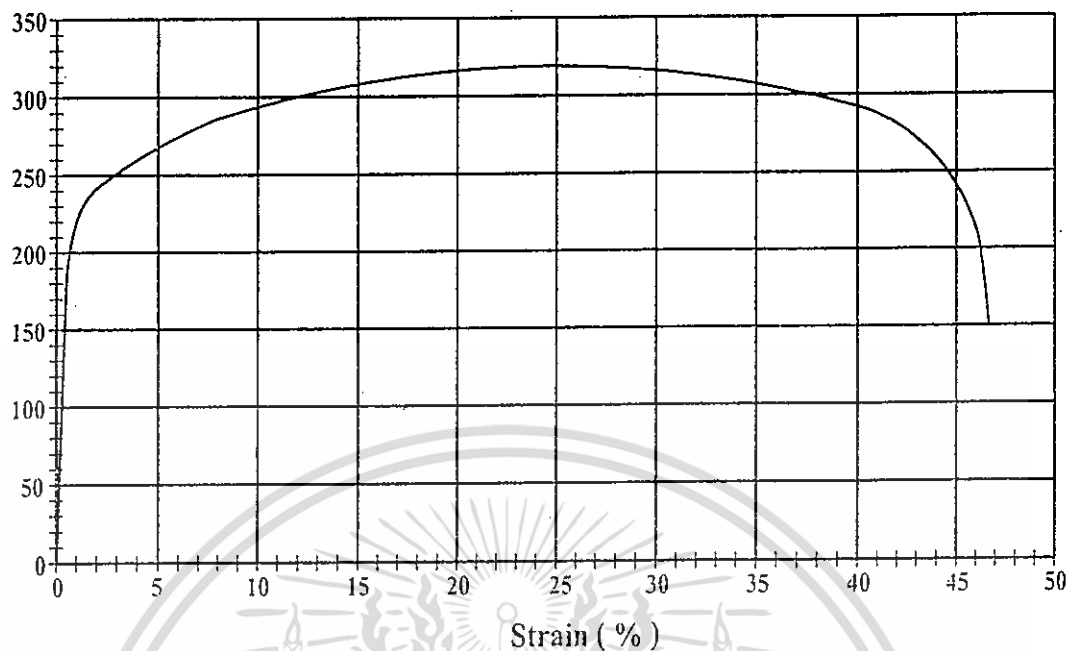
5.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางด้านแรงดึง

จากการตรวจสอบผลการตรวจสอบของวัสดุ แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดต่างกัน ซึ่งจากตารางที่ 5.4 จะแสดงให้เห็นได้ว่าวัสดุ S50C มีค่า Yield Strength มากกว่าวัสดุชนิด SPCC ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า และจากรูปที่ 5.1 เป็นรูปของการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SPCC และรูปที่ 5.2 เป็นรูปของการทดสอบแรงดึงของวัสดุ S50C จะเห็นว่าระยะยืดตัวของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่วัสดุ SPCC มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวออกมากกว่าวัสดุชนิด S50C ทั้งนี้เป็นเพราะสาเหตุว่า วัสดุชนิด SPCC มีความเหนียวกว่าจึงทำให้เกิดการยืดตัวได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุ SPCC และ S50C

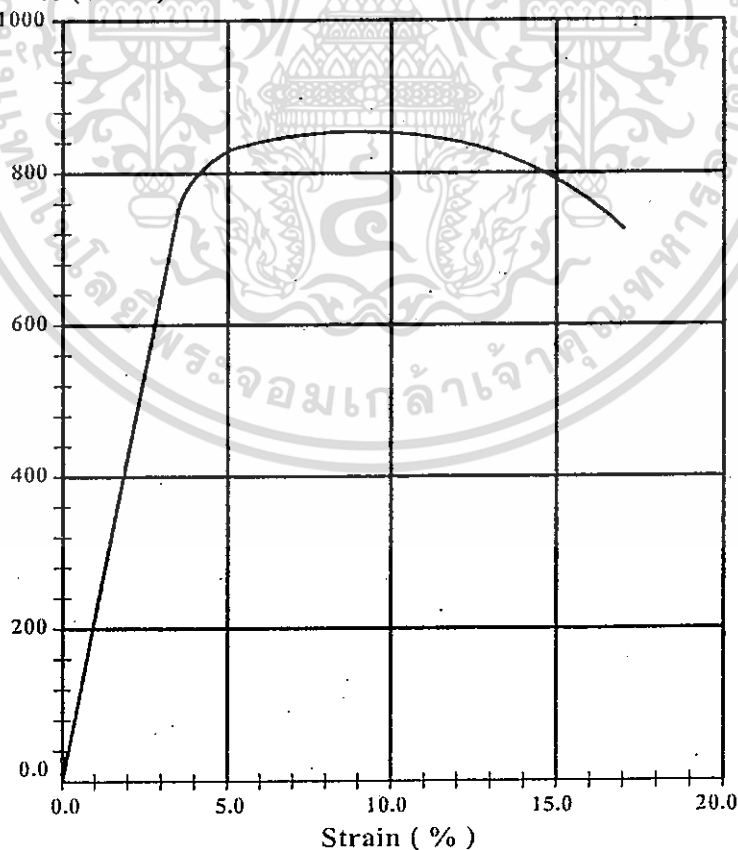
Material	Yield Strength	Elastic Modulus	Poisson Ratio
	[MPa]	[GPa]	[U]
SPCC	220	21	0.291
S50C	800	18.2	0.292

Stress (N/mm²)



รูปที่ 5.1 แสดงกราฟการทดสอบค่า Stress และ Strain ของวัสดุ SPCC

Stress (MPa)



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟการทดสอบค่า Stress และ Strain ของวัสดุ S50C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดสอบการพับวัสดุและการชดเชยของเสาการตีคดกลับ

5.2.1 ผลการทดสอบหาการตีคดกลับของวัสดุทางปฏิบัติ

จากตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 เป็นการทดสอบวัสดุชนิด S50C ขนาด 1 mm. และขนาด 2 mm. ทำให้ทราบว่าวัสดุที่ทำการทดลองมีการตีคดกลับ ทำให้องศาที่ทำการพับนั้นไม่ได้ตามองศาที่ต้องการ จากตารางที่ 5.4 จะเห็นว่าค่าของการตีคดกลับขององศาการพับจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมากที่สุดจะอยู่ที่ 50 องศา และจะลดลงมา ทั้งนี้เป็นเพราะว่าวัสดุจะมีการยืดตัวออก ซึ่งในตอนที่มีการให้โหลดกับวัสดุในช่วงแรก วัสดุจะเป็น Elastic คือ วัสดุที่มีความหนานั่นเมื่อทำการพับวัสดุ ความหนาของวัสดุจะมีผลต่อการยืดตัว ซึ่งค่านอกสุดที่มีการพับเกิดขึ้นจะเกิดการยืดตัวออกมากกว่าด้านในของวัสดุ ทำให้การตีคดกลับของวัสดุในแต่องศาการพับจะไม่เท่ากันทุกองศาการพับ และเมื่อทำการพับในองศาที่มากขึ้น วัสดุจะอยู่ในช่วง Plastic มากขึ้น ทำให้องศาในการตีคดกลับน้อยลง จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าความหนาของวัสดุมีผลต่อการเกิดการตีคดกลับ โดยวัสดุที่มีความหนามากกว่าจะมีองศาการตีคดกลับน้อยกว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่า

ตารางที่ 5.5 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.

ครั้งที่	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	2°06'	7°05'	12°49'	19°31'	26°57'	37°02'	48°42'	60°17'	72°15'
2	2°03'	7°04'	12°46'	19°37'	27°	37°03'	48°44'	60°23'	72°12'
3	2°05'	7°02'	12°45'	19°35'	26°59'	36°58'	48°50'	60°18'	72°16'
4	2°03'	7°07'	12°50'	19°34'	26°57'	36°56'	48°41'	60°15'	72°12'
5	2°04'	7°03'	12°48'	19°36'	26°56'	37°03'	48°46'	60°20'	72°13'
6	2°03'	7°04'	12°45'	19°37'	26°56'	37°02'	48°48'	60°16'	72°14'
7	2°04'	7°09'	12°47'	19°32'	27°01'	36°59'	48°42'	60°14'	72°15'
8	2°05'	7°04'	12°49'	19°34'	26°58'	37°04'	48°47'	60°22'	72°13'
9	2°05'	7°05'	12°45'	19°31'	26°59'	36°58'	48°51'	60°14'	72°09'
10	2°02'	7°07'	12°48'	19°33'	26°57'	37°02'	48°49'	60°21'	72°11'
ค่าเฉลี่ย	2°04'	7°05'	12°47'	19°34'	26°58'	37°01'	48°46'	60°18'	72°13'
องศาตีคดกลับ	7°56'	12°55'	17°13'	20°26'	23°02'	22°59'	21°14'	19°42'	17°47'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ S50C ขนาด 2 mm.

ครั้งที่	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	5°37'	12°35'	20°14'	28°43'	38°26'	48°61'	66°01'	71°05'	-
2	5°40'	12°24'	20°13'	29°46'	38°24'	48°55'	66°	70°58'	-
3	5°34'	12°21'	20°17'	28°51'	38°30'	48°57'	66°10'	71°15'	-
4	5°38'	12°28'	20°15'	28°45'	38°29'	48°54'	66°05'	70°58'	-
5	5°35'	12°32'	20°20'	29°46'	38°28'	48°62'	66°02'	71°04'	-
6	5°41'	12°25'	20°23'	28°48'	38°26'	48°54'	66°06'	71°05'	-
7	5°35'	12°34'	20°21'	28°47'	38°24'	48°60'	65°58'	70°59'	-
8	5°38'	12°23'	20°17'	29°44'	38°30'	48°58'	66°01'	71°09'	-
9	5°42'	12°24'	20°11'	28°52'	38°25'	48°56'	66°03'	71°07'	-
10	5°40'	12°34'	20°19'	28°48'	38°28'	48°53'	66°04'	71°09'	-
ค่าเฉลี่ย	5°38'	12°28'	20°17'	28°47'	38°27'	48°57'	66°03'	71°05'	-
องศาติดกลับ	4°22'	7°32'	9°43'	11°13'	11°33'	11°03'	9°57'	8°55'	-

จากตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 เป็นการทดสอบวัสดุชนิด SPCC ขนาด 1 mm. และขนาด 2 mm. ทำให้ทราบว่าวัสดุที่ทำการทดลองมีการติดกลับเหมือนกับวัสดุชนิด S50C จากตารางที่ 5.6 องศาการติดกลับมากที่สุดจะอยู่ที่ 20 องศา และตารางที่ 5.7 องศาการติดกลับมากที่สุดจะอยู่ที่ 30 องศาและลดลงมา จากวัสดุเดียวกัน องศาการติดกลับสูงสุดของวัสดุต่างกันเพราะว่าค่าความหนาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้าน Plastic ต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ S50C และ SPCC จะเห็นว่าองศาการติดกลับของวัสดุ SPCC จะมีองศาการติดกลับที่น้อยกว่าทุกช่วงองศาการพับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าวัสดุ SPCC มีค่าความแข็งที่น้อยกว่า (Stress) การยึดตัวออกหรือการเปลี่ยนแปลงจาก Elastic เป็น Plastic เป็นไปได้ง่ายกว่า และแรงที่ใช้ในการทดสอบก็จะใช้น้อยกว่าด้วย

ตารางที่ 5.7 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.

ครั้งที่	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	7°28'	16°29'	27°10'	37°58'	48°21'	58°32'	68°26'	78°42'	88°38'
2	7°32'	16°33'	27°12'	38°	48°10'	58°22'	68°34'	78°36'	88°45'
3	7°23'	16°29'	27°19'	38°03'	48°16'	58°23'	68°31'	78°30'	88°42'
4	7°22'	16°31'	27°18'	37°57'	48°14'	58°18'	68°35'	78°33'	88°40'
5	7°33'	16°33'	27°15'	37°55'	48°22'	58°27'	68°32'	78°34'	88°45'
6	7°26'	16°28'	27°11'	37°59'	48°13'	58°25'	68°29'	78°37'	88°38'
7	7°30'	16°34'	27°17'	37°58'	48°12'	58°28'	68°30'	78°39'	88°46'
8	7°28'	16°26'	27°15'	38°02'	48°15'	58°21'	68°28'	78°32'	88°44'
9	7°27'	16°25'	27°14'	38°01'	48°09'	58°28'	68°33'	78°36'	88°39'
10	7°31'	16°32'	27°19'	37°57'	48°18'	58°26'	68°32'	78°41'	88°43'
ค่าเฉลี่ย	7°28'	16°30'	27°15'	37°59'	48°15'	58°25'	68°31'	78°36'	88°42'
องศา ดีดกลับ	2°32'	3°30'	2°45'	2°01'	1°45'	1°35'	1°29'	1°24'	1°18'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดงองศาการพับที่ได้จากการทดสอบวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.

ครั้งที่	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	8°31'	18°20'	27°44'	38°10'	48°16'	58°25'	68°22'	78°52'	89°40'
2	8°30'	18°13'	27°47'	38°05'	48°12'	58°21'	68°27'	78°50'	89°35'
3	8°26'	18°17'	27°45'	38°15'	48°16'	58°25'	68°33'	78°45'	89°36'
4	8°34'	18°12'	27°50'	38°07'	48°12'	58°23'	68°28'	78°48'	89°41'
5	8°26'	18°21'	27°55'	38°09'	48°13'	58°24'	68°26'	78°51'	89°33'
6	8°29'	18°18'	27°53'	38°13'	48°08'	58°14'	68°31'	78°48'	89°31'
7	8°34'	18°16'	27°48'	38°11'	48°11'	58°15'	68°24'	78°52'	89°38'
8	8°25'	18°14'	27°51'	38°08'	48°16'	58°24'	68°28'	78°47'	89°32'
9	8°32'	18°21'	27°53'	38°09'	48°17'	58°19'	68°30'	78°44'	89°39'
10	8°33'	18°18'	27°54'	38°13'	48°09'	58°20'	68°31'	78°43'	89°35'
ค่าเฉลี่ย	8°30'	18°17'	27°50'	38°10'	48°13'	58°21'	68°28'	78°48'	89°36'
องศา ติดกลับ	1°30'	1°43'	2°10'	1°50'	1°47'	1°39'	1°32'	1°12'	0°24'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลการทดสอบหาการบิดกลับของวัสดุทางทฤษฎี

จากสมการที่ 3.23 และ 3.24 จะได้ค่า KS ของวัสดุ SPCC และ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm ซึ่งค่าในตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่าที่ออกมาทั้งสองสมการมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าค่าของ Poisson Ratio มีค่าที่ให้ความแตกต่างกันระหว่างการพันน้อยมาก

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดสอบการบิดกลับโดยทางทฤษฎี

องศาที่พัน	ค่า R mm	ค่า T mm	ค่า T mm	"γ" Spcc	"γ" S50C	"ε" Spcc	"ε" S50C	SPCC ที่ 1 mm		SPCC ที่ 2 mm		S50C ที่ 1 mm		S50C ที่ 2 mm	
								KS		KS		KS		KS	
								ทฤษฎี ที่ 24	ทฤษฎี ที่ 23	ทฤษฎี ที่ 24	ทฤษฎี ที่ 23	ทฤษฎี ที่ 24	ทฤษฎี ที่ 23	ทฤษฎี ที่ 24	ทฤษฎี ที่ 23
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	7.0	1	2	220	800	21000	18200	0.782	0.786	0.890	0.885	0.193	0.237	0.553	0.557
20	6.5	1	2	220	800	21000	18200	0.797	0.800	0.898	0.892	0.236	0.276	0.583	0.583
30	6.0	1	2	220	800	21000	18200	0.812	0.814	0.906	0.899	0.282	0.318	0.614	0.610
40	5.5	1	2	220	800	21000	18200	0.828	0.828	0.914	0.907	0.331	0.362	0.644	0.636
50	5.0	1	2	220	800	21000	18200	0.843	0.842	0.922	0.914	0.383	0.409	0.676	0.663
60	4.5	1	2	220	800	21000	18200	0.859	0.857	0.929	0.921	0.438	0.457	0.707	0.691
70	4.0	1	2	220	800	21000	18200	0.875	0.871	0.937	0.928	0.494	0.506	0.739	0.718
80	3.5	1	2	220	800	21000	18200	0.890	0.885	0.945	0.935	0.553	0.557	0.771	0.746
90	3.0	1	2	220	800	21000	18200	0.906	0.899	0.953	0.942	0.614	0.610		

5.2.3 ผลการทดสอบหาการบิดกลับของวัสดุโดยวิธีการทำแบบจำลอง

จากตารางด้านล่างเป็นการแสดงองศาที่ได้จากการพันวัสดุที่มีขนาด 1 mm. และ 2 mm. ของวัสดุ SPCC และ S50C ด้วยวิธีการทำแบบจำลอง โดยการหาค่า X และค่า Y ของแต่ละ Node แล้วนำค่าที่ได้มาแทนในสมการที่ 4.1 แล้วหาค่าเฉลี่ยของผลการพัน

5.2.3.1 ผลการทดสอบการบิดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. โดยวิธีการทำแบบจำลอง

5.2.3.1 ผลการทดสอบการบิดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. โดยวิธีการทำแบบจำลอง

ตารางที่ 5.10 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา

ที่ 10 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0141	-0.470402	
2695	24.9488	-0.658759	0.826
2200	14.4499	-0.810143	0.826
เฉลี่ย			0.826

ตารางที่ 5.11 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา

ที่ 20 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.9219	2.13991	
2695	24.9047	1.00506	4.98
2200	14.4443	0.0931389	4.98
เฉลี่ย			4.98

ตารางที่ 5.12 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา

ที่ 30 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.3533	6.43976	
2695	24.5715	3.72625	11.985
2200	14.3004	1.54573	11.985
เฉลี่ย			11.985

ตารางที่ 5.13 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

ที่ 40 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	36.0697	11.2597	
2695	23.7953	6.77916	20.05
2200	13.9319	3.17867	20.05
เฉลี่ย			20.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา

ที่ 50 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	33.9366	16.2436	
2695	22.4905	9.94088	28.84
2200	13.2927	4.87618	28.84
เฉลี่ย			28.84

ตารางที่ 5.15 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา

ที่ 60 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	30.8891	21.1118	
2695	20.6132	14.0406	34.53
2200	12.3558	6.55478	42.19
เฉลี่ย			38.26

ตารางที่ 5.16 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา

ที่ 70 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	26.8772	25.6686	
2695	18.1252	15.966	47.95
2200	11.0923	8.16928	47.95
เฉลี่ย			47.95

ตารางที่ 5.17 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา

ที่ 80 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	21.9082	29.6781	
2695	15.0183	18.5755	58.18
2200	9.48171	9.65384	58.18
เฉลี่ย			58.18

ตารางที่ 5.18 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา

ที่ 90 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	15.8349	32.9617	
2695	11.1941	20.7469	69.2
2200	7.46492	1.09314	69.2
เฉลี่ย			69.2

5.2.3.2 ผลการทดสอบการตีกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. โดยวิธีการทำแบบจำลอง

ตารางที่ 5.19 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา

ที่ 10 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0202	-0.713423	
2695	24.954	-0.749569	0.157
2200	14.4543	-0.778127	0.157
เฉลี่ย			0.157

ตารางที่ 5.20 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา

ที่ 20 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0191	-0.712633	
2695	24.9528	-0.774879	0.256
2200	14.4531	-0.819081	0.256
เฉลี่ย			0.256

ตารางที่ 5.21 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา

ที่ 30 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0177	-0.707669	
2695	24.9528	-0.811968	0.458
2200	14.4531	-0.897081	0.458
เฉลี่ย			0.458

ตารางที่ 5.22 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

ที่ 40 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.022	-0.337845	
2695	24.9575	-0.576366	1.046
2200	14.4543	-0.768055	1.046
เฉลี่ย			1.046

ตารางที่ 5.23 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา

ที่ 50 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.9439	1.90923	
2695	24.9198	0.855922	4.624
2200	14.454	0.00952876	4.624
เฉลี่ย			4.624

ตารางที่ 5.24 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา

ที่ 60 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.3947	6.28015	
2695	24.5931	3.66159	11.56
2200	14.3061	1.55741	11.56
เฉลี่ย			11.56

ตารางที่ 5.25 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา

ที่ 70 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	35.5584	12.7654	
2695	23.4603	7.82825	22.2
2200	13.7387	3.86097	22.2
เฉลี่ย			22.2

ตารางที่ 5.26 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา

ที่ 80 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	32.5033	18.9043	
2695	21.5492	11.7806	33.04
2200	12.7468	6.05632	33.04
เฉลี่ย			33.04

ตารางที่ 5.27 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา

ที่ 90 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	27.9306	24.8116	
2695	18.6738	15.5893	44.89
2200	11.2353	8.17866	44.89
เฉลี่ย			44.89

5.2.3.3 ผลการทดสอบการดีดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. โดยวิธีการทำแบบจำลอง

ตารางที่ 5.28 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

ที่ 10 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.089	-0.926346	
2695	25.0281	-1.31152	1.69
2200	14.5331	-1.6234	1.69
เฉลี่ย			1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.29 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา

ที่ 20 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.8512	3.23747	
2695	24.9249	1.33042	8.392
2200	14.5392	-0.208306	8.392
เฉลี่ย			8.392

ตารางที่ 5.30 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา

ที่ 30 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	36.8297	8.58569	
2695	24.3571	4.68935	17.35
2200	14.3319	1.5646	17.31
เฉลี่ย			17.33

ตารางที่ 5.31 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา

ที่ 40 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	34.9336	13.9131	
2695	23.2475	8.0653	26.58
2200	13.8507	8.37668	26.56
เฉลี่ย			26.57

ตารางที่ 5.32 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา

ที่ 50 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	29.8821	22.1142	
2695	20.2005	14.78481	37.16
2200	12.4161	8.87753	37.16
เฉลี่ย			37.16

ตารางที่ 5.33 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

ที่ 60 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	27.4071	24.8523	
2695	18.6947	15.1121	48.19
2200	11.6823	7.29453	48.15
เฉลี่ย			48.17

ตารางที่ 5.34 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา

ที่ 70 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	23.5673	28.1703	
2695	16.2968	16.4431	58.21
2200	10.4618	8.58661	58.19
เฉลี่ย			56.20

ตารางที่ 5.35 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา

ที่ 80 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	16.8792	32.1475	
2695	12.1632	19.9374	69.13
2200	8.39908	10.1322	69.11
เฉลี่ย			69.12

ตารางที่ 5.36 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา

ที่ 90 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	10.7446	34.1864	
2695	8.34772	21.3422	79.44
2200	6.42344	11.0191	79.44
เฉลี่ย			79.44

5.2.3.4 ผลการทดสอบการตีกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. โดยวิธีการทำแบบจำลอง

ตารางที่ 5.37 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

ที่ 10 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0602	-1.45509	
2695	24.9937	-1.96248	0.033
2200	14.4944	-1.9665	0.033
เฉลี่ย			0.033

ตารางที่ 5.38 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา

ที่ 20 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0582	1.98855	
2695	24.9918	-1.97888	0.043
2200	14.4922	-1.97	0.043
เฉลี่ย			0.043

ตารางที่ 5.39 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา

ที่ 30 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	38.0736	-0.68889	
2695	25.0162	-1.18272	2.166
2200	14.522	-1.58	2.168
เฉลี่ย			2.167

ตารางที่ 5.40 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา

ที่ 40 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	37.9013	2.58944	
2695	24.9383	0.953133	7.1794
2200	14.5248	-0.375365	7.27
เฉลี่ย			7.232

ตารางที่ 5.41 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา

ที่ 50 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	35.5246	12.5591	
2695	23.5685	7.28614	23.8
2200	13.9517	3.054	23.78
เฉลี่ย			23.79

ตารางที่ 5.42 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

ที่ 60 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	34.7611	14.3766	
2695	23.0763	8.5295	26.583
2200	13.6977	3.81572	26.681
เฉลี่ย			26.632

ตารางที่ 5.43 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา

ที่ 70 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	31.2511	20.4487	
2695	20.9329	12.4327	37.842
2200	12.6516	5.98192	37.91
เฉลี่ย			37.876

ตารางที่ 5.44 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา

ที่ 80 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	26.0011	26.2974	
2695	17.7358	16.1771	50.761
2200	11.0848	8.05009	50.703
เฉลี่ย			50.732

ตารางที่ 5.45 แสดงองศาที่ได้จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา

ที่ 90 องศา			
Node	X	Y	องศาที่ได้
3311	19.0056	31.2195	
2695	13.4098	19.4103	64.65
2200	8.89397	9.9278	64.53
เฉลี่ย			64.59

จากตารางแสดงองศาการตีกลับของวัสดุ SPCC และ S50C ที่ขนาด 1 mm. และ 2 mm. จะเห็นได้ว่าองศาที่ได้จากการพับวัสดุ โดยใช้วิธีการทำแบบจำลองมีค่าแตกต่างกับทางปฏิบัติมาก ที่องศาการพับน้อย จะเห็นว่าองศาที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างสูง และจะน้อยลงเมื่อทำการพับที่องศาที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า Error ที่เกิดจากการทำแบบจำลองก็ยังคงสูง ทั้งนี้อาจมาจากการแบ่ง Element ของชิ้นงานทดสอบที่มีความละเอียดน้อย ทำให้ค่าความเครียดพลาสติกที่มีอยู่ในแต่ละ Element มีค่าน้อย ทำให้การยึดตัวของชิ้นทดสอบจึงมีการยึดตัวน้อย

5.2.3.5 ค่าความเครียดพลาสติกจุดกึ่งกลาง Element ที่เกิดจากการพับ

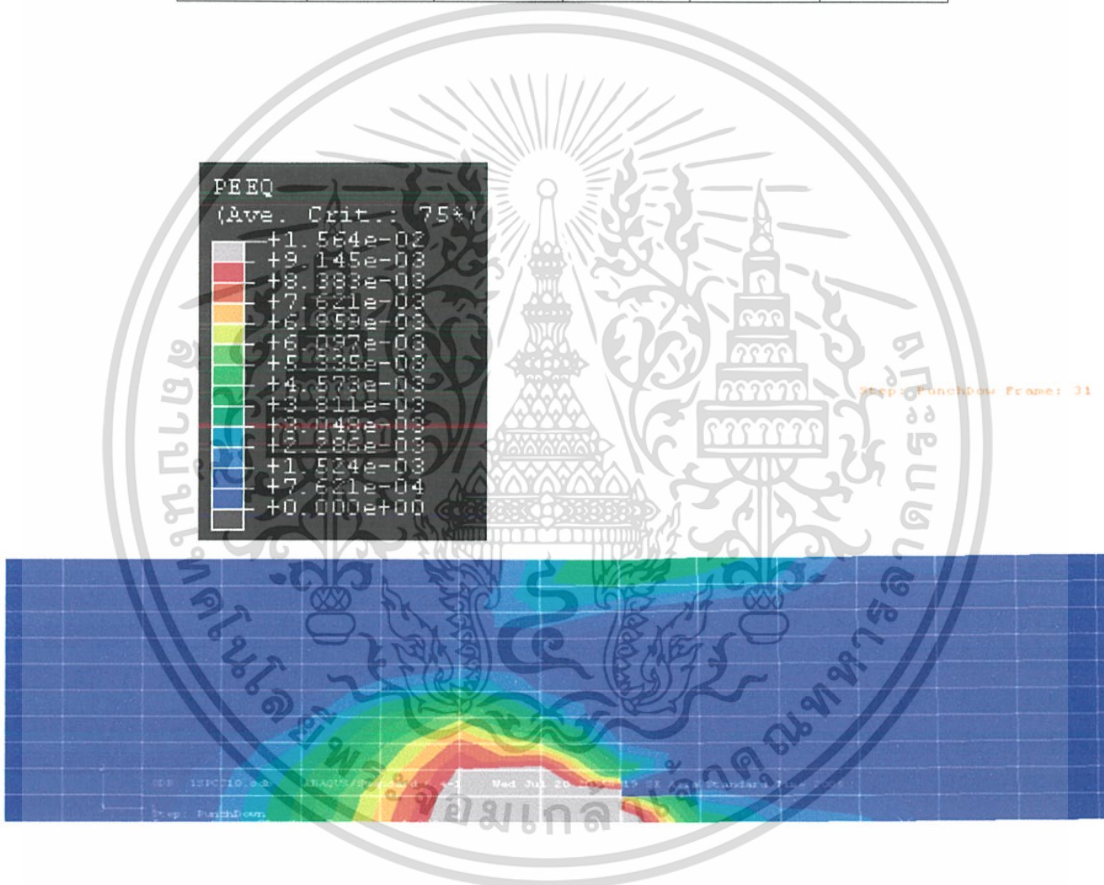
จากการทำแบบจำลอง โดยใช้วิธีการพับจึงทำให้วัสดุเกิดการยึดตัวเกิดขึ้น เมื่อวัสดุที่ทำการทดสอบมีการแบ่ง Element จึงสามารถที่จะบอกได้ว่า แต่ละ Element มีการยึดตัวไปเท่าไร ค่าความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) สูงสุดที่เกิดขึ้นมากกว่าการทำทดสอบจริง ก็จะทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้เมื่อทำการพับ

ตารางที่ 5.46 แสดงตำแหน่ง Element ที่ทำการวัดค่าความเครียดพลาสติก

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1381	1391	1401	1411	1421	1431	1441	1451	1461	1471	1481	1491	1501
1382	1392	1402	1412	1422	1432	1442	1452	1462	1472	1482	1492	1502
1383	1393	1403	1413	1423	1433	1443	1453	1463	1473	1483	1493	1503
1384	1394	1404	1414	1424	1434	1444	1454	1464	1474	1484	1494	1504
1385	1395	1405	1415	1425	1435	1445	1455	1465	1475	1485	1495	1505
1386	1396	1406	1416	1426	1436	1446	1456	1466	1476	1486	1496	1506
1387	1397	1407	1417	1427	1437	1447	1457	1467	1477	1487	1497	1507
1388	1398	1408	1418	1428	1438	1448	1458	1468	1478	1488	1498	1508
1389	1399	1409	1419	1429	1439	1449	1459	1469	1479	1489	1499	1509
1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510

ตารางที่ 5.47 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา

A	B	C	D	E	F
0	0	0.0053	0.002	0.0053	0
0	0.0012	0.005	0	0.0034	0
0	0.0024	0.0004	0	0	0
0.0001	0.001	0	0	0	0
0.0023	0.0016	0	0	0	0
0.005	0.0043	0	0	0	0
0.0068	0.0074	0.0011	0	0	0
0.007	0.0106	0.0049	0	0	0
0.0072	0.0122	0.0109	0	0	0
0.0089	0.0118	0.0156	0.0068	0.0009	0.0032

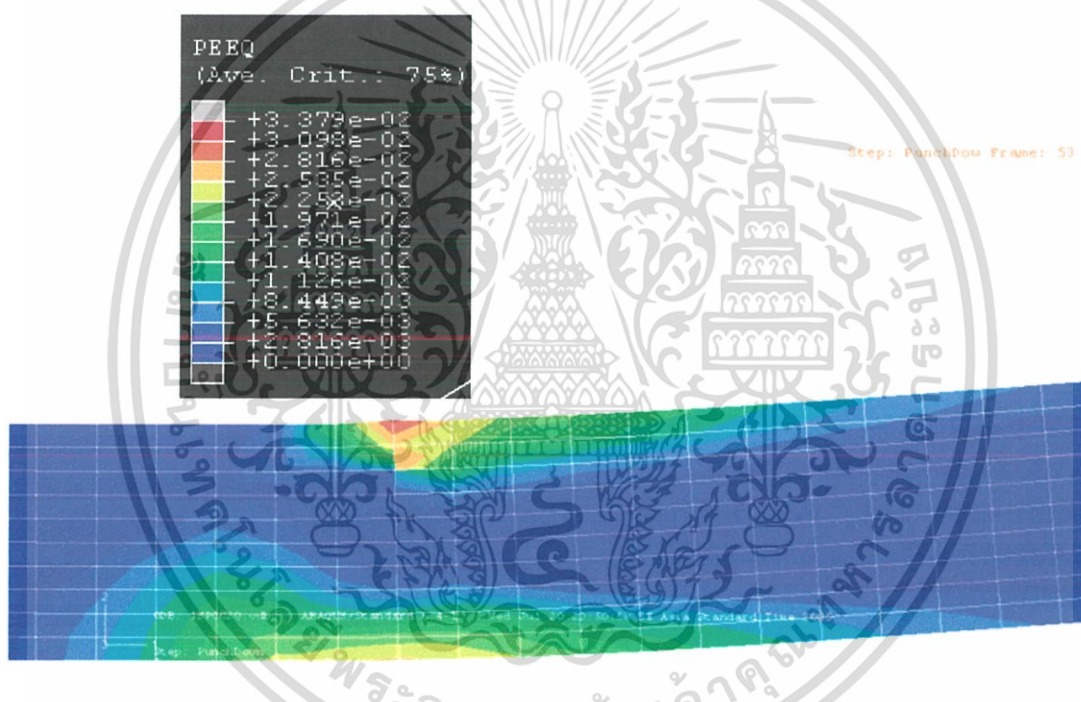


รูปที่ 5.3 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.48 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา

B	C	D	E	F	G	H
0.0053	0.0053	0.0303	0.0037	0.0172	0.0261	0.0149
0.005	0.005	0.0096	0.0281	0.0135	0.0131	0.0117
0.0004	0.0004	0	0.0116	0.0122	0.0024	0.0058
0	0	0	0	0.0023	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0044	0.0044	0	0	0	0	0
0.0081	0.0081	0.0017	0.0027	0.0024	0	0
0.0119	0.0119	0.0071	0.0097	0.0109	0.0062	0.0048
0.0162	0.0162	0.0149	0.0182	0.0171	0.0142	0.0109
0.0244	0.0244	0.0261	0.0258	0.0231	0.0221	0.0174

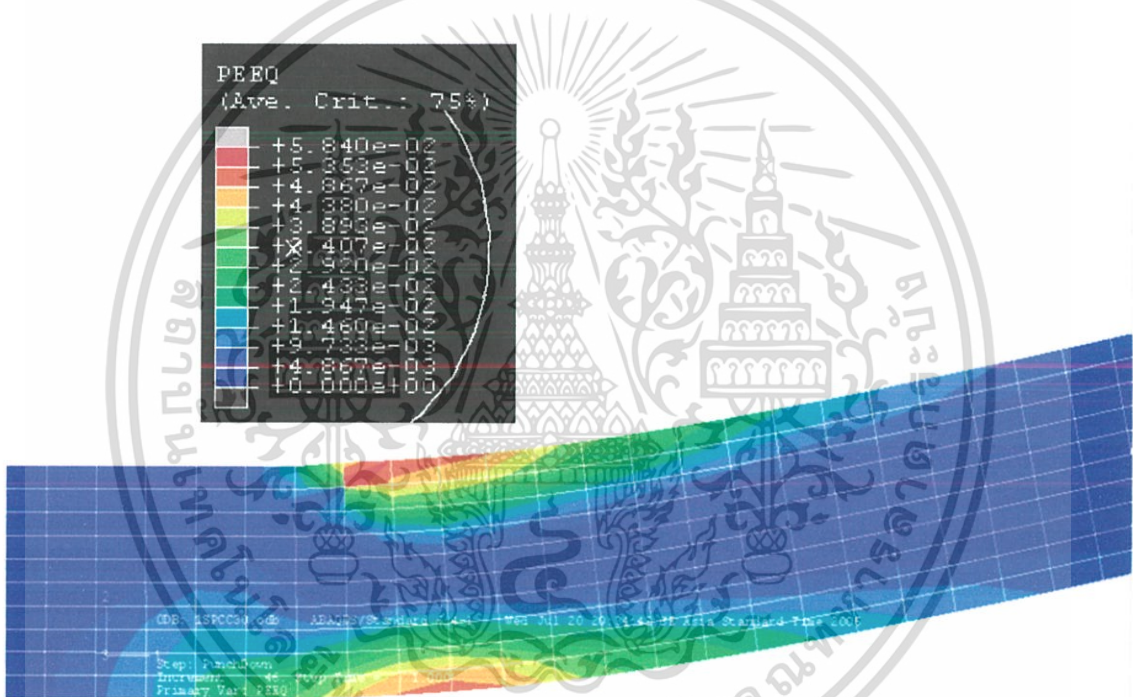


รูปที่ 5.4 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.49 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0.0325	0.0583	0.0483	0.0535	0.0454	0.0403	0.0036
0.0096	0.0404	0.0407	0.0356	0.0322	0.0254	0.0028
0	0.0166	0.0277	0.0223	0.0162	0.014	0.0121
0	0	0.0103	0.0284	0.0035	0.0029	0.0019
0	0	0	0	0	0	0
0.0004	0.0002	0.0022	0	0	0	0
0.0061	0.0114	0.0165	0.0131	0.0081	0.0066	0.0052
0.0145	0.023	0.0299	0.0267	0.0207	0.0165	0.0146
0.0255	0.0363	0.0406	0.0399	0.0339	0.0271	0.024
0.0426	0.0477	0.0508	0.0524	0.046	0.039	0.033

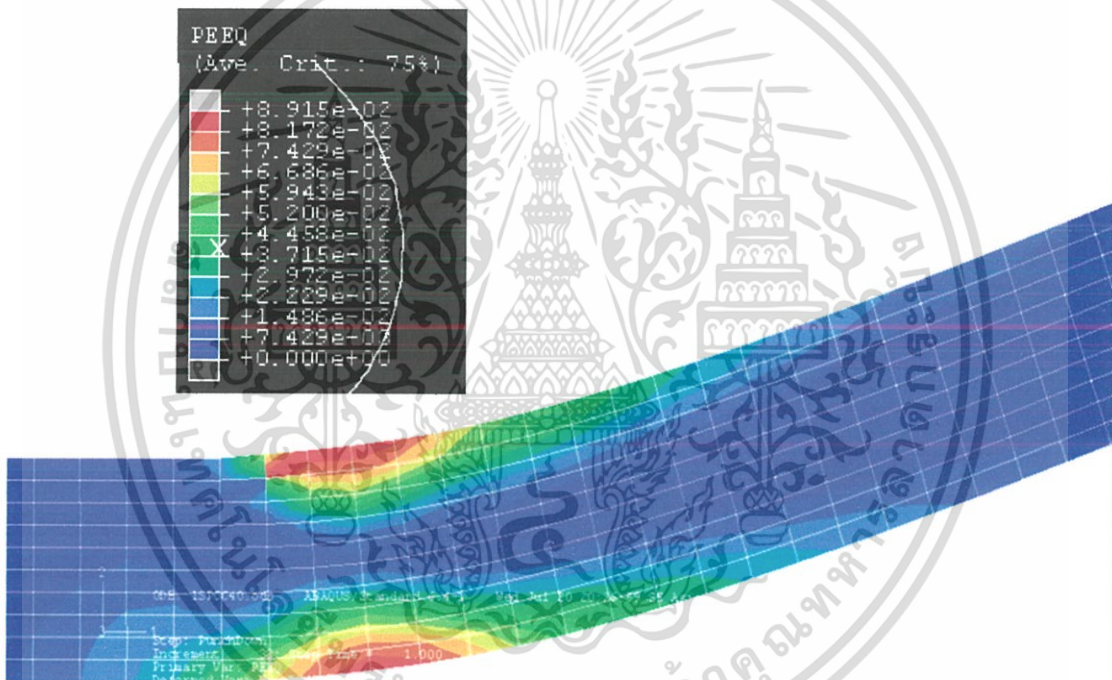


รูปที่ 5.5 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.50 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.0345	0.0891	0.0877	0.0869	0.0807	0.0645	0.0521	0.0475
0.0094	0.0544	0.0742	0.0644	0.0536	0.0425	0.0358	0.0338
0	0.0219	0.0461	0.0449	0.0276	0.023	0.0222	0.0182
0	0	0.0172	0.018	0.009	0.0062	0.0076	0.0053
0	0	0	0	0	0	0	0
0.0032	0.007	0.0156	0.0111	0.0019	0	0	0
0.0107	0.0227	0.0378	0.0344	0.0202	0.0139	0.0126	0.01
0.0216	0.0403	0.0566	0.0543	0.0411	0.0294	0.0254	0.0228
0.0365	0.0593	0.0715	0.0727	0.0618	0.0464	0.0385	0.0347
0.0564	0.0751	0.0851	0.0889	0.0805	0.0654	0.052	0.463

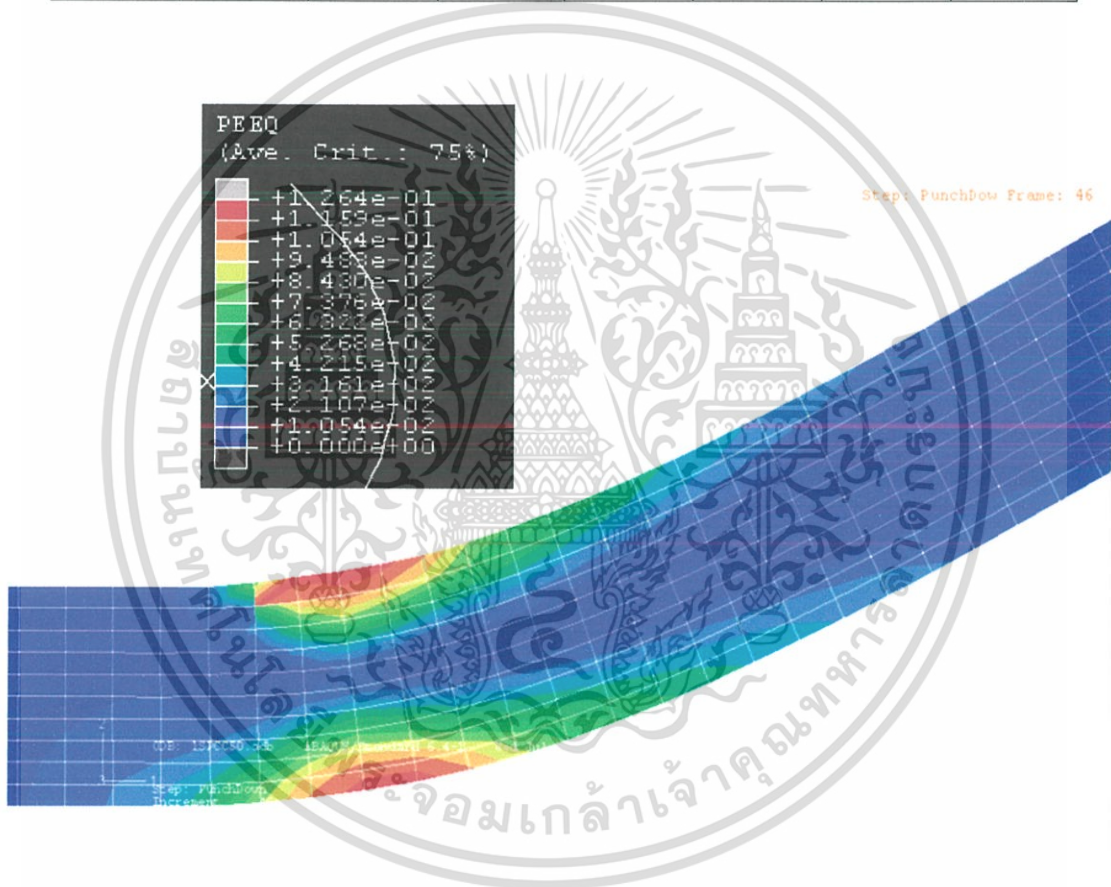


รูปที่ 5.6 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.51 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.358	0.1182	0.1249	0.1214	0.121	0.0954	0.078	0.0682
0.0092	0.0672	0.1049	0.0927	0.0784	0.0643	0.0525	0.0498
0	0.0263	0.063	0.0663	0.0399	0.0341	0.0337	0.0273
0	0	0.023	0.0259	0.0131	0.0091	0.0127	0.0091
0	0	0	0	0	0	0	0
0.0053	0.0127	0.0284	0.0249	0.0113	0.008	0.0066	0.0021
0.0143	0.0328	0.0575	0.0564	0.0379	0.0284	0.0249	0.0188
0.0274	0.0556	0.0813	0.0827	0.0671	0.0499	0.0422	0.0365
0.0455	0.0791	0.0998	0.1059	0.0942	0.0733	0.0598	0.0528
0.0698	0.0978	0.1171	0.1264	0.1176	0.0975	0.0782	0.0685

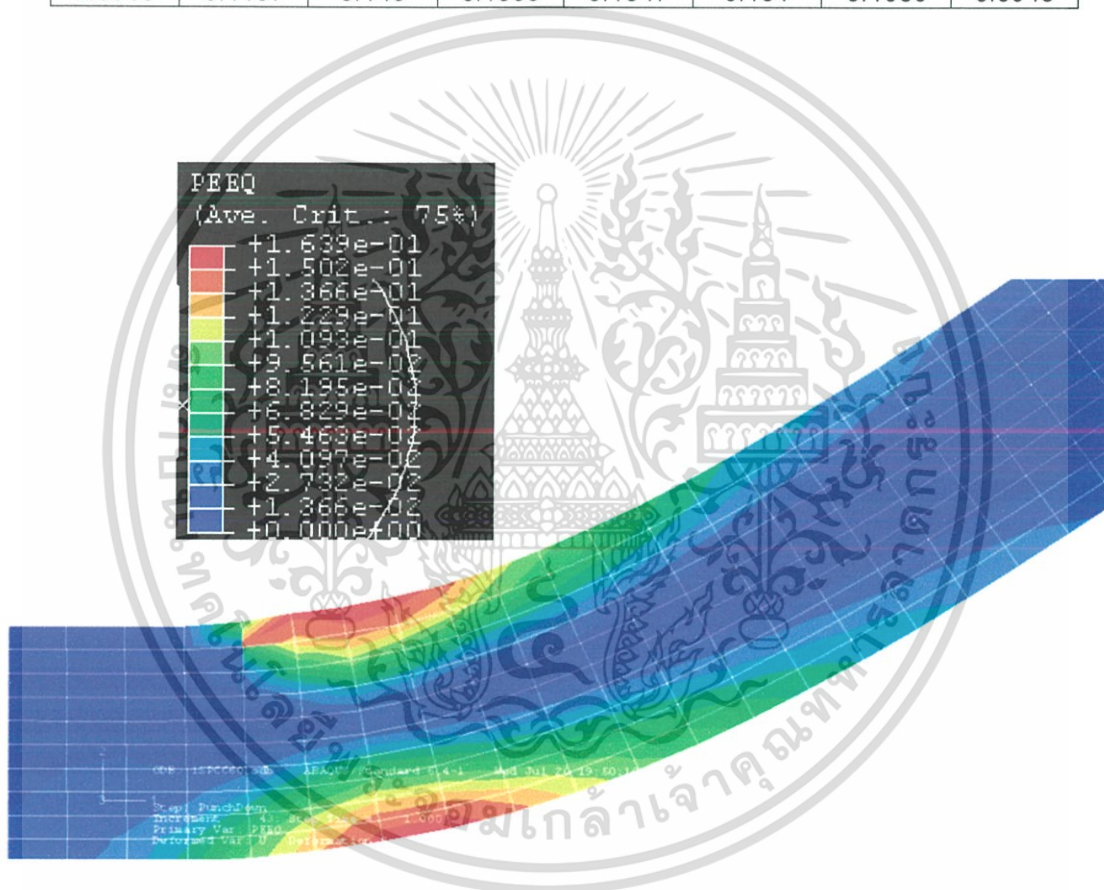


รูปที่ 5.7 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.52 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.0369	0.1482	0.1638	0.1568	0.1625	0.1293	0.1074	0.0932
0.0095	0.0793	0.1362	0.1228	0.1024	0.0862	0.0711	0.0695
0	0.0306	0.079	0.0879	0.0525	0.0434	0.0453	0.0385
0	0	0.028	0.0333	0.0168	0.0104	0.0166	0.0134
0.0006	0	0	0	0	0	0	0
0.0075	0.0182	0.0414	0.0398	0.0221	0.0168	0.0158	0.0106
0.0175	0.0424	0.0772	0.0796	0.0568	0.0431	0.0402	0.033
0.0328	0.0703	0.1052	0.1118	0.0929	0.0714	0.0626	0.0555
0.0545	0.0973	0.1281	0.1395	0.126	0.1008	0.0847	0.0758
0.0818	0.1197	0.149	0.1635	0.1547	0.131	0.1069	0.0948

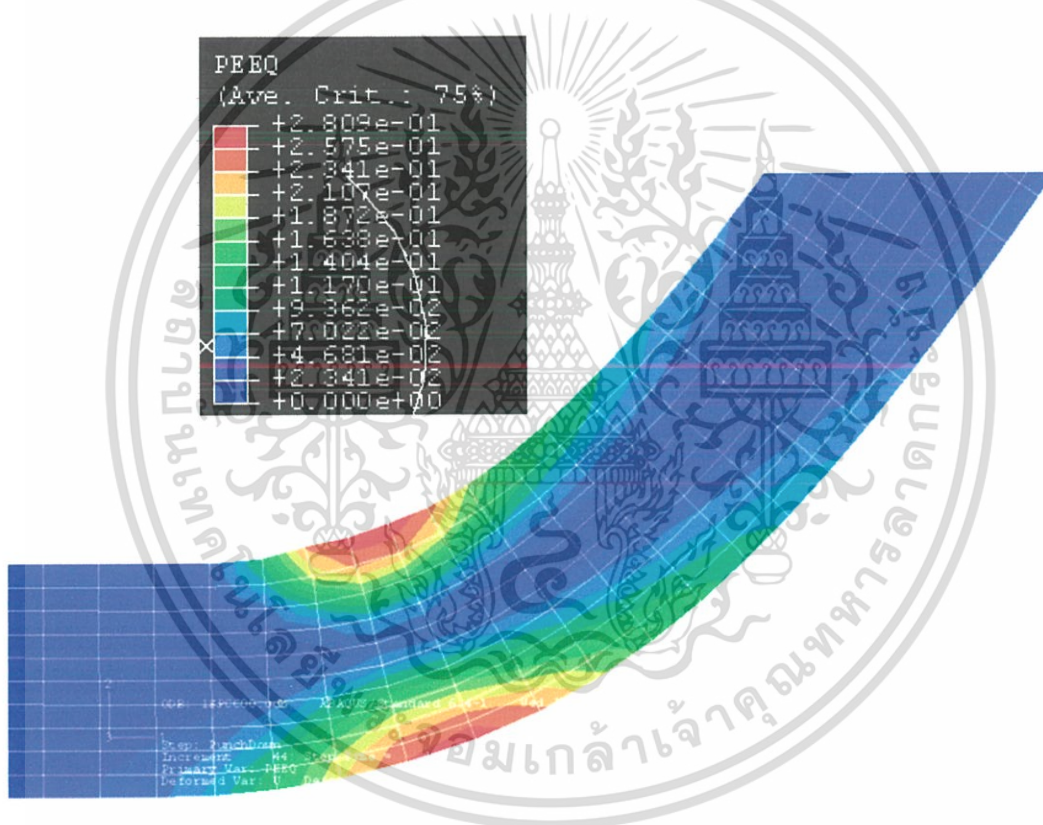


รูปที่ 5.8 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.53 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.0389	0.1851	0.2131	0.2008	0.2082	0.1622	0.1373	0.1177
0.0096	0.0944	0.1728	0.1566	0.126	0.1094	0.0895	0.0847
0	0.0355	0.0953	0.1061	0.0654	0.0558	0.0549	0.0462
0	0	0.0295	0.036	0.0218	0.0127	0.0186	0.0159
0.0031	0.0054	0.0102	0.0019	0	0	0	0
0.011	0.0307	0.062	0.0588	0.0357	0.028	0.0246	0.0178
0.0237	0.0601	0.1027	0.1075	0.0804	0.0601	0.0547	0.0444
0.0425	0.0912	0.1354	0.1471	0.124	0.0944	0.081	0.0722
0.0689	0.1202	0.1625	0.181	0.1628	0.1299	0.1071	0.0969
0.0985	0.1455	0.1871	0.2089	0.1971	0.1644	0.1349	0.1195



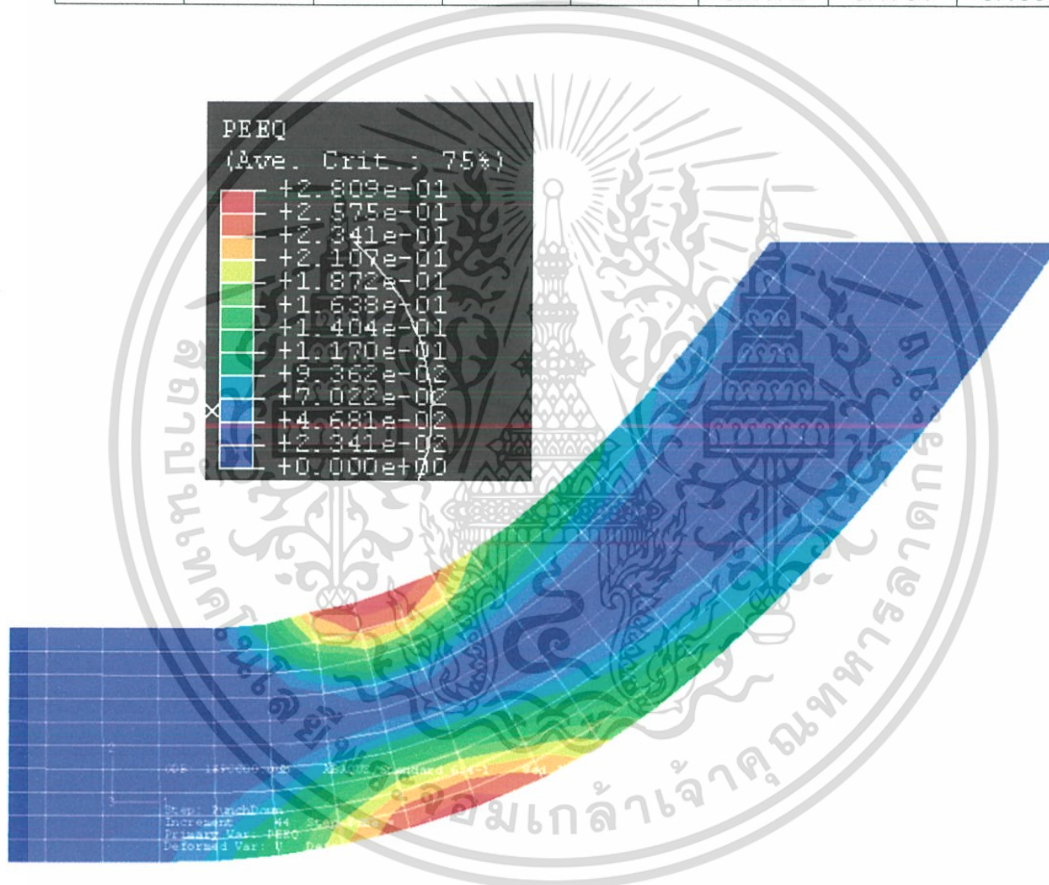
รูปที่ 5.9 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.54 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.0408	0.2059	0.2715	0.278	0.2808	0.2165	0.1641	0.1317
0.0097	0.1003	0.0214	0.0101	0.173	0.1359	0.103	0.0936
0	0.036	0.1037	0.1264	0.0884	0.2642	0.0624	0.0524
0	0	0.0288	0.0365	0.0215	0.014	0.0192	0.017
0.0043	0.0104	0.0253	0.0296	0.0188	0.0046	0	0
0.0124	0.0381	0.0873	0.1025	0.0758	0.0474	0.0321	0.0234
0.0257	0.0718	0.1365	0.1607	0.1319	0.0912	0.0673	0.0523
0.0465	0.1079	0.176	0.0284	0.1821	0.1346	0.1014	0.0811
0.076	0.1418	0.2099	0.2472	0.2255	0.1771	0.1353	0.1098
0.1084	0.1735	0.2404	0.2775	0.2632	0.2172	0.1701	0.1384

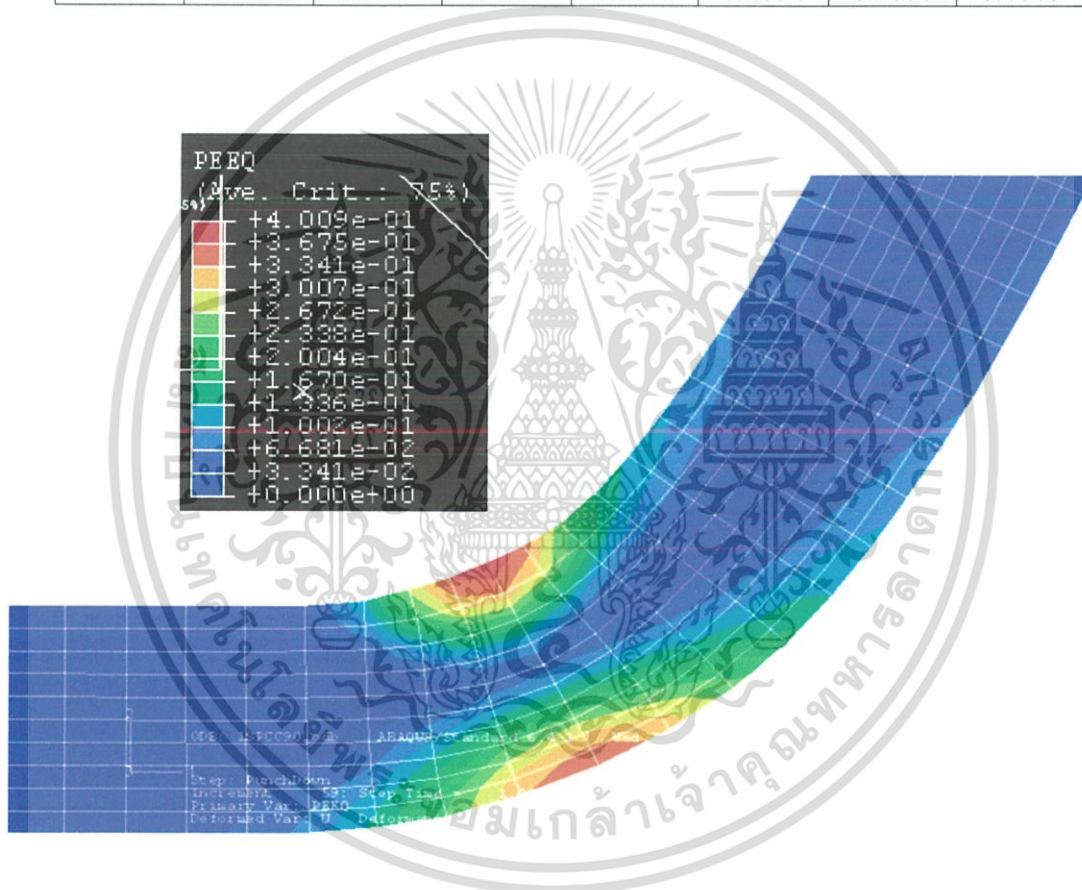


รูปที่ 5.10 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.55 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K
0.0412	0.2093	0.3433	0.4008	0.4008	0.3101	0.197	0.1339
0.0094	0.1004	0.2202	0.2833	0.2606	0.1803	0.1113	0.0937
0	0.0368	0.1062	0.1486	0.1267	0.0798	0.0604	0.0528
0	0	0.0288	0.0363	0.0217	0.0138	0.0192	0.0172
0.0043	0.0124	0.0354	0.0645	0.0642	0.0253	0	0
0.0126	0.0392	0.1029	0.1572	0.1451	0.0835	0.0381	0.0237
0.0258	0.0727	0.1583	0.2309	0.2159	0.1382	0.0822	0.0531
0.0462	0.1093	0.2059	0.2904	0.2737	0.1907	0.1222	0.084
0.0755	0.1459	0.2496	0.3368	0.3195	0.2409	0.165	0.1167
0.1078	0.1831	0.2914	0.3691	0.3569	0.2874	0.2091	0.1513



รูปที่ 5.11 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90°

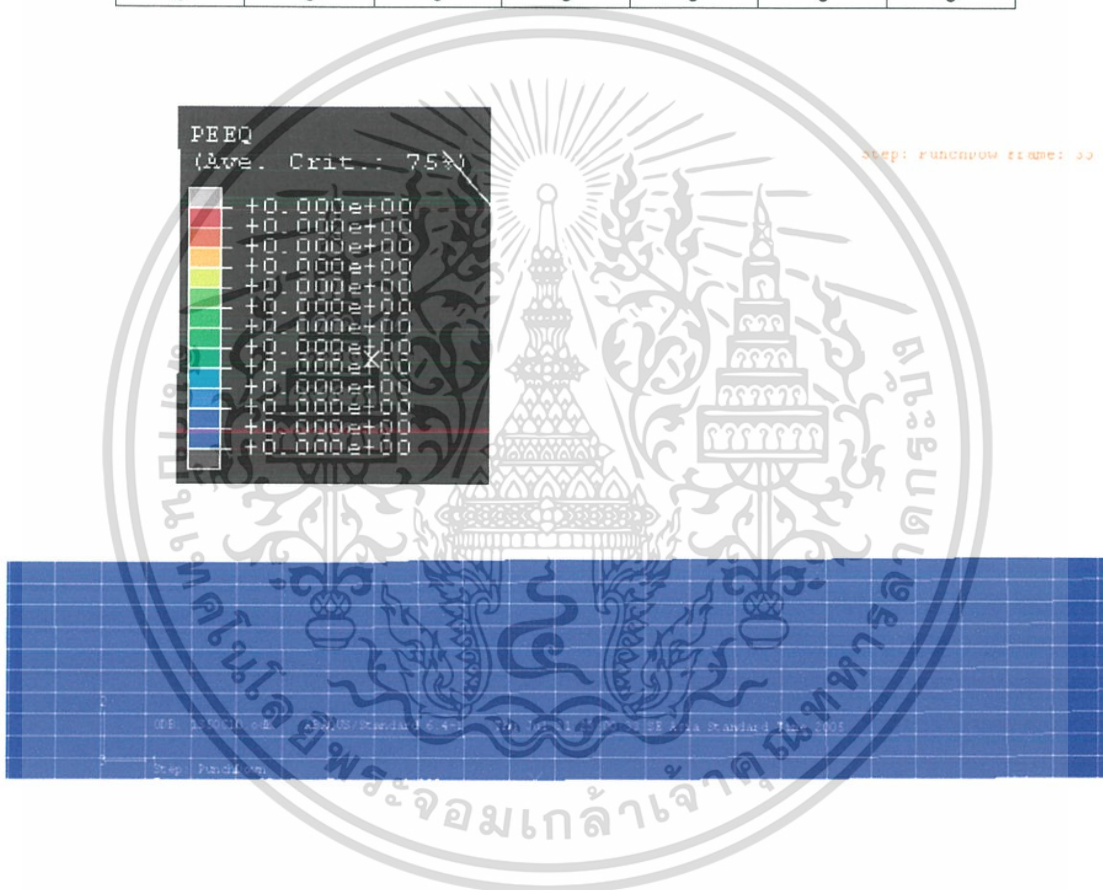
จากตารางผลการทดสอบ ค่าความเครียดพลาสติกของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. มีค่าความเครียดพลาสติกมากที่สุดที่ผิวด้านนอกสุด และมีลักษณะคล้ายกับรัศมี จะมีจุดศูนย์กลางแล้วกระจายออกด้านข้างเป็นแนวรัศมี โดยที่ค่าจะน้อยลงเมื่ออยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางของแรงที่กระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.56 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10

องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0



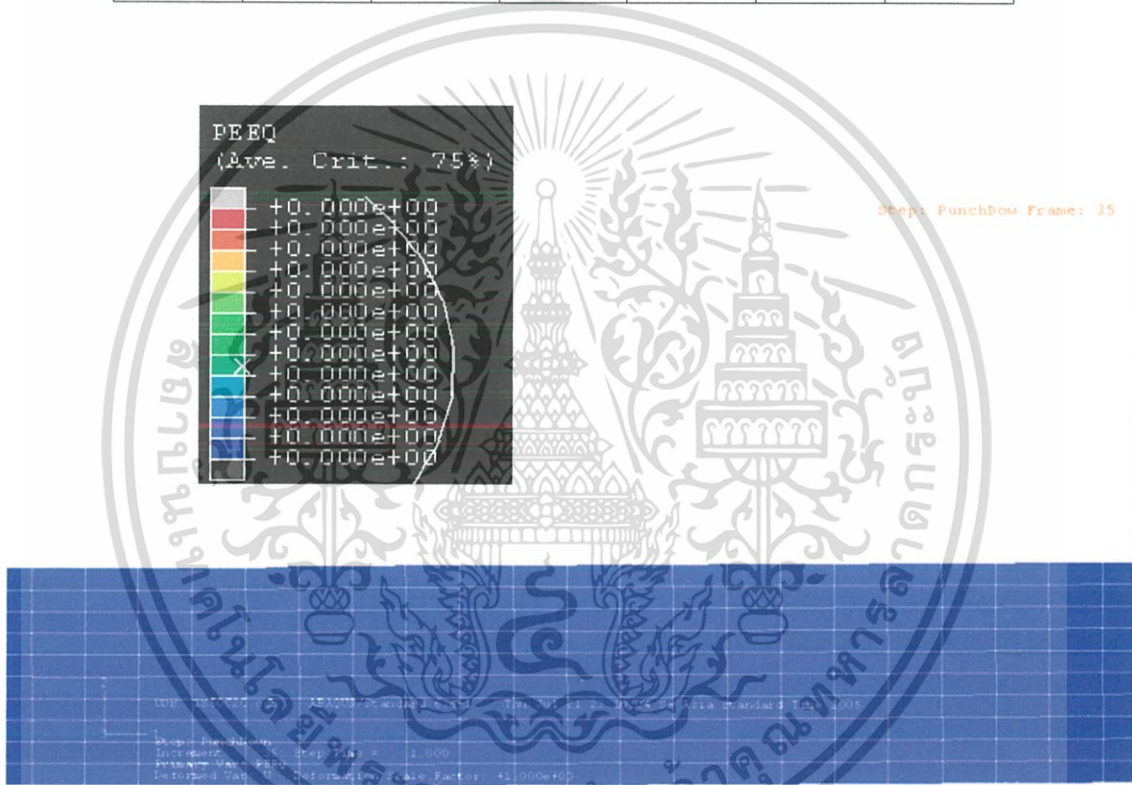
รูปที่ 5.12 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.57 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20

องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

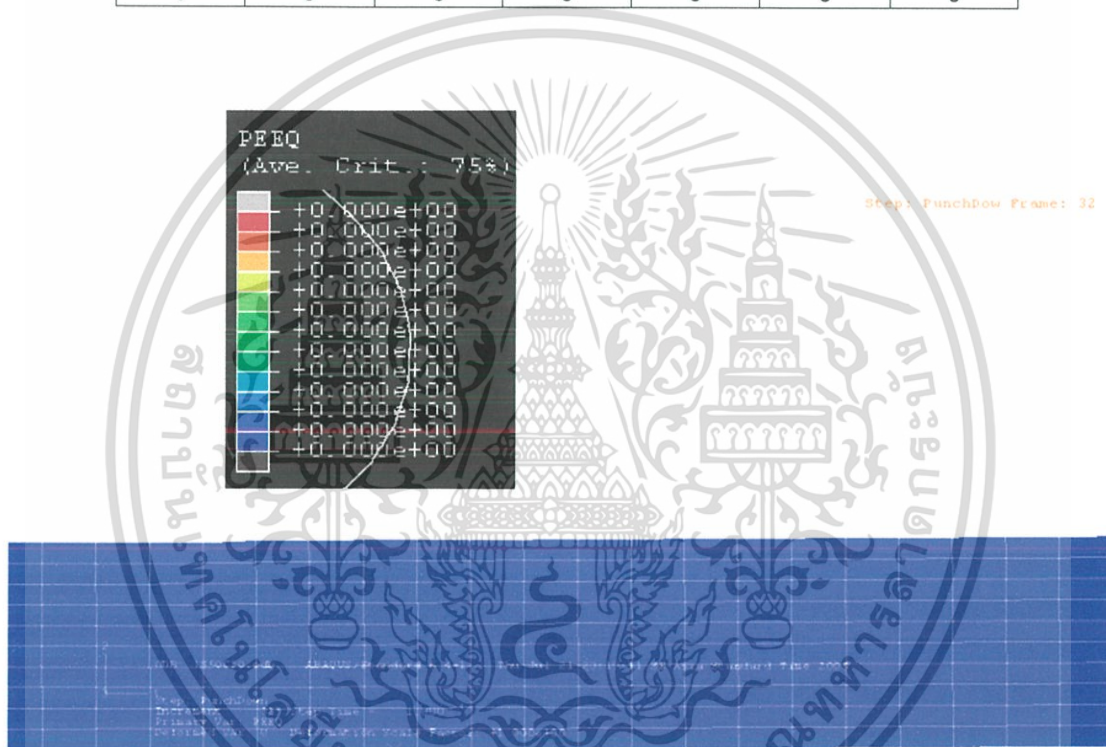


รูปที่ 5.13 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.58 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

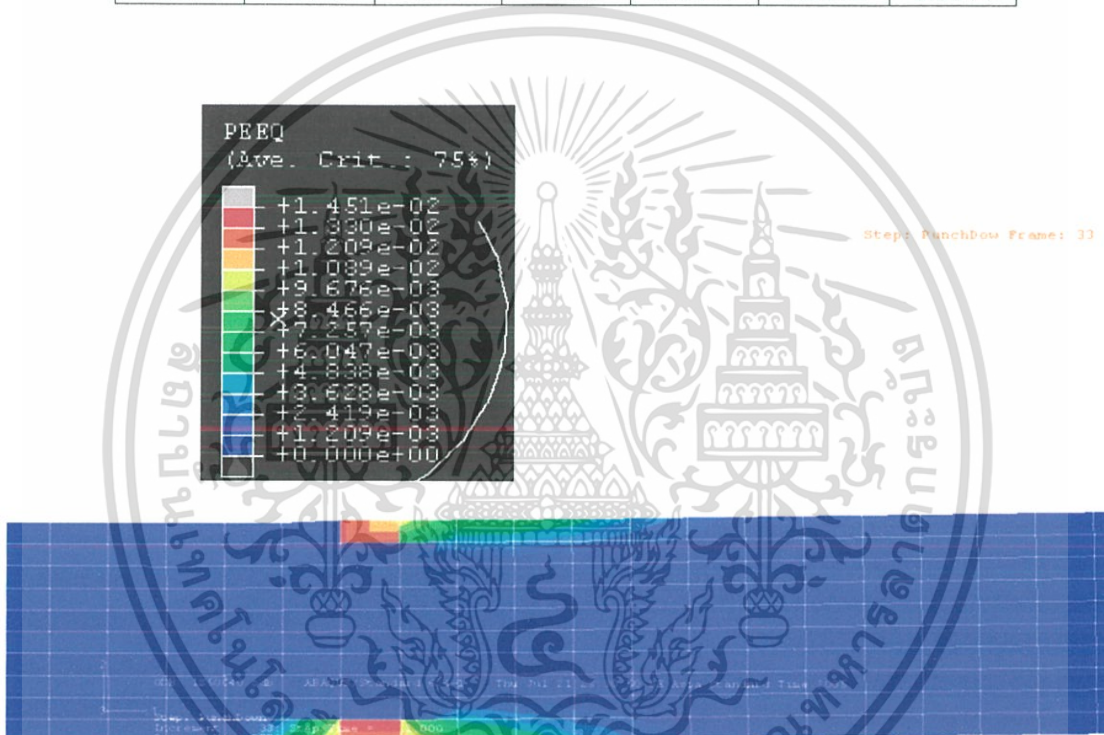


รูปที่ 5.14 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.59 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0.0135	0.0074	0.0073	0.007	0.0045	0.0028
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0.0013	0	0	0	0	0
0.0098	0.0145	0.01	0.008	0.0048	0.0032	0.0014



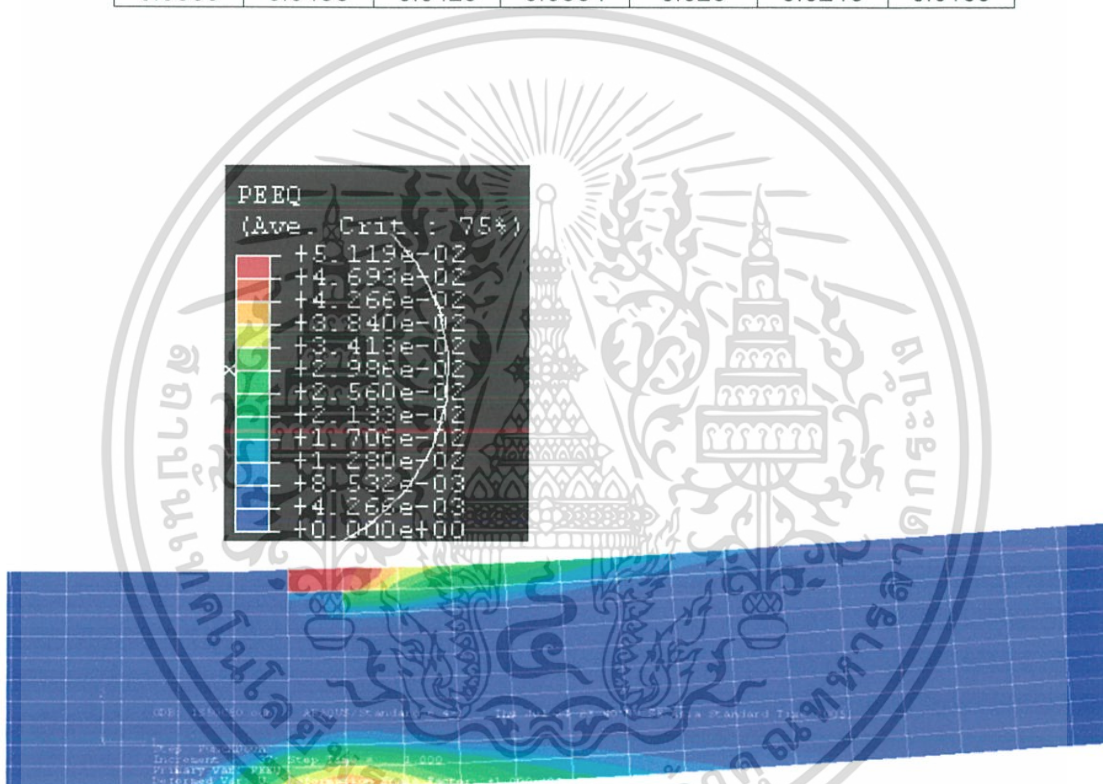
รูปที่ 5.15 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.60 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50

องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0.0511	0.0476	0.0325	0.0318	0.0029	0.0211
0	0.0115	0.0324	0.0103	0.0094	0.0091	0.0015
0	0	0.0054	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0.0062	0.0079	0.0008	0	0	0
0.0103	0.0277	0.0256	0.0171	0.0114	0.0071	0.0043
0.0305	0.0463	0.0423	0.0364	0.026	0.0215	0.0169

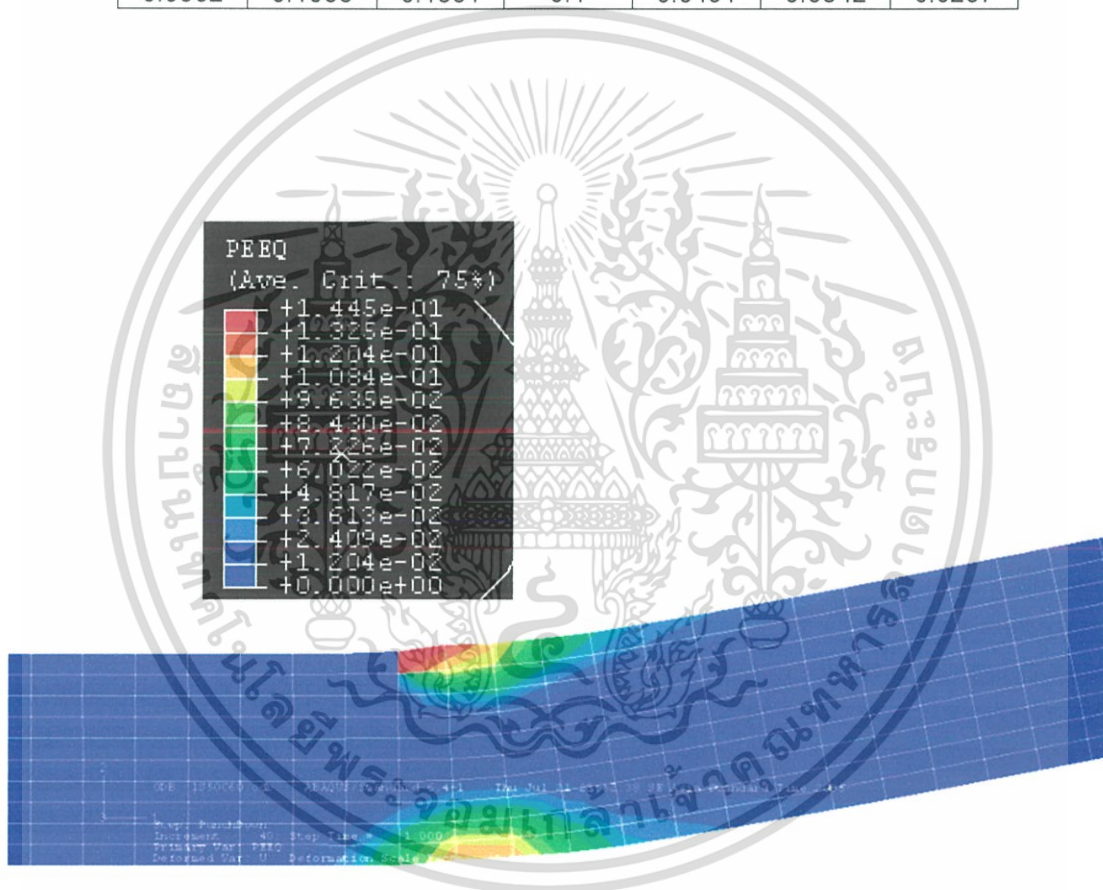


รูปที่ 5.16 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.61 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0.1349	0.1445	0.0822	0.0693	0.0339	0.0321
0	0.0433	0.1067	0.0575	0.0205	0.0182	0.0078
0	0	353	0.0088	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0.0123	0.0245	0.0096	0	0	0
0.004	0.046	0.0658	0.0391	0.0095	0.0006	0
0.0217	0.0783	0.1074	0.068	0.0275	0.0147	0.012
0.0502	0.1056	0.1351	0.1	0.0491	0.0342	0.0257

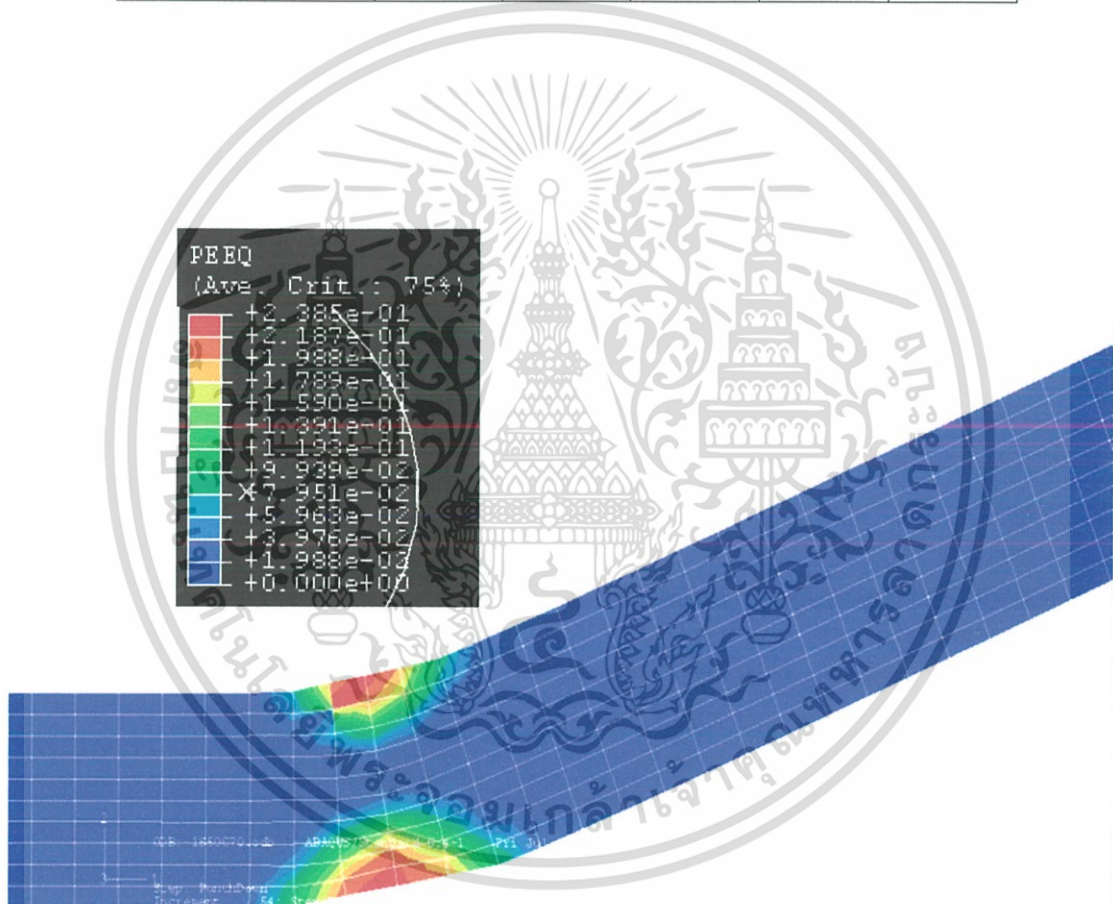


รูปที่ 5.17 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.62 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0	0.1565	0.2385	0.2304	0.1624	0.0397	0.0318
0	0.0436	0.1736	0.1797	0.0569	0.0181	0.0089
0	0.0022	0.0716	0.0689	0.0122	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0.0005	0.0508	0.0436	0	0	0
0	0.0234	0.1361	0.1201	0.0113	0	0
0.004	0.0596	0.1954	0.1817	0.0401	0.0017	0
0.216	0.1339	0.2241	0.2146	0.0993	0.0147	0.0115
0.0499	0.1976	0.2339	0.2239	0.1755	0.0342	0.0263

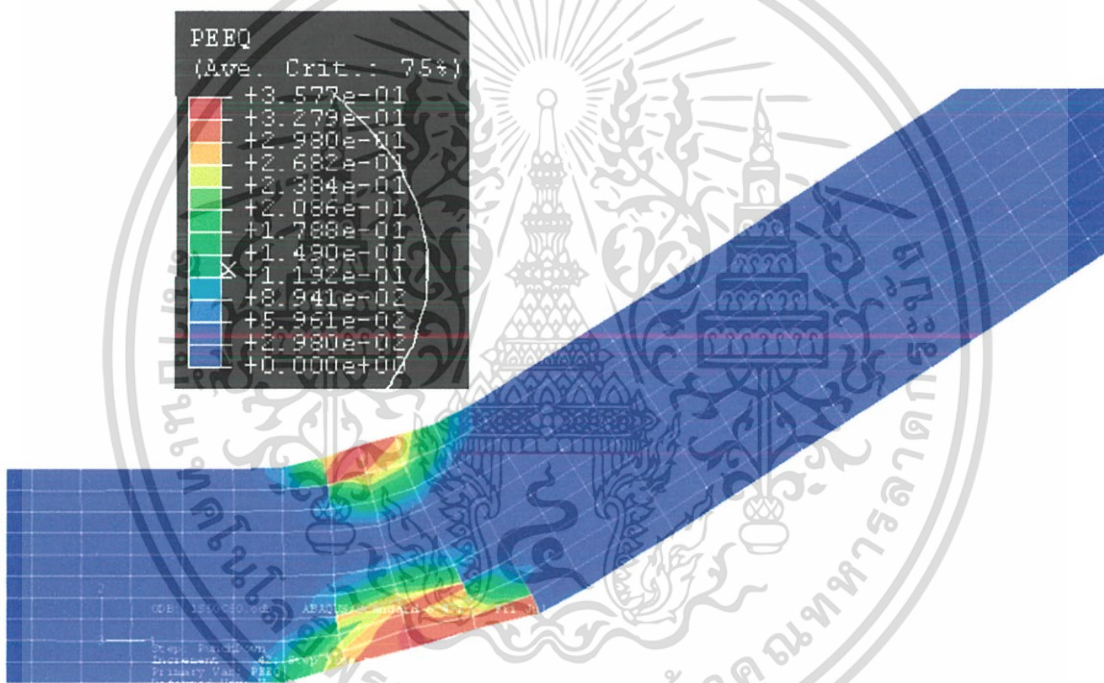


รูปที่ 5.18 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.36 แสดงค่าความเครียดพลาสติก ที่เกิดใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0.001	0.1829	0.3314	0.3576	0.2551	0.0747	0.0305
0	0.0436	0.2167	0.2692	0.1245	0.017	0.0088
0	0	0.0841	0.107	0.0259	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.0308	0.0357	0	0	0
0	0.0011	0.1393	0.1533	0.01	0	0
0	0.0209	0.2313	0.2488	0.0152	0	0
0.0028	0.0759	0.2931	0.3186	0.1083	0.0044	0
0.0175	0.175	0.3163	0.3513	0.0243	0.0139	0.011
0.0453	0.2649	0.3197	0.3496	0.3052	0.0354	0.0245

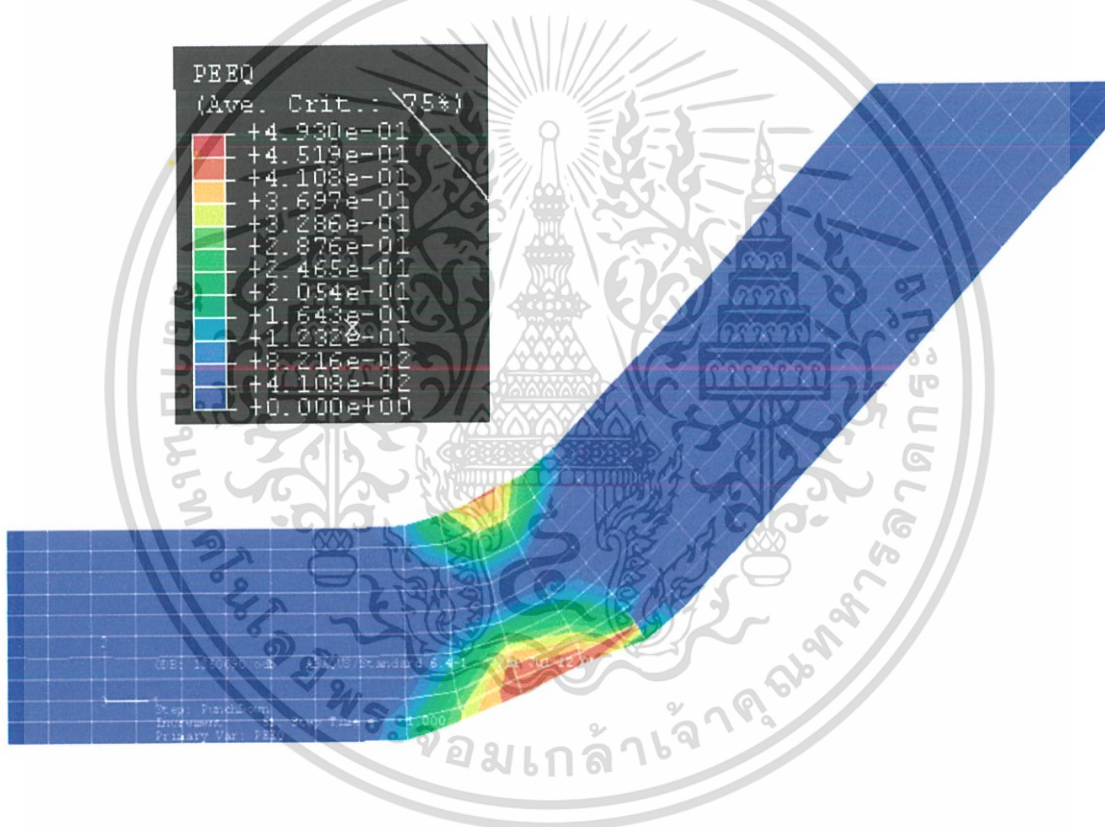


รูปที่ 5.19 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.64 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา

D	E	F	G	H	I	J
0.0012	0.2206	0.3729	0.3868	0.3868	0.1579	0.0323
0	0.0473	0.2259	0.4557	0.2055	0.0249	0.0089
0	0.0001	0.0821	0.3184	0.0306	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.0719	0.1404	0.0096	0	0
0	0.0012	0.1932	0.2726	0.0689	0	0
0	0.0218	0.2898	0.3804	0.1456	0.0007	0
0.0035	0.0869	0.3538	0.461	0.2171	0.0149	0
0.0201	0.1908	0.3883	0.4929	0.3174	0.038	0.0122
0.0473	0.2928	0.3996	0.4888	0.4227	0.0732	0.0267



รูปที่ 5.20 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90°

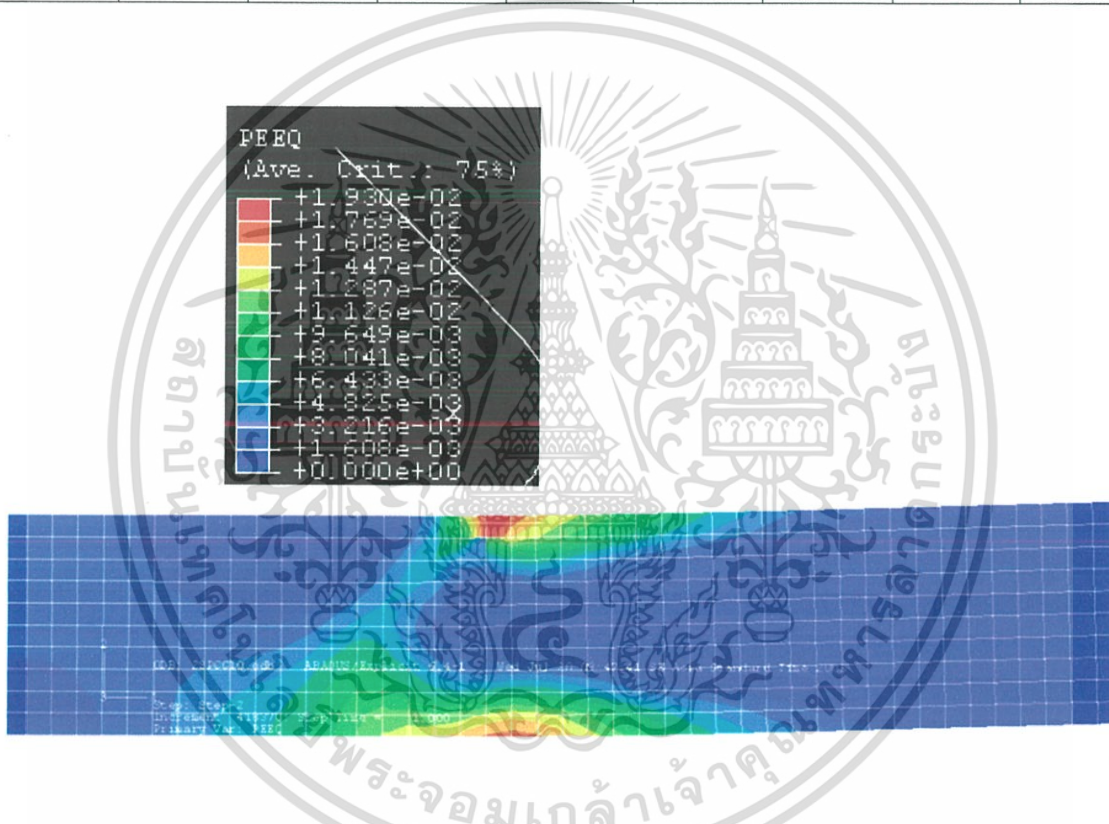
จากการทำแบบจำลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. จะเห็นว่าในช่วงการพับที่ 10 – 30 องศา ไม่มีค่าความเครียดพลาสติก หรือการยืดตัวออกจากวัสดุซึ่งขัดแย้งกับการทดลอง ขณะที่ทำการทดลองวัสดุจะผ่านจุด Plastic ที่การพับ จึงทำให้วัสดุเกิดการงอตัวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.65 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

องศา

B	C	D	E	F	G	H	I	J
0.0024	0.0065	0.0175	0.0192	0.0161	0.0145	0.0133	0.0121	0.0127
0.0061	0.0079	0.004	0.0112	0.0115	0.0099	0.0083	0.0068	0.0055
0.0067	0.0045	0	0.0009	0.0039	0.004	0.0029	0.0017	0.0007
0.0048	0.0014	0	0	0	0	0	0	0
0.0025	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0024	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0043	0.002	0.0004	0	0	0	0	0	0
0.0064	0.0046	0.0043	0.0048	0.0051	0.0046	0.0036	0.0024	0.0012
0.0092	0.0083	0.0093	0.0107	0.011	0.0104	0.0091	0.0076	0.0061
0.014	0.0145	0.0157	0.0171	0.0167	0.0159	0.0146	0.0129	0.0111



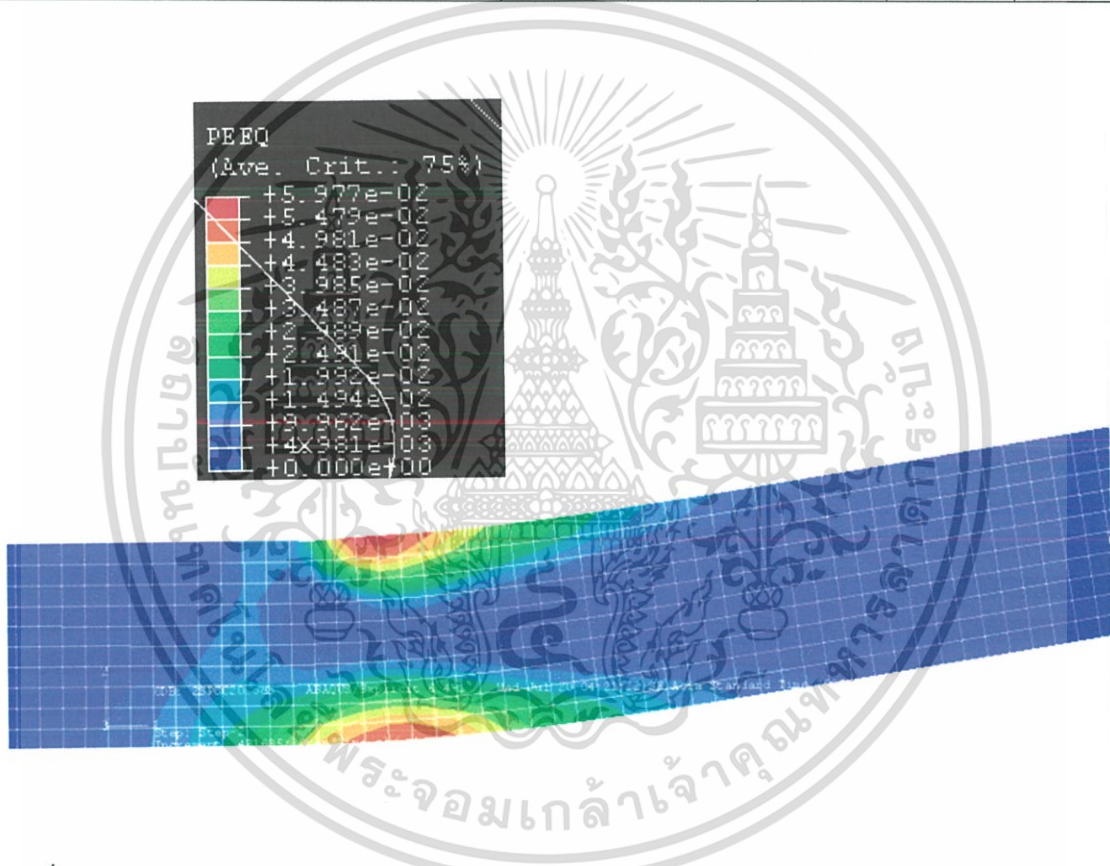
รูปที่ 5.21 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.66 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20

องศา

C	D	E	F	G	H	I	J	K
0.0084	0.0372	0.057	0.0597	0.0567	0.0542	0.0505	0.0464	0.0423
0.0077	0.0154	0.348	0.0446	0.0449	0.0405	0.0363	0.0325	0.0283
0.0044	0.0013	0.138	0.0228	0.0264	0.0254	0.022	0.0185	0.0153
0.0013	0	0	0.0042	0.0076	0.0085	0.0073	0.0054	0.0337
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0043	0.0034	0.0038	0.0042	0.0032	0.0011	0	0	0
0.0111	0.0123	0.0152	0.0175	0.174	0.0153	0.0127	0.0099	0.0076
0.0196	0.0228	0.0272	0.0301	0.0307	0.0294	0.0265	0.0226	0.0187
0.0301	0.0353	0.0395	0.042	0.0432	0.0424	0.0394	0.0353	0.0305
0.0429	0.0485	0.0513	0.0541	0.0554	0.0542	0.0514	0.0472	0.0425



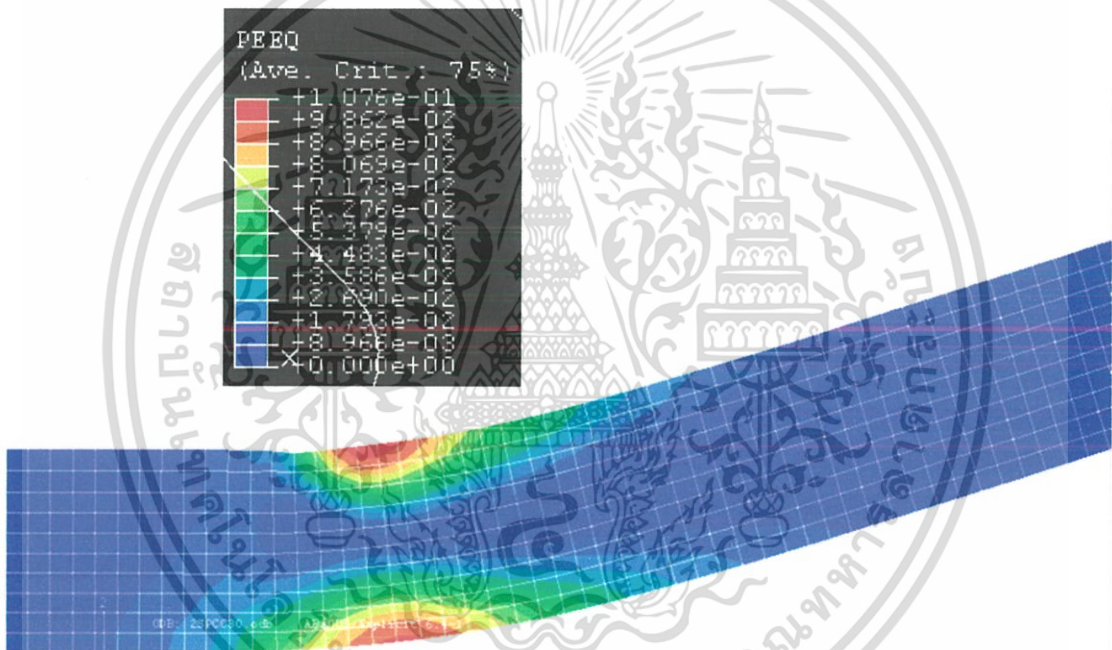
รูปที่ 5.22 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.67 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.0545	0.0851	0.1075	0.107	0.1042	0.0994	0.0916	0.0818	0.0718
0.0268	0.0511	0.0773	0.086	0.0824	0.0748	0.0659	0.0573	0.0497
0.0082	0.0245	0.0408	0.0522	0.0528	0.0472	0.0402	0.0339	0.0286
0	0.0028	0.0113	0.0183	0.0206	0.019	0.0157	0.0123	0.0097
0	0	0	0.0003	0.0005	0.0004	0.0003	0.0001	0
0.0106	0.0141	0.0165	0.0163	0.0138	0.0105	0.0071	0.0041	0.0017
0.0248	0.0324	0.0386	0.041	0.0392	0.0344	0.0287	0.0227	0.0181
0.0413	0.0507	0.0589	0.0633	0.0629	0.0582	0.0508	0.0431	0.0362
0.0586	0.0689	0.078	0.083	0.0838	0.0798	0.0722	0.0634	0.0546
0.0767	0.0867	0.0955	0.1012	0.102	0.0986	0.0922	0.0832	0.0734

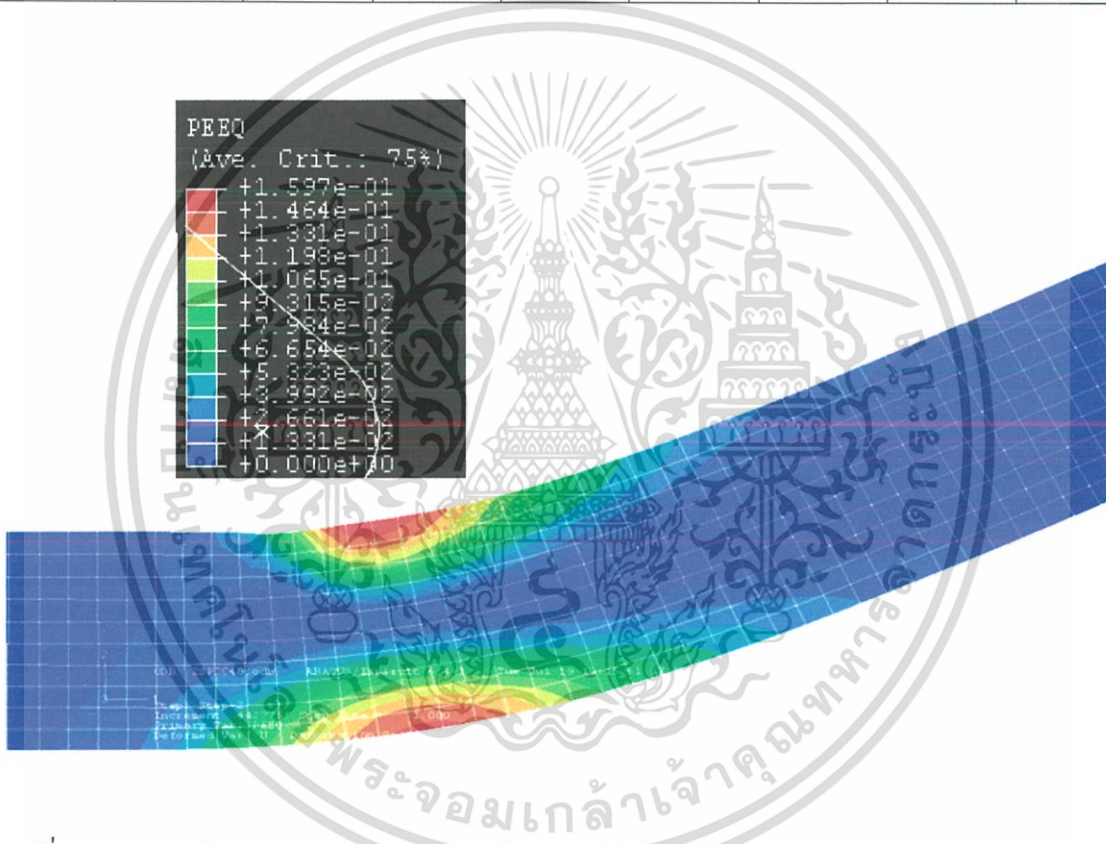


รูปที่ 5.23 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.68 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.1125	0.153	0.1596	0.1576	0.1519	0.142	0.1279	0.113	0.0984
0.0678	0.1099	0.1821	0.1267	0.1171	0.1047	918	0.0795	0.0687
0.0334	0.0604	0.0798	0.0833	0.0758	0.0651	0.055	0.0465	0.04
0.0054	0.0187	0.031	0.0354	0.0324	0.0269	0.0214	0.0174	0.0146
0	0.0001	0.0013	0.002	0.0017	0.0012	0.0007	0.0004	0.0022
0.0229	0.0274	0.0284	0.0257	0.0216	0.0174	0.0136	0.0104	0.0076
0.0494	0.0594	0.0642	0.0632	0.0577	0.0498	0.042	0.0353	0.0092
0.0758	0.0882	0.0959	0.0973	0.0922	0.0827	0.072	0.0618	0.0524
0.1013	0.1144	0.1236	0.1267	0.1227	0.113	0.1006	0.0877	0.0756
0.1255	0.1395	0.1489	0.1524	0.1492	0.1404	0.1275	0.113	0.0991

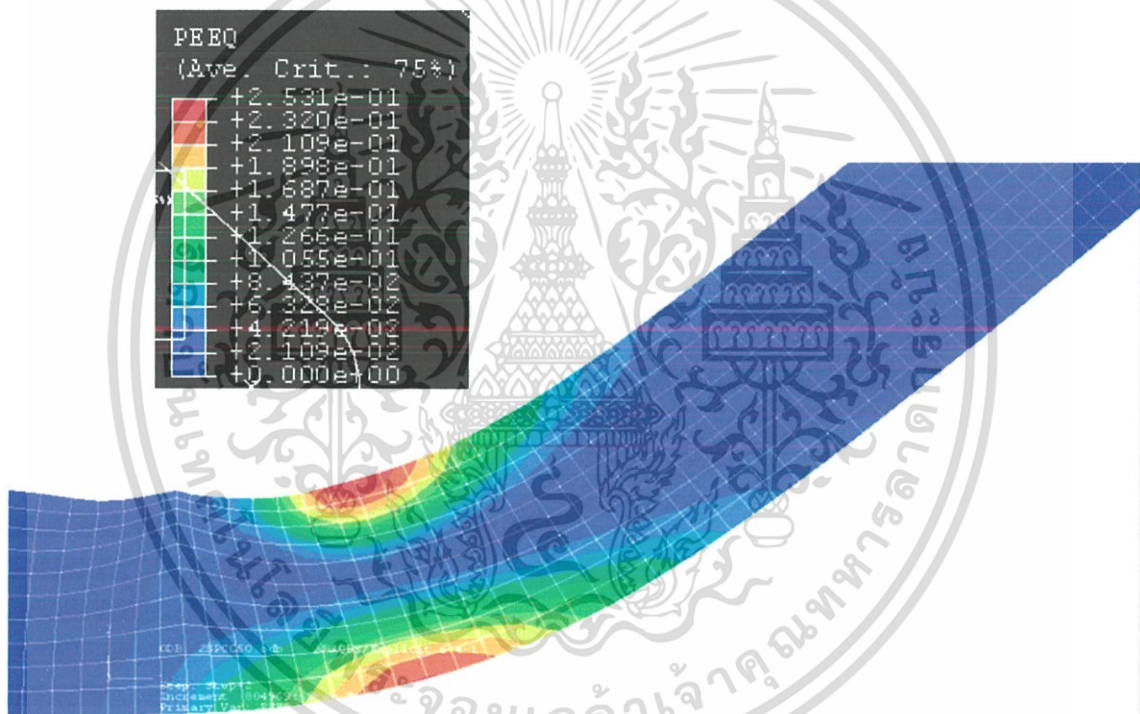


รูปที่ 5.24 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.69 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.1067	0.1717	0.233	0.2531	0.2507	0.2381	0.2166	0.1902	0.1632
0.0991	0.1453	0.1949	0.2154	0.2107	0.1927	0.168	0.1422	0.1186
0.573	0.0952	0.1335	0.1516	0.1471	0.1297	0.1081	0.088	0.0715
0.0218	0.0405	0.067	0.0814	0.0776	0.0643	0.0502	0.0385	0.0295
0.0076	0.0103	0.0145	0.016	0.0133	0.0091	0.0056	0.0034	0.002
0.0165	0.0207	0.0256	0.029	0.0294	0.028	0.025	0.0217	0.0181
0.0493	0.0641	0.0757	0.0821	0.0829	0.0792	0.0714	0.0624	0.0532
0.0949	0.1164	0.1326	0.1413	0.1406	0.1333	0.1208	0.1089	0.091
0.1398	0.1633	0.1819	0.1922	0.1908	0.1816	0.166	0.1473	0.1279
0.1821	0.2069	0.2261	0.236	0.2342	0.2245	0.2074	0.1861	0.164

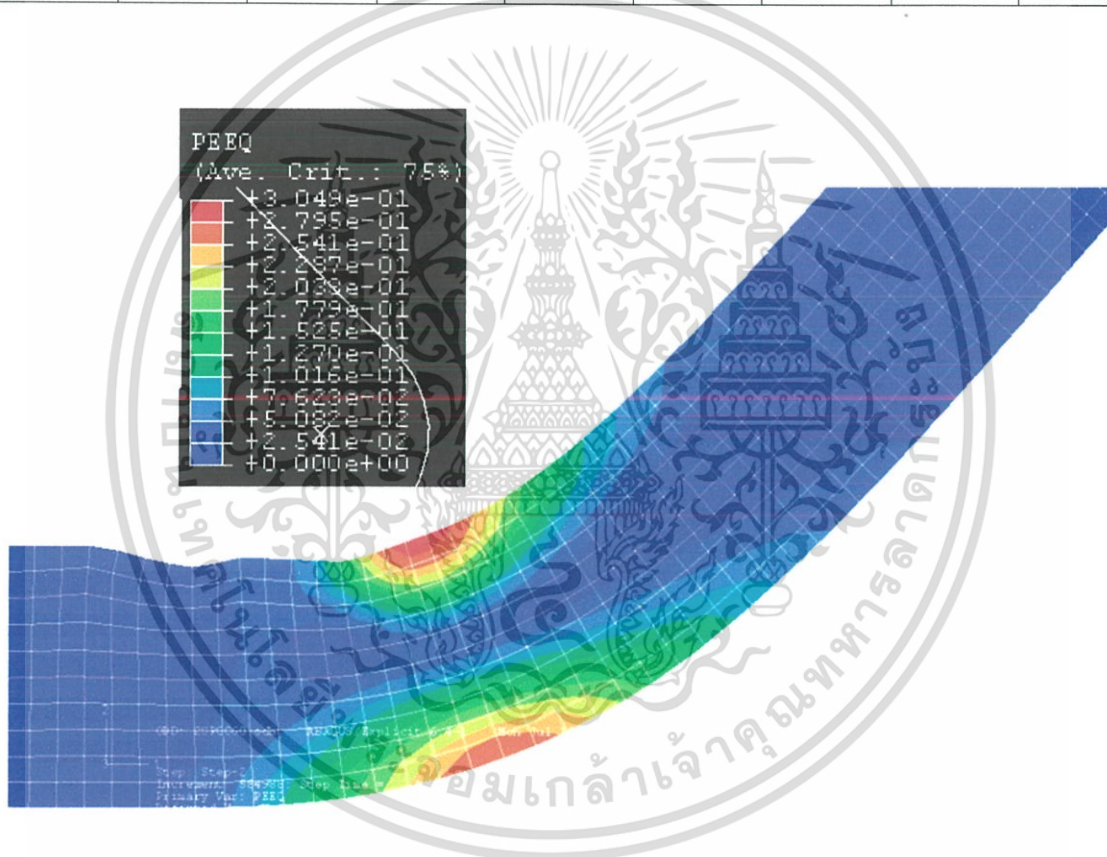


รูปที่ 5.25 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.70 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.182	0.2473	0.2968	0.3049	0.2955	0.2772	0.2511	0.2191	0.1871
0.1167	0.1783	0.2274	0.2421	0.2347	0.2154	0.1888	0.1605	0.1343
0.0542	0.1032	0.1404	0.1583	0.1555	0.1394	0.1178	0.0971	0.0796
0.0063	0.0331	0.0588	0.073	0.073	0.0634	0.051	0.04	0.0315
0.0117	0.0106	0.0102	0.0094	0.0088	0.0066	0.0045	0.003	0.0019
0.0454	0.0519	0.054	0.0528	0.0495	0.044	0.0372	0.035	0.2444
0.0911	0.107	0.1169	0.1194	0.1149	0.1049	0.0916	0.0775	0.0644
0.1344	0.1568	0.1734	0.1809	0.1771	1635	0.1455	0.1257	0.106
0.1751	0.2016	0.2228	0.233	0.2299	0.2159	0.1949	0.1709	0.1466
0.2134	0.2435	0.2669	0.2782	0.2756	0.2618	0.2396	0.2132	0.1865

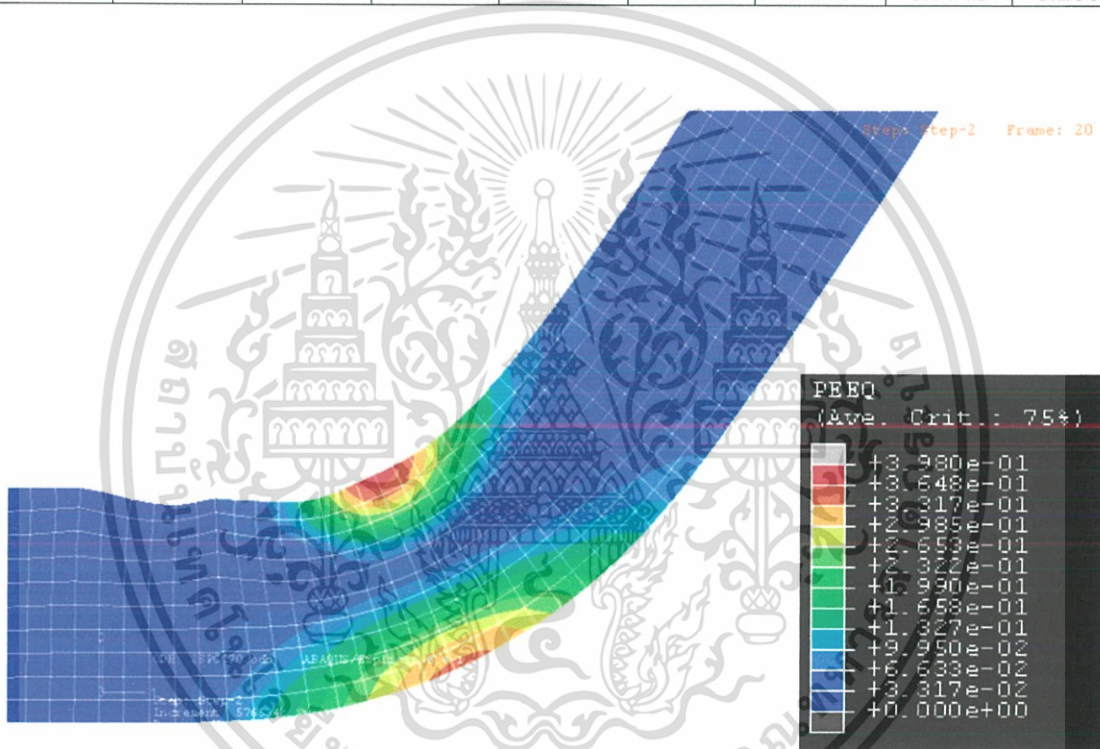


รูปที่ 5.26 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.71 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.1865	0.2595	0.3477	0.398	0.3912	0.3629	0.3258	0.2807	0.2357
0.1241	0.1901	0.2607	0.3059	0.3119	0.2898	0.2539	0.2125	0.1728
0.0573	0.1108	0.1631	0.1948	0.2048	0.1921	0.1651	0.1339	0.1048
0.0081	0.0361	0.0692	0.0908	0.0975	0.0931	0.0782	0.0599	0.0436
0.0155	0.0204	0.0236	0.0243	0.0194	0.0135	0.0098	0.0062	0.0037
0.0516	0.0597	0.0669	0.069	0.066	0.0595	0.0506	0.0408	0.0317
0.1031	0.1237	0.1394	0.1471	0.1462	0.1374	0.1212	0.1018	0.0824
0.1543	0.184	0.2083	0.2229	0.2245	0.2131	0.191	0.1629	0.1345
0.202	0.2375	0.2683	0.2877	0.2913	0.2787	0.253	0.2192	0.1844
0.2476	0.2881	0.3217	0.342	0.3462	0.3339	0.307	0.2715	0.2334

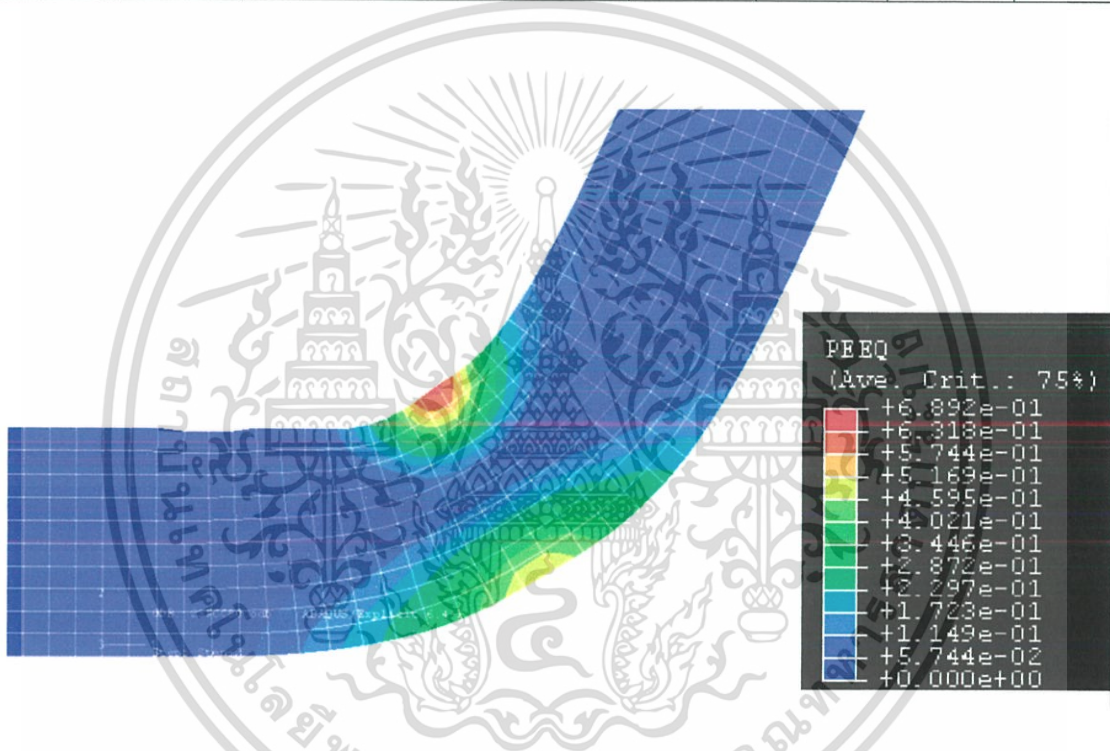


รูปที่ 5.27 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.72 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.1905	0.2609	0.3687	0.5717	0.6892	0.6383	0.5084	0.3483	0.2668
0.1241	0.1965	0.2978	0.4262	0.5295	0.5018	0.3723	0.2733	0.2009
0.0573	0.119	0.1965	0.273	0.3197	0.3063	0.2493	0.1837	0.1268
0.0073	0.0388	0.089	0.1298	0.1545	0.1577	0.1338	0.0935	0.0582
0.0174	0.0318	0.0416	0.0485	0.0464	0.0436	0.033	0.0156	0.0068
0.058	0.0732	0.0871	0.0937	0.0926	0.0893	0.0781	0.0568	0.0356
0.1123	0.144	0.1711	0.1867	0.1927	0.188	0.168	0.1339	0.0951
0.1682	0.2128	0.2566	0.2899	0.3062	0.2964	0.2611	0.2101	0.1588
0.2232	0.2732	0.3289	0.3834	0.4126	0.393	0.3367	0.2751	0.2205
0.279	0.3326	0.3934	0.4827	0.5221	0.4894	0.3973	0.3359	0.2821

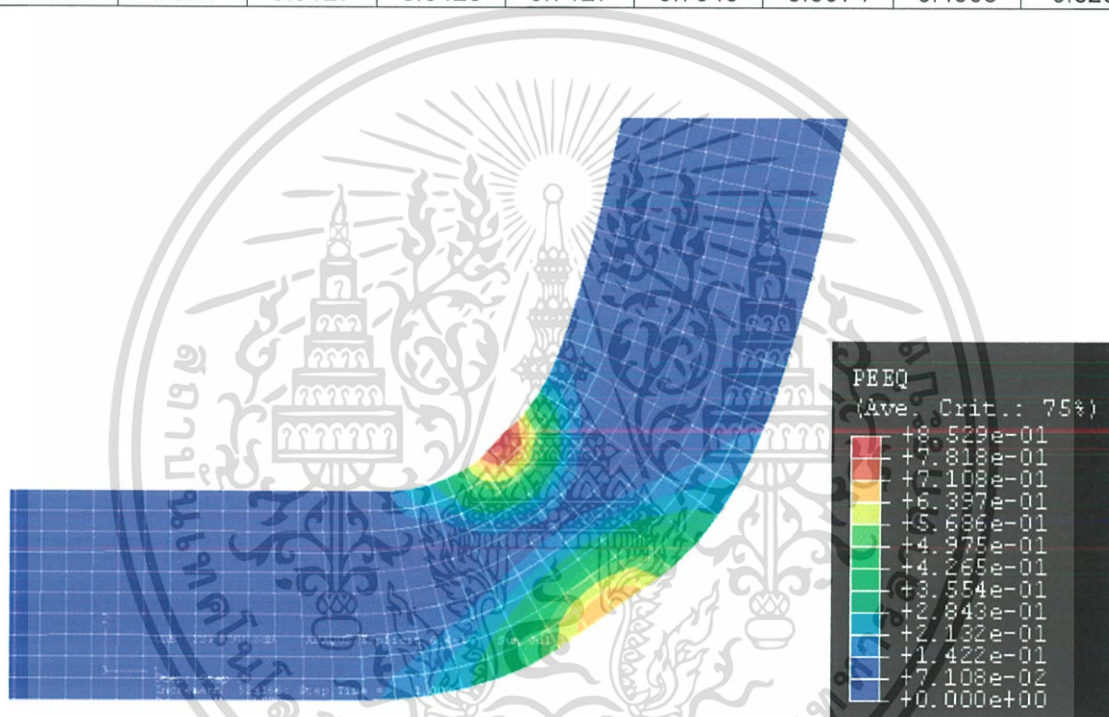


รูปที่ 5.28 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.73 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา

E	F	G	H	I	J	K	L	M
0.2728	0.2745	0.4074	0.6114	0.7557	0.8529	0.8069	0.6222	0.3649
0.1578	0.1984	0.332	0.5041	0.6302	0.6884	0.6116	0.4021	0.2585
0.0605	0.1284	0.233	0.3344	0.4176	0.4452	0.3775	0.2567	0.1591
0.008	0.0478	0.1181	0.1633	0.2146	0.2318	0.1991	0.1348	0.0798
0.0218	0.0507	0.0774	0.0904	0.0986	0.0983	0.0848	0.0567	0.0243
0.0625	0.0874	0.1131	0.1329	0.1439	1398	0.1205	0.0899	0.0569
0.1196	0.1588	0.2008	0.2403	0.265	0.2583	0.2223	0.1747	0.1252
0.1807	0.2367	0.3061	0.3788	0.4251	0.4179	0.3549	0.2728	0.1995
0.2452	0.3168	0.4182	0.5393	0.6014	0.5916	0.504	0.3649	0.2711
0.2946	0.374	0.5127	0.6423	0.7127	0.7046	0.5974	0.4308	0.323



รูปที่ 5.29 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90°

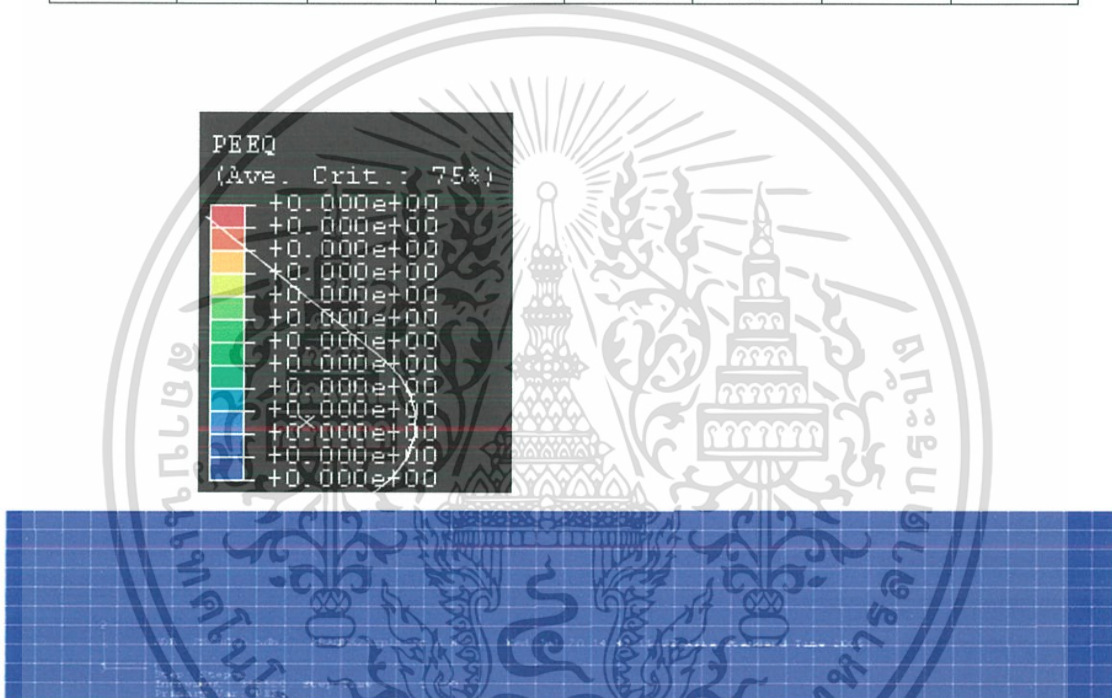
จากการทำแบบจำลองของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. จะเห็นว่าวัสดุเกิดการยึดตัวตั้งแต่เริ่มการพับ ค่าความเค้นจะมีการกระจายมากในช่วงการพับ ความเครียดที่เกิดขึ้นจะมากกว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่า การเกิดการยึดตัวของวัสดุมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทั้งทั้งช่วงการงอตัว และมีค่าสูงมากที่ผิวด้านนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.74 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

องศา

C	D	E	F	G	H	I	J
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0



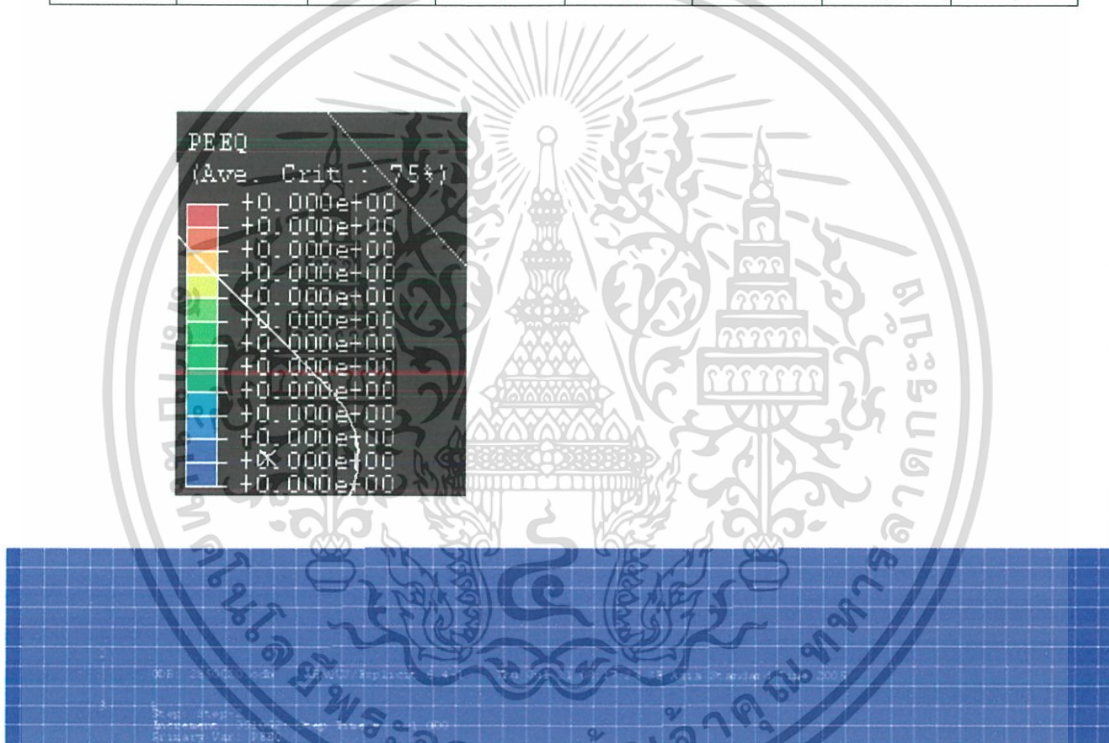
รูปที่ 5.30 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.75 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20

องศา

C	D	E	F	G	H	I	J
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

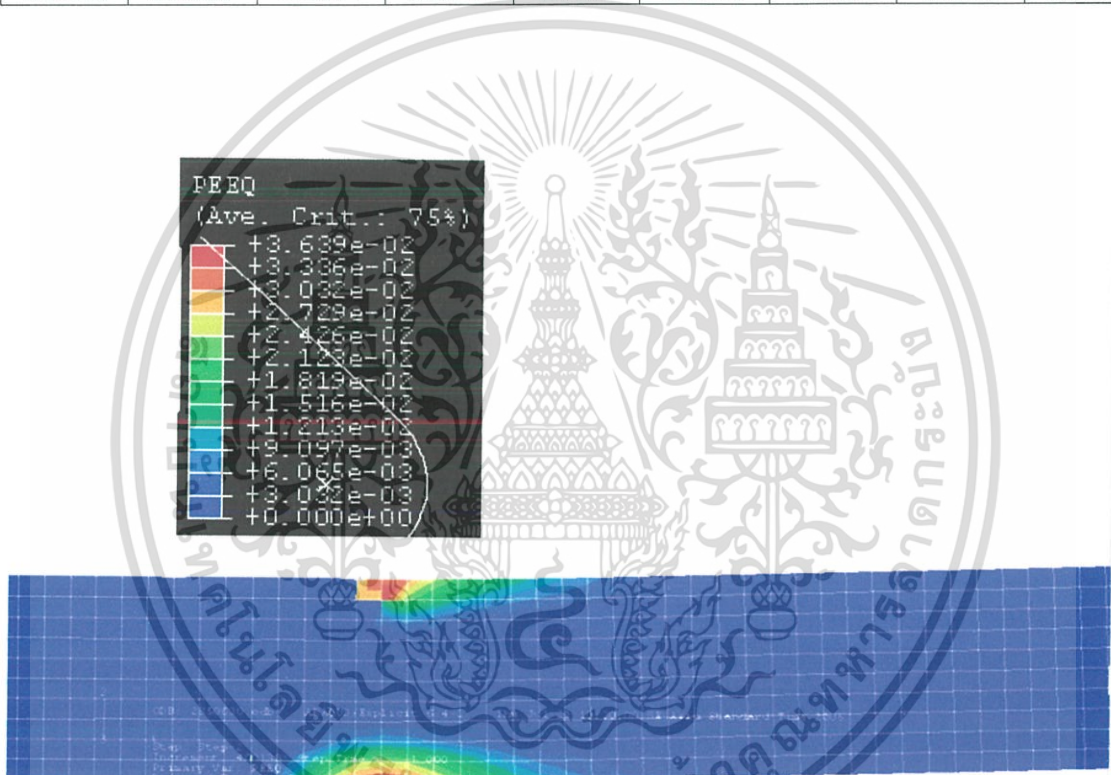


รูปที่ 5.31 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.76 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา

C	D	E	F	G	H	I	J	K
0	0.0007	0.0285	0.0363	0.0374	0.0029	0.0189	0.0158	0.0131
0	0	0.0017	0.0148	0.0127	0.0068	0.0003	0.0013	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.0006	0.0003	0	0	0	0	0
0.0055	0.0129	0.0168	0.0169	0.0142	0.0104	0.0065	0.0029	0.0007
0.0216	0.0297	0.0341	0.0341	0.0309	0.0259	0.0206	0.0158	0.0119



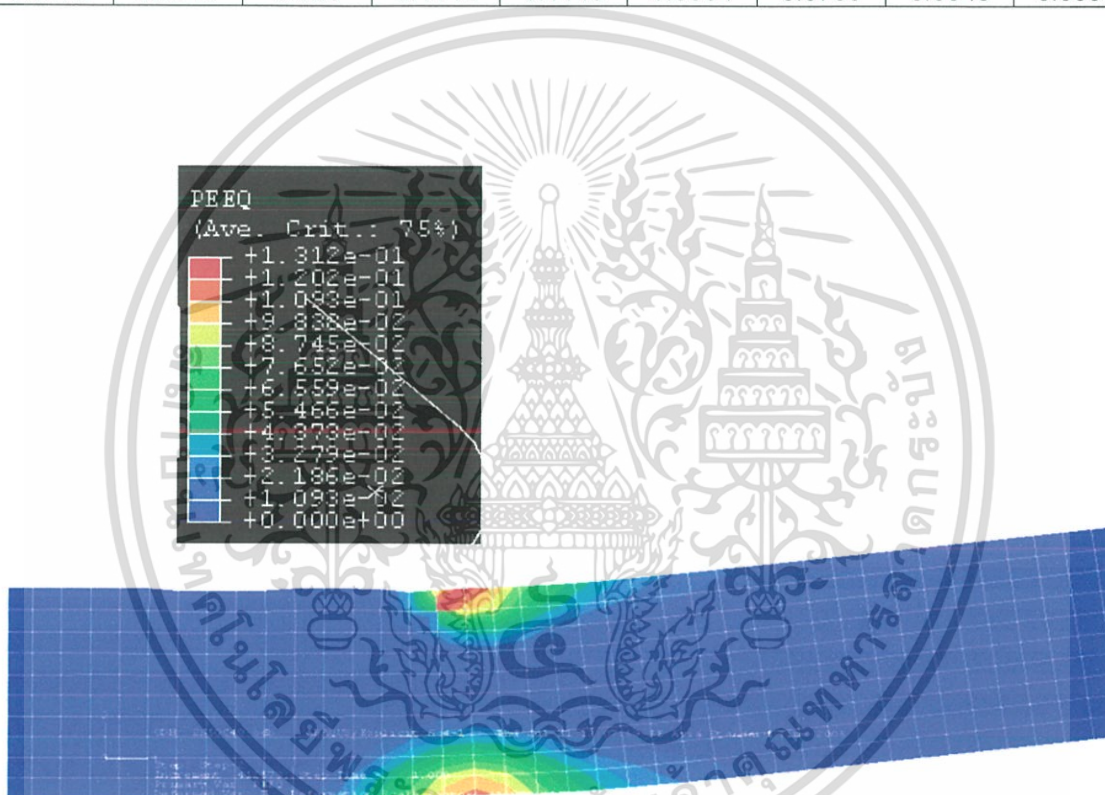
รูปที่ 5.32 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.77 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40

องศา

C	D	E	F	G	H	I	J	K
0.003	0.0015	0.0658	0.1311	0.125	0.0918	0.0734	0.0582	0.0439
0.0021	0.001	0.0279	0.0694	0.083	0.066	0.0424	0.0265	0.0174
0	0	0.0003	0.0114	0.0263	0.0266	0.0133	0.0018	0.0001
0	0	0	0	0.0001	0.0003	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.002	0.0096	0.0142	0.0132	0.0072	0.0001	0	0
0.005	0.0207	0.038	0.0479	0.0468	0.0367	0.0224	0.0099	0.0019
0.002	0.054	0.0682	0.0843	0.0837	0.068	0.0474	0.0299	0.0185
0.0476	0.0719	0.096	0.1142	0.1148	0.0964	0.0735	0.0543	0.0396



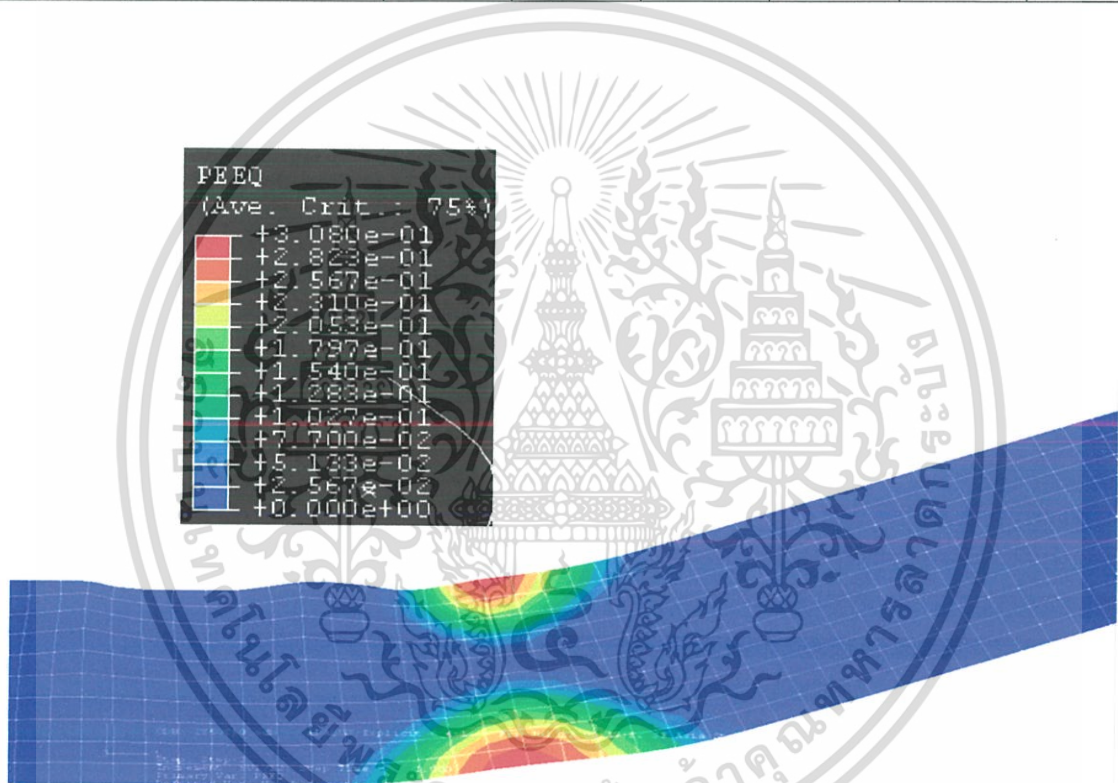
รูปที่ 5.33 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.78 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.0142	0.083	0.2026	0.2999	0.308	0.2635	0.2034	0.1395	0.0728
0.0109	0.0486	0.1466	0.2356	0.3533	0.2027	0.1353	0.0665	0.0254
0.0031	0.0077	0.0592	0.1373	0.1564	0.114	0.0515	0.0118	0.0005
0	0	0.0041	0.0239	0.036	0.0166	0.0014	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.0017	0.0206	0.0457	0.0462	0.0203	0.0001	0	0
0.0073	0.0351	0.0871	0.1369	0.1421	0.0932	0.0362	0.0048	0
0.0364	0.0994	0.1722	0.2149	0.2153	0.1756	0.1013	0.0348	0.0058
0.0874	0.1733	0.2427	0.2724	0.2662	0.2327	0.176	0.0878	0.03
0.1573	0.235	0.2852	0.3035	0.296	0.2676	0.2228	0.155	0.0727

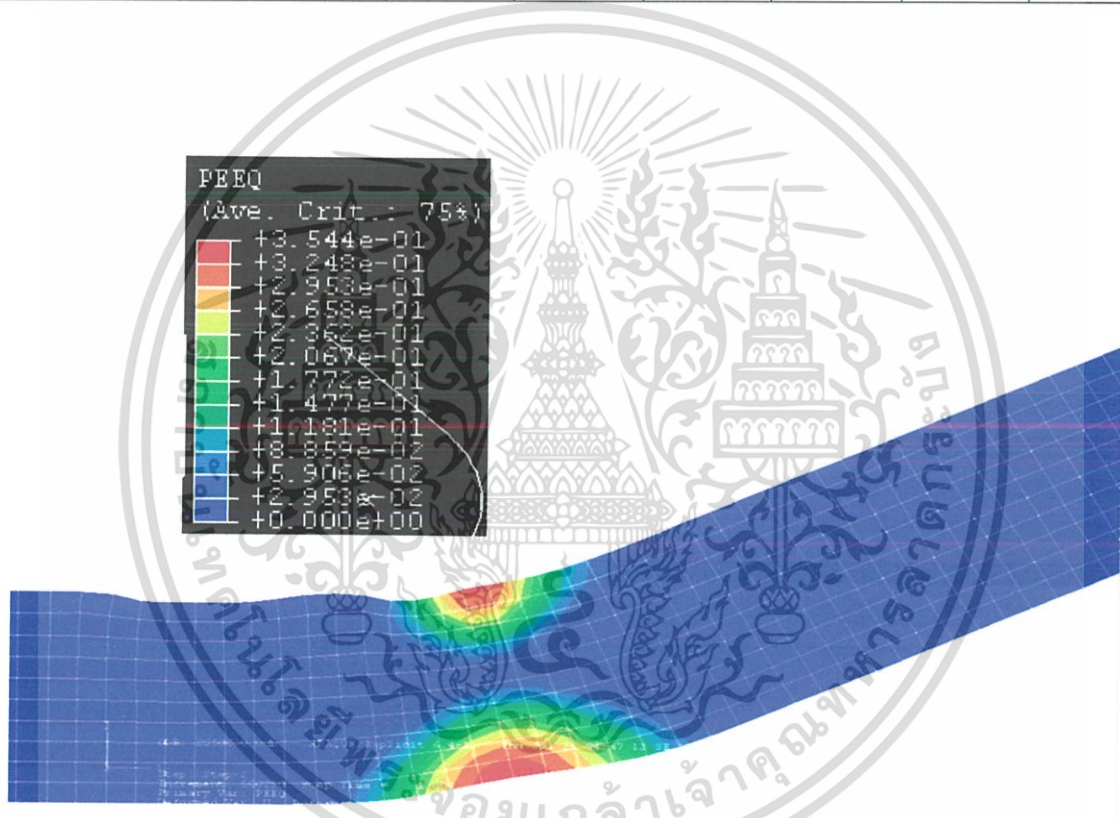


รูปที่ 5.34 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.79 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.0245	0.0925	0.2016	0.3167	0.3543	0.3144	0.2379	0.154	0.0874
0.0173	0.0657	0.1565	0.2564	0.2955	0.2511	0.1673	0.0827	0.0319
0.0062	0.0222	0.068	0.1535	0.189	0.1495	0.0732	0.0205	0.0008
0.0005	0.0001	0.0086	0.0347	0.0542	0.032	0.0044	0	0
0	0	0	0	0.0001	0	0	0	0
0	0.0046	0.0254	0.0537	0.0612	0.0369	0.0057	0	0
0.0079	0.0412	0.1031	0.1559	0.1706	0.1333	0.0602	0.0135	0
0.0416	0.1172	0.1971	0.2474	0.2531	0.216	0.1447	0.0591	0.0117
0.1048	0.1962	0.2759	0.316	0.3121	0.2766	0.2141	0.132	0.0489
0.1786	0.2653	0.3239	0.3516	0.3492	0.3162	0.2652	0.1928	0.104



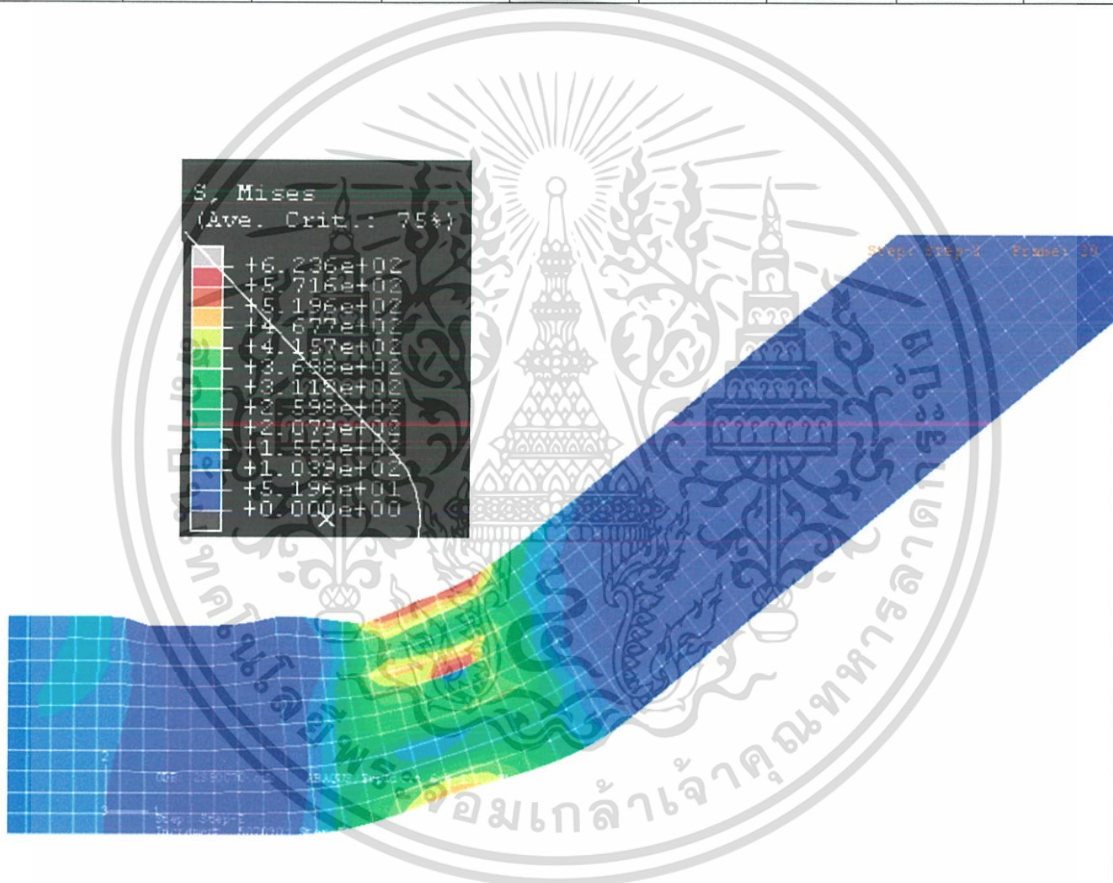
รูปที่ 5.35 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.80 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.215	0.0961	0.2503	0.3597	0.4571	0.4521	0.3669	0.2586	0.1601
0.017	0.0703	0.1721	0.2884	0.3683	0.3619	0.2734	0.1687	0.0128
0.0066	0.0148	0.0641	0.1804	0.2489	0.2289	0.1497	0.0587	0.0079
0.0003	0	0.0058	0.0516	0.0891	0.0672	0.021	0.001	0
0	0	0	0.0022	0.0033	0.0004	0	0	0
0	0.01	0.0432	0.0799	0.0964	0.0818	0.0449	0.0073	0
0.0099	0.0589	0.1437	0.208	0.235	0.2135	0.1494	0.0608	0.0092
0.0521	0.149	0.2496	0.3219	0.3507	0.3221	0.2478	0.1506	0.0515
0.1345	0.2431	0.3423	0.4113	0.4363	0.4037	0.3268	0.232	0.1274
0.2136	0.3204	0.4086	0.4641	0.4811	0.4527	0.3876	0.3012	0.2025



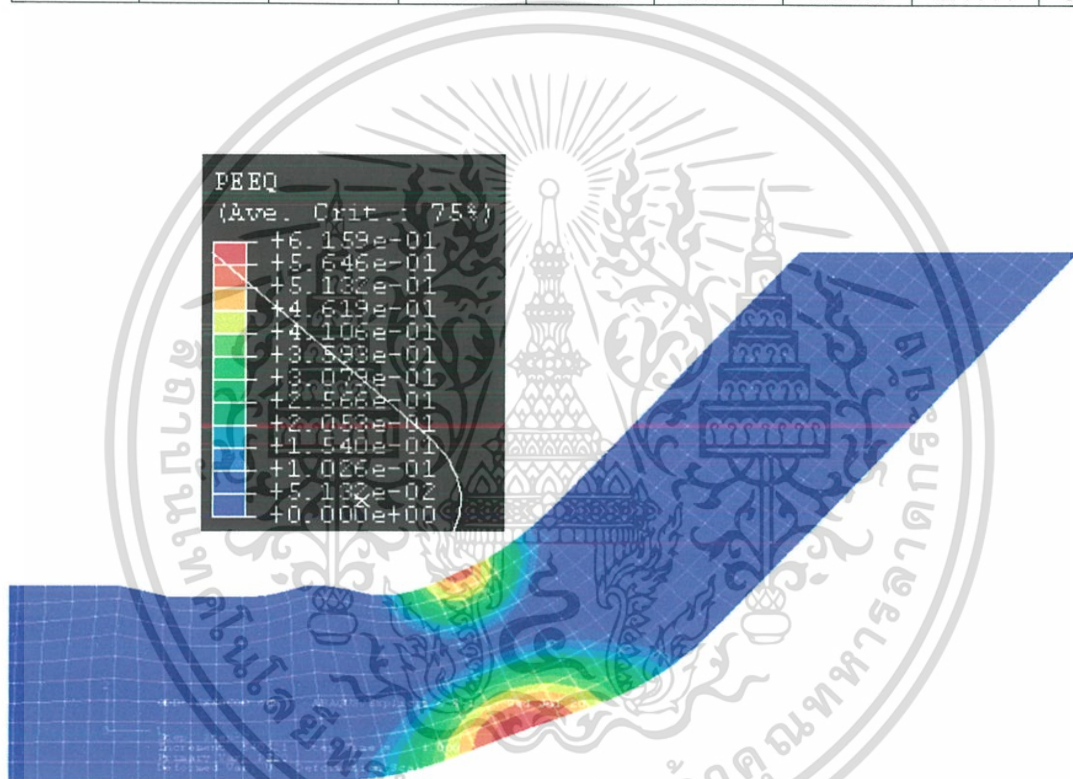
รูปที่ 5.36 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.81 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.0154	0.0825	0.2428	0.394	0.5058	0.5694	0.509	0.3604	0.2422
0.0103	0.0551	0.1805	0.3201	0.4259	0.4506	0.3907	0.2729	0.1489
0.0033	0.0153	0.0759	0.0196	0.2967	0.3054	0.2385	0.1333	0.0347
0	0	0.0111	0.0747	0.1374	0.1282	0.0655	0.0117	0
0	0	0.0002	0.0051	0.0165	0.0103	0.0001	0	0
0	0.008	0.0399	0.0829	0.1175	0.1193	0.0907	0.0447	0.0034
0.0071	0.0543	0.149	0.2818	0.2794	0.2813	0.2339	0.146	0.05
0.0511	0.1555	0.2776	0.3757	0.4277	0.4229	0.2582	0.2551	0.1371
0.1451	0.2702	0.3941	0.494	0.5466	0.5294	0.4513	0.3543	0.2409
0.2357	0.3655	0.4833	0.5736	0.6158	0.5915	0.5209	0.4111	0.3007



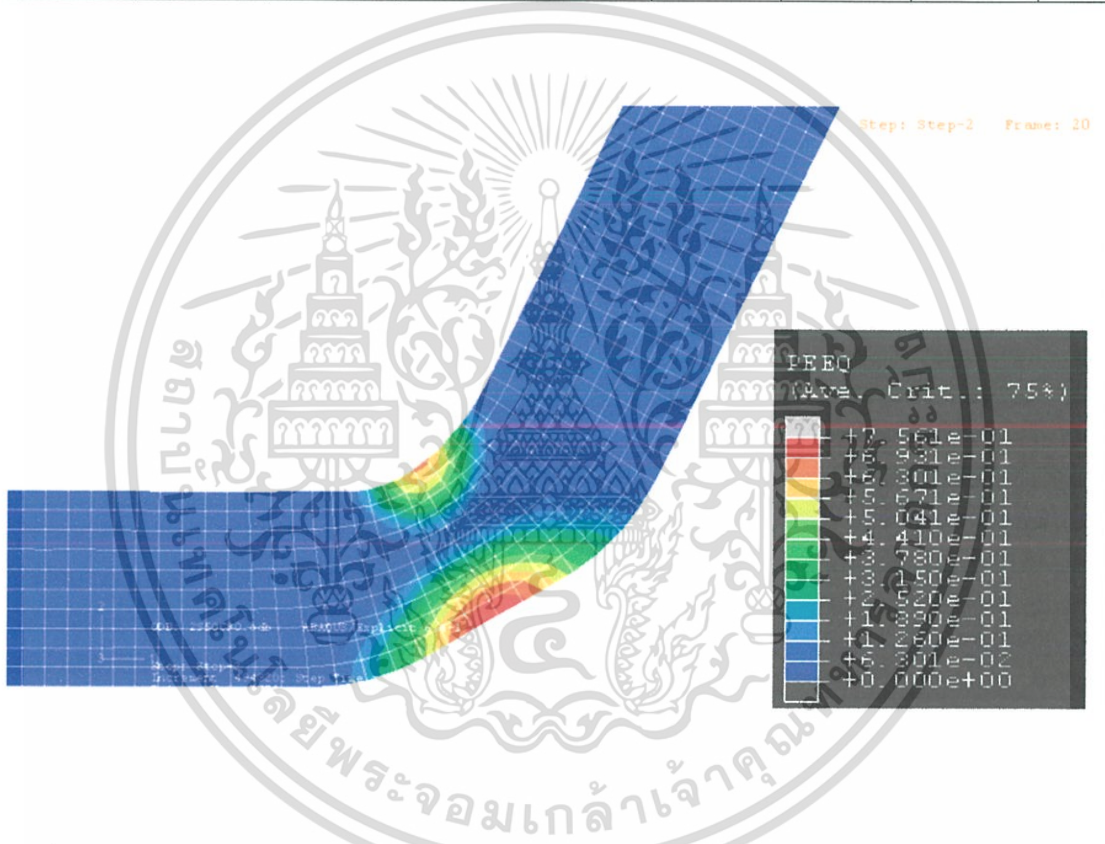
รูปที่ 5.37 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.82 แสดงค่าความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นใน Element ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา

องศา

D	E	F	G	H	I	J	K	L
0.0166	0.1204	0.3137	0.5015	0.6165	0.6693	0.6283	0.5016	0.3364
0.0019	0.044	0.00941	0.4027	0.5084	0.5504	0.4907	0.3754	0.2214
0	0.0027	0.0906	0.2606	0.3568	0.3889	0.3206	0.201	0.072
0	0	0.0094	0.0989	0.1891	0.1975	0.1267	0.0394	0.001
0	0	0.0004	0.0178	0.0595	0.0483	0.0076	0	0
0	0.0144	0.0598	0.1157	0.1523	0.1513	0.1228	0.0765	0.0247
0.0135	0.0747	0.1842	0.2801	0.3349	0.3435	0.301	0.2123	0.1001
0.0739	0.1909	0.3281	0.4482	0.5164	0.5279	0.462	0.3466	0.2131
0.1812	0.3262	0.4702	0.5911	0.6638	0.6661	0.587	0.4648	0.3268
0.2598	0.4196	0.5711	0.6934	0.756	0.7488	0.6709	0.5493	0.4094



รูปที่ 5.38 แสดงค่า Equivalent ของความเครียดพลาสติกในแต่ละ Node ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 90°

จากการทำแบบจำลองวัสดุ S50C ที่ความหนา 2 mm. จะเห็นว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการพับสูงมากกว่าวัสดุ SPCC จะไม่กระจายออกไปมากและจะเกาะกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 เปอร์เซ็นต์ค่า Error ของการทดสอบการดีดกลับของวัสดุ

จากผลการตรวจสอบและการทดลอง สามารถนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ค่า Error ของการดีดกลับ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากตารางการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทำแบบจำลองมีค่าต่างจากความเป็นจริงมากในช่วงเริ่มต้น การพับและเปอร์เซ็นต์ค่า Error จะลดลงเมื่อเข้าใกล้องศาการพับที่สูงขึ้น ส่วนในทางทฤษฎีจะเห็นว่าค่าการเกิดการดีดกลับจะมากในช่วงแรก และจะลดลงในช่วงหลัง วัสดุที่มีความแข็งมากจะมีเปอร์เซ็นต์ค่า Error มากกว่า และวัสดุที่มีความหนาน้อยจะมีเปอร์เซ็นต์ค่า Error น้อย แต่ในทางการทำแบบจำลอง เปอร์เซ็นต์ค่า Error ที่เกิดขึ้นจะสวนทางกับทางทฤษฎี โดยที่วัสดุที่มีความหนามาก เปอร์เซ็นต์ค่า Error จะน้อยกว่าและค่า Error จะมากในช่วงแรกของการพับ

ตารางที่ 5.83 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ SPCC ขนาด 1 mm.

SPCC Size 1 mm.							
องศาการพับ	eq.24	eq.23	Simulation	Experiment	%Error (eq.24)	%Error (eq.23)	% Error Simulation
10	0.782	0.786	0.083	0.747	-4.69	-5.22	88.89
20	0.797	0.8	0.249	0.825	3.39	3.03	69.82
30	0.812	0.814	0.399	0.908	10.57	10.35	56.06
40	0.828	0.828	0.501	0.95	12.84	12.84	47.26
50	0.843	0.842	0.577	0.965	12.64	12.75	40.21
60	0.859	0.857	0.639	0.974	11.81	12.01	34.39
70	0.875	0.871	0.685	0.979	10.62	11.03	30.03
80	0.89	0.885	0.727	0.983	9.46	9.97	26.04
90	0.906	0.899	0.769	0.986	8.11	8.82	22.01

ตารางที่ 5.84 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ S50C ขนาด 1 mm.

S50C Size 1 mm.							
องศา การพับ	eq.24	eq.23	Simulation	Experiment	%Error (eq.24)	%Error (eq.23)	% Error Simulation
10	0.193	0.237	0.015	0.207	6.76	-14.49	92.75
20	0.236	0.276	0.012	0.354	33.33	22.03	96.61
30	0.282	0.318	0.015	0.426	33.80	25.35	96.48
40	0.331	0.362	0.026	0.489	32.31	25.97	94.68
50	0.383	0.409	0.092	0.539	28.94	24.12	82.93
60	0.438	0.457	0.193	0.617	29.01	25.93	68.72
70	0.494	0.506	0.317	0.697	29.12	27.40	54.52
80	0.553	0.557	0.413	0.754	26.66	26.13	45.23
90	0.614	0.61	0.499	0.802	23.44	23.94	37.78

ตารางที่ 5.85 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ SPCC ขนาด 2 mm.

SPCC Size 2 mm.							
องศา การพับ	eq.24	eq.23	Simulation	Experiment	%Error (eq.24)	%Error (eq.23)	% Error Simulation
10	0.89	0.885	0.169	0.85	-4.71	-4.12	80.12
20	0.898	0.892	0.421	0.914	1.75	2.41	53.94
30	0.906	0.899	0.578	0.928	2.37	3.13	37.72
40	0.914	0.907	0.664	0.954	4.19	4.93	30.40
50	0.922	0.914	0.743	0.964	4.36	5.19	22.93
60	0.929	0.921	0.803	0.973	4.52	5.34	17.47
70	0.973	0.928	0.831	0.978	4.51	5.11	15.03
80	0.945	0.935	0.864	0.985	4.06	5.08	12.28
90	0.953	0.942	0.883	0.996	4.32	5.42	11.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.86 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Error ของ S50C ขนาด 2 mm.

S50C Size 2 mm.							
องศาการพับ	eq.24	eq.23	Simulation	Experiment	%Error (eq.24)	%Error (eq.23)	% Error Simulation
10	0.553	0.557	0.004	0.564	1.95	1.24	99.29
20	0.583	0.583	0.002	0.624	6.57	6.57	99.68
30	0.614	0.61	0.072	0.676	9.17	9.76	89.35
40	0.644	0.636	0.181	0.72	10.56	11.67	74.86
50	0.676	0.663	0.336	0.769	12.09	13.78	56.31
60	0.707	0.691	0.444	0.816	13.36	15.32	45.59
70	0.739	0.718	0.541	0.858	13.87	16.32	36.95
80	0.771	0.746	0.634	0.889	13.27	16.09	28.68

5.2.5 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคดกลับ

5.2.5.1 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.

ตารางที่ 5.87 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสากการตีคดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
17°00'	9°01'	9°02'	9°00'	8°59'	8°58'	9°01'	9°01'	9°59'	9°00'	8°59'	9°00'
17°30'	10°09'	10°09'	10°10'	10°11'	10°11'	10°12'	10°09'	10°08'	10°11'	10°10'	10°10'
18°00'	10°48'	10°52'	10°50'	10°51'	10°52'	10°47'	10°48'	10°53'	10°49'	10°50'	10°50'

จากการทดลองการพับวัสดุเพื่อชดเชยของสากการตีคดกลับของวัสดุที่ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา ได้ทำการทดลองพับที่ 17 องศา, 17 องศา 30 ลิปดา และ 18 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 10 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสากการตีคดกลับที่ 10 องศา ได้ประมาณ 17 องศา 27 ลิปดา

ตารางที่ 5.88 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 20

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
34°00'	19°08'	19°10'	19°07'	19°11'	19°10'	19°09'	19°14'	19°11'	19°12'	19°08'	19°10'
34°30'	19°36'	19°32'	19°34'	19°33'	19°37'	19°35'	19°31'	19°36'	19°34'	19°32'	19°34'
35°00'	20°07'	20°13'	20°10'	20°08'	20°11'	20°13'	20°09'	20°10'	20°08'	20°11'	20°09'

ทำการทดลองพับที่ 34 องศา, 34 องศา 30 ลิปดา และ 35 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 20 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกกลับที่ 20 องศา ได้ประมาณ 34 องศา 50 ลิปดา

ตารางที่ 5.89 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 30

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
45°00'	28°43'	28°47'	28°46'	28°45'	28°43'	28°46'	28°43'	28°48'	28°45'	28°44'	28°45'
45°30'	29°23'	29°22'	29°24'	29°26'	29°27'	29°23'	29°21'	29°24'	29°27'	29°23'	29°24'
46°00'	30°05'	30°01'	30°00'	30°03'	30°06'	30°04'	30°03'	30°02'	30°05'	30°01'	30°03'

ทำการทดลองพับที่ 45 องศา, 45 องศา 30 ลิปดา และ 46 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 30 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกกลับที่ 30 องศา ได้ประมาณ 45 องศา 57 ลิปดา

ตารางที่ 5.90 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาการติดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
60°00'	38°47'	38°48'	38°52'	38°51'	38°50'	38°52'	38°48'	38°53'	38°49'	38°50'	38°50'
60°30'	39°27'	39°29'	39°29'	39°26'	39°25'	39°24'	39°28'	39°26'	39°26'	39°30'	39°27'
61°00'	41°55'	41°57'	41°60'	41°58'	41°59'	41°56'	41°54'	41°56'	41°60'	41°55'	41°57'

ทำการทดลองพับที่ 60 องศา, 60 องศา 30 ลิปดา และ 61 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 40 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาการติดกลับที่ 40 องศา ได้ประมาณ 45 องศา 57 ลิปดา

ตารางที่ 5.91 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาการติดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
74°00'	49°03'	49°05'	49°07'	49°06'	49°04'	49°05'	49°02'	49°03'	49°07'	49°08'	49°05'
74°30'	49°19'	49°22'	49°23'	49°20'	49°24'	49°22'	49°21'	49°20'	49°21'	49°18'	49°21'
75°00'	50°09'	50°11'	50°12'	50°14'	50°15'	50°11'	50°10'	50°13'	50°10'	50°09'	50°12'

ทำการทดลองพับที่ 74 องศา, 74 องศา 30 ลิปดา และ 75 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 50 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาการติดกลับที่ 50 องศา ได้ประมาณ 74 องศา 51 ลิปดา

ตารางที่ 5.92 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 60

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
86°00'	59°45'	59°43'	59°46'	59°48'	59°44'	59°42'	59°43'	59°45'	59°46'	59°48'	59°45'
86°30'	60°14'	60°13'	60°16'	60°17'	60°14'	60°15'	60°18'	60°13'	60°12'	60°18'	60°15'
87°00'	61°01'	61°03'	61°05'	61°02'	61°03'	61°05'	61°03'	61°01'	61°02'	61°05'	61°03'

ทำการทดลองพับที่ 86 องศา, 86 องศา 30 ลิปดา และ 87 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 60 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 60 องศา ได้ประมาณ 86 องศา 28 ลิปดา

ตารางที่ 5.93 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 70

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
97°00'	69°02'	69°01'	69°04'	69°06'	69°04'	69°02'	69°03'	69°01'	69°02'	69°05'	69°03'
97°30'	69°27'	69°25'	69°24'	69°30'	69°29'	69°26'	69°24'	69°29'	69°30'	69°26'	69°27'
98°00'	70°05'	70°02'	70°06'	70°07'	70°07'	70°03'	70°05'	70°08'	70°03'	70°04'	70°05'

ทำการทดลองพับที่ 97 องศา, 97 องศา 30 ลิปดา และ 98 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 70 องศามากเมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 70 องศา ได้ประมาณ 74 องศา 51 ลิปดา

ตารางที่ 5.94 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาคารดัดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 80

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
106°00'	79°12'	79°11'	79°10'	79°14'	79°12'	79°13'	79°15'	79°11'	79°09'	79°13'	79°12'
106°30'	79°40'	79°42'	79°45'	79°44'	79°43'	79°40'	79°41'	79°44'	79°42'	79°39'	79°42'
107°00'	80°12'	80°11'	80°08'	80°09'	80°12'	80°07'	80°10'	80°11'	80°13'	80°17'	80°10'

ทำการทดลองพับที่ 106 องศา, 106 องศา 30 ลิปดาและ 107 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 80 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาคารดัดกลับที่ 80 องศา ได้ประมาณ 106 องศา 52 ลิปดา

ตารางที่ 5.95 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาคารดัดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่ 90

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
111°00'	88°56'	88°58'	88°55'	88°57'	88°58'	88°60'	88°56'	88°54'	88°57'	88°59'	88°57'
111°30'	89°45'	89°41'	89°40'	89°43'	89°42'	89°39'	89°40'	89°42'	89°43'	89°45'	89°42'
112°00'	90°07'	90°09'	90°05'	90°08'	90°04'	90°10'	90°09'	90°06'	90°05'	90°07'	90°07'

ทำการทดลองพับที่ 111 องศา, 111 องศา 30 ลิปดา และ 112 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 90 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาคารดัดกลับที่ 90 องศา ได้ประมาณ 111 องศา 50 ลิปดา

5.2.5.2 ผลการทดสอบการชดเชยการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm.

ตารางที่ 5.96 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
15°00'	9°09'	9°11'	9°10'	9°08'	9°13'	9°12'	9°07'	9°12'	9°08'	9°10'	9°10'
15°30'	9°51'	9°49'	9°54'	9°53'	9°50'	9°52'	9°51'	9°53'	9°55'	9°52'	9°52'
16°00'	10°16'	10°15'	10°13'	10°12'	10°14'	10°16'	10°18'	10°15'	10°14'	10°17'	10°15'

จากการทดลองการพับวัสดุเพื่อชดเชยของเสาการตีคกลับของวัสดุที่ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศาได้ทำการทดลองพับที่ 15 องศา, 15 องศา 30 ลิปดา และ 16 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 10 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกลับที่ 10 องศา ได้ประมาณ 15 องศา 39 ลิปดา

ตารางที่ 5.97 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกลับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
27°00'	18°52'	18°53'	18°56'	18°58'	18°57'	18°54'	18°56'	18°52'	18°54'	18°58'	18°55'
27°30'	19°49'	19°52'	19°50'	19°53'	19°49'	19°48'	19°50'	19°52'	19°53'	19°54'	19°51'
28°00'	20°34'	20°33'	20°31'	20°35'	20°34'	20°36'	20°37'	20°35'	20°32'	20°33'	20°34'

ทำการทดลองพับที่ 27 องศา, 27 องศา 30 ลิปดา และ 28 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 20 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกลับที่ 20 องศา ได้ประมาณ 27 องศา 35 ลิปดา

ตารางที่ 5.98 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 30

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
38°00'	28°53'	28°54'	28°56'	28°58'	28°57'	28°56'	28°55'	28°52'	28°54'	28°55'	28°55'
38°30'	29°28'	29°31'	29°29'	29°33'	29°29'	29°32'	29°30'	29°27'	29°31'	29°30'	29°30'
39°00'	30°13'	30°12'	30°15'	30°18'	30°17'	30°14'	30°15'	30°17'	30°13'	30°16'	30°15'

ทำการทดลองพับที่ 38 องศา, 38 องศา 30 ลิปดา และ 39 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 30 องศาเมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 30 องศา ได้ประมาณ 38 องศา 47 ลิปดา

ตารางที่ 5.99 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 40

องศา

องศา การ พับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
51°00'	38°41'	38°43'	38°42'	38°40'	38°39'	38°44'	38°45'	38°42'	38°41'	38°43'	38°42'
51°30'	41°17'	41°19'	41°16'	41°17'	41°18'	41°21'	41°19'	41°16'	41°20'	41°17'	41°18'
52°00'	43°15'	43°17'	43°12'	43°14'	43°14'	43°13'	43°16'	43°18'	43°15'	43°16'	43°15'

ทำการทดลองพับที่ 51 องศา, 51 องศา 30 ลิปดา และ 52 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 40 องศาเมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 40 องศา ได้ประมาณ 51 องศา 20 ลิปดา

ตารางที่ 5.100 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
60°00'	46°23'	46°25'	46°26'	46°24'	46°28'	46°27'	46°22'	46°24'	46°26'	46°25'	46°25'
60°30'	48°36'	48°37'	48°35'	48°38'	48°35'	48°33'	48°39'	48°37'	48°34'	48°36'	48°36'
61°00'	50°46'	50°47'	50°43'	50°45'	50°44'	50°42'	50°44'	50°46'	50°45'	50°48'	50°45'

ทำการทดลองพับที่ 60 องศา, 60 องศา 30 ลิปดา และ 61 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 50 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกัลป์ที่ 50 องศา ได้ประมาณ 60 องศา 57 ลิปดา

ตารางที่ 5.101 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
72°00'	56°35'	56°34'	56°38'	56°37'	56°34'	56°39'	56°36'	56°33'	56°35'	56°39'	56°36'
72°30'	59°11'	59°09'	59°13'	59°12'	59°14'	59°10'	59°11'	59°13'	59°15'	59°12'	59°12'
73°00'	63°46'	63°49'	63°47'	63°45'	63°51'	63°50'	63°46'	63°47'	63°48'	63°51'	63°48'

ทำการทดลองพับที่ 72 องศา, 72 องศา 30 ลิปดา และ 73 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 60 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกัลป์ที่ 60 องศา ได้ประมาณ 72 องศา 35 ลิปดา

ตารางที่ 5.102 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
83°00'	68°49'	68°45'	68°50'	68°47'	68°51'	68°46'	68°47'	68°51'	68°46'	68°48'	68°48'
83°30'	70°52'	70°50'	70°48'	70°47'	70°51'	70°53'	70°47'	70°52'	70°49'	70°51'	70°50'
84°00'	71°44'	71°47'	71°46'	71°43'	71°48'	71°45'	71°46'	71°43'	71°46'	71°42'	71°45'

ทำการทดลองพับที่ 83 องศา, 83 องศา 30 ลิปดา และ 84 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 70 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกัลป์ที่ 70 องศา ได้ประมาณ 83 องศา 22 ลิปดา

ตารางที่ 5.103 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกัลป์ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
90°00'	78°39'	78°36'	78°34'	78°35'	78°37'	78°33'	78°35'	78°38'	78°37'	78°36'	78°36'
90°30'	80°10'	80°09'	80°11'	80°12'	80°13'	80°10'	80°09'	80°11'	80°12'	80°13'	80°11'
91°00'	82°12'	82°14'	82°15'	82°16'	82°14'	82°15'	82°13'	82°18'	82°17'	82°16'	82°15'

ทำการทดลองพับที่ 90 องศา, 90 องศา 30 ลิปดา และ 91 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 80 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกัลป์ที่ 80 องศา ได้ประมาณ 90 องศา 26 ลิปดา

5.2.5.3 ผลการทดสอบการชดเชยการตีกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.

ตารางที่ 5.104 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11°00'	9°13'	9°14'	9°10'	9°15'	9°16'	9°10'	9°12'	9°11'	9°14'	9°15'	9°13'
11°30'	9°46'	9°45'	9°50'	9°48'	9°44'	9°47'	9°48'	9°45'	9°50'	9°47'	9°47'
12°00'	11°32'	11°31'	11°33'	11°36'	11°35'	11°31'	11°30'	11°34'	11°33'	11°35'	11°33'

จากการทดลองการพับวัสดุเพื่อชดเชยของเสาการตีกลับของวัสดุที่ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 10 องศาได้ทำการทดลองพับที่ 11 องศา, 11 องศา 30 ลิปดา และ 12 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 10 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีกลับที่ 10 องศา ได้ประมาณ 11 องศา 38 ลิปดา

ตารางที่ 5.105 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 20 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
21°00'	18°23'	18°22'	18°20'	18°21'	18°24'	18°20'	18°22'	18°24'	18°23'	18°21'	18°21'
21°30'	20°09'	20°11'	20°14'	20°12'	20°13'	20°11'	20°08'	20°10'	20°12'	20°10'	20°11'
22°00'	20°87'	20°89'	20°90'	20°91'	20°88'	20°85'	20°87'	20°86'	20°91'	20°86'	20°88'

ทำการทดลองพับที่ 21 องศา, 21 องศา 30 ลิปดา และ 22 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 20 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีกลับที่ 20 องศา ได้ประมาณ 21 องศา 28 ลิปดา

ตารางที่ 5.106 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 30 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
31°00'	28°54'	28°58'	28°55'	28°52'	28°56'	28°56'	28°57'	28°53'	28°54'	28°55'	28°55'
31°30'	29°38'	29°36'	29°35'	29°33'	29°32'	29°34'	29°35'	29°37'	29°33'	29°37'	29°35'
32°00'	31°22'	31°21'	31°26'	31°27'	31°24'	31°21'	31°25'	31°24'	31°27'	31°23'	31°24'

ทำการทดลองพับที่ 31 องศา, 31 องศา 30 ลิปดา และ 32 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 30 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของศาการตีดกลับที่ 30 องศา ได้ประมาณ 31 องศา 37 ลิปดา

ตารางที่ 5.107 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 40 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
42°00'	38°43'	38°44'	38°42'	38°45'	38°39'	38°40'	38°44'	38°40'	38°41'	38°42'	38°42'
42°30'	39°35'	39°37'	39°40'	39°37'	39°39'	39°41'	39°36'	39°39'	39°40'	39°36'	39°38'
43°00'	41°10'	41°08'	41°12'	41°11'	41°06'	41°07'	41°09'	41°06'	41°10'	41°11'	41°09'

ทำการทดลองพับที่ 42 องศา, 42 องศา 30 ลิปดา และ 43 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 40 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของศาการตีดกลับที่ 40 องศา ได้ประมาณ 42 องศา 37 ลิปดา

ตารางที่ 5.108 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาคารติดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 50 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
52°00'	47°12'	47°13'	47°11'	47°10'	47°07'	47°09'	47°07'	47°11'	47°12'	47°08'	47°10'
52°30'	48°46'	48°47'	48°44'	48°42'	48°45'	48°48'	48°46'	48°44'	48°43'	48°45'	48°45'
53°00'	50°38'	50°35'	50°40'	50°41'	50°36'	50°37'	50°39'	50°40'	50°38'	50°36'	50°38'

ทำการทดลองพับที่ 52 องศา, 52 องศา 30 ลิปดา และ 53 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 50 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาคารติดกลับที่ 50 องศา ได้ประมาณ 52 องศา 55 ลิปดา

ตารางที่ 5.109 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสาคารติดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 60 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
62°00'	59°33'	59°37'	59°32'	59°38'	59°35'	59°36'	59°36'	59°34'	59°37'	59°32'	59°35'
62°30'	61°21'	61°20'	61°19'	61°20'	61°17'	61°22'	61°23'	61°18'	61°19'	61°21'	61°20'
63°00'	62°44'	62°42'	62°44'	62°46'	62°41'	62°43'	62°45'	62°47'	62°42'	62°46'	62°44'

ทำการทดลองพับที่ 62 องศา, 62 องศา 30 ลิปดา และ 63 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 60 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสาคารติดกลับที่ 60 องศา ได้ประมาณ 62 องศา 8 ลิปดา

ตารางที่ 5.110 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 70 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
73°00'	68°32'	68°33'	68°34'	68°36'	68°34'	68°37'	68°36'	68°35'	68°31'	68°32'	68°34'
73°30'	71°47'	71°51'	71°52'	71°48'	71°53'	71°50'	71°49'	71°50'	71°49'	71°51'	71°50'
74°00'	73°13'	73°17'	73°16'	73°16'	73°19'	73°17'	73°15'	73°14'	73°18'	73°15'	73°16'

ทำการทดลองพับที่ 73 องศา, 73 องศา 30 ลิปดา และ 74 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 70 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของศาการตีคกลับที่ 70 องศา ได้ประมาณ 73 องศา 14 ลิปดา

ตารางที่ 5.111 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 80 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
83°00'	78°43'	78°45'	78°46'	78°49'	78°48'	78°44'	78°47'	78°46'	78°47'	78°45'	78°46'
83°30'	79°05'	79°06'	79°03'	79°07'	79°09'	79°05'	79°06'	79°08'	79°04'	79°07'	79°06'
84°00'	80°30'	80°31'	80°33'	80°34'	80°36'	80°30'	80°32'	80°33'	80°35'	80°36'	80°33'

ทำการทดลองพับที่ 83 องศา, 83 องศา 30 ลิปดา และ 84 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 80 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของศาการตีคกลับที่ 80 องศา ได้ประมาณ 83 องศา 50 ลิปดา

ตารางที่ 5.112 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีค้ำของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่ 90 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
92°00'	89°50'	89°52'	89°48'	89°49'	89°51'	89°53'	89°51'	89°49'	89°47'	89°50'	89°50'
92°30'	90°30'	90°31'	90°32'	90°36'	90°33'	90°34'	90°32'	90°33'	90°30'	90°36'	90°33'
93°00'	91°20'	91°22'	91°26'	91°25'	91°23'	91°20'	91°21'	91°24'	91°26'	91°23'	91°23'

ทำการทดลองพับที่ 92 องศา, 92 องศา 30 ลิปดา และ 93 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 90 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีค้ำที่ 90 องศา ได้ประมาณ 92 องศา 11 ลิปดา

5.2.5.4 ผลการทดสอบการชดเชยการตีค้ำของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.

ตารางที่ 5.113 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีค้ำของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11°00'	9°43'	9°41'	9°39'	9°40'	9°40'	9°38'	9°42'	9°37'	9°39'	9°42'	9°40'
11°30'	11°05'	11°06'	11°11'	11°10'	11°09'	11°08'	11°10'	11°07'	11°06'	11°08'	11°08'
12°00'	11°33'	11°35'	11°34'	11°35'	11°38'	11°36'	11°32'	11°34'	11°37'	11°36'	11°35'

จากการทดลองการพับวัสดุเพื่อชดเชยของเสาการตีค้ำของวัสดุที่ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 10 องศาได้ทำการทดลองพับที่ 11 องศา, 11 องศา 30 ลิปดา และ 12 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 10 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีค้ำที่ 10 องศา ได้ประมาณ 11 องศา 7 ลิปดา

ตารางที่ 5.114 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 20 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
21°00'	19°47'	19°48'	19°52'	19°51'	19°50'	19°46'	19°49'	19°47'	19°49'	19°51'	19°49'
21°30'	21°09'	21°12'	21°11'	21°07'	21°12'	21°08'	21°10'	21°13'	21°11'	21°07'	21°10'
22°00'	21°30'	21°31'	21°27'	21°29'	21°33'	21°29'	21°32'	21°28'	21°30'	21°31'	21°30'

ทำการทดลองพับที่ 21 องศา, 21 องศา 30 ลิปดา และ 22 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 10 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกลับที่ 10 องศา ได้ประมาณ 21 องศา 8 ลิปดา

ตารางที่ 5.115 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 30 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
31°00'	28°13'	28°15'	28°18'	28°16'	28°19'	28°14'	28°17'	28°19'	28°13'	28°16'	28°16'
31°30'	30°30'	30°32'	30°33'	30°34'	30°29'	30°31'	30°35'	30°32'	30°31'	30°33'	30°32'
32°00'	31°14'	31°18'	31°19'	31°15'	31°13'	31°17'	31°19'	31°16'	31°13'	31°16'	31°16'

ทำการทดลองพับที่ 31 องศา, 31 องศา 30 ลิปดา และ 32 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 20 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคกลับที่ 20 องศา ได้ประมาณ 31 องศา 24 ลิปดา

ตารางที่ 5.116 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 40 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
41°00'	38°34'	38°37'	38°35'	38°39'	38°35'	38°36'	38°36'	38°37'	38°38'	38°33'	38°36'
41°30'	40°29'	40°28'	40°24'	40°27'	40°28'	40°30'	40°26'	40°25'	40°30'	40°24'	40°27'
42°00'	41°17'	41°14'	41°16'	41°15'	41°15'	41°14'	41°12'	41°13'	41°18'	41°16'	41°15'

ทำการทดลองพับที่ 41 องศา, 41 องศา 30 ลิปดา และ 42 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 30 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 30 องศา ได้ประมาณ 41 องศา 24 ลิปดา

ตารางที่ 5.117 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคัลป์ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 50 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
51°00'	49°14'	49°15'	49°14'	49°13'	49°16'	49°17'	49°16'	49°15'	49°12'	49°18'	49°15'
51°30'	49°58'	49°56'	49°53'	49°54'	49°52'	49°55'	49°57'	49°55'	49°53'	49°57'	49°55'
52°00'	41°45'	41°47'	41°46'	41°44'	41°47'	41°50'	41°49'	41°47'	41°48'	41°49'	41°47'

ทำการทดลองพับที่ 51 องศา, 51 องศา 30 ลิปดา และ 52 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 40 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคัลป์ที่ 40 องศา ได้ประมาณ 51 องศา 31 ลิปดา

ตารางที่ 5.118 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสภาวะการตีกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 60 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
61°00'	58°55'	58°57'	58°60'	58°58'	58°56'	58°57'	58°59'	58°58'	58°54'	58°56'	58°57'
61°30'	59°26'	59°27'	59°24'	59°28'	59°29'	59°26'	59°25'	59°30'	59°27'	59°28'	59°27'
62°00'	61°40'	61°44'	61°43'	61°41'	61°38'	61°42'	61°40'	61°39'	61°41'	61°42'	61°41'

ทำการทดลองพับที่ 61 องศา, 61 องศา 30 ลิปดา และ 62 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 50 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสภาวะการตีกลับที่ 50 องศา ได้ประมาณ 61 องศา 38 ลิปดา

ตารางที่ 5.119 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของสภาวะการตีกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 70 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
71°00'	69°11'	69°12'	69°15'	69°17'	69°13'	69°16'	69°12'	69°14'	69°17'	69°13'	69°14'
71°30'	70°06'	70°10'	70°09'	70°05'	70°07'	70°11'	70°08'	70°06'	70°10'	70°08'	70°08'
72°00'	70°50'	70°49'	70°54'	70°55'	70°52'	70°54'	70°53'	70°51'	70°53'	70°49'	70°52'

ทำการทดลองพับที่ 71 องศา, 71 องศา 30 ลิปดา และ 72 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 70 องศามาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของสภาวะการตีกลับที่ 70 องศา ได้ประมาณ 71 องศา 26 ลิปดา

ตารางที่ 5.120 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 80 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
81°00'	79°38'	79°39'	79°37'	79°37'	79°38'	79°40'	79°39'	79°37'	79°39'	79°36'	79°38'
81°30'	80°02'	80°01'	79°58'	79°59'	79°59'	80°00'	80°01'	80°02'	79°59'	79°59'	80°00'
82°00'	80°33'	80°35'	80°37'	80°36'	80°36'	80°34'	80°34'	80°33'	80°36'	80°36'	81°35'

ทำการทดลองพับที่ 81 องศา, 81 องศา 30 ลิปดา และ 82 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 80 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคดกลับที่ 80 องศา ได้ประมาณ 81 องศา 30 ลิปดา

ตารางที่ 5.121 แสดงผลการทดสอบการชดเชยของเสาการตีคดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่ 90 องศา

องศาการพับ	องศาที่ได้จากการทดลอง										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
90°00'	89°41'	89°42'	89°45'	89°44'	89°39'	89°40'	89°43'	89°42'	89°44'	89°40'	89°42'
90°30'	90°05'	90°08'	90°06'	90°10'	90°08'	90°07'	90°11'	90°06'	90°09'	90°10'	90°08'
91°00'	90°58'	90°57'	90°59'	90°55'	90°53'	90°57'	90°54'	90°58'	90°56'	90°53'	90°56'

ทำการทดลองพับที่ 90 องศา, 90 องศา 30 ลิปดา และ 91 องศา ทำให้ทราบค่าองศาที่ใกล้เคียงกับ 90 องศา มาก เมื่อทำการทดลองแล้วหาค่าเฉลี่ยและทำการ Interpolate หาค่าการพับชดเชยของเสาการตีคดกลับที่ 90 องศา ได้ประมาณ 90 องศา 29 ลิปดา

ตารางที่ 5.122 แสดงค่าการชดเชยของศาการคิดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 และ 2 mm.

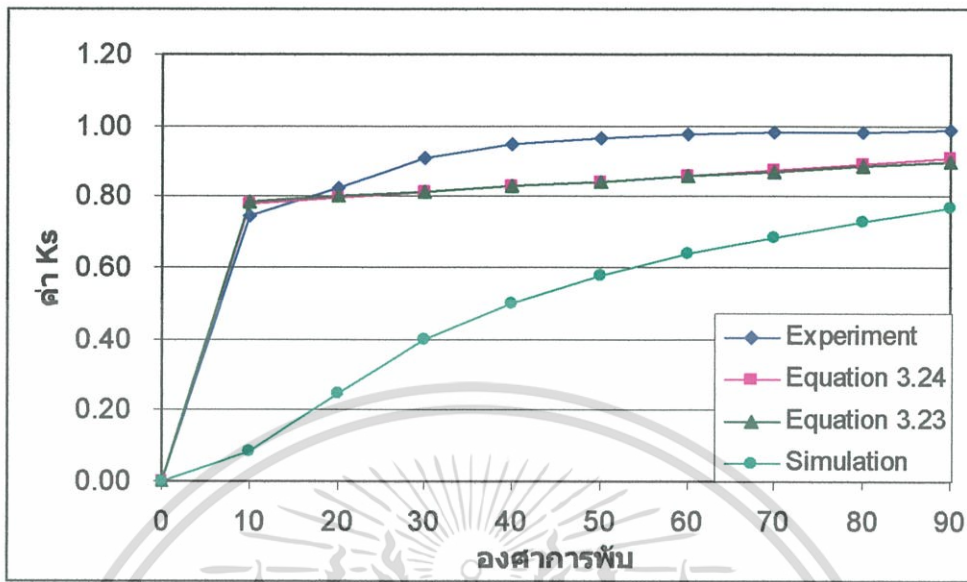
องศา พับ	SPCC ที่ 1 mm องศาการชดเชย				SPCC ที่ 2 mm องศาการชดเชย			
	ปฏิบัติ	ทฤษฎี 1	ทฤษฎี 2	Simulation	ปฏิบัติ	ทฤษฎี 1	ทฤษฎี 2	Simulation
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	11.64	12.18	12.14	27.17	11.12	11.1	11.15	21.8
20	21.46	24.06	24.00	40.00	21.14	22.04	22.15	32.87
30	31.62	35.63	35.58	51.23	31.4	32.82	33.02	43.24
40	42.62	46.88	46.87	61.80	41.4	43.45	43.73	52.58
50	52.91	57.83	57.88	72.00	51.52	53.92	54.31	62.28
60	62.14	68.46	68.60	81.65	61.64	64.24	64.74	72.94
70	73.23	78.88	79.04	90.73	71.43	74.4	75.03	80.85
80	83.83	88.78	89.19		81.5	84.4	85.17	90.54
90	92.18	98.47	99.05		90.49	94.24	95.18	

ตารางที่ 5.123 แสดงค่าการชดเชยของศาการคิดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 และ 2 mm.

องศา พับ	S50C ที่ 1 mm การชดเชย				S50C ที่ 2 mm องศาการชดเชย			
	ปฏิบัติ	ทฤษฎี 1	ทฤษฎี 2	Simulation	ปฏิบัติ	ทฤษฎี 1	ทฤษฎี 2	Simulation
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	17.45	18.07	17.63	57.75	15.65	14.47	14.43	41.67
20	34.83	35.28	34.47	67.93	27.58	28.34	28.33	47.71
30	45.95	51.53	50.45	77.20	38.79	41.59	41.71	62.99
40	60.69	66.75	65.5	81.75	51.33	54.22	54.54	71.65
50	74.85	80.84	79.57		60.95	66.22	66.83	79.43
60	86.47	93.75	92.61		72.59	77.57	78.57	86.68
70	97.96	105.4	104.57		83.37	88.27	89.74	
80	106.87	115.76	115.42		90.43	98.32	100.36	
90	111.84	124.78	125.12					

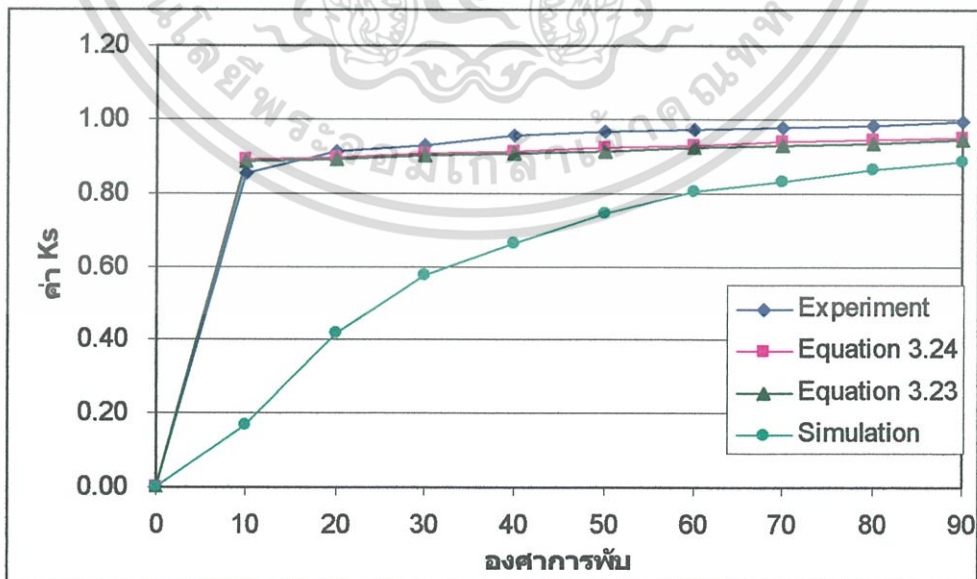
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 กราฟผลการทดสอบการตีคดกลับระหว่างการทดลองกับทฤษฎี



รูปที่ 5.39 แสดงค่าการตีคดกลับ (K_s) ที่องศาการพับต่างๆ ของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.

จากรูปที่ 5.39 แสดงค่าการตีคดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. จากรูปแสดงให้เห็นว่า จากผลทางการทดลองผลทางทฤษฎีและผลของการทำแบบจำลอง มีแนวโน้มไปทางเดียวกันมาก และมีค่าใกล้เคียงกันมากในจุดที่ 10 และ 20 องศาของวิธีการทางทฤษฎีและผลการทดลอง และมากขึ้นในช่วง 30 องศาขึ้นไป จะเห็นว่าทางด้านการทดสอบจะมีค่ามากกว่าด้านทฤษฎีและที่ 40

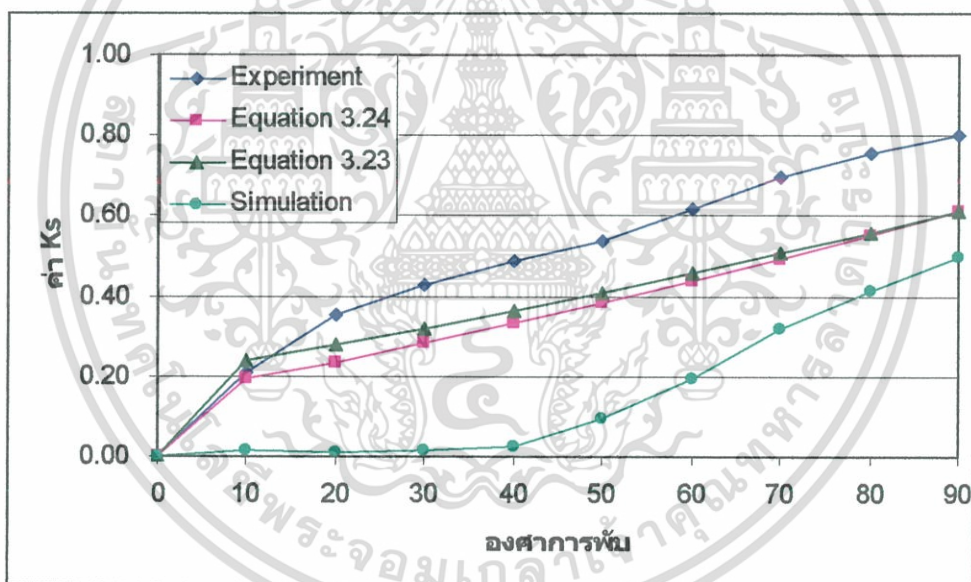


รูปที่ 5.40 แสดงค่าการตีคดกลับ (K_s) ที่องศาการพับต่างๆ ของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศา จนถึง 70 องศาทางด้านการทดลองจะมีค่ามากกว่าทางทฤษฎี โดยที่เส้นทั้งสองจะขนานกัน และจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนถึงที่ 90 องศา ส่วนทางด้านการทำแบบจำลอง จะมีค่า Error มากกว่าทางด้านทฤษฎีและจะเข้าใกล้เมื่อทำการพับที่มืองสามารถขึ้น

จากรูปที่ 5.40 แสดงให้เห็นถึง ค่าการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง ผลทางทฤษฎี และผลของการทำแบบจำลอง ที่เกิดจากการติดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. จากรูปจะเห็นว่า ผลทางทฤษฎีและผลของการทำแบบจำลอง ไปในทิศทางเดียวกัน โดยการผลของการทดลองและผลของทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยที่ 10 และ 20 องศา และทางทดลองจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนขนานไปกับทฤษฎี ส่วนในด้านผลการทำแบบจำลอง จะมีความแตกต่างมากในช่วง 10-70 องศาและจะใกล้เคียงเมื่อทำการพับที่มืองสามารถขึ้น จากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. จะเห็นว่า วัสดุเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน ค่าการเกิดการติดกลับต่างกัน ทั้งนี้เกิดมาจากการยึดตัวของวัสดุที่มีความหนามากมีการยึดตัว (Elastic) ได้มากกว่า ทั้งนี้ความหนามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านการติดกลับ

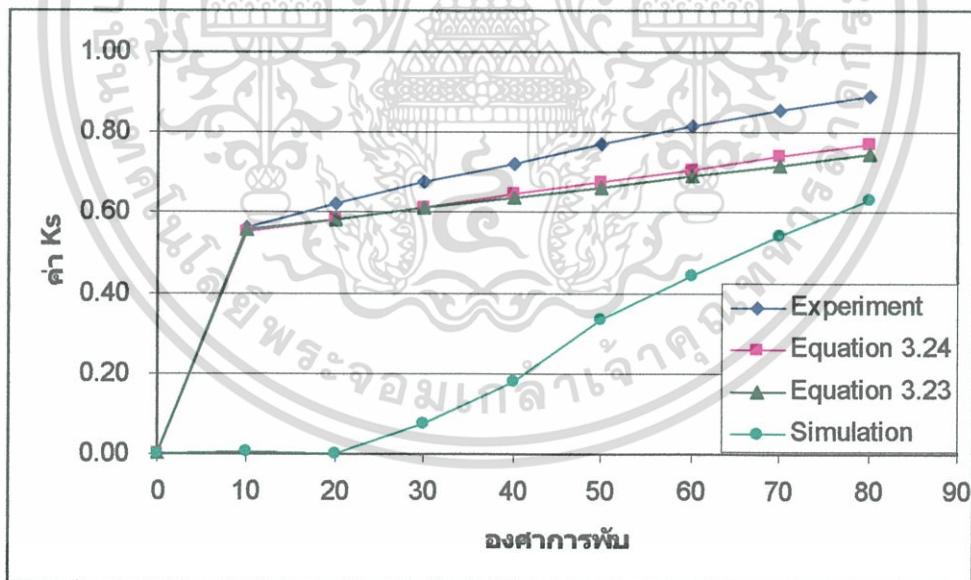


รูปที่ 5.41 แสดงค่าการติดกลับ (K_s) ที่องศาการพับต่างๆ ของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.

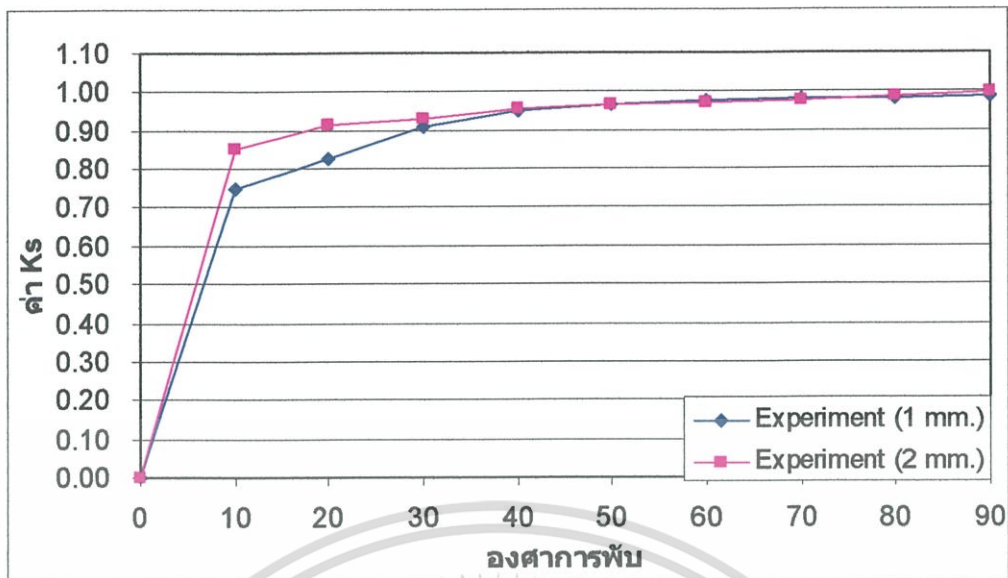
จากรูปที่ 5.41 เป็นการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการติดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. จากรูปจะเห็นว่า ทิศทางการเกิดการติดกลับของวัสดุในด้านการทดลอง, ทางด้านทฤษฎี และการทำแบบจำลองไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าการเกิดการติดกลับต่างกัน จากการพับที่ 10 องศา จะเห็นว่าใกล้เคียงกัน และทางด้านการทดลองค่าการเกิดการติดกลับจะมีค่า K_s มากกว่าทางด้านทฤษฎีตามลำดับ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า K_s จะมากขึ้นทุก ๆ องศาการพับ ทางด้านการทำแบบจำลอง ในช่วงของการพับ 10-40 องศา ค่าการเกิด Springback จะมีมากหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่าเกิดการยืดตัวน้อยมาก และจะเพิ่มขึ้นเมื่อองศามากขึ้น อย่างไรก็ตามค่า Error ก็ยังมีมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกันกับวัสดุที่มีความหนาเท่ากันแต่ต่างชนิดกัน จะเห็นว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่าค่า K_s จะน้อยกว่า (ค่าการเกิด K_s ต่ำ ค่าการเกิดการดีดกลับจะสูง เมื่อนำค่าที่ได้มาใส่ในสมการที่ 3.11)

จากรูปที่ 5.42 จะแสดงให้เห็นถึงองศาการดีดกลับของวัสดุ S50C ที่ความหนา 2 mm. จากรูป จะทำให้ทราบว่าทิศทางการเกิดการดีดกลับทางด้านการทดลอง, ทางด้านทฤษฎีและ การทำแบบจำลองเป็นไปในทางเดียวกัน ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดจะอยู่ที่ 10 องศา และจะเพิ่มขึ้นจากการพับทุก ๆ องศา โดยทางด้านการทดลองจะมากกว่าทางทฤษฎี ทางด้านการทำแบบจำลอง ในช่วงการพับที่ 10-20 องศาจะเห็นว่ามีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อทำการพับมากขึ้นกราฟทางด้านการทำแบบจำลอง ก็จะเข้าใกล้ทางด้านทฤษฎีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยัง Error สูงมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันแต่ความหนาของวัสดุแตกต่างกัน จะเห็นว่าค่า K_s ของวัสดุที่มีความหนามากกว่าค่า K_s มากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุต่างชนิดแต่ความหนาที่เท่ากัน วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่าจะมีค่า K_s น้อยกว่า ทั้งความหนาและความแข็งแรงของวัสดุมีผลต่อการเกิดการดีดกลับที่แตกต่างกัน วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าและมีความหนาน้อยกว่าจะเกิดการดีดกลับมากที่สุด เมื่อนำไปใช้ในทางทฤษฎีเพื่อหาค่าการดีดกลับเป็นองศา

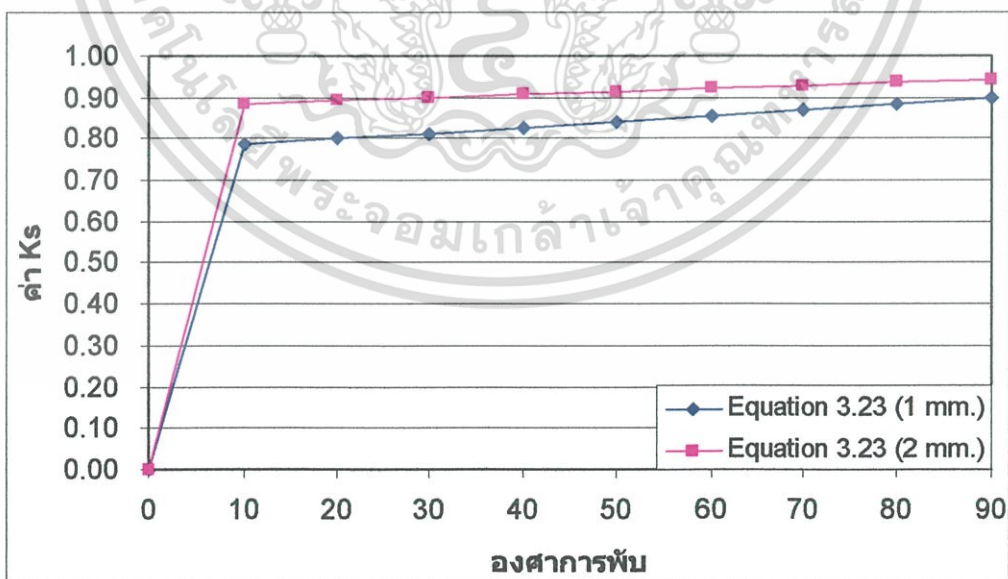


รูปที่ 5.42 แสดงค่าการดีดกลับ (K_s) ที่องศาการพับต่าง ๆ ของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm.



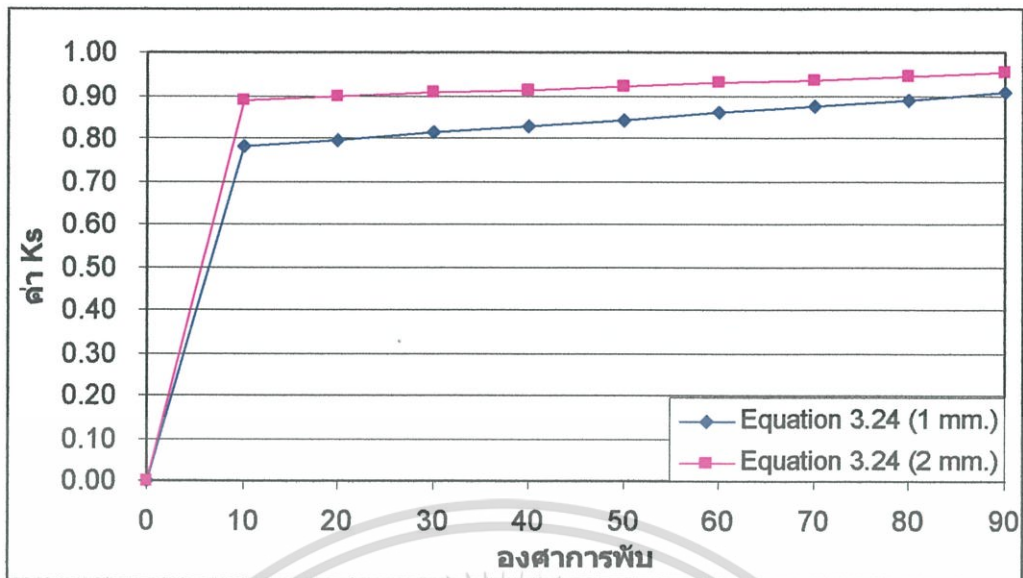
รูปที่ 5.43 แสดงองศาการดีดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทดลอง

จากรูปที่ 5.43 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบองศาการดีดกลับของวัสดุชนิดเดียวกันแต่ต่างกันที่ความหนา จะเห็นว่า ในทางปฏิบัติวัสดุที่ความหนาน้อยกว่าจะมีองศาการดีดกลับที่มากกว่าในช่วงองศาการพับเริ่มแรก เมื่อทำการพับของสามมากขึ้นจนถึงที่ 40 องศา จะเห็นว่าองศาการดีดกลับใกล้เคียงกันมากจนทับกันที่สุดในที่สุด



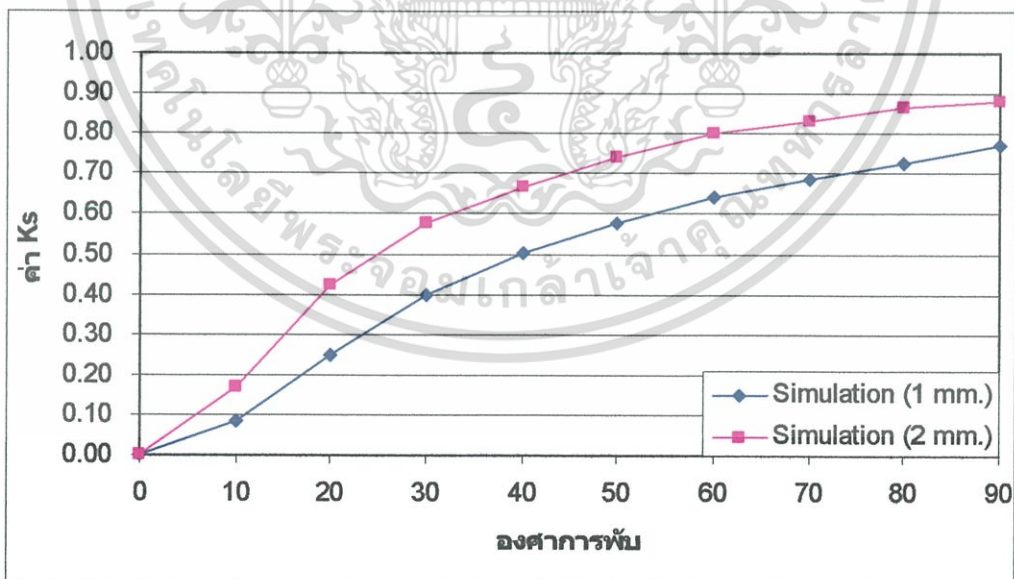
รูปที่ 5.44 แสดงองศาการดีดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 แสดงองศาการตีคดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่างๆ ในรูปแบบทฤษฎีที่ 3.24

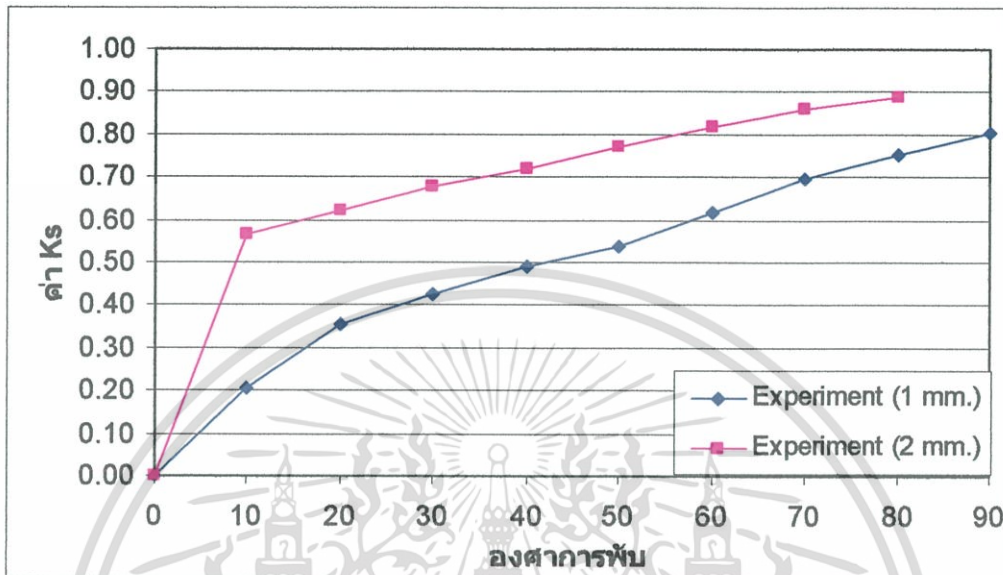
จากรูปที่ 5.44 และ 5.45 เป็นการเปรียบเทียบทางด้านทฤษฎีขององศาการตีคดกลับที่วัสดุชนิดบางมีมากกว่าวัสดุชนิดหนา และจะเข้าใกล้กันเมื่อทำการพับที่องศามากขึ้น วัสดุที่มีความบางเมื่อทำการพับที่องศามากขึ้นจะทำให้องศาการตีคดกลับน้อยลง



รูปที่ 5.46 แสดงองศาการตีคดกลับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่างๆ ในรูปแบบการทำไฟไนต์อิลิเมนต์

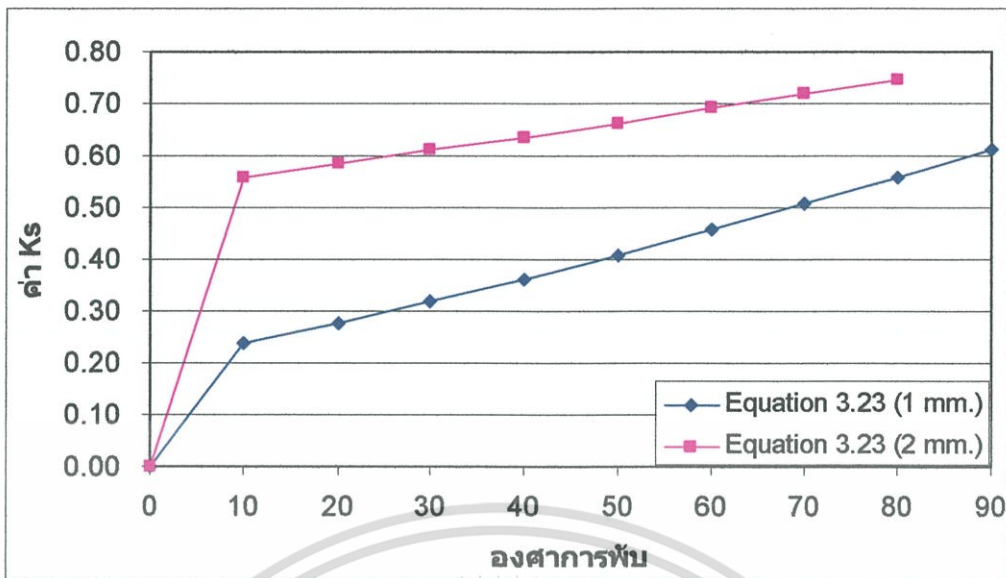
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.46 เป็นการเปรียบเทียบทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยค่าที่ได้จากองค์การคิดกลับมีค่าสูงกว่าทางด้านการทดลองและทางทฤษฎี โดยที่วัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าเกิดการคิดกลับมากกว่าทุกช่วงขององศาการพับ

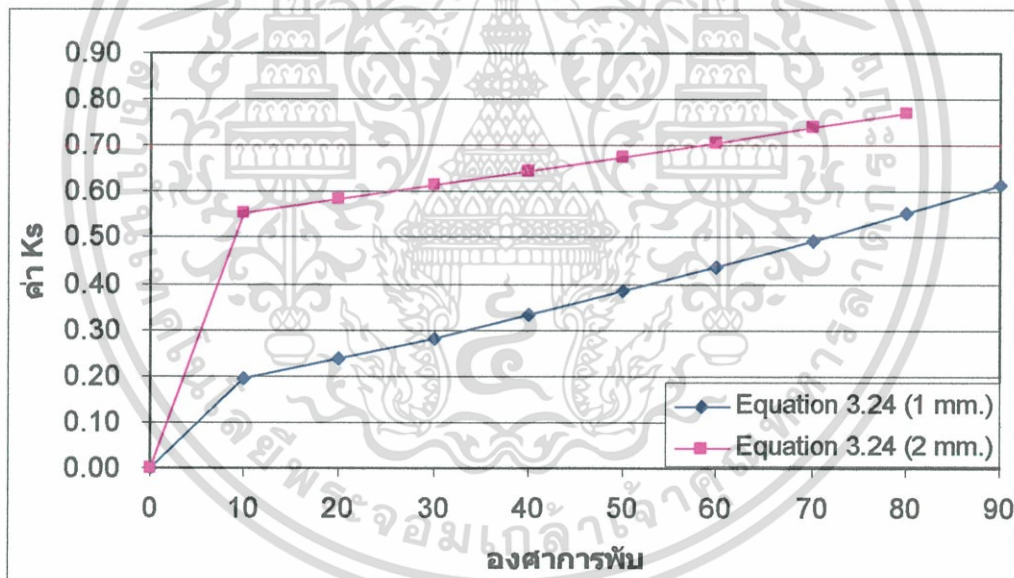


รูปที่ 5.47 แสดงองศาการคิดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทดลอง

จากรูปที่ 5.47 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบองศาการการคิดกลับของวัสดุชนิด S50C แต่แตกต่างกันทางด้านความหนา เส้นกราฟในทางปฏิบัติที่ความหนา 1 mm. มีการคิดตัวกลับที่มากกว่าที่ความหนาขนาด 2 mm. ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่ามุมมององศาการพับและความหนาของวัสดุมีผลต่อการคิดกลับ แต่เมื่อทำการพับวัสดุที่องศามากขึ้น องศาการคิดกลับจะเข้าใกล้กันมากขึ้น

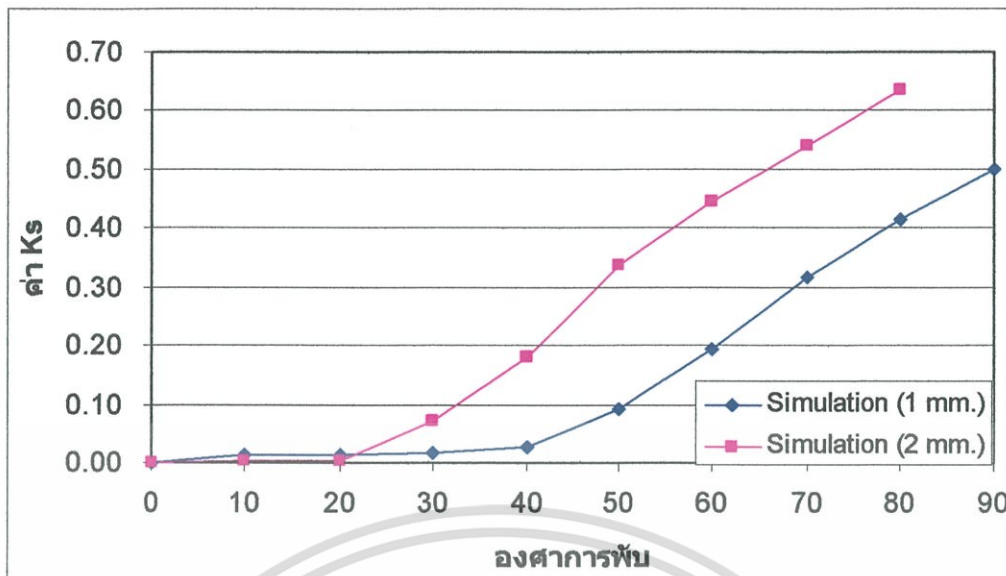


รูปที่ 5.48 แสดงองศาการตีคดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่างๆ ในที่ได้จากทฤษฎีที่ 3.23



รูปที่ 5.49 แสดงองศาการตีคดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่างๆ ในรูปแบบสมการที่ 3.24

จากรูปที่ 5.48 และ 5.49 ทางด้านทฤษฎีสอดคล้องกับทางปฏิบัติ คือ วัสดุที่มีความหนา น้อยกว่ามีการตีคดกลับที่มากกว่า และเมื่อทำการพับที่องศาการพับที่มากขึ้น องศาการตีคดกลับก็จะ ลดลงและเข้าใกล้กัน วัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าเกิดการตีคดกลับได้มากกว่า



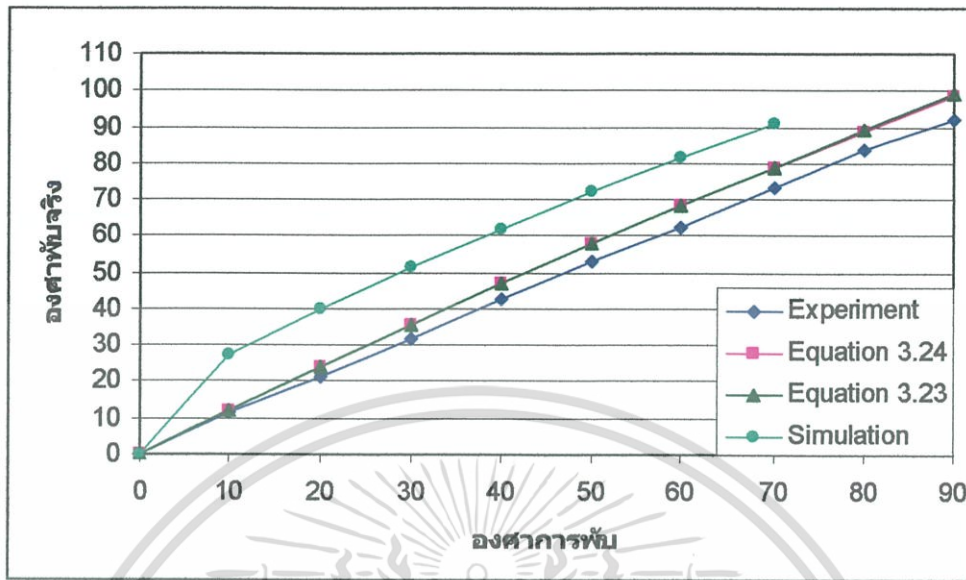
รูปที่ 5.50 แสดงองศาการดัดกลับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. และ 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ ในรูปแบบการทำไฟไนต์อีลิเมนต์

จากรูปที่ 5.50 เป็นการเปรียบเทียบทางด้านการทำแบบจำลอง โดยที่วัสดุที่มีความหนา น้อยกว่าองศาการดัดกลับมากกว่า ในขณะที่วัสดุที่มีความหนา องศาการดัดกลับจะลดลงเมื่อทำการพับไปที่ 30 องศา แต่วัสดุชนิดบางจะลดลงที่ 40 องศา

การดัดกลับของวัสดุ เกิดจากวัสดุเกิดการยืดตัวออกเมื่อถูกพับหรือถูกแรงกระทำ แต่วัสดุ ไม่มีการเสียรูปแบบพลาสติกตลอดทั่วทั้งความหนา โดยสามารถอธิบายได้คือจากรูปที่ 3.17 วัสดุที่เกิดการพับงอที่ผิวด้านนอกจะเกิดการยืดตัวแบบพลาสติก ส่วนด้านในของวัสดุจะเกิดการยืดตัวแบบยืดหยุ่น ซึ่งมีผลทำให้วัสดุเกิดการดัดกลับได้ ทั้งนี้การเกิดการดัดกลับขึ้นอยู่กับองศาการพับ ถ้าองศาการพับมากวัสดุจะดัดกลับน้อย กล่าวคือ ถ้าวัสดุมีค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดความเครียดพลาสติกมาก วัสดุจะเกิดการดัดกลับน้อยตามค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่มากขึ้น

จากผลการทดลอง เห็นว่าผลที่ได้จากการการทำแบบจำลองมีค่า Error สูงกว่าทางด้าน ทฤษฎีและทางด้านการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจาก ทางด้านการทำแบบจำลองเป็นการวิเคราะห์แบบ Elastic, Linearly strain hardening ซึ่งทางด้านทฤษฎีและทางด้านการทดลอง เป็นการวิเคราะห์ แบบ Elastic, perfectly plastic ซึ่งค่าของ Stress – Strain Curves ต่างกันจึงทำให้ค่าที่ได้ต่างกัน

5.2.7 ผลการทดสอบการชดเชยของศาการตีดกลับ

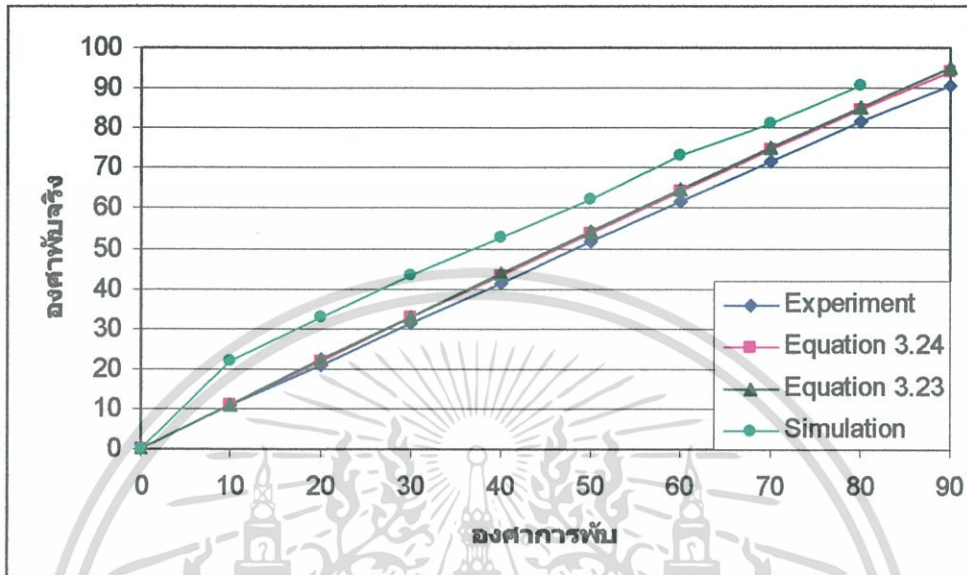


รูปที่ 5.51 แสดงองศาชดเชยการพับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. ที่องศาต่าง ๆ

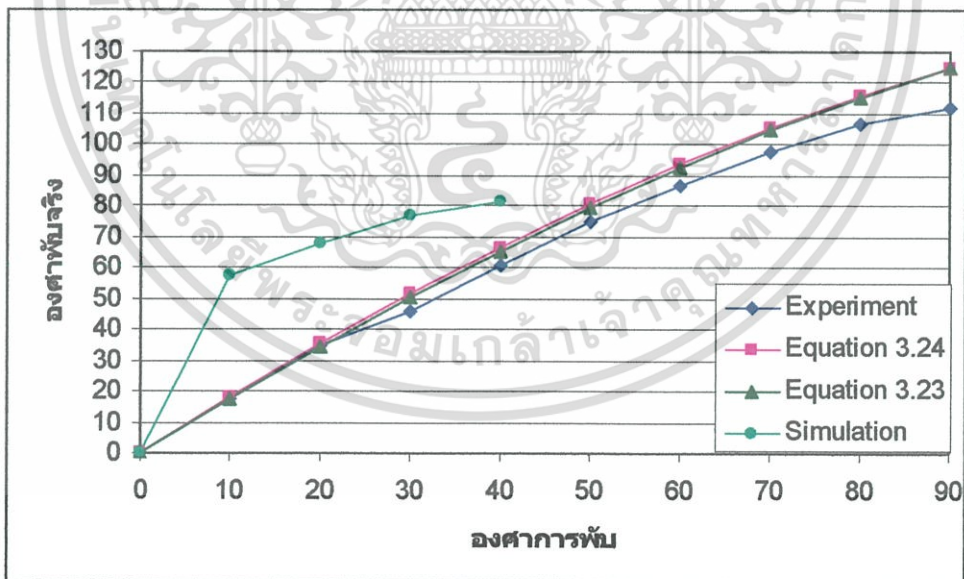
จากรูปที่ 5.51 แสดงการชดเชยการพับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. จากรูป จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟระหว่างผลการทดลอง, ผลของทฤษฎี และผลการทำแบบจำลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการทดลอง, ผลของทฤษฎีมีความใกล้เคียงกันมากในช่วง 10 ถึง 30 องศา เมื่อทำการพับที่องศาเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าค่าการชดเชยของศาการพับของผลการทดลองจะน้อยกว่า ซึ่งตรงข้ามกันในทางทฤษฎีที่เป็นไปในทางเส้นตรง ส่วนทางด้านการทำแบบจำลองการชดเชยของศาการพับจะมีการชดเชยที่มากกว่าทางด้านทฤษฎีและผลการทดลอง แต่ไม่สามารถที่จะชดเชยมากกว่า 90 องศาเพราะจะเสียรูป ถ้าสังเกตกราฟที่แสดงผลการตีดกลับก็จะเห็นว่าค่า K_s จะตรงกันข้ามกับองศาการชดเชยการพับของวัสดุ

จากรูปที่ 5.52 เป็นการแสดงค่าการชดเชยการพับของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm. จากรูปจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของผลการทดลอง และในทางทฤษฎีมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันมากที่สุด จากรูปจะสังเกตเห็นว่าในช่วง 10 ถึง 50 องศา มีค่าใกล้เคียงกัน พอทำการทดลองพับต่อ จะเห็นว่าเส้นกราฟจะค่อย ๆ ออกห่างจากกันระหว่างการทดลองกับทางทฤษฎี ทางด้านการทำแบบจำลองมีการชดเชยที่สูงกว่าทางด้านทดลองและทฤษฎี แต่เมื่อทำการพับองศาที่มากขึ้นแล้ว จะเห็นว่าเส้นกราฟจะตกลงมาเข้าใกล้ผลการทดลอง แต่ทั้งนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบของศาการชดเชยของวัสดุชนิดเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน จะเห็นว่า วัสดุที่มีความหนามากกว่าแนวทางในทางปฏิบัติ, ทางทฤษฎีและการทำแบบจำลองมีความใกล้เคียงกันมากกว่าความหนาขนาด 1 mm. อีกทั้งองศาการชดเชยในแต่ละองศา วัสดุที่มีความเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนามากกว่าจะมีการหดเซยน้อยกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นกราฟขององศาการหดเซยกลับ เส้นกราฟขององศาการดีดกลับ จะเห็นว่าค่า K_s มีค่าสูง แต่องศาการหดเซยจะน้อยกว่าวัสดุที่มีค่า K_s ต่ำ



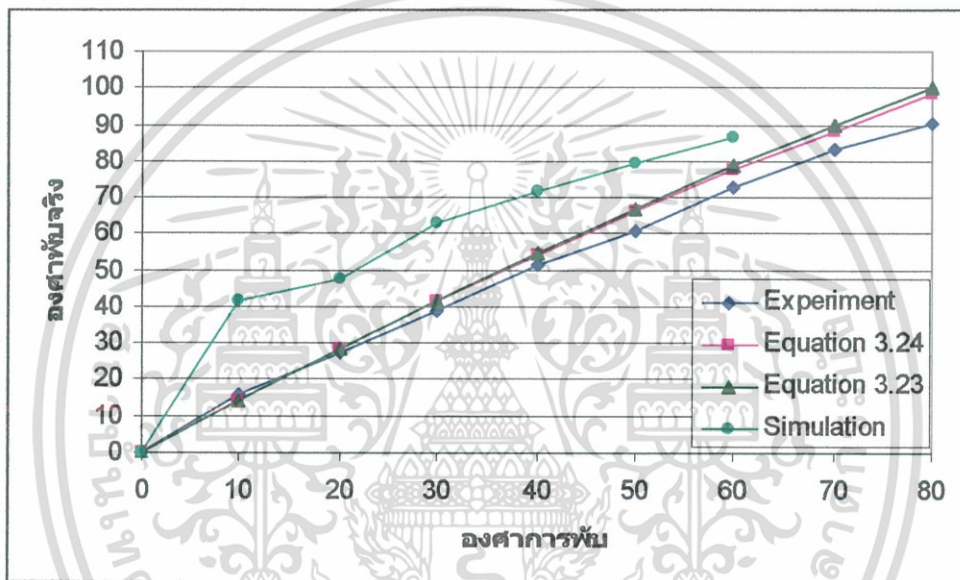
รูปที่ 5.52 แสดงองศาการหดเซยการพับของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm. ที่องศาต่างๆ



รูปที่ 5.53 แสดงองศาการหดเซยการพับของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. ที่องศาต่างๆ

จากรูปที่ 5.53 แสดงการหดเซยขององศาการพับของวัสดุ S50C ที่มีความหนา 1 mm. จากรูปกราฟแสดงให้เห็นว่า เส้นของกราฟมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกันและยังมีความใกล้เคียงกันในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ 10 องศาถึง 20 องศา จากนั้นเส้นจะออกห่างจากกันระหว่างกราฟทดลองกับทฤษฎี เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟหดรชของศาการดีดกลับกับองศาการดีดกลับ จะเห็นกราฟขององศาการดีดกลับมีค่าทางด้านกราฟทดลองสูงกว่าทางทฤษฎี แต่ช่วงการหดรชการทดลองกราฟต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้มาจากค่า Stress ของวัสดุในช่วงความยาวทั้งหมดในแต่ละจุดมีค่าไม่คงที่ จึงทำให้ค่าการหดรชของวัสดุในช่วงการทดลองน้อยกว่าทางทฤษฎี ทางด้านการทำแบบจำลองการหดรชจะสูงมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน เส้นกราฟจะลดลงเข้าใกล้กราฟทดลองมากขึ้นเมื่อทำการพับที่องศาเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อทำการพับมากขึ้นองศาการหดรชจะลดลง เมื่อทำการหดรชมากกว่า 90 องศาจะทำให้ Model เสียรูป



รูปที่ 5.54 แสดงองศาการพับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. ที่องศาต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.54 แสดงให้เห็นถึงการหดรชของศาการพับของวัสดุ S50C ขนาด 2 mm. จากกราฟ จะเห็นว่าทิศทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกันมากในช่วง 10 – 20 องศา และจะค่อย ๆ ออกห่างจากกันในช่วงที่ 30 องศา จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระยะความห่างของในแต่ละจุดจะออกห่างจนถึง 80 องศา ทางด้านการทำแบบจำลอง จะเห็นว่าองศาการหดรชที่ 10 องศา มีการหดรชที่สูงมากและลดลงมาจนเข้าใกล้ที่ 60 องศา เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุ 2 ชนิดที่มีความหนาเท่ากัน จะเห็นว่าวัสดุที่มีค่า Stress ต่ำ ค่าทางการทดลองและทางด้านทฤษฎี มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน จะเห็นว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าจะต้องหดรชของศาการพับมากกว่า เมื่อทำการหดรชของศาเกิน 95 องศาจะทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาคณิตกรรมทางกลของวัสดุเหล็กแผ่น 2 ชนิดคือ SPCC และ S50C ทำให้ทราบว่าค่าของ Stress ของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีค่าไม่เท่ากัน
2. วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะมีค่า Stress สูงกว่า ทั้งนี้มาจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุไม่เท่ากัน
3. จากตารางการทดสอบหาสารประกอบของวัสดุทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าวัสดุชนิด S50C มีค่าคาร์บอนมากกว่าวัสดุชนิด SPCC ซึ่งคาร์บอนมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ
4. เมื่อทำการพับวัสดุ SPCC ที่ 1 mm. จะเห็นว่าองศาการบิดกลับ ทั้งทางด้านปฏิบัติกับทางทฤษฎีไปในทางเดียวกันแต่ค่า K_s ในทางปฏิบัติมีค่ามากกว่าทางทฤษฎี
5. เมื่อทำการพับวัสดุ SPCC ที่ 2 mm. ของวัสดุ SPCC ค่าของ K_s ของการปฏิบัติกับทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด
6. ในการทดสอบวัสดุ S50C ที่ 1 mm. จากผลการทดสอบเห็นว่าค่า K_s ที่ได้ มีค่าที่ห่างออกจากกัน ทั้งทางด้านปฏิบัติและทางทฤษฎี
7. ในการทดสอบวัสดุ S50C ที่ 2 mm. จะเห็นว่าความใกล้เคียงของกราฟทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าที่วัสดุชนิดเดียวกัน
8. ผลการทดสอบทางด้านการทำแบบจำลอง มีค่า Error สูง เนื่องจากทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเสียรูปแบบพลาสติกต่างจากทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ และการแบ่ง element ยังมีความละเอียดน้อยเกินไป
9. จากการทำแบบจำลอง จะเห็นว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบมีค่าความเครียดพลาสติกสูงและกระจายเข้าสู่ผิวด้านใน
10. การชดเชยทางด้านการทำแบบจำลอง สูงกว่าทางด้านทฤษฎีและทางปฏิบัติ
11. เมื่อทำการชดเชยทางด้านการทำแบบจำลองเกิน 90 องศา ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหาย
12. ความหนาของวัสดุมีผลต่อการบิดกลับของวัสดุ เมื่อวัสดุที่มีความหนามากกว่าจะมีการพับ มีผลทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวมากเมื่อไกลจากเส้นแกนกลางของวัสดุ
13. องศาการพับมีผลต่อการบิดกลับของวัสดุ องศาการพับที่มากขึ้นจะทำให้องศาการบิดกลับจะน้อยลง เพราะจะก่อให้เกิดความเครียดพลาสติกสูง
14. การพับทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวอยู่แบบ Plastic และ Elastic ซึ่งผลของความเครียด Elastic สามารถทำให้เกิดการคืนตัวได้บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. วัสดุที่มีความหนามากกว่าจะเกิดการตีกลับมากกว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดใกล้เคียงกัน

16. จากการชดเชยการตีกลับของวัสดุทั้งสองชนิดและทั้งสองความหนา ทำให้ทราบว่าการชดเชยในทางปฏิบัติน้อยกว่าทางทฤษฎีและทางการทำแบบจำลอง

17. จากสมการชดเชยของผลการตีกลับผลที่ได้จากสมการยังมีค่าความผิดพลาด เพราะสมการที่ใช้เป็นสมการสำหรับการปรับแบบกดขึ้นรูป แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการปรับแบบการดัดขึ้นรูป

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ปัญหาที่เกิดจากการทำงานวิจัย

1. การผิดพลาดจากการทดสอบแรงดึง ซึ่งผลของการทดสอบแตกกลุ่ม การแก้ไขโดยการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยใช้เครื่อง Wire cut ซึ่งจะได้ชิ้นงานทดสอบที่ตรงตามมาตรฐาน ASTM
2. การทดสอบการพับที่ทำการพับได้ ไม่ตรงองศาที่ตั้งและการควบคุมความเร็วกับแรงที่ทำการทดสอบไม่ได้ทำให้ค่าที่ออกมาไม่อยู่ในกลุ่ม การแก้ไขโดยการติดตั้งระบบ Pneumatic ซึ่งทำให้ควบคุมความเร็วและแรงที่ใช้ในการทดสอบได้ดี

6.2.2 ทิศทางการทำงานวิจัยขั้นต่อไป

1. การทดสอบการพับวัสดุที่อุณหภูมิสูง และทำการวิเคราะห์หาองศาที่ได้จากการพับ
2. นำเสนอวิธีการคำนวณหาไฟไนต์อีลิเมนต์ใหม่ โดยลองใช้ Shell element ในโมเดล
3. ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน เปรียบเทียบกับวัสดุที่มีค่าคาร์บอนผสม

บรรณานุกรม

- จุลศิริ ศรีงามผ่อง, วิศวกรรมงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น. ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ปี
พ.ศ. 2526. หน้า 4.1-5.18.
- ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริม. "การขึ้นรูปโลหะ." กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยุคเข็ญ. พ.ศ. 2537. หน้า
166-174.
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์, ชาญ ฤกษ์งาน. "Machine Design 1." Science, Engineering & Education.
2537. หน้า 0-96., 363.
- อนินท์ มีมนต์, ขวลิต แสงสวัสดิ์, ประกอบ บุญยงค์. Engineering Materials. ภาควิชา
วิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
Ampere A. Tseng. Laboratory:Springback of Sheet Metal Forming. Arizona State
University : Tempe. Arizona 85287 USA.
- Chanatip Chaidilokpattanakul, Masahito Tanaka, Cheng-Tiao Hsieh, Deng Yong.
Experiment Report Springback.
- Ferdinand P.Beer., E.Russell Johnston., JR. "Mechanics of Materials Second Edition in SI
Units." Second Edition in SI Units. Face39-113,1992.
- H.-M. Huang, S.-D. Liu., S.Jiang. "Stress and Strain Histories of Multiple Bending –
Unbending Springback Proess." Transactions of the ASME. 384/Vol.123. October 2001.
- Joseph Edward Shigley. "Mechanical Engineering Design." First Metric Edition.
Face133-159. 1986.
- Kalpakjian, S. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 4 th Ed : Assison
Wesley. 1997.
- Nan Song., Dong Qian, Jian Cao., Wing Kam Liu. "Effective Models for Prediction of
Springback in Flanging." Transactions of the ASME. 456/Vol.123. October 2001.
- R. H. Sturges. "Design of a Vernier Punch and Die Set for Single-Minute Bending Set-
Ups." Transactions of the ASME. 396/Vol.117. September 1195.

ภาคผนวก ก

พื้นฐานในการทดสอบแรงดึง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Designation: E 8M - 91
METRIC

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]¹

This standard is issued under the fixed designation E 8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace method 211.1 of Federal Test Method Standard No. 151b. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point, tensile strength, elongation, and reduction of area.

NOTE 1—These test methods are the metric companion of Test Methods E 8.

NOTE 2—These metric test methods are essentially the same as those in Test Methods E 8, and are compatible in technical content except that gage lengths are required to be 5D for most round specimens rather than 4D as specified in Test Methods E 8. Test specimens made from powder metallurgy (P/M) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

NOTE 3—Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A 370 and Methods B 577M.

NOTE 4—Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C unless otherwise specified.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

A 356/A 356M Specification for Heavy-Walled, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel Castings for Steam Turbines²

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products³

B 557M Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]⁴

E 4 Practices for Load Verification of Testing Machines⁵

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁵

E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications⁵

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁵

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods⁷

E 345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁷

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The definitions of terms relating to tension testing appearing in Terminology E 6 shall be considered as applying to the terms used in these methods of tension testing.

4. Significance and Use

4.1 Tension tests provide information on the strength and ductility of materials under uniaxial tensile stresses. This information may be useful in comparisons of materials, alloy development, quality control, and design under certain circumstances.

4.2 The results of tension tests of specimens machined to standardized dimensions from selected portions of a part or material may not totally represent the strength and ductility properties of the entire end product or its in-service behavior in different environments.

4.3 These test methods are considered satisfactory for acceptance testing of commercial shipments. The test methods have been used extensively in the trade for this purpose.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machines*—Machines used for tension testing shall conform to the requirements of Practices E 4. The loads used in determining tensile strength, yield strength, or yield point shall be within the verified loading range of the testing machine as defined in Practices E 4.

5.2 Gripping Devices:

5.2.1 *General*—Various types of gripping devices may be used to transmit the measured load applied by the testing machine to the test specimens. To ensure axial tensile stress within the gage length, the axis of the test specimen should

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved July 15, 1991. Published September 1991. Originally published as E 8M - 84. Last previous edition E 8M - 90a.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vols 01.01-01.05 and 03.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vols 02.02 and 03.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vols 03.01 and 14.02.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

coincide with the center line of the heads of the testing machine. Any departure from this requirement may introduce bending stresses that are not included in the usual stress computation (load divided by cross-sectional area).

NOTE 5—The effect of this eccentric loading may be illustrated by calculating the bending moment and stress thus added. For a standard 12.5-mm diameter specimen, the stress increase is 1.5 % for each 0.025 mm of eccentricity. This error increases to about 2.5 %/0.025 mm for a 9-mm diameter specimen and to about 3.2 %/0.025 mm for a 6-mm diameter specimen.

NOTE 6—Alignment methods are given in Practice E 1012.

5.2.2 *Wedge Grips*—Testing machines usually are equipped with wedge grips. These wedge grips generally furnish a satisfactory means of gripping long specimens of ductile metal and flat plate test specimens such as those shown in Fig. 1. If, however, for any reason, one grip of a pair advances farther than the other as the grips tighten, an undesirable bending stress may be introduced. When liners are used behind the wedges, they must be of the same thickness and their faces must be flat and parallel. For best results, the wedges should be supported over their entire lengths by the heads of the testing machine. This requires that liners of several thicknesses be available to cover the range of specimen thickness. For proper gripping, it is desirable that the entire length of the serrated face of each wedge be in contact with the specimen. Proper alignment of wedge grips and liners is illustrated in Fig. 2. For short specimens and for specimens of many materials, it is generally necessary to use machined test specimens and to use a special means of gripping to ensure that the specimens, when under load, shall be as nearly as possible in uniformly distributed pure axial tension (see 5.2.3, 5.2.4, and 5.2.5).

5.2.3 *Grips for Threaded and Shouldered Specimens and Brittle Materials*—A schematic diagram of a gripping device for threaded-end specimens is shown in Fig. 3, while Fig. 4 shows a device for gripping specimens with shouldered ends. Both of these gripping devices should be attached to the heads of the testing machine through properly lubricated spherical-seated bearings. The distance between spherical bearings should be as great as feasible.

5.2.4 *Grips for Sheet Materials*—The self-adjusting grips shown in Fig. 5 have proved satisfactory for testing sheet materials that cannot be tested satisfactorily in the usual type of wedge grips.

5.2.5 *Grips for Wire*—Grips of either the wedge or snubbing types as shown in Figs. 5 and 6 or flat wedge grips may be used.

5.3 *Dimension-Measuring Devices*—Micrometers and other devices used for measuring linear dimensions shall be accurate and precise to at least one half the smallest unit to which the individual dimension is required to be measured.

6. Test Specimens

6.1 General:

6.1.1 Test specimens shall be either substantially full-size or machined, as prescribed in the product specifications for the material being tested.

6.1.2 Improperly prepared test specimens often are the reason for unsatisfactory and incorrect test results. It is important, therefore, that care be exercised in the preparation of specimens, particularly in the machining, to assure

the desired precision and bias in test results.

6.1.3 It is desirable to have the cross-sectional area of the specimen smallest at the center of the reduced section to ensure fracture within the gage length. For this reason, a small taper is permitted in the reduced section of each of the specimens described in the following sections.

6.1.4 For brittle materials it is desirable to have fillets of large radius at the ends of the gage length.

6.2 *Plate-Type Specimens*—The standard plate-type specimen is shown in Fig. 1. This specimen is used for testing metallic materials in the form of plate, shapes, and flat material having a nominal thickness of 5 mm or over. When product specifications so permit, other types of specimens may be used, as provided in 6.3, 6.4, and 6.5.

6.3 Sheet-Type Specimens:

6.3.1 The standard sheet-type test specimen is shown in Fig. 1. This specimen is used for testing metallic materials in the form of sheet, plate, flat wire, strip, band, hoop, rectangles, and shapes ranging in nominal thickness from 0.13 to 16 mm. When product specifications so permit, other types of specimens may be used as provided in 6.2, 6.4, and 6.5.

NOTE 7—Test Methods E 345 may be used for tension testing of materials in thicknesses up to 0.150 mm.

6.3.2 Pin ends as shown in Fig. 7 may be used. In order to avoid buckling in tests of thin- and high-strength materials, it may be necessary to use stiffening plates at the grip ends.

6.4 Round Specimens:

6.4.1 The standard 12.5-mm diameter round test specimen shown in Fig. 8 is used quite generally for testing metallic materials, both cast and wrought.

6.4.2 Figure 8 also shows small-size specimens proportional to the standard specimen. These may be used when it is necessary to test material from which the standard specimen or specimens shown in Fig. 1 cannot be prepared. Other sizes of small, round specimens may be used. In any such small-size specimen, it is important that the gage length for measurement of elongation be five times the diameter of the specimen.

6.4.3 The shape of the ends of the specimen outside of the gage length shall be suitable to the material and of a shape to fit the holders or grips of the testing machine so that the loads may be applied axially. Figure 9 shows specimens with various types of ends that have given satisfactory results.

6.5 *Specimens for Sheet, Plate, Flat Wire, and Strip*—In testing sheet, plate, flat wire, and strip one of the following types of specimens shall be used:

6.5.1 For material ranging in nominal thickness from 0.13 to 16 mm, use the sheet-type specimen described in 6.3.

NOTE 8—Attention is called to the fact that either of the flat specimens described in 6.2 and 6.3 may be used for material from 5 to 16 mm in thickness, and one of the round specimens described in 6.4 may also be used for material 12.5 mm or more in thickness.

6.5.2 For material having a nominal thickness of 5 mm or over (Note 8), use the plate-type specimen described in 6.2.

6.5.3 For material having a nominal thickness of 12.5 mm or over (Note 8), use the largest practical size of specimen described in 6.4.

6.6 Specimens for Wire, Rod, and Bar:

6.6.1 For round wire, rod, and bar, test specimens having

the full cross-sectional area of the wire, rod, or bar shall be used wherever practicable. The gage length for the measurement of elongation of wire less than 4 mm in diameter shall be as prescribed in product specifications. In testing wire, rod, or bar that has a 4 mm or larger diameter, unless otherwise specified, a gage length equal to five times the diameter shall be used. The total length of the specimens shall be at least equal to the gage length plus the length of material required for the full use of the grips employed.

6.6.2 For wire of octagonal, hexagonal, or square cross section, for rod or bar of round cross section where the specimen required in 6.6.1 is not practicable, and for rod or bar of octagonal, hexagonal, or square cross section, one of the following types of specimens shall be used:

6.6.2.1 *Full Cross Section* (Note 9)—It is permissible to reduce the test section slightly with abrasive cloth or paper, or machine it sufficiently to ensure fracture within the gage marks. For material not exceeding 5 mm in diameter or distance between flats, the cross-sectional area may be reduced to not less than 90 % of the original area without changing the shape of the cross section. For material over 5 mm in diameter or distance between flats, the diameter or distance between flats may be reduced by not more than 0.25 mm without changing the shape of the cross section. Square, hexagonal, or octagonal wire or rod not exceeding 5 mm between flats may be turned to a round having a cross-sectional area not smaller than 90 % of the area of the maximum inscribed circle. Fillets, preferably with a radius of 10 mm, but not less than 3 mm, shall be used at the ends of the reduced sections. Square, hexagonal, or octagonal rod over 5 mm between flats may be turned to a round having a diameter no smaller than 0.25 mm less than the original distance between flats.

NOTE 9—The ends of copper or copper alloy specimens may be flattened 10 to 50 % from the original dimension in a jig similar to that shown in Fig. 10, to facilitate fracture within the gage marks. In flattening the opposite ends of the test specimen, care shall be taken to ensure that the four flattened surfaces are parallel and that the two parallel surfaces on the same side of the axis of the test specimen lie in the same plane.

6.6.2.2 For rod and bar, the largest practical size of round specimen as described in 6.4 may be used in place of a test specimen of full cross section. Unless otherwise specified in the product specification, specimens shall be parallel to the direction of rolling or extrusion.

6.7 *Specimens for Rectangular Bar*—In testing rectangular bar one of the following types of specimens shall be used:

6.7.1 *Full Cross Section*—It is permissible to reduce the width of the specimen throughout the test section with abrasive cloth or paper, or by machining sufficiently to facilitate fracture within the gage marks, but in no case shall the reduced width be less than 90 % of the original. The edges of the midlength of the reduced section not less than 20 mm in length shall be parallel to each other and to the longitudinal axis of the specimen within 0.05 mm. Fillets, preferably with a radius of 10 mm but not less than 3 mm, shall be used at the ends of the reduced sections.

6.7.2 Rectangular bars of thickness small enough to fit the grips of the testing machine but of too great width may be reduced in width by cutting to fit the grips, after which the

cut surfaces shall be machined or cut and smoothed to ensure failure within the desired section. The reduced width shall be not less than the original bar thickness. Also, one of the types of specimens described in 6.2, 6.3, and 6.4 may be used.

6.8 *Shapes, Structural and Other*—In testing shapes other than those covered by the preceding sections, one of the types of specimens described in 6.2, 6.3, and 6.4 shall be used.

6.9 *Specimens for Pipe and Tube* (Note 10):

6.9.1 For all small tube (Note 10), particularly sizes 25 mm and under in nominal outside diameter, and frequently for larger sizes, except as limited by the testing equipment, it is standard practice to use tension test specimens of full-size tubular sections. Snug-fitting metal plugs shall be inserted far enough into the ends of such tubular specimens to permit the testing machine jaws to grip the specimens properly. The plugs shall not extend into that part of the specimen on which the elongation is measured. Elongation is measured over a length of 5D unless otherwise stated in the product specification. Figure 11 shows a suitable form of plug, the location of the plugs in the specimen, and the location of the specimen in the grips of the testing machine.

NOTE 10—The term "tube" is used to indicate tubular products in general, and includes pipe, tube, and tubing.

6.9.2 For large-diameter tube that cannot be tested in full section, longitudinal tension test specimens shall be cut as indicated in Fig. 12. Specimens from welded tube shall be located approximately 90° from the weld. If the tube-wall thickness is under 20 mm, either a specimen of the form and dimensions shown in Fig. 13 or one of the small-size specimens proportional to the standard 12.5-mm specimen, as mentioned in 6.4.2 and shown in Fig. 8, shall be used. Specimens of the type shown in Fig. 13 may be tested with grips having a surface contour corresponding to the curvature of the tube. When grips with curved faces are not available, the ends of the specimens may be flattened without heating. If the tube-wall thickness is 20 mm or over, the standard specimen shown in Fig. 8 shall be used.

6.9.3 Transverse tension test specimens for tube may be taken from rings cut from the ends of the tube as shown in Fig. 14. Flattening of the specimen may be either after separating as in *A*, or before separating as in *B*. Transverse tension test specimens for large tube under 20 mm in wall thickness shall be either of the small-size specimens shown in Fig. 8 or of the form and dimensions shown for Specimen 2 in Fig. 13. When using the latter specimen, either or both surfaces of the specimen may be machined to secure a uniform thickness, provided not more than 15 % of the normal wall thickness is removed from each surface. For large tube 20 mm and over in wall thickness, the standard specimen shown in Fig. 8 shall be used for transverse tension tests. Specimens for transverse tension tests on large welded tube to determine the strength of welds shall be located perpendicular to the welded seams, with the welds at about the middle of their lengths.

6.10 *Specimens for Forgings*—For testing forgings, the largest round specimen described in 6.4 shall be used. If round specimens are not feasible, then the largest specimen described in 6.5 shall be used.

6.11 *Specimens for Castings*—In testing castings either



TABLE 1 Details of Test Coupon Design for Castings (See Fig. 16)

NOTE 1—*Test Coupons for Large and Heavy Steel Castings:* The test coupons in Fig. 16 are to be used for large and heavy steel castings. However, at the option of the foundry the cross-sectional area and length of the standard coupon may be increased as desired. This provision does not apply to Specification A 356/A 356M.
NOTE 2—*Bend Bar:* If a bend bar is required, an alternate design (as shown by dotted lines in Fig. 16) is indicated.

Log Design (125 mm)		Riser Design	
1. L (length)	A 125-mm minimum length will be used. This length may be increased at the option of the foundry to accommodate additional test bars (see Note 1).	1. L (length)	The length of the riser at the base will be the same as the top length of the leg. The length of the riser at the top therefore depends on the amount of taper added to the riser.
2. End taper	Use of and size of end taper is at the option of the foundry.	2. Width	The width of the riser at the base of a multiple-leg coupon shall be $n(57 \text{ mm}) - 16 \text{ mm}$ where n equals the number of legs attached to the coupon. The width of the riser at the top is therefore dependent on the amount of taper added to the riser.
3. Height	32 mm		
4. Width (at top)	32 mm (see Note 1).		
5. Radius (at bottom)	13 mm max		
6. Spacing between legs	A 13-mm radius will be used between the legs.		
7. Location of test bars	The tensile, bend, and impact bars will be taken from the lower portion of the leg (see Note 2).		
8. Number of legs	The number of legs attached to the coupon is at the option of the foundry providing they are equispaced according to Item 6.	3. T (riser taper) Height	Use of and size is at the option of the foundry. The minimum height of the riser shall be 51 mm. The maximum height is at the option of the foundry for the following reasons: (a) many risers are cast open, (b) different compositions may require variation in risering for soundness, or (c) different pouring temperatures may require variation in risering for soundness.
9. R_s	Radius from 0 to approximately 2 mm		

the standard specimen shown in Fig. 8 or the specimen shown in Fig. 15 shall be used unless otherwise provided in the product specifications.

6.11.1 Test coupons for castings shall be made as shown in Fig. 16 and Table 1.

6.12 *Specimen for Malleable Iron*—For testing malleable iron the test specimen shown in Fig. 17 shall be used, unless otherwise provided in the product specifications.

6.13 *Specimen for Die Castings*—For testing die castings the test specimen shown in Fig. 18 shall be used unless otherwise provided in the product specifications.

6.14 *Specimens for Powder Metallurgy (P/M) Materials*—For testing powder metallurgy (P/M) materials the test specimens shown in Figs. 19 and 20 shall be used, unless otherwise provided in the product specifications. When making test specimens in accordance with Fig. 19, shallow transverse grooves, or ridges, may be pressed in the ends to allow gripping by jaws machined to fit the grooves or ridges. Because of shape and other factors, the flat unmachined tensile test specimen (Fig. 19) in the heat-treated condition will have an ultimate tensile strength of 50 % to 85 % of that determined in a machined round tensile test specimen (Fig. 20) of like composition and processing.

6.15 *Gage Length of Test Specimens:*

6.15.1 The gage length for the determination of elongation shall be in accordance with the product specifications for the material being tested. Gage marks shall be stamped lightly with a punch, scribed lightly with dividers or drawn with ink as preferred. For material that is sensitive to the effect of slight notches and for small specimens, the use of layout ink will aid in locating the original gage marks after fracture.

6.15.2 Extensometers with gage lengths equal to or shorter than the nominal gage length (dimension shown as “G-Gage

Length” in the accompanying figures) of the specimen may be used to determine the yield phenomenon.

6.16 *Location of Test Specimens:*

6.16.1 Unless otherwise specified, the axis of the test specimen shall be located as follows:

6.16.1.1 At the center for products 40 mm or less in thickness, diameter, or distance between flats.

6.16.1.2 Midway from the center to the surface for products over 40 mm in thickness, diameter, or distance between flats.

6.16.2 For forgings, specimens shall be taken as provided in the applicable product specifications, either from the predominant or thickest part of the forging from which a coupon can be obtained, or from a prolongation of the forging, or from separately forged coupons representative of the forging. When not otherwise specified, the axis of the specimen shall be parallel to the direction of grain flow.

6.17 *Surface Finish of Specimens*—When materials are tested with surface conditions other than as manufactured, the surface finish of the test specimens shall be as provided in the applicable product specifications.

NOTE 11—Particular attention should be given to the uniformity and quality of surface finishes of specimens for high strength and very low ductility materials since this has been shown to be a factor in the variability of test results.

7. Procedures

7.1 *Measurement of Dimensions of Test Specimens:*

7.1.1 To determine the cross-sectional area of a test specimen, measure the dimensions of the cross section at the center of the reduced section. For referee testing of specimens under 5 mm in their least dimension, measure the dimensions where the least cross-sectional area is found. Measure and record the cross-sectional dimensions of tension test specimens 5 mm and over to the nearest 0.02 mm;

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the cross-sectional dimensions less than 5 mm and not less than 2.5 mm to the nearest 0.01 mm; the cross-sectional dimensions less than 2.5 mm and not less than 0.50 mm to the nearest 0.002 mm; and when practical, the cross-sectional dimensions less than 0.50 mm to at least the nearest 1 % but in all cases to at least the nearest 0.002 mm.

NOTE 12—Rough surfaces due to the manufacturing process such as hot rolling, metallic coating, etc., may lead to inaccuracy of the computed areas greater than the measured dimensions would indicate. Therefore, cross-sectional dimensions of tension test specimens with rough surfaces due to processing may be measured and recorded to the nearest 0.02 mm.

7.1.2 Determine cross-sectional areas of full-size test specimens of nonsymmetrical cross sections by weighing a length not less than 20 times the largest cross-sectional dimension and using the value of density of the material. Determine the weight to the nearest 0.5 % or less.

7.1.3 When using specimens of the type shown in Fig. 13 taken from tubes, the cross-sectional area shall be determined as follows:

If $D/W \leq 6$:

$$A = \left\{ \left(\frac{W}{4} \right) \times (D^2 - W^2)^{1/2} + \left[\frac{D^2}{4} \right] \times \arcsin(W/D) - \left[\left(\frac{W}{4} \right) \times ((D - 2T)^2 - W^2)^{1/2} - \left[\frac{(D - 2T)^2}{4} \right] \times \arcsin(W/(D - 2T)) \right] \right\}$$

where:

A = exact cross-sectional area, mm²,

W = width of the specimen in the reduced section, mm,

D = measured outside diameter of the tube, mm, and

T = measured wall thickness of the specimen, mm.

arcsin values to be in radians

If $D/W > 6$, the exact equation or the following equation may be used:

$$A = W \times T$$

where:

A = approximate cross-sectional area, mm²,

W = width of the specimen in the reduced section, mm, and

T = measured wall thickness of the specimen, mm.

7.2 Zeroing of the Testing Machine:

7.2.1 The testing machine shall be set up in such a manner that zero force indication signifies a state of zero force on the specimen. Any force (or preload) imparted by the gripping of the specimen (see Note 13) must be indicated by the force measuring system unless the preload is physically removed prior to testing. Artificial methods of removing the preload on the specimen, such as taring it out by a zero adjust pot or removing it mathematically by software, are prohibited because these would affect the accuracy of the test results.

NOTE 13—Preloads generated by gripping of specimens may be either tensile or compressive in nature and may be the result of such things as:

- = grip design
- = malfunction of gripping apparatus (sticking, binding, etc.)
- = excessive gripping force
- = sensitivity of the control loop

7.3 Speed of Testing:

7.3.1 Speed of testing may be defined (a) in terms of rate of straining the specimen, (b) in terms of rate of stressing the specimen, (c) in terms of the elapsed time for completing

part or all of the test, (d) in terms of rate of separation of the two heads of the testing machine during a test, or (e) in terms of free-running crosshead speed (rate of movement of the crosshead of the testing machine when not under load).

NOTE 14—For some materials, the free-running crosshead speed, which is the least accurate, may be adequate, while for other materials one of the others, listed in decreasing order of precision, may be necessary in order to obtain test values within acceptable limits.

7.3.1.1 Specifying suitable numerical limits for speed and selection of the method are the responsibilities of the product committees. Suitable limits for speed of testing should be specified for materials for which the differences resulting from the use of different testing speeds are of such magnitude that the test results are unsatisfactory for determining the acceptability of the material. In such instances, depending upon the material and the use for which the test results are intended, one or more of the methods described in the following paragraphs is recommended for specifying speed of testing.

NOTE 15—Speed of testing can affect test values because of the rate sensitivity of materials and the temperature-time effects.

7.3.2 *Rate of Straining*—The allowable limits for rate of straining shall be specified in metres per metre per second. Some testing machines are equipped with pacing or indicating devices for the measurement and control of rate of straining, but in the absence of such a device the average rate of straining can be determined with a timing device by observing the time required to effect a known increment of strain.

7.3.3 *Rate of Stressing*—The allowable limits for rate of stressing shall be specified in megapascals per second. Many testing machines are equipped with pacing or indicating devices for the measurement and control of the rate of stressing, but in the absence of such a device the average rate of stressing shall be determined with a timing device by observing the time required to apply a known increment of stress.

7.3.4 *Elapsed Time*—The allowable limits for the elapsed time from the beginning of loading (or from some specified stress) to the instant of fracture, to the maximum load, or to some other stated stress, shall be specified in seconds. The elapsed time can be determined with a timing device.

7.3.5 *Free-Running Crosshead Speed*—The allowable limits for the rate of movement of the crosshead of the testing machine, when not under load, shall be specified in metres per metre of length of reduced section (or distance between grips for specimens not having reduced sections) per second. The limits for the crosshead speed may be further qualified by specifying different limits for various types and sizes of specimens. The average crosshead speed shall be experimentally determined by using length-measuring and timing devices.

7.3.6 *Rate of Separation of Heads During Tests*—The allowable limits for rate of separation of the heads of the testing machine during a test shall be specified in millimetres per millimetre of length of reduced section (or distance between grips for specimens not having reduced sections) per second. The limits for the rate of separation may be further qualified by specifying different limits for various types and sizes of specimens. Many testing machines are equipped with pacing or indicating devices for the measurement and

control of the rate of separation of the heads of the machine during a test, but in the absence of such a device the average rate of separation of the heads shall be experimentally determined by using length-measuring and timing devices.

7.3.7 Unless otherwise specified, any convenient speed of testing may be used up to one half the specified yield strength or yield point, or up to one quarter the specified tensile strength, whichever is smaller. The speed above this point shall be within the limits specified. If different speed limitations are required for use in determining yield strength, yield point, tensile strength, elongation, and reduction of area, they should be stated in the product specifications. In the absence of any specified limitations on speed of testing the following general rules apply:

7.3.7.1 The speed of testing shall be such that the loads and strains used in obtaining the test results are accurately indicated.

7.3.7.2 During the conduct of the test to determine yield strength or yield point the rate of stress application shall not exceed 12 MPa/s.

7.3.7.3 After the yield strength or yield point has been determined, the speed may be increased to correspond to a maximum strain rate of 0.01 m/m/s. The extensometer and strain rate indicator may be used to set the strain rate prior to its removal. If the extensometer and strain rate indicator are not used to set this strain rate, the speed should be set not to exceed 0.01 m/m of the length of the reduced section (or distance between the grips for specimens not having reduced sections) per second.

7.4 *Determination of Yield Strength*—Determine yield strength by either of the methods described in 7.4.1 or 7.4.2.

7.4.1 *Offset Method*—To determine the yield strength by the "offset method," it is necessary to secure data (autographic or numerical) from which a stress-strain diagram may be drawn. Then on the stress-strain diagram (Fig. 21) lay off Om equal to the specified value of the "offset," draw mn parallel to OA , and thus locate r , the intersection of mn with the stress-strain diagram (Note 17). In reporting values of yield strength obtained by this method, the specified value of offset used should be stated in parentheses after the term yield strength.

Thus:

$$\text{Yield strength (offset} = 0.2\%) = 360 \text{ MPa}$$

In using this method a Class B2 extensometer (see Practice E 83) would be sufficiently sensitive for most materials.

NOTE 16—There are two general types of extensometers, averaging and non-averaging, the use of which is dependent on the product tested. For most machined or reduced section specimens, there are minimal differences. However, for some materials such as some forgings and tube sections, significant differences in measured yield strength can occur. For these cases it is recommended that the averaging type be used.

7.4.2 *Extension-Under-Load Method*—To determine the yield strength by the extension-under-load (EUL) method, it is necessary to secure data as follows: (1) by autographic or numerical devices so that a stress-strain (or load-elongation) diagram may be drawn from which the value of the stress occurring at the specified value of extension may be ascertained; or (2) by a device attached to or part of an extensometer that indicates when the specified extension occurs so that the stress then occurring may be ascertained—either or both the devices attached to the extensometer or the

load-indicating device may be automatic. This method is illustrated in Fig. 22. The extension can be satisfactorily determined by the use of a Class B2 extensometer (see Practice E 83). The stress that occurs at the specified extension shall be reported thus:

$$\text{Yield strength (EUL} = .XX) = ZZ \text{ MPa}$$

where XX is the specified value of extension.

NOTE 17—If the load drops before the specified offset or extension-under-load is reached, technically the material does not have a yield strength (for that offset or extension-under-load), but the stress at the maximum load before the specified offset or extension-under-load is reached may be reported instead of the yield strength.

NOTE 18—When there is disagreement over the results of this test, the offset method for determining yield strength is recommended as the referee method.

7.5 *Determination of Yield Point:*

7.5.1 For materials that exhibit discontinuous yielding, determine the yield point by either of the methods described in 7.5.1.1 or 7.5.1.2.

7.5.1.1 *Halt-of-the-Load Method*—Apply an increasing load to the specimen at a uniform deformation rate. When the yield point of the material is reached, the increase of the load stops. At that time, there is a halt or hesitation of the load-indicating mechanism. When the increase in load stops or hesitates, record the corresponding stress as the yield point.

NOTE 19—This method was formerly known as the halt-of-the-pointer method and also as the drop-of-the-beam method.

7.5.1.2 *Autographic Diagram Method*—Obtain a stress-strain (or load-elongation) diagram by an autographic device. Record the stress (or load) corresponding to the maximum point at the onset of discontinuous yielding, as the yield point. This method is illustrated in Fig. 23.

7.5.2 When test specimens do not exhibit a well-defined disproportionate deformation that characterizes a yield point as measured by the drop-of-the-beam, halt-of-the-pointer, or autographic diagram methods described above, a value equivalent to the yield point in its practical significance may be determined by the following methods and may be substituted for the yield point:

7.5.2.1 *Strain Rate Method*—Attach a Class B2 extensometer to the specimen at the gage marks. When the specimen is in place and the extensometer attached, increase the load at a reasonably uniform rate. Watch the elongation of the specimen as shown by the extensometer and note for this determination the load at which the rate of elongation shows a sudden increase.

7.5.2.2 *Extension-Under-Load Method*—To determine the yield point by the extension-under-load (EUL) method, it is necessary to secure data as follows: (1) by autographic or numerical devices so that a stress-strain diagram may be drawn from which the value of the stress occurring at the specified value of extension may be ascertained; or (2) by a device attached to or part of an extensometer that indicates when the specified extension occurs so that the load then occurring may be ascertained—either or both the devices attached to the extensometer or the load-indicating device may be automatic. This method is illustrated in Fig. 22. The extension can be satisfactorily determined by the use of a Class C extensometer. The stress that occurs at the specified



extension shall be reported as the yield point.

NOTE 20—The appropriate value of the total extension should be specified. For steel with yield point specified not over 550 MPa, an appropriate value is 0.005 mm/mm of gage length. For higher strength steels, yield strength should be specified in preference to yield point.

7.6 Tensile Strength—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load carried by the specimen during a tension test by the original cross-sectional area of the specimen.

7.7 Elongation:

7.7.1 In reporting values of elongation, give both the original gage length and the percentage increase.

Example: elongation = 30 % increase (50-mm gage length)

7.7.2 When the specified elongation is greater than 3 %, fit ends of the fractured specimen together carefully and measure the distance between the gage marks to the nearest 0.25 mm for gage lengths of 50 mm and under, and to at least the nearest 0.5 % of the gage length for gage lengths over 50 mm. A percentage scale reading to 0.5 % of the gage length may be used.

7.7.3 When the specified elongation is 3 % or less, determine the elongation of standard round specimens (see Fig. 8) using the following procedure, except that the procedure given in 7.7.2 may be used instead when the measured elongation is greater than 3 %.

7.7.3.1 Measure the original gage length of the specimen to the nearest 0.05 mm.

7.7.3.2 Remove partly torn fragments that will interfere with fitting together the ends of the fractured specimen or with making the final measurement.

7.7.3.3 Fit the fractured ends together with matched surfaces and apply an end load along the axis of the specimen sufficient to close the fractured ends together. If desired, this load may then be removed carefully, provided the specimen remains intact.

NOTE 21—The use of an end load of approximately 15 MPa has been found to give satisfactory results on test specimens of aluminum alloy.

7.7.3.4 Measure the final gage length to the nearest 0.05 mm and report the elongation to the nearest 0.2 %.

7.7.4 Specimens other than the standard specimen described in Fig. 8 are exempt from the requirements of 7.7.3 except as required by the applicable product specification.

7.7.5 If any part of the fracture takes place outside of the middle half of the gage length or in a punched or scribed mark within the reduced section, the elongation value obtained may not be representative of the material. In acceptance testing, if the elongation so measured meets the minimum requirements specified, no further testing is required, but if the elongation is less than the minimum requirements, discard the test and retest.

7.7.6 In determining extension at fracture (elastic plus plastic extension), autographic or automated methods using extensometers may be employed.

7.7.6.1 In determining percent elongation from extension at fracture data, only the plastic extension shall be used. The elastic portion can be estimated graphically or by calculation, and then subtracted from the total extension at fracture.

7.8 Reduction of Area:

7.8.1 Specimens With Originally Circular Cross Sections—Fit the ends of the fractured specimen together and

measure the reduced diameter to the same accuracy as the original measurement.

NOTE 22—Because of anisotropy, circular cross sections often do not remain circular during straining in tension. The shape is usually elliptical, thus, the area may be calculated by $\pi \cdot d_1 \cdot d_2 / 4$, where d_1 and d_2 are the major and minor diameters, respectively.

7.8.2 Specimens With Originally Rectangular Cross Sections—Fit the ends of the fractured specimen together and measure the thickness and width at the minimum cross section to the same accuracy as the original measurements.

NOTE 23—Because of the constraint to deformation that occurs at the corners of rectangular specimens, the dimensions at the center of the original flat surfaces are less than those at the corners. The shape of these surfaces are often assumed to be parabolic. When this assumption is made, an effective thickness, t_e , may be calculated by: $(t_1 + 4t_2 + t_3) / 6$, where t_1 and t_3 are the thicknesses at the corners, and t_2 is the thickness at the mid-width. An effective width may be similarly calculated.

7.8.3 Calculate the reduced area based upon the dimensions determined in 7.8.1 or 7.8.2. The difference between the area thus found and the area of the original cross section expressed as a percentage of the original area, is the reduction of area.

7.8.4 If any part of the fracture takes place outside the middle half of the reduced section or in a punched or scribed gage mark within the reduced section, the reduction of area value obtained may not be representative of the material. In acceptance testing, if the reduction of area so calculated meets the minimum requirements specified, no further testing is required, but if the reduction of area is less than the minimum requirements, discard the test results and retest.

7.8.5 Results of measurements of reduction of area shall be rounded using the procedures of Practice E 29 and any specific procedures in the product specifications. In the absence of a specified procedure, it is recommended that reduction of area test values in the range from 0 to 10 % be rounded to the nearest 0.5 % and test values of 10 % and greater to the nearest 1 %.

7.9 Rounding Reported Test Data for Yield Strength, Yield Point, and Tensile Strength:

7.9.1 Test data should be rounded using the procedures of Practice E 29 and the specific procedures in the product specifications. In the absence of a specified procedure for rounding the test data, one of the procedures described in the following paragraphs is recommended.

7.9.2 For test values up to 500 MPa, round to the nearest 1 MPa; for test values of 500 MPa and up to 1000 MPa, round to the nearest 5 MPa; for test values of 1000 MPa and greater, round to the nearest 10 MPa.

NOTE 24—For steel products, see Test Methods and Definitions A 370.

7.9.3 For all test values, round to the nearest 0.5 MPa.

NOTE 25—For aluminum- and magnesium-alloy products, see Methods B 557M.

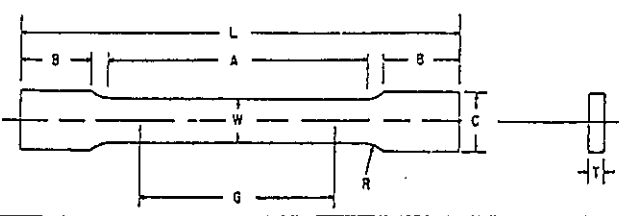
7.9.4 For all test values, round to the nearest 5 MPa.

7.10 Replacement of Specimens—A test specimen may be discarded and a replacement specimen selected from the same lot of material in the following cases:

7.10.1 The original specimen had a poorly machined surface.

7.10.2 The original specimen had the wrong dimensions.

E 8M



Nominal Width	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type 40 mm	Sheet-Type 12.5 mm	6 mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W—Width (Notes 3 and 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L—Overall length, min (Notes 2 and 7)	450	200	100
A—Length of reduced section, min	225	57	32
B—Length of grip section, min (Note 8)	75	50	30
C—Width of grip section, approximate (Notes 4 and 9)	50	20	10

NOTE 1—For the 40-mm wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 25 mm apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm apart, may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40-mm wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 75 mm may be used with all other dimensions similar to the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.10, 0.05 or 0.02 mm, respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 1% larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 40-mm wide specimens shall be 5 mm. Maximum thickness of 12.5-mm and 6-mm wide specimens shall be 19 mm and 6 mm, respectively.

NOTE 6—For the 40-mm wide specimen, a 13-mm minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 690 MPa in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial loading during testing of 6-mm wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of 12.5-mm wide specimens is over 10 mm, longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 2.5, 0.25, and 0.13 mm, respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5-mm wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm.

NOTE 10—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. 1 Rectangular Tension Test Specimens

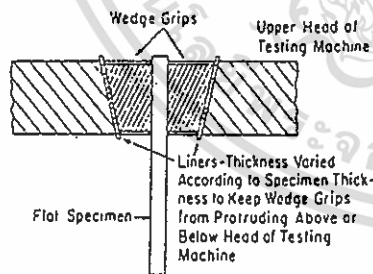


FIG. 2 Wedge Grips with Liners for Flat Specimens

7.10.3 The specimen's properties were changed because of poor machining practice,

7.10.4 The test procedure was incorrect,

7.10.5 The fracture was outside the gage length,

7.10.6 For elongation determinations, the fracture was outside the middle half of the gage length, or

7.10.7 There was a malfunction of the testing equipment.

NOTE 26—The tension specimen is inappropriate for assessing some types of imperfections in a material. Other methods and specimens employing ultrasonics, dye penetrants, radiography, etc., may be considered when flaws such as cracks, flakes, porosity, etc., are revealed during a test and soundness is a condition of acceptance.

8. Report

8.1 Test information on materials not covered by a product specification should be reported in accordance with 8.2 or both 8.2 and 8.3.

8.2 Test information to be reported shall include the following when applicable:

8.2.1 Material and sample identification.

8.2.2 Specimen type (Section 6).

8.2.3 Yield strength and the method used to determine yield strength (see 7.4).

8.2.4 Yield point and the method used to determine yield point (see 7.5).

8.2.5 Tensile strength (see 7.6).

8.2.6 Elongation (report both the original gage length and the percentage increase) (see 7.7).

8.2.7 Reduction of area (see 7.8).

8.3 Test information to be available on request shall include:

8.3.1 Specimen test section dimension(s).

8.3.2 Formula used to calculate cross-sectional area of specimens taken from large-diameter tubular products.

8.3.3 Speed and method used to determine speed of testing (see 7.3).

8.3.4 Method used for rounding of test results (see 7.9).

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษา ให้เป็น เมื่อนำไปใช้โดยไม่แจ้งชื่อต้นฉบับการค้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.5 Reasons for replacement specimens (see 7.10).

9. Precision and Bias⁸

9.1 Precision—An interlaboratory test program⁷ gave the following values for coefficients of variation for the most commonly measured tensile properties:

	Coefficient of Variation, %				
	Tensile Strength	Yield Strength Offset = 0.02 %	Yield Strength Offset = 0.2 %	Elongation Gage Length = 5 Diameters	Reduction of Area
CV % _r	0.9	2.7	1.4	3.0	2.8
CV % _R	1.3	4.5	2.3	6.4	4.6

CV %_r = repeatability coefficient of variation in percent within a laboratory
 CV %_R = repeatability coefficient of variation in percent between laboratories

9.1.1 The values shown are the averages from tests on six

⁸ Supporting data can be found in Appendix I and additional data are available from ASTM Headquarters. Request RR: E28-1004 and E28-1006.

frequently tested metals, selected to include most of the normal range for each property listed above. When these materials are compared, a large difference in coefficient of variation is found. Therefore, the values above should not be used to judge whether the difference between duplicate tests of a specific material is larger than expected. The values are provided to allow potential users of this test method to assess, in general terms, its usefulness for a proposed application.

9.2 Bias—The procedures in Test Methods E 8M for measuring tensile properties have no bias because these properties can only be defined in terms of a test method.

10. Keywords

10.1 accuracy; bending stress; discontinuous yielding; drop-of-the-beam; eccentric loading; elastic extension; elongation; extension-under-load; extensometer; force; free-running crosshead speed; gage length; half-of-the pointer; percent elongation; plastic extension; preload; rate of stressing; rate of straining; reduced section; reduction of area; sensitivity; strain; stress; taring; tensile strength; tension testing; yield point; yield strength

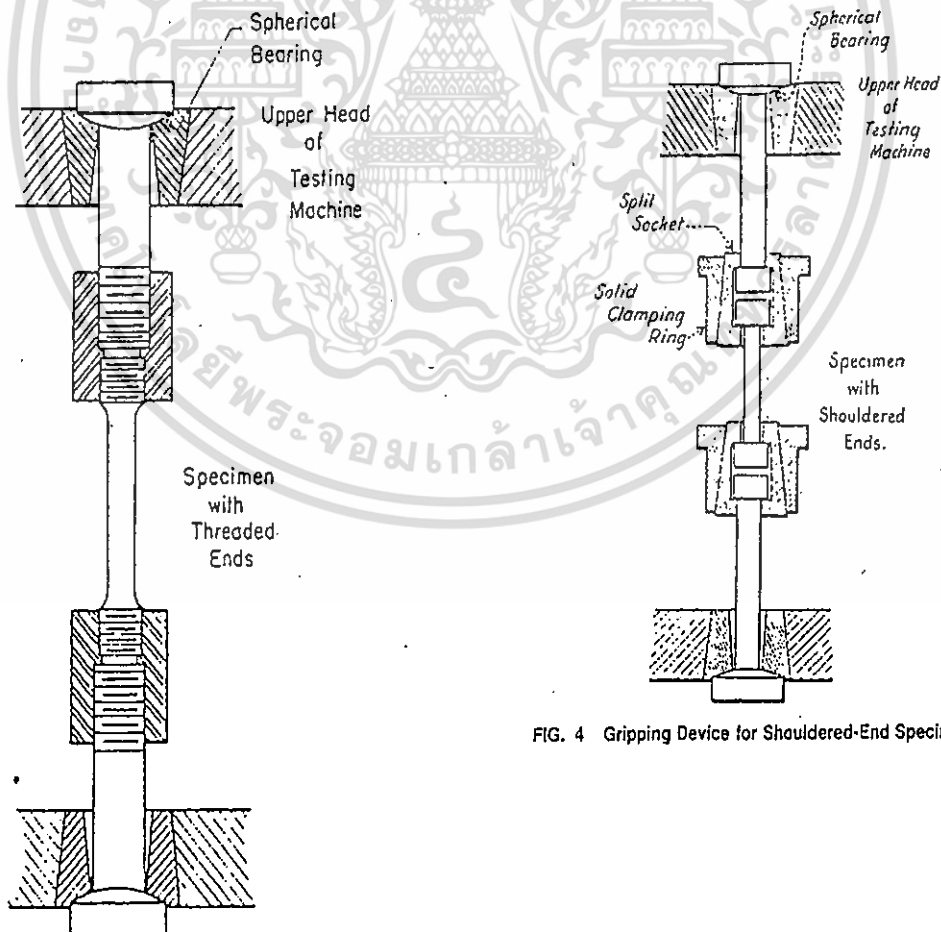


FIG. 3 Gripping Device for Threaded-End Specimens

FIG. 4 Gripping Device for Shouldered-End Specimens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E 8M

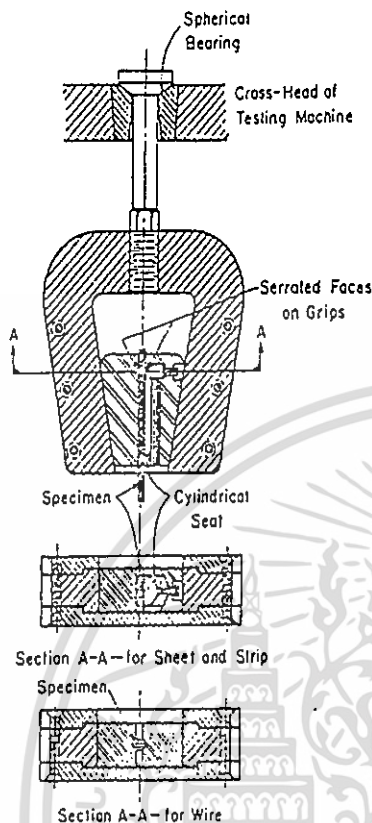


FIG. 5 Gripping Devices for Sheet and Wire Specimens

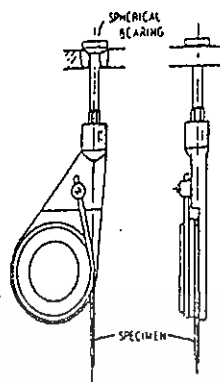
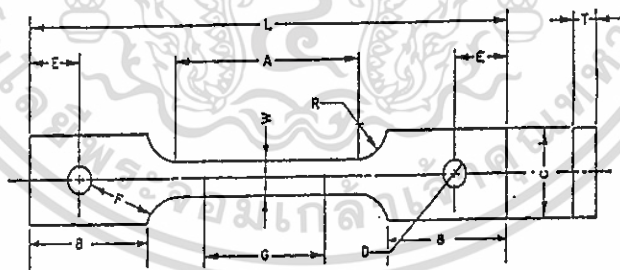


FIG. 6 Snubbing Device for Testing Wire



Dimensions, mm

G—Gage length	50.0 ± 0.1
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2
T—Thickness, max (Note 2)	12.5
R—Radius of fillet, min (Note 3)	13
L—Overall length, min	200
A—Length of reduced section, min	57
B—Length of grip section, min	50
C—Width of grip section, approximate	50
D—Diameter of hole for pin, min (Note 4)	13
E—Edge distance from pin, approximate	40
F—Distance from hole to fillet, min	15

NOTE 1—The ends of the reduced section shall differ in width by not more than 0.1 mm. There may be a gradual taper in width from the ends to the center, but the width at each end shall be not more than 1 % greater than the width at the center.

NOTE 2—The dimension T is the thickness of the test specimen as stated in the applicable product specifications.

NOTE 3—For some materials, a fillet radius R larger than 13 mm may be needed.

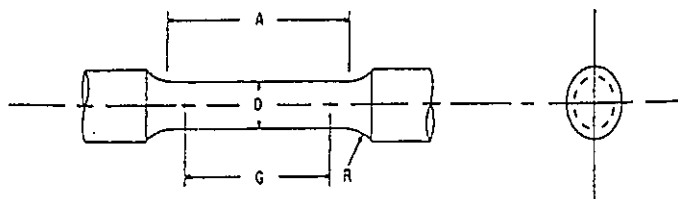
NOTE 4—Holes must be on center line of reduced section, within ± 0.1 mm.

NOTE 5—Variations of dimensions C, D, E, F, and L may be used that will permit failure within the gage length.

FIG. 7 Pin-Loaded Tension Test Specimen with 50-mm Gage Length

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E 8M



	Dimensions, mm				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional To Standard			
	12.5	9	6	4	2.5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center (controlling dimension).

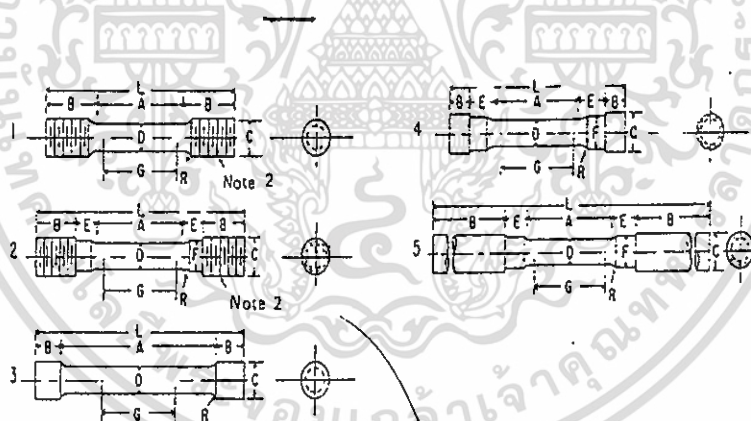
NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.

NOTE 3—The gage length and fillets shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load may be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Figs. 8 and 9, the gage lengths are equal to five times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but the 5-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 6 mm in diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

FIG. 8 Standard 12.5-mm Round Tension Test Specimen with Gage Lengths Five Times the Diameters (5D), and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimen



	Dimensions, mm				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2
R—Radius of fillet, min	10	10	2	10	10
A—Length of reduced section	75, min	75, min	100, approximately	75, min	75, min
L—Overall length, approximate	145	155	140	140	255
B—Length of end section (Note 3)	35, approximately	25, approximately	20, approximately	15, approximately	75, min
C—Diameter of end section	20	20	22	20	20
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	....	15	....	20	15
F—Diameter of shoulder	....	15	....	15	15

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center.

NOTE 2—On Specimens 1 and 2, any standard thread is permissible that provides for proper alignment and aids in assuring that the specimen will break within the reduced section.

NOTE 3—On Specimen 5 it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

FIG. 9 Various Types of Ends for Standard Round Tension Test Specimens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E 8M

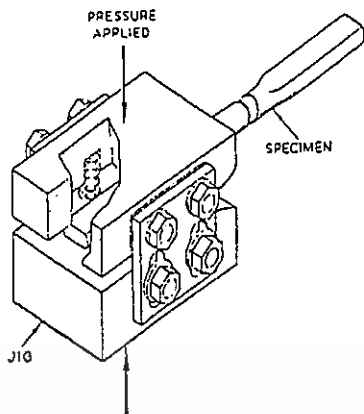
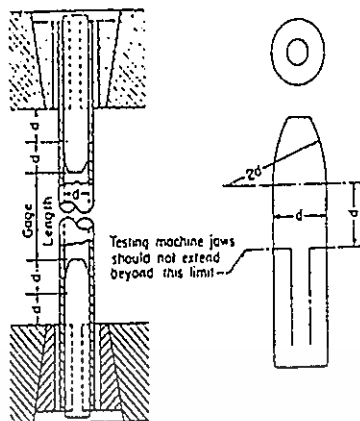
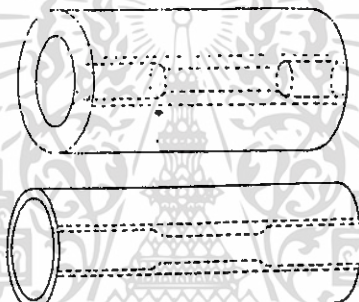


FIG. 10 Squeezing Jig for Flattening Ends of Full-Size Tension Test Specimens

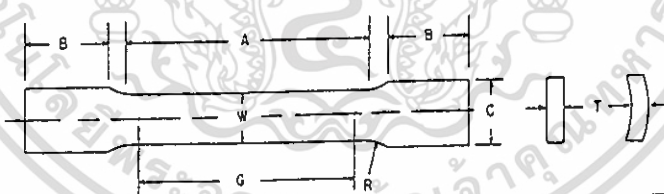


NOTE—The diameter of the plug shall have a slight taper from the line limiting the testing machine jaws to the curved section.
 FIG. 11 Metal Plugs for Testing Tubular Specimens, Proper Location of Plugs in Specimen and of Specimen in Heads of Testing Machine



NOTE—The edges of the blank for the specimen shall be cut parallel to each other.

FIG. 12 Location from Which Longitudinal Tension Test Specimens Are to Be Cut from Large-Diameter Tube



Dimensions, mm

Nominal Width	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
	12.5	40	40
G—Gage length	50.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	200.0 ± 0.2
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2	40.0 ± 2.0	40.0 ± 2.0
T—Thickness	measured thickness of specimen		
R—Radius of fillet, min	12.5	25	25
A—Length of reduced section, min	60	60	230
B—Length of grip section, min (Note 2)	75	75	75
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	20	50	50

NOTE 1—The ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.1 mm for specimens 1, 2, and 3. There may be a gradual taper in width from the ends to the center, but the width at each end shall be not more than 1% greater than the width at the center.
 NOTE 2—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.
 NOTE 3—The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 1.0 mm for specimen 1 and 2.5 mm for specimens 2 and 3.
 NOTE 4—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing and where prohibited by product specification, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. If the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. 13 Tension Test Specimens for Large-Diameter Tubular Products

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E 8M

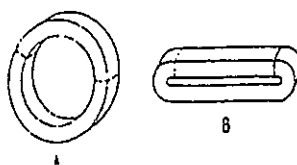
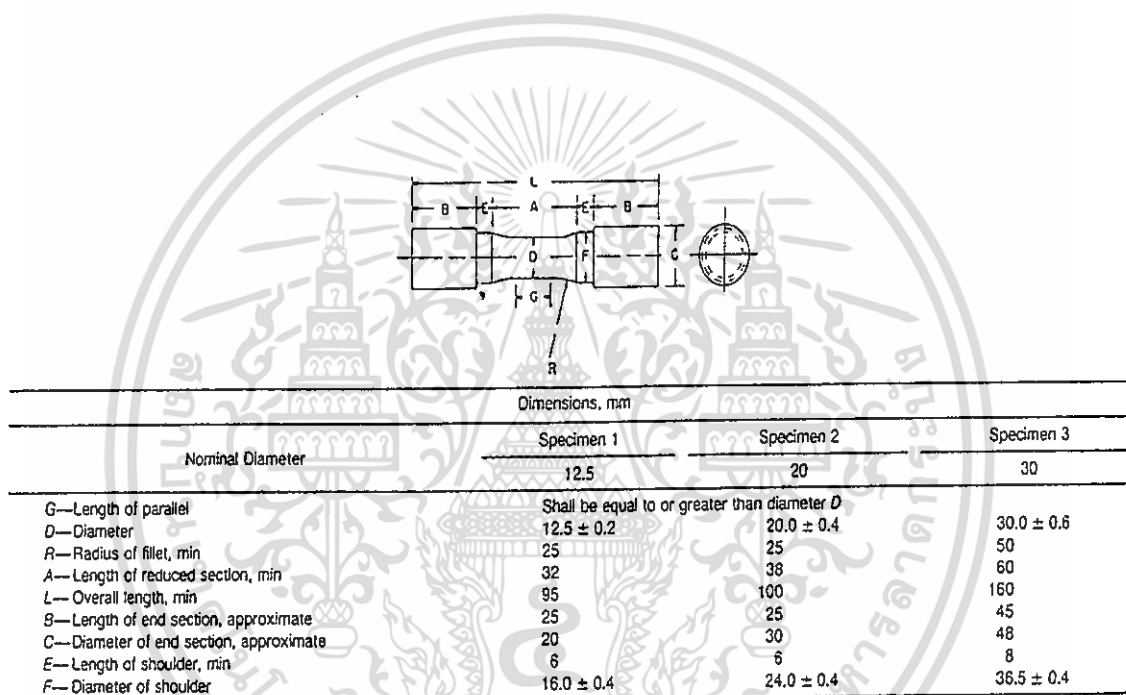


FIG. 14 Location of Transverse Tension Test Specimen in Ring Cut from Tubular Products

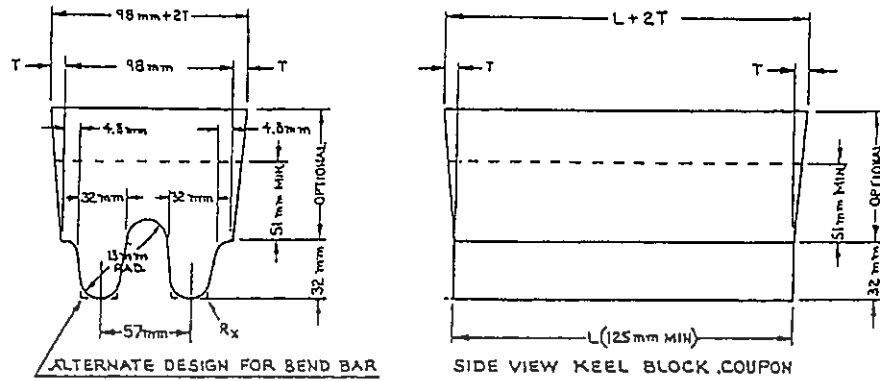


NOTE—The reduced section and shoulders (dimensions *A*, *D*, *E*, *F*, *G*, and *R*) shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial. Commonly the ends are threaded and have the dimensions *B* and *C* given above.

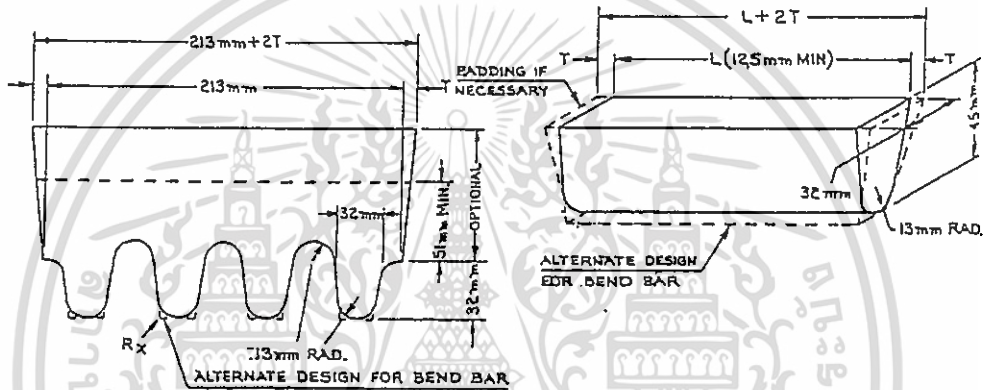
FIG. 15 Standard Tension Test Specimen for Cast Iron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E 8M



(a) Design for Double Keel Block Coupon



(b) Design for Multiple Keel Block Coupon (4 Legs)

(c) Design for "Attached" Coupon

FIG. 16 Test Coupons for Castings (see Table 1 for Details of Design)

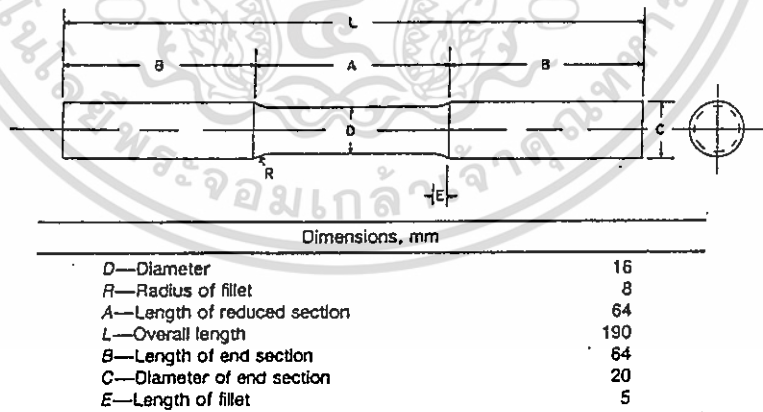
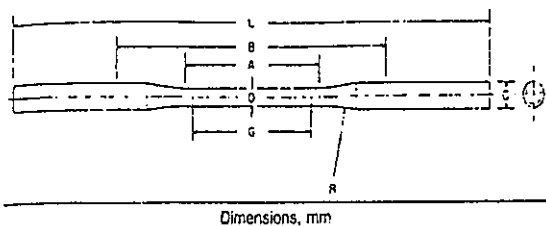


FIG. 17 Standard Tension Test Specimen for Malleable Iron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

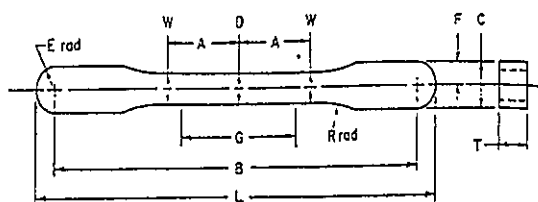
E 8M



Dimensions, mm	
G—Gage length	50.0 ± 0.1
D—Diameter (see Note)	6.4 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	75
A—Length of reduced section, min	60
L—Overall length, min	230
B—Distance between grips, min	115
C—Diameter of end section, approximate	10

NOTE—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 0.1 mm larger in diameter than the center.

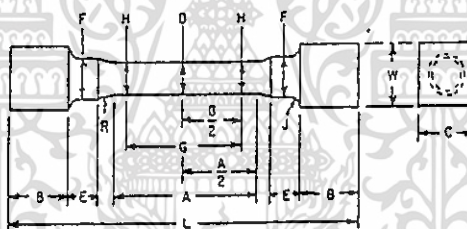
FIG. 18 Standard Tension Test Specimen for Die Castings



Pressing Area = 645 mm²
NOTE—Dimensions specified, except G and T, are those of the die.

Dimensions, mm	
G—Gage length	25.40 ± 0.8
D—Width at center	5.72 ± 0.03
W—Width at end of reduced section	5.97 ± 0.03
T—Compact to this thickness	3.56 to 6.35
R—Radius of fillet	25.4
A—Half-length of reduced section	15.88
B—Grip length	80.95 ± 0.03
L—Overall length	89.64 ± 0.03
C—Width of grip section	8.71 ± 0.03
F—Half-width of grip section	4.34 ± 0.03
E—End radius	4.34 ± 0.03

FIG. 19 Standard Flat Unmachined Tension Test Specimen for Powder Metallurgy (P/M) Products



Approximate Pressing Area of Unmachined Compact = 752 mm²
Machining Recommendations

1. Rough machine reduced section to 6.35 mm diameter
2. Finish turn 4.75/4.85 mm diameter with radii and taper
3. Polish with 00 emery cloth
4. Lap with crocus cloth

Dimensions, mm	
G—Gage length	25.40 ± 0.8
D—Diameter at center of reduced section	4.75 ± 0.03
H—Diameter at ends of gage length	4.85 ± 0.03
R—Radius of fillet	6.35 ± 0.13
A—Length of reduced section	47.63 ± 0.13
L—Overall length (die cavity length)	75, nominal
B—Length of end section	7.88 ± 0.13
C—Compact to this end thickness	10.03 ± 0.13
W—Die cavity width	10.03 ± 0.08
E—Length of shoulder	6.35 ± 0.13
F—Diameter of shoulder	7.88 ± 0.03
J—End fillet radius	1.27 ± 0.13

NOTE 1—The gage length and fillets of the specimen shall be as shown. The ends as shown are designed to provide a practical minimum pressing area. Other end designs are acceptable, and in some cases are required for high-strength sintered materials.

NOTE 2—It is recommended that the test specimen be gripped with a split collet and supported under the shoulders. The radius of the collet support circular edge is to be not less than the end fillet radius of the test specimen.

NOTE 3—Diameters D and H are to be concentric within 0.03 mm total indicator runout (T.I.R.), and free of scratches and tool marks.

FIG. 20 Standard Round Machined Tension Test Specimen for Powder Metallurgy (P/M) Products

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. FACTORS AFFECTING TENSION TEST RESULTS

X1.1 The precision and bias of tension test strength and ductility measurements depend on strict adherence to the stated test procedure and are influenced by instrumental and material factors, specimen preparation, and measurement/testing errors.

X1.2 The consistency of agreement for repeated tests of the same material is dependent on the homogeneity of the material, and the repeatability of specimen preparation, test conditions, and measurements of the tension test parameters.

X1.3 Instrumental factors that can affect test results include: the stiffness, damping capacity, natural frequency, and mass of the tensile test machine, the accuracy of loading and the use of loads within the verified range for the machine, speed of loading, alignment of the test specimen with the applied load, parallelness of the grips, grip pressure, nature of the load control used, appropriateness and calibration of extensometers used, and so forth.

X1.4 Material factors that can affect test results include: representativeness and homogeneity of the test material, sampling scheme, and specimen preparation (surface finish, dimensional accuracy, fillets at the ends of the gage length, taper in the gage length, bent specimens, thread quality, and so forth).

X1.4.1 Some materials are very sensitive to the quality of the surface finish of the test specimen (see Note 11) and must be ground to a fine finish, or polished to obtain correct results.

X1.4.2 Test results for specimens with as-cast, as-rolled, as-forged, or other non-machined surface conditions can be affected by the nature of the surface (see Note 12).

X1.4.3 Test specimens taken from appendages to the part or component, such as prolongs or risers, or from separately produced castings (for example, keel blocks) may produce test results that are not representative of the part or component.

X1.4.4 Test specimen size can influence test results. For cylindrical specimens, changing the test specimen size generally has a negligible effect on the yield and tensile strength but may influence the yield point, if one is present, and will influence the elongation and reduction of area values. In general, increasing the specimen size reduces the % elongation and % reduction in area, although some studies have shown no effect, or the opposite effect. For rectangular tensile test specimens, increasing the width or thickness generally increases the % elongation and decreases the % reduction in area.

X1.4.5 Use of a taper in the gage length, up to the allowed 1 % limit, can result in lower elongation values. Reductions of as much as 15 % have been reported for a 1 % taper.

X1.4.6 Some materials are highly strain-rate sensitive. Changes in the strain rate can affect the yield strength and elongation values, especially for strain-rate sensitive mate-

rials. In general, the yield strength and elongation will increase as the strain rate increases.

X1.4.7 Brittle materials require careful specimen preparation, high quality surface finishes, large fillets at the ends of the gage length, oversize threaded grip sections, and cannot tolerate punch or scribe marks as gage length indicators.

X1.4.8 Flattening of tubular products to permit testing does alter the material properties, generally nonuniformity, in the flattened region which may affect test results.

X1.5 Measurement errors that can affect test results include: verification of the test force, extensometers, micrometers, dividers, and other measurement devices, alignment and zeroing of chart recording devices, and so forth.

X1.5.1 Measurement of the dimensions of as-cast, as-rolled, as-forged, and other test specimens with non-machined surfaces may be imprecise due to the irregularity of the surface flatness.

X1.5.2 Materials with anisotropic flow characteristics may exhibit non-circular cross sections after fracture and measurement precision may be affected, as a result (see Note 24).

X1.5.3 The corners of rectangular test specimens are subject to constraint during deformation and the originally flat surfaces may be parabolic in shape after testing which will affect the precision of final cross-sectional area measurements (see Note 25).

X1.5.4 If any portion of the fracture occurs outside of the middle of the gage length, or in a punch or scribe mark within the gage length, the elongation and reduction of area values may not be representative of the material. Wire specimens that break at or within the grips may not produce test results representative of the material.

X1.5.5 Use of specimens with shouldered ends ("button-head" tensiles) will produce lower 0.02 % offset yield strength values than threaded specimens.

X1.6 Because standard reference materials with certified tensile property values are not available, it is not possible to rigorously define the bias of tension tests. However, by the use of carefully designed and controlled interlaboratory studies, a reasonable definition of the precision of tension test results can be obtained.

X1.6.1 An interlaboratory test program⁸ was conducted where six specimens each, of six different materials were prepared and tested by each of six different laboratories. Tables 2.1 to 2.6 present the precision statistics, as defined in Practice E 691, for: tensile strength, 0.02 % yield strength, 0.2 % yield strength, % elongation in 5D, and % reduction in area. In each table, the first column lists the six materials tested, the second column lists the average of the average results obtained by the laboratories, the third and fifth columns list the repeatability and reproducibility standard deviations, the fourth and sixth columns list the coefficients of variation for these standard deviations, and the seventh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and eighth columns list the 95 % repeatability and reproducibility limits.

X1.6.2 The averages (below columns four and six in each table) of the coefficients of variation permit a relative comparison of the repeatability (within-laboratory precision) and reproducibility (between-laboratory precision) of the tension test parameters. This shows that the ductility measurements exhibit less repeatability and reproducibility than the strength measurements. The overall ranking from the least to the most repeatable and reproducible is: % elongation in 5D, % reduction in area, 0.02 % offset yield strength, 0.2 % offset yield strength, and tensile strength. Note that the rankings are in the same order for the repeatability and

reproducibility average coefficients of variation and that the reproducibility (between-laboratory precision) is poorer than the repeatability (within-laboratory precision), as would be expected.

X1.6.3 No comments about bias can be made for the interlaboratory study due to the lack of certified test results for these specimens. However, examination of the test results showed that one laboratory consistently exhibited higher than average strength values and lower than average ductility values for most of the specimens. One other laboratory had consistently lower than average tensile strength results for all specimens.

TABLE X1.1 Precision Statistics—Tensile Strength, MPa

Material	X	s_r	$s_r/X, \%$	s_R	$s_R/X, \%$	r	R
EC-H19	177.5	0.63	2.45	0.63	2.45	1.76	1.76
2024-T351	492.9	0.88	1.24	0.96	1.34	2.47	2.68
ASTM A105	598.8	0.50	0.70	1.27	1.46	1.68	3.55
AISI 316	696.9	0.39	0.39	1.21	1.20	1.09	3.39
Inconel 600	688.1	0.42	0.43	0.72	0.72	1.19	2.02
SAE 51410	1257.0	0.46	0.25	1.14	0.63	1.29	3.20
Averages:			0.91		1.30		

NOTE: X is the average of the cell averages, that is, the grand mean for the test parameter.

s_r is the repeatability standard deviation (within-laboratory precision).

s_r/X is the coefficient of variation in %.

s_R is the reproducibility standard deviation (between-laboratory precision).

s_R/X is the coefficient of variation, %.

r is the 95 % repeatability limits.

R is the 95 % reproducibility limits.

TABLE X1.2 Precision Statistics—0.02 % Yield Strength, MPa

Material	X	s_r	$s_r/X, \%$	s_R	$s_R/X, \%$	r	R
EC-H19	111.8	0.65	3.99	1.19	7.36	1.81	3.33
2024-T351	355.4	0.84	1.64	0.89	1.73	2.36	2.49
ASTM A105	412.7	1.20	2.02	1.89	3.18	3.37	5.31
AISI 316	336.3	2.39	4.91	4.61	9.49	6.68	12.91
Inconel 600	268.0	0.46	1.18	0.76	1.95	1.28	2.13
SAE 15410	725.6	2.40	2.29	3.17	3.02	6.73	8.88
Averages:			2.67		4.46		

TABLE X1.3 Precision Statistics—0.2 % Yield Strength, MPa

Material	X	s_r	$s_r/X, \%$	s_R	$s_R/X, \%$	r	R
EC-H19	159.0	0.47	2.06	0.48	2.07	1.33	1.33
2024-T351	364.1	0.74	1.41	0.79	1.49	2.08	2.20
ASTM A105	403.7	0.83	1.42	1.44	2.47	2.31	4.03
AISI 316	481.6	0.94	1.35	2.83	4.07	2.63	7.93
Inconel 600	269.1	0.36	0.93	0.85	2.18	1.01	2.37
SAE 51410	970.7	1.29	0.92	2.30	1.64	3.60	6.45
Averages:			1.35		2.32		



TABLE X1.4 Precision Statistics—% Elongation in 5D

Material	X	s_r	$s_r/X, \%$	s_R	$s_R/X, \%$	r	R
EC-H19	14.61	0.59	4.03	0.66	4.52	1.65	1.85
2024-T351	18.04	0.64	3.57	1.72	9.53	1.81	4.81
ASTM A105	25.63	0.77	2.99	1.30	5.06	2.15	3.63
AISI 316	35.93	0.71	1.98	2.68	7.45	2.00	7.49
Inconel 600	41.58	0.67	1.61	1.60	3.86	1.88	4.49
SAE 51410	12.39	0.45	<u>3.61</u>	0.96	<u>7.75</u>	1.25	2.69
		Averages:	2.97		6.36		

Note A1—Length of reduced section = 6D.

TABLE X1.5 Precision Statistics—% Reduction in Area

Material	X	s_r	$s_r/X, \%$	s_R	$s_R/X, \%$	r	R
EC-H19	79.14	1.94	2.45	2.02	2.56	5.44	5.67
2024-T351	30.31	2.07	6.82	3.58	11.80	5.79	10.01
ASTM A105	65.59	0.84	1.28	1.26	1.92	2.35	3.53
AISI 316	71.49	0.99	1.39	1.51	2.25	2.78	4.50
Inconel 600	59.34	0.67	1.14	0.70	1.18	1.89	1.97
SAE 51410	50.49	1.86	<u>3.69</u>	3.95	<u>7.81</u>	5.21	11.05
		Averages:	2.80		4.59		

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบความแข็งและการแปลงหน่วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-1 ผลการตรวจสอบความแข็งของวัสดุชนิด S50C

แบบ วค. 1



ที่ วว 0505/ 9609

ถึง นาย ภาสกร จำปาเงิน

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัดดัดตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 10 กรกฎาคม 2545 เลขรับ 4854 วันที่ 10 กรกฎาคม 2545

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2545

กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

กอง ฟิสิกส์และวิศวกรรม

โทร. 0-2201-7130



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง	เครื่องหมาย	หมายเลข	ผลการทดสอบ
ตามที่ผู้ส่งเรียก	ตรา ฯลฯ	ที่ระบุตัวอย่าง	ปฏิบัติกร
เหล็ก S 50 C	-	WB.599	Hardness Rockwell Scale C, HRC
หนา 2 มม.			26.8

ผู้รับรอง

(นาย ประดับ สว่างศรี)

หัวหน้ากลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2

ผู้ทดสอบ

(นายปัทม ไทยากิรมย์)

นักวิทยาศาสตร์ 6A

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการเป็นลายลักษณ์อักษร

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

6/2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 ผลการตรวจสอบความแข็งของวัสดุชนิด SPCC

แบบ วค. 1



ที่ ว 0505/ 9608

ถึง นาย ภาสกร จำปาเงิน

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัดดัดตัวอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 10 กรกฎาคม 2545 เลขรับ 4853 วันที่ 10 กรกฎาคม 2545

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2545

กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

กอง พิสิกส์และวิศวกรรม

โทร. 0-2201-7130



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัดดัดตัวอย่าง เครื่องหมาย หมายเลข

ตรา ฯลฯ

ผลการทดสอบ

ตามที่อยู่ส่งเรียก ที่ระบุตัวอย่าง ปฏิบัติการ

Hardness Vicker, HV

เหล็ก SPCC

WB.598

99.7

หนา 2 มม.

ผู้รับรอง

(นาย ประดับ สว่างศรี)

หัวหน้ากลุ่มพิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2

ผู้ทดสอบ

(นายปิยทัต ไทยากิรัมย์)

นักวิทยาศาสตร์ 6ว

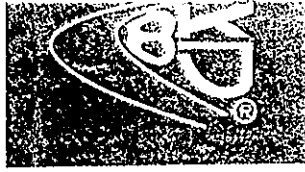
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการเป็นลายลักษณ์อักษร

- รายงานนี้ :
- รับรองเฉพาะวัดดัดตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
 - ไม่รับรองวัดดูหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

6/2542

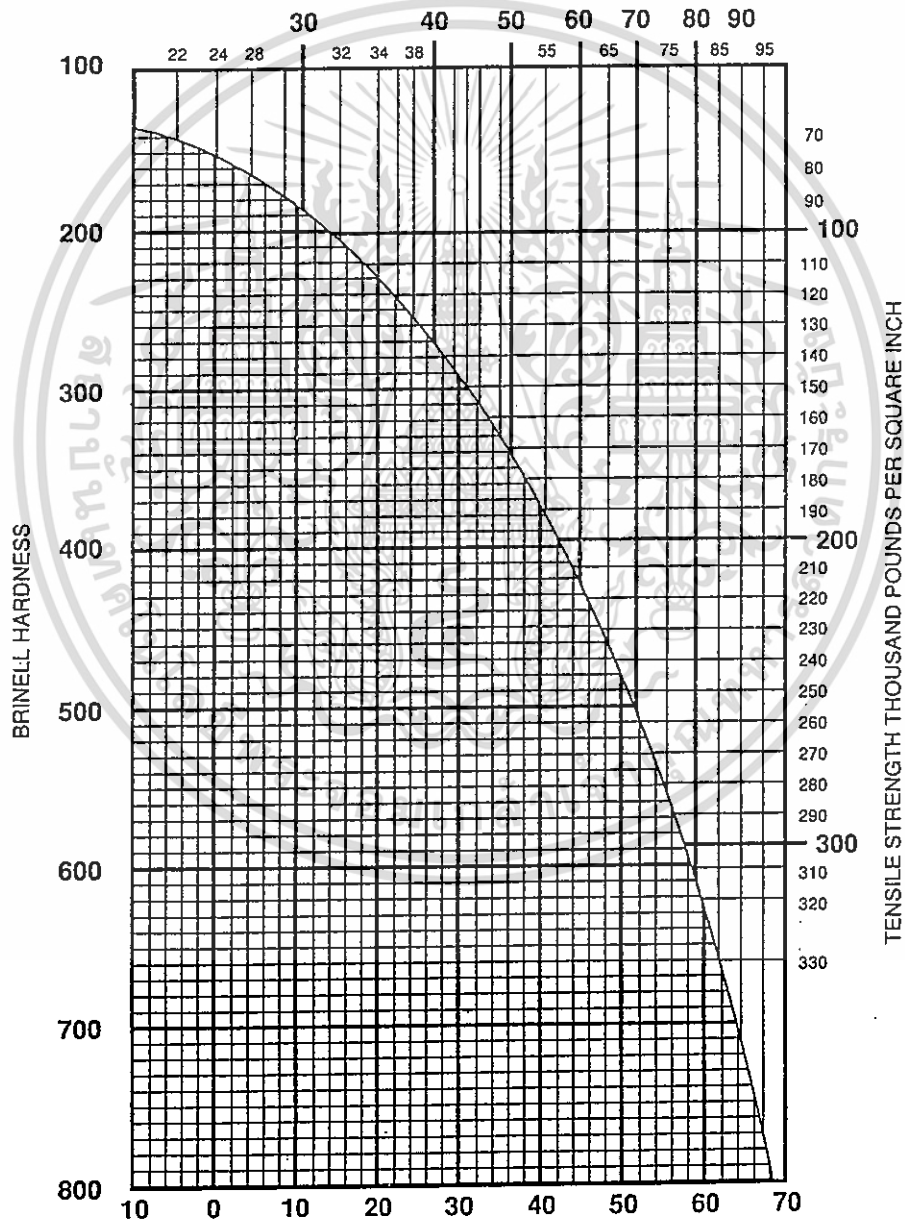
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุ



Hardness Number Conversion Chart

SHORE HARDNESS



ROCKWELL "C" HARDNESS
(Reproduces by courtesy of International Nickel Co.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-4 ตารางเปรียบเทียบเกรดเหล็กตามมาตรฐานประเทศต่าง ๆ

ตารางเปรียบเทียบเกรดเหล็กตามมาตรฐานประเทศต่าง ๆ

ประเภทของเหล็ก	USA	เยอรมัน	ออสเตรีย	สวีเดน	ญี่ปุ่น	จีน				
	ASIS SAE	ROCHLING	BOHLER	ASSAB	JIS	GB (YB)				
เหล็กคาร์บอน	M1	1.3316 S 235 L	GIANT M9 THYRAPID 3316 BOSS 3316	Edelstahl Buderus	BOHLER VEW	ASSAB UDDEHOLM	JIS YKMT YKMT	DAIDO YK1 YK1		
	M2	1.3333 S 235 L	GIANT M5 THYRAPID 3343 BOSS 3343	EBW 3343	Super Rapid Extra No. 5 500	HSP-41 KM2	SKH 51	MH 51	WBMSCHV2	
	M35	1.3213 S 355 L	GIANT MK THYRAPID 3243 BOSS 3243		Mo Rapid Extra 520 5 105		SKH 55	YK4 YK33	MH 55	WBMSCHV2CoS
	M42	1.3247 S 355 L	GIANT 101 THYRAPID 3247		5 500		SKH 58	YK42 YK32		W2M6C4VCoS
	T1	1.3355 S 195 L	GIANT 50 THYRAPID 3215		Super Rapid Extra V	HSP-11 CASTON 3	SKH 2	YK2 YK2	WH 2	W18C4V
T15	1.3355 S 195 L	GIANT 68 THYRAPID 3215		CC 35 M 5 207	HSP-18	SKH 10	YK3 YK3	WH 10	W12C4VCoS	
เหล็กหล่อโรงงานเย็น	A2	1.2383 X 100 CrMoV 5	RKCM THYRODUR 2382 BOH 2382	EBW 2383	SPECIAL X5 A 204	XW 10 NICON	SKD 12	SCD KD 12	DC 12	C12Me1v
	D2	1.2719 X 155 CrMoV 12	RCC Suss RCCD THYRODUR 2372 BOH 2372	EDW 2370 ISO D	SPECIAL XML S 303	XW 41 SVEFKER 21	SKD 11	SKD KD 11	DC 11	C12MeV
	D3	1.2080 X 210 Cr 12	KRUPP 2376 THYRODUR 2080 BOH 2080	EDW 210W ISO B	SPECIAL X K 100	XW 5 SVEFKER 3	SKD 1	YK5 KD 1	DC 1	C12
	1K6	1.2719 X 210 Cr 12	RCC Extra THYRODUR 2106 BOH 2106		SPECIAL K1 V 107	XW 5 SVEFKER 3	SKD 2	YK5 KD 2	DC 2	C12W
	F1	1.2719 T20 W 2	RTN 1 THYRODUR 2115		SSW K 105		SKD 2	YK5 KD 2	DC 2	C12W
	L3	1.2087 10C Cr 6	RTC 14 THYRODUR 2087 BOH 2087		K 200		SUJ 1			GC9
	O1	1.2510 90 Mn Cr W 3	PUB 3 THYRODUR 2510 BOH 2510	EDW 2415	AMB 1115 K 100	DF 2 ARNE	SKS 9	SGT KS 3	GO 31	C1Wm
	O2	1.2842 90 Mn Cr W 3	RUS THYRODUR 2842 BOH 2842		VST K 120					
	S7	1.2554 50 W Cr V 7	4TW 211 THYRODUR 2559 BOH 2559		SUB K 215	M 4 REGIN 3	SKS 41	K5 41	GS 41	C1W2S
	H16	1.2384 X 320 CrMoV 33	HPG3 THYRODUR 2384 BOH 2384		V 370		SKD 7	KDH 1	DH 72	
เหล็กหล่อโรงงานร้อน	H11	1.2314 X 38 CrMoV 5	RCC 2 THYRODUR 2314 BOH 2314	EDW 2311 ISO B	N 500	8407 CRVAK 2M	SKD 61	KDA KDA	DHA 1	C1S6M1V1S
	H13	1.2314 X 40 CrMoV 5	RCC 2V KRUPP 2314 THYRODUR 2314 BOH 2314		US 1112 W 332	8407 CRVAK 2M	SKD 61	DAO KDA	DHA 1	C1S6M1V1S
	H21	1.2317 X 30 CrMoV 5	RCW 2H THYRODUR 2317 BOH 2317		W 100	WIK 2 11WT 5A	SKD 5	HDC KD 5		C1Z8W8V
	BFD	1.2714 50 Mn Cr W 7	THYRODUR 2714 BOH 2714		34M W 500		SKT 4	-KT 4		
	L6	1.2719 55 MnCrMo 6	THYRODUR 2719 BOH 2719		NBS N W 501	M 14 CHONE	SKS 51	K5 51		SC1M6
	420	1.2083 X 40 Cr 13	RAOH THYRODUR 2083 BOH 2083	EDW 2083 ISO B	M 310	STAVAX STAINLESS 31	SUS 420 J2	HP140 U 420 J 2	DSR 20F	3Cr13
สแตนเลส	400A	1.4140 X 40 CrNi 13	REMANIT 4102 BOH 4102		N 255		SUS 440A	SM 3		
	4400	1.4119 X 53 CrNi 13	REMANIT 4112 BOH 4112		N 265		SUS 440B	SM 2		2Cr13MeV
	440C	1.4125 X 105 CrNi 13	REMANIT 4 BOH 4		N 985		SUS 440C	SM 3		9Cr18
	310	1.4841 X 15 CrNiSi 28	TH 22 THERMAX 4841 BOH 4841		AMTINICOM F20 N 512, N 532	STAINLESS 25	SUS Y310	U 310		
เหล็กกล้าผสมแข็ง (เหล็ก CJ)	318	1.4401 X 5 CrNiMo 1810	ANDRUX 40 THERMAX 4401 BOH 4401		A 120 A 120, A 100	STAINLESS 21-7ZL SAST 2	SUS 316	U 316		0Cr17Ni11Mo2V
	321	1.4878 X 12 CrNiTi 189	THERMAX 4878 BOH 4878		A 700	STAINLESS 30-7ZL	SUS 321	U 321		1Cr18Ni9Ti
	1015	1.1141 Ck 15	RA BGH 1141	Buderus Ck 15	E 2 E 200	UHB 35				15
	5117	1.7131 18 MnCr 5	EC 80 TEW 18 MnCr 5 BOH 7131	Buderus 18 MnCr5	E3 85 E 410		SMc 420			15CrMn
	4115	1.7237 18 CrNi 44	TEW 16 CrNi 44 BOH 7237			EM 80	SCM 415	CM 415		15CrNi6
	5120	1.7149 20 MnCr 5 5	EC 100 TEW 20 MnCr 5 5 BOH 7015	Buderus 18 CHGT	E 401		SC 420	Cr 420		20Cr
	5115	1.7013 15 Cr 3	RE 2C TEW 15 Cr 3 BOH 7015		E 525		SC 415	Cr 415		15Cr
เหล็กหล่อ	1045	1.1191 Ck 45	RA KRUPP 1191	BGH 1191	EDW 1730	EH V 145	-760	B 45 C		45
	4140	1.7225 42 CrNi 4	Mo 40 KRUPP 7225	TEW 42 CrNi 4 BOH 7225	EDW 7225	VD 140 V 330	709M	SCM 440	CM 4	42CrNi6
	4340	1.6581 40 MnCrMo 8	Moxy 15 KRUPP 6582	TEW 34 CrNiMo 8 BOH 6665	EDW 6582	VDH 100 V 130	709M -MICRO 812	SHCM 439	HCM 439	40CrNiMo
	5140	1.7035 41 Cr 4	ROP2 TEW 41 Cr 4 BOH 7035	Buderus 41 Cr4	KMCH V 500		SMc 443			40Cr
เหล็กปรับปรุง	1060	1.1221 Ck 60	R 6 TEW 60 BOH 7221	Buderus Ck 60	BHM V 500	UHB -12	-5 58C			80
	6150	1.6159 50 CrNi 4	F 2K TEW 50 Cr 4 BOH 6159	Buderus 50 CrV4	SOCYBOLER F350 F 350		SUP 10			SOCV
	9260	0.9008 60 SiMn 5	TEW 65 Si 7 BOH 7015	Buderus 60 SiMn5	F 105		SUP 8			60Si2Mn
เหล็กทนความร้อน	P20	1.2728 35 CrNi 4	Moxy 22 A KRUPP 2211	THYRODUR 2211 BOH 2211	Buderus ISO-BM	M 210	718 IMPAX SUPREME	HPM 2 KPM 25	PDS 5	
เหล็กทนกรด	W1	1.1545 C 105 W	RBN 10 THYRODUR 1545	EDW 1545	Edw Tough & Heat K 98C	K 100 URB 20	SK 3, SK 5	YK 3 K3	YK 3	T10
เหล็กทนดัด	52100	1.3505 100 Cr 6	RW 3 TEW 100 Cr 6	EDW 3505	R 200 R 100	K 150	SUJ 2	KR		GC15

ชื่อเหล็ก	ตัวแทนจำหน่าย	ชื่อเหล็ก	ตัวแทนจำหน่าย	ชื่อเหล็ก	ตัวแทนจำหน่าย
RÖCHLING	บริษัท ดายค็อกซ์อินดัสทรี จำกัด โทร. 2234581, 2236132, 2234003	BOHLER VEW	บริษัท สตีลเมทซ์ จำกัด โทร. 2945806-11, 2940542	Hitachi	บริษัท ฮิตาชิ (ประเทศไทย) จำกัด โทร. 3840026, 3841011-2
	บริษัท คีเอชทีเมทัลลิส จำกัด โทร. 2948897-8, 2947158-00		บริษัท สหมิตรเคอมีคอล จำกัด โทร. 2267300, 2367374		KOSHURA	บริษัท จูททวไร จำกัด โทร. 2940000-8
KRUPP	บริษัท สตีลเมทซ์อินดัสทรี จำกัด โทร. 3151490, 3151466, 3151938	ASSAB UDDEHOLM	บริษัท สอนสมสตีล (ประเทศไทย) จำกัด โทร. 3955937-42	DAIDO	บริษัท เอ. ฮี. นค. สตีล จำกัด โทร. 2912410, 2912354 พณ. กร่างวานส์อิน โทร. 2941880-0
Edelstahl Buderus	บริษัท สตีลเมทซ์อินดัสทรี จำกัด โทร. 2945806-11				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-5 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่าง ๆ

ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่าง ๆ

ความแข็ง ร็อกเวลล์ (HV)	ความแข็งบริเนลล์ (HB) ลูกบอลเหล็ก 10 มม.แรง 3000 กก.			ความแข็งร็อกเวลล์ (HR)				จุดแข็งยูเปอร์ไทเทเนียม หน่วย			SHORE	ความต้าน แรงดึง ก.ก./ม.ม. ²	ความแข็ง ร็อกเวลล์ (HV)
	ลูกบอลเหล็ก มาตรฐาน	ลูกบอลเหล็ก Multi-ball	ลูกบอลเหล็ก พิเศษเฉพาะ โน้ต	สเกล A แรง 30 ก.ก. หน่วย	สเกล B แรง 100 ก.ก. หน่วย	สเกล C แรง 150 ก.ก. หน่วย	สเกล D แรง 300 ก.ก. หน่วย	สเกล 45-H แรง 18 ก.ก.	สเกล 30-H แรง 30 ก.ก.	สเกล 45-H แรง 45 ก.ก.			
940	-	-	-	85.6	-	68.0	76.9	93.2	84.4	75.4	97	-	940
920	-	-	-	85.3	-	67.5	76.5	93.0	84.0	74.8	96	-	920
900	-	-	-	85.0	-	67.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95	-	900
880	-	-	-	84.7	-	66.4	75.7	92.7	83.1	73.6	93	-	880
860	-	-	767	84.4	-	65.9	75.3	92.5	82.7	73.1	92	-	860
			757										
			745	84.1	-	65.3	74.8	92.3	82.2	72.2	91	-	840
840	-	-	733	83.8	-	64.7	74.3	92.1	81.7	71.8	90	-	820
820	-	-	722	83.4	-	64.0	73.8	91.8	81.1	71.0	88	-	800
800	-	-	710	83.0	-	63.3	73.3	91.5	80.4	70.2	87	-	780
780	-	-	698	82.6	-	62.5	72.6	91.2	79.7	69.4	86	-	760
760	-	-											
			684	82.2	-	61.8	72.1	91.0	79.1	68.6	84	-	740
740	-	-	670	81.8	-	61.0	71.5	90.7	78.4	67.7	83	-	720
720	-	-	656	81.3	-	60.1	70.8	90.3	77.6	66.7	81	-	700
700	-	61.5	647	81.1	-	59.7	70.5	90.1	77.2	66.2	-	-	690
690	-	610	638	80.8	-	59.2	70.1	89.8	76.8	65.7	80	232	680
680	-	603											
			597	80.6	-	58.8	69.8	89.7	76.4	65.3	-	228	670
670	-	590	620	80.3	-	58.3	69.4	89.5	75.9	64.7	79	-	660
660	-	585	611	80.0	-	57.8	69.0	89.2	75.5	64.1	-	221	650
650	-	578	601	79.8	-	57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	77	-	640
640	-	571	591	79.5	-	56.8	68.3	88.8	74.6	63.0	-	217	630
630	-												
			564	79.2	-	56.3	67.9	88.5	74.2	62.4	75	210	620
620	-	557	573	78.9	-	55.7	67.5	88.2	73.6	61.7	-	207	610
610	-	550	564	78.8	-	55.2	67.0	88.0	73.2	61.2	74	203	600
600	-	542	554	78.4	-	54.7	66.7	87.8	72.7	60.5	-	200	590
590	-	535	545	78.0	-	54.1	66.2	87.5	72.1	59.9	72	196	580
580	-												
			527	77.8	-	53.6	65.8	87.2	71.7	59.3	71	193	570
570	-	519	525	77.4	-	53.0	65.4	86.9	71.2	58.6	-	189	560
560	-	512	517	77.0	-	52.3	64.8	86.6	70.5	57.8	-	186	550
550	505	503	507	76.7	-	51.7	64.4	86.3	70.0	57.0	69	183	540
496	496	495	497	76.4	-	51.1	63.9	86.0	69.5	56.2	-	179	530
530	488												
			487	76.1	-	50.5	63.5	85.7	69.0	-	67	176	520
520	480	479	479	75.7	-	49.8	62.9	85.4	68.3	54.7	-	173	510
510	473	471	471	75.3	-	49.1	62.2	85.0	67.7	53.9	66	169	500
500	465	460	460	74.9	-	48.4	61.6	84.7	67.1	53.1	-	165	490
490	456	452	452	74.5	-	47.7	61.3	84.3	66.4	52.2	64	162	480
480	448												
			442	74.1	-	46.9	60.7	83.9	65.7	51.3	-	158	470
470	441	433	433	73.6	-	46.1	60.1	83.6	64.9	50.4	62	155	460
460	433	425	425	73.3	-	45.3	59.4	83.2	64.3	49.4	-	151	450
450	425	415	415	72.8	-	44.5	58.8	82.8	63.5	48.4	59	148	440
440	415	405	405	72.3	-	43.6	58.2	82.3	62.7	47.4	-	144	430
430	405												
			397	71.8	-	42.7	57.5	81.8	61.9	46.4	57	141	420
420	397	388	388	71.4	-	41.8	56.8	81.4	61.1	45.3	-	137	410
410	388	379	379	70.8	-	40.8	56.0	81.0	60.2	44.1	55	134	400
400	379	369	369	70.3	-	39.8	55.2	80.3	59.3	42.9	52	130	390
390	369	360	360	69.8	(110.0)	38.8	54.4	79.8	58.4	41.7	-	127	380
380	360												
			350	69.2	-	37.7	53.6	79.2	57.4	40.4	-	123	370
370	350	341	341	68.7	(109.0)	36.6	52.8	78.6	56.4	39.1	50	120	360
360	341	331	331	68.1	-	35.5	51.9	78.0	55.4	37.8	-	117	350
350	331	322	322	67.6	(108.0)	34.4	51.1	77.4	54.4	36.5	47	113	340
340	322	313	313	67.0	-	33.3	50.2	76.8	53.6	35.2	-	110	330
330	313												
			303	66.4	(107.0)	32.2	49.4	76.2	52.3	33.9	45	106	320
320	303	294	294	65.8	-	31.0	48.4	75.6	51.3	32.5	-	103	310
310	294	284	284	65.2	(105.5)	29.8	47.5	74.9	50.2	31.1	42	99	300
300	284	280	280	64.8	-	29.2	47.1	74.6	49.7	30.4	-	98	295
295	280	275	275	64.5	(104.5)	28.5	46.5	74.2	49.0	29.5	41	96	290
290	275												
			270	64.2	-	27.8	46.0	73.8	48.4	28.7	-	94	285
285	270	265	265	63.8	(103.5)	27.1	45.3	73.4	47.8	27.9	40	92	280
280	265	261	261	63.5	-	26.4	44.9	73.0	47.2	27.1	-	91	275
275	261	256	256	63.1	(102.0)	25.6	44.3	72.6	46.4	26.2	38	89	270
270	256	252	252	62.7	-	24.8	43.7	72.1	45.7	25.2	-	87	265
265	252												
			247	62.4	(101.0)	24.0	43.1	71.6	45.0	24.3	37	85	260
260	247	243	243	62.0	-	23.1	42.2	71.1	44.2	23.2	-	82	255
255	243	238	238	61.6	-	22.2	41.7	70.6	43.4	22.2	36	80	250
250	238	233	233	61.2	-	21.3	41.1	70.1	42.5	21.1	-	78	245
245	233	228	228	60.7	-	20.3	40.3	69.6	41.7	19.9	34	76	240
240	228												
			219	-	-	96.7	(18.0)	-	-	-	33	71	230
230	219	209	209	-	-	95.0	(15.7)	-	-	-	32	68	220
220	209	200	200	-	-	93.4	(13.4)	-	-	-	30	65	210
210	200	190	190	-	-	91.5	(11.0)	-	-	-	29	62	200
200	190	181	181	-	-	89.5	(8.5)	-	-	-	28	59	190
190	181												
			171	-	-	87.1	(6.0)	-	-	-	26	56	180
180	171	162	162	-	-	85.0	(3.0)	-	-	-	25	53	170
170	162	152	152	-	-	81.7	(0.0)	-	-	-	24	50	160
160	152	143	143	-	-	78.7	-	-	-	-	22	46	150
150	143	133	133	-	-	75.0	-	-	-	-	21	44	140
140	133												
			124	-	-	71.2	-	-	-	-	20	40	130
130	124	114	114	-	-	66.7	-	-	-	-	-	-	120
120	114	105	105	-	-	62.3	-	-	-	-	-	-	110
110	105	95	95	-	-	56.2	-	-	-	-	-	-	100
100	95	90	90	-	-	52.0	-	-	-	-	-	-	95
95	90												
			86	-	-	48.0	-	-	-	-	-	-	90
90	86	81	81	-	-	41.0	-	-	-	-	-	-	85
85	81												

หมายเหตุ (1) ค่าที่หาคือเป็นพื้นฐานได้จาก ASTM E 48-83
(2) ค่าในวงเล็บไม่ค่อยได้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

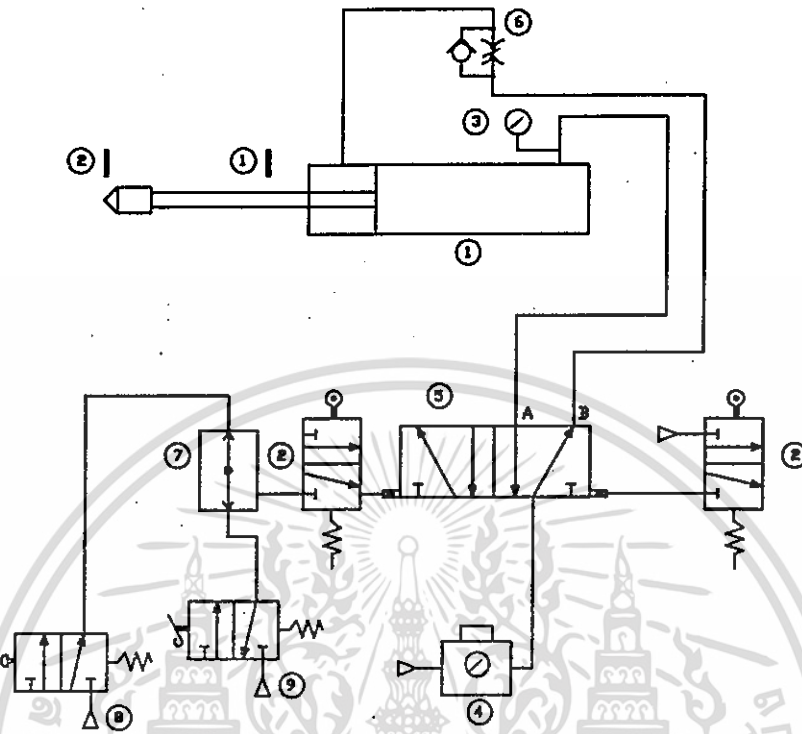
ภาคผนวก ก

อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-1 Diagram และชุดอุปกรณ์ Control ระบบการทำงานของระบบ Pneumatic

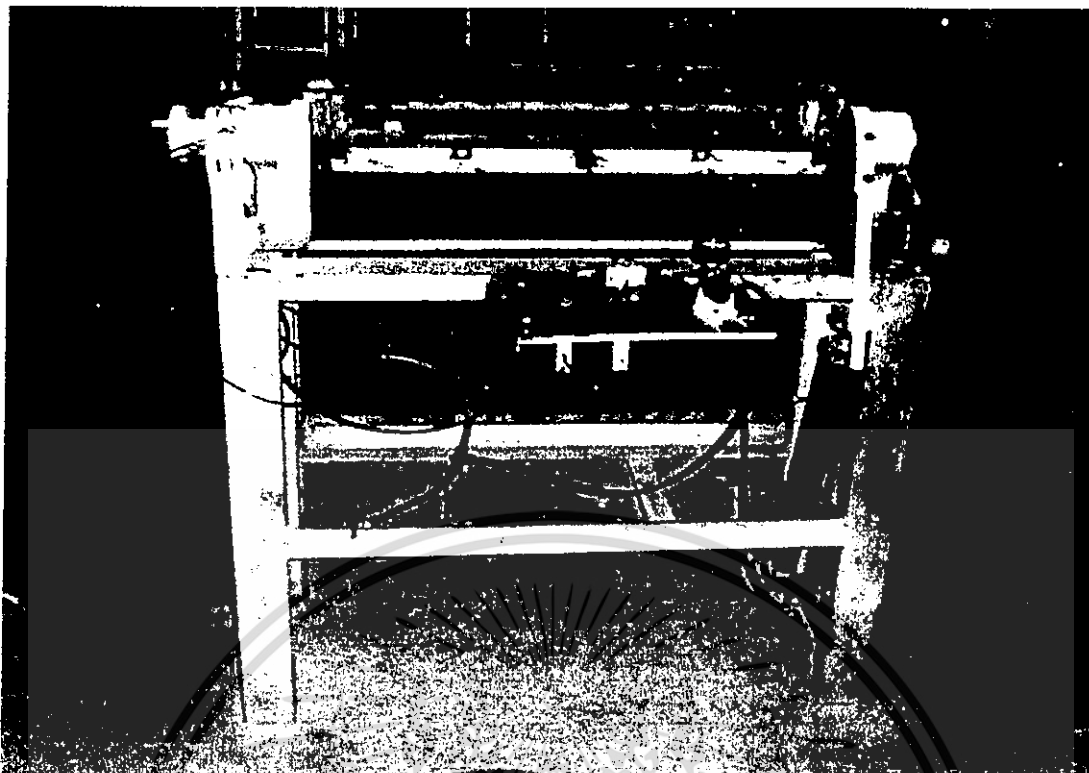


รูปที่ ค-1-1 แสดง Diagram ระบบ Pneumatic ของระบบ Control

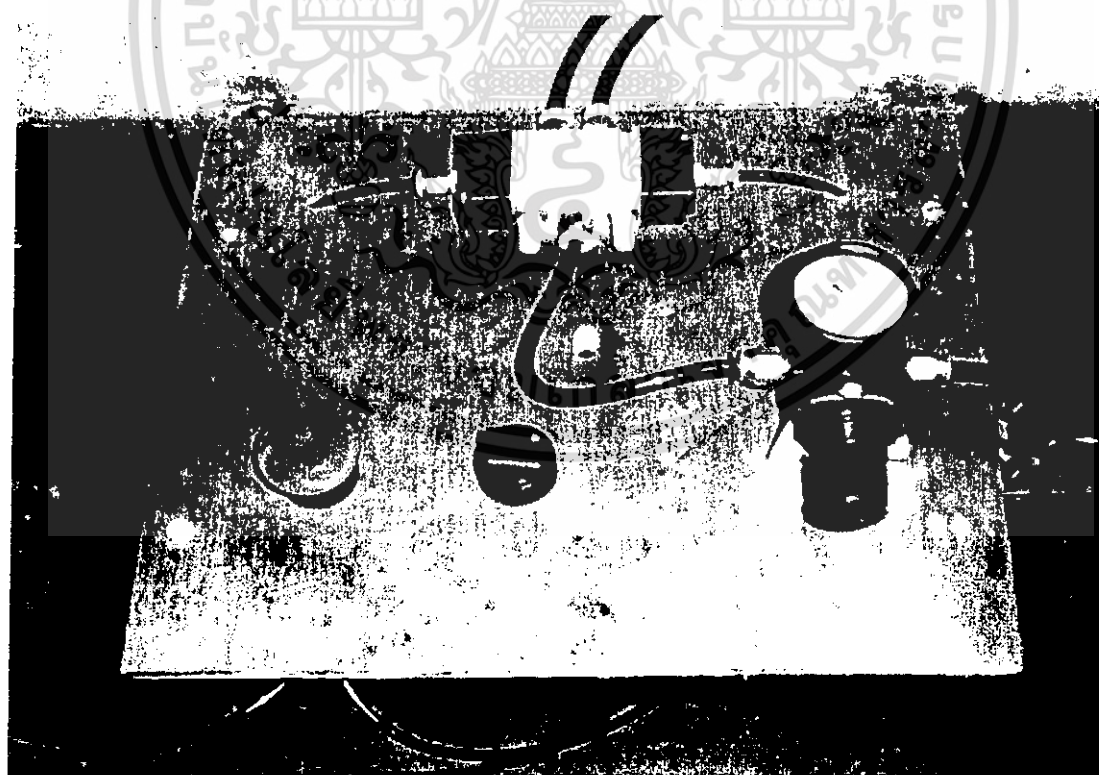
รายการอุปกรณ์ Pneumatic ของเครื่องทดสอบ

1. Cylinder
2. Lever Roller – Spring 3/2
3. Pressure Gauge
4. Regulator + Gauge
5. Valve 5/2
6. Throttle Valve
7. Shuttle Valve
8. Push Bottom 3/2
9. Push Bottom 2 Port 3/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

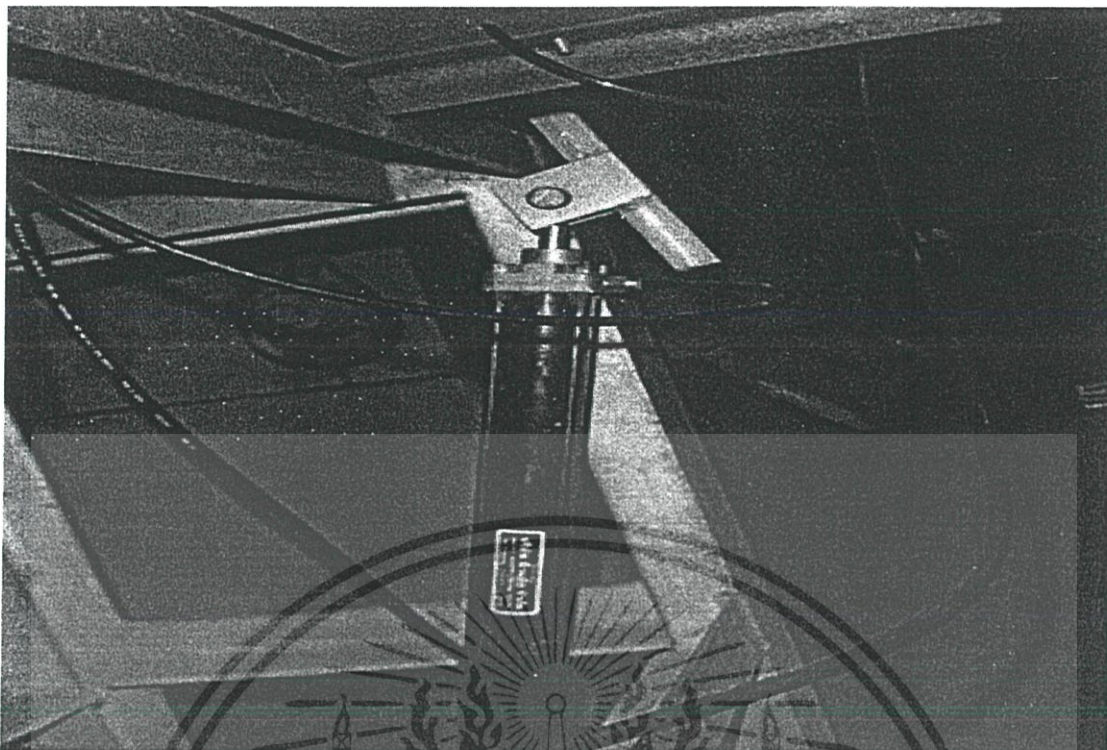


รูปที่ ก-1-2 แสดงเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ

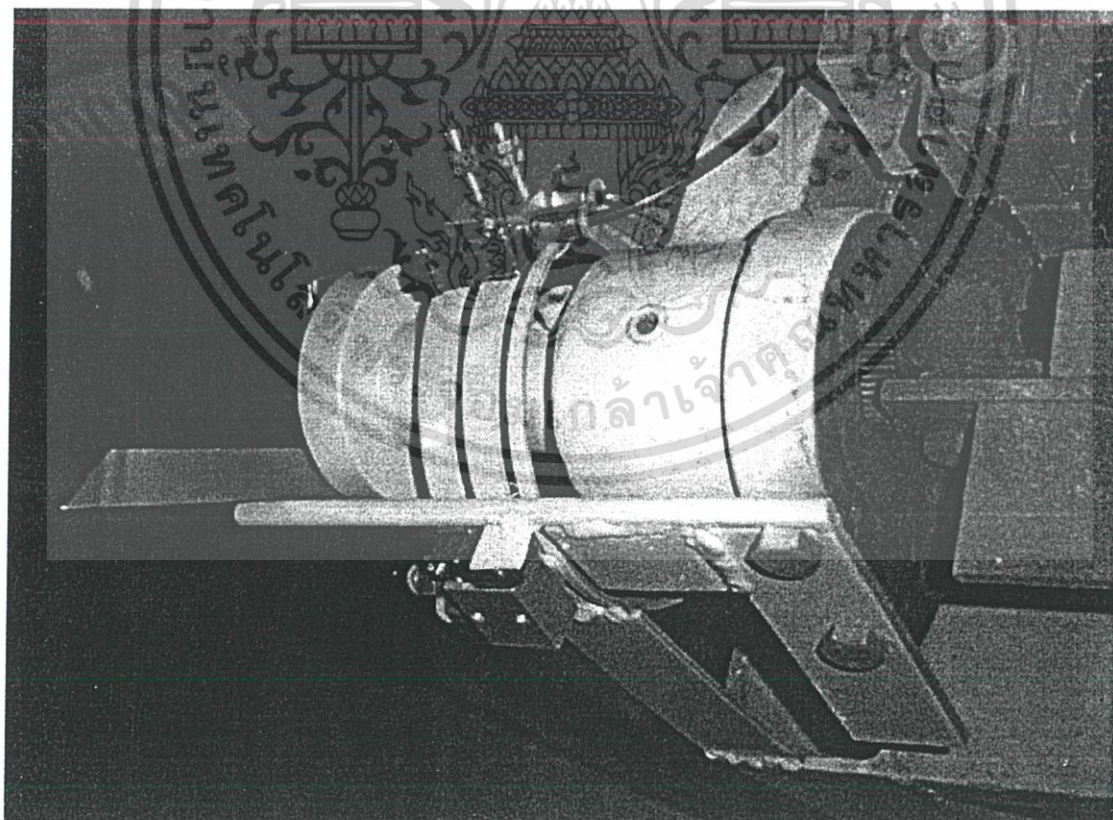


รูปที่ ก-1-3 แสดงแผนผังควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

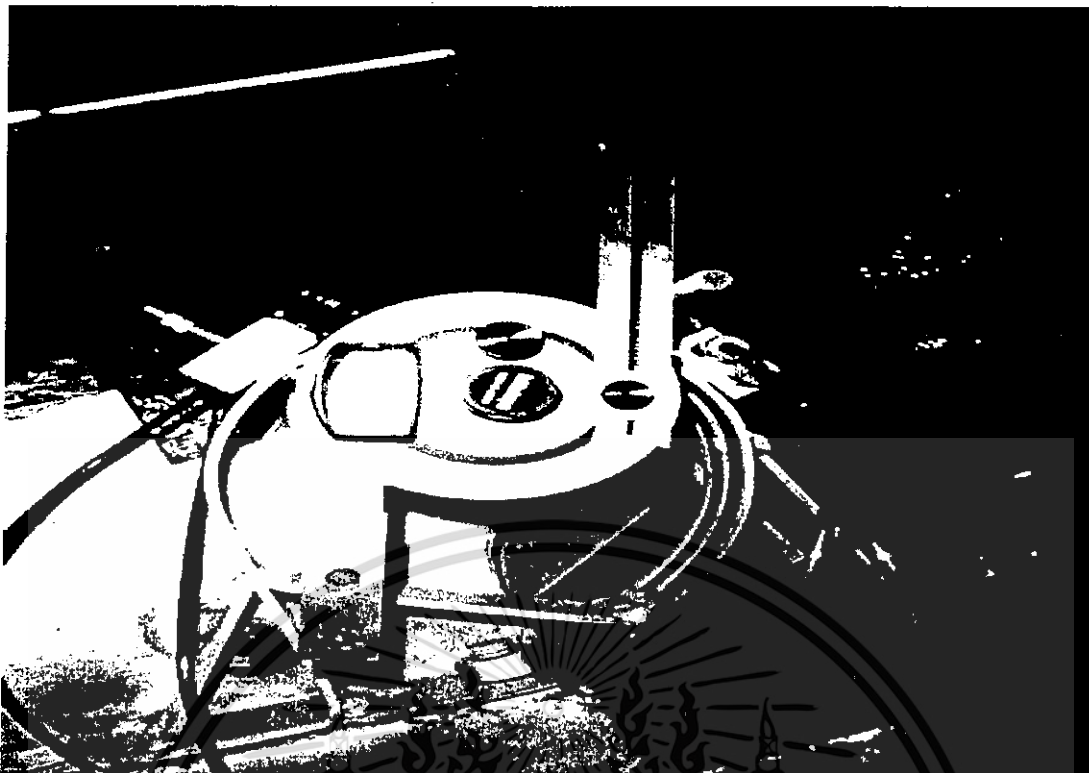


รูปที่ ก-1-4 แสดงการติดตั้งชุดกระบอกระบบ Pneumatic กับเครื่องทดสอบ



รูปที่ ก-1-5 แสดงการติดตั้ง Lever Roller – Spring 3/2 กับเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

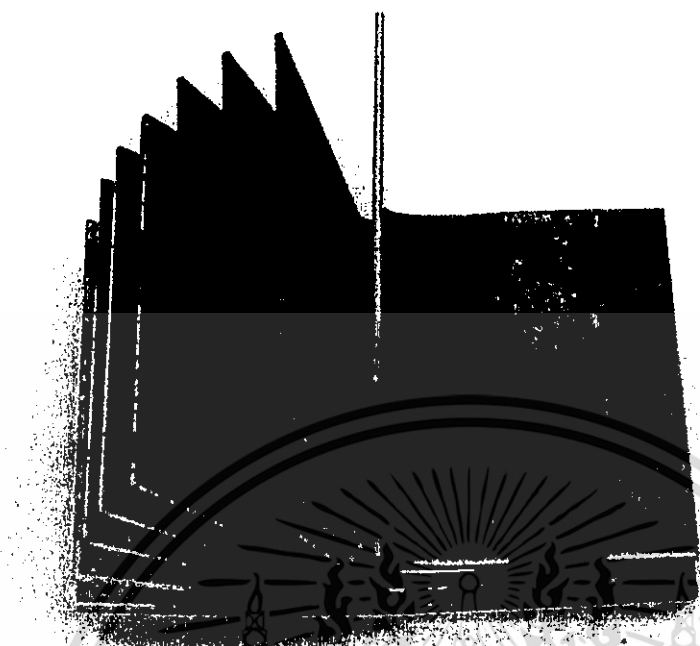


รูปที่ ก-1-6 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดองศาการทดสอบ



รูปที่ ก-1-7 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดสอบหาค่าการเกิดการตีกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-1-8 แสดงวัสดุที่ได้หลังจากการพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความที่ได้ขึ้นประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง-1 การศึกษาการชดเชยการดีดกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC

(A Study on Compensation of Springback of S50C and SPCC Steel Sheets)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

หน้าแรก
ประวัติเครือข่าย
วัตถุประสงค์
บทความ
คณะกรรมการ
ข้อมูลทั่วไป
สถานที่
ข้อมูลห้องเช่า
ติดต่อเรา
คู่มือระบบ
สมาชิกเครือข่าย

การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

ระหว่างวันที่ 18-20 ตุลาคม 2547

ณ โรงแรมโซฟิเทล ราชาออร์คิด ขอนแก่น

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

"ครบรอบ 30 ปี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล"
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

สาขาวิชาในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
ไทย ครั้งที่ 18
ระหว่างวันที่ 18-20 ตุลาคม 2547
ณ โรงแรม โซฟีเทล ราชอาณาจักร ชอนแก่น

หน้าแรก
ประวัติเครือข่าย
วัตถุประสงค์
บทความ
คณะกรรมการ
ข้อมูลทั่วไป
สถานที่
ข้อมูลห้องเช่า
ติดต่อเรา
ผู้สนับสนุน
สมาชิกเครือข่าย

รหัสสาขา	ชื่อสาขาวิชา
TSE	Thermal System and Fluid Mechanics
DSC	Dynamic Systems and Control
AMM	Applied Mechanics, Materials and Manufacturing
ETM	Energy Technology and Management
CST	Computational & Simulation Techniques
AME	Aerospaces & Marine Engineering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- หน้าแรก
- ประวัติเครื่องช่าง
- วัตถุประสงค์
- บทความ
- คณะกรรมการ
- ชื่องานทั่วไป
- สถานที่
- ข้อมูลท่องเที่ยว
- ติดต่อเรา
- ติดตามงาน
- สมาชิกเครื่องช่าง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

หมายเลขบทความ	ชื่อบทความ	TYPE OF PRESENT
AMM01	ผลกระทบจากความเร็วของมีดพร้อมต่อความสูญเสียของเส้นใยในการทอพรอม : กรณีศึกษาโรงงานผลิตพรอม	Poster
AMM02	การศึกษากฎพื้นฐานและหลักการออกแบบ GATE และ RUNNER ของชิ้นงาน LOCKING KNOB ในอุตสาหกรรมโคมไฟโดยใช้เทคนิคการจำลองวิธีการหล่อฉีดขึ้นรูป	Oral
AMM03	ความเค้นในท่อยาวเหนือไฟ	Oral
AMM04	การวิเคราะห์การขึ้นรูปหล่อฉีดขึ้นรูปโคมไฟ	Oral
AMM05	การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแผ่นเวลาดิจิทัลสำหรับแม่พิมพ์กดและแม่พิมพ์ถักออนไลน์	Oral
AMM06	การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในการกัดขึ้นรูปตัวโรลโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกโดยวิธีไฟในดีแอลเอ็ม	Oral
AMM07	แนวทางการผลิตเครื่องแม่พิมพ์พร้อมหล่อฉีดขึ้นรูป	Poster
AMM08	การประยุกต์ใช้สมการคอนสแตนต์ของบาร์นอร์เฟสสำหรับศึกษาพฤติกรรม การแปลงรูปของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูป	Oral
AMM09	เครื่องผลิตขนมปังแก้วอัตโนมัติโดยควบคุมการเคลื่อนของมอเตอร์เพื่อใช้ ในกระบวนการแปรรูปอาหาร	Poster
AMM10	อิทธิพลของการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นด้วยเทคนิคการขึ้นรูป	Oral
AMM11	ความเค้นในท่อเนื่องจากความดันภายในตัวถัง	Oral
AMM12	การศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวในโลหะเชื่อมด้วยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีแบบเรียลไทม์	Oral
AMM13	การวิเคราะห์ความเค้นในสกรูและแผ่นโลหะรับแรงอัดทางพลศาสตร์ที่ยึดติดอยู่บน กระดุกขังท้ายของเครื่องบิน	Oral
AMM14	An Investigation of the Effects of the Cutting Parameters on Surface Quality and Tool Wear in Solid Parawood Machining Process	Oral
AMM15	การศึกษาของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อและระบบวิธีไฟในดีแอลเอ็ม	Oral
AMM16	การจำลองวัสดุโพลีคาร์บอเนตในเชิงเส้นของอ่างผสมคาร์บอนภายใต้การหล่อ	Oral
AMM17	การทดสอบสมบัติของวัสดุโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในแม่พิมพ์ในดีแอลเอ็ม	Oral
AMM18	การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบของแม่พิมพ์หล่อฉีดขึ้นรูป	Oral
AMM19	การสร้างและทดสอบกับท่อเหล็ก	Poster
AMM20	อิทธิพลของรูปร่างที่ขึ้นรูปต่อการขึ้นรูปของแม่พิมพ์โดยวิธีไฟในดีแอลเอ็ม	Oral
AMM21	สมบัติของยางธรรมชาติเสริมด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ - ความเหนียวและสมบัติเชิงกล	Oral
AMM22	การวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อแบบกาวสำหรับวัสดุที่ไม่เหมือนกันภายใต้การรับแรงดึง	Oral
AMM23	การหาประสิทธิภาพในการขึ้นรูปขึ้นรูปในช่วงขนาดต่างของเครื่องขึ้นรูปแบบเมกานิคคอลล	Oral
AMM24	การศึกษาผลของแรงเสียดทานโดยใบของผสมอะครีลาไมด์ โพลีเอสเตอร์ ที่มีต่อต้นทุนพลังงานในการขึ้นรูปขึ้นรูป ไดนของกรุงเทพมหานคร	Oral
AMM26	พฤติกรรมการหล่อขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM27	การศึกษาอิทธิพลของความสูงคาบและเส้นรอบวงวิธีการขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM28	คุณสมบัติของไฟโพลีคาร์บอเนตสำหรับการขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM29	การวิเคราะห์และปรับปรุงเครื่องขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM30	การศึกษารูปแบบการขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM31	การศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรเตอร์ต่อคุณสมบัติของ โลหะผสมจำรูป Ti-Ni-Cu ผลิตโดยวิธี Melt-Spining	Oral
AMM32	Balancing gate and runner for family mould using CAE tools	Oral
AMM33	การวิเคราะห์โครงสร้างและรอยแตกสำหรับการขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM34	อิทธิพลของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	Oral
AMM35	การทดสอบหาค่าสมบัติเชิงกลและการจำลองการขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM36	เครื่องขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral
AMM37	The First 100-kN Force Interlaboratory Comparison in Thailand	Poster
AMM38	An observation on non-linear behaviour in condition monitoring	Oral
AMM39	พฤติกรรมการขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นรูป	Oral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

- ☑ วิทยากร
- ☑ ประเด็นวิจัย
- ☑ วัตถุประสงค์
- ☑ บทความ
- ☑ คณะกรรมการ
- ☑ ชื่อสาขาไป
- ☑ สถานที่
- ☑ ชื่อแหล่งเผยแพร่
- ☑ คัดสรร
- ☑ ผู้สนับสนุน
- ☑ สมาชิกเครือข่าย

AMM40	การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องส่งถ่ายกำลังแบบ	Oral
AMM41	การศึกษาการขบเคี้ยวการติดกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC	Oral
AMM42	The study of notch's effect on life cycles under axial load of material AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6	Oral
AMM43	A comparison of experimental buckling load of rectangular plates determined from various measurement methods	Oral
AMM44	การทำนายค่าความเค้นครากของเหล็กเส้นสำหรับเสริมคอนกรีตโดยใช้โครงข่ายใยประสาทเทียม	Oral
AMM45	Measurement of Shaft Vibration Using Radar for Rolling Element Bearing Diagnostic	Oral
AMM46	การวิจัยและพัฒนาโมดูลจลนหมุนสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทยตอนที่ 1 การหาคุณสมบัติและวัดแรงต้านทานพลศาสตร์ที่กระทำกับโมดูลจลนหมุน	Oral
AMM47	การประยุกต์ทฤษฎีบทพลังงานเพื่อหาตัวประกอบขนาดรวม	Oral
AMM48	Projection Network for Machine Fault Detection and Diagnosis	Oral
AMM49	An experiment verification of the scaling law for buckling of cross-ply composite plates	Oral
AMM50	การสร้างเพลาลูกเบี้ยวแบบต่อเนื่อง	Oral
AMM51	Development of Semi-Analytical Approach for Wing Structural Weight Estimation	Oral
AMM52	Modeling of Metal Power Compaction using the Modified Drucker-Prager Cap Model	Oral
AMM53	Structural Compliance Minimisation Using Evolutionary Algorithms with Surface Spline Interpolation	Poster
AMM54	Structural Vibration Alleviation via Evolutionary Optimisation	Poster
AMM55	Aeroelastic Design of an AI-Moveable UAV Fin	Poster
AMM56	Acoustical Performance of Single Helmholtz Resonator-Type Silencers with Air Flow Inside a Duct	Oral
AMM57	พฤติกรรมด้านไดนามิกของตัวสัมผัสระหว่างเหล็กทำคิมและเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการจำลองการทำงานบนเครื่องแบบ Ball-on-disk	Oral
AMM58	Experimental Investigation of Hydrodynamic Journal Bearings with Non-Newtonian Soybean-Based Oils	Oral
AMM59	การลดปัญหาการพ่นของปืนงานมือหมุนในกรณีการต่อติดสังกะสีผสม	Oral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การศึกษาการชดเชยการตีดกลับของเหล็กแผ่นชนิด S50C และ SPCC

A Study on Compensation of Springbacks of S50C and SPCC Steel Sheets

ภาสกร จำปาเงิน* ทวี เทศเจริญ**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

โทร 0-23264197 โทรสาร 0-23264198 E-mail: phasakorn_79@hotmail.com

Phasakorn Champargern* Thavee Teschareon**

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
NongChok, Bangkok, 10530, Thailand

Tel: 02-3264197 Fax: 02-3264198 E-mail: phasakorn_79@hotmail.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาพฤติกรรมการตีดกลับและการชดเชยการตีดกลับโดยวิธีการพับขึ้นรูปแบบคงรูปที่ทำให้วัสดุเกิดแรงกดพ้นจนเกินจุด Yield Strength ซึ่งทำให้วัสดุเกิดการยืดตัว แต่ก็มีค่าความเค้นที่ตกค้างอยู่ซึ่งทำให้วัสดุนั้นตีดกลับมาบางส่วนวัสดุ S50C และ SPCC โดยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะ เป็นการทดสอบโดยวิธีการพับขึ้นรูปตัววี เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบโยก กระบวนการทดสอบเริ่มจากนำเอาชิ้นทดสอบมาตรวจหาคุณสมบัติเชิงกล เช่น ตรวจสอบการรับแรงดึงและการตรวจสอบหาความแข็งแบบร็อกเวลแบบวิกเกอร์ ตลอด จนหาสารผสมในเนื้อวัสดุ โดยที่ขนาดของชิ้นทดสอบอยู่ที่ 70 x 50 มิลลิเมตร ทำการพับที่มุมต่างๆ ในการทดสอบจะใช้ระบบนิวแมตริกเป็นตัวส่งกำลัง, ควบคุมระยะเวลาการพับรวมถึงอัตราความเร็วในการพับ ซึ่งจะทำให้การพับจะเท่ากันทุกช่วงการทดสอบ จากชิ้นทดสอบที่ได้จะนำไปวัดหามุมองศาของการตีดกลับของวัสดุ ผลการทดสอบเหล็กทั้งสองชนิดมีการตีดกลับ หลังจากการพับ เหล็กที่มีความเค้นสูงจะเกิดการตีดกลับมาก ถ้าพับให้มุมองศามากขึ้นการเกิดการตีดกลับจะลดลงการพับเหล็กในองศาที่มากกว่าจะได้องศาตามต้องการและเมื่อพับเหล็กเลยจุดแรงดึงสูงสุดจะทำให้ชิ้นงานแตก

Abstract

The objective of this research was to study on mechanical action of springback and to recover of springback by means of materials. Standing model which the materials have forced to press bending to exceed Yield strength and then the materials have to stretch and residual stress to take place a partially springback on S50C and SPCC which mostly used in metal shaping industry. The investigation of these used materials V-

bending machine with the help of a rocking-type tester. The testing process commenced from testing the mechanical properties of sample materials: (a tensile strength test , a Rackwell, Vicker hardness test) and material mixture analyzing. The dimension of specimens was 70 x 50 mm, with different angles. The pneumatic system was used as a power transmitter for bending duration and speed controller in order to obtain the steady bendings throughout the test. After that the springback angles of the materials were measured. It was found that both types of specimens had their own springback properties. After the bending process it was found that the higher stress occurred the more increasingly in springback property occurred but the angles increases, the springback property became less. To obtain the angle required, the specimens bending angles had to exceed bent. But such bending angle exceeded its tensile strength limit, the specimens were broken.

1. บทนำ

การเกิด Springback เป็นอันตรายในการประดิษฐ์ส่วนประกอบต่างๆ ทั้งทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างรถยนต์ เครื่องบิน อุปกรณ์สำนักงาน อีกทั้งภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม Springback ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเสียหายกับวัสดุที่ทำการผลิต การหาวิธีลดการเกิด Springback ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้ผลผลิตที่ดี ทั้งทางด้านความแข็งแรง ความสวยงามของพื้นผิว ความแม่นยำของชิ้นงานรวมทั้งราคาไม่สูง การพับวัสดุโดยเพิ่มแรงกดทำให้องศาโค้งรูปร่างไป พลังงานยืดหยุ่นที่อยู่ในส่วนโค้งเป็นสาเหตุทำให้วัสดุกับมาสู่สภาพเดิมบางส่วน การเกิด Springback มากหรือน้อย เป็นผลมาจากองศาการพับและรัศมีของมุม

* นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

พับ รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ จุดประสงค์หลักของการทดลองนี้ เพื่อทำการศึกษาลักษณะการเกิด Springback ของวัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุ SPCC และ วัสดุ S50C ซึ่งมีค่าทางกายภาพที่แตกต่างกันโดยทางปฏิบัติและทางทฤษฎี และทำการชดเชยการเกิด Springback

2. ทฤษฎี

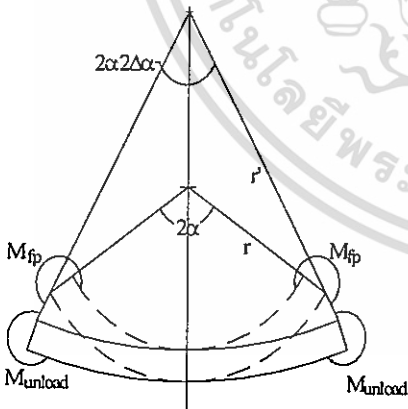
การขึ้นรูปโลหะด้วยการพับขึ้นรูป เมื่อให้โหลดกับวัสดุ (M_{fp}) วัสดุจะเกิดการงอตัวความเค้นจะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ หลังจากวัสดุไม่ได้รับโหลด (M_{unload}) วัสดุจะเกิดการงอตัวเกิดขึ้น แต่มุมที่เกิดขึ้นไม่เท่ากับมุมที่เกิดจากการรับโหลด เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะวัสดุเกิดการ Springback (K_s) จากรูปที่ 2.1 แสดงรูปร่างระหว่างวัสดุที่รับโหลดกับวัสดุที่ไม่มีโหลด

$$K_s = \frac{\alpha - \Delta\alpha}{\alpha} \tag{2.1}$$

โดยที่
$$K_s = 1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \tag{2.2}$$

จากการพยายามที่จะกลับสู่สภาพปกติ ความเค้นตกค้างส่งผลให้วัสดุเกิดการตีกลับมาบางส่วน ความแตกต่างของครึ่งของมุมการงอที่เกิดจากการ Springback; $\Delta\alpha$

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายที่มา โดยการสันนิษฐาน ให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบ Isotropic จากสภาวะการดึงผิว หรือความดึงเครียดที่เกิดจากการโค้งงอของวัสดุ σ



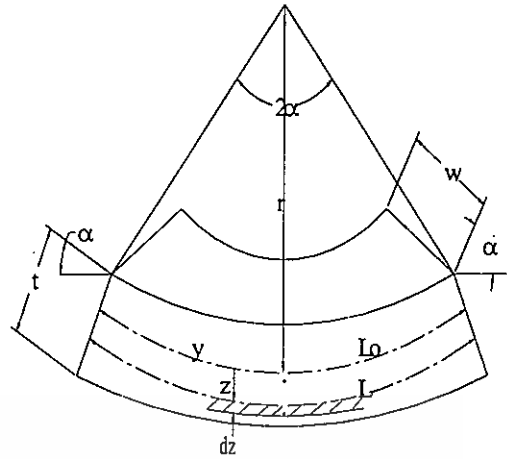
รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์การเกิด Springback

โดยที่
$$\sigma_0 = Y' \tag{2.3}$$

Y' = ค่า Yield Stress ที่แนวระนาบ จากสมการ

$$Y' = 1.15 Y_0 \tag{2.4}$$

กำหนดให้ Y_0 คือ Yield stress ในแนวแกน



รูปที่ 2.2 แสดงพิกัดสำหรับการวิเคราะห์ระบบการงอ

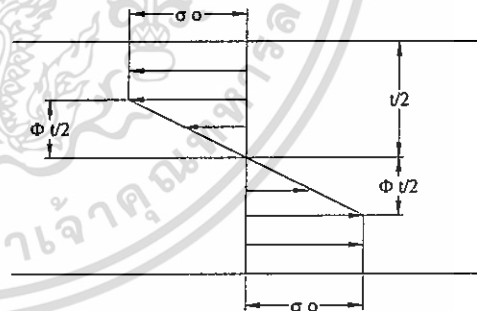
จากการวิเคราะห์รูปที่ 2.2 ความเค้น σ ความเครียด ϵ ในกระบวนการพับ จะกระจายไปตามแกน Z การวิเคราะห์ค่าของ elastic perfect plastic ของวัสดุ M_{fp} สามารถหาได้จากสมการรูปที่ 2.3

$$\sigma_y = \begin{cases} \frac{zE}{r(1-\nu^2)} \\ \sigma_0 \end{cases} \tag{2.5}$$

$$0 \leq |z| \leq \phi v/2 \text{ ถึง } \phi v/2 \leq |z| \leq v/2$$

ค่า E คือค่า Young's modulus

ν คือค่า Poisson ratio



รูปที่ 2.3 แสดงความเค้นกระจายช่วง Elastic และ Plastic

จากการโค้งงอให้เกิดปัจจัยสำคัญที่สามารถ คำนวณสมการได้ดังนี้

$$M_{fp} = 2 \int_0^{v/2} \sigma_y z dz \tag{2.6}$$

แทนค่าสมการความเค้น 2.5 ลงในสมการที่ 2.6

$$M_{fp} = (\sigma_0) \frac{t^2}{4} - \sigma_0^3 \left[\frac{(1-\nu^2) \left(r_p + \frac{t}{2} \right)}{E} \right]^2 / 3 \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$r = r_p + \frac{t}{2} \tag{2.8}$$

r_p = รัศมีของ punch

จากข้อสรุป ความแตกต่างระหว่างการกระทำที่มี M_{fp} และไม่มี M_{unload} จากรูป 2.1 ค่าความแตกต่างของ Springback ที่ได้รับจากความเค้นที่เกิดขึ้น

$$\Delta \epsilon = \frac{z}{r} - \frac{z}{r'} \tag{2.9}$$

เงื่อนไขความเค้นแนวระนาบ

$$\sigma_y = \frac{\Delta \epsilon E}{(1 - \nu^2)} \tag{2.10}$$

เพราะฉะนั้น แทนสมการ 2.9 ลงใน 2.10

$$M_{unload} = \frac{2 E}{(1 - \nu^2)} \int_0^{t/2} \Delta \epsilon z dz$$

$$= \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \tag{2.11}$$

เนื่องด้วยการเคลื่อนตัวของชิ้นทดสอบในสภาวะที่ไม่มีโหลด ผลของ Moment มีค่าเป็น

$$M_{fp} - M_{unload} = 0 \tag{2.12}$$

K_s หาได้จาก

$$K_s = 1 - \frac{12(1 - \nu^2)(r_p / t + 1/2)M_{fp}}{Et^3} \tag{2.13}$$

ฉะนั้น แทนสมการ 2.7 และ 2.8 ในสมการ 2.13 ได้

$$K_s = 1 - 3(1 - \nu^2) \left(\frac{r_p}{t} + 1/2 \right) \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) + 4 \left[\left(\frac{r_p}{t} + 1/2 \right) \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \right]^2 \tag{2.14}$$

จากสมการ ถ้า $t \ll r_p$, ให้ $\nu = 0.366$

$$K_s = 1 - 3 \left(\frac{r_p Y_0}{E} \right) / (E / t) + 4 \left[\left(\frac{r_p Y_0}{E} \right) / (E / t) \right]^2 \tag{2.15}$$

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลสเกล C (HRC) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยการใช้หัวกดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรมีมุมยอดเท่ากับ 120 องศา ผลการตรวจสอบความแข็งของเหล็ก S50C แบบ HRC ได้ 26.8

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker, HV) ความแข็งจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่สัมผัสกับหัวกดเพชรรูปพีระมิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 130 องศา ส่วนน้ำหนักหรือแรงกดนั้นขึ้นอยู่กับผิวของชิ้นทดสอบ มีขนาดตั้งแต่ 1-200 กิโลกรัมโดยใช้เวลาในการกดประมาณ 10-30 วินาที ผลการตรวจสอบความแข็งของเหล็ก SPCC แบบ HV ได้ 99.7

3.2 การตรวจสอบหาส่วนผสมในเนื้อวัสดุ (Composition test)

การตรวจสอบส่วนผสมของวัสดุ S50C และ SPCC โดยใช้เครื่อง BΛIRD Spectrovac 1000 MODEL OV4 SERIAL 2054 ในการตรวจสอบจะใช้ก๊าซ ไฮโดรเจนเหลว ละลายเนื้อของวัสดุและทำการตรวจวัดและแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ S50C

Fe	98.353	C	0.4993	SI	0.2328	Mn	0.754	P	0.0341
S	0.0153	NI	0.0098	Cr	0.0233	Mo	0.0043	Cu	0.0063
V	0.0054	TI	0.0015	Al	0.0236	W	0.0356	Co	0.0001
Sn	0.0018								

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ SPCC

Fe	99.504	C	0.0394	SI	0.0096	Mn	0.208	P	0.0415
S	0.0182	NI	0.0167	Cr	0.0473	Mo	0.0053	Cu	0.0082
V	0.0037	TI	0.0014	Al	0.0564	W	0.0383	Co	0.0005
Sn	0.0019								

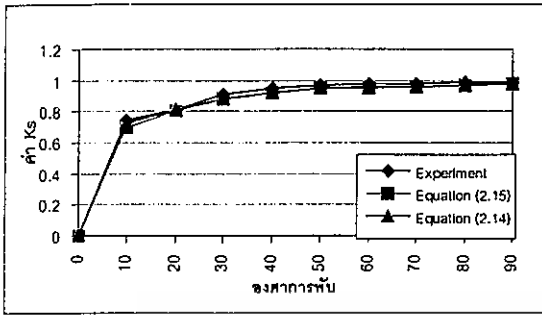
3.3 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบเป็นการประมาณความแข็งแรงของโลหะทำให้ทราบถึงข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบค่าความเค้นและความเครียดสามารถนำมาวิเคราะห์ในทางวิศวกรรม

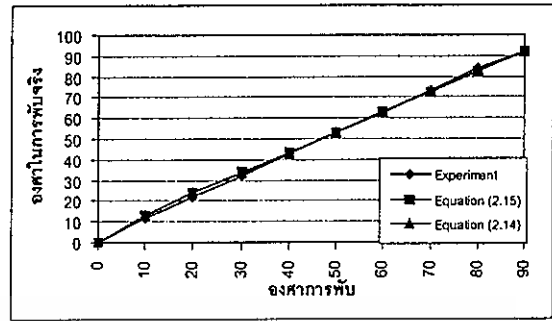
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความเค้นความเครียด

Material	Yield Strength	Elastic Modulus	Poisson Ratio
	[MPa]	[GPa]	[ν]
SPCC	300	210	0.291
S50C	1100	207	0.292

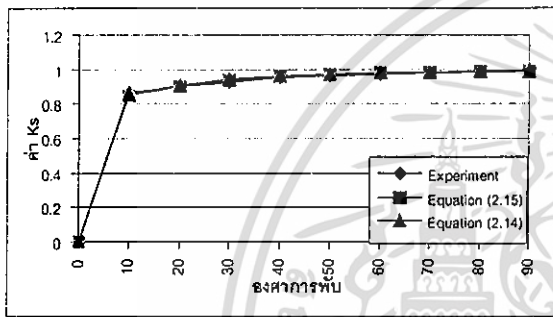
3.4 เปรียบเทียบการทดลองกับทฤษฎี



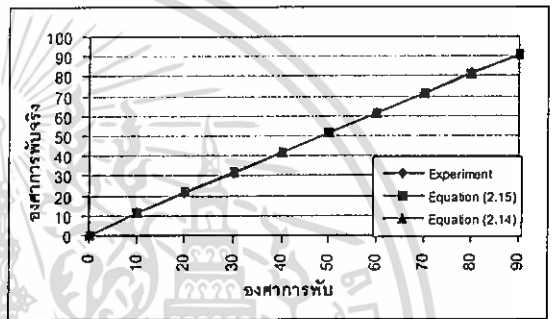
กราฟที่ 3.1 แสดงค่า K_s ที่เกิดจากการพับวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.



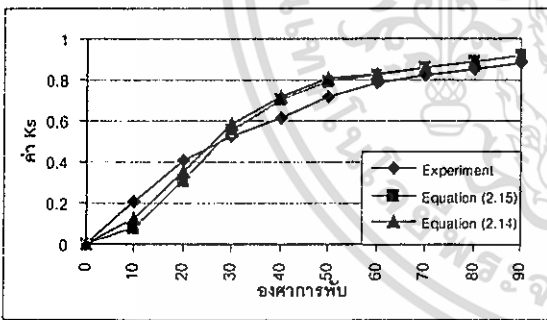
กราฟที่ 3.5 แสดงค่าชดเชยของศาการพับจริงของวัสดุ SPCC ขนาด 1 mm.



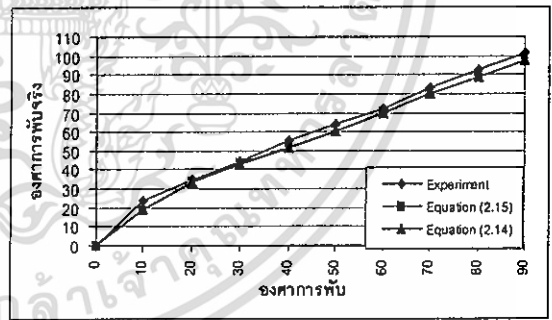
กราฟที่ 3.2 แสดงค่า K_s ที่เกิดจากการพับวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.



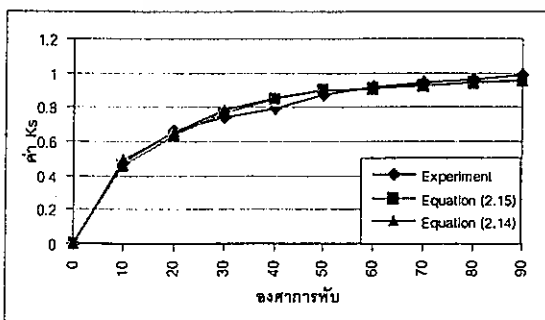
กราฟที่ 3.6 แสดงค่าชดเชยของศาการพับจริงของวัสดุ SPCC ขนาด 2 mm.



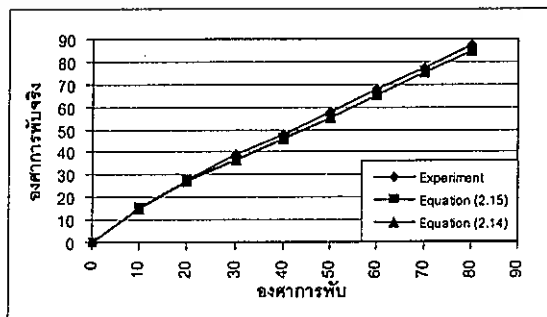
กราฟที่ 3.3 ค่า K_s ที่เกิดจากการพับวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.



กราฟที่ 3.7 แสดงค่าชดเชยของศาการพับจริงของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm.



กราฟที่ 3.4 ค่า K_s ที่เกิดจากการพับวัสดุ S50C ขนาด 2 mm.



กราฟที่ 3.8 แสดงค่าชดเชยของศาการพับจริงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่วัสดุ S50C ขนาด 2 mm. โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิด จึงทำให้ทราบว่าวัสดุแต่ละชนิดมีการตีกลับที่ไม่เท่ากัน อีกทั้งความหนาของวัสดุก็เป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการตีกลับ จากสมการที่นำมาวิเคราะห์ ค่าการตีกลับของวัสดุนี้ สามารถแสดงให้เห็นถึง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้น วัสดุจะยึดตัวออกจนเลยจุด Yield strength เมื่อถูกพับหลังจากถูกพับที่องศามากขึ้นทำให้เลยจุด Elastic ไปอยู่ในช่วง Plastic ซึ่งทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคงรูป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปในที่นี้ ก็ยังมีความเค้นที่แฝงตัวอยู่ในตัวของชิ้นงาน ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้มากจากความหนาของชิ้นงานนั่นเอง สามารถที่จะสังเกตได้จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าความเค้นที่อยู่ในช่วง Elastic จะอยู่ตรงด้านในใกล้เส้นกึ่งกลางของวัสดุ ส่วนช่วงที่เป็น Plastic จะอยู่ในช่วงด้านนอกหรือตรงผิวของชิ้นงาน ฉะนั้นเมื่อวัสดุไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในช่วง Plastic ได้ทั่วทั้งชิ้นทดสอบการเกิดการตีกลับเมื่อทำการพับวัสดุก็สามารถที่เกิดขึ้นได้เสมอ จากการทดสอบ ทั้งทางด้านทฤษฎีและทางด้านปฏิบัติ ซึ่งสามารถนำไปหาค่าการตีกลับของวัสดุชนิดอื่นๆ และนำค่าที่ได้ไปทดแทนเพื่อหาค่าการตีกลับที่เกิดขึ้นได้ดังเช่น กราฟที่ทำการทดลองไปข้างต้น จากกราฟที่ 3.1,3.2 จะเห็นว่าค่าการคำนวณที่ได้จากสมการ 2.14,2.15 มีความแตกต่างกับทางปฏิบัติเล็กน้อย แนวทางของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน การเกิด Springback จะมีความน้อยในช่วง 10-40 องศาหลังจากนั้น Springback จะลดลงมา เล็กลงๆ ทั้งนี้มาจากวัสดุอยู่ในช่วง Plastic วัสดุจะยึดตัวออกจนเลยจุด Yield strength จากกราฟที่ 3.3 แสดงค่า K_s (Springback) ที่เกิดขึ้นจากทางทฤษฎีและการทดลองของวัสดุ S50C ขนาด 1 mm. จากกราฟจะเห็นว่าค่าที่ออกมาแตกต่างจากกราฟตัวอื่น ค่าของ K_s ในทางปฏิบัติมีค่ามากในช่วง 10-20 และจะน้อยกว่าทฤษฎีในช่วง 30-90 ทั้งนี้มาจาก จุด Yield strength ของวัสดุมีค่าน้อยกว่าทำให้วัสดุยึดตัวมาก ทางทฤษฎี จากกราฟที่ 3.4 เส้นกราฟใกล้เคียงกัน แสดงว่าทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองและทฤษฎีไปในทางเดียวกัน จากการนำค่าของ K_s มาชดเชยในวัสดุ SPCC มีความใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นในเนื้อวัสดุเกิดการตีกลับและค่าการตีกลับนั้นคงที่ ทำให้สามารถชดเชยและนำมาใช้งานจริง ทางด้านวัสดุ S50C ซึ่งมีค่าความเค้นมากกว่าวัสดุ SPCC ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าต้องทำการชดเชยมากกว่า จะเห็นว่าทางด้านปฏิบัติสูงกว่าทางด้านทฤษฎี ทั้งนี้เกิดจากการขึ้นรูปวัสดุจริงมีค่ามากกว่าทางทฤษฎี

4.สรุป

1. วัสดุที่มีค่า Yield strength ต่างกันการเกิด K_s ต่างกัน โดยที่ Yield strength สูง K_s ต่ำเมื่อเทียบในองศาเดียวกัน
2. เมื่อพับวัสดุเลยจุด Elastic ถึงช่วง Plastic แล้ววัสดุยังสามารถตีกลับได้
3. การตีกลับของวัสดุเกิดจากความเค้นตกค้างที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ
4. ความหนาของวัสดุมีผลต่อการเกิด Springback
5. ค่า K_s ในแต่ละช่วงองศา จะลดลงเมื่อองศาการพับมากขึ้น
6. ค่า K_s ที่ได้สามารถนำมาชดเชยการเกิด Springback ได้ดีในวัสดุที่มีค่า Yield strength ต่ำ
7. ค่า K_s ที่ได้แทนค่าในสมการที่ 2.2 นำค่าที่ได้ไปเพิ่มในองศาที่ทำการ

การพับจะต้องดำเนินการพับจริง

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำจากท่านคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kalpakjian,S.,”Manufacturing Processes for Engineering Materials,”4 th Ed.,Assison Wesley, 1997.
- [2] Nan Song, Dong Qian, Jian Cao, Wing Kam Liu, ”Effective Models for Prediction of Springback in Flanging,”Transactions of the ASME, 456/Vol.123,October 2001
- [3] Chanatip Chaidilokpattanukul, Masahito Tanaka, Cheng-Tiao Hsieh, Deng Yong, ”Experiment Report Springback”
- [4] H.-M. Huang, S.-D. Liu, S.Jiang, ”Stress and Strain Histories of Multiple Bending –Unbending Springback Proecess,” Transactions of the ASME, 384/Vol.123,October 2001
- [5] R.H. Sturges, ”Desingn of a Vernier Punch and Die Set for Single-Minute Bending Set-Ups,” Transactions of the ASME, 396/Vol.117,September 1195
- [6] ศ.ดร.วิวิธ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาญ ฤณรงค์งาน, ”Machine Design 1,”Science,Engineering&Education, ปี พ.ศ. 2537, หน้า 0-96,363

เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณค่าที่ทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ-1 การคำนวณหาค่าการเกิดการ Springback

จากสมการ

$$K_s = 1 - 3 (r_p Y_o) / (E / t) + 4 [(r_p Y_o) / (E t)]^3$$

เมื่อ K_s คือ ค่าการเกิดการ Springback

R_p คือ รัศมีของมุมพับ

Y_o คือ Yield Stress

E คือ Young's Modulus

t คือ ความหนาของวัสดุ

ตัวอย่างการคำนวณ

โดยทำการคำนวณห้องสการติดกลับของวัสดุ SPCC ที่การพับ 10 องศา

แทนค่าในสมการ

$$K_s = 1 - 3 (7 \times 220) / (21000 / 1) + 4 [(7 \times 220) / (21000 \times 1)]^3$$

เพราะฉะนั้นค่าการเกิดการติดกลับเท่ากับ $K_s = 0.782$

จ-2 การคำนวณชดเชยการเกิด Springback

จากสมการ

$$K_s = 1 - \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$$

จากสมการข้างต้นทำการชดเชยโดยการนำค่า K_s ที่เกิดการ Springback มาเพิ่มในมุมองศาการพับ

จะได้สมการ

$$\alpha_{Compensate} = ((1 - K_s) \times \Delta \alpha \times 2) + \alpha$$

เมื่อ $\alpha_{Compensate}$ คือ องศาการชดเชยการติดกลับ

K_s คือ ค่าการเกิดการ Springback

$\Delta \alpha$ คือ ความแตกต่างของครึ่งของมุมการงอที่เกิดจากการ Springback

α คือ ครึ่งหนึ่งขององศาการพับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

โดยทำการคำนวณที่องศาการติดกลับของวัสดุ SPCC ที่การพับ 10 องศา

$$\alpha_{Compensate} = \left((1 - 0.782) \times \left(\frac{10}{2} \right) \times 2 \right) + 10$$

เพราะฉะนั้นค่าการชดเชยเกิดการติดกลับ $\alpha_{Compensate} = 12.18$ องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายภาสกร จำปาเงิน เกิดเมื่อวันที่ 11 ธันวาคม 2517 สำเร็จการศึกษา หลักสูตร
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น ในปี
การศึกษา 2539 และเริ่มศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542

ปัจจุบันทำงานตำแหน่งวิศวกร บริษัท IDS Manufacturing จำกัด 21/7 หมู่ 6 ซอยตำลุทกา
11 (ซอยรังสิต - นคานายก 46) ต. คูคต อ. ตำลุทกา จ. ปทุมธานี 12130



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้