

อภิธานนาการ



สำนักทดสอบ

การทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเชื่อมพ่วง

Tensile Test of Tailored – Welded Blanks

สำนักทดสอบ มหาวิทยาลัยวงเรศวร
วันลงทะเบียน..... 20 พ.ค. 2554
เลขทะเบียน..... / 549168X
เลขเรียกหนังสือ..... TS

250
ศ1442ก
2553

นาย ศิริวิชญ์

เจนใจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงเรศวร

ปีการศึกษา 2553

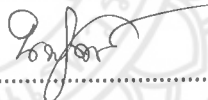


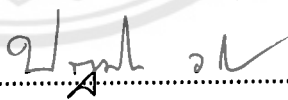
ใบรับรองโครงการ

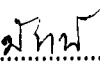
หัวข้อโครงการ : การทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเชื่อมพ่วง
 ผู้ดำเนินโครงการ : นาย ศิริวิชญ์ เจนใจ รหัสบัณฑิต 47380127
 ที่ปรึกษาโครงการ : อาจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ


ประธานกรรมการ
 (อาจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์)


กรรมการ
 (ผศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล)


กรรมการ
 (รศ.ดร. มัทนี สงวนเสริมศรี)

หัวข้อโครงการ : การทดสอบแรงดึงของ โลหะแผ่นเชื่อมพ่วง
ผู้ดำเนินโครงการ : นาย ศิริวิชญ์ เจนใจ รหัสนิติ 47380127
ที่ปรึกษาโครงการ : อาจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2553

.....

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเชื่อมพ่วง วัสดุทดสอบเป็นแผ่นเหล็กดำหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm ตามมาตรฐาน ISO6892-1984 (E) และ ASTM (E8) ทำการทดสอบแรงดึง ทั้งแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวและแผ่นเหล็กดำที่ผ่านการเชื่อมเชื่อมพ่วง (TWB) โดยกำหนดลักษณะการเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา กับแนวการแรงดึง เพื่อหาผลกระทบที่มีต่อความแข็งแรง ผลที่ได้จะแสดงผลออกมาเป็นกราฟไดอะแกรมความเค้น - ความเครียด จากนั้นทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลของแผ่นเหล็กเนื้อเดียวและแผ่นเหล็กเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง แล้วสังเกตผลกระทบต่อความเสียหายจากชิ้นงานทดสอบ ว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีการทดสอบด้วยวิธีการดึงของวัสดุหรือไม่ เพื่อความมั่นใจที่จะนำมาเลือกพิจารณาในการใช้วัสดุในการผลิตเครื่องจักรชิ้นส่วน โครงสร้างต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ต้องการศึกษาและสนใจในการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นเชื่อมพ่วง

Project Title : Deep drawing of tailored – welded blanks
Name : Mr. Sirawit Jenjai Student ID 47380127
Project Advisor : Mr. Nopaparatt Sihawong
Department : Mechanical Engineering
Academic Year : 2010

.....

Abstract

This project focused on a multi-welded iron's tensile stress experiment. The materials being tested were 3 pieces of black iron sheet with the thickness of 2.0, 4.0 and 6.0 mm under an ISO standard of 6892 -1984 and ASTM (E8). The experiments were performed on both a single black iron sheet and some multi-welded ones (TWB). The styles of the multi welding were at 90 and 45 against the direction of the tensile stress in order to find out the effect on the strength. The result was presented in a diagram of Strain and Stress. After that, it was an analyzing process to compare the result of the single iron sheet and the single iron sheet against the multi-welded ones. Then, observe for the effect of the damage to find out if it was relevant to the theory-on how the sheet was pulled-in the experiment or not. As a result, it would help build confidence on what or which kind of materials was best for the use of parts in a machine or in a project or in a factory. Moreover, it would also be beneficial to other researchers interested in a multi-welded iron's tensile stress experiment.

กิตติกรรมประกาศ

ในโครงการฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือในด้านกาให้คำแนะนำในการทำโครงการจากอาจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและ ผศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล, อาจารย์ รัตนา การุญบุญญานันท์ และอาจารย์ ปัญญวัฒน์ ถิ่นพาพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ร่วมปรึกษาให้คำแนะนำ แก่ผู้ดำเนินโครงการตลอดมา ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาให้ความร่วมมือและช่วยเหลือเรื่องงบประมาณในการจัดทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและญาติมิตรทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้ดำเนินโครงการอย่างสม่ำเสมอตลอดมา

นาย ศิริวิชญ์ เจนใจ



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ระยะเวลาการปฏิบัติงาน	2
1.6 รายละเอียดงบประมาณของโครงการ	2
1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)	3
2.1.1 ประเภทของการทดสอบทางกล	3
2.1.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	3
2.2 ทฤษฎีความเสียหาย	5
2.2.1 ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด	5
2.2.2 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	6
2.2.3 ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทฤษฎีตรีศร	8
2.3 ลักษณะการขาดของชิ้นงาน	10
2.3.1 การขาดแบบขวางตรง	10
2.3.2 รอยขาดแบบเอียง	11
2.3.3 รอยขาดแบบผสม	12

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 มาตรฐานการทดสอบ	12
2.4.1 ขนาดชั้นทดสอบแรงดึงตาม ISO 6892 – 1984(E) รูปร่างและขนาดมิติ	12
2.4.2 งานที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแรงดึง (W)	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	20
3.2 การป้อนข้อมูลตัวแปรการพิมพ์	23
3.3 การจับชิ้นงาน	23
3.4 การทดสอบ	24
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	25
4.1 การทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว ขนาดความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm	25
4.2 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุ ในแผ่นเหล็กดำหนา 2.0 mm	27
4.3 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุ ในแผ่นเหล็กดำหนา 4.0 mm	29
4.4 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุ ในแผ่นเหล็กดำหนา 6.0 mm	31
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	33
5.1 สรุปผลการทดสอบ	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	35
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบ	36
ภาคผนวก ข การคำนวณค่า Modulus of elasticity และความเค้นคราก	42
ภาคผนวก ค การเชื่อมพ่วงและการเชื่อมไฟฟ้า	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มิติของชั้นทดสอบภาคตัววงกลม ความยาวก่อนดึง $L_0 = k\sqrt{S_0}$	13
ตารางที่ 2.2 มิติของชั้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (ไม่ได้สัดส่วน)	14
ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วความเค้นในการทดสอบแรงดึง สำหรับเหล็กกล้าและโลหะไม่ใช่เหล็ก	18
ตารางที่ 3.1 การเตรียมวัสดุในการทดสอบแรงดึง	20
ตารางที่ 3.2 แสดงหาความยาวก่อนดึงของชั้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก	22



สารบัญรูปภาพ

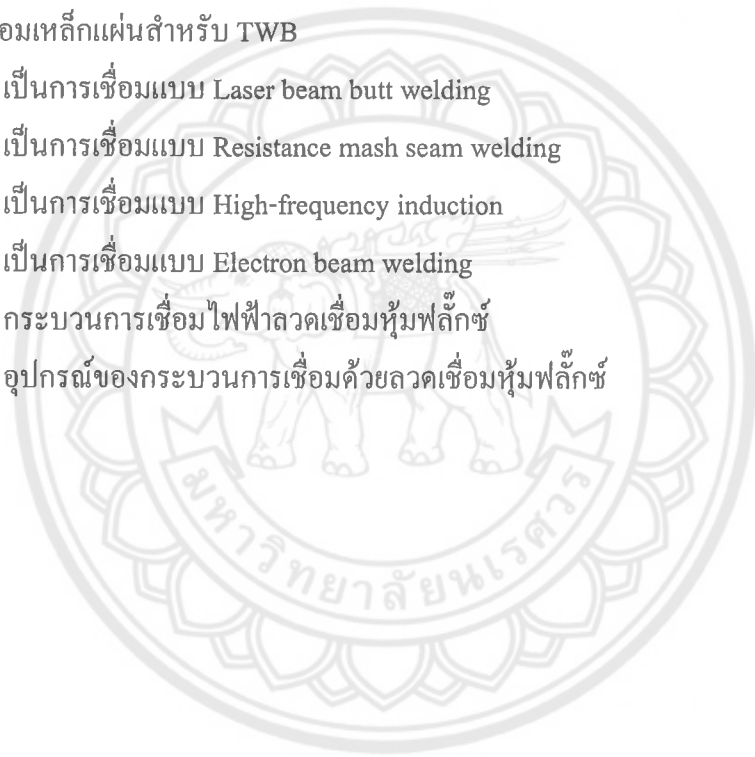
	หน้า
รูปที่ 2.1 ไคอะแกรมความเค้น-ความเครียด	4
รูปที่ 2.2 โลคัสการแตกหักตามทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (สองมิติ)	5
รูปที่ 2.3 (ก) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ข) วงกลมโมร์	6
รูปที่ 2.4 โลคัสการแตกหักของปัญหาสองมิติตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	7
รูปที่ 2.5 ความเค้นเฉือนบนระนาบออกทฤษฎีครีค จากการทดสอบแรงดึง	8
รูปที่ 2.6 โลคัสการแตกหักของปัญหาสองมิติตามทฤษฎีความเค้นออกทฤษฎีครีค	10
รูปที่ 2.7 ลักษณะรอยขาดของชิ้นงานทดสอบ	10
รูปที่ 2.8 แรงภายในชิ้นทดสอบที่รับแรงดึง	11
รูปที่ 2.9 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม	13
รูปที่ 2.10 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก	14
รูปที่ 2.11 การเขียนรอยขีดหมายขนาดความยาวทดสอบ (L_0) โดยอนุญาตให้ผิดพลาดได้ $\pm 1\%$ และการวัดขนาดความยาวหลังดึงขาด (L_u)	15
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของความเร็วแรงดึงต่อการเริ่มครากตัวหรือต่อความสูง ของจุดครากตัวตามแผนภาพแรง-ระยะยืด	17
รูปที่ 2.13 ปฏิกริยาของการป่มเครียด (strain ageing) ต่อแผนภาพแรง – ระยะยืดตัว ที่มีการลดแรงดึงในขณะที่ทดสอบแรงดึงต่อเหล็กกล้าที่มีช่องครากตัวให้เห็นเด่นชัด	17
รูปที่ 3.1 แสดงการเชื่อมพ่วงแผ่นเหล็กดำ	21
รูปที่ 3.2 แสดงการเจียรรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง	21
รูปที่ 3.3 แผ่นเหล็กทดสอบเนื้อเดียว แผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา และ 45 องศา หนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm	21
รูปที่ 3.4 ชุดป้อนควบคุมการดึงค่า	23
รูปที่ 3.5 การป้อนข้อมูลตัวแปรการทดสอบ	24
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว	25
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการฉีกของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว	26
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว กับแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงหนา 2.0 mm	27
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเสียรูปของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หนา 2.0 mm	28

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Stain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 4.0 mm	29
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเสียรูปของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หนา 4.0 mm	30
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Stain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 6.0 mm	31
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเสียรูปของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หนา 6.0 mm	32
กราฟที่ ก.1 แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm	37
กราฟที่ ก.2 แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm	37
กราฟที่ ก.3 แผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm	38
กราฟที่ ก.4 แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา	38
กราฟที่ ก.5 แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา	39
กราฟที่ ก.6 แผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา	39
กราฟที่ ก.7 แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา	40
กราฟที่ ก.8 แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา	40
กราฟที่ ก.9 แผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา	41
รูปที่ ข.1 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm	44
รูปที่ ข.2 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm	45
รูปที่ ข.3 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm	45
รูปที่ ข.4 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา หนา 2.0 mm	46
รูปที่ ข.5 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา หนา 4.0 mm	46
รูปที่ ข.6 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา หนา 6.0 mm	47

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.7 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา หน้า 2.0 mm	47
รูปที่ ข.8 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา หน้า 4.0 mm	48
รูปที่ ข.9 แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา หน้า 6.0 mm	48
รูปที่ ค.1 ตัวอย่างการใช้งาน TWB ในชิ้นส่วนของรถยนต์ วิธีการเชื่อมเหล็กแผ่นสำหรับ TWB	49
รูปที่ ค.2 เป็นการเชื่อมแบบ Laser beam butt welding	50
รูปที่ ค.3 เป็นการเชื่อมแบบ Resistance mash seam welding	50
รูปที่ ค.4 เป็นการเชื่อมแบบ High-frequency induction	51
รูปที่ ค.5 เป็นการเชื่อมแบบ Electron beam welding	51
รูปที่ ค.6 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	52
รูปที่ ค.7 อุปกรณ์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การทดสอบแรงดึงของวัสดุ (Tensile Test) เป็นการนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้น-ความเครียด ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ นั้น ๆ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับนำไปแก้ไขข้อบกพร่องหรือพัฒนาให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น สมบัติเด่นที่มีความสำคัญ สมบัติทางกลบ่งบอกถึงความแข็งแรงและทนทานต่อการนำไปใช้งาน

โลหะแผ่นเชื่อมพ่วง (Tailor Welded Blank: TWB) คือ การนำโลหะแผ่นจำนวนตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปนำมาเชื่อมต่อกัน ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมในแบบต่างๆ วัสดุที่นำมาเชื่อมจะเป็นโลหะแผ่นชนิดเดียวกัน กับโลหะแผ่นต่างชนิดกันและความหนาวัสดุที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ลดค่าใช้จ่ายในส่วนที่ไม่จำเป็นออกไป เช่น โครงสร้างของรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องจักรและส่วนประกอบของเครื่องมือช่างต่างๆ เป็นต้น การผลิตชิ้นส่วนโลหะแผ่นเชื่อมพ่วงมีกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เพื่อให้ได้สมบัติของชิ้นงานตามความต้องการเหมาะสมกับการใช้งาน

โครงการนี้จึงมีความต้องการศึกษาและทำการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงดึงของวัสดุ (Tensile test) ของเหล็กแผ่นคาน้ำเนื้อเดียวกับเหล็กแผ่นเชื่อมพ่วงต่างความหนา โดยเลือกใช้แผ่นเหล็กคาน้ำความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมที่มีต่อความแข็งแรงของวัสดุ ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตจริงและลดความเสียหายในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาพฤติกรรมต่อความแข็งแรงจากการทดสอบแรงดึง ของแผ่น โลหะคาน้ำความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm
2. ศึกษาพฤติกรรมของแผ่น โลหะเชื่อมพ่วงที่มีต่อความแข็งแรง ในแนวเชื่อมพ่วง 90 องศา กับแนวเชื่อมพ่วง 45 องศา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมต่อความแข็งแรงของวัสดุของการเชื่อมแผ่น โลหะเนื้อเดียวกับแผ่น โลหะเชื่อมพ่วง
2. ทราบถึงสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาทดสอบแรงดึง (Tensile test)

1.4 ขอบเขตของโครงการ

เหล็กแผ่นดำขนาดความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm ตัดเป็นแผ่นขนาดความกว้าง 20 × 200 mm ตามมาตรฐาน ISO 6892-1984 (E) และ ASTM (E8) นำมาเชื่อมต่อกัน โดยกำหนดแนวเชื่อมเอียงทำมุม 45 องศา และ 90 องศา กับแนวยาวของแผ่นเหล็ก ทำการทดสอบด้วยการดึงในหนึ่งแนวแกน

ทดสอบแรงดึงจำนวน 5 ชิ้น โดยจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟไดอะแกรมความเค้น-ความเครียด แล้วนำผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุทดสอบการผลต่อความแข็งแรง

1.5 ระยะเวลาการปฏิบัติงาน

รายละเอียด	พ.ย.	มิ.ย. - ก.ค.	ส.ค.- ก.ย.	ต.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีการทดสอบ				
2.จัดเตรียมวัสดุทดสอบ				
3.ทำการทดสอบแรงดึง				
4.จัดทำรายงาน				

1.6 รายละเอียดงบประมาณของโครงการ

แผ่นเหล็กดำความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm	500	บาท
ค่าเช่าเล่มโครงการ	500	บาท
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทำโครงการ	1,000	บาท

1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

การทดสอบ หมายถึง การกระทำ ทดสอบที่สามารถระบุค่าเป็นตัวเลขซึ่งแสดงคุณสมบัติได้ วัสดุที่ใช้ในงานทุกสาขาจากถูกผลิตออกมาให้มีคุณภาพ ลักษณะเฉพาะ แต่ในบางครั้งวัสดุที่ผลิตอาจมีคุณภาพไม่ถูกต้องตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งเป็นสาเหตุให้งานออกมาไม่เหมาะสมหรือเท่าที่ควร ดังนั้น หากมีการทดสอบวัสดุที่นำมาใช้งานก็จะเป็นสิ่งหนึ่งที่ช่วยให้มีความมั่นใจมากขึ้น การทดสอบ อาจไม่จำเป็นต้องทดสอบทุกชิ้นส่วน โดยทั่วไปมักใช้วิธีสุ่มตัวอย่างมาทดสอบ การทดสอบนี้ นอกจาก จะช่วยเพิ่มความมั่นใจแล้ว ยังช่วยให้มีงานออกมามีคุณภาพมากขึ้น วิศวกรส่วนใหญ่เกือบทุกสาขาจะ เลือกว่าวัสดุที่ใช้งานจะต้องมีการทดสอบวัสดุเสียก่อน การทดสอบโดยส่วนใหญ่จึงมักทดสอบเรื่อง คุณสมบัติของวัสดุว่าเป็นไปตามมาตรฐาน

2.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

2.1.1 ประเภทของการทดสอบทางกล

ผู้ที่เป็นช่างด้านโยธา ไฟฟ้า หรือเครื่องกลก็ตาม ควรรู้จักวัสดุต่าง ๆ ที่ได้นำมาผลิตสิ่งต่าง ๆ ขึ้น เช่น การผลิตรถยนต์ การสร้างอาคาร ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้เหล่านี้จะพบว่าเป็นวัสดุในงาน อุตสาหกรรมเกือบทั้งสิ้น ซึ่งจะมีสมบัติต่างกัน เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น เป็นต้น ในการเลือกใช้ จึงควรมีการศึกษาถึงชนิด ประเภท และคุณสมบัติ การแบ่งวัสดุทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ใหญ่ ๆ คือ

1. ประเภทโลหะ (Metallic Materials) คือ วัสดุที่ได้จากการถลุงแร่ธาตุซึ่งมีอะตอมมาเรียงกัน อย่างเป็นระเบียบ เช่น เหล็กหล่อ เหล็กกล้า รวมไปถึงอลูมิเนียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ฯลฯ

2. ประเภทอโลหะ (Nonmetallic Materials) คือ วัสดุจากธรรมชาติหรือจากสารสังเคราะห์ ไม้ ยาง พลาสติก ปูนซีเมนต์ ฯลฯ

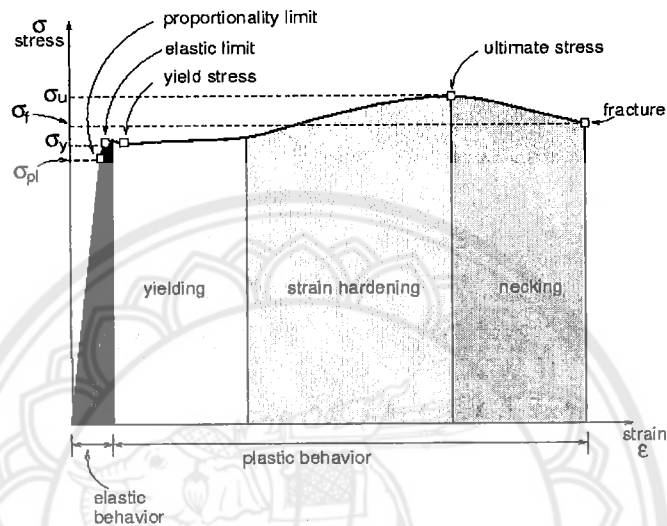
2.1.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

พฤติกรรมของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง สมบัติทางกลที่เรามักให้ความสนใจ คือ

ความเค้น (Stress) คือแรงภายในที่ต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วย พื้นที่ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ความเค้นดึง (Tensile Stress) ความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นเฉือน (Shearing Stress) นอกจากนี้ยังมีความเค้นดัด (Bending Stress) ซึ่งเกิดจากแรงดึง กับแรงอัดกระทำพร้อมกัน

ความเครียด (Strain) หรือการเสียรูป (Deformation) คือการเปลี่ยนแปลงมิติตามยาว (Linear Dimension) ต่อหน่วยความยาวของวัสดุ ซึ่งเกิดจากความเค้นที่เพิ่มขึ้น

ไดอะแกรมความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Diagram) เป็นไดอะแกรมระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยมีค่าความเค้นอยู่ในแนวตั้ง (Ordinates) และความเครียดในแกนนอน (Abscissas) ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมความเค้น-ความเครียด[1]

ขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) คือความเค้นสูงสุดที่สามารถมีขึ้นได้ในวัสดุโดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) ภายหลังจากที่ความเค้นได้หมดไปโดยสิ้นเชิง

ขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional Limit) คือความเค้นสูงสุดที่สามารถมีขึ้นได้ในวัสดุโดยไม่ผิดไปจากกฎสัดส่วนของความเค้นต่อความเครียด (Law of Proportional of Stress to Strain) หรือ กฎของฮุก (Hook's Law)

จุดล้า (Yield Point) คือความเค้นที่มีขึ้นในวัสดุที่ทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มความเค้นหรือเป็นความเค้นที่วัสดุเริ่มความเสียหายทางโครงสร้าง

ความแข็งแรงล้า (Yield Strength) คือความเค้นที่วัสดุแสดงการเสียรูปถาวรจำกัดที่กำหนดขึ้นหาได้โดยการลากเส้นประ

โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คืออัตราของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดจากความเค้นภายในขีดจำกัดยืดหยุ่น ซึ่งค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนี้ใช้ในการวัดความแข็งแรงกระด้าง (Stiffness) ของวัสดุอย่างหนึ่งนอกจากมีความเค้น 3 ประเภทดังที่ได้กล่าวมาแล้วในวัสดุยืดหยุ่นได้ จึงมีโมดูลัส 3 ประเภทด้วย คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงเฉือน[2]

2.2 ทฤษฎีความเสียหาย

2.2.1 ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (maximum principal stress theory) หรือเรียกว่าทฤษฎีของ Rankine ซึ่งเป็นทฤษฎีที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการแตกหักของโลหะเปราะ โดยทฤษฎีกล่าวว่า “การแตกหักจะเกิดขึ้น ถ้าค่าของความเค้นหลักสูงสุดที่จุดใดๆ ในชิ้นงานมีค่าเท่ากับความเค้นครากหรือความเค้นประลัยที่ได้จากชิ้นงานทดสอบของวัสดุเดียวกัน” [3]

$$\sigma_u = \sigma_N$$

$$N = \frac{\sigma_u}{\sigma_N}$$

N = แฟกเตอร์ความปลอดภัย

$$\sigma_u = \text{MAX}(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

$$\sigma_N = \text{MAX}(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

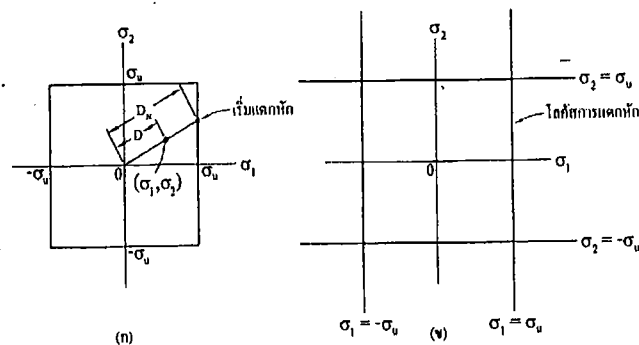
ในกรณีความเค้นบนระนาบ ถ้า $\sigma_3 = 0$ ความสัมพันธ์ของ σ_1, σ_2 และ σ_u ความสัมพันธ์ของความเค้นที่ต้องการไม่ให้เกิดความเสียหาย เท่ากับ

$$\text{MAX}(|\sigma_1|, |\sigma_2|) \leq \sigma_u$$

และสามารถหากรอบของความปลอดภัยของทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุดได้จากสมการ

$$\sigma_1 = \sigma_u, \sigma_1 = -\sigma_u$$

$$\sigma_2 = \sigma_u, \sigma_2 = -\sigma_u$$



รูปที่ 2.2 โลกัศการแตกหักตามทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (สองมิติ) [3]

2.2.2 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress theory) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Tresca yield theory ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ง่ายและสะดวกที่ใช้ตรวจสอบการแตกหักของโลหะเหนียว ทฤษฎีกล่าวว่า “การแตกหักจะเกิดขึ้น ถ้าความเค้นเฉือนสูงสุดในชิ้นงานมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนครากที่ได้จากชิ้นงานทดสอบของวัสดุเดียวกัน” ดังนั้น[3]

$$\tau_{\max} = \tau_o$$

ซึ่ง τ_o คือความเค้นเฉือนครากของโลหะ ซึ่งหาได้จากชิ้นงานทดสอบแรงดึงและ τ_{\max} ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

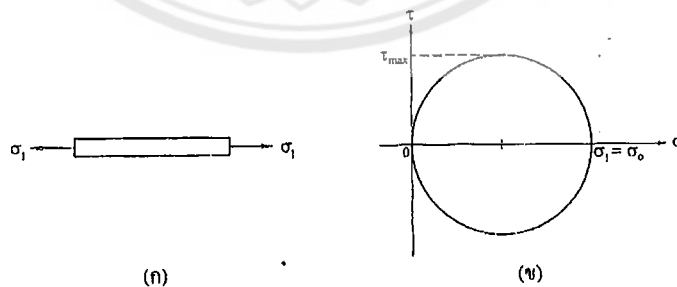
ในกรณีของปัญหาการขึ้นรูปของโลหะสามมิติ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระนาบ 45 องศา กับพิกัดหลัก ขนาดของความเค้นเฉือนสูงสุดในแต่ละระนาบหาได้จากสมการ

$$\tau_1 = \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right|, \tau_2 = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|, \tau_3 = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|$$

จะได้ความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau_o = \max \left(\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right| \right)$$

ในการทดสอบแรงดึงทิศทางเดียว ถ้า $\sigma_1 = \sigma_o, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ การสร้างวงกลมโมร์ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเท่ากับ $\tau_o = \frac{\sigma_o}{2}$



รูปที่ 2.3 (ก) ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ข) วงกลมโมร์[3]

แทนค่าในสมการความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\frac{\sigma_o}{2} = \max \left(\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right| \right)$$

หรือ

$$\sigma_0 = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

และความเค้นเฉือนประสิทธิผลจากการทดสอบ เท่ากับ $\bar{\sigma}_s$ จะได้

$$\bar{\sigma}_s = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

$$N = \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$$

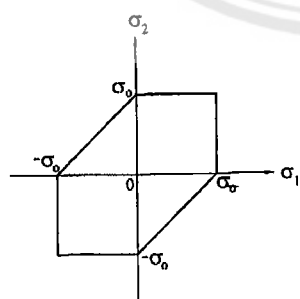
$N =$ แฟกเตอร์ความปลอดภัย

$$\sigma_0 = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

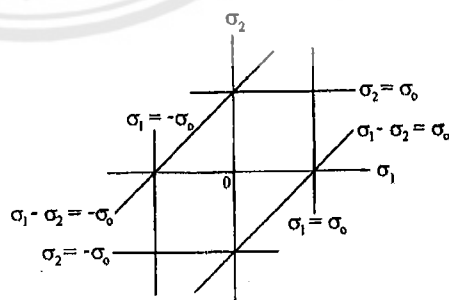
$$\bar{\sigma}_s = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

ในกรณีของความเค้นระนาบ $\sigma_3 = 0$ และความสัมพันธ์ของ σ_1 กับ σ_2 ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด จะนำมาสร้างกรอบหกเหลี่ยม ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่จะไม่มีการแตกหัก $\bar{\sigma}_s < \sigma_0$ กรอบหกเหลี่ยมจะล้อมรอบด้วยเส้น

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm\sigma_0, \sigma_2 = \pm\sigma_0, \sigma_1 = \pm\sigma_0$$



(n)



(ข)

รูปที่ 2.4 โลคัสการแตกหักของปัญหาสองมิติตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด[3]

2.2.3 ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัล

ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัล เป็นทฤษฎีการแตกหักอีกทฤษฎีหนึ่งที่นิยมใช้ทำนายการแตกหักของโลหะเหนียว ทฤษฎีกล่าวว่า “การแตกหักจะเกิดขึ้น ถ้าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบออกทะฮีดรัลในชิ้นงาน มีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัลที่ได้จากชิ้นทดสอบแรงดึงของวัสดุเดียวกัน” ดังนั้น

$$\tau_h = \tau_{ho}$$

ซึ่ง τ_{ho} คือค่าความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแล้ \mathcal{E}_h คือความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัลที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน การทำนายการแตกหักของชิ้นงานด้วยทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัล จะให้ผลเช่นเดียวกับการทำนายการแตกหักด้วยทฤษฎีพลังงานแปรรูป (distortion energy) หรืออีกชื่อหนึ่งว่า “ทฤษฎี von mises” [3]

ความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัลในเทอมของความเค้นหลัก $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ

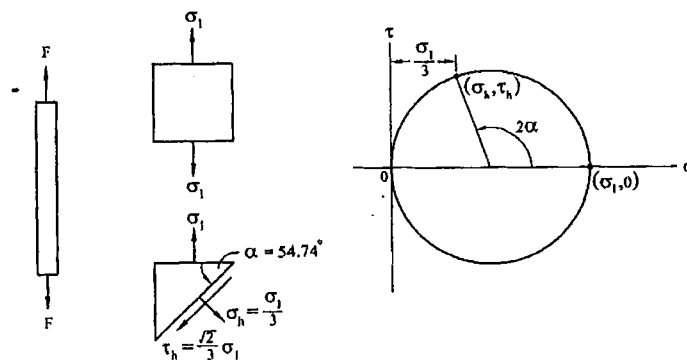
$$\tau_h = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

และการแตกหักจะเกิดขึ้น ถ้าความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัล ถ้า $\tau_h = \tau_{ho}$

หรือ
$$\tau_{ho} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

พิจารณาการแตกหักที่ความเค้นครากที่ได้จากชิ้นงานให้ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ แทน σ_1 ด้วย σ_0 สมการความเค้นเฉือนออกทะฮีดรัล เท่ากับ

$$\tau_{ho} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_0$$



รูปที่ 2.5 ความเค้นเฉือนบนระนาบออกทะฮีดรัลจากการทดสอบแรงดึง[3]

สมการที่ใช้ทำนายการแตกหักของโลหะเหนียวในเทอมของความเค้นคราก σ_0 คือ ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$)

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

แทนสมการความเค้นคราก σ_0 ในความเค้นเฉือนประสิทธิผล(ออกทฤษฎี) $\bar{\sigma}_H$ จะได้

$$\bar{\sigma}_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

ความปลอดภัยที่ความเค้นเฉือนออกทฤษฎี

$$N = \frac{\sigma_0}{\sigma_H}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\bar{\sigma}_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

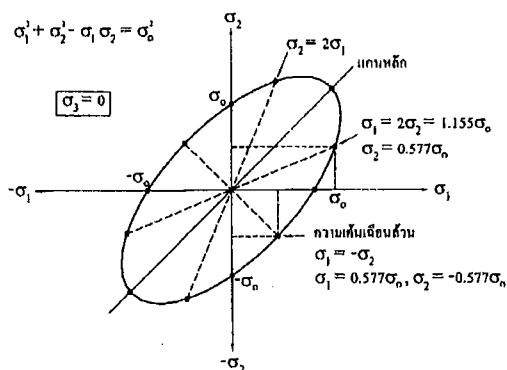
และสามารถหาความปลอดภัย N ได้เช่นเดียวกับทฤษฎีการแตกหักของความเค้นเฉือนสูงสุด ความเค้นประสิทธิผลในเทอมของ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ และ τ_{zx} นั่นคือ

$$\bar{\sigma}_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

ในกรณีของความเค้นระนาบ $\sigma_3 = 0$ สมการทำนายการแตกหักเท่ากัน

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2}$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างจะได้สมการในรูปของวงรี $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2$

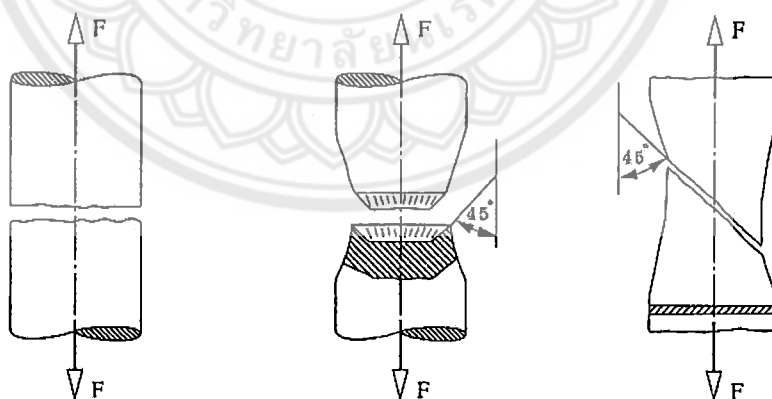


รูปที่ 2.6 โลกัศการแตกหักของปัญหาสองมิติตามทฤษฎีความเค้นออกทะษีดรัล[3]

2.3 ลักษณะการขาดของชิ้นงาน

2.3.1 การขาดแบบขวางตรง

รอยขาดขวางแนวแรงดึงที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ปราศจากระนาบเลื่อนไหล หรือเกิดจากวัสดุที่มีแรงต้านการเลื่อนไหลของอะตอมสูง ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเม็ดเกรนลักษณะวิวิธพันธุ์ (heterogeneous) มีผลึกเม็ดเกรนที่เปราะ (เหล็กหล่อเทา) [4]



(ก) ขาดแบบขวางตรงจากความเค้นดึงปกติ (ข) ขาดแบบผสม (ค) ขาดแบบเฉียงจากความเค้นเฉือน

รูปที่ 2.7 ลักษณะรอยขาดของชิ้นงานทดสอบ[4]

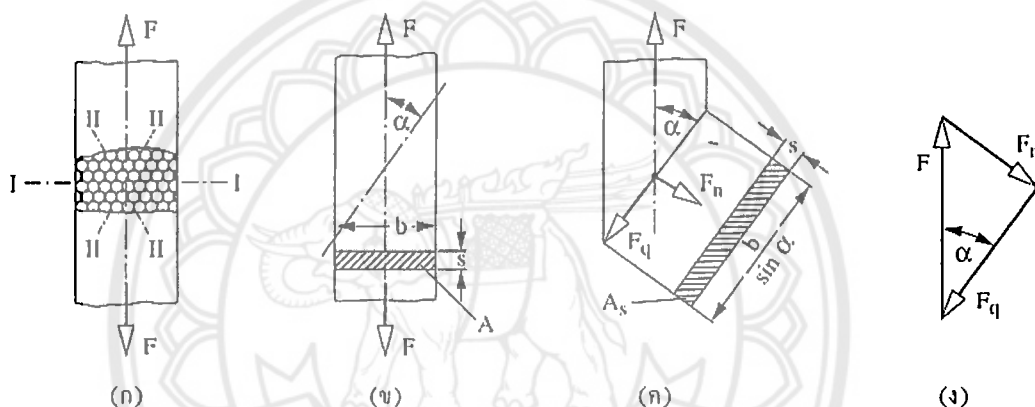
2.3.2 รอยขาดแบบเอียง

กระบวนการภายใน ในขณะที่แตกหัก

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาให้คิดว่าภาคตัด (ตามรูปที่ 2.8(ก)) เป็นหนึ่งผลึกที่มีเม็ดเกรนหนาแน่นมาก

ในการแยกระนาบเม็ดเกรน I ให้ออกจากกันจะต้องใช้แรงดึง F ที่มากกว่าแรงต้านการแยกของวัสดุ แต่ก่อนที่แรงดึง F จะเพิ่มขึ้นและชนะแรงต้านการแยกตัว ระนาบเม็ดเกรน II จะเคลื่อนที่มีผลทำให้ชิ้นทดสอบเสียดรูป (translation)

การเสียดรูปนี้จะมีแรงเฉือนกระทำอยู่ที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้น[4]



รูปที่ 2.8 แรงภายในชิ้นทดสอบที่รับแรงดึง[4]

จากรูปที่ 2.8(ข) แสดงภาพของแรงเฉือน ทำให้เกิดมุม α ขึ้นอย่างอิสระเป็นแนวตัดในชิ้นทดสอบที่เขียนเป็นแนวแรงในรูปของวัสดุอิสระ (free body) ดังรูปที่ 2.8(ค)

ในแนวตัดจะมีแรงภายใน F กระทำที่มีแรงภายใน 2 แรงกระทำ ทำให้อยู่ในสถานะสมดุล (รูปที่ 2.8(ง))

พื้นที่ภาคตัดขวาง A (รูปที่ 2.8(ค)) ที่สัมพันธ์กับมุม α ซึ่งมีขนาดพื้นที่โตกว่าพื้นที่ A

$$A_s = A / \sin \alpha = bs / \sin \alpha$$

$$\tau = F_q / A_s = F \cos \alpha \sin \alpha / bs$$

ในทุกกระนาบของเม็ดเกร็นจะทำให้เกิดมุมจากการเลื่อนไหลของอะตอมสูงสุดไม่เกิน 45 องศา ที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนภายในขึ้น ลักษณะรอยขาดเป็นมุมเอียงนี้เรียกว่า “รอยขาดแบบเอียง” ซึ่งมักเกิดขึ้นกับแท่งวัสดุแบนและบาง หรือวัสดุที่มีระนาบเลื่อนไหลของอะตอมหลายระนาบ[4]

2.3.3 รอยขาดแบบผสม

รอยขาดแบบผสมเป็นรูปแบบรอยขาดขึ้นทดสอบระหว่างแบบขวางตรงและแบบเอียง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบเหล็กกล้าภาคตัดขวางกลม เมื่อดึงถึงจุดรับความเค้นสูงสุด () จากนั้นจะเกิดการคอดเล็กของภาคตัดขวาง ทำให้แนวปฏิบัติของแรงหักเหเข้าไปข้างใน (เดิมเป็นความเค้นแกนเดียว) มีผลให้ทำให้เกิดโซนรอยขาดในเวลาต่อมาที่เกิดจากความเค้นกระทำในรัศมีออกมาด้านนอก (ระนาบความเค้นหลายแกน) ซึ่งจะหนองเหนียวการครากคั่วที่ควรจะเกิดขึ้น[4]

2.4 มาตรฐานการทดสอบ

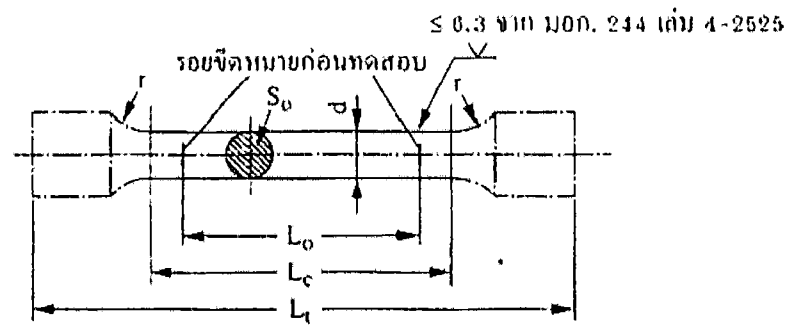
ในปัจจุบันหน่วยงานที่ทำหน้าที่รับผิดชอบเรื่องการทดสอบวัสดุให้ได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับทั่วโลกสามารถนำไปใช้ได้ คือ หน่วยงานมาตรฐานของอเมริกาที่ใช้ชื่อว่า American Society for Test and Materials ย่อว่า ASTM หน่วยงานดังกล่าวทำหน้าที่กำหนดรายการต่าง ๆ เฉพาะของวัสดุ วิธีการทดสอบที่สามารถนำมาปฏิบัติได้เหมือนกัน พัฒนาปรับปรุงแก้ไข จนได้ประสิทธิภาพใช้งานได้ และนำมาเผยแพร่สู่สาธารณชน หน่วยงานอื่นที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ ASTM ที่รู้จักกันดี เช่น ACI (American Concrete Institute) เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทดสอบวัสดุต่าง ๆ ในงานวิศวกรรม คือ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชื่อย่อ มอก. ตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2511 สังกัดกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานที่ใช้อยู่ทั่วโลก[5]

2.4.1 ขนาดขึ้นทดสอบแรงดึงตาม ISO 6892 – 1984(E) รูปร่างและขนาดมิติ

โดยปกติขึ้นทดสอบจะขึ้นรูปด้วยการปาดผิวจากโลหะจากวัสดุโลหะกึ่งสำเร็จรูป แต่ขึ้นงานกึ่งสำเร็จรูป (semi-finish products) ที่มีภาคตัดขวาง (ภาคตัดต่าง ๆ, แท่ง ลวด อื่น ๆ) และขึ้นทดสอบหล่อขึ้นรูปก็อาจจะเอามาทดสอบได้โดยไม่ต้องทำการปาดผิวขึ้นรูป

ขึ้นงานที่มีความยาวทดสอบ (original gauge length) L_0 มีค่าดังนี้ $L_0 = k\sqrt{S_0}$

k = ค่าคงที่ 5.65 สำหรับขึ้นทดสอบที่เป็นสัดส่วน (proportional) ความยาวทดสอบ L_0 จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 25 mm เสมอ



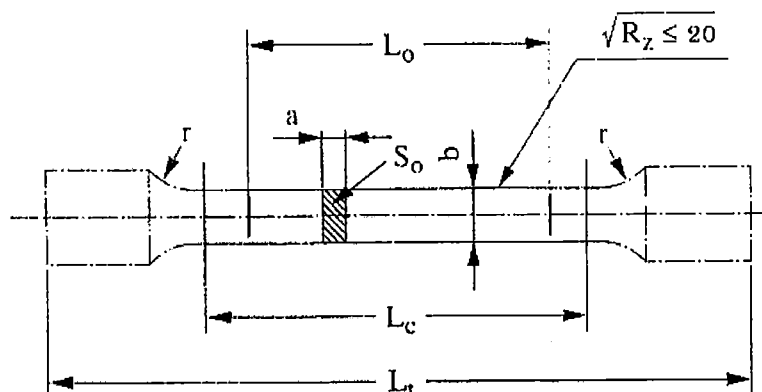
ขีดหมายขนาด L_0 ก่อนทดสอบแรงดึง
รูปที่ 2.9 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม[4]

ตารางที่ 2.1 มิติของชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม ความยาวก่อนดึง $L_0 = k\sqrt{S_0}$

พื้นที่ ภาคตัดขวาง S_0 mm ²	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง d mm	ความยาว L_0 mm	ความยาว ขนานต่ำสุด $L_0 = 5.5d$ mm	รัศมีของบ่า ต่ำสุด r mm	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อนของเส้น ผ่านศูนย์กลาง
12.5	3.99	20	22	4	0.02
25	5.64	28	31	5	0.03
50	7.98	40	44	8	0.04
100	11.28	56	62	10	0.06
150	13.82	69	76	13	0.07
200	15.96	80	88	15	0.08
400	22.56	113	124	23.5	0.13

หมายเหตุ

- ปลายยึดและส่วนขนานของชิ้นทดสอบจะต้องมีแกนร่วมกัน โดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการร่วมแกนจะต้องอยู่ในกำหนด 0.03 mm
- เส้นผ่านศูนย์กลางขนานความยาวจะต้องต่างกันไม่เกิน 0.03 mm
- ในกรณีพิเศษชิ้นทดสอบซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน อาจใช้ได้ถ้าความยาวก่อนดึงเท่ากับ $5.65\sqrt{S_0}$ คือประมาณ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง



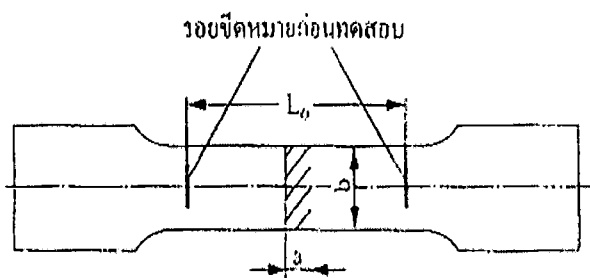
รูปที่ 2.10 ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก[4]

ตารางที่ 2.2 มิติของชิ้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (ไม่ได้สัดส่วน)

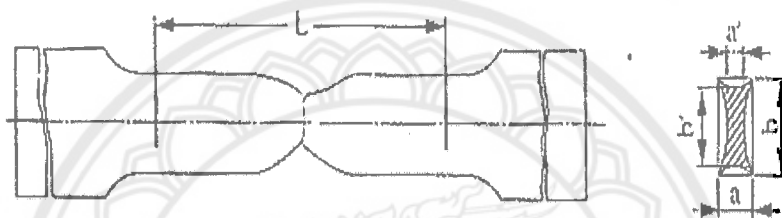
ความกว้าง	ความยาวตั้ง	รัศมีต่ำสุดของบ่า	ความยาวรวม
b	L_0	ชิ้นทดสอบ r	โดยประมาณ L_t
3	12	6	50
6	24	12	100
12.5	50	25	200
25	100	25	300

หมายเหตุ

- นอกจากขนาดที่กล่าวไว้จากตารางแล้ว ให้ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความยาวก่อนตั้งเท่ากับ $5.65\sqrt{S_0}$
- ชิ้นทดสอบที่มีความกว้างตั้งแต่ 3 ถึง 25 mm อาจใช้ความยาวก่อนตั้งเท่ากับ 50 mm โดยมี ความยาวรวมประมาณ 200 mm
- ชิ้นทดสอบที่มีความกว้างไม่เกิน 12.5 mm ความกว้างของภาคตัดในส่วนขนานแตกต่างกันได้ไม่เกิน 0.03 mm ส่วนชิ้นทดสอบที่มีความกว้างมากกว่า 12.5 mm ความกว้างในส่วนขนานแตกต่างกันได้ไม่เกิน 0.1 mm
- ชิ้นทดสอบที่ตรงและมีความกว้างสม่ำเสมอทั้งหมด ให้นำมาทดสอบได้โดยตรงไม่ว่าจะเป็นขนาดใด



ขีดหมายขนาด L_0 ก่อนทดสอบ



นำชิ้นทดสอบดังกล่าวมาต่อกันเพื่อวัดขนาด L_0 การวัดขนาดรอยขาด $a \times b$ ของชิ้นทดสอบ

รูปที่ 2.11 การเขียนรอยขีดหมายขนาดความยาวทดสอบ (L_0) โดยอนุญาตให้ผิดพลาดได้ $\pm 1\%$ และการวัดขนาดความยาวหลังดึงขาด (L_u) [4]

เงื่อนไขการทดสอบ

1. ความเค้นครากบน (R_{eH}) ในการหาค่าความเค้นนี้จะกำหนดอัตราความเค้น
2. ความเค้นครากล่าง (R_{eL}) ในการหาความเค้นครากล่างจะกำหนดอัตราความเครียด (strain rate) ระหว่าง 0.00025/s ถึง 0.0025/s โดยให้ค่าที่เท่าที่สามารถกระทำได้
3. ความเค้นพิสูจน์ (proof stress) R_p ในกรณีที่ยืดตัวไม่เป็นสัดส่วน (non-proportional elongation) ให้อัตราความเครียด ตามตารางที่ 4 เมื่อทำการดึงทดสอบจนชิ้นงานขาด สามารถนำแผนภาพความเค้น - อัตรายืดมาขยาย จากนั้นกำหนดจุดอัตรายืด (ϵ) = 0.2% ลากขนาดเส้นตรงสูงขึ้นไปตัดเส้นโค้ง ลากไปตัดแกนความเค้นตั้งอ่านค่าความเค้นเป็นความเค้นพิสูจน์ $R_{p0.2}$

2.4.2 งานที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแรงดึง (W)

ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจะได้จากหัวจับขึ้นทดสอบที่ดึงด้วยแรงและระยะทางที่ยืดออกไป และงานที่ได้จากการดึงมีใช้ค่าบ่งบอกความหมายของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากภาคตัดขวางสัมพันธ์กับความยาวขึ้นทดสอบ

$$\text{เมื่อ } F = f(\Delta L)$$

$$\text{งานจากการดึงในพื้นที่ได้เส้นโค้ง } W = \int Fd(\Delta L)^{\Delta L_{\max}}$$

ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

ค่าแรงดึงต่อพื้นที่ภาคตัดขวาง ที่ได้จากการทดสอบจะมีสูตรที่ประกอบการคำนวณดังนี้

$$\text{ความเค้นคราก (ทั่วไป) } R_e = \sigma_y = \frac{F_e}{S_0} = R_{p0.2} = \sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}$$

$$R_{p0.2} = \text{ความเค้นครากพิสูจน์ที่อัตราการยืดตัว 0.2\% } \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$R_e = \text{แรงดึงที่จุดคราก N}$$

$$R_{p0.2} = \text{แรงดึงที่ทำให้เกิดการยืด 0.2\% (วัดหลังจากลดแรงแรงดึงเหลือศูนย์)}$$

$$S_0 = \text{ขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางก่อนรับแรงดึง } \text{mm}^2$$

ในกรณีที่เป็นเหล็กกล้าละมุน (เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ) จะเกิดจุดครากตัวบน-ล่าง

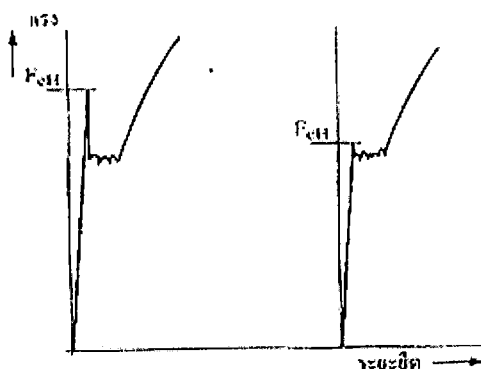
$$\text{ความเค้นครากบน (Upper yield stress) } R_{eH} = R_e = \frac{F_{eH}}{S_0} \text{ หน่วย } \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\text{ความเค้นครากล่าง ความเค้นคราก } R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$\text{ความต้านแรงดึง (tensile test) } R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ หน่วย } \frac{N}{\text{mm}^2}$$

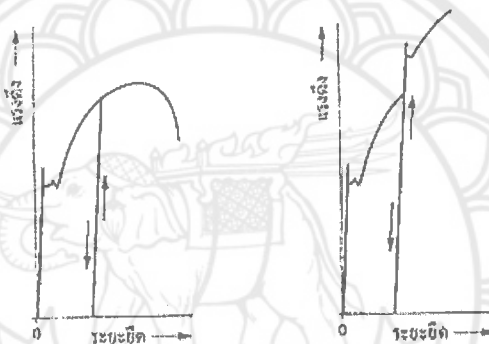
ความเร็วในการดึงทดสอบสูงเกินไปจะทำให้ค่า R_e , R_m สูงเกินความเร็วในการดึงต่ำ และอัตราการยืดตัวจะน้อยการทดสอบที่ความเร็วต่ำ โดยปกติความเร็วสำหรับเหล็กกล้า $V_F \approx 200 - 1000$ N/s

เนื่องจากความเร็วมีผลต่อจุดครากตัวบนมาก จึงให้ความแรงดึงต่ำเหลือระหว่าง 25 – 50 N/s การทดสอบที่ขึ้นทดสอบต่างกันหรือเหมือนกันความเร็วในการทดสอบแรงดึงให้มีค่าเท่ากัน ความเร็วในการยืดตัวสูงสุด $V_{e(\max)}$ จะไม่เกิน 3% ต่อนาที[4]



(ก) ที่ความเร็วแรงดึงสูง (ข) ที่ความเร็วแรงดึงต่ำ

รูปที่ 2.12 อิทธิพลของความเร็วแรงดึงต่อการเริ่มครากตัวหรือต่อความสูงของจุดครากตัวตามแผนภาพแรง-ระยะยืด[4]



(ก) กรณีไม่ผ่านการบ่มเครียด (ข) กรณีผ่านการบ่มเครียด

รูปที่ 2.13 ปฏิกริยาของการบ่มเครียด (strain ageing) ต่อแผนภาพแรง - ระยะยืดตัวที่มีการลดแรงดึงในขณะทดสอบแรงดึงต่อเหล็กกล้าที่มีช่องครากตัวให้เห็นเด่นชัด[4]

จะเห็นว่าเส้นลดแรงดึงนี้จะขนานกับเส้นแรงดึงจากศูนย์ขึ้นมา และเมื่อเริ่มให้แรงดึงเพิ่มขึ้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง จะเกิดเส้นแรงดึงที่เกือบเป็นเส้นตรงขึ้น ซึ่งทำให้เกิดลักษณะฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ขึ้นจะเห็นว่าช่วงการครากตัวจะไม่เกิดขึ้นอีกสำหรับกรณีขึ้นทดสอบไม่ผ่านการบ่มเครียดดังรูปที่ 2.13(ก)

ส่วนขึ้นทดสอบที่ผ่านการบ่มเครียดตามธรรมชาติ ด้วยการเก็บเอาไว้เกินกว่า 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้องหรือผ่านการบ่มเครียดเทียม ด้วยการอบที่ประมาณ 200 °C ถึง 300 °C ในเวลา 1 นาที จะเกิดช่วงการครากตัวให้เห็นอีก เมื่อทำการลดหรือเพิ่มแรงดึงอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะมีความสูงกว่าค่าเดิม ดังรูปที่ 2.13(ข) เช่นผ่านการ ได้รับความร้อนจากการเชื่อมและจากการตัดขึ้นทดสอบ

การวัดขนาดขึ้นทดสอบ ขนาด $\phi d_0 < 10 \text{ mm}$ ให้ค่าผิดพลาดได้ 0.01mm ขนาด $\phi d_0 > 10 \text{ mm}$ ให้ค่าผิดพลาด 0.1 mm ชิ้นงานที่เป็นผิวรีดขนาดผิดพลาดได้ 0.1 mm ชิ้นงานไม่เป็นหน้าตัดทรงกระบอกกลม หรือไม่เป็นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ให้ขนาดผิดพลาดได้สูงสุด 1%[4]

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วความเค้นในการทดสอบแรงดึง สำหรับเหล็กกล้าและโลหะไม่ใช่เหล็ก

วัสดุ	ความเร็วความเค้นสูงสุดในช่องยึดหย่อน		
	ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง	สูงกว่าอุณหภูมิห้อง
เหล็กกล้า	ตามแต่ตกลง	30N/mm ² .s	10N/mm ² .s
โลหะไม่ใช่เหล็ก	ตามแต่ตกลง	10N/mm ² .s	10N/mm ² .s

สำหรับอุณหภูมิทดสอบที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ห้ามไม่ให้ความเร็วการยืดตัวสูงกว่า 3% ต่อนาที ความเร็วการยืดตัวในการหาจุดครากตัวล่าง (R_{eL}) ที่อุณหภูมิห้องจะให้ไม่เกิน 15 % ต่อนาที สำหรับโลหะไม่ใช่เหล็ก ให้ความเร็วการยืดตัวสูงสุดไม่เกิน 40 % ต่อนาที

$$\text{ความยืด} \quad A = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100 \text{ หน่วย \%}$$

L_o = ความยาวก่อนดึง (original gauge length), mm

L_u = ความยาวหลังดึงขาด, mm

$$\text{การลดทอนพื้นที่} \quad Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} * 100 \text{ mm}^2$$

S_u = พื้นที่ภาคตัดขวางหลังรับแรงดึง, mm²

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่น} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ หน่วย N/mm}^2$$

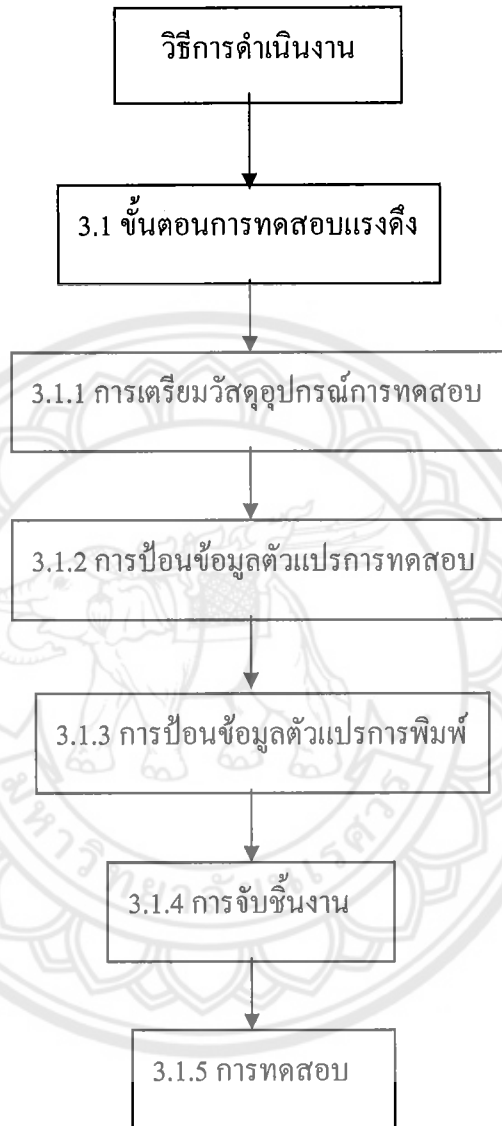
σ = ความเค้นดึง, N/mm²

$$\epsilon = \text{ส่วนที่ออก} = \frac{L - L_o}{L_o}$$

L = ความยาวที่ยืดออก, mm

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า $E = 21.10^4 \text{ N/mm}^2$ [4]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน



การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่มีสมบัติทางกล ตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง (Tensile test) และศึกษาการเชื่อมแบบการเชื่อมพ่วง โลหะแผ่นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปทดสอบแรงดึง การตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมที่มีอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์

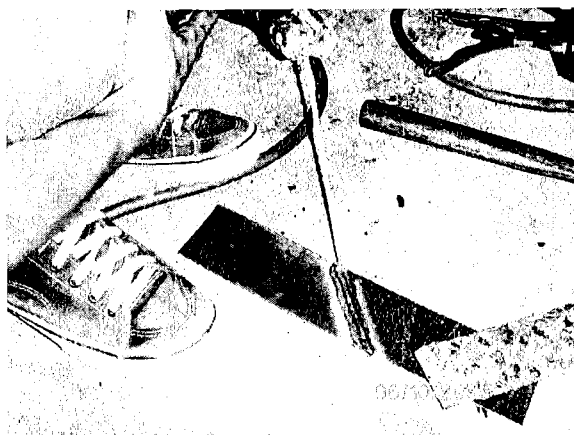
3.1 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

3.1.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์การทดสอบ

การเตรียมวัสดุทดสอบเริ่มจากการหาซื้อวัสดุแผ่นเหล็กดำจากท้องตลาดตามขนาดและจำนวนตามตาราง 3.1 แล้วนำมาเชื่อมด้วยการเชื่อมไฟฟ้าและนำมาแต่งรอยเชื่อมด้วยการเจียร์

ตารางที่ 3.1 การเตรียมวัสดุในการทดสอบแรงดึง

ลักษณะโลหะแผ่นเหล็กดำ	ความหนา (mm)	ขนาด (mm)	จำนวน (ชิ้น)
แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว	2.0	20 × 200	5
	4.0	20 × 200	5
	6.0	20 × 200	5
แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 90 องศา	2.0/2.0	20 × 200	5
	4.0/4.0	20 × 200	5
	6.0/6.0	20 × 200	5
แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 45 องศา	2.0/2.0	20 × 200	5
	4.0/4.0	20 × 200	5
	6.0/6.0	20 × 200	5



รูปที่ 3.1 แสดงการเชื่อมฟวงแผ่นเหล็กดำ



รูปที่ 3.2 แสดงการเจียรรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กเชื่อมฟวง



รูปที่ 3.3 แผ่นเหล็กทดสอบเนื้อเดียว แผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา และ 45 องศา หนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบชุดที่ 1 จำนวน 5 ชิ้นวัดและบันทึกความกว้างและความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานทั้ง ห้า และระบุเลขของชิ้นงาน จัดเส้นทำเครื่องหมายบนชิ้นงาน ให้ห่างกัน ตามตาราง 3.2 ให้ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความยาวก่อนดึงเท่ากับ $5.65\sqrt{S_0}$

L_0 = ความยาวก่อนดึง

k = 5.65

S_0 = พื้นที่ภาคตัดขวาง

ชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม $S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$

ชิ้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก $S_0 = a \times b$ หรือ ความหนา \times ความกว้าง

ตารางที่ 3.2 แสดงหาความยาวก่อนดึงของชิ้นทดสอบภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ความหนา mm	ความกว้าง mm	ชิ้นทดสอบภาคตัด สี่เหลี่ยมมุมฉาก S_0	ความยาวก่อนดึง L_0
2.0	20	40	35.7
4.0	20	80	50
6.0	20	120	61

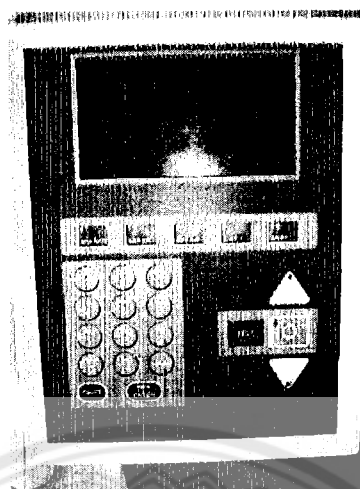
การเตรียมแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงตรงและแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 45 องศา
วัสดุทดสอบควรเป็นไปตามมาตรฐานแรงดึง เพื่อผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน

2. ติดตั้ง Load Cell ขนาด 50 kN พร้อมหัวจะชิ้นงานเข้ากับ Crosshead และเครื่องแล้วติดสายสัญญาณ เข้า Load Cell

3. เปิดสวิทช์เครื่องทดสอบ เครื่องจะใช้เวลารวบรวมข้อมูลหน้าจอ

3.1 การป้อนข้อมูลตัวแปรการทดสอบ

1. เข้าสู่ Main Manu Screen ด้วยการกดปุ่ม [Enter]
2. เลือก [1] เพื่อตั้งค่าตอนไปนี้ Speed 1 = 30 mm/min
3. เลือก [3] เพื่อตั้งค่า Auto return = Stop เสร็จแล้วกด [Enter]
4. เลือก [4] เพื่อ Force Limit = 90.00 %; ค่าอื่นๆ ตั้งเป็น off เสร็จแล้วกด [Enter]
5. เลือก [6] เพื่อตั้งค่าให้เป็น Graph Display
6. เลือก [7] เพื่อตั้งค่า Result > Program > Result Unit = Stress เสร็จแล้วกด [Enter]
7. เลือก [8] เพื่อตั้งค่า Default > Force Unit = Newton; Extension unit = Millimetres
8. เลือก [9] เพื่อป้อนความหนาและความกว้างของชิ้นงานตามที่วัดจริง



รูปที่ 3.4 ชุดป้อนควบคุมการตั้งค่า

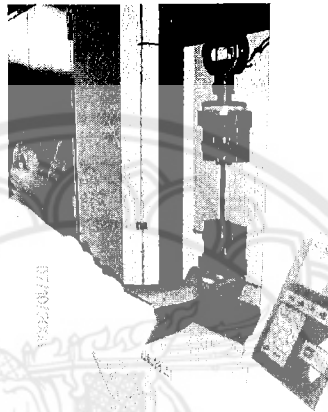
3.2 การป้อนข้อมูลตัวแปรการพิมพ์

1. เลือก [5] เพื่อตั้งค่า Identifier: Subject = ชื่อวิชา MELAB1/ MELABII/ MELABIII/ IELABI; Group = ชื่อกลุ่ม 1,2,3,...; Date/Time = วันที่และเวลาเริ่มทำการทดลอง เช่น 09/10/09 13.30 คือวันที่ 9 ตุลาคม 2552 เวลา 13.30 น; Material = ชนิดวัสดุที่ทดสอบ ST สำหรับเหล็ก หรือ PP สำหรับพลาสติก โพลีฟลอยด์สำเร็จแล้วกด [Enter]
2. เลือก [8] เพื่อตั้งค่า Printer Setup > Curves per page = 5, > Curves offset = 5% > Print out = Result/Graph เสร็จแล้วกด [Enter]

3.3 การจับชิ้นงาน

1. จับชิ้นงานชิ้นที่ 1 เข้ากับหัวจับด้านบน ขันยึດให้แน่น ส่วนหัวจับตัวล่างเปิดปากกว้างเอาไว้
2. กดปุ่ม [STOP] บนแผงควบคุมเพื่อให้ LED กะพริบ แล้วตั้งตำแหน่งชิ้นงานด้วยปุ่ม ลูกศร [UP] และ [DOWN] (เรียกว่า jogging) จนชิ้นงานอยู่ในปลายของหัวจับตัวล่างพอดี
3. กดปุ่ม [STOP] เพื่อ LED หยุดกะพริบ (สว่างนิ่ง)
4. ตั้ง Mechanical limit switch อันล่างที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งของตัวพา (crosshead striker) ประมาณ 1 เซนติเมตร

5. กดปุ่ม [F1] Zero Force เพื่อตั้งค่าแรงเป็นศูนย์ และ [F2] Zero Extension เพื่อตั้งระยะยึดเป็นศูนย์
6. ชันหัวจับด้านล่างให้จับชิ้นงานให้แน่น
7. ตรวจสอบดูความแน่ใจ LED ที่ปุ่ม [TEST] สว่างนิ่งแล้วแสดงว่าพร้อมที่จะทดสอบ ถ้า LED ดับ ให้กดปุ่ม [TEST] อีกครั้งหนึ่ง LED จะสว่างนิ่ง



รูปที่ 3.5 การป้อนข้อมูลตัวแปรการทดสอบ

3.4 การทดสอบ

1. กดปุ่มลูกศร [UP] เครื่องจะทำการทดสอบโดยการดึงจนขาดหรือถึง Limit ที่ระบุไว้ในกรณีที่ตั้งความเร็วในการดึงให้ต่ำกว่า 30 mm/min เครื่องจะส่งสัญญาณเสียงเตือนขณะทำงาน Crosshead กำลังเคลื่อนที่อยู่
2. เมื่อชิ้นงานขาดแล้วให้นำชิ้นงานเดิมทั้งสองส่วนออกมาวางต่อกันแล้ววัดความยาวรวมและความกว้างของชิ้นงาน ณ บริเวณรอยขาด
ในกรณีที่ชิ้นงานถูกดึงจนเครื่องหยุดแต่ยังไม่ขาดให้กดลูกศร [UP] จนชิ้นงานขาดแล้วกดปุ่ม [STOP] จากนั้นจึงทำต่อไปตามปกติ
3. กดปุ่ม [F5] หัวจับบนจะเคลื่อนที่กลับมาสู่ตำแหน่งศูนย์
4. เปลี่ยนชิ้นงานใหม่ใส่เข้าไปในปากของหัวจับบนแล้วทำตามขั้นตอน
5. ทำการทดลองจนครบ 5 ชิ้น
6. กด [F4] เครื่องจะพิมพ์ผลการทดลองเป็นกราฟ 5 เส้นพร้อมผลการทดลองที่เป็นตัวเลข หลังจากพิมพ์งานแล้วให้กด [F1] เพื่อลบข้อมูลทั้ง 5 ชุดออกจากหน่วยความจำ
7. ป้อนข้อมูลวัสดุเป็น ST
8. ป้อนความกว้างและความหนาของชิ้นงาน

ช.
TS
250
01442.0
2553

บทที่ 4

1549168X
20 พ.ค. 2554



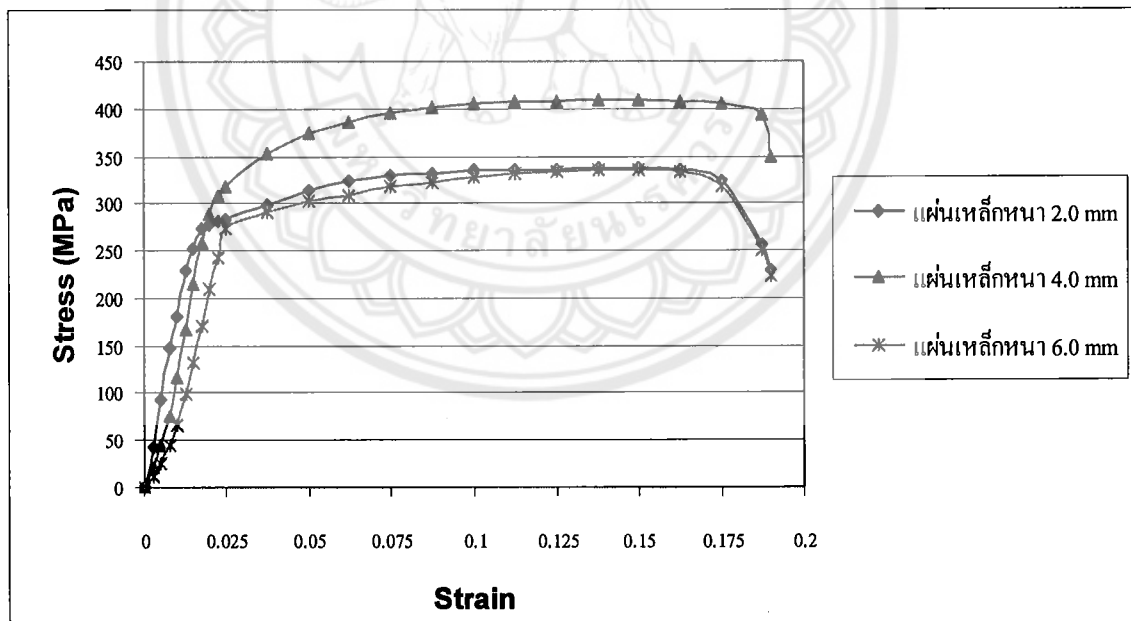
สำนักหอสมุด

ผลการทดสอบ

การทดสอบที่มีผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุ ในการศึกษานี้จะใช้เหล็กแผ่นดำ ขนาดความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm ตัดเป็นแผ่นขนาดความกว้าง 20 × 200 mm นำมาเชื่อมต่อกัน โดยกำหนดแนวเชื่อมเอียงทำมุม 45 องศา และ 90 องศา กับแนวยาวของแผ่นเหล็ก ทำการทดสอบด้วยการดึงในหนึ่งแนวแกน (Unidirection tensile test) ตามมาตรฐาน ISO 6892-1984 (E) และ ASTM (E8) จากผลการทดสอบจะได้ข้อมูล ดังนี้

4.1 การทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวขนาดความหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm

เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น ของการเชื่อมพ่วงที่มีต่อความแข็งแรงของวัสดุ จึงได้ทำการทดสอบแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวด้วยการดึงในหนึ่งแนวแกน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในกราฟ ดังนี้



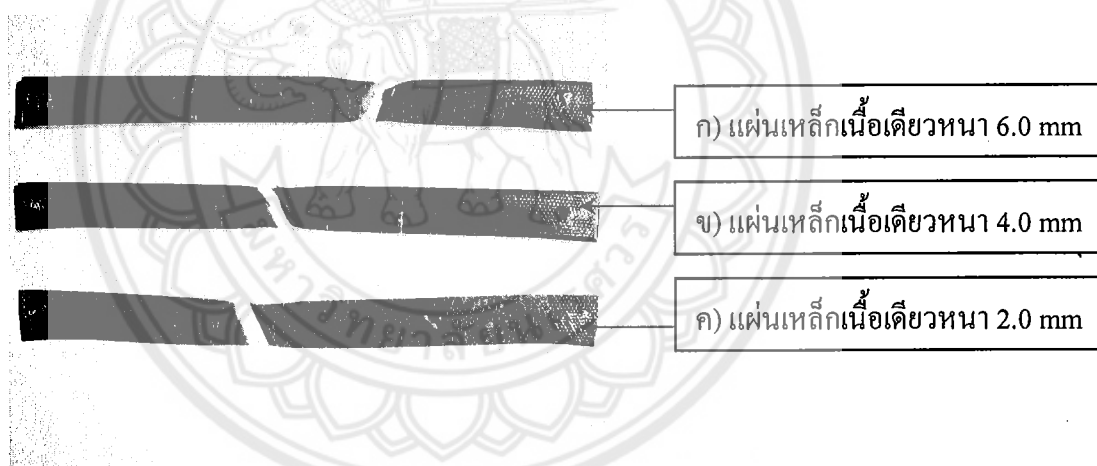
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว

ลักษณะของเส้นกราฟในแต่ละความหนา จะมีช่วงเหมือนกันและช่วงที่ต่างกัน ช่วงที่เหมือนกันคือ ช่วงสัดส่วนคงที่ (Proportional Limit) และ ช่วงสุดท้ายการยืดหยุ่น (Elastic limit) กับช่วงที่ต่างกัน คือ ช่วงจุดคราก (Yield Point), จุดที่ความเค้นสูงสุด (Ultimate Stress) และจุดแตกหัก

(Fracture) ซึ่งลักษณะกราฟไม่สอดคล้องกับสมบัติทางกลของวัสดุ กล่าวว่ วัสดุนิตเดียวกันไม่ว่าจะขนาดไหนก็ตาม เมื่อนำมาทดสอบด้วยการดึงแล้ว จะมีลักษณะกราฟ Stress – Strain ที่เหมือนหรือใกล้เคียงกัน

จากช่วงเหมือนกัน จะมีค่า Modulus of elasticity ของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้น ในช่วง Elastic แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm มีค่ามากที่สุดประมาณ 18.00 GPa, แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm มีค่าประมาณ 11.72 GPa ห่างจากแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm ประมาณ 34.89% และแผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm มีค่าประมาณ 6.67 GPa ห่างจากแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm ประมาณ 63.02%

แล้วในช่วงจุดคราก ค่าความเค้นครากไม่สามารถประมาณ นอกจากของวัสดุซึ่งเป็นเหล็กหล่อ จึงใช้วิธีการ 0.2% Offset Stress ลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียว เพื่อหาค่าความเค้นครากของแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm ในแต่ละเส้น แล้วจะได้ค่าของความเค้นครากประมาณ 315.25, 329.36 และ 277.26 MPa ตามลำดับ

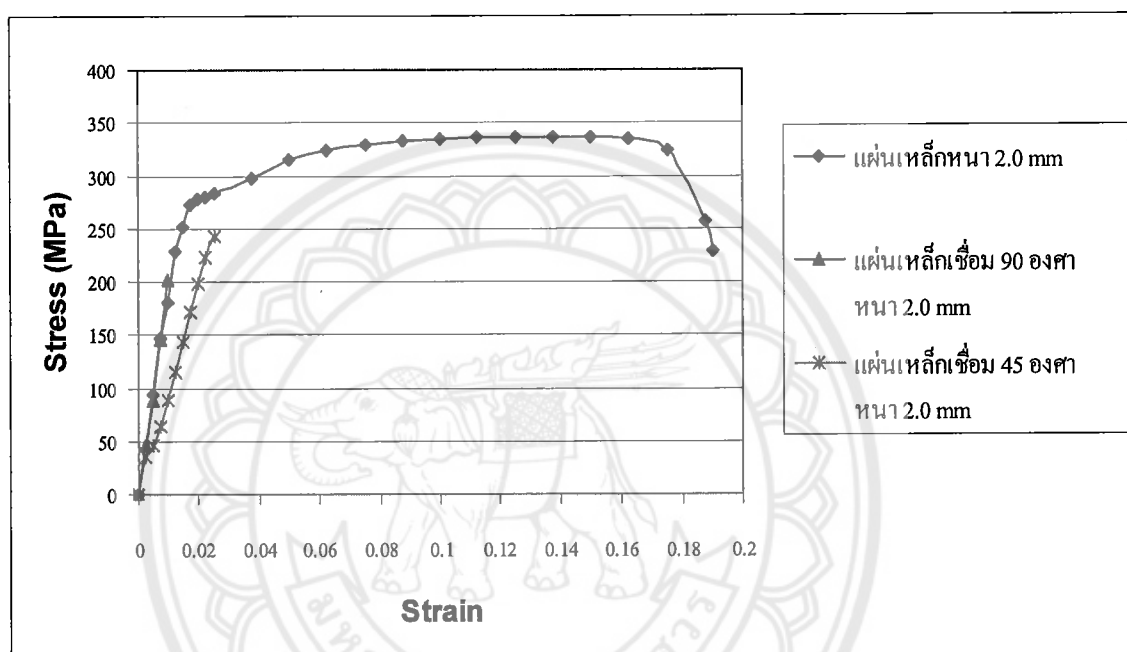


รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการฉีกของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียว

ลักษณะรอยขาดของแผ่นเหล็กเนื้อเดียวเป็นแบบเอียง ประมาณ 45 องศา กับแนวการดึง มีความสอดคล้องกันทฤษฎีการเสียหายของวัสดุเหนียว คือ ทฤษฎีความเค้นเค้นเฉือนสูงสุด กล่าวว่ “ความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนครากที่เกิดขึ้นในงานทดสอบของวัสดุเดียวกัน” โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแผ่นเหล็กทั้ง 3 ความหนามีค่ามากกว่าความเค้นเฉือนครากที่ได้จากการทดสอบ ในรูป 4.1

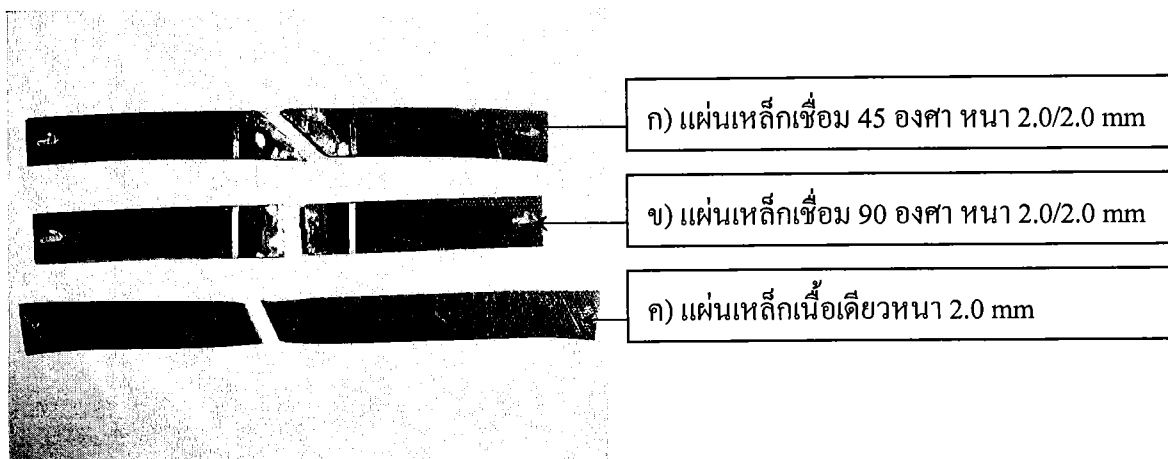
4.2 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุในแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm

การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อกำหนดแนวรอยเชื่อมบนแผ่นเหล็กขนาดความหนา 2.0 mm ทำมุม 45 องศา และ 90 องศากับแนวยาวของแผ่นเหล็ก นำมาทดสอบด้วยการดึงในหนึ่งแนวแกน แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบระหว่าง แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงแล้ว จะได้กราฟแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 2.0 mm

จากรูป 4.3 ลักษณะของกราฟของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงขนาดก่อนช่วงจุดคราก จึงพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วง ที่ค่า Modulus of elasticity ของแผ่นเหล็กทั้ง 3 เส้น โดยที่แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงมีแนวโน้มลดลง จากกราฟค่า Modulus of elasticity ของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา มีค่ามากที่สุด ประมาณ 20.19 GPa แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวมีค่า ประมาณ 18.00 GPa มีค่าห่างกันแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา ประมาณ 10.84% และแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา มีค่าประมาณ 8.9 GPa และ ห่างจากแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา ประมาณ 55.76%

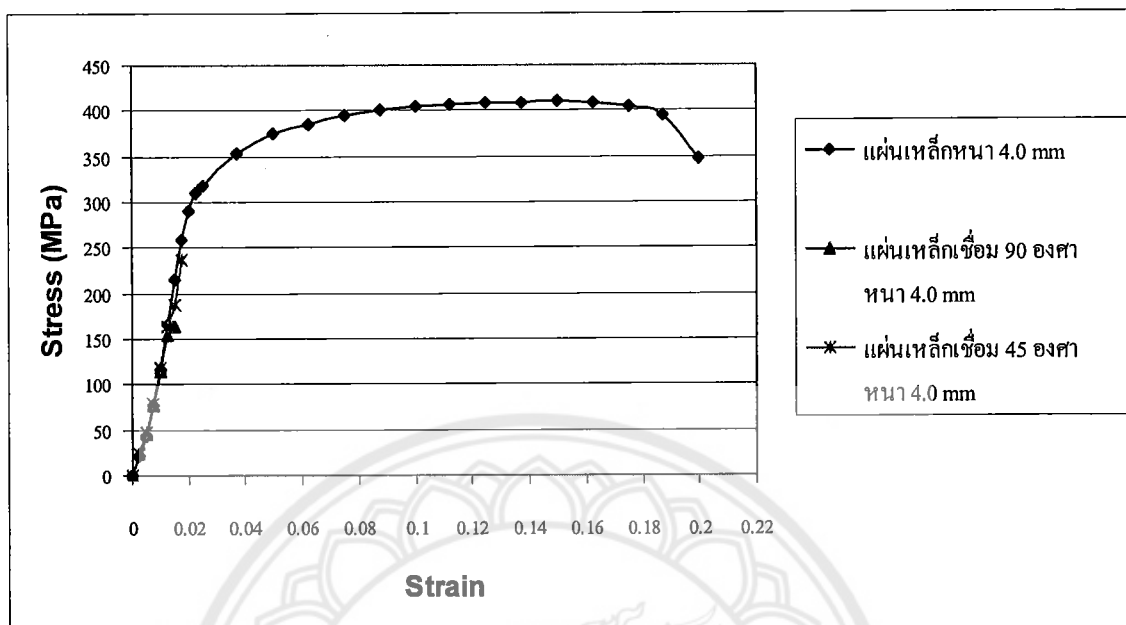


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเสียรูปของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว
แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หน้า 2.0 mm

การทดสอบแรงดึงการเสียหายของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงแตกต่างกับแผ่นเหล็กเนื้อเดียว โดยการขาดแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงจะขาดแบบตรงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเปราะ แต่แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวเป็นแบบเอียง ประมาณ 45 องศา กับแนวการดึงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเหนียวและการยึดตัวของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงน้อยกว่าแผ่นเหล็กเนื้อเดียว

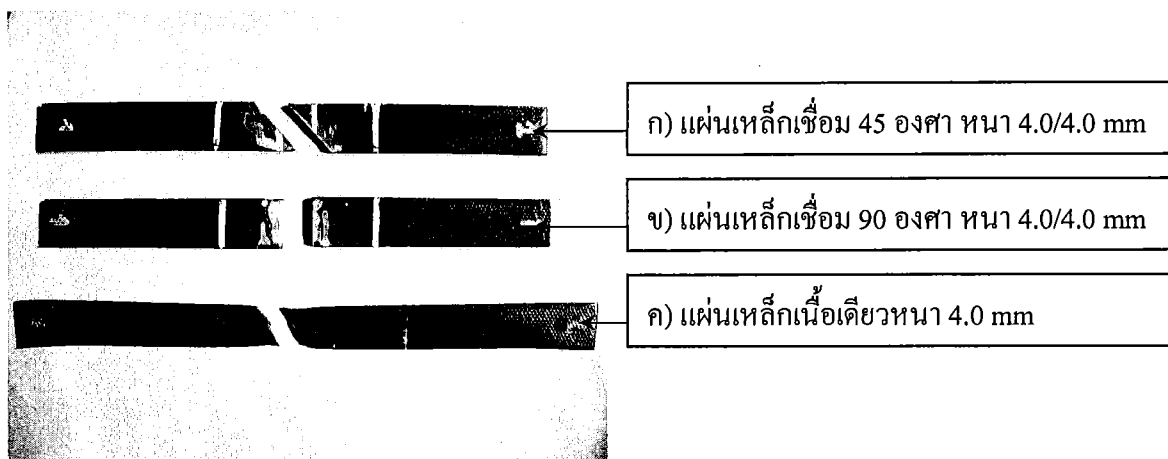
ทำให้ทราบว่าแผ่นเหล็กที่ผ่านการเชื่อมพ่วงแล้วนำทดสอบด้วยการดึง ค่าความแข็งแรงของเหล็กลดลง การขาดจะเกิดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม

4.3 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุในแผ่นเหล็กดำหนา 4.0 mm



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว กับแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงหนา 4.0 mm

ผลการสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ค่า Modulus of elasticity ของแผ่นเหล็กทั้ง 3 เส้น ค่าความแข็งแรงโดยที่แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา มีค่าประมาณ 11.75 GPa แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว ประมาณ 11.72 MPa ห่างกับแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว ประมาณ 0.26% และแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา มีค่าประมาณ 11.35 GPa อยู่ห่างกับแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา ประมาณ 3.11% และค่าความเค้นครากของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงไม่ปรากฏในกราฟ เกิดการเสียหายก่อนความเค้นครากที่ได้จากการทดสอบแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว

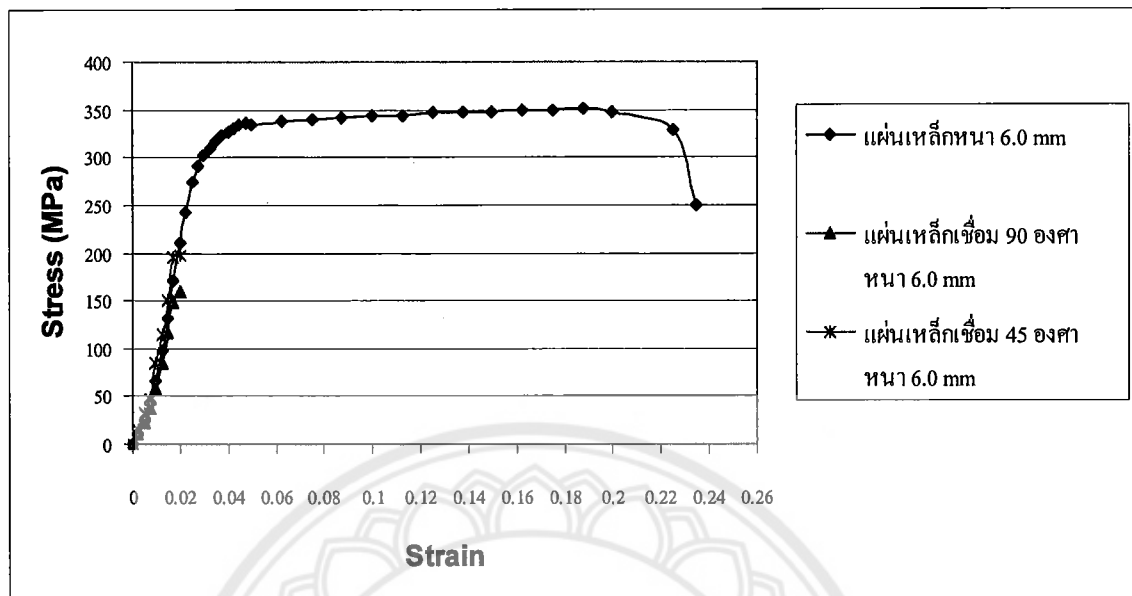


รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเสียหายรูปของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว
แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หน้า 4.0 mm

ผลการสอบมีลักษณะรูปการเสียหาย เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4 การทดสอบแรงดึงการเสียหายของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงแตกต่างกับแผ่นเหล็กเนื้อเดียว โดยการขาดแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงจะขาดแบบตรงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเปราะ แต่แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวเป็นแบบเอียง ประมาณ 45 องศา กับแนวการดึงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเหนียวและการยึดตัวของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงน้อยกว่าแผ่นเหล็กเนื้อเดียว

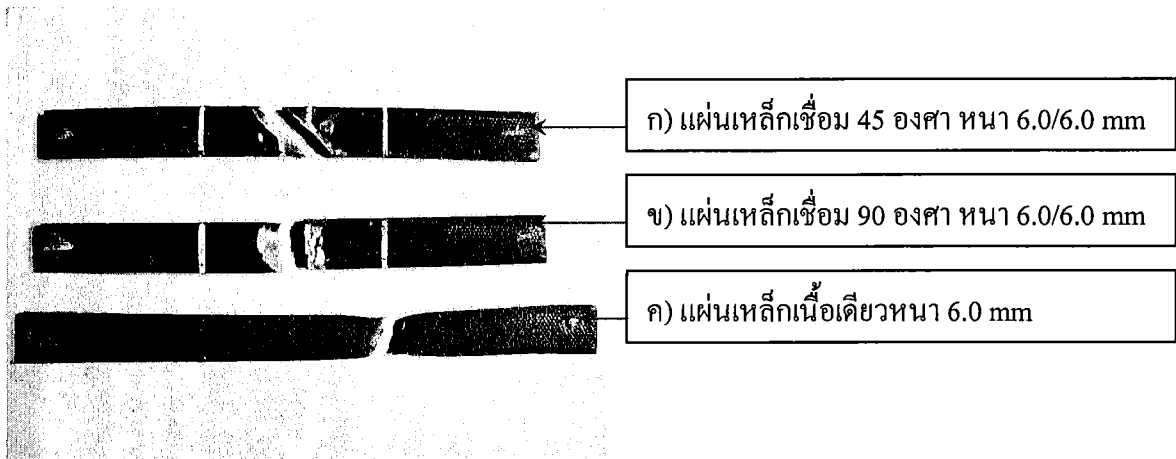
ทำให้ทราบว่าแผ่นเหล็กที่ผ่านการเชื่อมพ่วงแล้วนำทดสอบด้วยการดึง ค่าความแข็งแรงของเหล็กลดลง การขาดจะเกิดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม

4.4 การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุในแผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 6.0 mm

ผลการสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ค่า Modulus of elasticity ของแผ่นเหล็กทั้ง 3 เส้น โดยที่แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา ค่า E ประมาณ 8.39 GPa มีค่ามากที่สุด แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียว มีค่าประมาณ 6.67 GPa ซึ่งมีค่าต่างกับแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา ประมาณ 20.63% และแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา มีค่าประมาณ 5.83 GPa ต่างกับแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา ประมาณ 30.45% ค่าความเค้นครากของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงไม่ปรากฏให้เห็น เกิดเสียหายก่อนความเค้นครากที่ได้จากการทดสอบแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียว



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเสียรูปของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียว

แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 90 องศา และ 45 องศา หน้า 6.0 mm

ผลการสอบมีลักษณะรูปการเสียหาย เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4 การทดสอบแรงดึงการเสียหายของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงแตกต่างกับแผ่นเหล็กเนื้อเดียว โดยการขาดแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงจะขาดแบบตรงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเพราะ แต่แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวเป็นแบบเอียง ประมาณ 45 องศา กับแนวการดึงเกิดจากความเสียหายของวัสดุเหนียวและการยึดตัวของแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงน้อยกว่าแผ่นเหล็กเนื้อเดียว

ทำให้ทราบว่าแผ่นเหล็กที่ผ่านการเชื่อมพ่วงแล้วนำทดสอบด้วยการดึง ค่าความแข็งแรงของเหล็กลดลง การขาดจะเกิดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เราจึงศึกษาการทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm เนื้อเดียวและเชื่อมพ่วง 90 องศา กับ 45 องศา ตามมาตรฐาน ISO 6892-1984 (E) และ ASTM E8 ได้ผลสรุปดังนี้

1. การทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm ต่อค่าความแข็งแรงพิจารณาจากค่า Modulus of elasticity, ค่าความเค้นครากของวัสดุและกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain พบว่าแผ่นเหล็กมีความแข็งแรงที่สุดมาก คือความหนาที่ 2.0 mm มีค่าความแข็งแรงมากกว่าความหนา 4.0 mm และแผ่นเหล็กหนา 4.0 mm มีค่าความแข็งแรงมากกว่าความหนา 6.0 mm

(2.0 > 4.0 > 6.0)

2. การทดสอบผลกระทบของการเชื่อมพ่วงต่อความแข็งแรงของวัสดุในแผ่นเหล็ก หนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm จากไดอะแกรม Stress – Strain พบว่าแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงทั้ง 3 ความหนาขาดในช่วง Elastic หรือก่อนช่วงของจุดคราก ลักษณะของการขาด ขาด ณ ตำแหน่งรอยเชื่อมพ่วง และพิจารณาค่าความแข็งแรงจากค่า Modulus of elasticity ของแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วงจะมีความแข็งแรงแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเหล็กเนื้อเดียว โดยแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา มีความแข็งแรงได้มากกว่าแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา

(แผ่นเหล็กเนื้อเดียว > แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา > แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเชื่อมพ่วงแผ่นเหล็กค้ำทดสอบแต่ละความหนา ความร้อนจากการเชื่อมมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ดังนั้น ในการจัดเตรียมวัสดุทดสอบ ควรกำหนดเวลาการเชื่อมให้ให้เท่ากัน และความหนาของรอยเชื่อมให้สม่ำเสมอ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chaptor_6/tension_test.doc
- [2] http://www.tumcivil.com/engfanatic/board/gen.php?topic_id=14981&hit=1
- [3] ทฤษฎีพลาสติกซิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร โดย รศ.ดร. เดช พุทธเจริญทอง
- [4] งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม โดย มานพ ต้นตระกูลชัย
- [5] http://www.dpt.go.th/nrp/tisi/fulltext/TIS244_4_7-2525.pdf





ภาคผนวก ก

กราฟและตารางผลการทดสอบ

ในส่วนของภาคผนวก ก เป็นผลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ เพื่อสร้างกราฟไคอะแกรม ความเค้น - ความเครียด จะมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณค่าความเค้น - ความเครียด

$$\text{สมการความเค้น } \sigma = \frac{F}{A} \text{ หน่วย } \frac{N}{m^2} ; pa$$

เมื่อ σ = ความเค้น (นิวตันต่อตารางเมตร)

F = แรงดึง (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดขวาง (ตารางเมตร)

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่าที่ได้ F = แรงดึง (นิวตัน) กับระยะยืด(มิลลิเมตร) ต้องทำการเปลี่ยนหน่วยของระยะยืดเป็น (เมตร) ก่อนการคำนวณสมการ

$$\text{สมการความเครียด } \varepsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} \text{ ไม่มีหน่วย}$$

เมื่อ ε = ความเครียด

L_i = ระยะยืดของชิ้นงาน

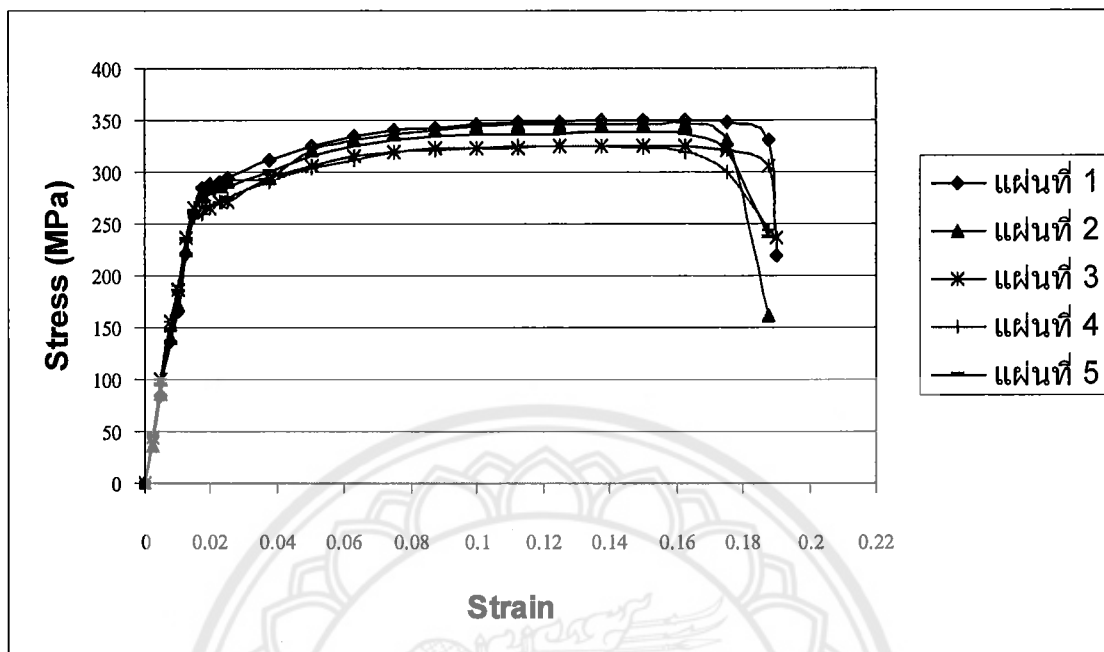
L_o = ความยาวของชิ้นงาน

ตัวอย่าง แผ่นเหล็กดำเนื้อเดี่ยว ขนาด $2.0 \times 20 \times 200$ mm (หนา \times กว้าง \times ยาว) ทดสอบการดึงที่แรงดึง 2500 นิวตัน ณ ระยะยืดออก 5 มิลลิเมตร ค่าความเค้น - ความเครียดมีค่าเท่าไร

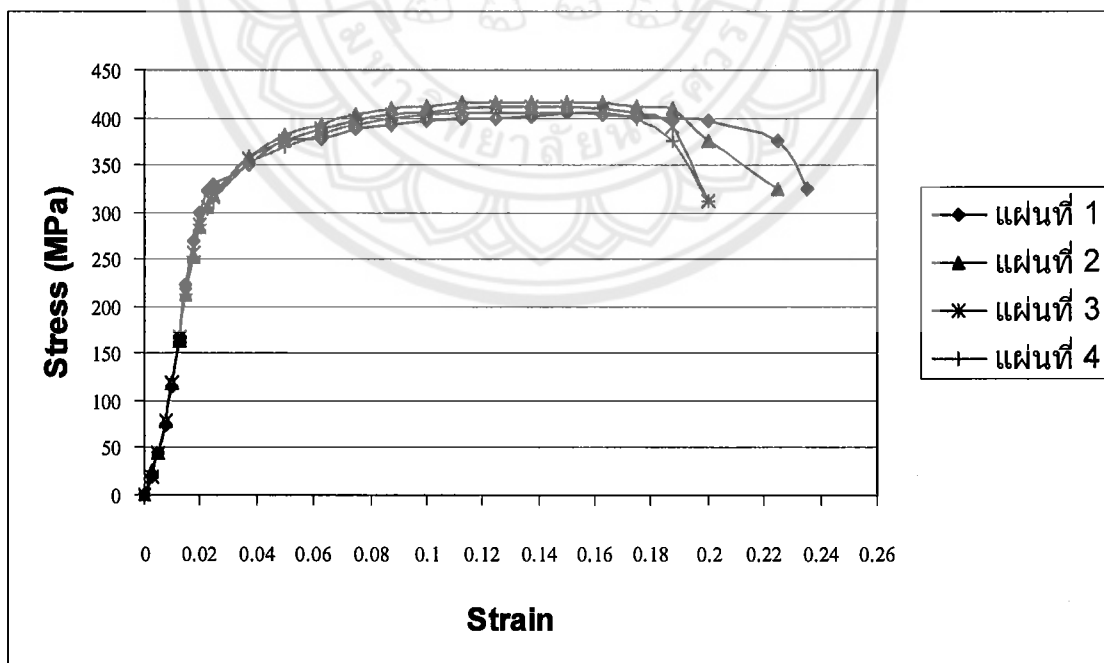
$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ จากสมการความเค้น } \sigma &= \frac{F}{A} \\ &= \frac{2500}{0.002 \times 0.02} \frac{N}{m^2} \\ &= 62500000 \frac{N}{m^2} ; pa \\ &= 62.5 \times 10^6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการความเครียด } &= \frac{L_i - L_o}{L_o} \\ &= \frac{205 - 200}{200} = 0.025 \end{aligned}$$

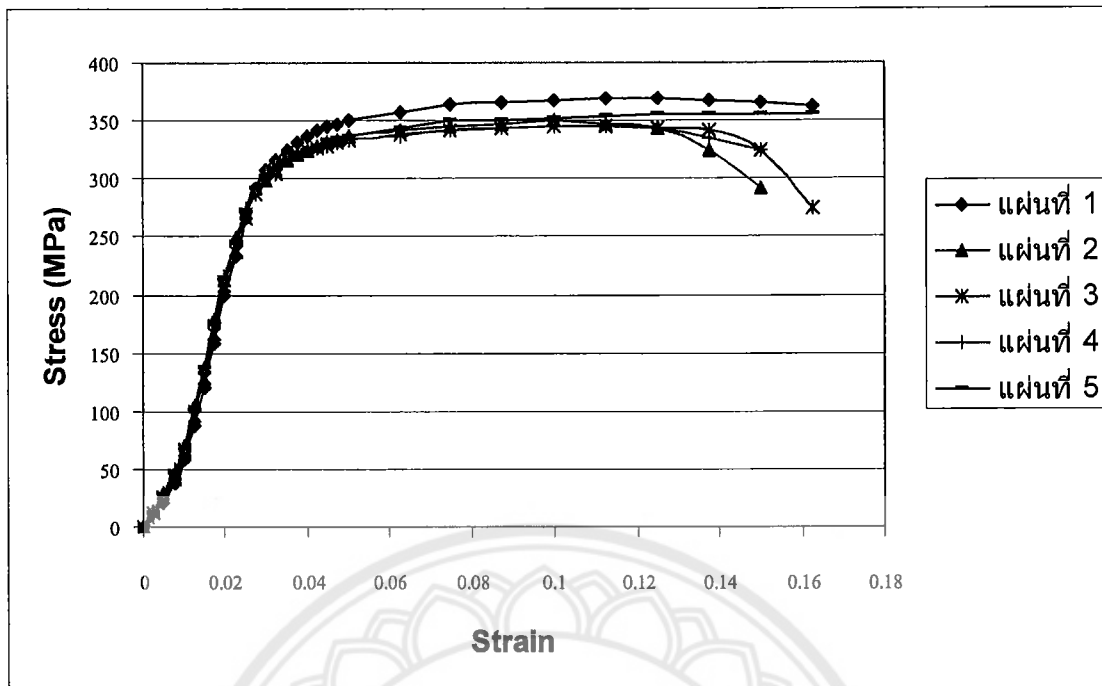
แผ่นเหล็กเนื้อเดียว



กราฟที่ 1(ก) แผ่นเหล็กหนา 2.0 mm

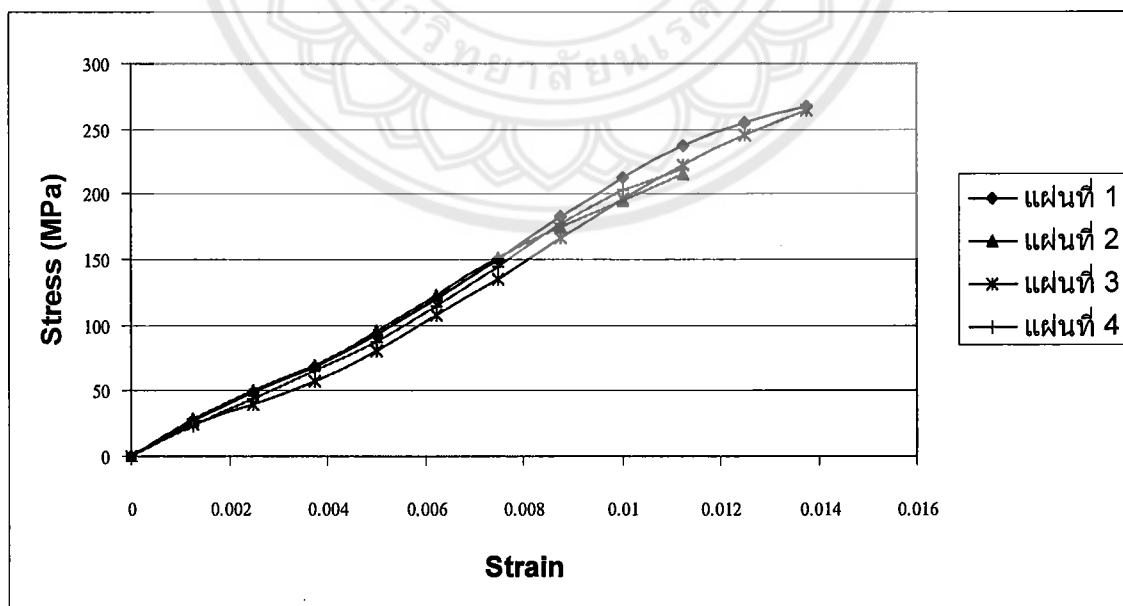


กราฟที่ 2(ก) แผ่นเหล็กหนา 4.0 mm

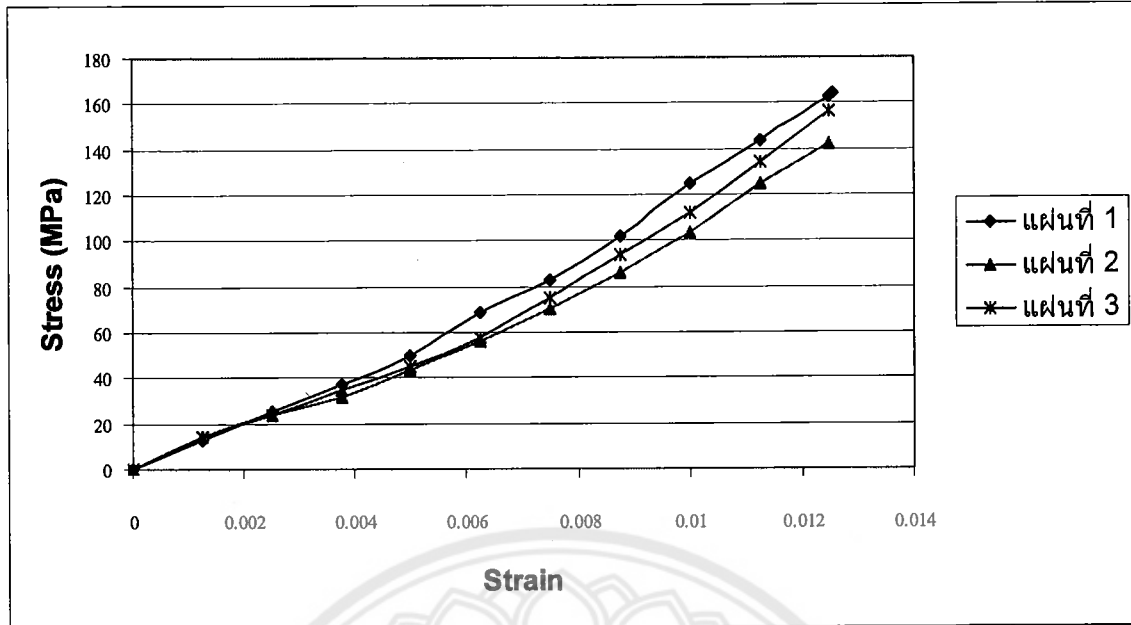


กราฟที่ 3(ก) แผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm

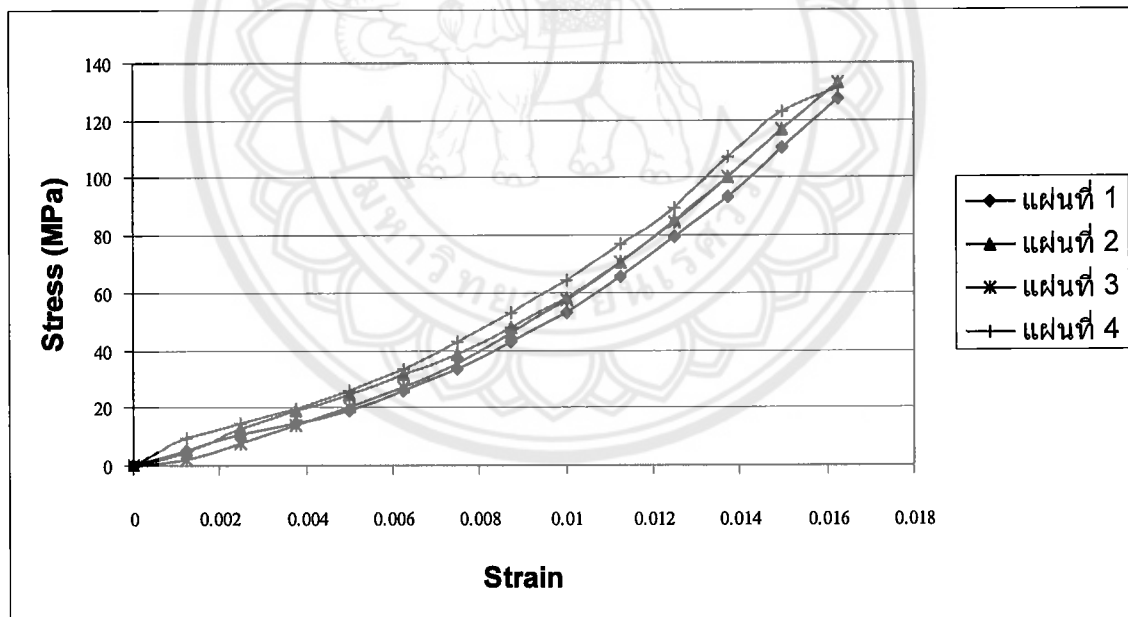
แผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วง 90 องศา



กราฟที่ 4(ก) แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา

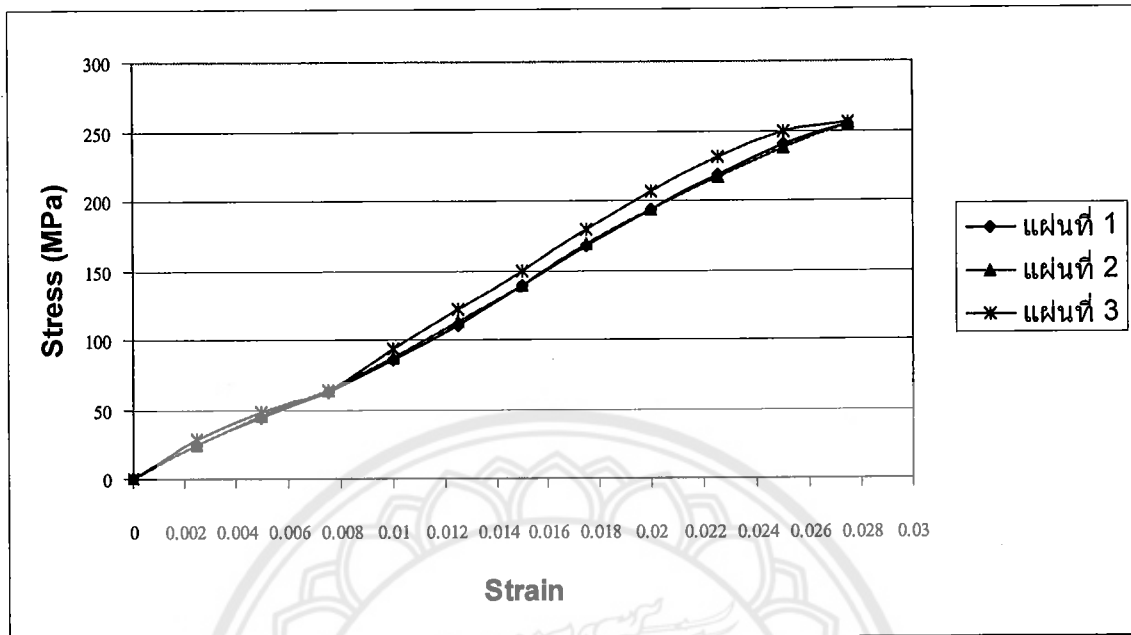


กราฟที่ 5(ก) แผ่นเหล็กหนา 4.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา

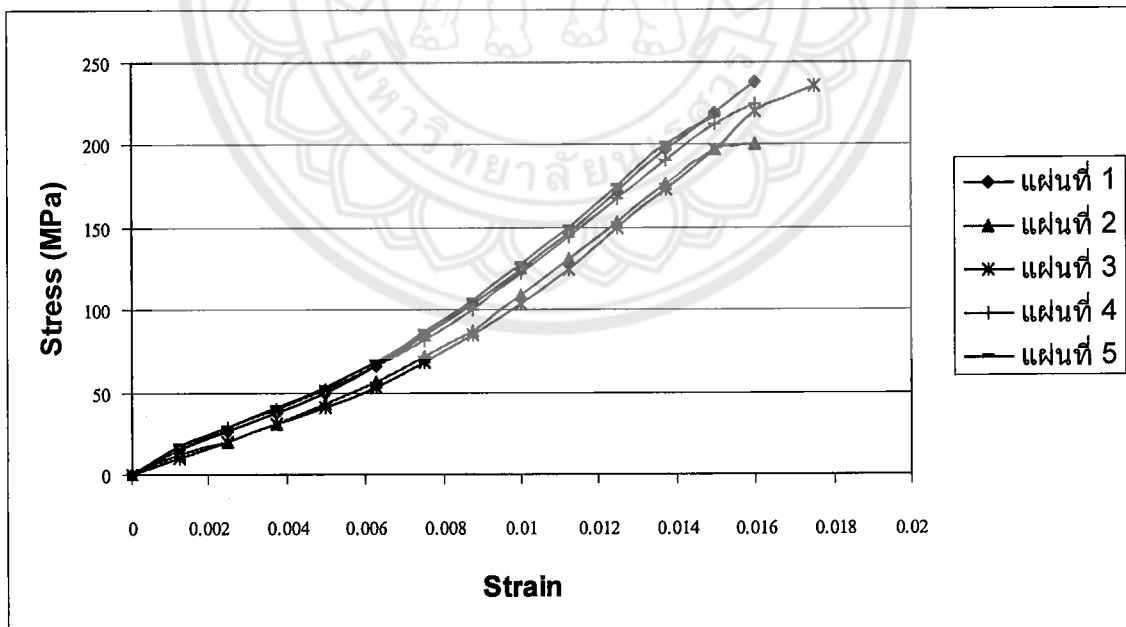


กราฟที่ 6(ก) แผ่นเหล็กหนา 6.0 mm เชื่อมพ่วง 90 องศา

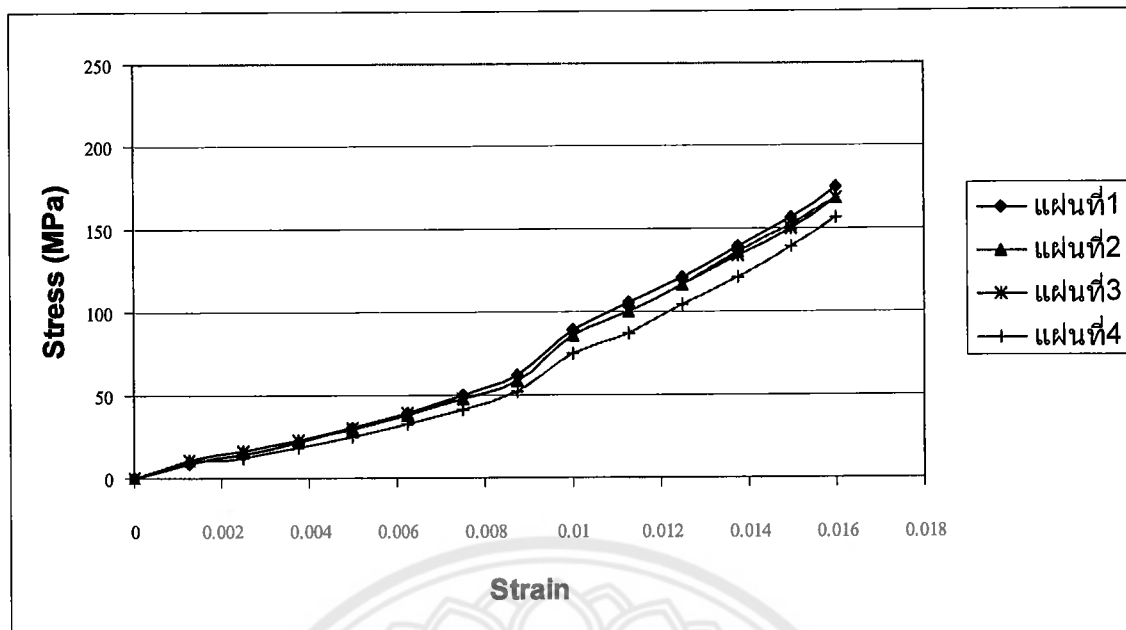
แผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วง 45 องศา



กราฟที่ 7(ก) แผ่นเหล็กดำหนา 2.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา



รูปกราฟที่ 8(ก) แผ่นเหล็กดำหนา 4.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา



กราฟที่ 9(ก) แผ่นเหล็กดำหนา 6.0 mm เชื่อมพ่วง 45 องศา



ผนวก ข

การคำนวณค่า Modulus of elasticity และความเค้นคราก

จากรูปที่ 4.1 ค่า Modulus of elasticity ของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้น ในช่วง Elastic พิจารณาที่ความเครียด เท่ากับ 0.01

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

เมื่อ E = Modulus of elasticity

σ = ความเค้น

ε = ความเครียด

การหาเปอร์เซ็นต์ช่วงห่างของค่า Modulus of elasticity ในเส้นกราฟ Stress - Strain

ค่าความเค้นที่มากที่สุดตั้ง หารให้ได้ 100 %

แล้วนำความเค้นที่ต้องการทราบช่วงห่างตั้ง หารด้วยตัวหารของค่าความเค้นที่มากที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้มาลบกัน 100%

ตัวอย่าง แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวหนา 4.0 mm $\frac{14500}{145} = 100\%$

แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวหนา 2.0 mm $\frac{14000}{145} = 96.55\%$

ช่วงห่างของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวหนา 4.0 mm กับ แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวหนา 2.0 mm เท่ากับ $100\% - 96.55\% = 3.45\%$

แผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 180 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{180}{0.01} = 18.00 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 117.185 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{117.185}{0.01} = 11.72 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 66.55 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{66.55}{0.01} = 6.65 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กค้ำหนา 4.0 mm ค่า E ประมาณ 18.00 GPa มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าต่างจากแผ่นเหล็กค้ำหนา 2.0 mm และแผ่นเหล็กค้ำหนา 6.0 mm ประมาณ 34.89% และ 63.02% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain การเปรียบเทียบของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 2.0 mm ค่า Modulus of elasticity ของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้นในช่วง Elastic พิจารณาที่ความเครียด เท่ากับ 0.01

แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดี่ยวหนา 2.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 180 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{180}{0.01} = 18.00 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 2.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 201.875 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{201.875}{0.01} = 21.19 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 40 องศา หนา 2.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 89.063 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{89.063}{0.01} = 8.91 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา หนา 2.0 mm ค่า E ประมาณ 18.00 GPa มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าต่างจากแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดี่ยวหนา 2.0 mm และแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 2.0 mm ประมาณ 10.84% และ 55.88% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain การเปรียบเทียบของแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กค้ำเชื่อมพ่วงหนา 4.0 mm ค่า Modulus of elasticity ของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้นในช่วง Elastic พิจารณาที่ความเครียด เท่ากับ 0.01

แผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดี่ยวหนา 4.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 117.185 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{117.185}{0.01} = 11.72 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 4.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 113.54 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{113.54}{0.01} = 11.35 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา หนา 4.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 117.5 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{117.85}{0.01} = 11.75 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา หนา 4.0 mm ค่า E ประมาณ 11.75 GPa มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าต่างจากแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 4.0 mm และแผ่นเหล็กค้ำเนื้อเดี่ยวหนา 4.0 mm ประมาณ 0.26% และ 3.11% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain การเปรียบเทียบของแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็กดำเชื่อมพ่วงหนา 6.0 mm ค่า Modulus of elasticity ของเส้นกราฟทั้ง 3 เส้นในช่วง Elastic พิจารณาที่ความเครียด เท่ากับ 0.01

แผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวหนา 6.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 66.55 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{66.55}{0.01} = 6.67 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 6.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 58.32 MPa

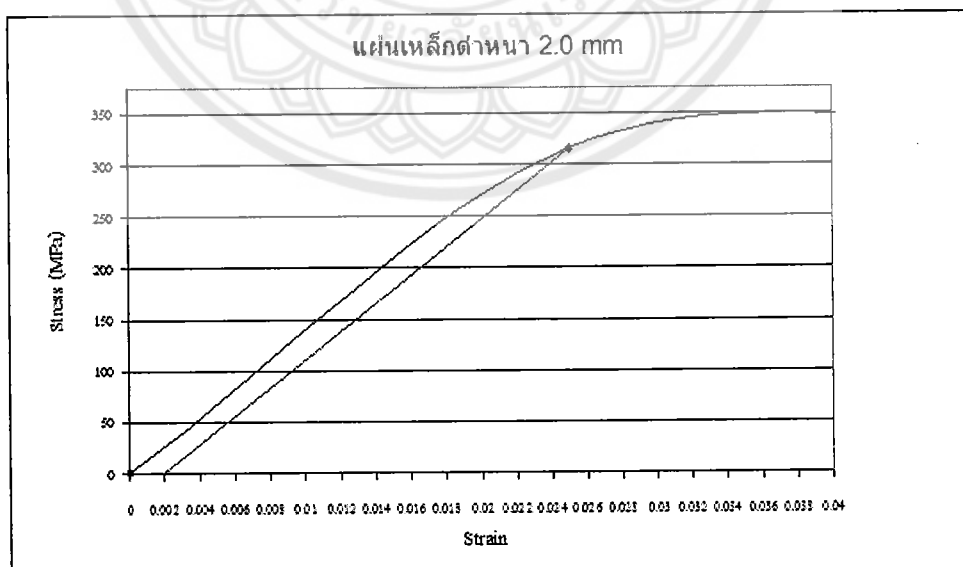
$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{58.32}{0.01} = 5.83 \text{ GPa}$$

แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา หนา 6.0 mm ค่าความเค้นประมาณ 83.85 MPa

$$\text{จาก } E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{83.85}{0.01} = 8.39 \text{ GPa}$$

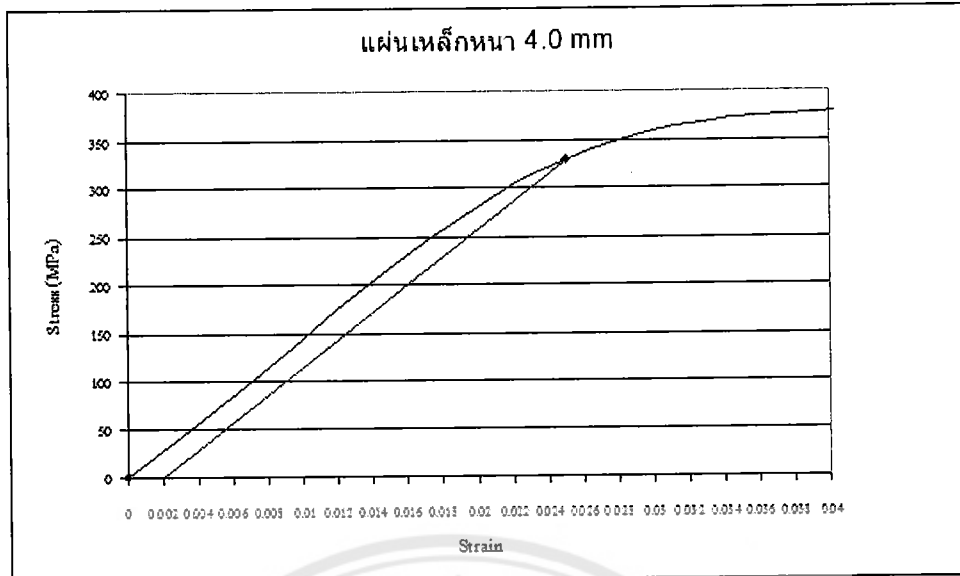
แผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 45 องศา หนา 6.0 mm ค่า E ประมาณ 8.39 GPa มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าต่างจากแผ่นเหล็กดำเนื้อเดียวหนา 6.0 mm และแผ่นเหล็กเชื่อมพ่วง 90 องศา หนา 6.0 mm ประมาณ 20.63% และ 30.45% ตามลำดับ

วิธีการ 0.2% Offset Stress เพื่อหาค่าความเค้นครากของแผ่นเหล็กหนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm



รูปที่ 1(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002

ของแผ่นเหล็กดำหนา 2.0 mm

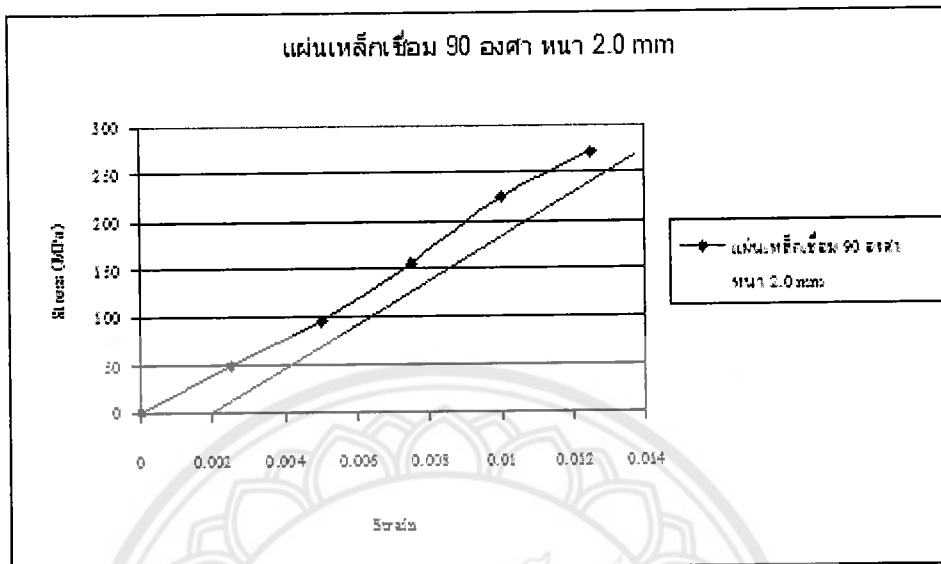


รูปที่ 2(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กหนา 4.0 mm

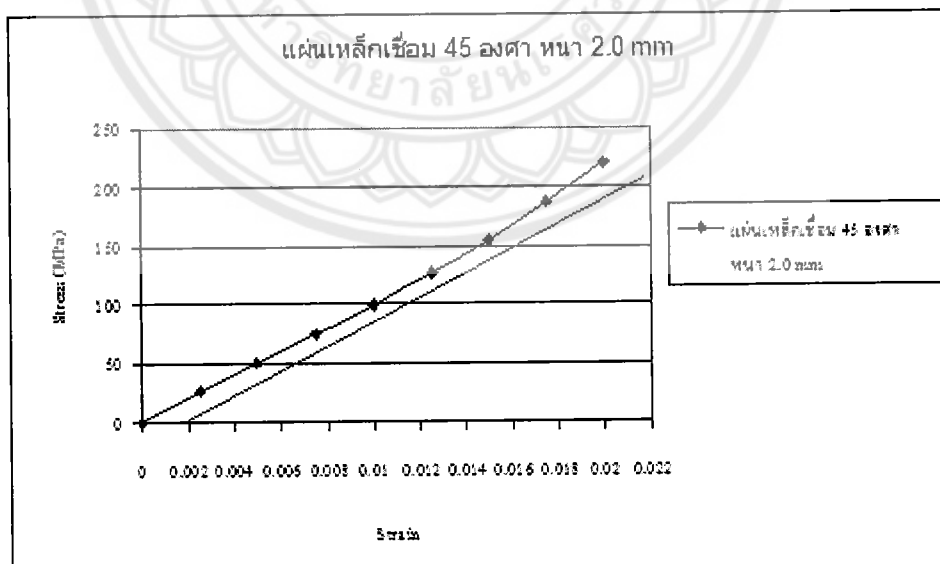


รูปที่ 3(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กหนา 6.0 mm

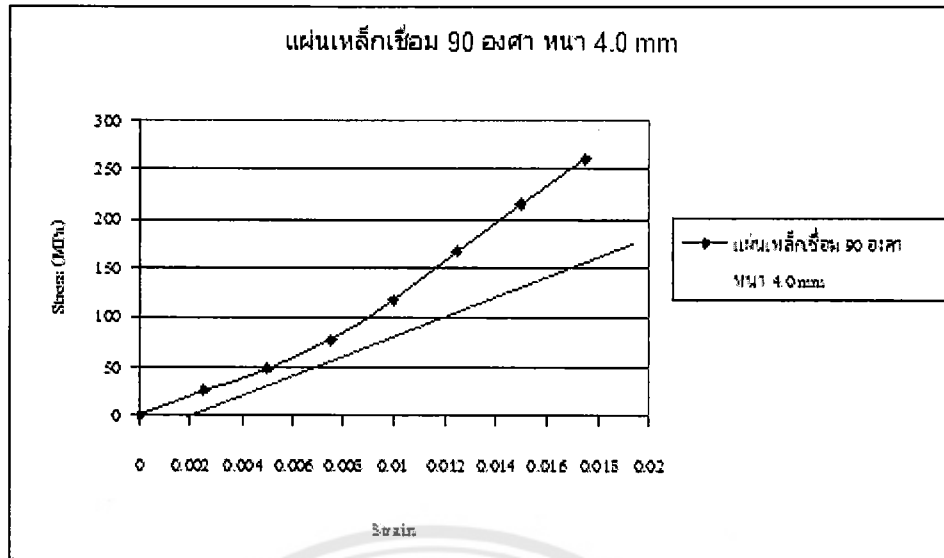
วิธีการ 0.2% Offset Stress เพื่อหาค่าความเค้นครากของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา และ 45 องศา
หนา 2.0, 4.0 และ 6.0 mm



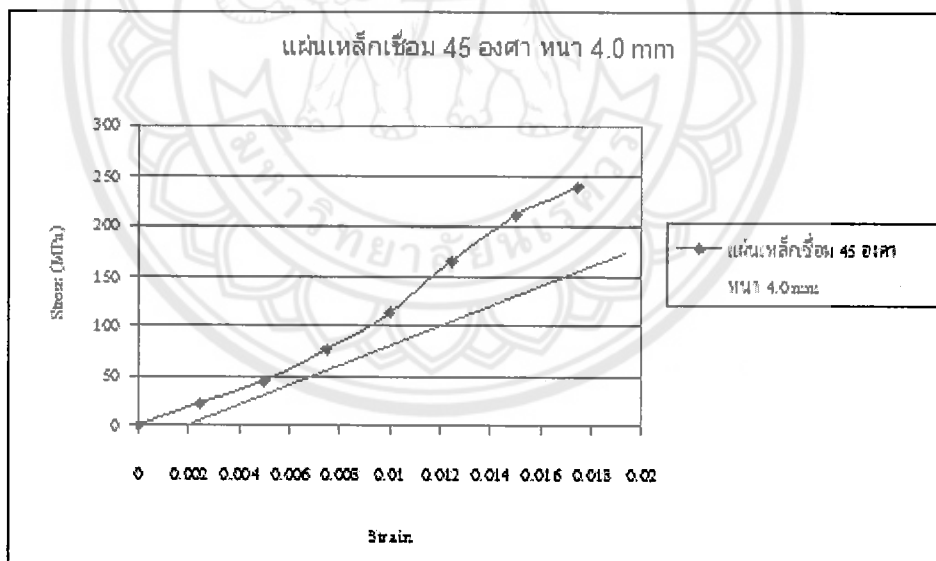
รูปที่ 4(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา หนา 2.0 mm



รูปที่ 5(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา หนา 2.0 mm



รูปที่ 6(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา ทน 4.0 mm

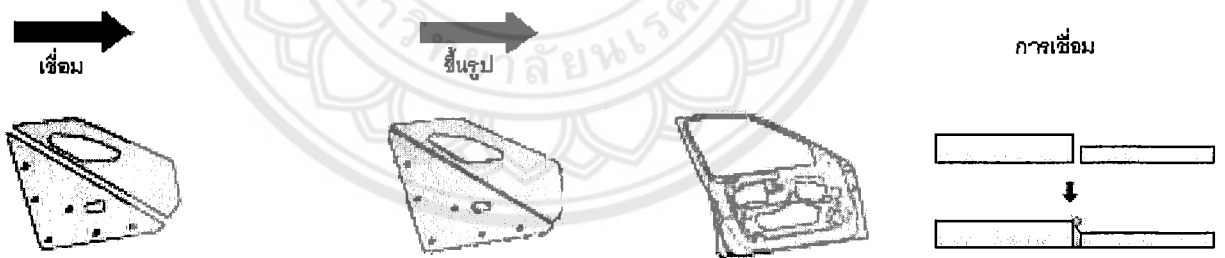


รูปที่ 7(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002
ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา ทน 4.0 mm

ภาคผนวก ก การเชื่อมพ่วงและการเชื่อมไฟฟ้า

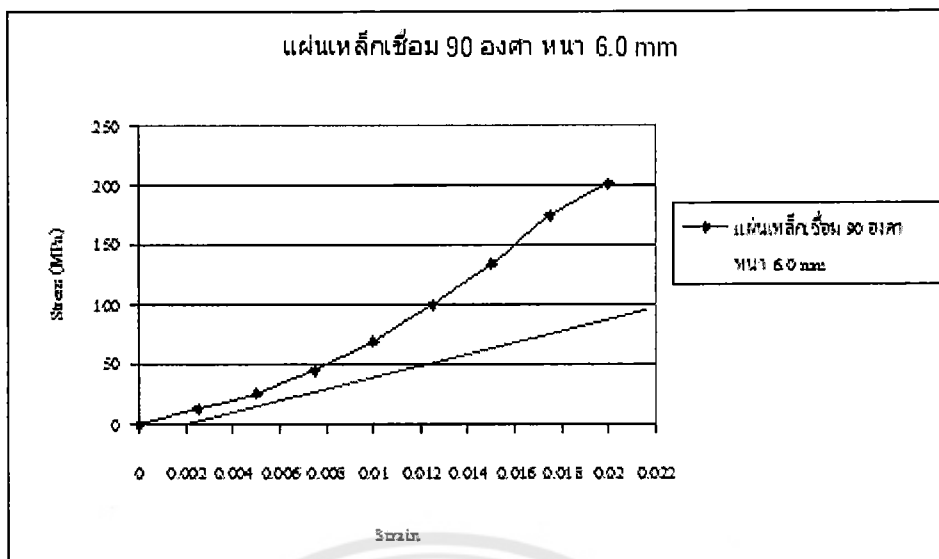
แผ่นเชื่อมพ่วง (Tailor Welded Blank) คือ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยนำเหล็กแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกัน รวมไปถึงเหล็กที่มีคุณสมบัติ หรือชั้นเคลือบที่ต่างกัน มาเชื่อมต่อให้เป็นเหล็กแผ่นชิ้นเดียวกันก่อนที่จะนำไปทำการขึ้นรูป แนวคิดในการรวมเหล็กประเภทต่างๆ เข้ามาเป็นแผ่นเดียวกันด้วยการเชื่อม ถูกพัฒนาเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยนำเหล็กที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาต่อให้อยู่ในบริเวณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด วิธีนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วนให้ลดลง แต่ยังช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนได้โดยลดการใช้อุปกรณ์ยึดต่างๆ

กระบวนการนี้ถูกนำไปใช้และพัฒนาอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีแรงผลักดันมาจากข้อบังคับทางด้านสิ่งแวดล้อมความปลอดภัยและการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งต้องการให้ออกแบบรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อประหยัดพลังงานและก่อให้เกิดมลภาวะน้อยลง พร้อมกับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวรถให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น ตัวอย่างชิ้นส่วนที่ผลิตมาจาก TWB ได้แก่ โครงสร้างด้านข้างของรถยนต์, ประตูรถยนต์, เครื่องยนต์ที่เป็นฐานของชิ้นส่วนต่างๆ โครงสร้างภายในตัวรถยนต์, การติดตั้งกระจกหน้าสำหรับกับลม เป็นต้น

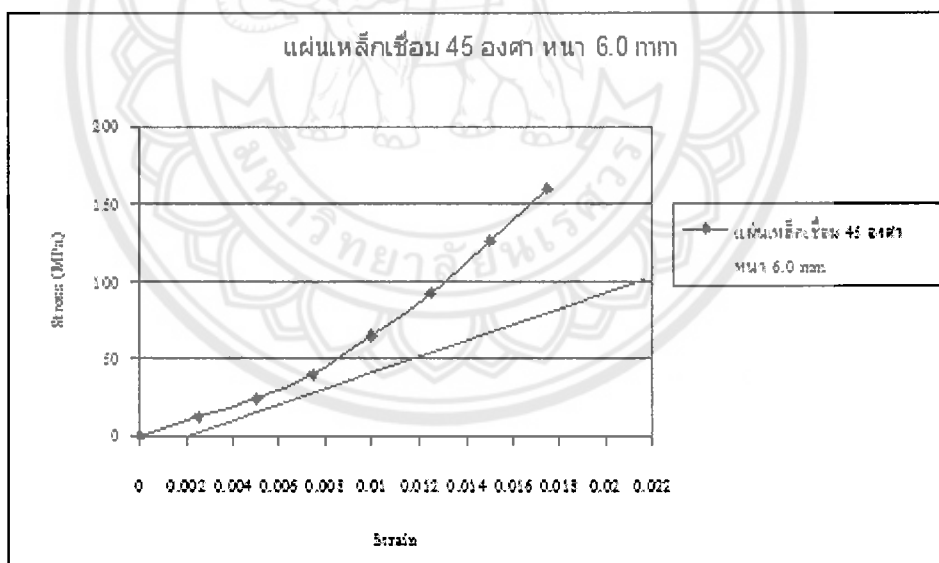


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการใช้งาน TWB ในชิ้นส่วนของรถยนต์ **วิธีการเชื่อมเหล็กแผ่นสำหรับ TWB**

วิธีการเชื่อมในการผลิต TWB มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่ Laser beam butt welding , Resistance mash seam welding , Electron beam welding และ High-frequency induction ซึ่ง 2 วิธีแรกนั้น เป็นการเชื่อมที่มีการใช้แพร่หลายมากที่สุด โดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันดังนี้

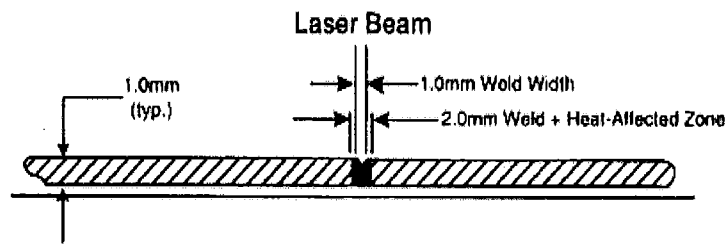


รูปที่ 8(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 90 องศา หน้า 6.0 มม



รูปที่ 9(ข) แสดงการหาค่าจุดครากในแนวแกนของค่าความเครียดที่ค่า 0.002 ของแผ่นเหล็กเชื่อม 45 องศา หน้า 6.0 มม

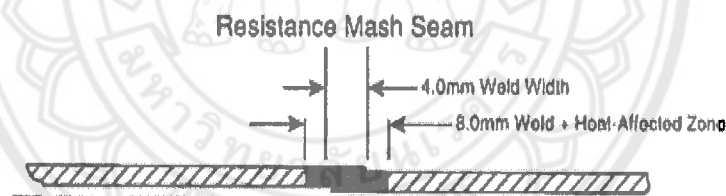
1. Laser beam butt welding



รูปที่ 2.6 เป็นการเชื่อมแบบ Laser beam butt welding

เป็นการเชื่อมแบบเต็ม (full-penetration) ซึ่งสามารถเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อความหนาสูง ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมที่ลึกและแคบ นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่สูงมากทำให้ได้ความแข็งของรอยเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยวิธี resistance mash seam weld และควบคุมแนวเชื่อมได้แม่นยำ

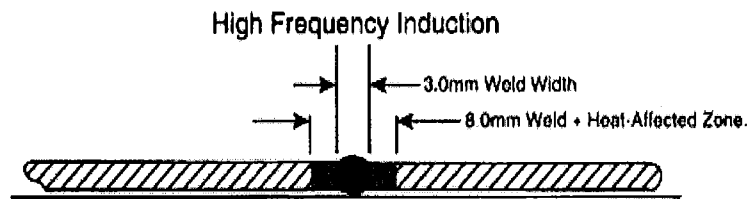
2. Resistance mash seam welding



รูปที่ 2.7 เป็นการเชื่อมแบบ Resistance mash seam welding

เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลูกรีด (ต้องอาศัยรอยเชื่อมที่ต่อเหลื่อมกัน) อัดเนื้อเหล็กเข้าด้วยกันขณะที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (solid-state) วิธีนี้จะได้แนวเชื่อมที่กว้างกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย วิธีเชื่อมแบบนี้จะได้รับการผลิตรถยนต์ในยุโรปของ Volkswagen, Volvo, SEAT, ฯลฯ

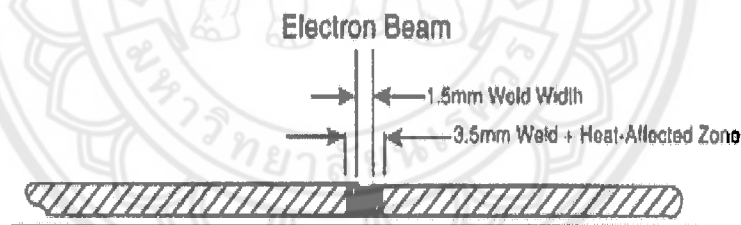
3. High-frequency induction



รูปที่ 2.8 เป็นการเชื่อมแบบ High-frequency induction

เป็นการเชื่อมแบบต่อชน (butt-upset weld) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัท Volvo ใช้สำหรับเชื่อมงานเหล็กแผ่น ปัจจุบันมีการใช้สำหรับงานเชื่อมที่มีความยาวของแนวเชื่อมสูงสุด 1 เมตร รอยเชื่อมที่ได้จะมีความหนาสูงกว่าความหนาของเหล็กแผ่นประมาณ 50% ซึ่งต้องทำการขัดออกภายหลัง การเชื่อมการเชื่อมทำโดยนำเหล็กแผ่น 2 แผ่นมากดเข้าหากันตรงขอบด้วยตัวยึดตลอดแนวความยาวของเหล็กแผ่น และหน้าสัมผัสของชิ้นงานจะถูกกดด้วยแรงอัดในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเหล็กจะหลอมติดกัน

4. Electron beam welding



รูปที่ 2.9 เป็นการเชื่อมแบบ Electron beam welding

เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายเช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 25 - 35 กิโลวัตต์ วิธีนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดหนาๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเลเซอร์พบว่า Electron beam welding สามารถเชื่อมได้โดยที่มีระยะห่างของแผ่นโลหะ (Gap) มากกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมได้เร็วกว่าและกระแสนอกอิเล็กตรอนก็ควบคุมได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญของ Electron beam welding คือ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการแผ่รังสีจากรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม

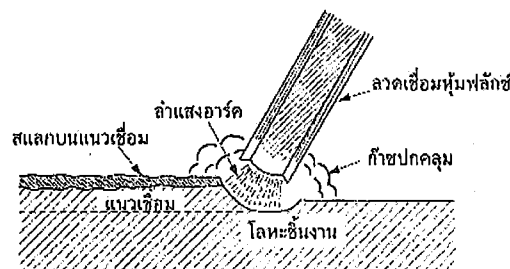
ข้อดีของ Tailor Welded Blank

1. ลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์
 - สารเคลือบใช้เหล็กที่ความต่างกันได้ในการผลิตชิ้นส่วนชนิดเดียว ทำให้ลดน้ำหนักได้
 - ผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้ใช้เหล็กหนาได้เฉพาะในบริเวณที่ต้องการทำให้คุณสมบัติทนต่อการกระแทกได้ดี
 - การเปลี่ยนแปลงการออกแบบทางวิศวกรรมทำได้โดยเปลี่ยนแค่ sub blank
2. ต้นทุนในการผลิตต่ำ
3. สามารถใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติตามต้องการได้ในจุดที่ต้องการ
4. คุณภาพรวมของ TWB สามารถควบคุมได้จาก sub blank ที่ประกอบขึ้นเป็น TWB
5. ลดจำนวนการใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปเหล็กแผ่น
6. ลดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมลง
7. ความยืดหยุ่นในการผลิตสูง สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากขึ้น

กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า

กระบวนการเชื่อมเกิดจากการอาร์คระหว่างปลายลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrode) กับชิ้นงาน (Base metal) ทำให้เกิดความร้อนอันรุนแรง (ประมาณ 3,300 C – 5,500 C) เผาแผ่นโลหะงานตรงจุดนั้น หลอมละลายเป็นแอ่ง ขณะเดียวกันปลายของลวดเชื่อมก็หลอมละลายเช่นกันและหยดเติมลงไปใในแอ่งนั้น

ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อม เมื่อได้รับความร้อนส่วนหนึ่งจะหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อม ช่วยลดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม เมื่อฟลักซ์เย็นตัวลงจะแข็งและเปราะ เรียกว่า สแลก (Slag) และฟลักซ์บางส่วนก็จะกลายเป็นก๊าซปกคลุมแนวเชื่อม เพื่อป้องกันอากาศภายนอกรอบๆ การอาร์คมิให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม โดยรักษาระยะห่างของการอาร์ค ความเร็ว และมุมของลวดเชื่อมอย่างถูกต้องสม่ำเสมอ ก็จะได้เป็นแนวเชื่อมยึดแผ่นงานให้ติดกันตามต้องการ



รูปที่ 1(ค) กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

กระบวนการเชื่อมแบบนี้ได้รับความนิยมสูง และใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกรรมวิธีการเชื่อมกระทำได้ง่าย เครื่องมืออุปกรณ์ไม่สลับซับซ้อน เชื่อมงานได้ทุกท่าเชื่อม เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ลวดเชื่อมที่ใช้มีมากมายซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับคุณสมบัติหรือชนิดของโลหะที่นำมาเชื่อม

2.4.2 อุปกรณ์การเชื่อมไฟฟ้า

อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐาน ได้แก่ เครื่องเชื่อม หัวจับลวดเชื่อม สายเชื่อม สายดิน เครื่องมือทำความสะอาด อุปกรณ์ป้องกันร่างกาย และลวดเชื่อม เป็นต้น



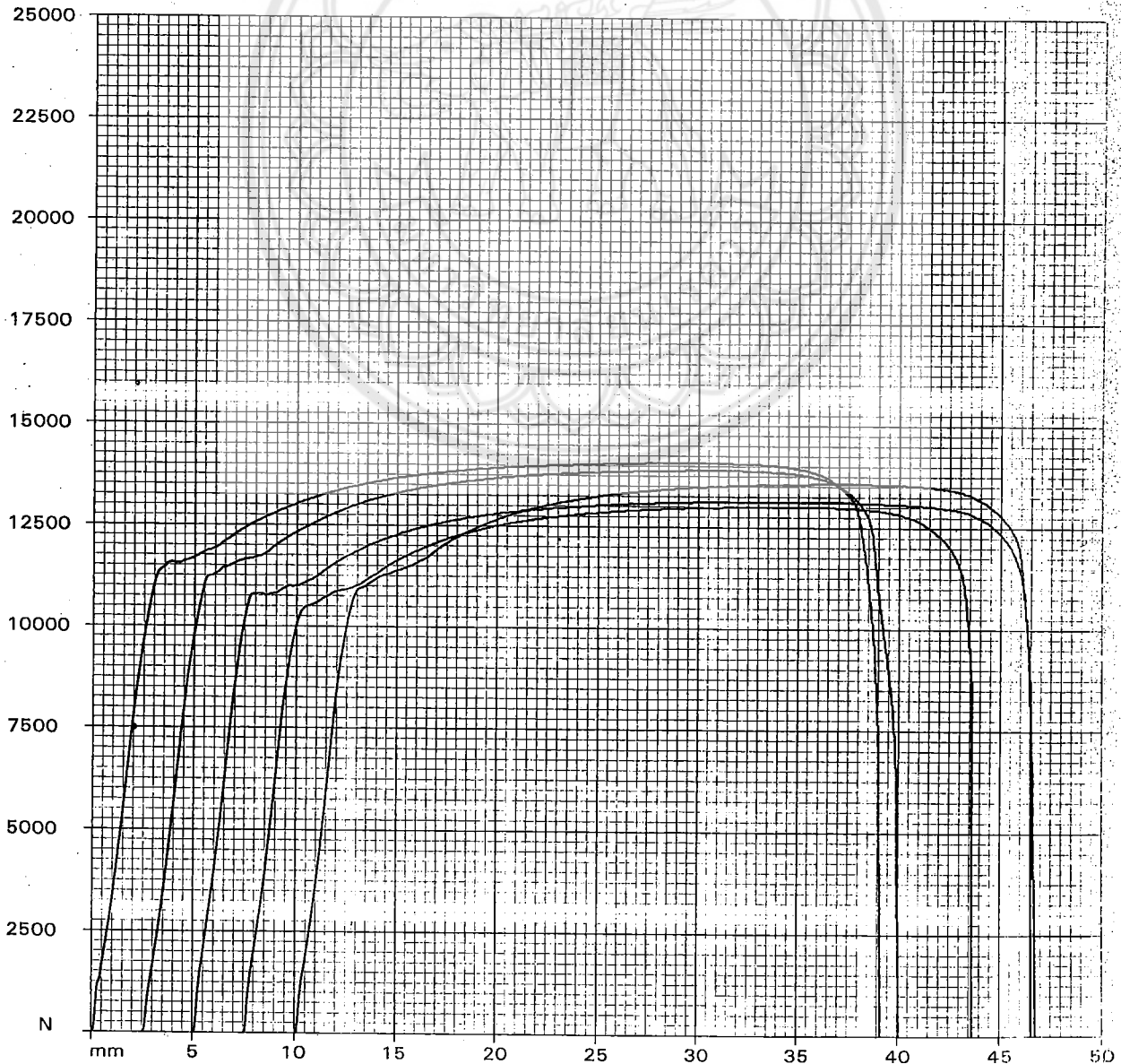
รูปที่ 2(ค) อุปกรณ์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

เครื่องเชื่อมที่ผลิตออกมาในท้องตลาดปัจจุบันนี้มีมากมายหลายชนิดเพื่อความเหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมแบบต่าง ๆ ลักษณะงานที่ใช้และสภาพการใช้งานเครื่องเชื่อมแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้หลายแบบ เช่น แบ่งออกตามลักษณะการจ่ายพลังงานไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือชนิดกระแสคงที่ (CC) และชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (CV) เป็นการแบ่งชนิดของเครื่องเชื่อมเพื่อความเหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมซึ่งต้องการลักษณะการจ่ายพลังงานไม่เหมือนกัน

Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 2.0
 Date: 08/04/2010
 Batch Number ...:
 Operator:
 Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

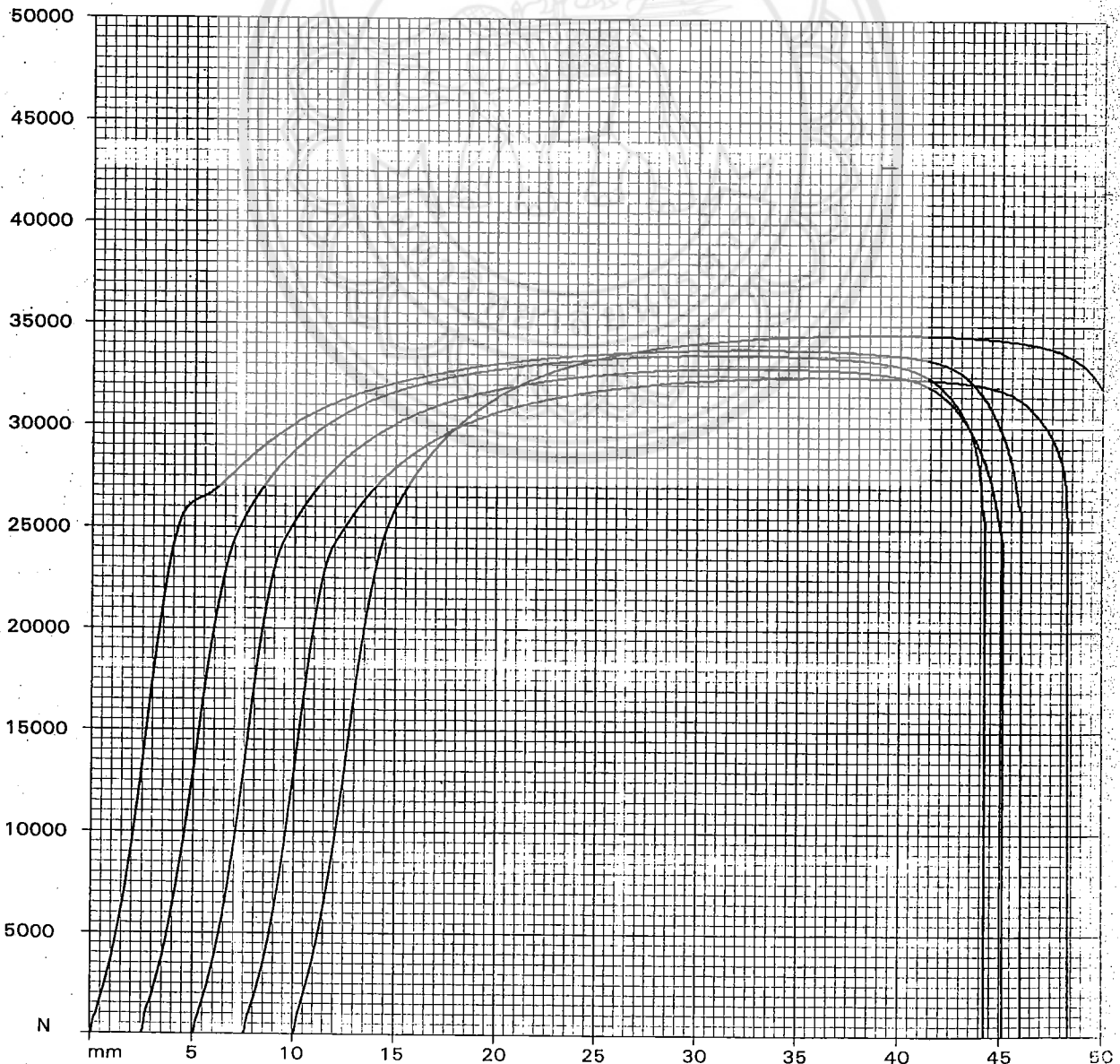
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	391.296	48.148	39.112	325.555	362.175	379.675	387.129	390.138	1.800	20.000
2	386.296	41.388	37.497	324.027	359.166	375.833	382.870	385.648	1.800	20.000
3	365.231	221.064	41.476	306.018	341.157	355.925	361.944	364.583	1.800	20.000
4	361.574	230.740	36.070	303.935	338.472	353.333	359.305	361.388	1.800	20.000
5	377.175	44.768	36.680	316.713	351.990	368.194	374.675	376.944	1.800	20.000
Mean	376.314	117.222	38.167	315.250	350.592	366.592	373.185	375.740	1.800	20.000
Median	377.175	48.148	37.497	316.713	351.990	368.194	374.675	376.944	1.800	20.000
Std.Dev.	12.893	99.299	2.173	9.982	10.554	11.712	12.343	12.623	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 4.0
Date: 08/04/2010
Batch Number ...:
Operator:
Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

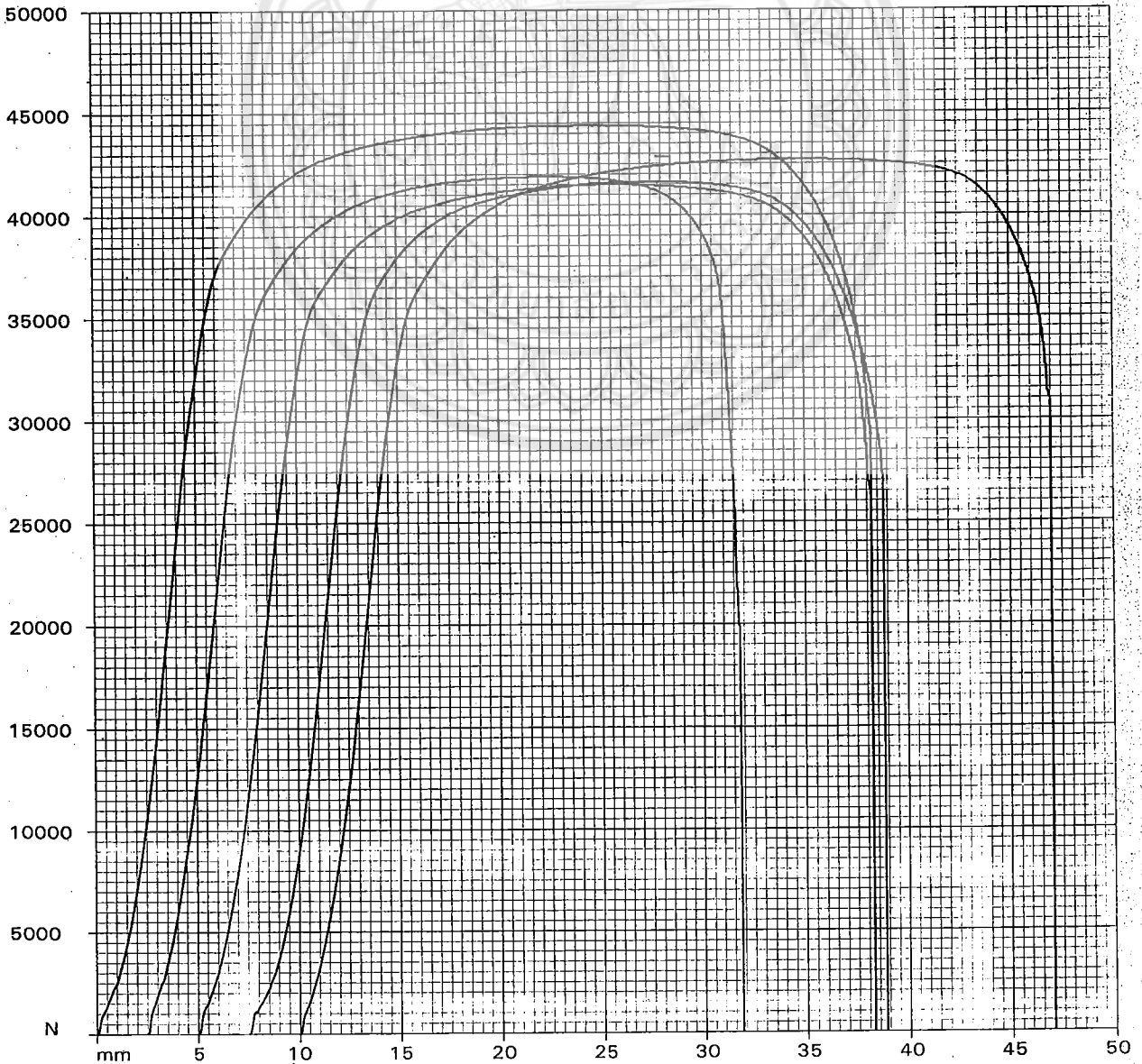
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	433.440	327.777	45.924	337.222	385.854	411.346	423.653	430.042	3.900	20.000
2	429.893	317.029	41.618	328.461	392.158	414.551	424.145	428.782	3.900	20.000
3	421.538	309.786	40.057	325.427	385.982	407.414	416.944	421.004	3.900	20.000
4	416.153	318.867	40.813	321.666	380.235	401.388	410.812	415.106	3.900	20.000
5	443.141	112.863	41.297	334.017	402.777	426.965	437.179	441.923	3.900	20.000
Mean	428.833	277.265	41.941	329.359	389.401	412.333	422.547	427.371	3.900	20.000
Median	429.893	317.029	41.297	328.461	385.982	411.346	423.653	428.782	3.900	20.000
Std.Dev.	10.500	92.126	2.302	6.304	8.585	9.539	9.836	10.146	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 6.0
Date: 08/04/2010
Batch Number ...:
Operator:
Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

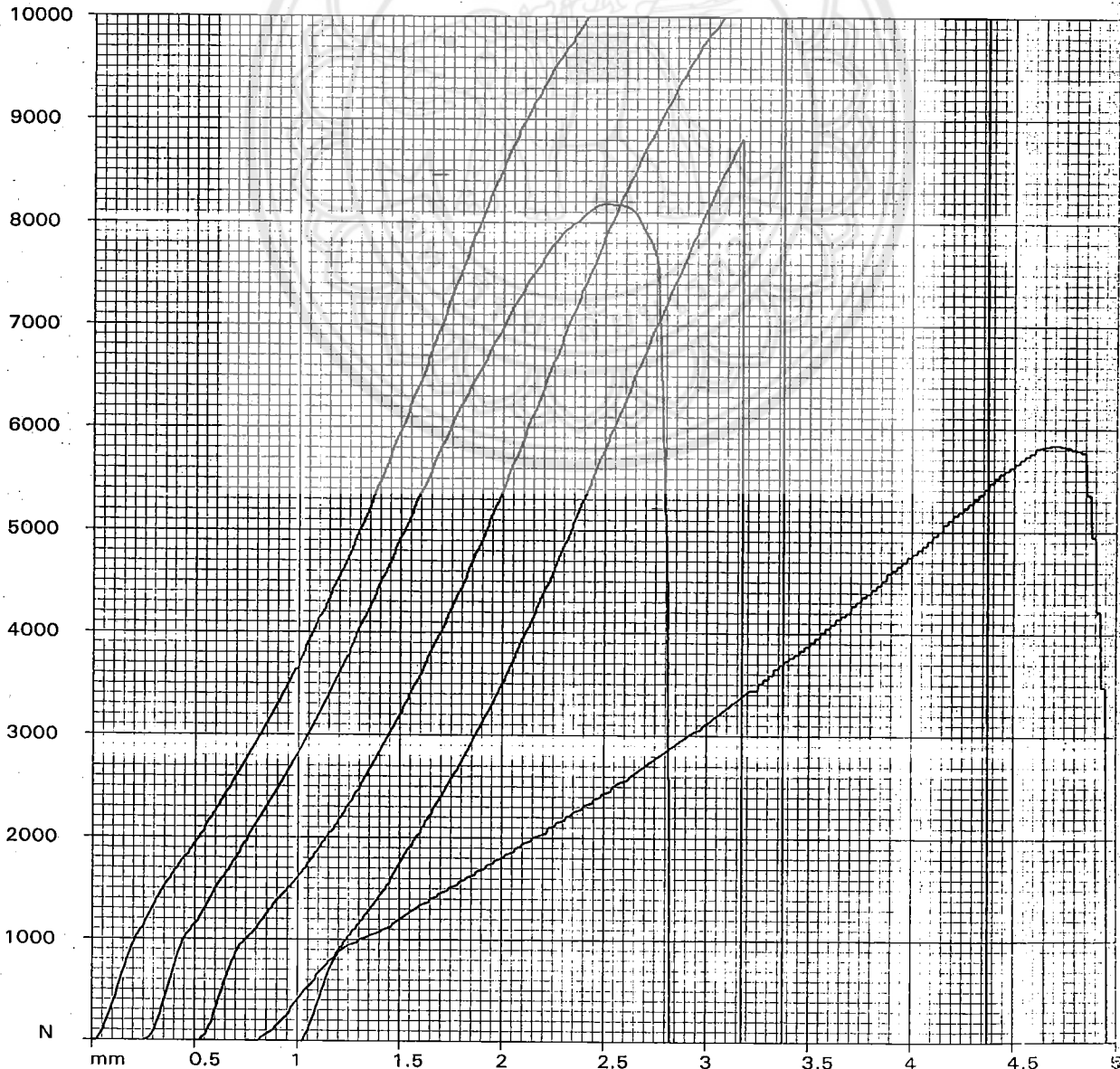
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	382.787	245.114	38.137	278.362	362.672	376.867	381.666	382.744	5.800	20.000
2	361.293	154.195	29.255	284.468	347.399	358.879	361.293	356.235	5.800	20.000
3	357.859	220.000	33.134	278.232	343.750	354.712	357.801	355.905	5.800	20.000
4	359.037	232.758	31.308	259.784	344.956	356.149	359.023	355.172	5.800	20.000
5	368.261	258.290	36.923	285.431	349.353	362.586	367.097	368.232	5.800	20.000
Mean	365.847	222.071	33.751	277.255	349.626	361.839	365.376	363.658	5.800	20.000
Median	361.293	232.758	33.134	278.362	347.399	358.879	361.293	356.235	5.800	20.000
Std.Dev.	10.292	40.523	3.737	10.323	7.608	8.921	9.782	11.962	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 2.0/2.0
 Date: 08/04/2010
 Batch Number ...:
 Operator:
 Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

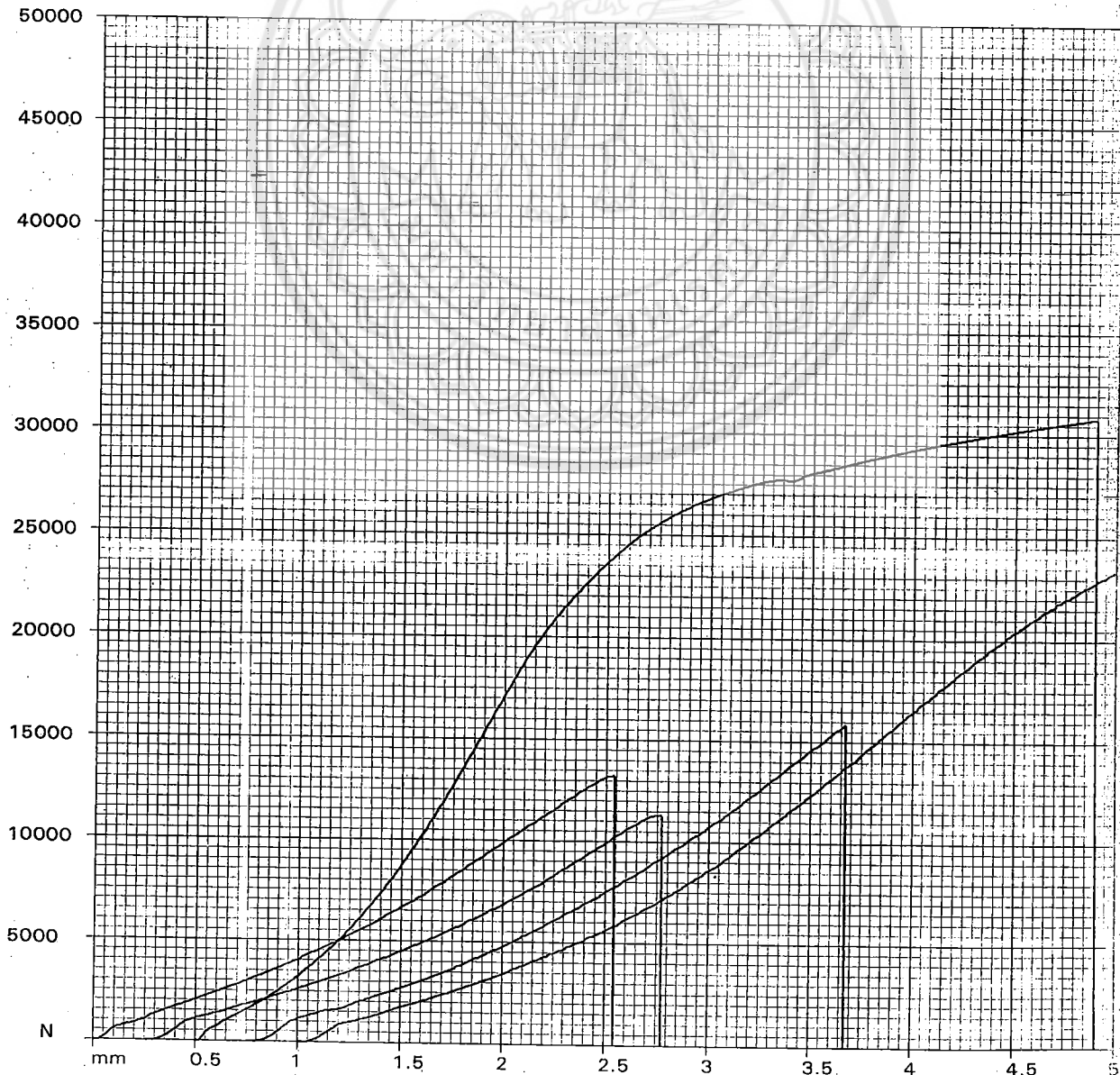
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	339.768	336.990	4.381	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
2	227.314	32.500	2.589	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
3	287.685	283.842	2.883	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
4	162.407	25.185	1.697	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
5	245.972	233.703	2.184	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Mean	252.629	182.444	2.746	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Median	245.972	233.703	2.589	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Std.Dev.	66.421	144.920	1.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 4.0/4.0
Date: 08/04/2010
Batch Number ...:
Operator:
Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

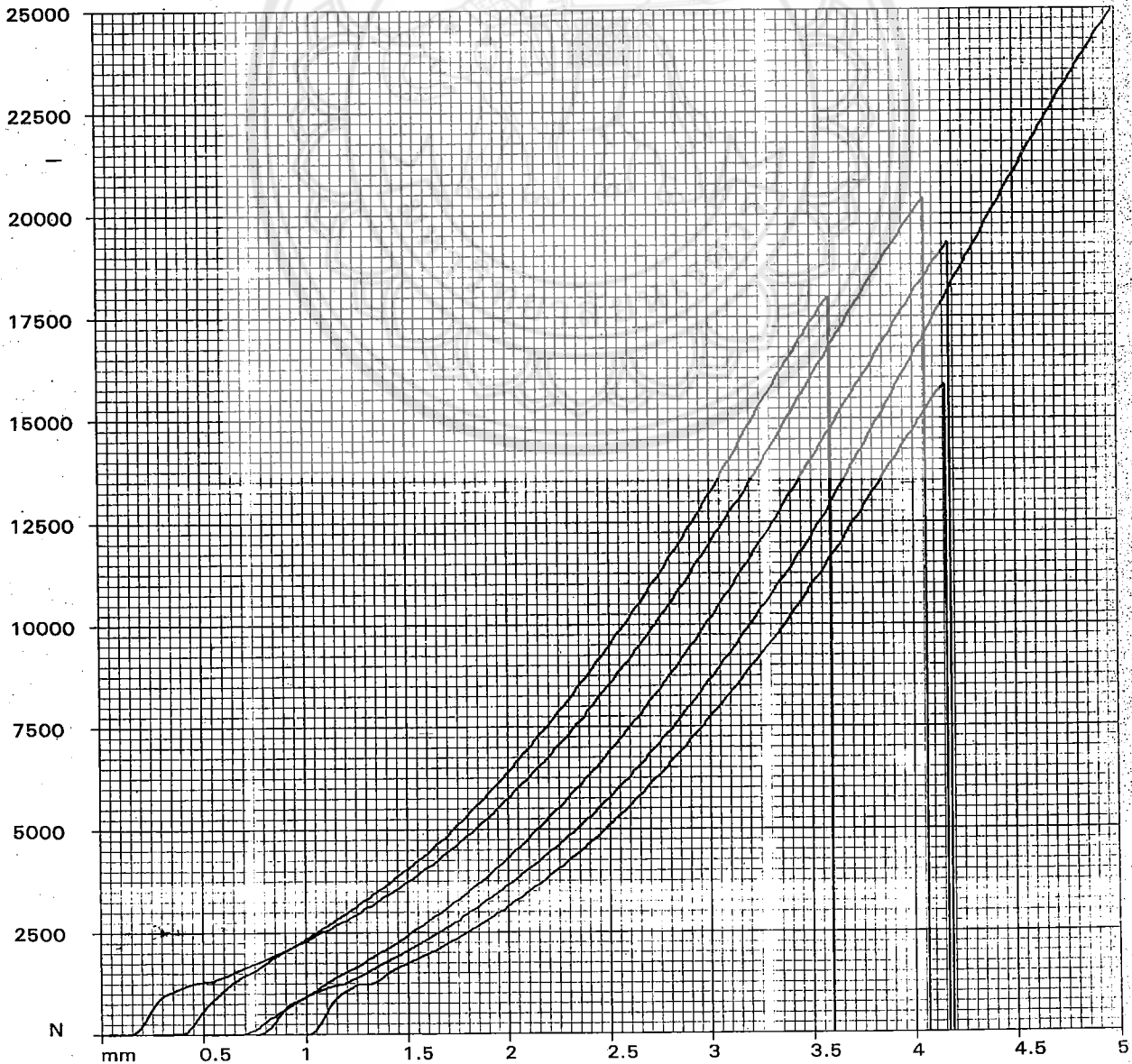
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	170.042	168.632	2.548	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
2	145.384	144.508	2.525	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
3	395.491	390.769	8.817	344.465	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
4	206.859	206.859	2.938	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
5	329.615	329.380	4.635	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Mean	249.478	248.029	4.292	68.893	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Median	206.859	206.859	2.938	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Std.Dev.	108.055	106.897	2.673	154.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 6.0/6.0
Date: 08/04/2010
Batch Number ...:
Operator:
Test Speed.....: 30.000{mm/min}

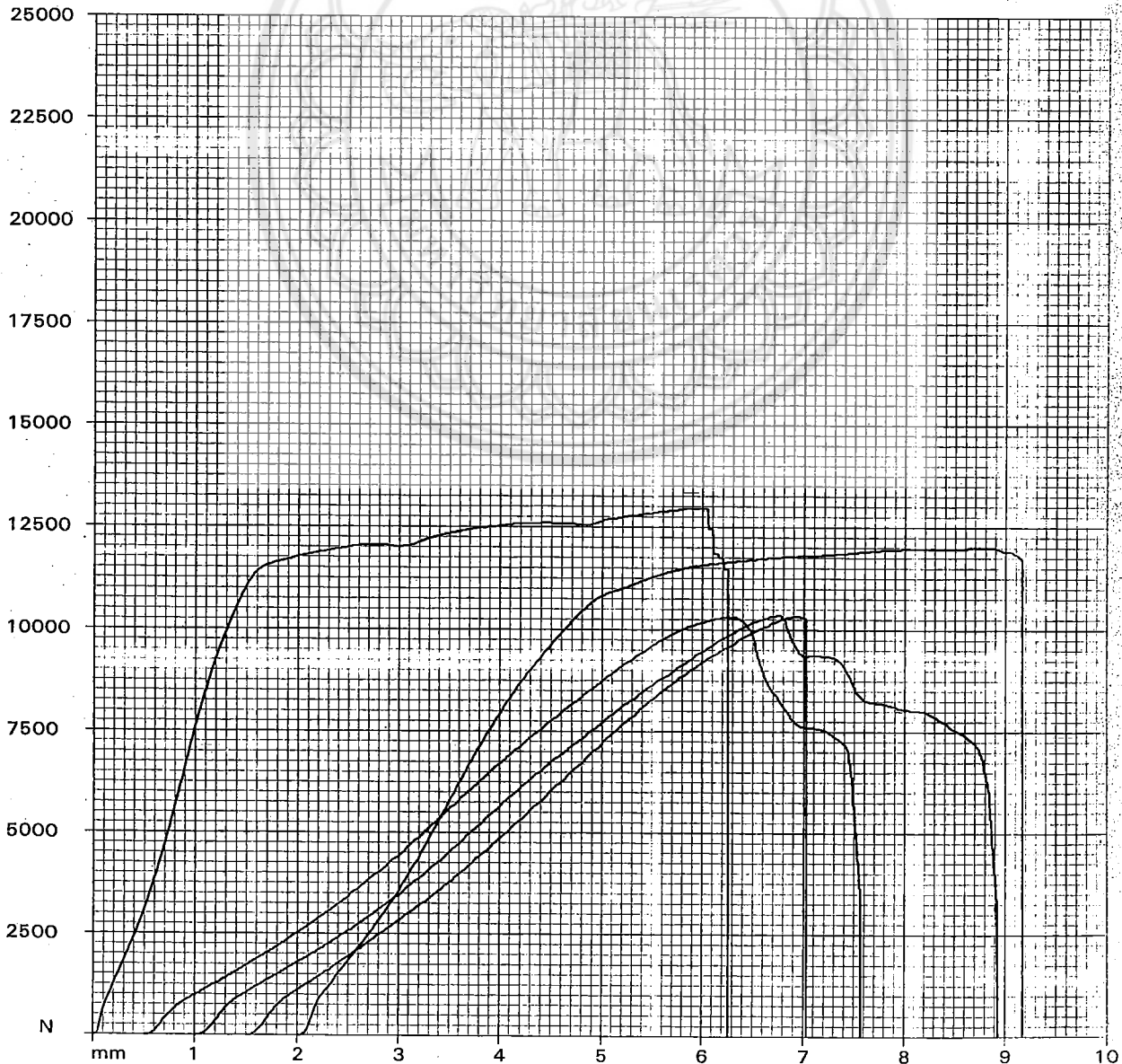
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	175.862	175.229	4.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
2	155.387	155.086	3.354	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
3	166.853	166.767	3.695	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
4	220.330	220.100	4.348	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
5	137.227	137.227	3.170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Mean	171.132	170.882	3.727	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Median	166.853	166.767	3.695	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Std.Dev.	31.058	30.985	0.488	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 2.0/2.0 45
 Date: 08/04/2010
 Batch Number ...:
 Operator:
 Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

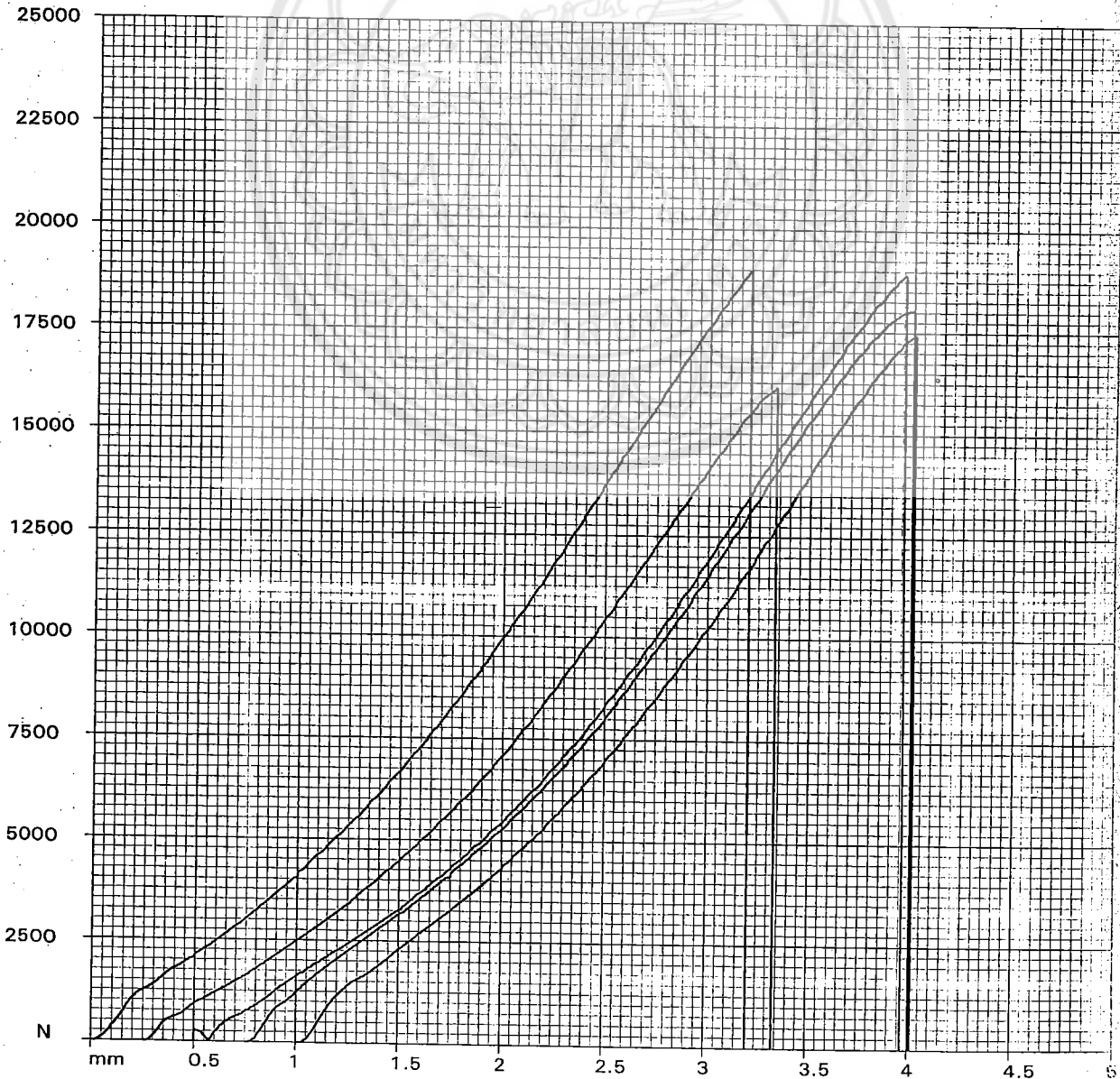
	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	360.231	310.787	12.451	333.796	351.481	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
2	286.574	39.675	3.541	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
3	287.685	33.888	3.972	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
4	286.990	283.518	2.767	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
5	333.657	323.981	7.184	327.824	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Mean	311.027	198.370	5.983	132.324	70.296	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Median	287.685	283.518	3.972	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.800	20.000
Std.Dev.	34.109	148.243	3.988	181.204	157.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 4.0/4.0 45
Date: 08/04/2010
Batch Number ...:
Operator:
Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	244.658	244.658	3.214	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
2	207.008	206.773	3.087	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
3	242.927	242.906	3.494	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
4	231.196	229.722	3.262	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
5	223.611	223.418	3.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Mean	229.880	229.495	3.215	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Median	231.196	229.722	3.214	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.900	20.000
Std.Dev.	15.433	15.516	0.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Hounsfield
Test Report

Product Code ...: 6.0/6.0 45
 Date: 08/04/2010
 Batch Number ...:
 Operator:
 Test Speed.....: 30.000 {mm/min}

	Max MPa	Break MPa	Ext @ Brk mm	5.000 MPa	10.000 MPa	15.000 MPa	20.000 MPa	25.000 MPa	Thickness mm	Width mm
1	201.724	201.523	3.851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
2	185.718	185.459	3.720	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
3	181.479	180.890	3.664	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
4	206.494	205.890	4.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
5	138.146	134.267	3.916	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Mean	182.712	181.606	3.857	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Median	185.718	185.459	3.851	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.800	20.000
Std.Dev.	27.035	28.472	0.185	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

