

การพัฒนา และการประยุกต์ศิลปะแก่กับการทดสอบการแตกหัก



นาย ยอดยิ่ง หมวกงาม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

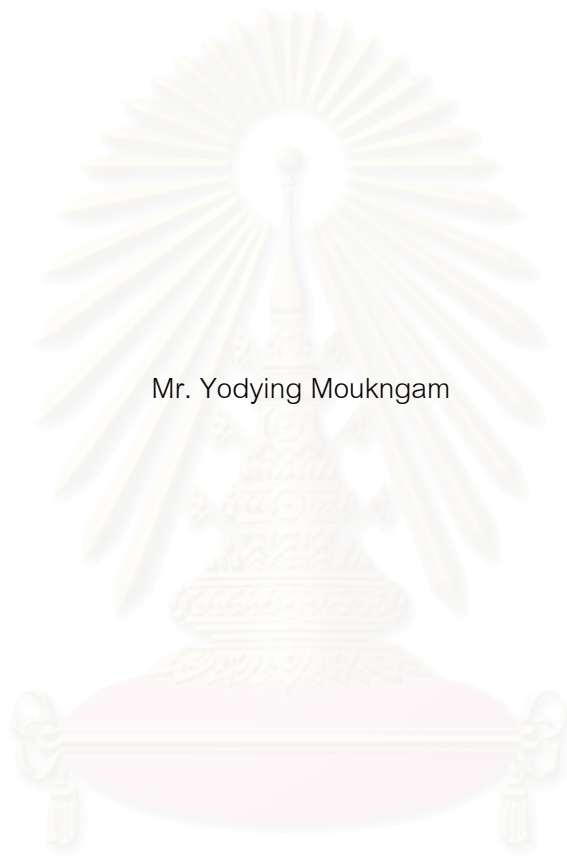
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2014-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A CLIP GAGE FOR FRACTURE TESTING



Mr. Yodying Moukngam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2014-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาและการประยุกต์ศิลปะแก่กับการทดสอบการแตกหัก
โดย นาย ยอดยิ่ง หมวกงาม
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

ยอดยิ่ง หมวกงาม : การพัฒนาและการประยุกต์คลิปเกจกับการทดสอบการแตกหัก
(DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A CLIP GAGE FOR FRACTURE TESTING)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 173 หน้า. ISBN 974-17-2014-9

วิทยานิพนธ์นี้ พัฒนาขั้นตอนการออกแบบคลิปเกจ และนำไปใช้ออกแบบคลิปเกจคานคู่แบบ
สี่เหลี่ยมคางหมู คลิปเกจที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้ในการทดสอบการแตกหัก ดังนี้ การวัดคอมพลายแอนซ์
การวัดความต้านทานการแตกหัก และการวัดอัตราการเติบโตของรอยร้าว การทดสอบใช้ชิ้นงาน
ทดสอบแบบ CT ทำจากวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 และทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง

ในการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ชิ้นงานทดสอบมีอัตราส่วนระหว่างความยาวรอยร้าวกับ
ความกว้างชิ้นงานทดสอบตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวกับคอมพลาย
แอนซ์ที่ได้จากการทดสอบ สอดคล้องกับผลเฉลยในมาตรฐาน ASTM E399 โดยมีความคลาดเคลื่อน
สูงสุดไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

ในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก ชิ้นงานทดสอบที่ใช้มีอัตราส่วนระหว่างความ
ยาวรอยร้าวกับความกว้างชิ้นงานทดสอบอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน ASTM E399 กำหนด จำนวน 3 ชิ้น
และอยู่นอกช่วงที่มาตรฐานกำหนดจำนวน 2 ชิ้น จากการทดสอบพบว่า อะลูมิเนียมผสม 7075-T651
มีค่าความต้านทานการแตกหักเท่ากับ $20.25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ และความต้านทานการแตกหักไม่ขึ้นกับ
ความยาวรอยร้าวแล้วเริ่มต้น

ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว ความยาวรอยร้าวที่ขณะใด ๆ หากจากวิธี
1) วัดโดยตรง และ 2) คำนวณจากค่าคอมพลายแอนซ์ เมื่อเปรียบเทียบกราฟอัตราการเติบโตของรอย
ร้าวที่ได้จากวิธีทั้งสองพบว่า มีความแตกต่างอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

จากผลการใช้งานคลิปเกจกับการทดสอบการแตกหักข้างต้น สรุปว่าคลิปเกจที่พัฒนาขึ้น มี
ความแม่นยำ และมีความไวในการตรวจวัดเพียงพอสำหรับใช้ทดสอบการแตกหัก นอกจากนี้มีความ
ทนทาน เนื่องจากผลการสอบเทียบหลังผ่านการใช้งานเปลี่ยนแปลงจากเดิม 0.6 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2545	

4370456421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CLIP GAGE / COMPLIANCE / FRACTURE TOUGHNESS / FATIGUE CRACK
GROWTH RATE / ALUMINIUM ALLOY 7075 – T651

YODYING MOUKNGAM : DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A CLIP
GAGE FOR FRACTURE TESTING. THESIS ADVISOR : JIRAPONG
KASIVITAMNUAY, D.Eng, 173 pp. ISBN 974-17-2014-9

This thesis developed clip gage designing procedures and applied these to design a double – tapered – cantilever clip gage. The clip gage was used in fracture tests, i.e. compliance measurement, fracture toughness testing and fatigue crack growth rate testing. The type of specimen was compact-tension (CT) made of 7075 – T651 aluminium alloy. All of the tests were conducted at room temperature.

Specimens used in compliance measurement have a crack length to width ratio ranged from 0.3 to 0.7. The relationships between compliance and crack length obtained from the tests agree with the solution suggested by ASTM E399 standard, with a maximum error of 7 percents.

In fracture toughness testing, the tests were conducted on three specimens with a crack length following the ASTM standard and other two specimens which do not follow the ASTM standard. The fracture toughness of 7075 – T651 aluminium alloy obtained are $20.25 \text{ MPa}\sqrt{m}$. It also found that the toughness did not depend on the crack length.

In fatigue crack growth rates testing, the crack length at any time were 1) directly measured and 2) compute from the compliance measurement. The fatigue crack growth rate curve obtained from both techniques differ from each other within an acceptable range.

From the fracture test results and calibration results of serviced clip gage, it can be concluded that the developed clip gage has satisfactory accuracy, sensitivity and durability for fracture tests.

Department	Mechanical Engineering	Student's signature
Field of study	Mechanical Engineering	Advisor's signature
Academic year	2002	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยมาโดยตลอด ทั้งการถ่ายทอดความรู้ทางด้านกลศาสตร์การแตกหัก ค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย แง่คิดเกี่ยวกับการดำเนินชีวิต และให้โอกาสทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัย ทำให้ภาระค่าใช้จ่ายในการศึกษา และการวิจัยลดลงอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ และ อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำ และยืมเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ครูธงชัย สิงห์สังวรรณ ครูปฏิบัติการ และพี่บัญชา อุนพานิช เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านการซ่อมเครื่องทดสอบ พี่สุบิน ชนดี ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการเครื่องมือกล

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และให้ความสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
รายการสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานโดยสรุป.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก.....	4
2.1 ประวัติความเป็นมา.....	4
2.1.1 วิวัฒนาการของกลศาสตร์การแตกหัก.....	5
2.2 การวิเคราะห์การแตกหักของ Griffith.....	5
2.2.1 กรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัว	7
2.2.2 กรณีภาระคงที่.....	9
2.3 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น.....	10
2.4 คอมพลาเยนซ์.....	12
2.5 ความต้านทานการแตกหัก.....	13
2.5.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก.....	14
2.6 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า	17
2.6.1 วิธีสร้างกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	17
2.6.2 เส้นกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3 การทดสอบหาอัตราการใช้ของรอยร้าวล้า	21
บทที่ 3 ทฤษฎีการวัดความเครียด.....	23
3.1 การวิเคราะห์ความเครียดในคาน.....	23
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่ง และความเครียดของคาน.....	24
3.3 การประยุกต์สเตรนเกจในการออกแบบทราวิสตีวเซอร์.....	25
3.3.1 คุณสมบัติของสเตรนเกจ.....	26
3.3.2 วิธีติดสเตรนเกจ.....	26
3.3.3 การแปลงความต้านทานเป็นความเครียดของสเตรนเกจ.....	29
บทที่ 4 การออกแบบคลิปเกจ.....	30
4.1 แนวความคิดการออกแบบ.....	30
4.2 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ.....	30
4.3 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	36
4.4 ผลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ.....	39
4.5 ผลการออกแบบ และการสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	54
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานคลิปเกจและการวิเคราะห์ผล.....	60
5.1 ประเภทของการทดสอบ.....	60
5.2 รายละเอียดทั่วไปของการทดสอบ.....	60
5.2.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ.....	60
5.2.2 ชิ้นงานทดสอบ.....	62
5.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	62
5.3 การประยุกต์คลิปเกจเพื่อหาคอมพลายแอนซ์.....	67
5.3.1 สภาวะทดสอบ.....	67
5.3.2 ผลการทดสอบ.....	68
5.3.3 การวิเคราะห์ผล	68
5.4 การประยุกต์คลิปเกจเพื่อหาความต้านทานการแตกหัก.....	73
5.4.1 สภาวะทดสอบ.....	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.2 ผลการทดสอบ.....	74
5.4.3 การวิเคราะห์ผล	80
5.5 การประยุกต์ศิลป์เกจเพื่อหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	83
5.5.1 สภาวะทดสอบ.....	83
5.5.2 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล.....	84
5.6 การวิเคราะห์ผลการออกแบบ.....	87
5.6.1 ความไว.....	87
5.6.2 ความแม่นยำของศิลป์เกจหลังการใช้งาน.....	87
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	91
6.1 สรุปผลการออกแบบและการสร้างศิลป์เกจ.....	91
6.2 สรุปผลการทดลองหาคอมพลายแอนซ์.....	91
6.3 สรุปผลการทดลองหาความต้านทานการแตกหัก.....	92
6.4 สรุปผลการทดลองอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	92
6.5 ข้อเสนอแนะ.....	93
6.5.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงาน.....	93
6.5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการปฏิบัติงาน.....	93
6.6 งานวิจัยต่อเนื่อง.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 วงจรสเตรนเกจแบบต่างๆ.....	42
4.2 ผลการสอบเทียบคลิปเกจ.....	53
5.1 ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_S ของชิ้นงานทดสอบคอมพลาไนด์.....	68
5.2 ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_S และค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}	70
5.3 ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวชิ้นงานทดสอบความต้านทานการแตกหัก.....	73
5.4 สภาวะการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว.....	83
5.5 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปเกจเมื่อใช้งานในสภาวะการทดสอบต่าง ๆ.....	88
5.6 ผลการสอบเทียบคลิปเกจก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบความล้า ที่ 200,000 รอบ.....	90
ก.1 สมบัติของวัสดุอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651.....	98
ก.2 ส่วนประกอบของวัสดุอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651.....	98
ข.1 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 1).....	99
ข.2 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 1).....	99
ข.3 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 1).....	100
ข.4 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 1).....	100
ข.5 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 1).....	101
ข.6 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 1).....	101
ข.7 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 1).....	102
ข.8 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 1).....	102
ข.9 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 1).....	103
ข.10 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 1).....	103
ข.11 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 2).....	104
ข.12 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 2).....	104
ข.13 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 2).....	105
ข.14 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาไนด์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 2).....	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.42 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 5).....	119
ข.43 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 5).....	120
ข.44 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 5).....	120
ข.45 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 5).....	121
ข.46 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 5).....	121
ข.47 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 5).....	122
ข.48 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 5).....	122
ข.49 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 5).....	123
ข.50 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 5).....	123
ค.1 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.79$ มม.).....	124
ค.2 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.93$ มม.).....	125
ค.3 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 27.25$ มม.).....	126
ค.4 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 16.79$ มม.).....	127
ค.5 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 32.17$ มม.).....	128
ง.1 ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากกล้องไมโครสโคป.....	130
ง.2 ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากคลิปเกจ.....	131

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความล้าที่เกิดจากโมเมนต์ดัดที่เกิดกับเรือ.....	4
2.2 แผ่นแบนขนาดไม่จำกัดมีรอยร้าวทะลุความหนา.....	5
2.3 วิธีดูลพลังงานของ Griffith.....	8
2.4 โหมดของภาวะกระทำ.....	10
2.5 ชิ้นงานรูปร่างใดๆ ในการหาคอมพลายแอนซ์.....	12
2.6 ขั้นตอนการหาคอมพลายแอนซ์จากการทดสอบ.....	13
2.7 ตำแหน่งที่วัดความยาวรอยร้าว (เมื่อมองตั้งฉากกับผิวแตกหัก)ในการทดสอบ หาความต้านทานการแตกหัก ตามมาตรฐาน ASTM E399.....	15
2.8 การเบี่ยงเบนทิศทางการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	15
2.9 ประเภทของความสัมพันธ์ระหว่างภาวะที่กระทำกับชิ้นงาน และระยะเปิด หน้าปากรอยร้าวในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหักของวัสดุ.....	16
2.10 ความยาวรอยร้าวที่จำนวนรอบภาวะต่าง ๆ.....	18
2.11 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า.....	20
2.12 ทิศทางเบี่ยงเบนของรอยร้าว.....	22
3.1 ความเค้นของคาน.....	24
3.2 ระยะโค้งของคานเมื่อรับแรง.....	25
3.3 สเตรนเกจ.....	26
3.4 การติด G – picker และสเตรนเกจกับชิ้นงาน.....	27
3.5 วิธีการลอก G – picker ที่ปลายด้านหัวของสเตรนเกจ.....	27
3.6 การหยด (ทา) สารยึดติดสเตรนเกจ.....	27
3.7 วิธีการกดสเตรนเกจ เพื่อให้กาวติดอย่างสม่ำเสมอ.....	28
3.8 วงจรบริดจ์ที่ใช้กับสเตรนเกจ.....	28
4.1 คานคลิปเกจแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	30
4.2 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ.....	31
4.3 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบ.....	36
4.4 คลิปเกจแบบต่างๆ.....	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 สเตรนเกจของบริษัท Kyowa Type KFG – 1 – 120 – C1 – 11.....	42
4.6 สารยึดติดสเตรนเกจชนิด CC – 33A.....	44
4.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651.....	46
4.8 มิติของคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	46
4.9 ขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	48
4.10 การคำนวณหาความสูงของ spacer block.....	49
4.11 การต่อวงจรสเตรนเกจแบบเต็มบริดจ์.....	51
4.12 คลิปเกจพร้อมทำการสอบเทียบ.....	52
4.13 การติดตั้งคลิปเกจกับ knife edge.....	52
4.14 กราฟสอบเทียบคลิปเกจ.....	53
4.15 วิธีสอบเทียบคลิปเกจ.....	55
4.16 ด้ามไม้โครไมเตอร์ รุ่น 152 – 380.....	56
4.17 แบบร่างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	56
4.18 เครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	57
4.19 การสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	58
4.20 กราฟสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ.....	59
5.1 การวางตัวของชิ้นงานทดสอบแบบ T – L	61
5.2 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานแบบ Compact Tension (CT Specimen).....	61
5.3 ส่วนควบคุมหลัก.....	62
5.4 ชุดไฮดรอลิค.....	63
5.5 actuator และ grip device.....	63
5.6 ก้านไม้โครสโคป.....	64
5.7 การติดตั้งไดอัลเกจกับฐานวางชิ้นงานของก้านไม้โครสโคป.....	65
5.8 สเตรนมิเตอร์.....	66
5.9 คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูล.....	66
5.10 ตำแหน่งการวัดความยาวรอยร้าว.....	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ที่ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิวต่าง ๆ เทียบกับผลเฉลยในมาตรฐาน ASTM E399.....	69
5.12 ส่วนโค้งของขอบหน้ารอยร้าว.....	70
5.13 นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ที่ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ต่าง ๆ เทียบกับผลเฉลยมาตรฐาน ASTM E399.....	71
5.14 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์เทียบกับ มาตรฐาน ASTM E399 ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวเฉลี่ยที่ผิว a_S	72
5.15 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ เทียบกับมาตรฐาน ASTM E399 ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}	72
5.16 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าเฉลี่ย ของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 26.79 มม.....	75
5.17 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 26.93 มม.....	76
5.18 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 27.25 มม.....	77
5.19 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 16.79 มม.....	78
5.20 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 32.17 มม.....	79
5.21 ภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ ของการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 26. 79 มม.....	81
5.22 ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว ของการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 26. 79 มม.....	82
5.23 ผลของความยาวรอยร้าวต่อความต้านทานการแตกหัก.....	83
5.24 การวัดอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากกล้องไมโครสโคป เปรียบเทียบกับวิธีคอมพลายแอนซ์.....	85

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 ขอบเขตบนและล่างของกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าโดยวิธีวัดความยาว รอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป เมื่อเทียบกับวิธีวัดความยาวรอยร้าวจากวิธี คอมพลายแอนซ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.995 เปอร์เซนต์.....	86
5.26 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปปะเกจกรณีทดสอบหาคอมพลายแอนซ์.....	89
5.27 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปปะเกจกรณีทดสอบหา K_{IC}	89
5.28 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปปะเกจกรณีทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า....	89
ช.1 ชั้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว.....	148
ช.2 แบบประกอบคลิปปะเกจ.....	149
ช.3 คานคลิปปะเกจ.....	150
ช.4 แผ่นป้องกันสเตรนเกจ.....	151
ช.5 spacer block.....	152
ช.6 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 1.....	153
ช.7 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 2.....	154
ช.8 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 3.....	155
ช.9 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 4.....	156
ช.10 Grip ติดตั้งคลิปปะเกจ.....	157
ช.1 มิติของคลิปปะเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	159

รายการสัญลักษณ์

A	อัตราส่วนแอมพลิจูด
a	ความยาวรอยร้าว, mm
B	ความหนาชิ้นงานทดสอบ, mm
$\frac{da}{dN}$	อัตราการเติบโตของรอยร้าว, $mm / cycle$
C	คอมพลายแอนซ์
K	ตัวประกอบความเข้มของความเค้น, $MPa\sqrt{m}$
K_C	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤติ, $MPa\sqrt{m}$
K_Q	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ใช้ในการคำนวณหา K_{IC} , $MPa\sqrt{m}$
K_{IC}	ความต้านทานการแตกหักในสถานะความเครียดระนาบ, $MPa\sqrt{m}$
N	จำนวนรอบความล้า, $cycle$
P	ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ, N
P_Q	ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการคำนวณหา K_{IC} , N
R	อัตราส่วนความเค้น
U_a	การปลดปล่อยพลังงานความเครียดยืดหยุ่น เนื่องจากการเกิดรอยร้าวความยาว $2a$
U_i	พลังงานความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้นเนื่องมาจากภาระกระทำ กรณีที่แผ่นแบนไม่มีรอยร้าว
U_t	พลังงานยืดหยุ่นสุทธิ
U_w	งานที่เกิดจากแรงภายนอก
U_y	การเพิ่มของพลังงานผิวยืดหยุ่นเนื่องจากการเกิดผิวรอยร้าว
W	ระยะทางจากรูเจาะบนชิ้นงานทดสอบถึงขอบด้านตรงข้าม, mm

อักษรกรีก

σ_{ys}	ความเค้นคราก, MPa
σ_m	ความเค้นเฉลี่ย, MPa
σ_a	แอมพลิจูดความเค้น, MPa
θ	มุมที่วัดจากแกนนอนไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา, deg
ϕ	ทิศทางการเบี่ยงเบนของรอยร้าว

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

Δ	พิสัย
γ_e	พลังงานผิวตึงของวัสดุใดๆ ต่อความหนาหนึ่งหน่วย
δ	ระยะที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากภาวะที่กระทำ

ตัวห้อย

max	สูงสุด
min	ต่ำสุด
avg	ค่าเฉลี่ย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

กลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics) เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระ หรือความแข็งแรง ของวัตถุที่มีรอยร้าว (cracked body) นอกจากนี้ กลศาสตร์การแตกหัก สามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่เกิดรอยร้าว มีโอกาสเติบโตด้วยกลไกความเสียหายต่าง ๆ เช่น ความล้า (fatigue) ความคืบ (creep) เป็นต้นได้

การศึกษาด้านพฤติกรรมของการแตกหักของวัสดุ เช่น การหาความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) หรือการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว (crack growth rate) จำเป็นที่จะต้องวัดความยาวรอยร้าว ซึ่งสามารถทำได้ทั้งทางตรง และทางอ้อม สำหรับการวัดทางตรง ได้แก่ การถอดชิ้นงานออกมาจากเครื่องทดสอบ แล้วนำไปวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป เป็นต้น วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องหยุดการทดสอบเป็นระยะ ๆ ทำให้สูญเสียเวลา และยุ่งยากในเรื่องของการเก็บข้อมูล ทำให้มีการพัฒนาวิธีวัดความยาวรอยร้าวทางอ้อม เช่น การวัดคอมพลายแอนซ์ (compliance) การวัดความต่างศักย์ตกคร่อม (potential drop) เป็นต้น^[11] สำหรับวิธีแรก มีข้อได้เปรียบตรงที่ เครื่องมือไม่ซับซ้อน และผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำสูง

อย่างไรก็ตาม การหาความยาวรอยร้าวโดยการวัดคอมพลายแอนซ์ ต้องใช้อุปกรณ์วัดระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (crack mouth opening displacement, CMOD) ของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า “คลิปเกจ (clip gage)” ซึ่งมีราคาสูงหากใช้ของต่างประเทศ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการทำวิจัยด้านกลศาสตร์การแตกหัก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างคลิปเกจขึ้นใช้เอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึง การออกแบบคลิปเกจ โดยเริ่มตั้งแต่ แนวคิดการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย การวัดคอมพลายแอนซ์ การหาความต้านทานการแตกหัก และการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

- 1) เพื่อสร้างขั้นตอนการออกแบบคลิปเกจแบบคานคู่ ที่ใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด
- 2) เพื่อออกแบบ และสร้างคลิปเกจแบบคานคู่
- 3) เพื่อสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ (clip gage calibrator)
- 4) เพื่อประยุกต์คลิปเกจที่สร้างขึ้นกับการหา คอมพลายแอนซ์ อัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า ความต้านทานการแตกหัก

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. คลิปเกจที่ได้ มีความไว (sensitivity) และพิสัยการใช้งาน (range) เพียงพอสำหรับการทดสอบการแตกหัก ของชิ้นงานทดสอบแบบ CT ทำจากวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 กว้าง 2 นิ้ว หนา 1 นิ้ว
2. เครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจที่ได้ มีความแม่นยำ และพิสัยการใช้งานเพียงพอสำหรับการสอบเทียบคลิปเกจที่สร้างขึ้น
3. การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง สภาพแวดล้อมไม่กัดกร่อน

1.4 วิธีดำเนินงานโดยสรุป

1. ศึกษาทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก และทฤษฎีเครื่องมือวัด
2. ออกแบบ และสร้างคลิปเกจ
3. ออกแบบ และสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ
4. ทดสอบคลิปเกจกับการหาคอมพลายแอนซ์ ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า ชิ้นงานทดสอบแบบ CT วัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และสรุปผลตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) สามารถพัฒนาเครื่องมือวัดสำหรับติดตามรอยร้าว โดยไม่ต้องพึ่งพาการนำเข้าเครื่องมือประเภทนี้จากต่างประเทศ
- 2) สามารถพัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติได้ ซึ่งจะช่วยให้การทดสอบดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบการแตกหักที่อุณหภูมิสูง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

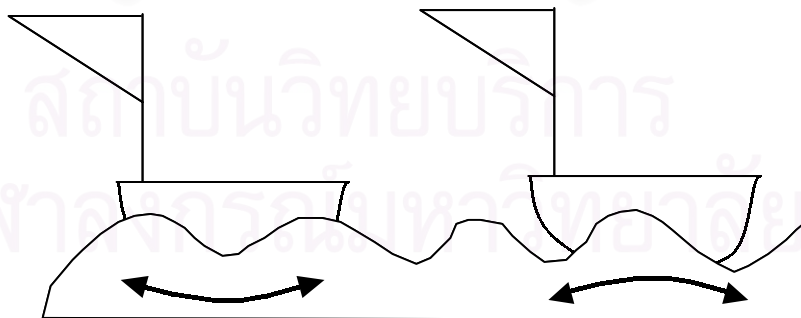
ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก

2.1 ประวัติความเป็นมา

กลศาสตร์การแตกหักศึกษาพฤติกรรมและการเสียรูป และความแข็งแรงของวัตถุที่มีรอยร้าว ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก จัดเป็นแขนงหนึ่งในกลศาสตร์ของแข็งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบคำถามต่อไปนี้

- ชิ้นส่วนจะเสียหาย เมื่อรอยร้าวมีความยาวเท่าไร
- ระยะเวลานับจากเริ่มเกิดรอยร้าว (crack initiation) จนกระทั่งชิ้นส่วนเสียหายเป็นเวลานานเท่าไร
- ช่วงเวลาการตรวจสอบชิ้นส่วน เพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับรอยร้าวที่เหมาะสมควรเป็นเท่าไร

ในอดีตโครงสร้าง ชิ้นส่วนต่างๆ จะใช้เกณฑ์การคราก (yield criteria) ในการออกแบบ แต่ก็พบว่าโครงสร้างยังคงเกิดความเสียหายอยู่ ยกตัวอย่างเช่น สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 เกิดความเสียหายของเรือลิเบอร์ตี (Liberty) ที่สร้างโดยใช้การเชื่อมแทนการใช้หมุดเหล็กยักษ์ ทั้ง ๆ ที่ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากอย่างมาก ซึ่งสาเหตุของความเสียหายมาจากการเกิดรอยร้าวล้าในโครงสร้างเรือทำให้ความแข็งแรงของตัวเรือลดลง ภาวะดังกล่าวนี้มาจากระลอกคลื่น ซึ่งทำให้เรือโก่งตัว และแอ่นตัว ซ้ำแล้วซ้ำอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



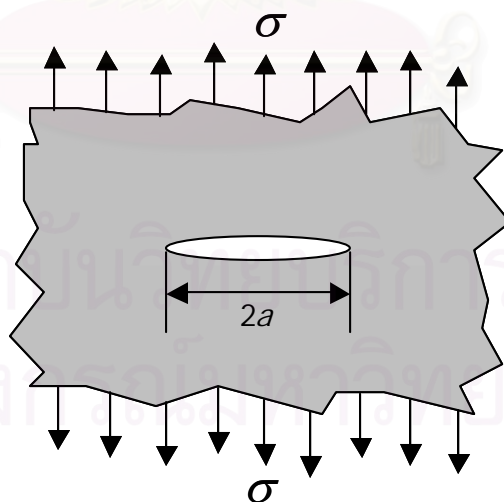
รูปที่ 2.1 ความล้าที่เกิดจากโมเมนต์ดัดที่เกิดกับเรือ

2.1.1 วิวัฒนาการของกลศาสตร์การแตกหัก

จุดเริ่มต้นที่สำคัญของกลศาสตร์การแตกหักเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1920 โดย Griffith เสนอแนวคิดที่ว่า “การเติบโตของรอยร้าวจะเกิดขึ้น เมื่อพลังงานสุทธิของระบบเริ่มลดลง” โดยได้ใช้ทฤษฎีสมดุลพลังงาน หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1948 Irwin ได้นิยาม “อัตราการปลดปล่อยพลังงาน” (energy release rate, G) ซึ่งมีค่าเท่ากับ พลังงานที่ใช้ เพื่อให้รอยร้าวเติบโตต่อหน่วยพื้นที่ นอกจากนี้ Irwin ยังปรับปรุงแนวคิดของ Griffith ซึ่งใช้ได้กับการแตกหักแบบเปราะเพียงอย่างเดียว (brittle fracture) ให้ครอบคลุมการแตกหักแบบเปราะ และการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ในปี ค.ศ. 1950 Irwin ได้เสนอพารามิเตอร์ใหม่ที่เรียกว่า “ตัวประกอบความเข้มของความเค้น” (stress intensity factor, K) โดยพารามิเตอร์นี้จะขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ ขนาดรอยร้าว และภาระที่กระทำ เกณฑ์การแตกหักในเทอมของพารามิเตอร์ K คือ วัสดุจะแตกหักเสียหายเมื่อ K มีค่าเท่ากับค่า K วิกฤติ

2.2 การวิเคราะห์การแตกหักของ Griffith

Griffith พิจารณาแผ่นแบนขนาดไม่จำกัด (infinite plate) หนาหนึ่งหน่วยที่มีรอยร้าวความยาว $2a$ ทะลุความหนา (through – thickness crack) และมีความเค้นดึงสม่ำเสมอกระทำ (σ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผ่นแบนขนาดไม่จำกัดมีรอยร้าวทะลุความหนา

Griffith ได้แบ่งพลังงานออกเป็น 4 ส่วน คือ

1) พลังงานความเครียดยืดหยุ่นในแผ่นแบนไม่มีรอยร้าว, U_i

$$U_i = \int_A \frac{\sigma^2}{2E} dA \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นที่กระทำกับแผ่นแบนขนาดไม่จำกัด

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยร้าว

2) การปลดปล่อยพลังงานความเครียดยืดหยุ่น ในแผ่นแบนมีรอยร้าว, U_a

สำหรับแผ่นแบนขนาดไม่จำกัดที่มีรอยร้าวยาว $2a$ และรับความเค้นดึง σ สม่ำเสมอ จะได้

$$U_a = \pm \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (2.2)$$

3) งานของแรงภายนอก, U_w

$$U_w = \int_{\delta} F dy \quad (2.3)$$

โดยที่ δ คือ ระยะที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากภาระที่กระทำ

F คือ ภาระที่กระทำต่อความหนาหนึ่งหน่วย

4) การเพิ่มของพลังงานผิวยืดหยุ่นเนื่องจากการเกิดผิวรอยร้าว, U_γ

$$U_\gamma = 4a\gamma_e \quad (2.4)$$

โดยที่ γ_e คือ พลังงานผิวยืดหยุ่นของวัสดุหนาหนึ่งหน่วย

ดังนั้น พลังงานยืดหยุ่นสุทธิของแผ่นแบนที่มีรอยร้าว คือ

$$U_t = U_i \pm U_a - U_w + U_\gamma \quad (2.5)$$

หรือ

$$U_t = \int_A \frac{\sigma^2}{2E} dA \pm \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} - \int_{\delta} F dy + 4a\gamma_e \quad (2.6)$$

จากนั้นทำการพิจารณาสมดุลพลังงานของ Griffith ใน 2 กรณี คือ กรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัว (displacement – controlled) และกรณีควบคุมภาระ (load – controlled)

2.2.1 กรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัว

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 เนื่องจากเป็น กรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัวซึ่งระยะคงที่ ทำให้งานที่เกิดจากแรงภายนอกเป็นศูนย์ ($U_w = 0$) ดังนั้นจากสมการที่ 2.5 จะได้ พลังงานยืดหยุ่นสุทธิ (U_t) คือ

$$U_t = U_i - U_a + U_\gamma \quad (2.7)$$

หรือ จากสมการที่ 2.6 จะได้

$$U_t = \int_A \frac{\sigma^2}{2E} dA - \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_e \quad (2.8)$$

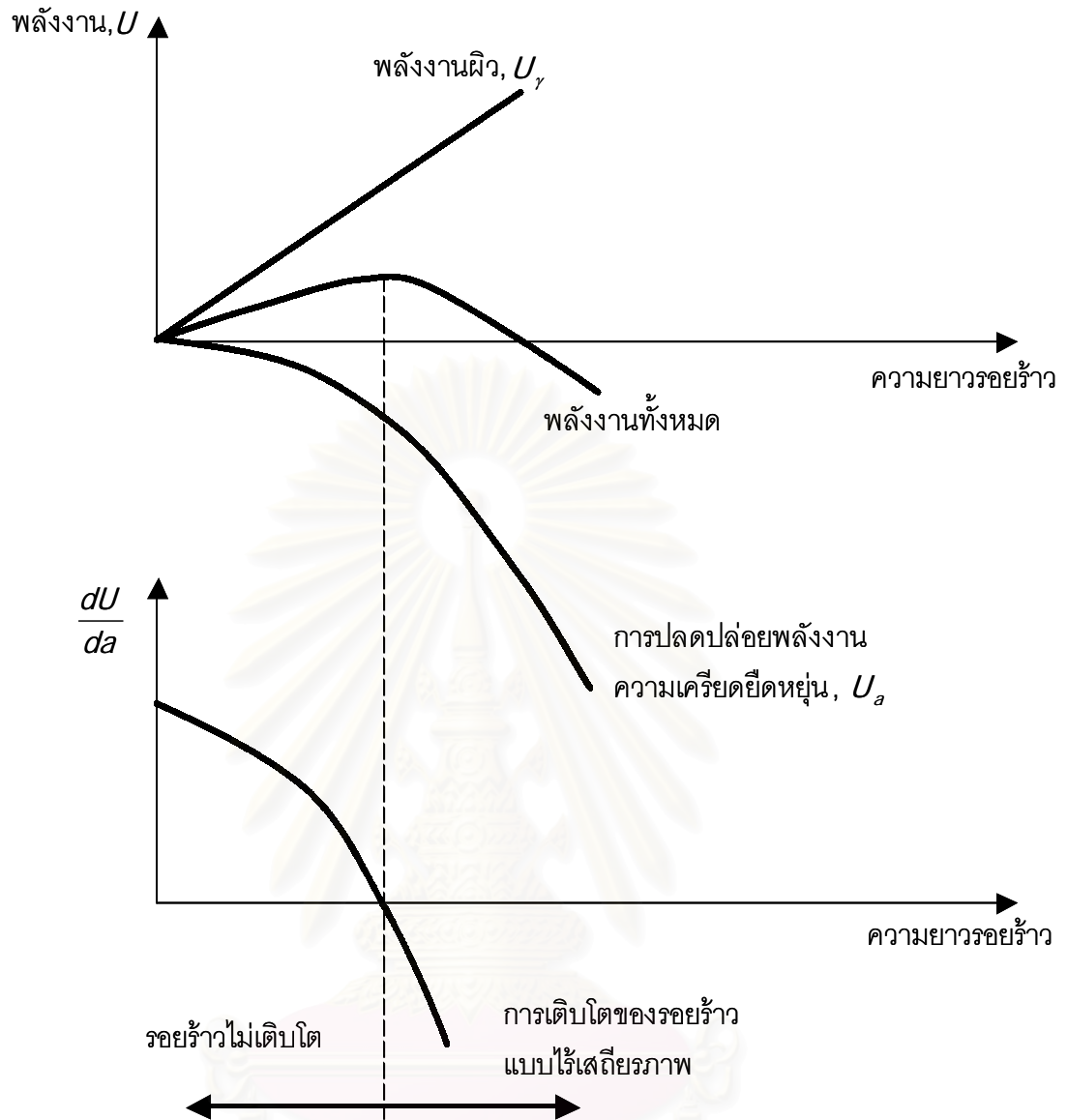
จากการพิจารณาสมดุลพลังงาน การเติบโตของรอยร้าวที่ไร้เสถียรภาพ (unstable crack growth) จะเกิดขึ้นเมื่อ การเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความยาวรอยร้าวเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.8 ทำการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบความยาวรอยร้าว จะได้ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{\partial U_t}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \left[-\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_e \right] = 0 \quad (2.9)$$

กล่าวคือ เมื่อรอยร้าวเติบโตทำให้พลังงานความเครียด $\left(-\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \right)$ ลดลงมากกว่าพลังงานที่สามารถดูดซับไว้ได้ ($4a\gamma_e$) จะทำให้เกิดการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ ดังนั้นจะนำไปสู่การเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (unstable crack growth) สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.3 ณ จุดที่พลังงานสมดุลจะได้

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{2E\gamma_e} \quad \text{กรณีความเค้นระนาบ} \quad (2.10ก)$$

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{\frac{2E\gamma_e}{(1-\nu^2)}} \quad \text{กรณีความเครียดระนาบ} \quad (2.10ข)$$



รูปที่ 2.3 วิธีดุลพลังงานของ Griffith

ณ จุดที่เริ่มเปลี่ยนเป็นการเติบโตของรอยร้าวแบบไร้เสถียรภาพ จะเห็นได้ว่าพจน์ขวามือของสมการที่ 2.10 เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ดังนั้นพจน์ด้านซ้ายมือจึงมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ที่ทำให้เกิดรอยร้าวเติบโตแบบไร้เสถียรภาพ ซึ่งกำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็น K_c ดังนั้นสมการที่ 2.10 สามารถเขียนได้ใหม่ว่า รอยร้าวจะเติบโตแบบไร้เสถียรภาพเมื่อ $K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a}$ สมการที่ 2.10 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ คือ

$$\frac{\pi \sigma^2 a}{E} = 2\gamma_e \quad \text{กรณีความเค้นระนาบ} \quad (2.11ก)$$

$$\frac{\pi \sigma^2 a}{E} (1 - \nu^2) = 2\gamma_e \quad \text{กรณีความเค้นดัดระนาบ} \quad (2.11ข)$$

จากสมการที่ 2.11 พจน์ด้านซ้ายมือแสดงพลังงานยืดหยุ่นต่อผิวรอยร้าวหนึ่งหน่วย กำหนดมีสัญลักษณ์เป็น G ขณะที่พจน์ด้านขวาแสดงพลังงานผิวยืดหยุ่น หรือความต้านทานรอยร้าว แทนด้วยสัญลักษณ์ R ดังนั้น การเติบโตรอยร้าวแบบไร้เสถียรภาพจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$G_c \geq R \quad (2.12)$$

โดยที่

$$G_c = \frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} \quad \text{กรณีความเค้นระนาบ}$$

$$G_c = \frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} (1 - \nu^2) \quad \text{กรณีความเครียดระนาบ}$$

$$R = 2\gamma_e$$

2.2.2 กรณีภาวะคงที่

จากสมการที่ 2.5 กรณีที่ภาวะคงที่ จะได้พลังงานยืดหยุ่นสุทธิ (U_t) คือ

$$U_t = U_i + U_a - U_w + U_\gamma \quad (2.13)$$

จากการพิจารณาสมดุลพลังงานการเติบโตของรอยร้าวแบบไร้เสถียรภาพจะเกิดขึ้นเมื่อ การเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงความยาวรอยร้าวเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.8 ทำการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบความยาวรอยร้าว จะได้สมการที่ 2.14

$$\frac{\partial U_t}{\partial a} \leq 0 \quad (2.14)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียดยืดหยุ่นเริ่มต้น เนื่องมาจากภาวะกระทำแผ่นแบน ไม่มีรอยร้าวเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความยาวรอยร้าว เท่ากับศูนย์ $\left(\frac{\partial U_i}{\partial a} = 0\right)$ ดังนั้น จากสมการที่ 2.14 จะได้

$$\frac{\partial}{\partial a} (U_a - U_w + U_\gamma) \leq 0 \quad (2.15)$$

จัดรูปสมการใหม่ อธิบายอยู่ในรูป G_c และ R ได้สมการที่ 2.16

$$\frac{\partial}{\partial a} (U_w - U_a) \geq \frac{\partial U_\gamma}{\partial a} \quad \text{หรือ} \quad G_c \geq R \quad (2.16)$$

2.3. ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K)

ตัวประกอบความเข้มของความเค้นแสดงถึงความรุนแรงของภาวะกระทำ ที่เกิดกับวัสดุ บริเวณปลายรอยร้าว ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโหมดของภาวะที่มากกระทำ คือ

แบบที่ 1 โหมดเปิด (Opening Mode)

แบบที่ 2 โหมดไถล (Sliding Mode)

แบบที่ 3 โหมดฉีก (Tearing Mode)

โหมดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.4

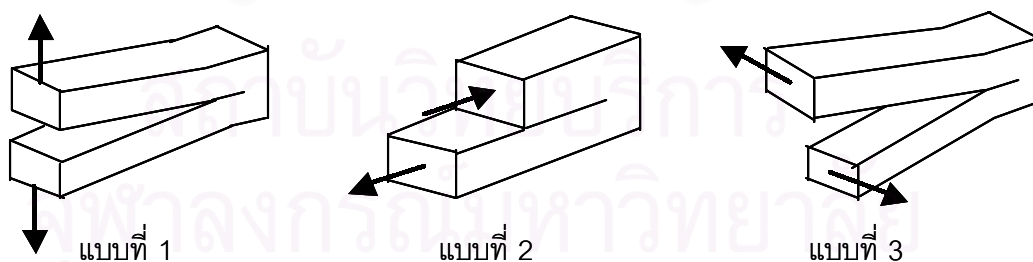
ตัวประกอบความเข้มของความเค้นแสดงความเค้นบริเวณใกล้ปลายรอยร้าว จะสามารถหาได้โดยใช้วิธีของ Westergaard^[11] ซึ่งเขียนในรูปแบบทั่วไป ได้ดังนี้

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad (2.17ก)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{xy} \sqrt{2\pi r}) \quad (2.17ข)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\tau_{yz} \sqrt{2\pi r}) \quad (2.17ค)$$

โดยที่ ตัวประกอบความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับ รูปร่างของชิ้นงาน รอยร้าว และ ลักษณะภาวะที่มากกระทำ วิธีการหาจะสามารถทำได้ทั้งวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method), วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และ วิธีทดลอง (experimental method)



รูปที่ 2.4 โหมดของภาวะกระทำ

ในทางปฏิบัติจะทำได้ยากเนื่องจากรูปร่าง และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ 2.17 ในรูปแบบใหม่ คือ

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่ $f\left(\frac{a}{W}\right)$ คือ ตัวประกอบทางเรขาคณิต (geometry factor) โดยจะมีค่าแตกต่างกันไปตามรูปทรงของชิ้นงาน และรอยร้าว

อย่างไรก็ดี ในส่วนของการทดลองนั้น การกำหนดขนาดของภาระจะสะดวกกว่าการกำหนดขนาดของความเค้นที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ ทำให้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาตัวประกอบความเข้มของความเค้น นิยมเขียนในรูปขนาดของภาระ

$$K_I = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.19)$$

โดยที่ P คือ ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ

B คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

W คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

a คือ ความยาวรอยร้าว

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ คือ ตัวประกอบทางเรขาคณิต

ชิ้นงานทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบหาการแตกหัก คือ ชิ้นงานทดสอบแบบ CT โดยที่ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในชิ้นงานทดสอบแบบ CT ตามมาตรฐาน ASTM E399^[3] คือ

$$K_I = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[0.886 + 4.64 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (2.20)$$

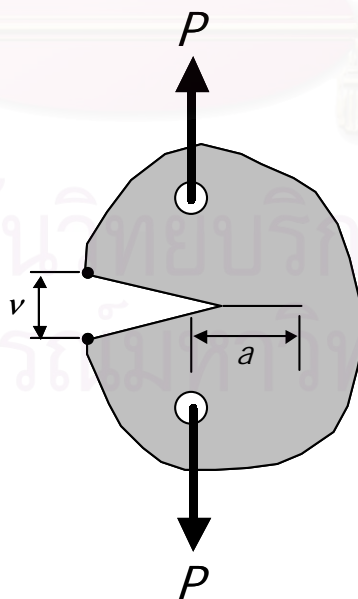
2.4 คอมพลาเยแอนซ์

การวัดความยาวรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ วิธีที่นิยมใช้ คือการถอดชิ้นงานทดสอบออกมาดูด้วยกล้องไมโครสโคป ซึ่งการใส่ และถอดชิ้นงานทดสอบ เพื่อทำการวัดความยาวรอยร้าวในแต่ละครั้งจะเสียเวลามาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวัดความยาวรอยร้าวจึงได้มีวิธีการวัดแบบต่างๆ ทั้งการวัดความยาวรอยร้าวโดยตรง และการวัดความยาวรอยร้าวทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการวัดในหลายๆ วิธีด้วยกัน โดยที่แต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน วิธีวัดความยาวรอยร้าวแบบคอมพลาเยแอนซ์เป็นวิธีวัดความยาวรอยร้าวโดยอ้อม โดยทำนายรอยร้าวจากสมการระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าวเทียบกับแรงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ วิธีนี้มีข้อดีคือ มีราคาถูก แม่นยำ อีกทั้งยังไม่ต้องถอดชิ้นงานออกเพื่อนำมาวัดความยาวรอยร้าว ซึ่งสามารถตรวจวัดความยาวรอยร้าวจากชิ้นงานทดสอบให้เป็นแบบอัตโนมัติได้

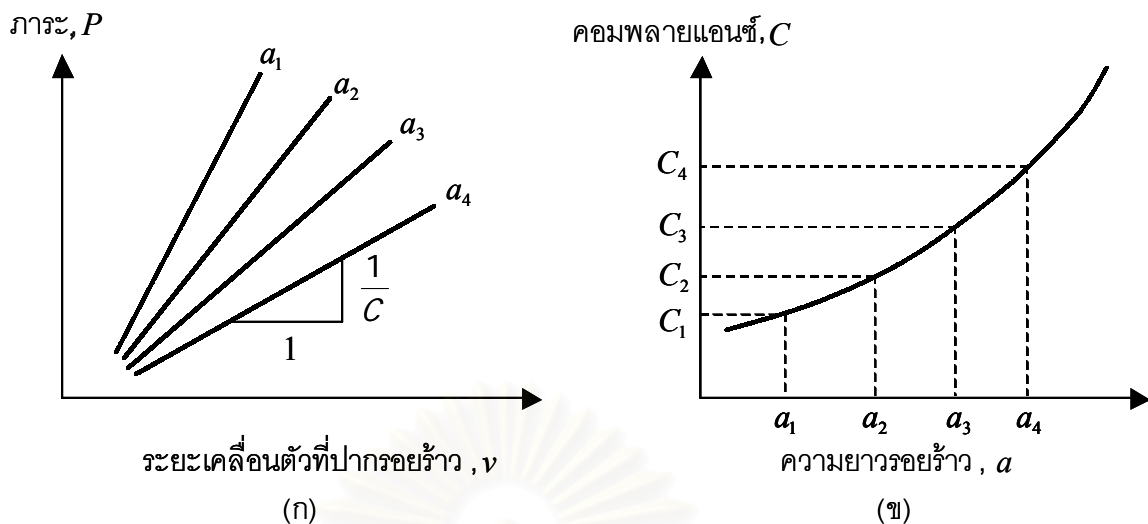
คอมพลาเยแอนซ์, (C) คือ อัตราส่วนระหว่าง ระยะเคลื่อนตัว (v) กับภาระที่กระทำ (P) ต่อชิ้นงาน

$$C = \frac{v}{P} \quad (2.21)$$

เนื่องจากระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงานทดสอบขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่พิจารณา ดังนั้นคอมพลาเยแอนซ์ที่ได้จะต้องระบุตำแหน่งอ้างอิงด้วย วิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้ระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชิ้นงานรูปร่างใด ๆ ในการหาคอมพลาเยแอนซ์



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการหาคอมพลายแอนซ์จากการทดสอบ

- (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ
- (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างคอมพลายแอนซ์กับความยาวรอยร้าว

การทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ มีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างรอยร้าวล้าเริ่มต้น (fatigue precracking) ในชิ้นงานทดสอบให้มีความยาวต่างๆ กัน $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$ เป็นต้น
2. นำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาดึงด้วยแรงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของ K_{IC} จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับชิ้นงาน (จากเครื่องทดสอบ) และระยะเปิดที่ปากรอยร้าว (จากคลิบเกจ) ดังรูปที่ 2.6ก
3. คำนวณหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ v ที่ความยาวรอยร้าวต่างๆ นำส่วนกลับความชันที่ได้ $\left(\frac{V}{P}\right)$ ซึ่งเท่ากับคอมพลายแอนซ์ C มาพล็อต เทียบกับความยาวรอยร้าว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างคอมพลายแอนซ์ และความยาวรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.6ข

2.5 ความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness, K_C) หมายถึง ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤตของวัสดุที่สามารถรับได้ (กรณีพิจารณาเป็นความเครียดระนาบ) โดย K_C เป็นสมบัติของวัสดุ ที่ขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม

2.5.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก

การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักในวิทยานิพนธ์นี้ ยึดตามมาตรฐาน ASTM B645 [2] และ E399 [3] ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ก) การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ CT มีข้อกำหนดดังนี้

1) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานการแตกหัก ต้องมี ความหนา B และความยาวรอยร้าว a สอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.22)$$

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.23)$$

โดยที่

K_{IC} คือ ความต้านทานการแตกหักในสภาวะความเครียดระนาบ (plane strain fracture toughness)

σ_Y คือ ความเค้นคราก (yield stress)

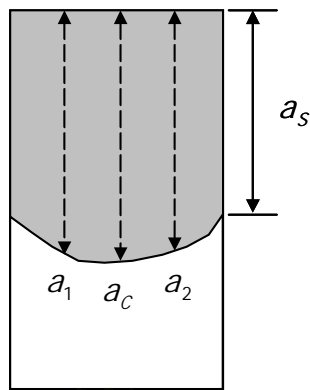
จะเห็นว่าก่อนเริ่มทำการทดสอบ จะต้องประมาณค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ เพื่อนำไปหาความหนา และความยาวรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ การประมาณค่าความต้านทานการแตกหักเริ่มต้น ควรจะประมาณเผื่อไว้ เพื่อให้มั่นใจว่าผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ข้างต้น

2) ความยาวรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบต้องมีความยาวอยู่ในช่วง

$$0.45 \leq \frac{a}{W} \leq 0.55 \quad (2.24)$$

โดยที่ อัตราส่วนระหว่างความกว้าง W และความหนาของชิ้นงานทดสอบ B จะต้องอยู่ในช่วง

$$2 \leq \frac{W}{B} \leq 4 \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.7 ตำแหน่งที่วัดความยาวรอยร้าว (เมื่อมองตั้งฉากกับผิวแตกหัก)

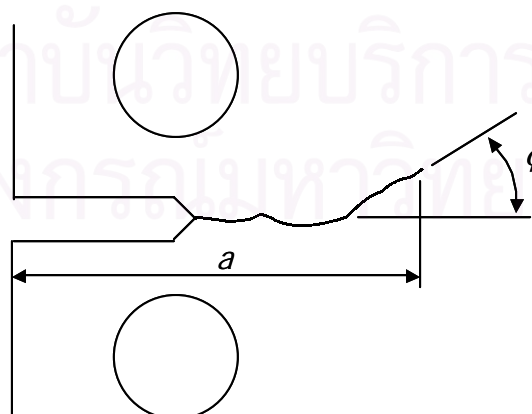
ในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก ตามมาตรฐาน ASTM E399

- 3) จำนวนการทดสอบความต้านทานการแตกหักต้องไม่น้อยกว่า 3 ชิ้น
- 4) การวัดความยาวรอยร้าวที่จะนำมาใช้ในการหาค่าความต้านทานการแตกหักนั้น จะวัดความยาวรอยร้าวจำนวน 3 จุด มีระยะห่างจากขอบเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่ ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว (a_{avg}) มีค่าเท่ากับ

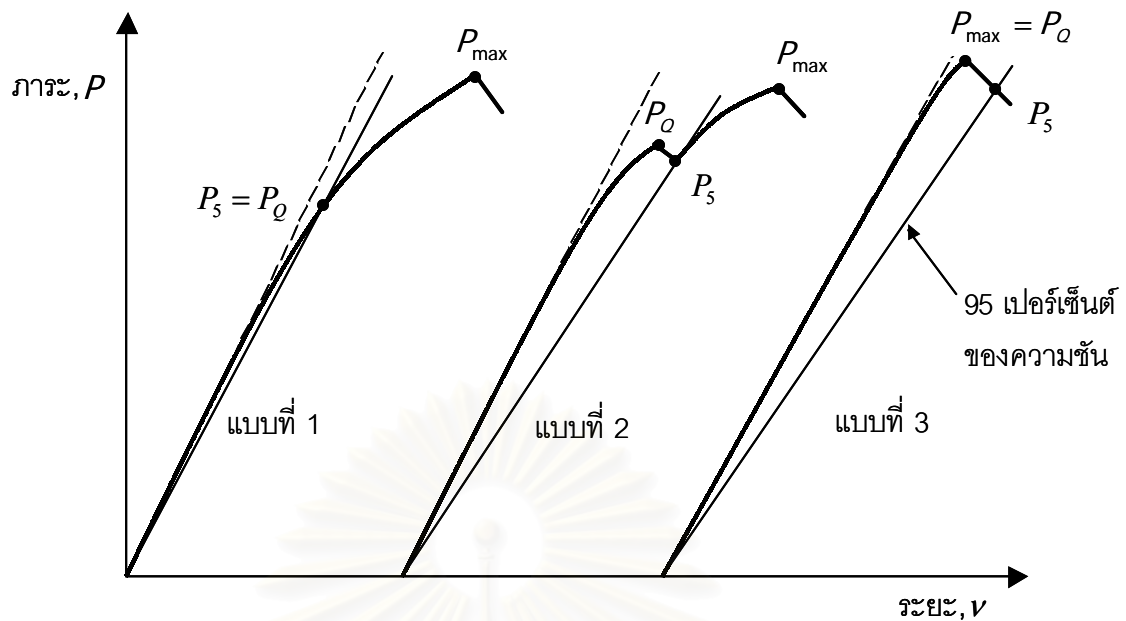
$$a_{avg} = \frac{a_1 + a_2 + a_c}{3} \quad (2.26)$$

มาตรฐาน ASTM E399 ^[3] กำหนดไว้ว่าความยาวรอยร้าวในแต่ละจุดที่วัด จะต้องแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}

- 5) ทิศทางเบี่ยงเบนของรอยร้าว ϕ ต้องเบี่ยงเบนไม่เกิน ± 10 องศา จากทิศทางของปลายรอยบาก (notch) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเบี่ยงเบนทิศทางการเติบโตของรอยร้าว



รูปที่ 2.9 ประเภทของความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับชิ้นงาน และระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหักของวัสดุ

ข) ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก

การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก ต้องเก็บข้อมูล 2 อย่าง คือ

1. ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ
2. ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบทำโดยการดึงชิ้นงานจนกระทั่งเสียหาย ด้วยอัตราการเพิ่มภาระ (loading rate) ที่ทำให้ อัตราการเพิ่มของตัวประกอบความเข้มของความเค้น $\left(\frac{dK}{dt}\right)$ ต้องอยู่ในช่วง $0.55 - 2.75 \frac{MPa \cdot \sqrt{m}}{s}$ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบทางพลศาสตร์ (dynamic response) จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว กับภาระที่กระทำกับชิ้นงาน ในวัสดุทั่วไปจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง ภาระที่กระทำกับชิ้นงาน และระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวอยู่ 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.9

การคำนวณหาค่าความต้านทานการแตกหักทำได้โดยนำ P_Q แสดงดังรูปที่ 2.9 แทนในสมการของ ASTM E399 ^[3] เพื่อหาตัวประกอบความเข้มของความเค้น K_Q โดยที่สมการของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นของชิ้นงานทดสอบแบบ CT คือ

$$K_o = \left(\frac{P_o}{B\sqrt{W}} \right) \frac{\left(2 + \frac{a}{W} \right) \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

(2.27)

โดยที่ B คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
 W คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
 a คือ ความยาวรอยร้าว

โดยมาตรฐาน ASTM E399 กำหนดไว้ว่า P_{\max} ต้องมากกว่า P_o ไม่นเกิน 10%

เมื่อได้ค่า K_o นำมาแทนค่าในสมการต่อไปนี้ โดยให้ $K_o = K_{IC}$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.28ก)$$

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.28ข)$$

พิจารณาขนาดชิ้นงานทดสอบว่า สอดคล้องกับสมการที่ 2.28 หรือไม่ ถ้าสอดคล้องจะสรุปได้ว่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ (K_{IC}) คือ

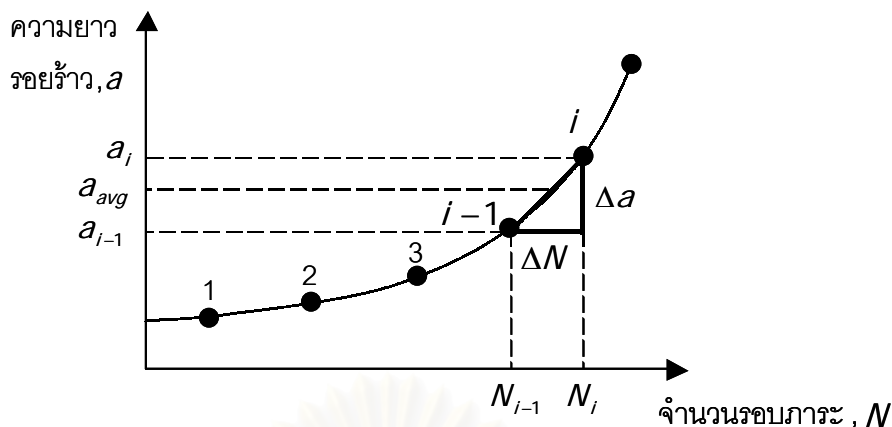
$$K_{IC} = K_o$$

2.6 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

2.6.1 วิธีสร้างกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวรอยร้าว และจำนวนรอบของความล้า จากรูปที่ 2.10 ข้อมูลแต่ละจุดเป็น $1, 2, 3, \dots, i$ จะได้อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าของข้อมูลลำดับที่ i คือ

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_i \approx \left(\frac{\Delta a}{\Delta N} \right)_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.10 ความยาวรอยร้าวที่จำนวนรอบภาระต่าง ๆ

โดยที่ ΔK คำนวณได้จากความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของแต่ละช่วง คือ

$$\Delta K_i = \frac{\Delta P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a_{i,avg}}{W}\right) \quad (2.30)$$

โดยที่

$f\left(\frac{a_{i,avg}}{W}\right)$ คือ ตัวประกอบเรขาคณิต

$$a_{avg} = \frac{a_i + a_{i-1}}{2}$$

พารามิเตอร์ที่ควรทราบในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า มีดังนี้

พิสัยความเค้น $\Delta\sigma$ คือ ผลต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุด และต่ำสุด

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.31)$$

ความเค้นเฉลี่ย σ_m คือ ค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุด และต่ำสุด

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.32)$$

แอมพลิจูดความเค้น σ_a คือ ครึ่งหนึ่งของพิสัยความเค้น

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.33)$$

อัตราส่วนความเค้น R คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดต่อความเค้นสูงสุด

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.34)$$

วัตถุประสงค์ของการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า คือ เพื่อใช้คำนวณหาจำนวนรอบ
ภาระที่ทำให้รอยร้าวเติบโตจากความยาวหนึ่งไปยังอีกความยาวหนึ่ง

สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว สามารถเขียนได้อยู่ในรูปทั่วไป ได้ดังนี้

$$\frac{da}{dN} = g(\Delta K, R, \dots) \quad (2.35ก)$$

$$\frac{dN}{da} = \frac{1}{g(\Delta K, R, \dots)} \quad (2.35ข)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง ได้

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{g(\Delta K, R, \dots)} da \quad (2.36)$$

สำหรับกรณีอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ในรูปของ

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.37)$$

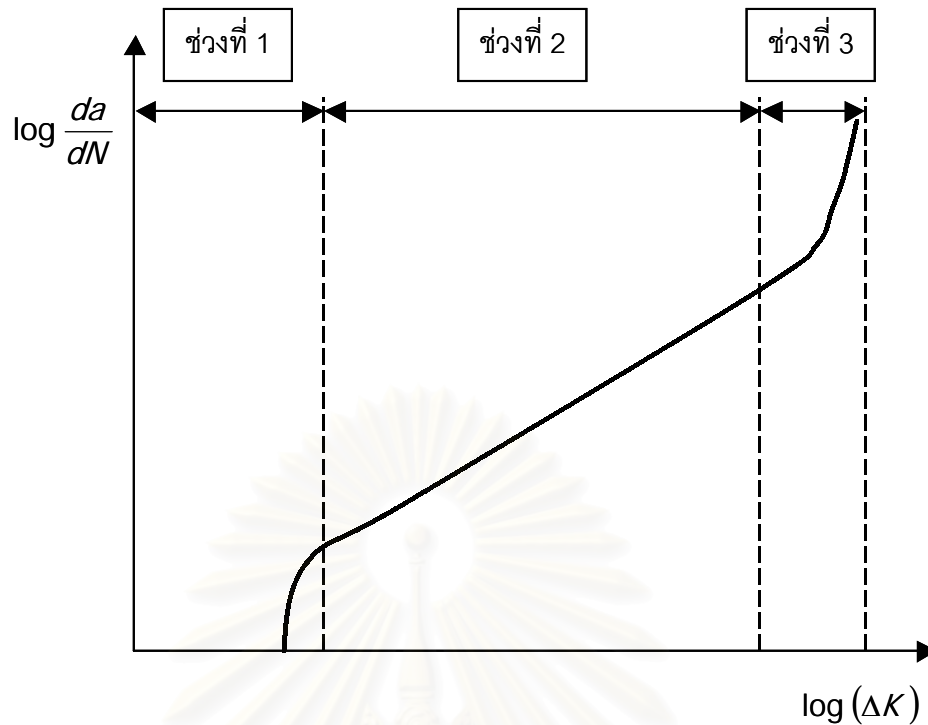
โดยที่ C, m เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

จะได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (กรณีที่ $m \neq 2$) คือ

$$N = \frac{a_f^{1-\frac{m}{2}} - a_i^{1-\frac{m}{2}}}{C(\Delta K)^m \cdot \left(1 - \frac{m}{2}\right)} \quad (2.38)$$

2.6.2 เส้นกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

การวัดอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า นิยมเขียนเป็นกราฟระหว่าง $\frac{da}{dN}$ เทียบกับ ΔK
บนสเกลแบบล็อก – ล็อก กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง
ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

ช่วงที่ 1 ช่วงแรกของการเติบโตของรอยร้าวล้า เป็นบริเวณที่มีค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นต่ำ โดยที่ ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ของภาวะมีค่าต่ำกว่าช่วงนี้ จะทำให้รอยร้าวไม่เกิดการเติบโต ซึ่งเรียกว่า ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ขีดเริ่ม (threshold stress intensity factor range, ΔK_{th}) กราฟช่วงนี้จะมีลักษณะสูงชัน โดยอัตราการเติบโตของรอยร้าวจะอยู่ในช่วง $\frac{da}{dN} = 10^{-8} \sim 10^{-6} \frac{mm}{cycle}$

ช่วงที่ 2 สำหรับวัสดุส่วนใหญ่ กราฟในช่วงนี้จะเป็นเส้นตรง ซึ่ง Paris ได้แทนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.39)$$

เมื่อ C, m คือ ค่าคงที่ในแต่ละวัสดุ

ช่วงที่ 3 กราฟจะมีลักษณะชัน มีค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นสูง เป็นช่วงที่วัสดุเกิดความเสียหาย เพราะจะเป็นการเติบโตรอยร้าวล้าแบบไม่เสถียร โดยที่อายุความล้าในช่วงนี้จะมีระยะเวลาที่สั้นมาก ด้วยเหตุนี้งานทางวิศวกรรม จึงมักไม่ให้ความสนใจพฤติกรรมในช่วงนี้

2.6.3 การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

มาตรฐานการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่ใช้ยึดตาม ASTM E647^[4] ก่อนที่จะทดสอบ ต้องมีการทำรอยร้าวล้าเริ่มต้น ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก) การเตรียมชิ้นงานทดสอบ และรอยร้าวล้าก่อนหน้า

มีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมชิ้นงาน สามารถหาขนาดได้ตามหัวข้อ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ของการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก
2. การทำรอยร้าวล้าก่อนหน้า ภาวะสูงสุดที่ใช้ในการทำรอยร้าวล้าเริ่มต้น ต้องน้อยกว่าภาวะที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า แต่เนื่องจากเพื่อให้เป็นการลดเวลาในการทดสอบ มาตรฐาน ASTM กำหนดไว้ว่า สามารถใช้ภาวะมากกว่าได้ แต่ต้องลดขนาดภาวะสุดท้ายที่ใช้ในการทำรอยร้าวเริ่มต้นลงให้น้อยกว่า ภาวะที่ทดสอบหาอัตราเติบโตของรอยร้าวล้า โดยที่การลดภาวะในแต่ละครั้งต้องไม่เกินกว่า 20% ของภาวะเดิม เพื่อไม่ให้รอยร้าวหยุดการเติบโต
3. ทั้งนี้การสร้างรอยร้าวก่อนหน้าจากปลายของรอยบาก จะต้องทำรอยร้าวล้าเริ่มต้นไม่น้อยกว่า $0.1B$, h และ 1 มม.
4. การวัดความยาวรอยร้าวสำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ CT ต้องวัดภายในช่วง

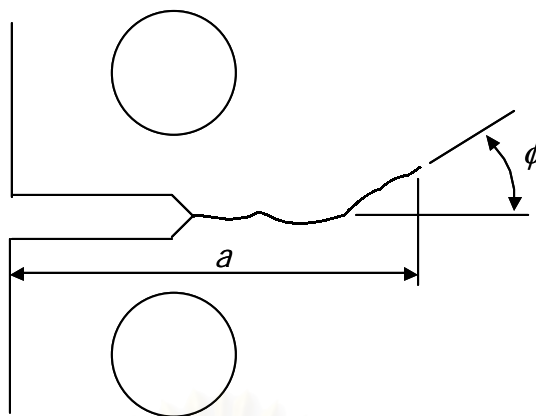
$$\Delta a \leq 0.04W \text{ สำหรับความยาวรอยร้าวในช่วง } 0.25 \leq \frac{a}{W} \leq 0.40$$

$$\Delta a \leq 0.02W \text{ สำหรับความยาวรอยร้าวในช่วง } 0.40 \leq \frac{a}{W} \leq 0.60$$

$$\Delta a \leq 0.01W \text{ สำหรับความยาวรอยร้าวในช่วง } \frac{a}{W} \geq 0.60$$

โดยมีข้อแนะนำว่า Δa ไม่ควรมีค่าน้อยกว่า 0.25 mm หรือ ไม่เกิน 10 เท่าของความแม่นยำของอุปกรณ์ที่ใช้วัดความยาวรอยร้าว

5. ถ้ารอยร้าวเบี่ยงเบน จากแนวของรอยบากเป็นมุมเกิน ± 20 องศา เป็นระยะทางมากกว่า $0.1W$ แล้วจะถือว่าข้อมูลการทดลองใช้ไม่ได้ แต่ถ้าอยู่ในช่วง $\pm 10^\circ - \pm 20^\circ$ สามารถใช้ได้แต่จะต้องมีการรายงานผลของทิศทางที่เบี่ยงเบนไป ดังรูปที่ 2.12
6. ความยาวรอยร้าวของด้านซ้าย และขวาจะต้องแตกต่างกันไม่เกิน $0.25W$



รูปที่ 2.12 ทิศทางเบี่ยงเบนของรอยร้าว

ข) วิธีการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของงานวิจัยนี้ ยึดตามมาตรฐาน ASTM 647 – 93 โดยจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีการกักความร้อน การทดสอบเริ่มต้นด้วยการสร้างรอยร้าวก่อนหน้า โดยเริ่มต้นภาระที่ 600 ± 500 กิโลกรัม จนกระทั่งเกิดรอยร้าวขึ้น จากนั้นพิจารณาเงื่อนไขต่อไปนี้

1. สภาวะทดสอบที่จะทดสอบมีค่าภาระสูงสุด มากกว่าภาระสูงสุดที่ใช้ในการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าหรือไม่ ถ้าไม่มากกว่าจะต้องทำการลดภาระจนสภาวะของภาระ เท่ากับสภาวะของภาระทดสอบ
2. ต้องมีความยาวรอยร้าวเฉลี่ยมากกว่า 3 มม. จึงทำการสร้างรอยร้าวให้ยาวต่อไป ด้วยสภาวะของภาระเดียวกับ สภาวะของภาระทดสอบต่อไปอีกเป็นระยะทางหนึ่ง และเริ่มเก็บข้อมูลในส่วนที่มากกว่า จะใช้สภาวะของภาระทดสอบสร้างรอยร้าวต่อไปจากรอยร้าวขนาดเล็ก จนกระทั่งได้ความยาวมากกว่า 3 มม. จึงเริ่มทำการเก็บข้อมูล

สำหรับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวจะเป็นการทดสอบแบบเพิ่ม K (K increasing) เนื่องจากสภาวะของภาระคงที่ (load control) ทำให้ค่าพิสัยความเข้มของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากรอยร้าวยาวขึ้น จนกระทั่งอัตราการเติบโตของรอยร้าว มากกว่าหรือเท่ากับ 10^{-3} มม./รอบ จึงยุติการทดสอบ

บทที่ 3

ทฤษฎีการวัดความเครียด

การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกล ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงต้องมีการทดสอบเพื่อความแน่ใจว่าการออกแบบเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการออกแบบไว้ ความเค้นในชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงเป็นตัวแปรที่สำคัญทางวิศวกรรมที่ต้องมีการทดสอบจริงก่อนนำไปใช้งาน จึงทำให้มีการพัฒนาการวัดความเค้นในชิ้นส่วน แต่การวัดความเค้นไม่สามารถวัดโดยตรงได้โดยต้องวัดทางอ้อม คือ วัดความเครียด (strain) แปลงไปสู่ความเค้น การวัดความเครียดจากสเตรนเกจ (strain gage) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยม การวัดความเครียดจากสเตรนเกจมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความเครียดในคาน

ความเค้น σ ของคานในรูปที่ 3.1 หาได้จากสมการ^[6]

$$\sigma = \frac{P \cdot x \cdot c}{I} \quad (3.1)$$

โดยที่

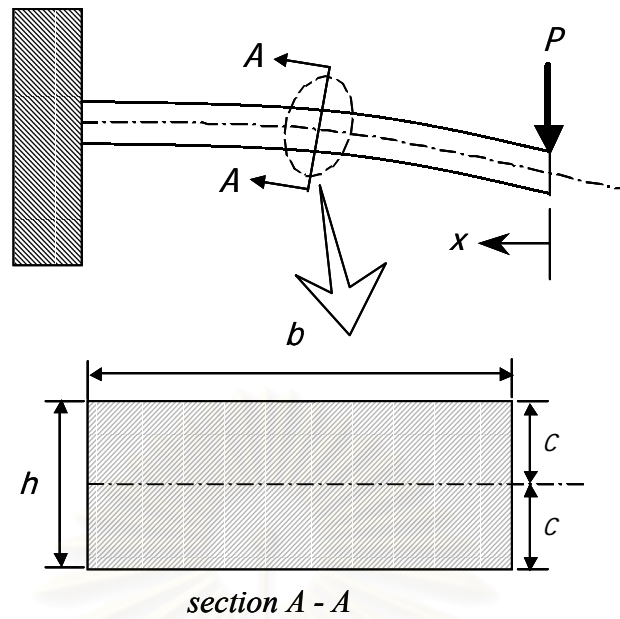
- P คือ ภาระที่กระทำ
- x คือ ระยะจากแรงกระทำ
- c คือ ระยะจากแกนสะเทิน
- I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

สำหรับกรณี คานมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด คือ

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

โดยที่ b คือ ความกว้างของคาน

h คือ ความหนาของคาน



รูปที่ 3.1 ความเค้นของคาน

จากกฎของฮุค (Hooke 's law)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

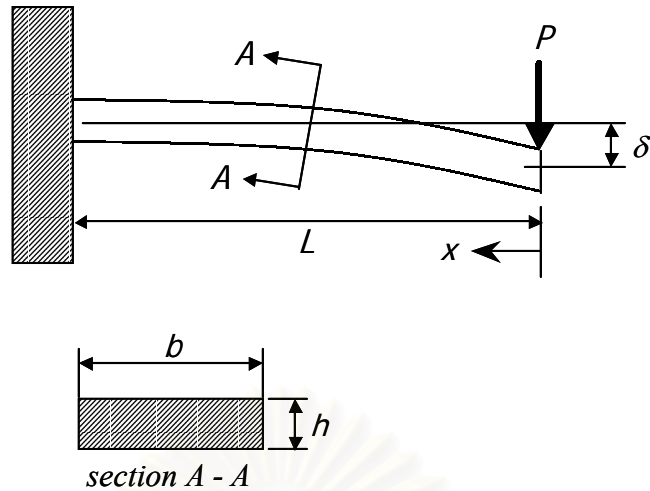
โดยที่ E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น

แทนความเค้นที่เกิดขึ้น (สมการที่ 3.1) ลงในสมการที่ 3.2 จะได้ความเครียดที่ผิวของคาน ε มีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon = \frac{P \cdot x \cdot c}{E \cdot I} \quad (3.3)$$

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่ง กับความเครียดของคาน

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่ง กับความเครียดของคาน จะใช้ในการคำนวณหา ความไวของ คลิปเกจ ซึ่งนิยามว่าเท่ากับ อัตราส่วนของ ความเครียดบริเวณที่ติดสเตรนเกจ เทียบกับระยะโก่งของคานคลิปเกจ



รูปที่ 3.2 ระยะเวลาของคานเมื่อรับแรง

ระยะเวลาของคาน δ เนื่องจากแรงกระทำ P ในรูปที่ 3.2 คือ ^[5]

$$\delta = \frac{1}{3} \frac{PL^3}{EI} \quad (3.4)$$

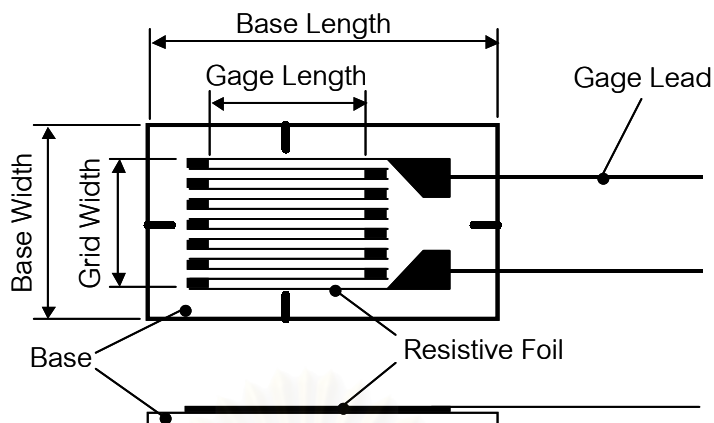
จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา และ ความเครียดของคาน คือ

$$\frac{\delta}{\varepsilon} = \frac{1}{3} \frac{L^3}{CX} \quad (3.5)$$

3.3 การประยุกต์สเตรนเกจในการออกแบบทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณทางกลเป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อที่สามารถเก็บข้อมูลบันทึกในคอมพิวเตอร์ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้คลิปเกจเป็นทรานส์ดิวเซอร์ แปลงระยะทางเป็นความต่างศักย์โดยใช้สเตรนเกจ ดังนั้นการเลือกสเตรนเกจจึงมีผลต่อ ทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำการออกแบบ สเตรนเกจมีลักษณะดังรูปที่ 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 สเตรนเกจ

3.3.1 คุณสมบัติของสเตรนเกจ^[17]

ในทางทฤษฎี สเตรนเกจควรมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

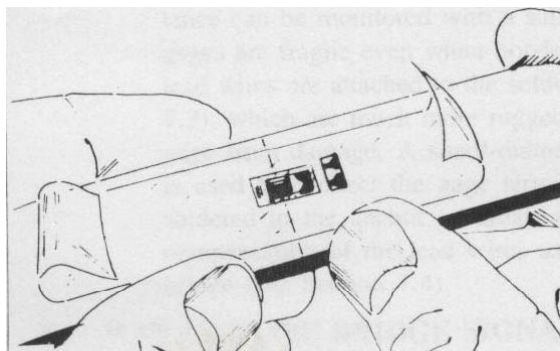
1. มีความแม่นยำสูงทั้งในการวัดแบบสถิตย์ศาสตร์ และพลศาสตร์
2. ขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา
3. ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง
4. ติดตั้งง่าย
5. ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน
6. ความเป็นเชิงเส้นสูง
7. ราคาถูก

3.3.2 วิธีติดสเตรนเกจ^[9]

วิธีติดสเตรนเกจบนคลิปปเกจ มีขั้นตอนดังนี้

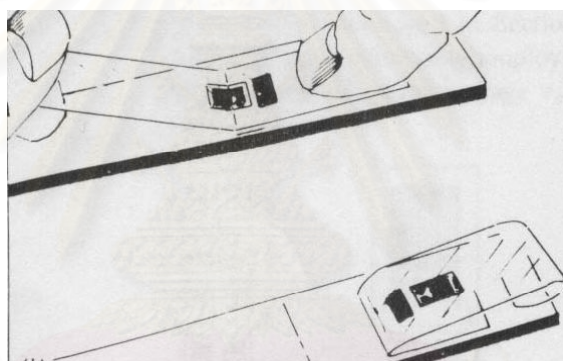
1. ขัดผิวด้วยกระดาษทราย เบอร์ 100 – 300
2. ใช้อะซิโตน (acetone) เช็ดผิวชิ้นงานให้สะอาด
3. ชีตเครื่องหมายกากบาทแสดงตำแหน่งการติดสเตรนเกจด้วยดินสอด
4. ติด G – picker¹ กับสเตรนเกจ
5. ติด G – picker และสเตรนเกจกับชิ้นงาน โดยต้องวางตำแหน่งแกนกลางสเตรนเกจ ให้ตรงกับตำแหน่งที่ได้ขีดเครื่องหมายไว้ ดังรูป 3.4

¹ เป็นเทปใสสำหรับติดสเตรนเกจโดยเฉพาะ



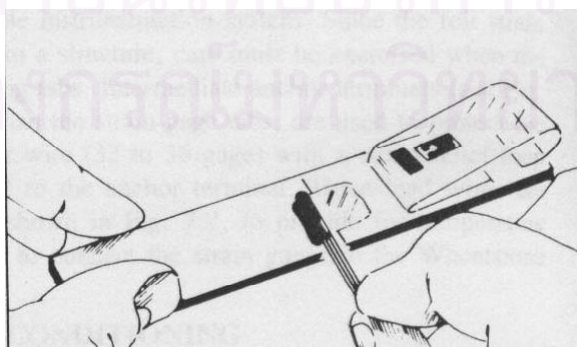
รูปที่ 3.4 การติด G – picker และสเตรนเกจกับชิ้นงาน

6. ลอก G – picker ที่ปลายด้านหัวของสเตรนเกจขึ้น (ด้านที่ไม่มีสายไฟ) ดังรูปที่ 3.5 ใช้อะซิโตนเช็ดผิวให้สะอาดอีกครั้งหนึ่ง

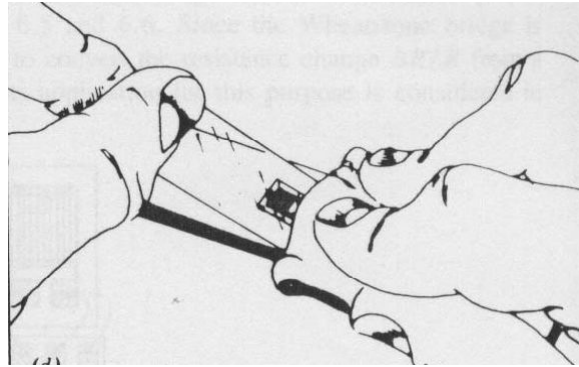


รูปที่ 3.5 วิธีการลอก G – picker ที่ปลายด้านหัวของสเตรนเกจ

7. หยด (หรือ ทา) สารยึดติดสเตรนเกจ ประมาณ 1 – 2 หยด ที่ชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6



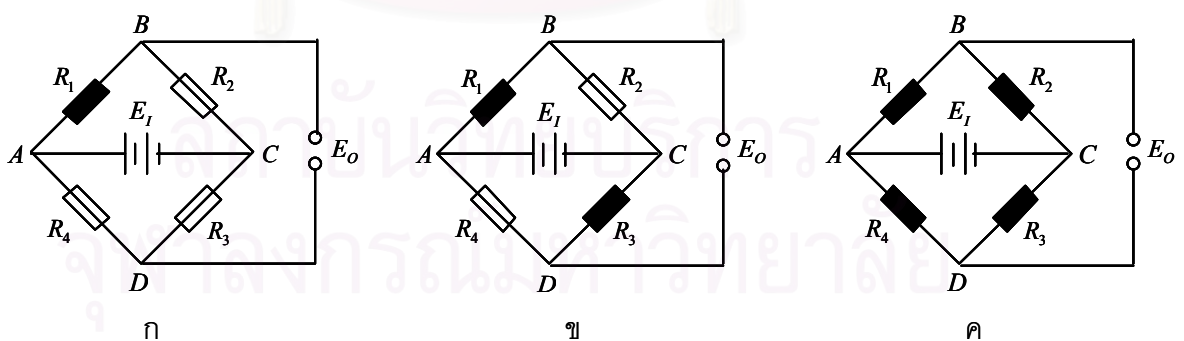
รูปที่ 3.6 การหยด (ทา) สารยึดติดสเตรนเกจ



รูปที่ 3.7 วิธีการกดสเตรนเกจ เพื่อให้กาวิตดอย่างสม่ำเสมอ

8. กดสเตรนเกจกลับไปบนชิ้นงานอีกครั้ง แล้วใช้นิ้วกดไล่จากด้านสายไฟไปยังด้านหัว เพื่อให้กาวิตดอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นกดไว้ประมาณ 3 นาที ดังรูปที่ 3.7
9. ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง (ควรจะประมาณ 24 ชั่วโมง) ก่อนการใช้งาน
10. ลอก G - picker ออก โดยเริ่มจากด้านสายไฟสเตรนเกจ
11. หยดสารยึดติดสเตรนเกจประมาณ 1 หยด ติดแผ่นพักสาย
12. ต่อดวงจรสเตรนเกจ
13. เคลือบสเตรนเกจด้วยแผ่นกันความชื้น

การใช้สเตรนเกจ นิยมต่อเป็นวงจรบริดจ์ เพื่อเพิ่มอัตราขยาย ซึ่งวงจรบริดจ์ที่ใช้กับสเตรนเกจ มี 3 แบบ คือ 1. แบบบริดจ์เดี่ยว (single bridge) 2. แบบครึ่งบริดจ์ (half bridge) 3. แบบเต็มบริดจ์ (full bridge) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรบริดจ์ที่ใช้กับสเตรนเกจ

ก. แบบบริดจ์เดี่ยว ข. แบบครึ่งบริดจ์ ค. แบบเต็มบริดจ์

3.3.3 การแปลงความต้านทานเป็นความเครียดของสเตรนเกจ

จากรูปที่ 3.8 ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลง ΔE_o เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสเตรนเกจ ΔR_i คือ

$$\Delta E_o = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E_i \quad (3.4)$$

โดยที่

E_i คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานสเตรนเกจแต่ละตัว ΔR_i เป็นดังสมการที่ 3.5

$$\Delta R_i = \varepsilon_i \cdot G \cdot R_i \quad (3.5)$$

โดยที่

G คือ เกจแฟคเตอร์ของสเตรนเกจ

จากสมการที่ 3.4 และ 3.5 ถ้าความต้านทานของสเตรนเกจเท่ากัน และต่อวงจรแบบเต็มบริดจ์ จะได้ ΔE_o คือ

$$\Delta E_o = E_i \cdot \varepsilon_i \cdot G \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 สามารถนำไปคำนวณความเครียด จากการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ออกมาจากวงจรได้

บทที่ 4

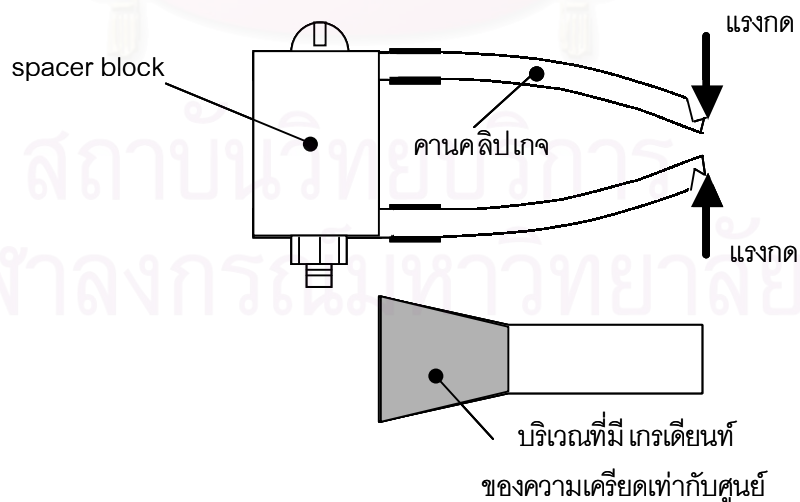
การออกแบบคลิปเกจ

4.1 แนวความคิดการออกแบบ

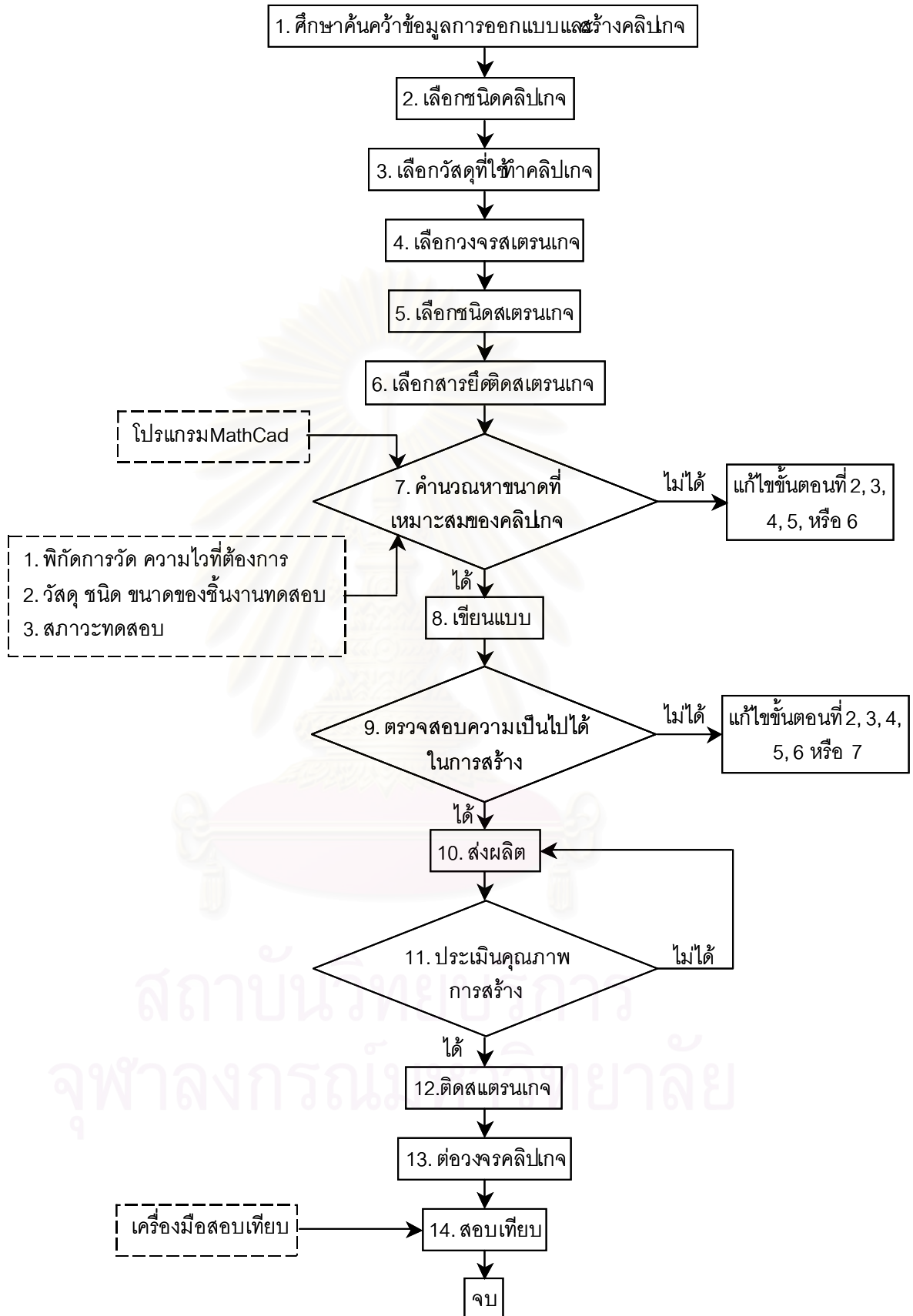
วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบคลิปเกจแบบคานคู่ โดยใช้แนวทางการออกแบบที่มาตรฐาน ASTM E399 แนะนำ แต่มีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจจากไททาเนียมผสมเป็น อลูมิเนียมผสมเพราะไม่มีตัวแทนนำเข้าไทเทเนียมผสมในประเทศ อย่างไรก็ตามการใช้อลูมิเนียมผสมจะมีข้อดีตรงที่มีน้ำหนักเบา ส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของคลิปเกจดี^[7] นอกจากนี้ยังดัดแปลงให้คานคลิปเกจมีความกว้างไม่คงที่ (รูปที่ 4.1) ซึ่งมีข้อดีหลายประการดังนี้ 1) สามารถกำจัดความผิดพลาดที่เกิดจากการติดตั้งเกจไม่ตรงกับตำแหน่งที่ออกแบบ เพราะส่วนของคลิปเกจที่ติดตั้ง เสร็จจะมีความเครียดเท่ากันทั้งบริเวณ 2) เพิ่มความเป็นเชิงเส้นของผลลัพธ์ และ 3) สามารถติดตั้งเกจในตำแหน่งที่มีความเครียดสูงสุดได้โดยไม่ได้รับผลกระทบ จากการปลายยึด (end effect)

4.2 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ

ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Double cantilevers taper clip gage) แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 คานคลิปเกจแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างศิลป์

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ

ศึกษาถึงประเภท วิธีการออกแบบ การสร้าง ข้อดี ข้อเสียของคลิปเกจ ในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้าง หรือวิธีการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของคลิปเกจ จากวารสารทางวิชาการ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกชนิดคลิปเกจ

เลือกชนิดของ คลิปเกจ ที่เหมาะสมกับสภาวะการทดสอบต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์นี้ โดยนำข้อมูลขั้นตอนที่ 1 มาใช้เป็นหลักการพิจารณาเลือก

ขั้นตอนที่ 3 เลือกวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ พิจารณาจาก อัตราส่วนของความเค้นครากของวัสดุต่อโมดูลัสของความยืดหยุ่น วัสดุที่เหมาะสมควรมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวสูง^[7] เพราะจะทำให้สามารถออกแบบคลิปเกจ ที่มีความไวสูง และมีพิสัยการวัดกว้าง

ขั้นตอนที่ 4 เลือกวงจรสเตรนเกจ

หลักในการพิจารณาการเลือกวงจร สเตรนเกจ มีดังนี้

- 4.1) มีอัตราขยายสูง (บริดจ์แฟคเตอร์สูง)
- 4.2) มีการชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้

ขั้นตอนที่ 5 เลือกชนิดสเตรนเกจ

สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ซึ่งใช้วัดความเครียดของวัสดุที่แตกต่างกัน หลักการที่ใช้พิจารณาการเลือกสเตรนเกจ มีการพิจารณาคูณสมบัติของสเตรนเกจดังที่ได้กล่าวไปใน หัวข้อ 3.3.1 คุณสมบัติของคลิปเกจ

ขั้นตอนที่ 6 เลือกสารยึดติดสเตรนเกจ

สารยึดติด (adhesive) ที่ใช้ต้องสามารถติดสเตรนเกจ กับวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจได้ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานทนทาน ต่อการทดสอบแบบภาวะของความล้าได้

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ

วิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจขึ้นอยู่กับ พิสัยการวัด ความไวที่ต้องการ วัสดุ ชนิด ขนาดของชิ้นงานทดสอบ และสภาวะการทดสอบ ในวิทยานิพนธ์นี้คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจจากโปรแกรม MathCad มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) กำหนดวัสดุ ชนิด และขนาดของชิ้นงานทดสอบ

ก่อนที่จะทำการออกแบบคลิปเกจจะต้องทราบวัสดุ ชนิด และขนาดของชิ้นงานทดสอบ โดยที่ในวิทยานิพนธ์นี้ ชิ้นงานทดสอบจะยึดตามมาตรฐาน ASTM B645^[2] และ E399^[3]

2) กำหนดขอบเขตของการคำนวณหาขนาดคลิปเกจ

2.1) ขอบเขตความเค้นครากของวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ

เมื่อนำคลิปเกจไปใช้งานจะต้องไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของคลิปเกจที่เกิดการครากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้คลิปเกจที่ได้มีความแม่นยำลดลง (เนื่องมาจากความเป็นเชิงเส้นลดลง) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดให้ มีความเค้นมากที่สุดที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิน 75% ของความเค้นคราก

2.2) ขอบเขตความไวของคลิปเกจ

ขอบเขตความไวของคลิปเกจ สามารถคำนวณได้จาก พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม ΔK_{th} ที่ทำให้รอยร้าวเริ่มเติบโต

2.3) ขอบเขตพิสัยการวัด

พิสัยการวัดของคลิปเกจ คำนวณได้จากระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวมากที่สุด โดยที่ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวมากที่สุด จะเกิดขึ้นในกรณีการทดสอบความต้านทานการแตกหัก เพราะต้องให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ จนกระทั่งเสียหาย

2.4) ขอบเขตการเสียหายเนื่องจากความล้าของคานคลิปเกจ และสาร์ยัดติดสเตรนเกจ

คานคลิปเกจ และสาร์ยัดติดสเตรนเกจเป็นส่วนที่รับภาระแบบความล้า ทำให้อาจเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้ ดังนั้นจึงมีการพิจารณาขอบเขตการเสียหายเนื่องจากความล้าของคาน คลิปเกจ และกาวติดสเตรนเกจ จากสมการทำนายความล้าของ Goodman

2.5) ขอบเขตทางด้านรูปร่างคลิปเกจ

ขอบเขตทางด้านรูปร่างพิจารณา ความหนา ความกว้าง และความยาวของคลิปเกจ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการติดตั้งกับชิ้นงานทดสอบ

3) กำหนดขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจจากโปรแกรม MathCad

ในวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ต้องการให้มีความไวมากที่สุด โดยจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MathCad เป็นเครื่องมือที่ใช้คำนวณรูปร่างที่เหมาะสมของคลิปเกจ

4) กำหนดความสูงของ spacer block

ความสูงของ spacer block จะขึ้นอยู่กับขนาดของคานคลิปเกจที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะคำนึงถึงการสวมเข้าพอดี ระหว่างคานคลิปเกจกับ spacer block และพื้นที่ของการเดินสายไฟ วงจรสเตรนเกจ

5) กำหนดขนาดแผ่นป้องกันสเตรนเกจ

เนื่องจากการใช้งานมีโอกาสที่จะสัมผัสถูกสเตรนเกจ ซึ่งอาจทำให้สเตรนเกจเสียหายได้ ดังนั้นจึงควรมีแผ่นป้องกันสเตรนเกจ จากการขีดข่วน แต่ก็ควรมีขนาดเล็ก เพื่อให้คลิปเกจมีน้ำหนักเบา และยังใช้งานได้สะดวก

ขั้นตอนที่ 8 เขียนแบบประกอบ และแบบรายละเอียด

เพื่อความถูกต้องของคลิปเกจที่ออกแบบ ต้องมีการพิจารณาตรวจสอบความถูกต้องของแบบประกอบว่าชิ้นส่วนทั้งหมดสามารถประกอบกันได้ โดยต้องไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการติดขัด เนื่องมาจากการประกอบชิ้นส่วนใดๆ เกิดขึ้น จากนั้นเขียนแบบรายละเอียด เพื่อกำหนดความเรียบของผิว พิสัยความเผื่อ และขนาดชิ้นส่วนอย่างละเอียด

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการสร้าง

ในขั้นตอนนี้ จะต้องนำคลิปเกจที่ได้ออกแบบไว้ไปให้ช่างฝีมือทำการผลิตชิ้นงาน โดยจะมีการสรุปกันทั้งสองฝ่ายคือ 1) ฝ่ายออกแบบหรือผู้วิจัย และ 2) ฝ่ายผลิตชิ้นงานหรือช่างฝีมือ ว่าชิ้นส่วนที่ออกแบบไว้ สามารถผลิตได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้จะต้องนำคลิปเกจไปออกแบบใหม่อีกครั้งเพื่อให้สามารถผลิตคลิปเกจได้ในทางปฏิบัติงานจริง

ขั้นตอนที่ 10 ส่งผลิต

เมื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการสร้าง และสามารถตกลงกับช่างฝีมือได้ จากนั้นจึงส่งแบบอย่างละเอียดของคลิปเกจ เพื่อทำการผลิต

ขั้นตอนที่ 11 ประเมินคุณภาพการสร้าง

เมื่อช่างฝีมือทำการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของคลิปเกจเรียบร้อยแล้ว นำมาประเมินคุณภาพงาน โดยการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมด ถ้าพบว่าชิ้นงานที่สร้างมากกว่าพิสัยความเผื่อที่ได้กำหนดไว้ในแบบละเอียดทำให้ไม่สามารถประกอบชิ้นส่วนได้ ต้องทำการผลิตอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 12 ติดสเตรนเกจ

ขั้นตอนนี้ทำการติดสเตรนเกจกับคลิปเกจ พร้อมทั้งติดแผ่นพักสาย (terminal) เพื่อทำการต่อวงจรสเตรนเกจ

ขั้นตอนที่ 13 ต่อวงจรคลิปเกจ

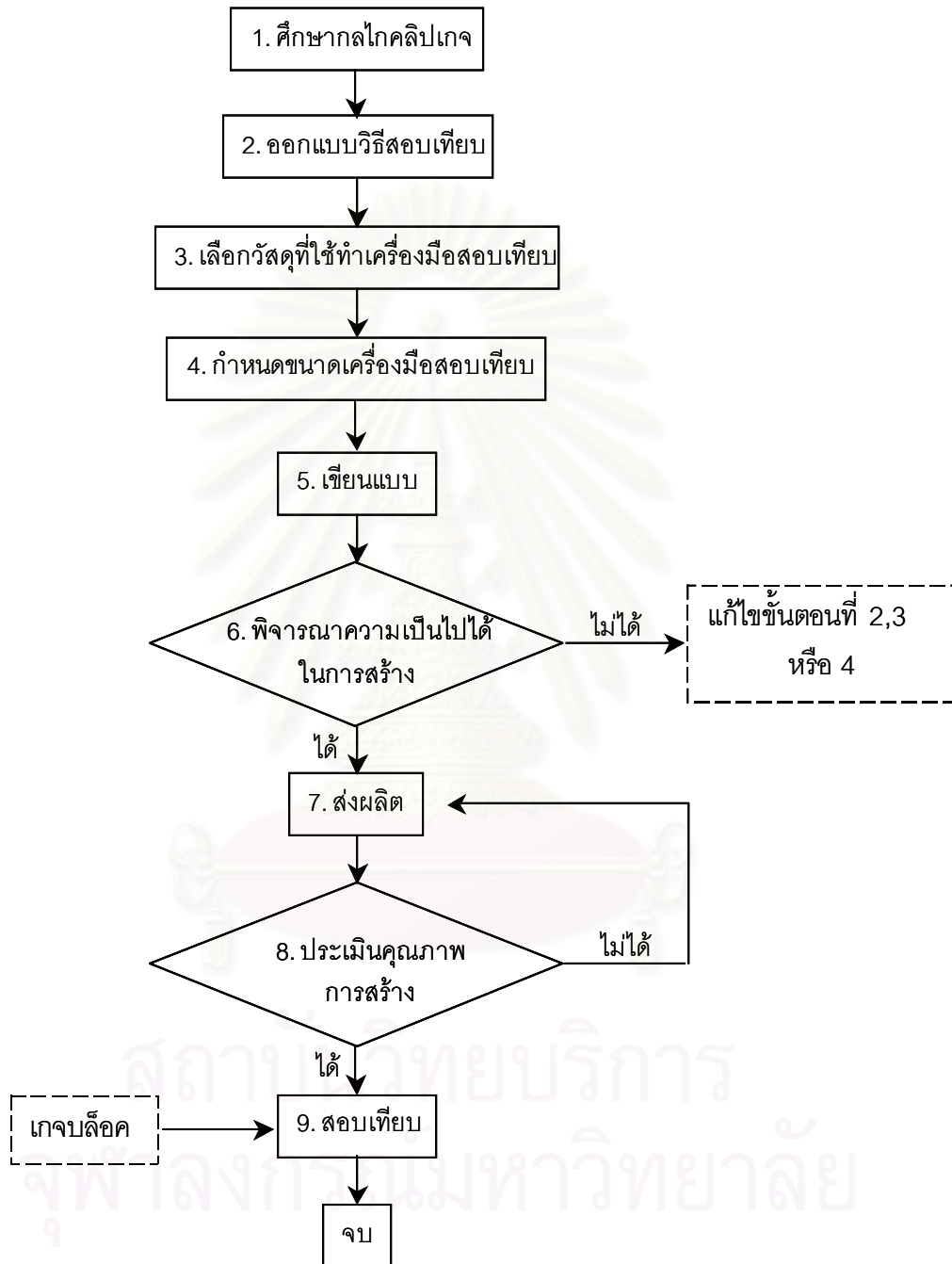
ขั้นตอนนี้เป็นการต่อวงจรคลิปเกจ แสดงขั้นตอนการต่อวงจรอย่างละเอียด

ขั้นตอนที่ 14 สอบเทียบคลิปเกจ

เมื่อประกอบชิ้นส่วนคลิปเกจที่ได้ทั้งหมดแล้ว ทำการสอบเทียบคลิปเกจกับเครื่องมือสอบเทียบ ก่อนที่จะนำคลิปเกจไปใช้งานจริงต่อไป

4.3 ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

ขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ อธิบายได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษากลไกคลิปเกจ

ศึกษากลไก การทำงาน วิธีการติดตั้งของคลิปเกจเมื่อทำการสอบเทียบ กับเครื่องมือสอบเทียบ เพื่อให้มีความแม่นยำในการสอบเทียบมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบวิธีสอบเทียบ

ออกแบบวิธีสอบเทียบ คำนึงถึง กลไกการทำงาน และอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนที่ 3 เลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือสอบเทียบ

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือสอบเทียบ ต้องเป็นวัสดุที่สามารถเก็บรักษาได้ง่าย ไม่เป็นสนิม

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขนาดเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนนี้ทำการร่างแบบของเครื่องมือสอบเทียบ เพื่อแสดงแนวคิดว่าชิ้นส่วนจะประกอบกันอย่างไรให้สอดคล้องกัน เครื่องมือจะทำงานอย่างไร ไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งที่ทำงานติดขัด

ขั้นตอนที่ 5 เขียนแบบประกอบ และแบบรายละเอียด

ขั้นตอนนี้คือการนำแบบร่างของขั้นที่ 4 มาเขียนแบบประกอบเพื่อให้เห็นสัดส่วนจริงสามารถตรวจสอบว่ามีมิติต่าง ๆ ว่าเหมาะสม หรือทำงานได้อย่างที่ต้องการหรือไม่ จากนั้นจึงเขียนแบบรายละเอียด ซึ่งจะมีรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ โดยจะมีการระบุคุณภาพผิว , พิสัยความเผื่อ (ของการสวม) และมีการลบมุมเพื่อความปลอดภัยเวลาใช้งาน

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาความเป็นไปได้ในการสร้าง

เนื่องจากเครื่องมือสอบเทียบต้องมีความแม่นยำสูง เพื่อสามารถสอบเทียบคลิปเกจได้อย่างแม่นยำ จึงต้องให้ความสำคัญต่อขั้นตอนการสร้างอย่างมาก โดยต้องพิจารณาความสามารถการสร้างได้ โดยต้องนำแบบรายละเอียดไปปรึกษากับช่างฝีมือว่ามีขั้นตอนการสร้างเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งในขั้นตอนนี้ อาจจะมีการแก้ไขมิติหรือรูปร่างบางส่วน of เครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนที่ 7 ส่งผลิต

ขั้นตอนนี้จะให้ช่างฝีมือทำการผลิตชิ้นงาน โดยได้ให้ช่างที่กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (MIDI) ทำการผลิต โดยต้องไปตกลงเรื่องแบบของชิ้นส่วนต่างๆ พิสูจน์ความเผื่อ คุณภาพของผิว

ขั้นตอนที่ 8 ประเมินคุณภาพการสร้าง

ขั้นตอนนี้ทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดของเครื่องมือสอบเทียบ การสวมเข้าของชิ้นส่วนทั้งหมด พร้อมทั้งจะทำการสอบเทียบกับเกจบลิ๊อค

ขั้นตอนที่ 9 สอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบกับเกจบลิ๊อค

โดยขั้นตอนนี้ จะนำเครื่องมือสอบเทียบมาทำการสอบเทียบกับเกจบลิ๊อค เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนตัวของไมโครมิเตอร์ ต่อระยะเคลื่อนตัวของเกจบลิ๊อค



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

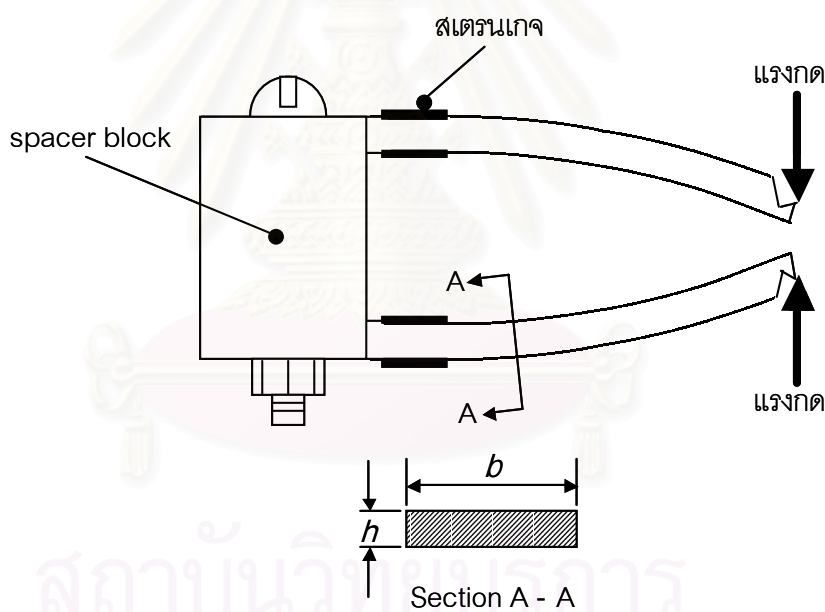
4.4 ผลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ

ผลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ แสดงตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ

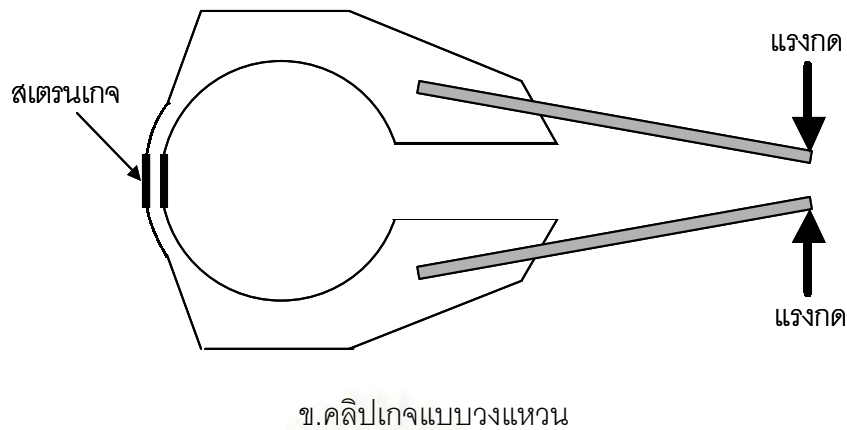
จากการศึกษาค้นคว้า สามารถแบ่งคลิปเกจได้เป็น 2 ประเภท^[5,7,16] คือ

- 1) คลิปเกจแบบคานคู้ จะมีลักษณะดังรูปที่ (4.4ก) ได้บรรจุเป็นมาตรฐานของ ASTM E399 ซึ่งมีข้อดี คือ มีพิสัยการวัดกว้าง ความเป็นเชิงเส้นสูง ติดสเตรนเกจได้ง่าย และวิธีการสร้างไม่ซับซ้อน
- 2) คลิปเกจแบบวงแหวน จะมีลักษณะดังรูปที่ (4.4ข) มีข้อดีคือ มีความไวสูง แต่มีข้อเสียคือ วิธีการติดสเตรนเกจมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องติดสเตรนเกจบริเวณที่มีส่วนโค้ง พื้นที่การติดตั้งน้อย มีพิสัยการวัดต่ำ และวิธีสร้างซับซ้อน



ก. คลิปเกจแบบคานคู้

รูปที่ 4.4 คลิปเกจแบบต่างๆ



ข.คลิปเกจแบบวงแหวน

รูปที่ 4.4 (ต่อ) คลิปเกจแบบต่างๆ

เนื่องจากคลิปเกจเป็นเครื่องมือวัดที่มีขนาดเล็ก และต้องมีความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงใช้วิธี wire cut EDM เพราะสามารถตัดชิ้นส่วนขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำ และไม่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างบนชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 เลือกชนิดคลิปเกจ

จากผลการศึกษาค้นคว้าข้อมูลของคลิปเกจในขั้นตอนที่ 1 ทำให้ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกคลิปเกจแบบคานคู่ เพราะมีข้อดีหลายประการ คือ มีพิสัยการวัดกว้าง สร้างได้ง่าย และติดสเตรนเกจได้สะดวก

ขั้นตอนที่ 3 เลือกวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ

การเลือกวัสดุที่นำมาสร้างเป็นคลิปเกจ พิจารณาจากวัสดุที่ทำให้คลิปเกจมีความไวสูง และมีพิสัยการวัดกว้าง โดยตัวแปรทั้งสองขึ้นอยู่กับ ความเค้นคราก σ_Y และโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ E โดยต้องมีอัตราส่วนระหว่าง ความเค้นคราก กับโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง

ผลของ $\frac{\sigma_Y}{E}$ สูง ๆ แล้วทำให้ ความไว และพิสัยการวัดของคลิปเกจมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้จาก นิยามของ ความไวคลิปเกจ S คือ อัตราส่วน สัญญาณออก (Output) กับ สัญญาณเข้า (Input) แสดงดังสมการที่ 4.1

$$S = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\varepsilon}{\delta} = \frac{\sigma}{E \cdot \delta} \quad (4.1)$$

โดยที่	ε	คือ ความเครียดของคานคลิปเกจ
	δ	คือ ระยะโก่งของคานคลิปเกจ
	σ	คือ ความเค้นของคานคลิปเกจ
	E	คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

พิจารณาผลคูณของความไว S และระยะโก่งของคานคลิปเกจ δ จากสมการที่ 4.1 ได้

$$S \cdot \delta = \frac{\sigma}{E} \quad (4.2)$$

ซึ่งสามารถอธิบายสมการที่ 4.2 ได้ว่า ความไว S และระยะโก่งของคานคลิปเกจ δ ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความเค้น กับโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือ $\left(\frac{\sigma}{E}\right)$ ซึ่งความเค้นสูงสุดของวัสดุในการใช้งานครั้งนี้ คือ ความเค้นคราก σ_Y

เมื่อระยะโก่งของคานคลิปเกจแปรผันโดยตรง กับพิสัยการวัดของคลิปเกจ ดังนั้นสรุปได้ว่า “ เมื่อวัสดุมีอัตราส่วนของความเค้นคราก กับโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง จะทำให้มี ความไว และพิสัยการวัดมากขึ้น ” ดังนั้นผลคูณของความไว และพิสัยการวัดมากที่สุด จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเค้นคราก และโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ดังสมการ

$$S \cdot \delta = \frac{\sigma_Y}{E} \quad (4.3)$$

จากขบวนการข้างต้น พิจารณาการใช้วัสดุที่นำมาทำคลิปเกจ มีดังนี้คือ

- 1) ไทเทเนียมผสม (Titanium Alloy) Ti – 13V – 11Cr – 3Al มีความเค้นคราก ^[5] เท่ากับ 827.4 MPa และโมดูลัสความยืดหยุ่น^[5] เท่ากับ 103.4 GPa ดังนั้น $S \cdot \delta = \frac{\sigma_Y}{E} = 0.008$
- 2) อลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy) 7075 – T651 มีความเค้นคราก ¹ 461 MPa และ โมดูลัสความยืดหยุ่น 68 GPa ดังนั้น $S \cdot \delta = \frac{\sigma_Y}{E} = 0.0068$

¹ ข้อมูลจากบริษัทผู้นำเข้า, คุณเอกฉัตร กิจพานิชวิเศษ, ที่ปรึกษาการใช้โลหะ, บริษัทไทย – เยอรมันสเปเชียลตีลเซนต์เตอร์ จำกัด 234/40 – 42 หมู่ที่ 6 ถ. สุขสวัสดิ์ 78 ต.ในคลองบางปลากด อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ 10290 โทร. 02 – 8176025 - 9

จะเห็นว่าไทเทเนียมผสมมี อัตราส่วนของความเค้นคราก และโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า อลูมิเนียมผสม 7075 – T651 แต่เนื่องจากไม่มีตัวแทนจำหน่ายภายในประเทศ และอลูมิเนียมผสม 7075 - T651 ข้อดีคือมีน้ำหนักที่เบากว่า จึงทำให้ผู้วิจัย เลือกลงใช้อลูมิเนียมผสม 7075 - T651 เป็นวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ

ขั้นตอนที่ 4 เลือกวงจรถเรนเกจ

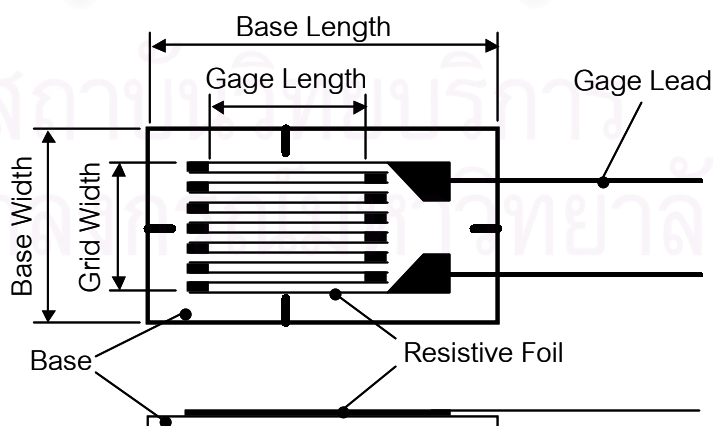
วงจรถเรนเกจที่ใช้เป็นวงจรถเรนเกจ ควรมีลักษณะดังนี้

- 1) มีบริดจ์แพคเตอร์สูง
- 2) สามารถชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้

จากตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบวงจรถเรนเกจแบบต่างๆ จะเห็นว่า วงจรถเรนเกจแบบ เต็มบริดจ์ มีบริดจ์แพคเตอร์ เท่ากับ 4 และสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรถเรนเกจแบบเต็มบริดจ์ ซึ่งลักษณะของการต่อวงจร แสดงอยู่ในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 4.1 วงจรถเรนเกจแบบต่างๆ

วงจรถเรนเกจ	การชดเชยอุณหภูมิ	จำนวนสเตรนเกจ	บริดจ์แพคเตอร์
แบบบริดจ์เดี่ยว	ไม่ชดเชย	1	1
แบบครึ่งบริดจ์	ชดเชย	2	2
แบบเต็มบริดจ์	ชดเชย	4	4



รูปที่ 4.5 สเตรนเกจของบริษัท Kiowa Type KFG – 1 – 120 – C1 – 11

ขั้นตอนที่ 5 เลือกชนิดสเตรนเกจ

การเลือกชนิดสเตรนเกจ เลือกได้จากแค็ตตาล็อกของผู้นำเข้า^[9] ซึ่งมีการพิจารณาคุณสมบัติของคลิปเกจ ดังที่ได้แสดงไปในหัวข้อ 3.3.1 คุณสมบัติของสเตรนเกจ

จากข้อกำหนดทั้งหมด ทำให้เลือกใช้สเตรนเกจ Kyowa Type KFG – 1 – 120 – C1 – 11 แสดงในรูปที่ 4.5 มีขนาดดังนี้

Gage Length	1 mm
Grid Width	1.1 mm
Base Length	4.8 mm
Base Width	2.4 mm
ความต้านทาน	120 Ω
เกจแฟคเตอร์	2.10

ขั้นตอนที่ 6 เลือกสารยึดติดสเตรนเกจ

การพิจารณาเลือกสารยึดติดสเตรนเกจ พิจารณาดังนี้

- 1) สามารถติดสเตรนเกจกับคลิปเกจที่ทำมาจากวัสดุอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651 ได้
- 2) คำนึงถึงอายุการใช้งานของสารยึดติด ต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

จากข้อกำหนดทั้งหมด มีสารยึดติด 2 ชนิด คือ

- 1) สารยึดติด cyano acrylate
- 2) สารยึดติดสเตรนเกจชนิด CC – 33A

จากการสอบถามตัวแทนจำหน่ายในประเทศ² ผู้วิจัยเลือกใช้ สารยึดติดสเตรนเกจของบริษัท Kyowa ชนิด CC – 33A ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า สารยึดติด cyano acrylate และสามารถใช้ได้กับโลหะทุกชนิด

² บริษัทไฟฟ้าอุตสาหกรรม จำกัด 85/2, 85/3 ซอยสดพิษณุวร ถนนรางน้ำ แขวงพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400 โทร. 02 – 642 – 6700



รูปที่ 4.6 สารยึดติดสเตรนเกจชนิด CC – 33A

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ

การจะทราบขนาดของคลิปเกจได้ ต้องพิจารณาถึง วัสดุ ชนิด และขนาดของชิ้นงานทดสอบ รวมทั้งสภาวะทดสอบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงพิสัยการวัด และความไวของคลิปเกจที่ต้องการ การกำหนดหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) กำหนดวัสดุ ชนิด และขนาดชิ้นงานทดสอบ

1.1) กำหนดวัสดุชิ้นงานทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้เลือก ทดสอบวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 T – 651 เนื่องจาก เป็นวัสดุที่มีข้อมูลทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง และกลศาสตร์การแตกหัก ที่สามารถอ้างอิงได้ เก็บรักษาได้ง่ายในสภาวะห้องปกติ และไม่เป็นสนิม

1.2) กำหนดชนิดชิ้นงานทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้เลือก ชิ้นงานทดสอบแบบ CT เนื่องจากเป็นชิ้นงานทดสอบที่ทำการสร้างได้ง่าย และใช้ปริมาณวัสดุที่ใช้ทำน้อย

1.3) กำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบ

การกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบต้องเป็นชิ้นงานทดสอบที่เป็นมาตรฐาน สามารถนำไปอ้างอิงได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชิ้นงานทดสอบโดยยึดมาตรฐาน ASTM B645 ^[2] และ E399 ^[3] โดยจะต้องสามารถใช้ในการทดสอบ ต่อไปนี้ได้

- ก) การวัดคอมเพลกซ์แอนนิตี้
- ข) การวัดความต้านทานการแตกหัก
- ค) การวัดอัตราการใช้ไฮโดรเจนรั่ว

การพิจารณาความหนาของชิ้นงานทดสอบ B จะต้องมีความหนาที่ ASTM B645 ยอมรับ โดยกำหนดว่า ความหนาน้อยที่สุดของวัสดุอลูมิเนียมผสม กรณีที่เป็นความเครียดระนาบ ต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$B \geq 5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (4.4)$$

โดยที่ K_{IC} คือ ความต้านทานการแตกหักในสถานะความเครียดระนาบ
 σ_Y คือ ความเค้นครากของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

จะเห็นว่าการกำหนดชิ้นงานทดสอบ จะต้องประมาณความต้านทานการแตกหัก และความเค้นครากของอลูมิเนียมผสม 7075 - T651 ล่วงหน้า สำหรับค่าความต้านทานการแตกหัก สามารถประมาณได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข [12]

$$K_{IC} = 29 \text{ MPa}\sqrt{m}^{[12]}$$

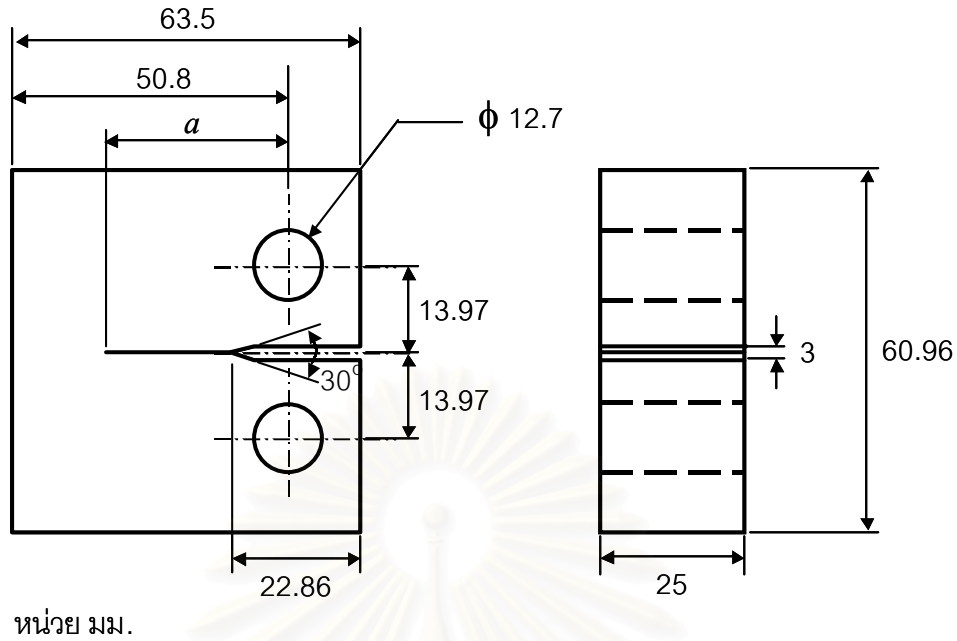
$$\sigma_Y = 461 \text{ MPa}^3$$

ความหนาชิ้นงานทดสอบ B (ในกรณีที่เป็นความเครียดระนาบ) ได้จากการนำ ค่าของความต้านทานการแตกหัก K_{IC} และความเค้นคราก σ_Y แทนค่าในสมการที่ 4.4 ได้ความหนาของชิ้นงานทดสอบ คือ

$$B \geq 19.8 \text{ mm}$$

โดยขนาดชิ้นงานทดสอบที่นิยมใช้มีความหนา $B = 0.5", 1"$ ดังนั้น จึงเลือกขนาดความหนา $B = 1"$ หรือประมาณ 25 mm ซึ่งขนาดมิติต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ จะมีความสัมพันธ์กัน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ยึดตามมาตรฐาน ASTM E399^[3] จะได้ขนาดชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

³ ข้อมูลจากบริษัทผู้นำเข้า, คุณเอกฉัตร กิจพานิชวิเศษ, ที่ปรึกษาการใช้โลหะ, บริษัทไทย – เยอรมันสเปเชียลสตีลเซนเตอร์ จำกัด 234/40 – 42 หมู่ที่ 6 ถ. สุขสวัสดิ์ 78 ต.ในคลองบางปลากด อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ 10290 โทร. 02 – 8176025 - 9

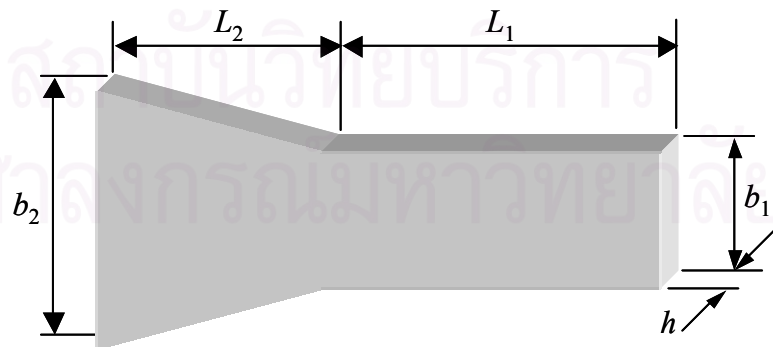


รูปที่ 4.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

เมื่อได้ขนาดมิติชิ้นงานทดสอบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบรูปร่างของคลิปเกจ โดยกำหนดขอบเขตที่ใช้ เพื่อคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ

2) กำหนดขอบเขตเพื่อการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ⁴

คลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มีขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 4.8 มิติของคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู

⁴ การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจอย่างละเอียด แสดงในภาคผนวก ข

ขอบเขตความเค้นครากของวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ $6 \cdot \frac{P_{\max} \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \leq \sigma_{allow}$ (4.5)

ขอบเขตความไวของคลิปเกจ $S \geq 5.63 \times 10^{-4} \frac{1}{mm}$ (4.6)

ขอบเขตพิสัยการวัด $Range \geq 4 \cdot mm$ (4.7)

ขอบเขตเนื่องจากความล้าของคานคลิปเกจ

$$\frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \leq \sigma_{er} \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\sigma_u \cdot b_1 \cdot h^2} \right] \quad (4.8)$$

ขอบเขตเนื่องจากความล้าของสเตรนเกจ

$$\frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{E \cdot b_1 \cdot h^2} \leq \varepsilon_{erC} \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\varepsilon_{uC} \cdot E \cdot b_1 \cdot h^2} \right] \quad (4.9)$$

ขอบเขตเกี่ยวกับมิติของคลิปเกจ

$$8 \text{ mm} \leq b_1 \leq 25 \text{ mm} \quad (4.10ก)$$

$$1 \text{ mm} \leq h \leq 1.5 \text{ mm} \quad (4.10ข)$$

$$20 \text{ mm} \leq L_1 \quad (4.10ค)$$

$$13 \text{ mm} \leq L_2 \quad (4.10ง)$$

$$\frac{L_1}{L_2} \geq 1.5 \quad (4.10จ)$$

โดยที่

P_{\max} คือ แรงบีบมากที่สุด

P_{\min} คือ แรงน้อยที่สุดในการใช้ยึดคลิปเกจกับชิ้นงาน

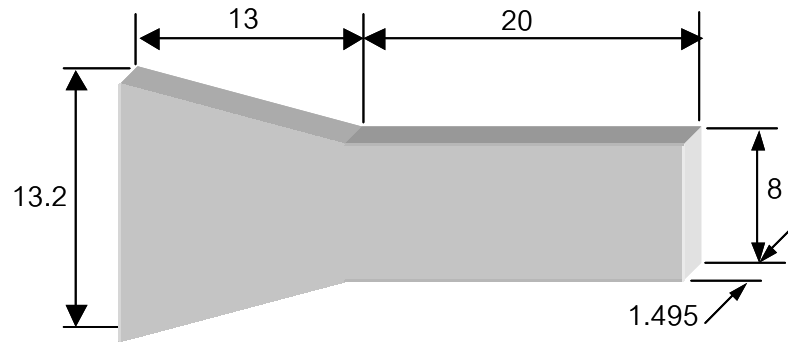
σ_{all} คือ ความเค้นที่ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นคราก

σ_{er} คือ endurance limit ที่ $\sigma_m = 0$ ของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

σ_U คือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

ε_{erC} คือ endurance limit ที่ $\sigma_m = 0$ ของสเตรนเกจ

ε_{UC} คือ ความเครียดสูงสุดของสเตรนเกจ



รูปที่ 4.9 ขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู

3) คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ⁵

กำหนดให้คลิปเกจมีค่าความไวสูงสุด และกำหนดขอบเขตต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จากนั้นคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดจากโปรแกรมสำเร็จรูป MathCad จะได้มิติของคลิปเกจแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ดังนี้

$$b_1 = 8 \text{ mm}$$

$$b_2 = 13.2 \text{ mm}$$

$$L_1 = 20 \text{ mm}$$

$$L_2 = 13 \text{ mm}$$

$$h = 1.495 \text{ mm}$$

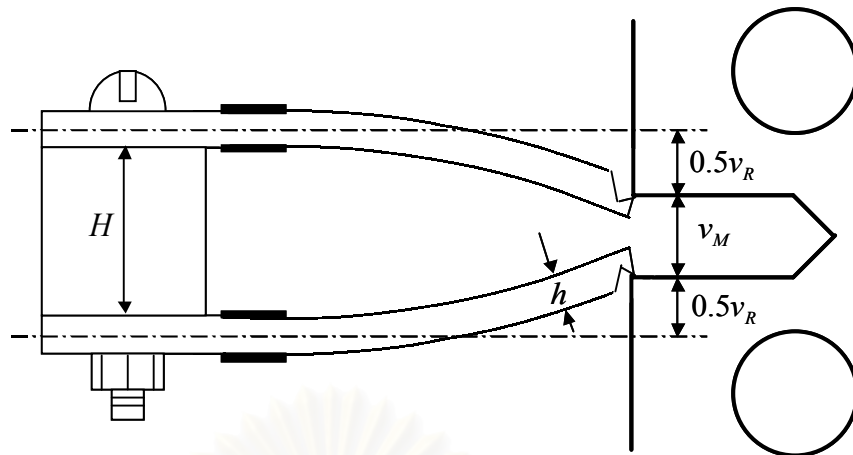
ดังแสดงในรูปที่ 4.9

จากการคำนวณหาขนาดคลิปเกจที่เหมาะสม สามารถคำนวณความไว และพิสัยการวัดได้ ดังนี้

ความไว S คือ $7.82 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}}$

พิสัยการวัด $Range$ คือ 4 mm

⁵ การคำนวณอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.10 การคำนวณหาความสูงของ spacer block

4) คำนวณหาความสูงของ spacer block

ความสูงของ spacer block H จะขึ้นอยู่กับ ความหนาของคานคลิปเกจ h ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าวกรณีที่ไม่มีภาวะ v_M และพิสัยการวัดของคลิปเกจ v_R ดังรูปที่ 4.10 สามารถคำนวณหาความสูงของ spacer block ได้จากสมการที่ 4.11

$$H = v_M + 0.5v_R + 0.5v_R - 0.5h - 0.5h \quad (4.11)$$

โดยที่ ในวิทยานิพนธ์นี้

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าวของชิ้นงานทดสอบกรณีที่ไม่มีภาวะ $v_M = 3 \text{ mm}$

พิสัยการวัดของคลิปเกจ $v_R = 4 \text{ mm}$

ความหนาของคานคลิปเกจ $h = 1.495 \text{ mm}$

ดังนั้นจะได้ ความสูงของ spacer block คือ

$$H = 5.51 \text{ mm}$$

แบบรายละเอียดของ spacer block จะแสดงในภาคผนวกรูปที่ ช.5

5) กำหนดขนาดแผ่นป้องกันสเตรนเกจ

เนื่องจากส่วนนี้ไม่ได้รับแรง จึงพิจารณาในด้านการจับคลิปเกจอย่างสะดวก สามารถปกคลุมสเตรนเกจได้ทั้งหมด และมีขนาดไม่ใหญ่มากเกินไป แบบรายละเอียดของแผ่นป้องกันสเตรนเกจ แสดงในรูปที่ ช.4

ขั้นตอนที่ 8 เขียนแบบประกอบ และแบบรายละเอียด

ขั้นตอนนี้เป็นการเขียนแบบประกอบ และแบบรายละเอียดของคลิปเกจ เพื่อให้ช่างฝีมือสร้าง

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการสร้าง

ขั้นตอนนี้เป็นการนำแบบที่ได้จากการเขียนแบบขั้นตอนที่ 8 ไปปรึกษาช่างฝีมือ ถึงความเป็นไปได้ในการสร้าง โดยจะมีการแก้ไขแบบพร้อมส่งการผลิต

ขั้นตอนที่ 10 ส่งผลิต

เมื่อตกลงกับช่างฝีมือในการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการสร้างแล้ว จึงส่งแบบชิ้นส่วนให้ช่างฝีมือเพื่อทำการผลิต ผู้วิจัยเลือกทำชิ้นงานที่สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (MIDI)⁶ ซึ่งผลของแบบประกอบ และแบบรายละเอียด แสดงในภาคผนวก ข

ขั้นตอนที่ 11 ประเมินคุณภาพการสร้าง

จากการที่ได้ประกอบชิ้นส่วน และวัดขนาดอย่างละเอียดชิ้นส่วนต่างๆ ของคลิปเกจ แสดงในรูปที่ ๓.2

ขั้นตอนที่ 12 ติดสเตรนเกจ

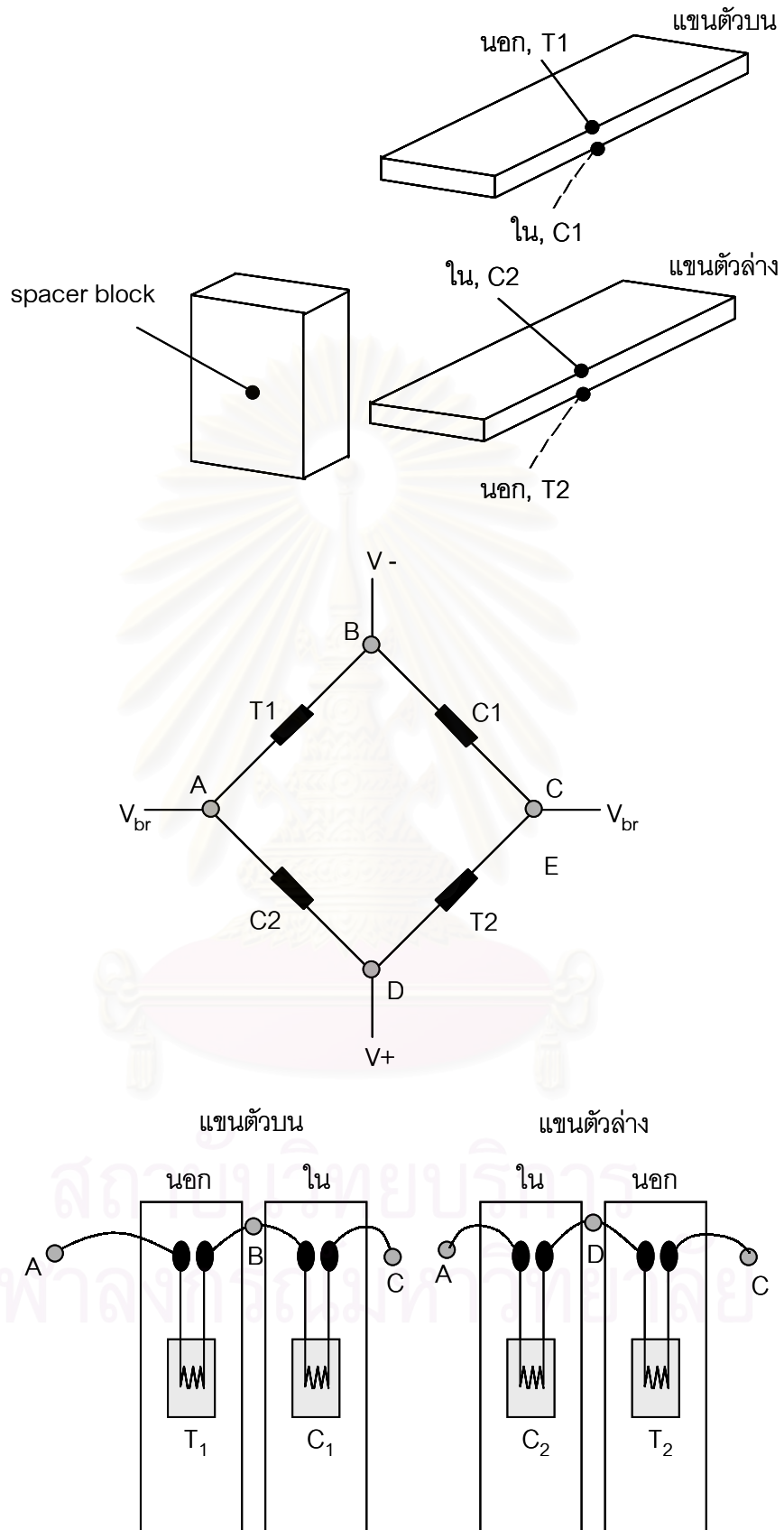
ขั้นตอนการติดสเตรนเกจ แสดงในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อทำการติดสเตรนเกจ และแผ่นพักสายแล้ว จึงทำการต่อวงจรคลิปเกจ

ขั้นตอนที่ 13 ต่อวงจรคลิปเกจ

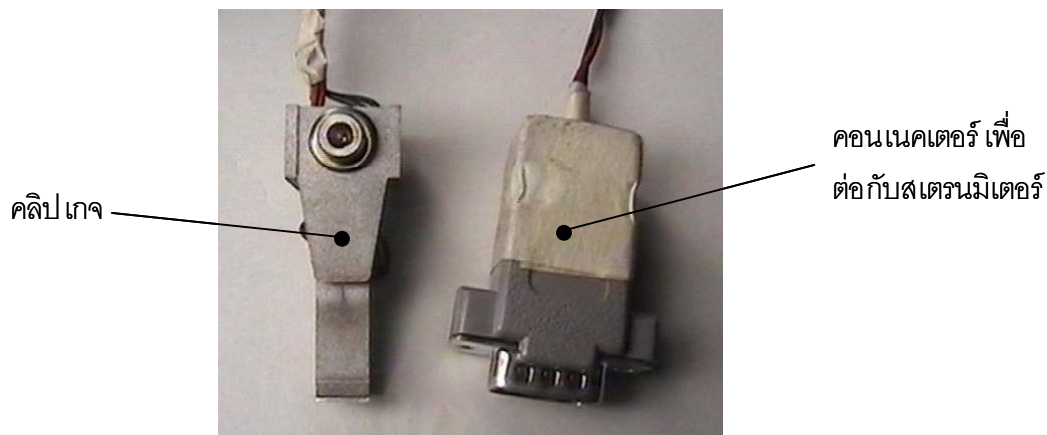
วิธีการต่อวงจรคลิปเกจ ซึ่งเป็นวงจรสเตรนเกจแบบเต็มบริดจ์ มีวิธีการดังรูปที่ 4.11

6

ชอยตรีมิตร ถนน พระราม 4 คลองเตย กรุงเทพฯ 10110



รูปที่ 4.11 การต่อวงจรสเตรนเกจแบบเต็มบริดจ์

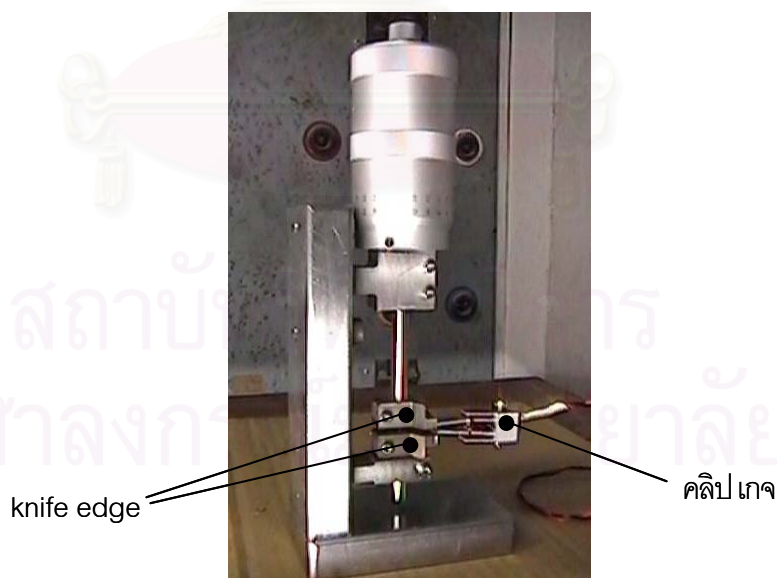


รูปที่ 4.12 คลิปเกจพร้อมทำการสอบเทียบ

เมื่อต่อวงจรเรียบร้อยแล้วจะได้คลิปเกจแสดงในรูปที่ 4.12 ขั้นตอนต่อไปเป็นการสอบเทียบคลิปเกจ กับเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนที่ 14 สอบเทียบคลิปเกจ

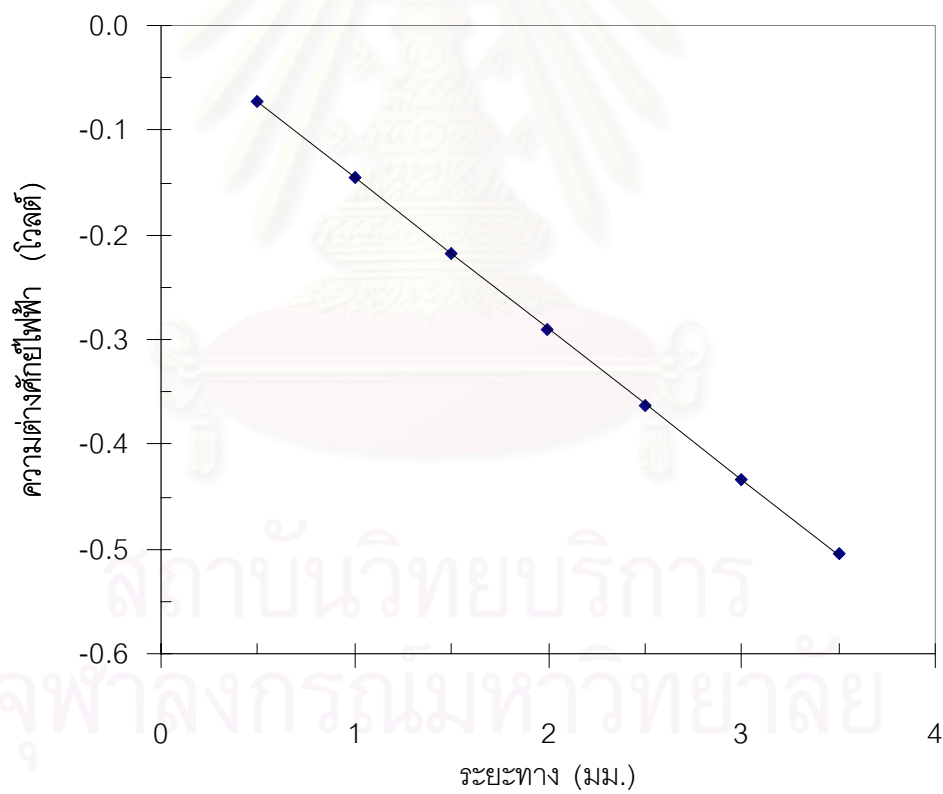
คลิปเกจที่ได้นำไปสอบเทียบ (calibrate) กับเครื่องมือสอบเทียบ โดยติดตั้งคลิปเกจกับ knife edge ของเครื่องมือสอบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ผลการสอบเทียบจะได้นี้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 การติดตั้งคลิปเกจกับ knife edge

ตารางที่ 4.2 ผลการสอบเทียบคลิบเกจ

ระยะทาง (มม.)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
0.4998	-0.073
0.9997	-0.146
1.4995	-0.218
1.9993	-0.291
2.4991	-0.363
2.9990	-0.434
3.4988	-0.505



รูปที่ 4.14 กราฟสอบเทียบคลิบเกจ

4.5 ผลการออกแบบ และการสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

จากการที่ได้ปฏิบัติตามขั้นตอนการออกแบบ และสร้างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ ได้ผลการออกแบบ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหลักคลิปเกจ

คลิปเกจที่สร้างขึ้นจะติดตั้งกับเครื่องมือสอบเทียบโดยใช้ knife edge ดังนั้นเครื่องมือสอบเทียบจึงต้องมีพิสัยการวัด มากกว่าพิสัยการวัดของคลิปเกจ ในที่นี้กำหนดเผื่อไว้ที่ 50 มม. โดยประมาณ

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบวิธีสอบเทียบ

วิธีสอบเทียบที่เลือกใช้เป็นวิธีทางกล โดยวิธีนี้มีข้อดี เนื่องจากมีราคาถูก และมีความซับซ้อนน้อย หลักการทำงานก็คือ จะมีก้านที่เลื่อนปรับระยะได้ และก้านที่ตรึงอยู่กับที่ บนก้านทั้งสองจะมี knife edge เพื่อติดตั้งคลิปเกจ วิธีนี้จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนตัวของคลิปเกจ กับความเครียดได้ ดังรูปที่ 4.15

การสอบเทียบของเครื่องมือสอบเทียบใช้เกจบล็อก โดยเกจบล็อกที่ใช้สอบเทียบมีรายละเอียด ดังนี้

Mitutoyo Gage Block Set

Code. No. 516 – 959

Set No. BM1 – 47 – 1

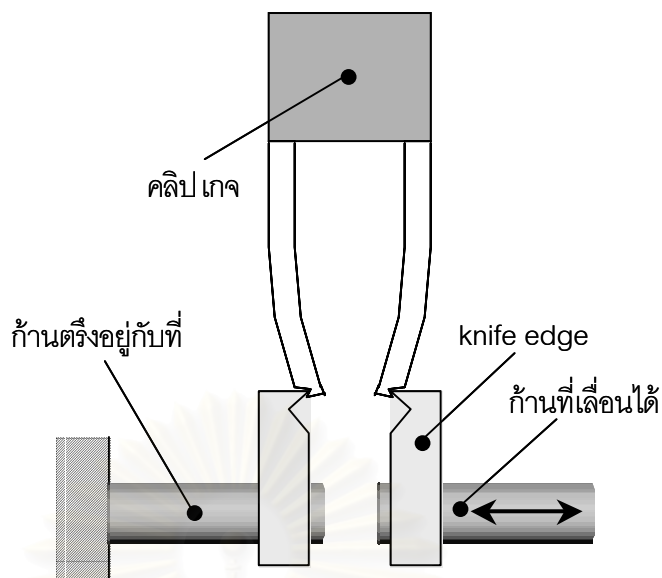
Grade 1

Serial No. 011256

การเลือกด้ามไมโครมิเตอร์ (micrometer head) พิจารณาดังนี้

1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ามไมโครมิเตอร์

การเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ามไมโครมิเตอร์ ควรเลือกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ เพื่อให้การหมุนปรับระยะ และการอ่านสเกลทำได้สะดวก และแม่นยำ



รูปที่ 4.15 วิธีสอบเทียบคลิปเกจ

2) พิสัยการวัด

การเลือกพิสัยการวัด ต้องเลือกพิสัยการวัดที่ได้เพียงพอที่จะทำการสอบเทียบคลิปเกจ โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีพิสัยไม่ต่ำกว่า 50 มม.

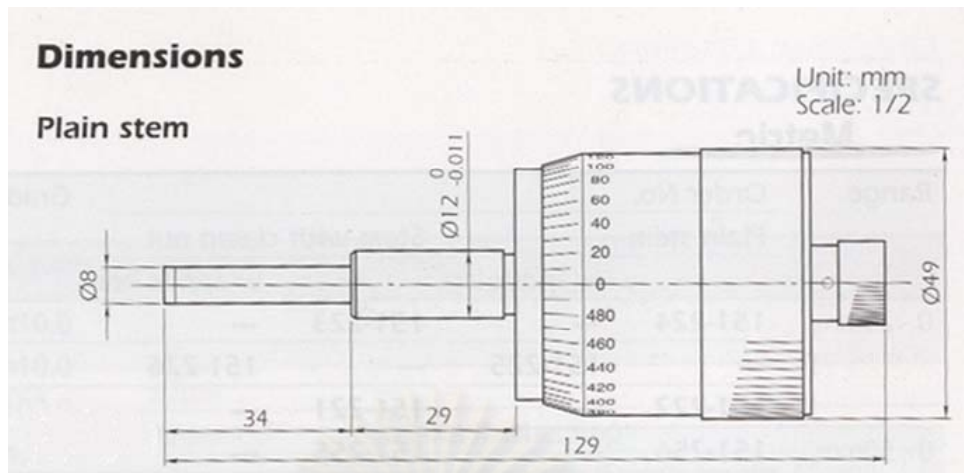
3) วิธีจับยึดด้ามไมโครมิเตอร์

เนื่องจากไมโครมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดละเอียด การจับยึดด้ามไมโครมิเตอร์ต้องเป็นการจับยึดที่แน่น ไม่มีการเคลื่อนไหว เพราะจะทำให้การวัดระยะคลาดเคลื่อนได้ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีแบบรัด (clamp)

4) ความแม่นยำ

เลือกด้ามไมโครมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อให้เครื่องมือสอบเทียบมีความคลาดเคลื่อนน้อย ทำให้ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกด้ามไมโครมิเตอร์ของ Mitutoyo รุ่น 152-380 แสดงมิติ ดังรูปที่ 4.16

- 1) มีพิสัยการวัด 0 ~ 50 มม.
- 2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมือหมุน 49 มม.
- 3) ความละเอียด 0.002 มม.
- 4) ความแม่นยำ ± 4 ไมครอน



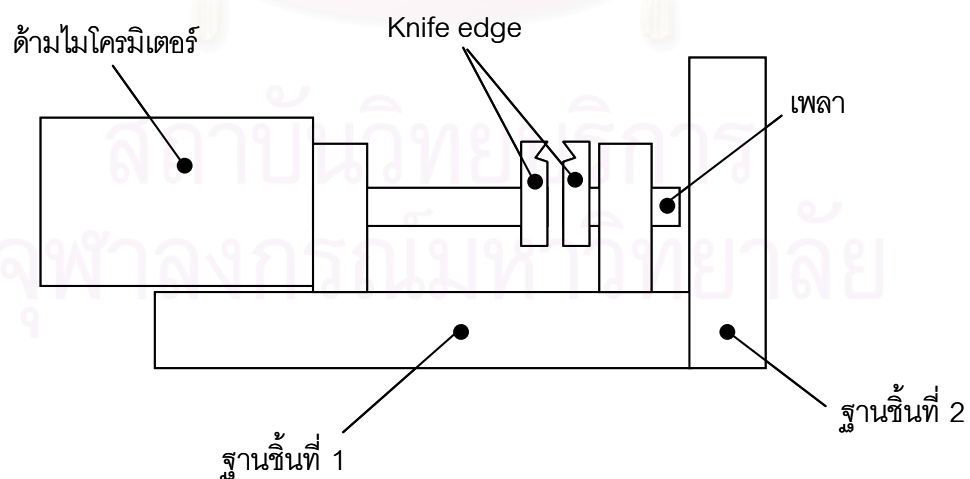
รูปที่ 4.16 ด้ามไมโครมิเตอร์ รุ่น 152 – 380

ขั้นตอนที่ 3 เลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือสอบเทียบ

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือสอบเทียบ ต้องเป็นวัสดุที่ไม่เป็นสนิม เพื่อให้เก็บรักษาได้ง่าย ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ วัสดุสแตนเลส 316

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขนาดเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนนี้ คือการร่างแบบของเครื่องมือสอบเทียบ เพื่อแสดงแนวคิดว่าชิ้นส่วนจะประกอบกันอย่างไรให้สอดคล้องกัน เครื่องมือจะทำงานอย่างไรโดยไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งที่ทำงานไม่ได้หรือติดขัดซึ่งแบบร่าง แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.17 แบบร่างเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

ขั้นตอนที่ 5 เขียนแบบ

แบบประกอบ และแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องมือสอบเทียบจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ข ของวิทยานิพนธ์นี้

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาความเป็นไปได้ในการสร้าง

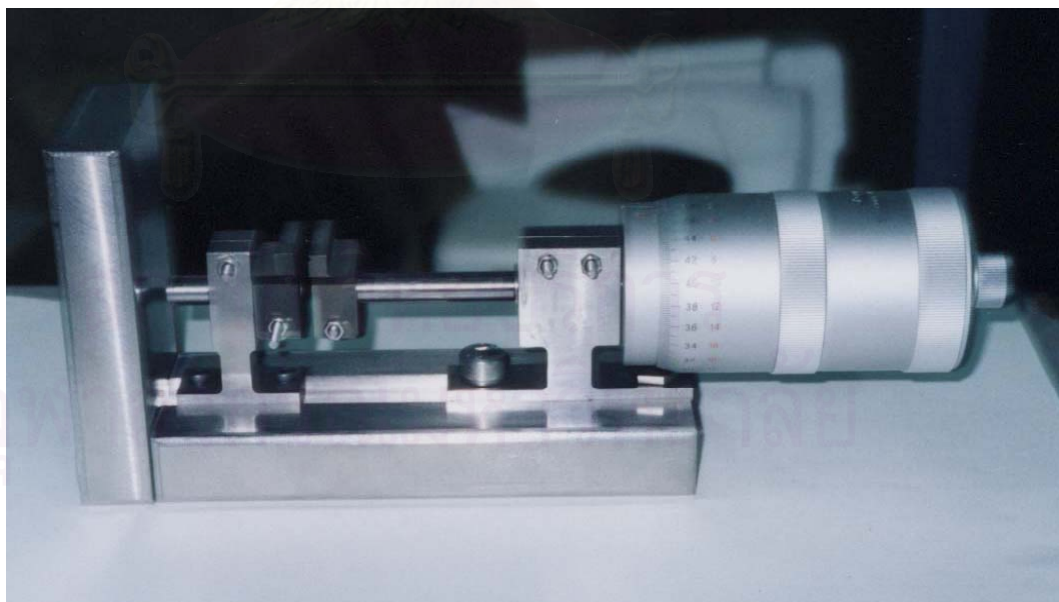
ในที่นี้ได้นำเสนอแบบที่แก้ไขเรียบร้อยแล้ว จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูป จากช่างฝีมือ

ขั้นตอนที่ 7 ส่งช่างฝีมือเพื่อทำการสร้าง

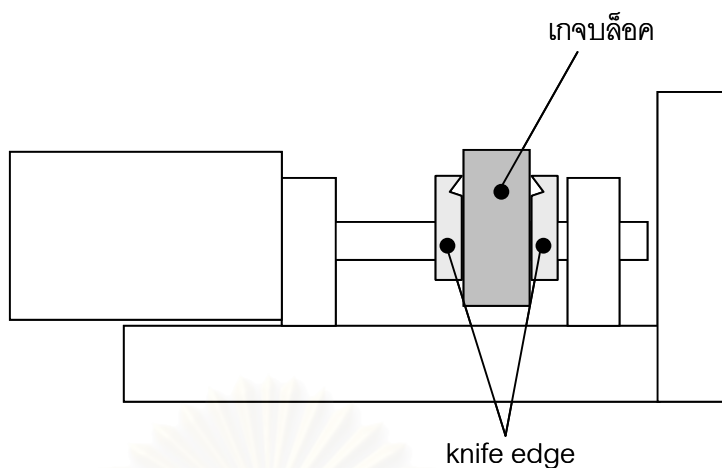
ขั้นตอนนี้จะให้ช่างฝีมือทำการสร้างชิ้นส่วน โดยที่ได้ให้ช่างที่กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (MIDI) ทำการสร้าง โดยต้องไปตกลงเรื่องแบบของชิ้นส่วนต่างๆ พิสูจน์ความเผื่อ คุณภาพของผิว ซึ่งได้ทำการกำหนดไว้ในแบบเรียบร้อยแล้ว

ขั้นตอนที่ 8 ประกอบชิ้นส่วนเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนนี้จะทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเป็นเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ (รูปที่ 4.18) หลังจากนั้นทำการสอบเทียบด้วยเกจบล็อก



รูปที่ 4.18 เครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ



รูปที่ 4.19 การสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

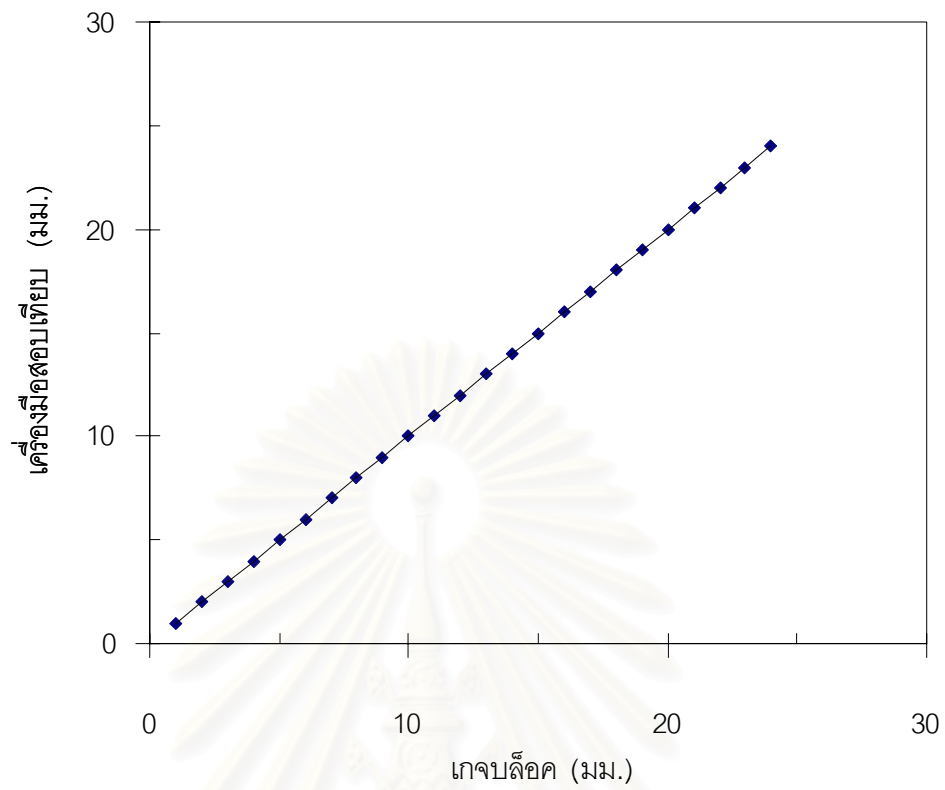
ขั้นตอนที่ 9 สอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบ

ขั้นตอนนี้ จะนำเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจมาสอบเทียบกับเกจบลิ๊อค โดยจะวัดความสัมพันธ์ระหว่างระยะของไมโครมิเตอร์ ต่อระยะเกจบลิ๊อค ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ มีดังนี้

- 1) ประกอบชิ้นส่วนของเครื่องมือสอบเทียบ
- 2) วางเกจบลิ๊อคระหว่างเพลลา ที่ knife edge ยึดอยู่
- 3) หมุนไมโครมิเตอร์จนกระทั่งปลายทั้งสองของเพลลาแนบกับเกจบลิ๊อค แล้วบันทึกระยะที่อ่านได้ที่ตามไมโครมิเตอร์
- 4) เอาเกจบลิ๊อคออก แล้วนำเกจบลิ๊อคขนาดอื่นใส่แทน
- 5) ทำข้อ 3-4 ซ้ำจนกระทั่งได้ข้อมูลตามจำนวนที่ต้องการ
- 6) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะสัมพันธ์ที่อ่านได้จากไมโครมิเตอร์ กับขนาดสัมพันธ์ของเกจบลิ๊อค

ผลของการสอบเทียบ แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานคลิปปอกและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการประยุกต์ใช้งานคลิปปอกกับการทดสอบการแตกหัก ซึ่งประกอบด้วย การหาคอมพลายแอนซ์ อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า และความต้านทานการแตกหัก โดยทดสอบจากชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว ที่ทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 และกล่าวถึงรายละเอียดของ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ สภาวะทดสอบ ในการทดสอบแต่ละประเภท สุดท้ายจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการใช้งาน

5.1 ประเภทของการทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบคลิปปอกกับการทดสอบทางด้านกลศาสตร์การแตกหัก โดยประกอบไปด้วย

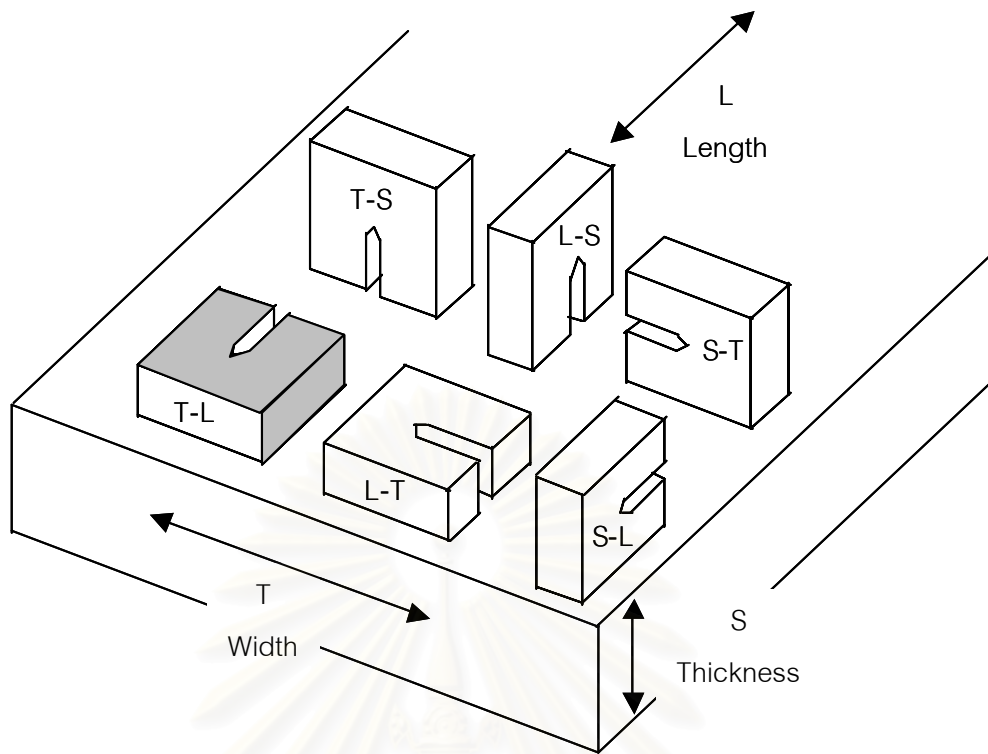
- 1) การทดสอบหาคอมพลายแอนซ์
- 2) การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก
- 3) การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

5.2 รายละเอียดทั่วไปของการทดสอบ

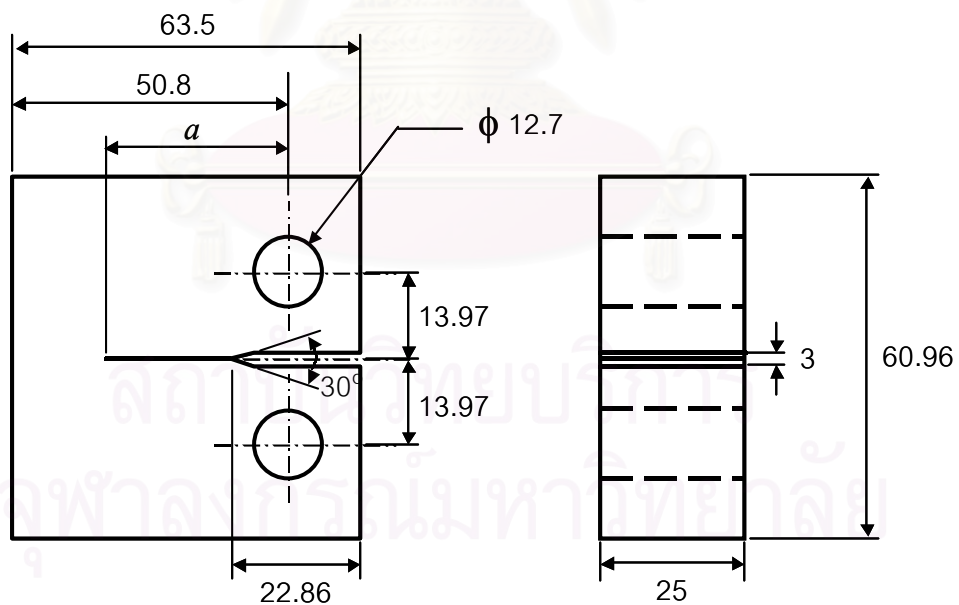
การทดสอบต้องมีการกำหนดค่าต่างๆ เช่น ทิศทางการวางตัวของวัสดุ ขนาดของชิ้นงานทดสอบ และภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้มีมาตรฐานในการทดสอบที่ตรงกัน และเป็นที่ยอมรับ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบคลิปปอกกับการทดลอง โดยยึดตามมาตรฐานของ ASTM B645^[2], E399^[3] และ E647^[4] โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.2.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบทำมาจากอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 ทิศทางการวางตัวในลักษณะ T - L ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การวางตัวของชิ้นงานทดสอบแบบ T-L



หน่วย มม.

รูปที่ 5.2 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานแบบ Compact Tension (CT Specimen)

5.2.2 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบยึดตามมาตรฐาน ASTM B645 และ E399 โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว ดังรูปที่ 5.2

5.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย

1) เครื่อง Hydraulic servo testing machine

เครื่องทดสอบที่ใช้เป็นของบริษัท Saginomiya ส่วนควบคุม (controller) รุ่น 2405 มีความสามารถในการสร้างภาระสูงสุดเท่ากับ 30 ตัน เครื่องทดสอบนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1.1) ส่วนควบคุมหลัก (main controller) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ทำหน้าที่ควบคุมสถานะทดสอบ ได้แก่ ขนาดของภาระเฉื่อย ขนาดของแอมพลิจูดภาระ ความถี่ รูปแบบของคลื่นภาระ และจำนวนรอบของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ



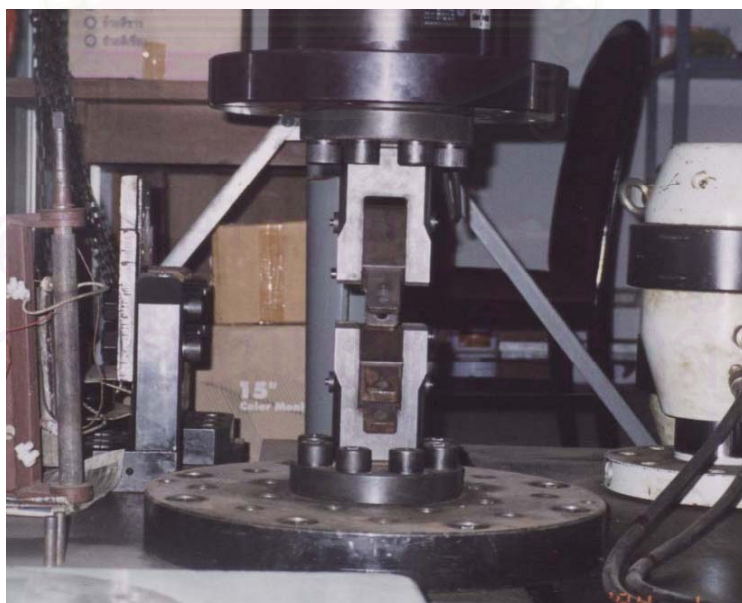
รูปที่ 5.3 ส่วนควบคุมหลัก



รูปที่ 5.4 ชุดไฮดรอลิก

1.2) ชุดไฮดรอลิก (hydraulic unit) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ทำหน้าที่สร้างความดันให้กับระบบ เพื่อให้ในการสร้างภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ

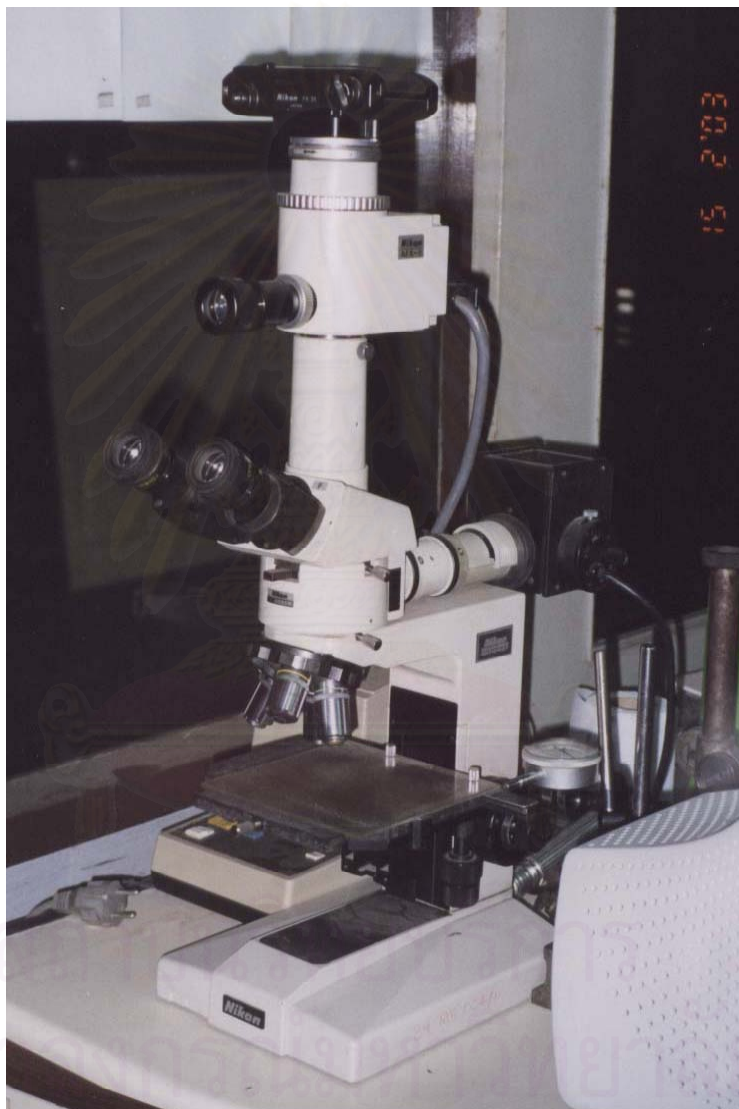
1.3) actuator และ grip device ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ทำหน้าที่ปรับระยะระหว่าง grip จับชิ้นงานทดสอบบนและล่าง และทำหน้าที่ยึดจับชิ้นงาน



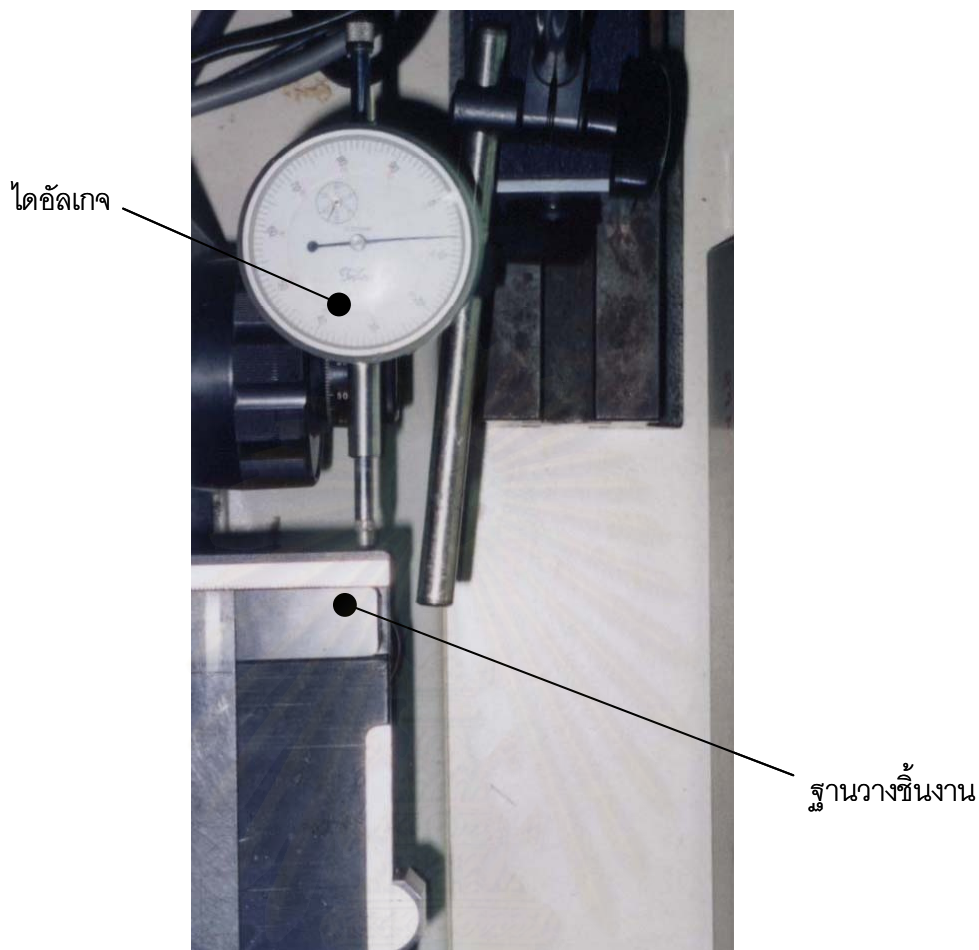
รูปที่ 5.5 actuator และ grip device

2) กล้องไมโครสโคป

กล้องไมโครสโคปที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นของบริษัท Nikon รุ่น AFX – II ดังแสดงในรูปที่ 5.6 มีอัตราขยายเท่ากับ 100, 200, 400, และ 1000 เท่า กล้องไมโครสโคปจะถูกนำมาดัดแปลงเพื่อใช้สำหรับวัดความยาวรอยร้าว โดยติดตั้งไดอัลเกจกับฐานวางชิ้นงานดังรูปที่ 5.7 ไดอัลเกจที่ใช้มีพิสัยการวัด 30 มม. ความละเอียด 0.01 มม.



รูปที่ 5.6 กล้องไมโครสโคป



รูปที่ 5.7 การติดตั้งไดอัลเกจกับฐานวางชิ้นงานของกล้องไมโครสโคป

3) การ์ดเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D card)

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อก ให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัลเพื่อบันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์ การ์ดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของ บริษัท ADVANTECH รุ่น PCL – 818L โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต (port) ISA ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้^[1]

- ความละเอียด : 12 bits
- พิสัยขาเข้า (กระแสตรง) : $\pm 0.625, \pm 1.25, \pm 2.50, 5.0, \pm 10$ โวลต์
- อัตราเร็วในการแปลง : สูงสุด 40 kHz
- ความเที่ยงตรง : ± 0.01 เปอร์เซ็นต์



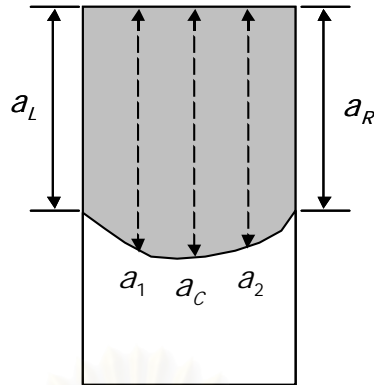
รูปที่ 5.8 สเตรนมิเตอร์

4) สเตรนมิเตอร์ (strain meter)

ทำหน้าที่จ่ายไฟ และรับสัญญาณไฟฟ้าจากรสเตรนเกจ พร้อมทั้งแสดงผลความเครียดออกทางหน้าจอเป็นหน่วยไมโครสเตรน และขยายสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของวงจรสเตรนเกจ ส่งไปยังการ์ดเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อทำการเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ สเตรนมิเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นของบริษัท TecQuipment Ltd 1999^[15] รุ่น E10 MKII แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.9 คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูล



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งการวัดความยาวรอยร้าว (เมื่อมองทิศตั้งฉากกับผิวหน้ารอยร้าว)

5) คอมพิวเตอร์

ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ผ่านทางการแปลงข้อมูลแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดยต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต ISA คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 5.9

5.3 การประยุกต์คลิปเกจเพื่อหาคอมพลายแอนซ์

วิทยานิพนธ์นี้ทำการเปรียบเทียบคอมพลายแอนซ์ จากการทดลองกับ ASTM E399 โดยใช้ नियามการวัดความยาวรอยร้าว 2 แบบ (รูปที่ 5.10) ดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_S ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$a_S = \frac{a_R + a_L}{2} \quad (5.1)$$

2. ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ¹ ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$a_{avg} = \frac{a_1 + a_2 + a_c}{3} \quad (5.2)$$

5.3.1 สภาวะทดสอบ

ทำการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้น แต่ละชิ้นมีความยาวรอยร้าวดังตารางที่ 5.1 โดยที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิห้อง สภาวะไม่กักความร้อน

¹ ได้จากการตั้งชิ้นงานจนขาด แล้วจึงทำการวัดความยาวที่จุด a_1 , a_2 และ a_3 ดังรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_S ของชิ้นงานทดสอบ

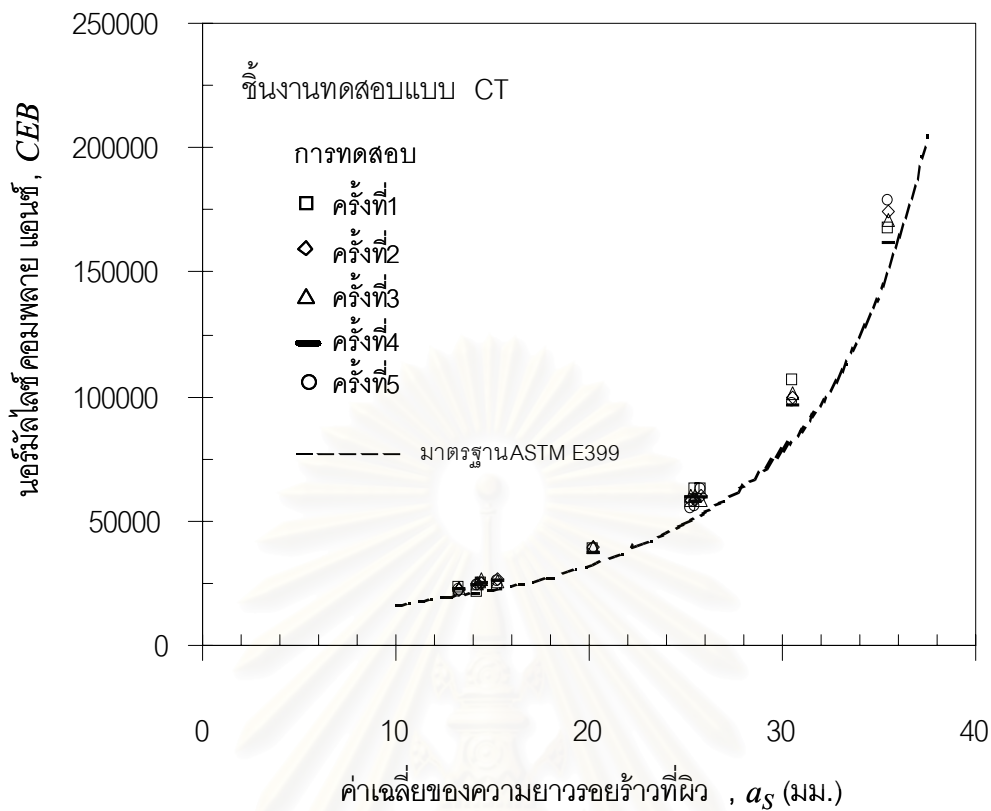
ชั้นที่	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว, a_S (mm)
1	13.27
2	14.23
3	14.46
4	15.24
5	20.24
6	25.29
7	25.52
8	25.79
9	30.77
10	35.47

5.3.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเพื่อหาคอมพลายแอนซ์ ของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 แสดงอยู่ในรูปที่ 5.11 จากรูป แกนตั้งคือ นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ (normalized compliance), ซึ่งอยู่ในรูปของ $C \cdot E \cdot B$ โดย E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น และ B คือ ความหนา สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ มีค่า E เท่ากับ 68 GPa และมีค่า B เท่ากับ 25 mm ส่วนแกนนอนคือความยาวรอยร้าวที่ผิว

5.3.3 การวิเคราะห์ผล

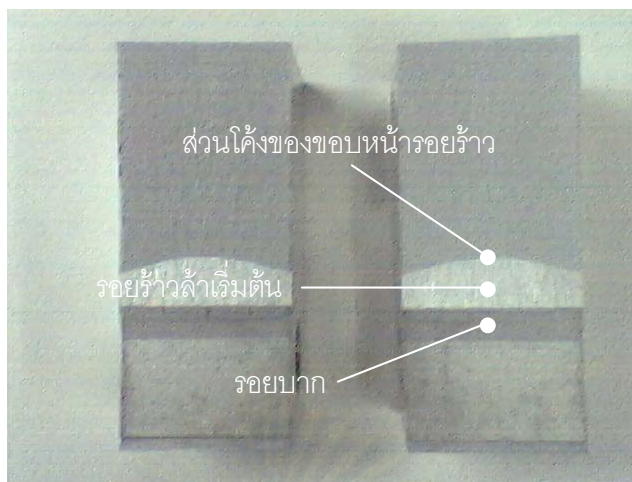
จากรูปที่ 5.11 เปรียบเทียบนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ของการทดลอง และผลเฉลยมาตรฐาน ASTM E399 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิวต่าง ๆ กันจำนวน 10 ชั้น และแต่ละชั้นทำการทดลองทั้งสิ้น 5 ครั้ง โดยใช้การประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลัง 5 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_S มากขึ้น จะมีผลทำให้ นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์มีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลเฉลยของ ASTM E399



รูปที่ 5.11 นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ที่ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิวต่าง ๆ เทียบกับผลเฉลยในมาตรฐาน ASTM E399

โดยที่ความแตกต่างของผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยของ ASTM E399 จาก รูปที่ 5.11 ไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดของคลิบเกจในการวัดระยะเคลือ่อนตัว แต่เกิดจากความแตกต่างของนิยามความยาวรอยร้าวที่ใช้ในรูปที่ 5.11 กับนิยามของความยาวรอยร้าวของมาตรฐาน ASTM (สมการที่ 5.2) สาเหตุที่ ASTM นิยามเช่นนี้ก็เพื่อชดเชยความโค้งงอของขอบหน้ารอยร้าว (รูปที่ 5.12)

เพื่อตรวจสอบว่าความแตกต่างเกิดจากสาเหตุที่กล่าวข้างต้นหรือไม่ จึงตั้งขี้นงานให้ขาด เพื่อให้สามารถวัดความยาวรอยร้าวตรงกึ่งกลางความหนา a_c (รูปที่ 5.10) ได้ โดยตารางที่ 5.2 แสดงค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s และค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}



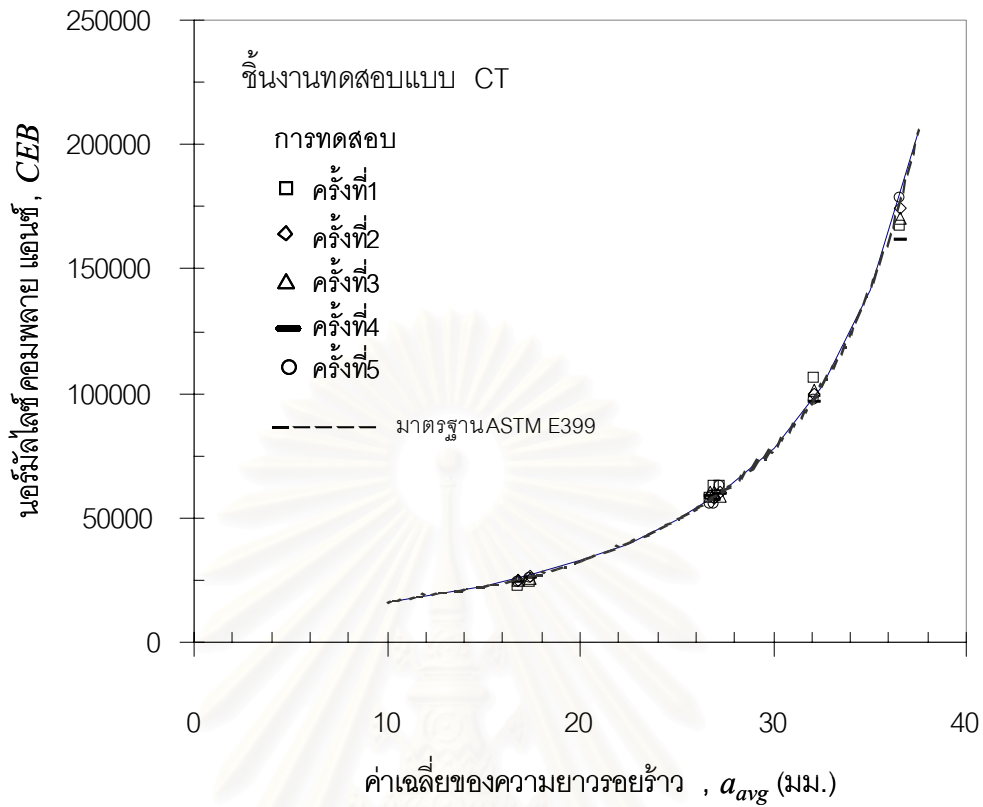
รูปที่ 5.12 ส่วนโค้งของขอบหน้ารอยร้าว (มองตั้งฉากผิวหน้ารอยร้าว)

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s
และค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}

ชั้นที่	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว, a_s (mm)	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว*, a_{avg} (mm)
1	13.27	-**
2	15.23	16.79
3	14.46	-**
4	15.24	17.41
5	20.24	-**
6	25.29	26.79
7	25.52	26.93
8	25.79	27.25
9	30.77	32.17
10	35.47	36.53

* คือ นิยามความยาวรอยร้าว ตามมาตรฐาน ASTM สำหรับในการหาคอมพลาเยนซ์

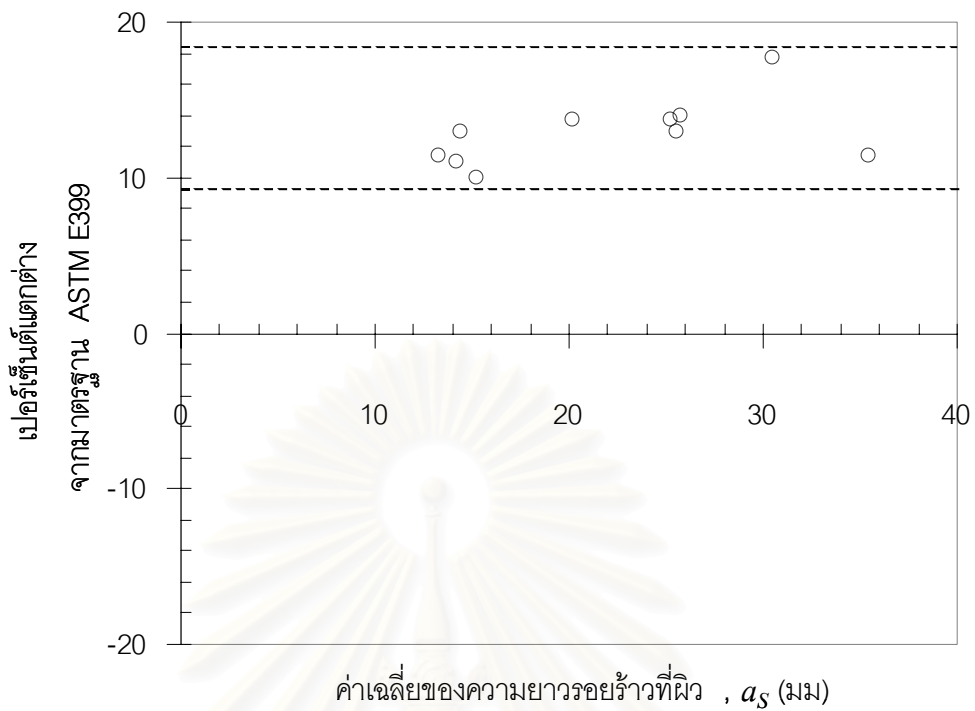
** ชั้นงานไม่ได้ถูกดึงจนขาด



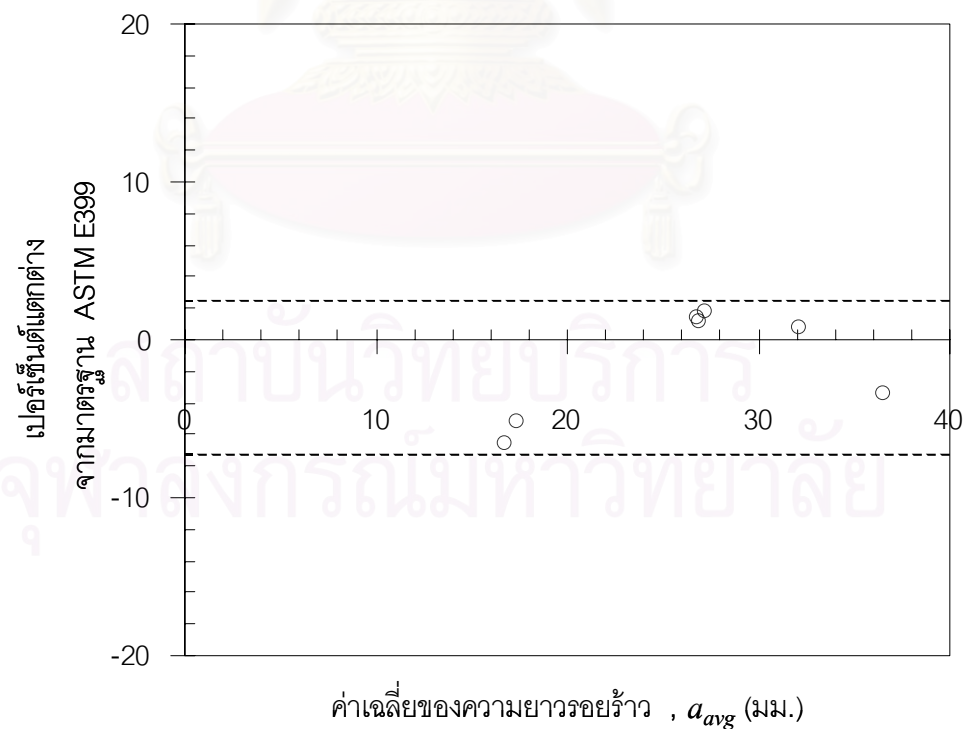
รูปที่ 5.13 นอร์มัลไลซ์คอมเพลกซ์แอนน์ที่ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ต่าง ๆ เทียบกับผลเฉลยมาตรฐาน ASTM E399

ความสัมพันธ์ของนอร์มัลไลซ์คอมเพลกซ์แอนน์ และค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} แสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อพล็อตค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ในชิ้นงานทดสอบ ร่วมกับนอร์มัลไลซ์คอมเพลกซ์แอนน์แล้ว ผลการทดสอบมีความแตกต่างจากมาตรฐาน ASTM ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไปแล้ว

รูปที่ 5.14 และ 5.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการหาคอมเพลกซ์แอนน์เทียบกับผลเฉลยของสมการ ASTM E399 ในกรณีที่นิยามความยาวรอยร้าวว่าเป็น 1) ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s และ 2) ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}



รูปที่ 5.14 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์เทียบกับ มาตรฐาน ASTM E399 ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวเฉลี่ยที่ผิว a_s



รูปที่ 5.15 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์เทียบกับ มาตรฐาน ASTM E399 ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg}

จากกราฟรูปที่ 5.14 และ 5.15 จะได้

กรณีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s จะมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 9 ~ 18 %

กรณีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} มีความแตกต่างอยู่ในช่วง -7 ~ 2 %

จากการเปรียบเทียบ โดยใช้ नियามของความยาวรอยร้าวต่างกันในการหาคอมพลายแอนซ์ ได้ข้อสรุปว่า ความแตกต่างของคอมพลายแอนซ์ (นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์) เกิดจากการ नियามความยาวรอยร้าวต่างกัน โดยเมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} (नियามความยาวรอยร้าวของ ASTM) จะทำให้ความแตกต่างที่เกิดจากส่วนโค้งของขอบหน้ารอยร้าวมีค่าลดลง

5.4 การประยุกต์คลิปเกจเพื่อหาความต้านทานการแตกหัก

5.4.1 สภาวะทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของ ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ทำจากวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 - T651 ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว และมี ค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าวที่ผิวต่าง ๆ กันจำนวน 5 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ในจำนวนนั้นมีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM E399 จำนวน 3 ชิ้น (ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 26.79, 26.93, 27.25 มม.) และที่อยู่นอกเกณฑ์มาตรฐาน ASTM E399 จำนวน 2 ชิ้น (ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 16.79, 32.17 มม.) โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่อยู่นอกเกณฑ์มาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 5.3 สาเหตุที่ทำการทดสอบหาความต้านทานการแตกหักกับความยาวรอยร้าวที่อยู่นอกเกณฑ์มาตรฐานก็เพื่อ ทดสอบความวิฤติของความต้านทานการแตกหักต่อความยาวรอยร้าวว่ามีมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ของ
ชิ้นงานทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก

ชิ้นที่	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว, a_s (มม.)	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} (มม.)
1	25.29	26.79
2	25.52	26.93
3	25.79	27.25
4	14.23	16.79 ^{***}
5	30.77	32.17 ^{***}

^{***} เป็นชิ้นงานทดสอบที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวอยู่นอกเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM E399

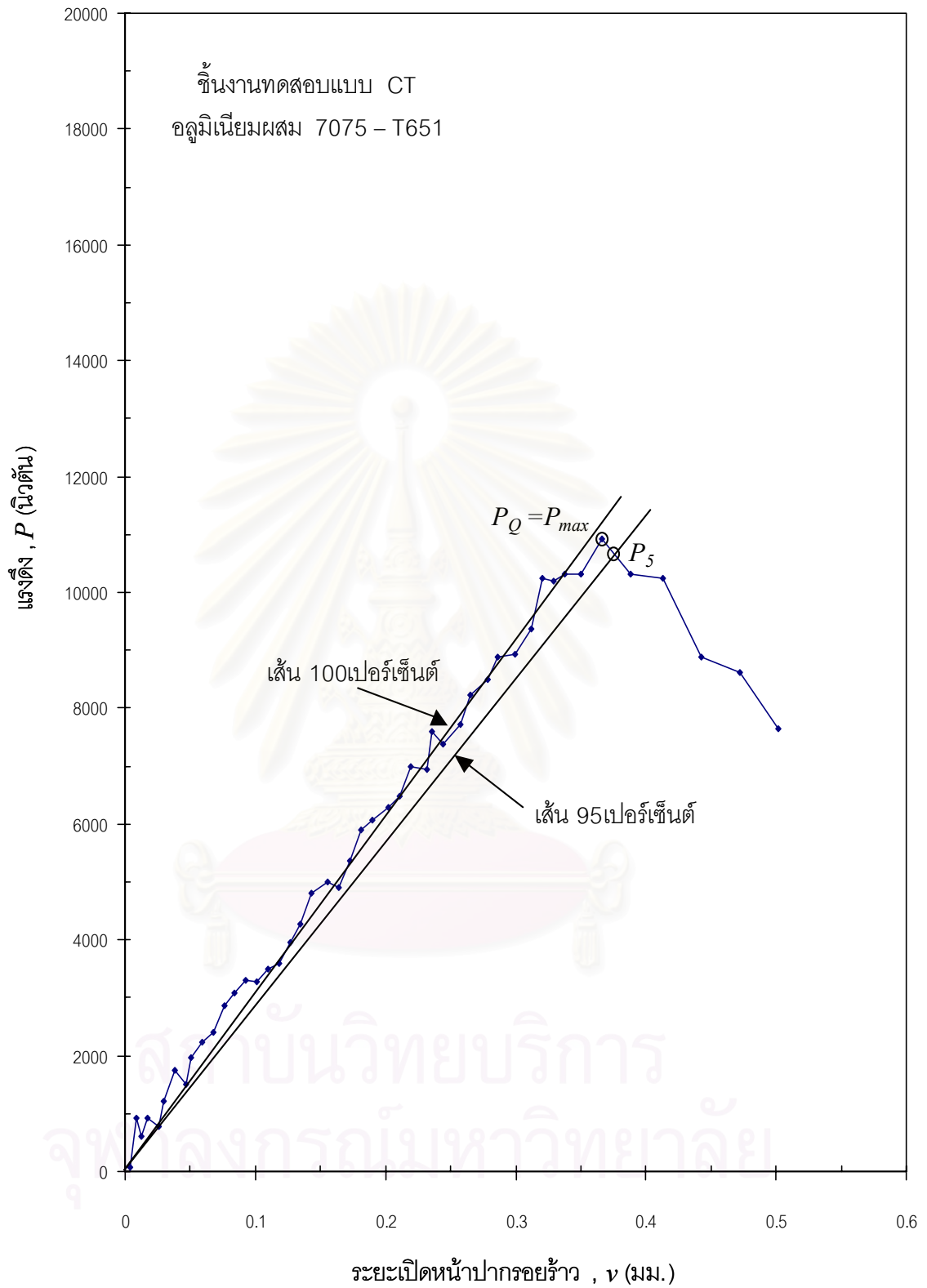
5.4.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก ต้องเก็บข้อมูลต่อไปนี้

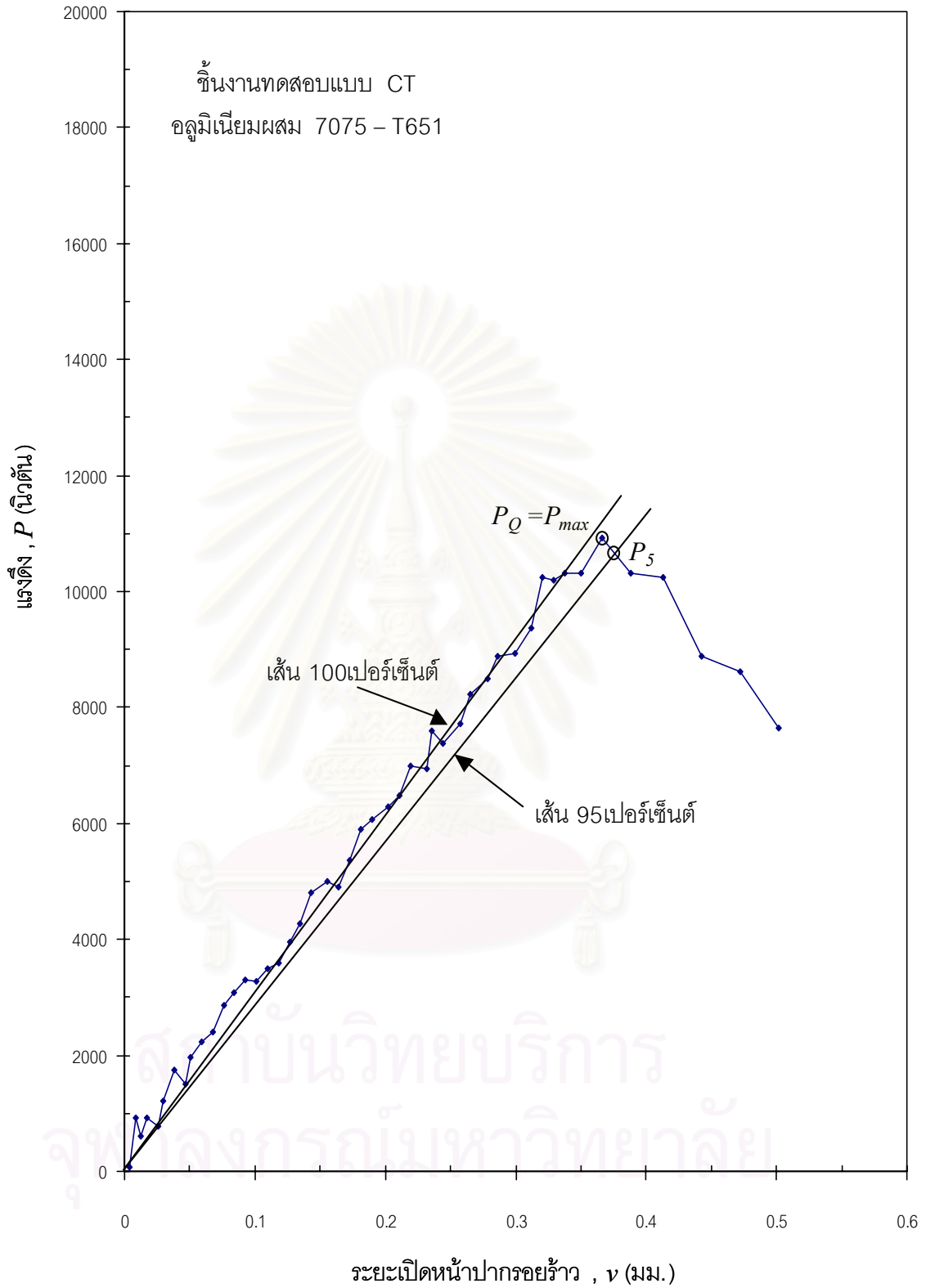
1. ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวจากคลิปเกจ v ซึ่งได้มาจากคลิปเกจ
2. ภาระที่ใช้ดึงชิ้นงาน P ซึ่งได้มาจากเครื่องทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง $P - v$ ของชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น (ตารางที่ 5.3) แสดงอยู่ในรูปที่ 5.16 ถึง 5.20 ตามลำดับ วิธีการหาเส้น 95 เปอร์เซนต์ทำได้โดยหาเส้นความชันของความสัมพันธ์ของแรงดึงกับระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวช่วงที่เป็นเส้นตรง (100 เปอร์เซนต์) จากนั้นนำ 0.95 คูณกับความชัน 100 เปอร์เซนต์จะได้เส้นความชัน 95 เปอร์เซนต์

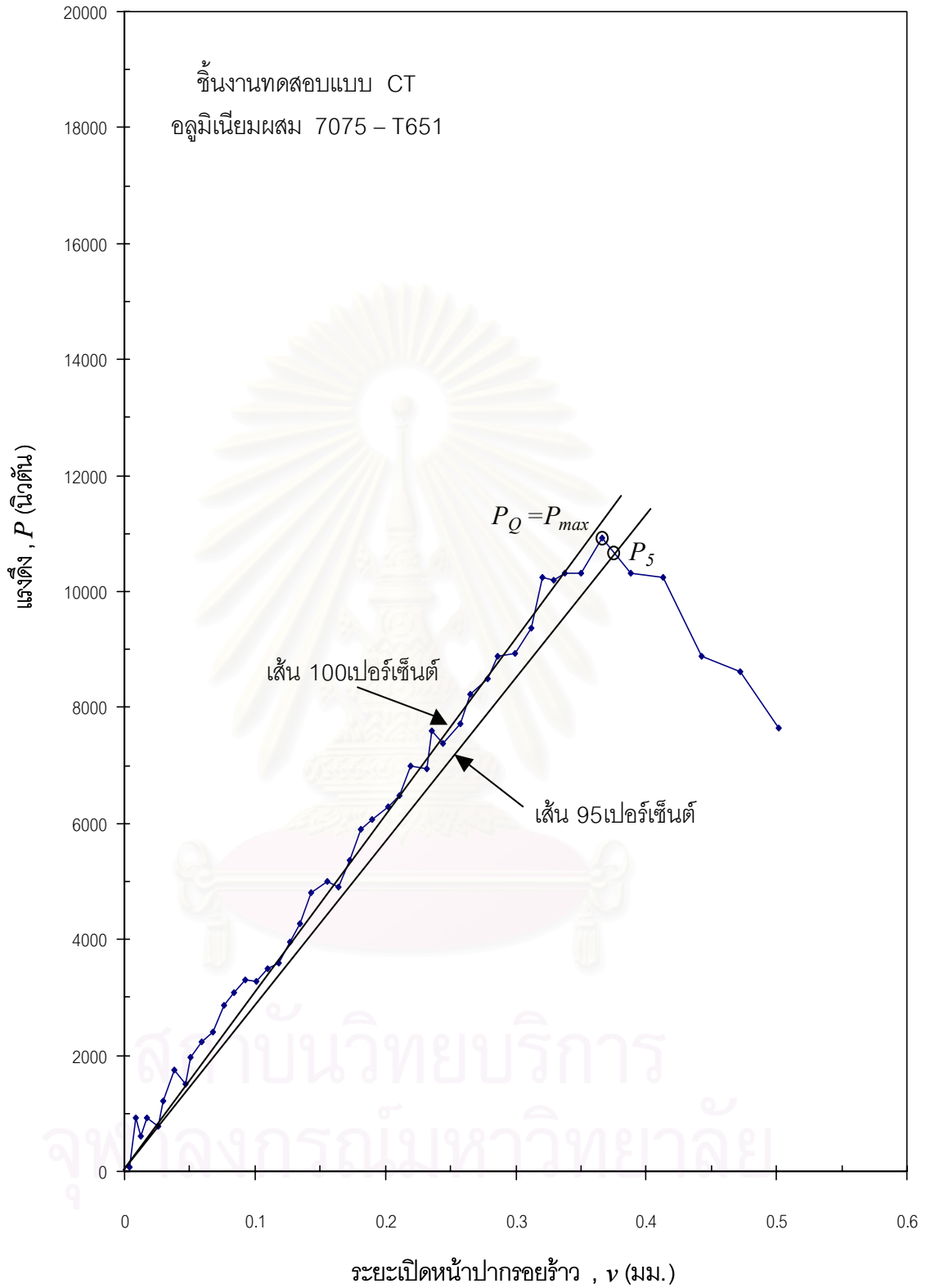
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



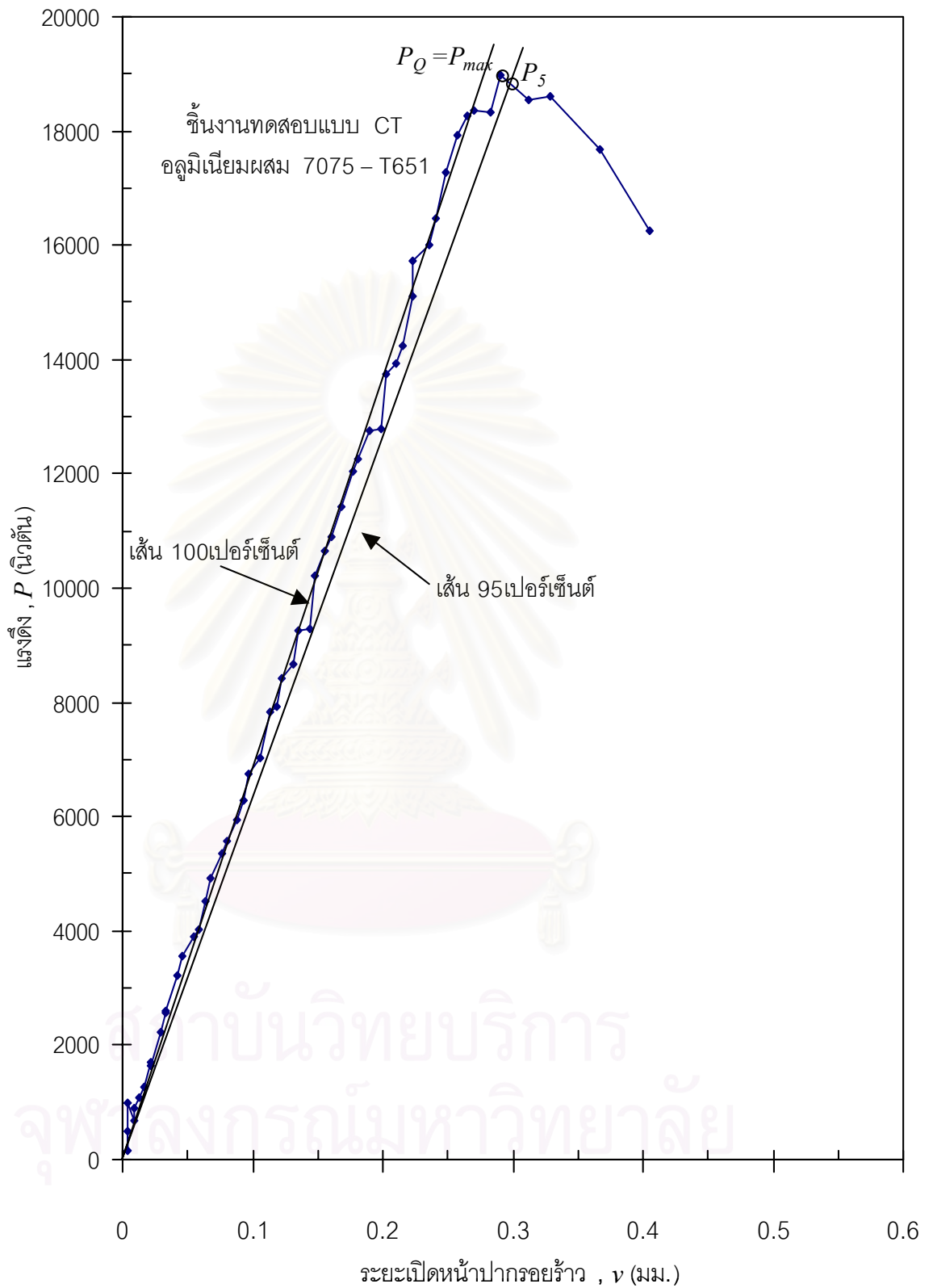
รูปที่ 5.16 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ
ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 26.79 มม.



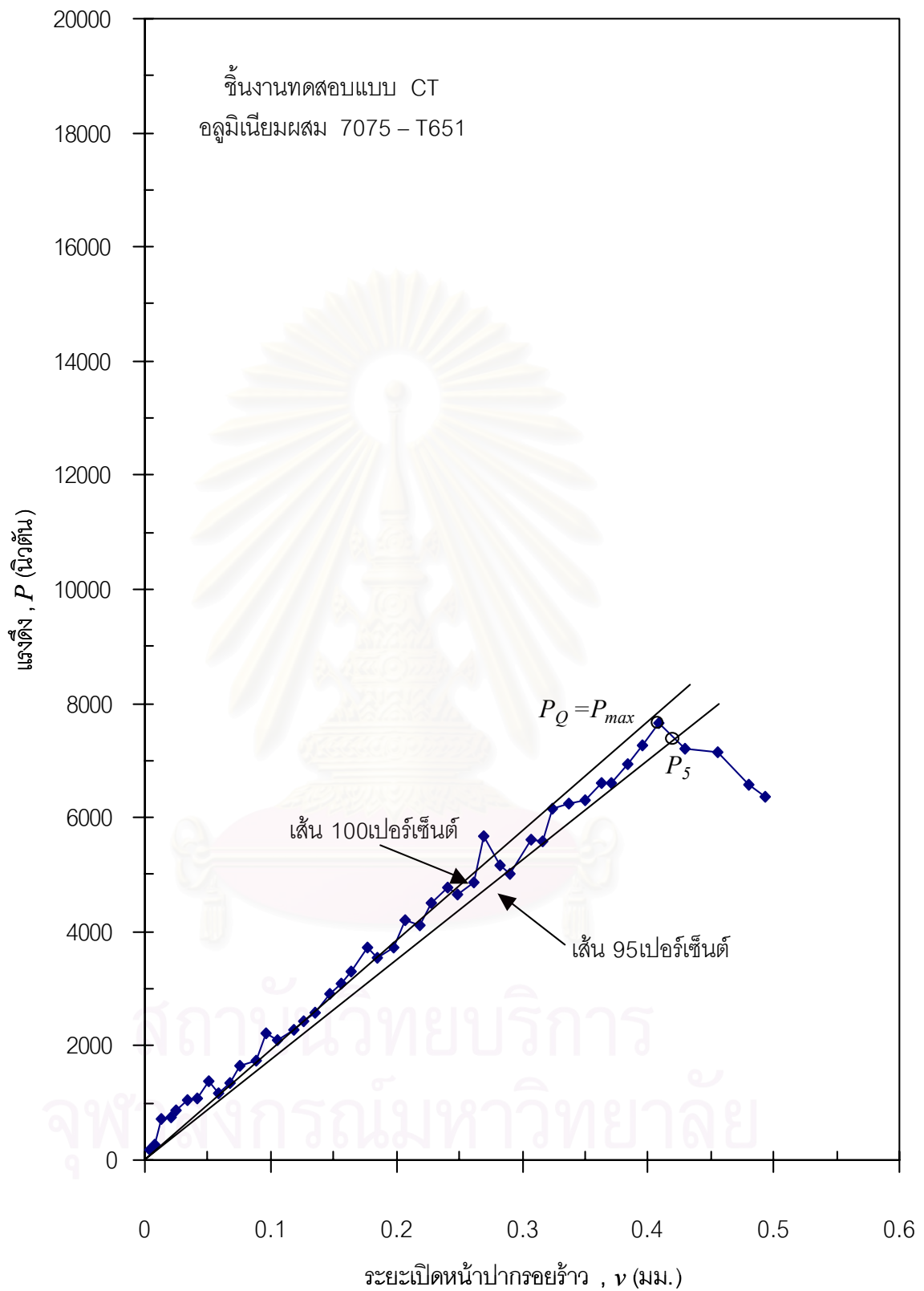
รูปที่ 5.17 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ
 ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 26.93 มม.



รูปที่ 5.18 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ
ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 27.25 มม.



รูปที่ 5.19 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ
 ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 16.79 มม.



รูปที่ 5.20 การทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ
ที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} 32.17 มม.

5.4.3 การวิเคราะห์ผล

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวกับแรงดึงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก (รูปที่ 5.16 ถึง 5.20) จะเห็นว่าเมื่อเทียบกราฟกับรูปที่ 2.9 เป็นแบบที่ 3 เส้นตรงที่มีความชัน 95 เปอร์เซ็นต์ (เส้น 95 เปอร์เซ็นต์) ของความชันช่วงแรกของข้อมูลตัดกับกราฟที่จุดต่ำกว่าจุดภาระสูงสุด (คือจุด P5 ในรูป) ดังนั้น ตามมาตรฐาน ASTM E399 จะได้ P_Q ที่นำไปคำนวณหาค่าความต้านทานการแตกหักเท่ากับ P_{max}

1) การคำนวณหาค่าความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหัก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_{IC} = \left(\frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} \right) \frac{\left(2 + \frac{a}{W} \right) \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

(5.3)

โดยที่ P_{max} คือ ภาระดึงสูงสุด
 a คือ ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว

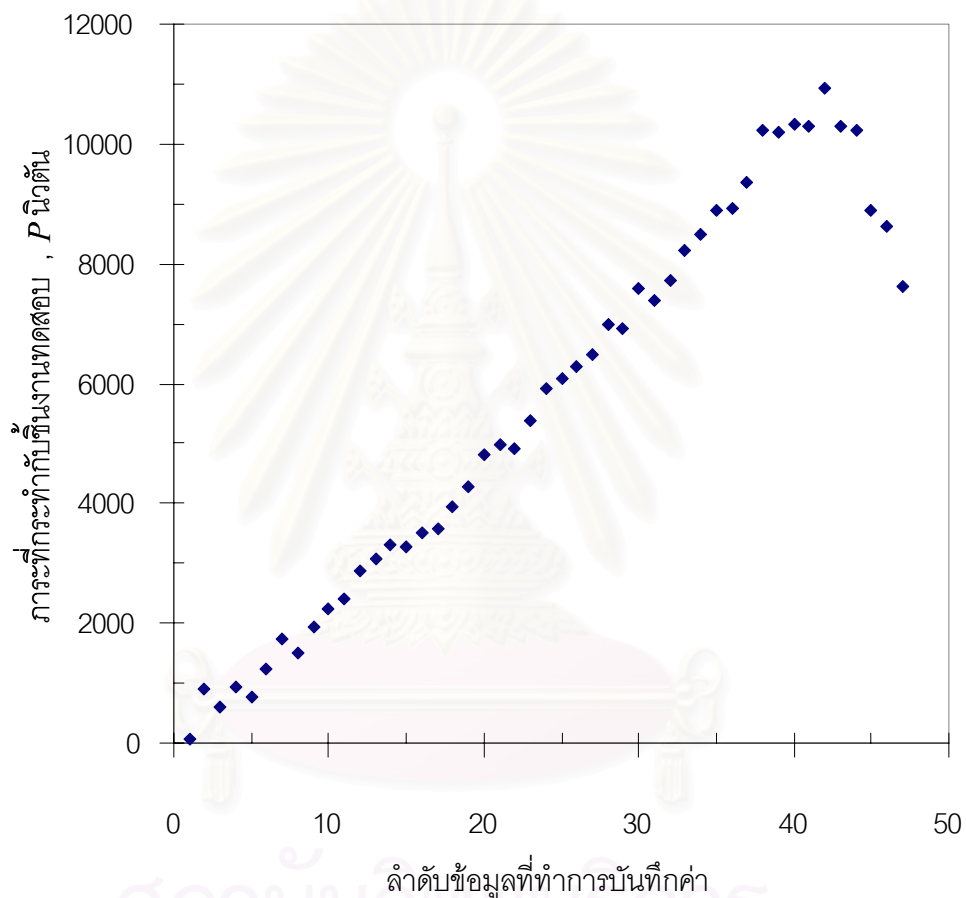
ค่าความต้านทานการแตกหัก ของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 จากการทดสอบชิ้นงานทดสอบที่มี ค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าว 26.79, 26.93 และ 27.25 mm แสดงในตารางที่ 5.4 โดยที่ค่าเฉลี่ยของความต้านทานการแตกหัก คือ

$$K_{IC} = \frac{20.10 + 20.43 + 20.21}{3} = 20.25 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

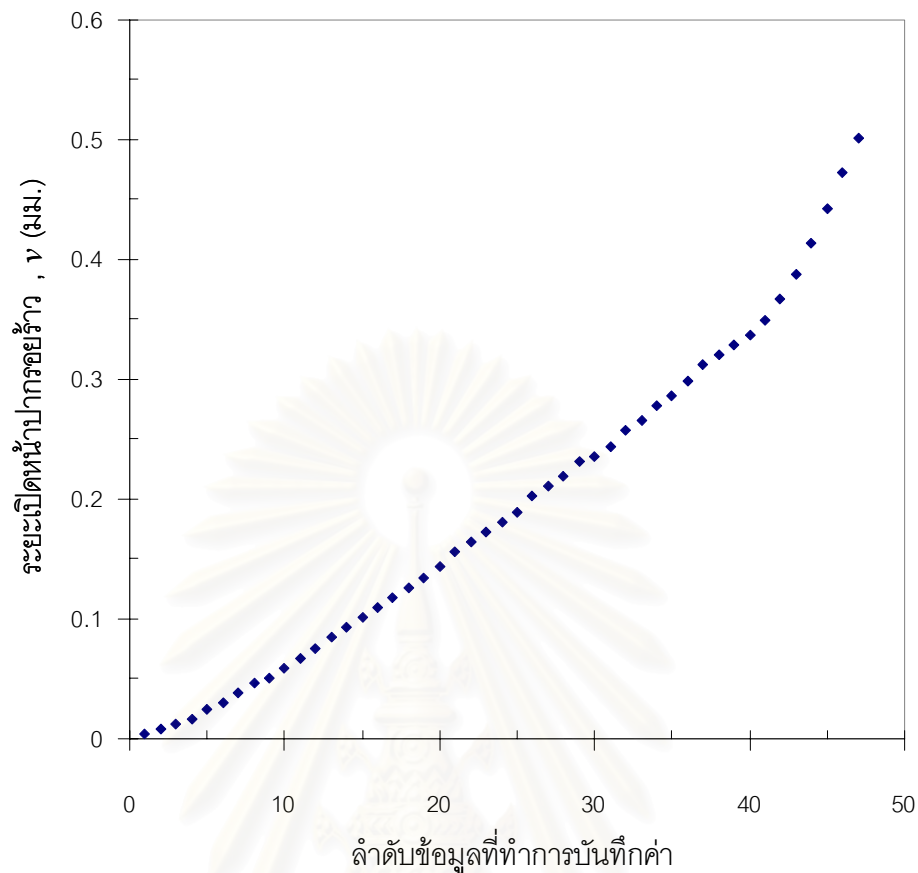
ตารางที่ 5.4 ค่าความต้านทานการแตกหักของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

ชั้นที่	ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว, a_{avg} (mm)	ความต้านทานการแตกหัก, K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	26.79	20.43
2	26.93	20.10
3	27.25	20.21

การกระจาย (scatter) ของข้อมูลในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ภาระที่กระทำกับ ชิ้นงานทดสอบ P กับระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว v มาจากการกระจายของ ข้อมูลภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบไม่ได้มีสาเหตุมาจากคลิปกงดังแสดงในรูปที่ 5.21 และ 5.22 ซึ่งพล็อต ระหว่างภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบกับลำดับข้อมูลที่ทำการบันทึก และระยะเปิดหน้าปากกรวย ร้าวกับลำดับข้อมูลที่ทำการบันทึก ตามลำดับ



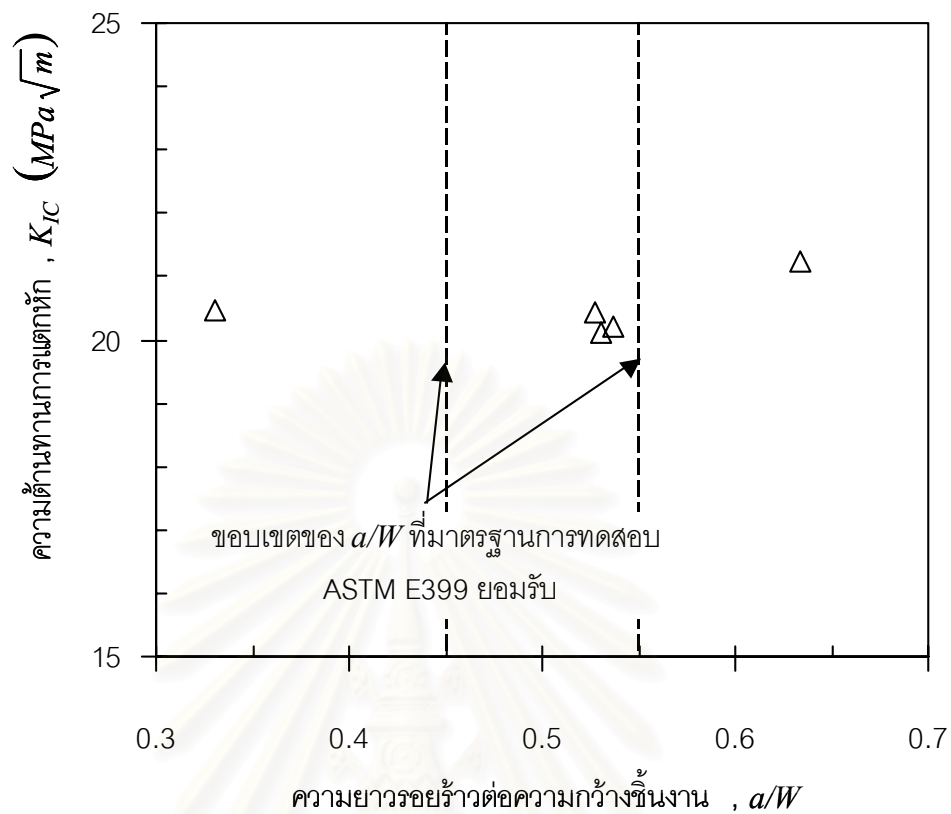
รูปที่ 5.21 ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ ของการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 26.79 มม.



รูปที่ 5.22 ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวของการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 26.79 มม.

2) ผลของความยาวรอยร้าวต่อความต้านทานการแตกหัก

การทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาผลของความยาวรอยร้าว ต่อความต้านทานการแตกหักของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 โดยทดสอบกับชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว 16.79 และ 32.17 mm (โดยที่มีค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวทั้งสองมีค่าต่ำกว่า และสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน ASTM E399 กำหนด) ผลการทดสอบ และที่ทดสอบไปก่อนหน้านี้ (ตารางที่ 5.4) แสดงอยู่ในรูปที่ 5.23 จากรูปจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวรอยร้าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการแตกหัก การกระจายของข้อมูลที่ปรากฏน่าจะเกิดจากค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ของการเตรียมการทดลอง เครื่องมือทดสอบ วัสดุ และผู้ทดสอบเอง อย่างไรก็ดี ผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Henk F. Jong^[8] ซึ่งสรุปว่า “ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุนี้ไม่ขึ้นกับความยาวรอยร้าว”



รูปที่ 5.23 ผลของความยาวรอยร้าวต่อความต้านทานการแตกหัก

5.5 การประยุกต์คลิปปางเพื่อหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

5.5.1 สภาวะทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ทำการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ของวัสดุอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651 ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว จำนวน 2 ชิ้น โดยที่ทำการเปรียบเทียบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า จากการวัดความยาวรอยร้าวโดยกล้องไมโครสโคป และการทำนายความยาวรอยร้าวโดยวิธีคอมพลายแอนซ์จากคลิปปาง โดยจะมีสภาวะการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สภาวะการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

รูปแบบคลื่น	ความถี่ (Hz)	ภาระสูงสุด (ตัน) ²	ภาระเฉลี่ย (ตัน)	พิสัยภาระ (ตัน) ²
สามเหลี่ยม	1	0.644	0.400	0.487

² เป็นค่าที่อ่านได้จริง ซึ่งคำนวณจากข้อมูลที่การ์ด A/D บันทึก

5.5.2 ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผล

การทดสอบทำการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจาก 2 กรณี กรณีแรก วัดความยาวรอยร้าวโดยกล้องไมโครสโคป และกรณีที่สอง คำนวณหาความยาวรอยร้าวจากการวัดคอมพลายแอนซ์³ ผลการทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 5.24

กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากวิธีทั้งสองมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นพฤติกรรมในช่วงที่ 2 ของกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าว (รูปที่ 2.11) จึงสามารถแทนข้อมูลการทดสอบได้โดยใช้สมการของ Paris (สมการที่ 2.39) ผลการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด มีดังนี้

อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า กรณีวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป

$$\frac{da}{dN} = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.81} \quad (5.4)$$

อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า กรณีทำนายความยาวรอยร้าวจากวิธีคอมพลายแอนซ์

$$\frac{da}{dN} = 7.30 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.97} \quad (5.5)$$

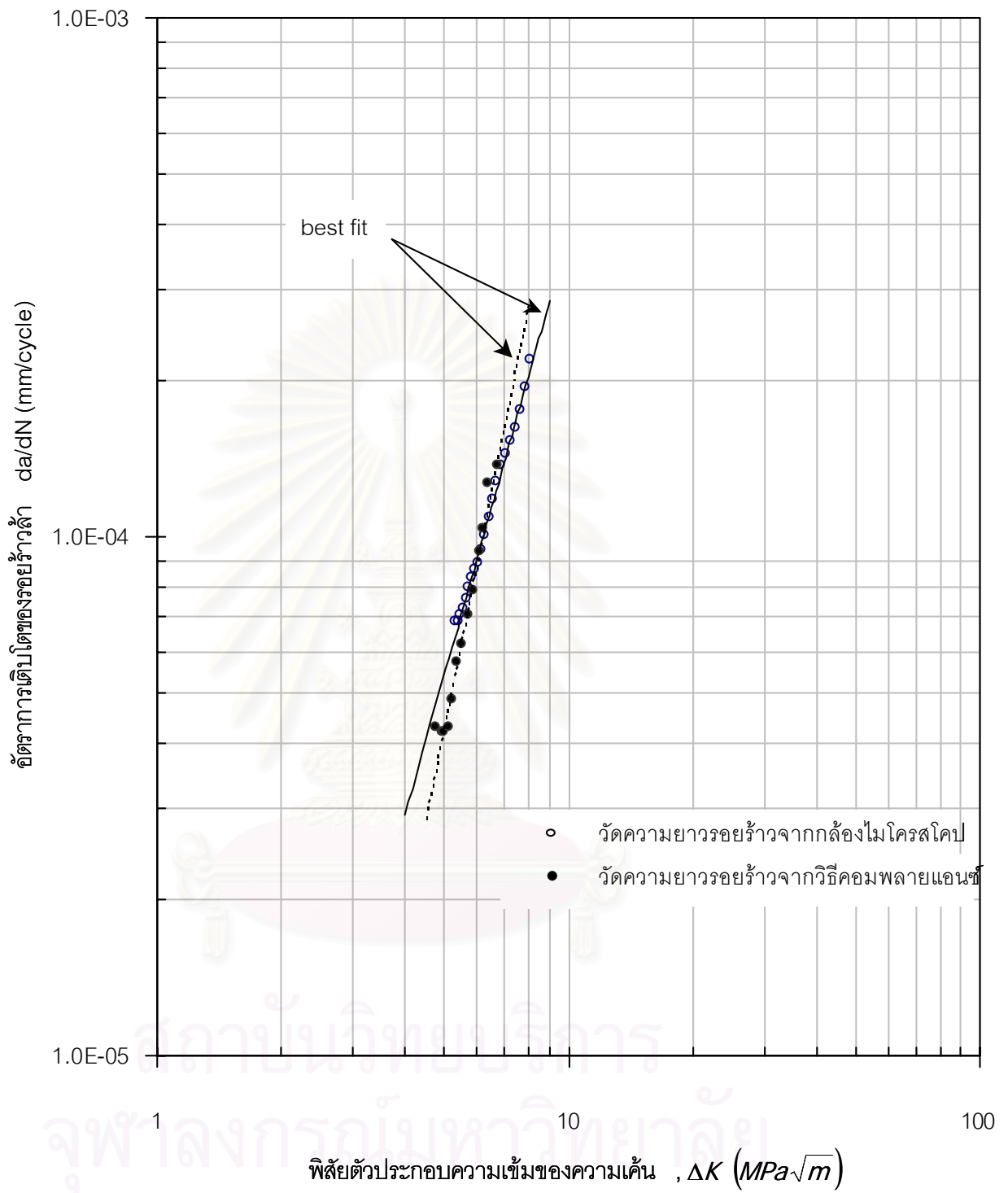
รูปที่ 5.25 แสดงขอบเขตบน และล่างของสมการที่ 5.4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.995 เปอร์เซนต์ จากรูปขอบเขตดังกล่าวเพียงพอที่จะครอบคลุมข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากวิธีวัดคอมพลายแอนซ์ จึงสรุปได้ว่า อัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากวิธีทั้งสองไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99.995 เปอร์เซนต์ ขอบเขตบน และล่างของอัตราการเติบโตของรอยร้าว $(da/dN)_U$ และ $(da/dN)_L$ สามารถแทนได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_U = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{3.01}$$

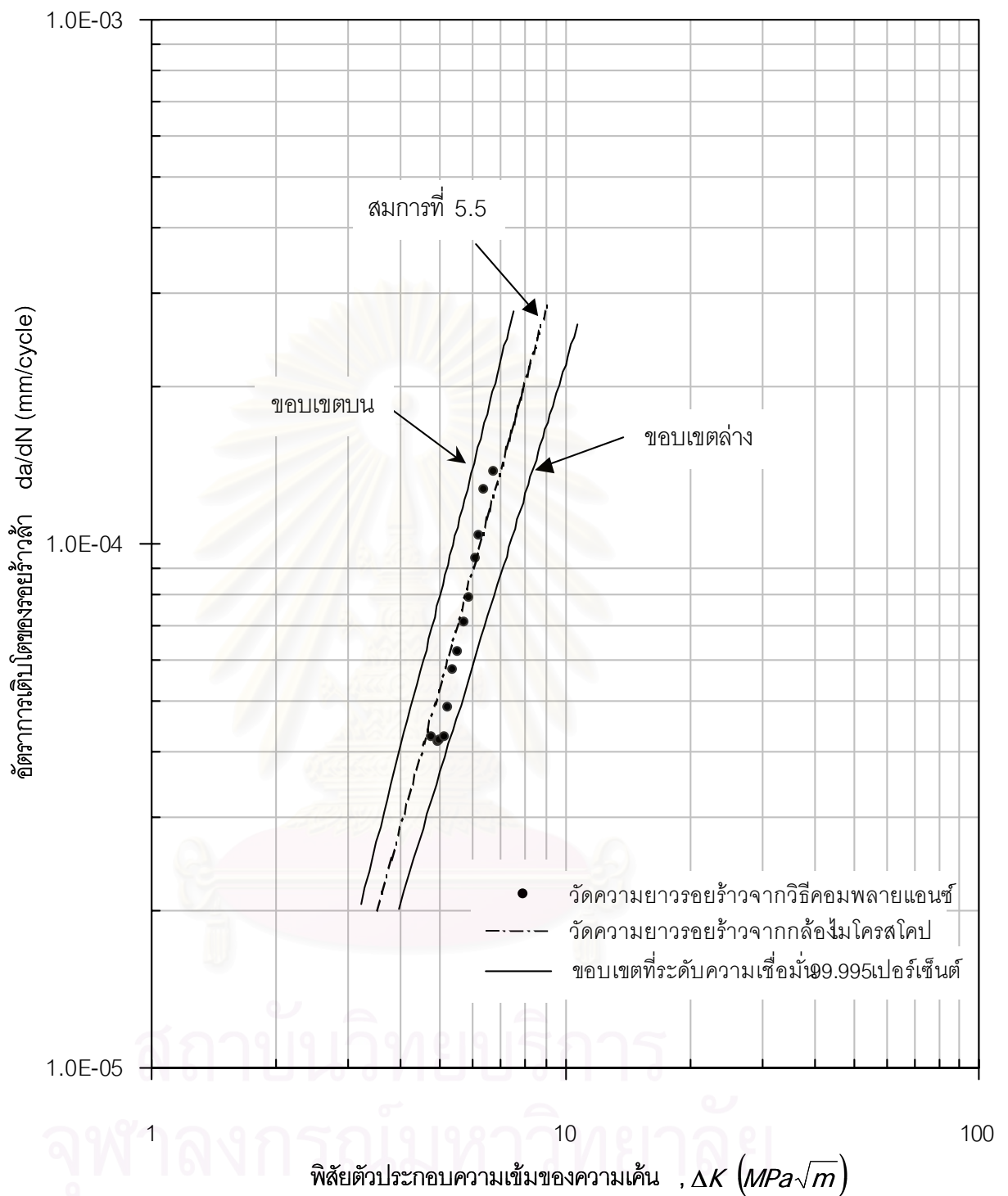
$$\left(\frac{da}{dN}\right)_L = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.57}$$

โดยระดับความเชื่อมั่นที่บ่งบอกความเหมือนของข้อมูลทั้งสองกรณี ยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับกันทั่วไปซึ่งมักกำหนดไว้ที่ ± 200 เปอร์เซนต์

³ เนื่องจากการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจะเป็นการวัดความยาวรอยร้าว โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s ดังนั้น กรณีนี้จะใช้การทำนายความยาวรอยร้าว (โดยวิธีคอมพลายแอนซ์) จากกราฟรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.24 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่วัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป และวัดคอมพลายแอนซ์



รูปที่ 5.25 ขอบเขตบนและล่างของกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำโดยวิธีวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป เมื่อเทียบกับวิธีวัดความยาวรอยร้าวจากวิธีคอมพลายแอนซ์ที่ระดับความเค้น 99.995 เปอร์เซ็นต์

5.6 การวิเคราะห์ผลการออกแบบ

5.6.1 ความไว

ในหัวข้อนี้แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ความไวทางทฤษฎีของคลิปเกจ กับความไวที่แท้จริงของคลิปเกจ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประมาณความไวที่เกิดขึ้นจริงในการออกแบบคลิปเกจครั้งต่อไป

สำหรับคลิปเกจที่ออกแบบ

$$\text{ความไวทางทฤษฎี}^4 \text{ เท่ากับ } 7.82 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}} \quad (5.6)$$

$$\text{และความไวที่แท้จริง}^4 \text{ เท่ากับ } 7.18 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}} \quad (5.7)$$

จากผลที่นำมาแสดงข้างต้น จะเห็นว่า ความไวที่แท้จริง มีค่าน้อยกว่าความไวทางทฤษฎีประมาณ 8.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผู้วิจัยมีความเห็นว่า อาจเกิดจากการที่จุดยึดคานคลิปเกจ กับ spacer block ไม่แข็งแรงเท่ากับที่กำหนดในการคำนวณทำให้ความเครียดที่วัดได้ตรงจุดติดสเตรนเกจอ่านค่าได้น้อยกว่า ค่าทางทฤษฎีที่ระยะเคลื่อนตัวที่ปลายคลิปเกจเดียวกัน ดังนั้นความไวที่แท้จริงจึงมีค่าต่ำกว่าความไวทางทฤษฎี

สรุปได้ว่า ในการออกแบบคลิปเกจควรที่จะเพิ่มความไวทางทฤษฎีให้มากกว่าความไวที่ต้องการ (ซึ่งเท่ากับความไวที่แท้จริง) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

5.6.2 ความแม่นยำของคลิปเกจหลังการใช้งาน

คลิปเกจที่ผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง อาจมีความแม่นยำลดลง (คลาดเคลื่อนจากข้อมูลสอบเทียบเดิม) เนื่องจาก knife edge มีการสึกหรอ และสเตรนเกจ เกิดความเสียหายเนื่องจากการล่า หรือสารยึดติดสเตรนเกจหลุด เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสอบเทียบคลิปเกจหลังผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง

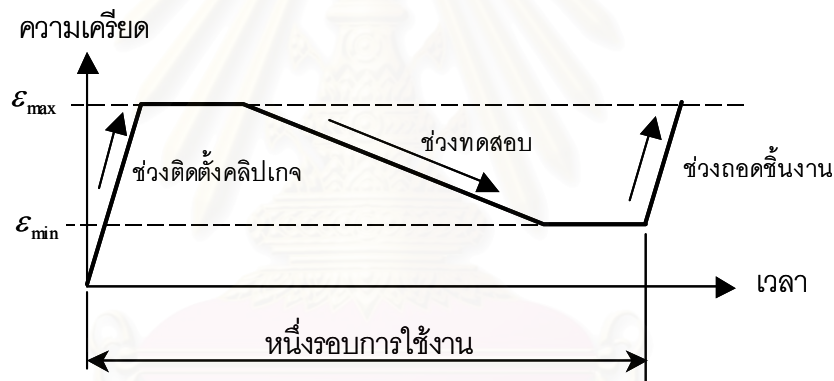
จากการตรวจสอบด้วยสายตา ไม่ปรากฏการความสึกหรอของ knife edge อย่างรุนแรง ดังนั้น สิ่งที่มีผลต่อความแม่นยำของคลิปเกจจึงมีเพียงความแม่นยำของสเตรนเกจ และความแข็งแรงของการติดสเตรนเกจ

⁴ รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ญ

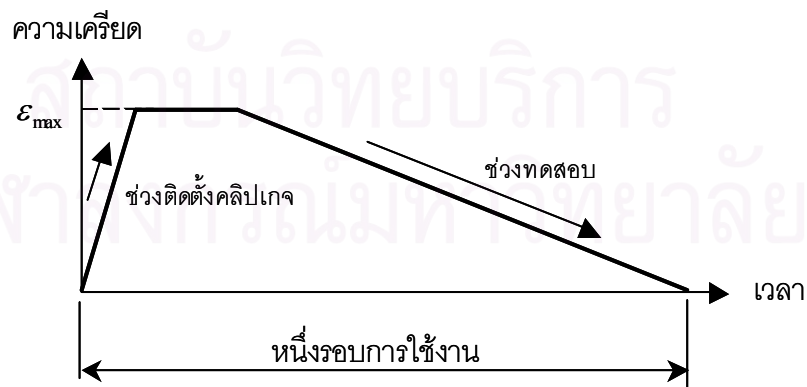
คลิปเกจที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้ในการทดสอบหา คอมพลาเยนซ์ ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ตามลำดับ โดยประวัติความเครียด (strain history) ที่เกิดขึ้นกับสเตรนเกจมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.26 ถึง 5.28 ตามลำดับ ขนาดของความเครียดสูงสุดและต่ำสุด ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งติดสเตรนเกจ แสดงอยู่ในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปเกจเมื่อใช้งานในสภาวะการทดสอบต่าง ๆ

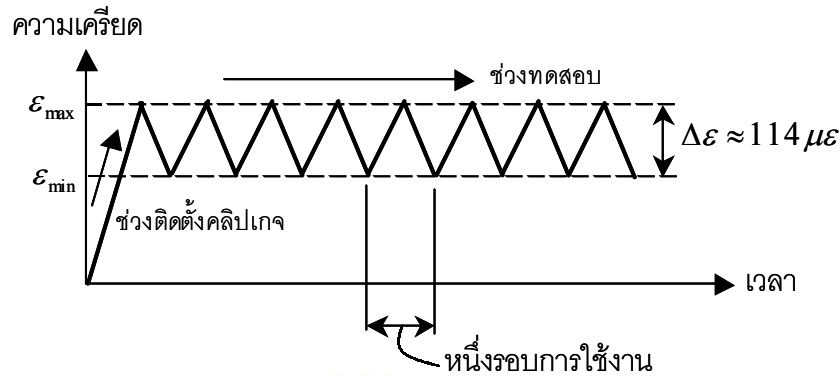
สภาวะการทดสอบ	ความเครียด ($\mu\epsilon$)		จำนวนรอบการใช้งาน (รอบ)
	สูงสุด ϵ_{max}	ต่ำสุด ϵ_{min}	
คอมพลาเยนซ์	2800	2690	150
ความต้านทานการแตกหัก	2800	0	7
อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า	2800	2686	200,000



รูปที่ 5.26 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปเกจกรณีทดสอบหาคอมพลาเยนซ์



รูปที่ 5.27 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปเกจกรณีทดสอบหา K_{IC}



รูปที่ 5.28 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคลิปเกจกรณีทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

จากรูปที่ 5.26 แสดงการทดสอบคลิปเกจเพื่อหาคอมพลายแอนซ์ ในหนึ่งรอบการใช้งานของคลิปเกจประกอบด้วย ช่วงติดตั้งคลิปเกจกับชิ้นงานทดสอบ จากนั้นทำการดึงชิ้นงานทดสอบเพื่อหาคอมพลายแอนซ์ และเมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้น จะต้องถอดชิ้นงานทดสอบออกโดยปลดภาระที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ การทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ในวิทยานิพนธ์นี้ทดสอบประมาณ 150 รอบการใช้งาน

จากรูปที่ 5.27 แสดงการทดสอบคลิปเกจ เพื่อหาค่าความต้านทานการแตกหัก ในหนึ่งรอบการใช้งานของคลิปเกจประกอบด้วย ช่วงติดตั้งคลิปเกจกับชิ้นงานทดสอบ จากนั้นดึงชิ้นงานจนกระทั่งขาด (จึงทำให้ความเครียดที่คลิปเกจเป็นศูนย์ เนื่องจากเมื่อชิ้นงานขาดจะทำให้คลิปเกจหลุดออก) โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบหาความต้านทานการแตกหักประมาณ 7 รอบการใช้งาน

จากรูปที่ 5.28 แสดงการทดสอบคลิปเกจ เพื่อหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าคลิปเกจถูกใช้งานภายใต้ภาระล้า เป็นจำนวนรอบประมาณ 200,000 รอบ ที่พิสัยความเครียดประมาณ $114 \mu\epsilon$

จากการใช้งานคลิปเกจดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ผลการสอบเทียบก่อนและหลังการใช้งานแสดงดังตารางที่ 5.6 จากตารางจะเห็นว่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไป 0.6 เพลอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าคลิปเกจยังคงมีความแม่นยำเหมือนเดิมแม้จะผ่านการใช้งานการทดสอบทั้ง 3 ประเภทมาแล้ว

ตารางที่ 5.6 ผลการสอบเทียบคลิบเกจก่อนการทดสอบและ
หลังการทดสอบความล้าที่ 200,000 รอบ

ระยะทาง (mm)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (volt)	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบความล้าที่ 200,000 รอบ
0.4998	-0.073	-0.073
0.9997	-0.146	-0.146
1.4995	-0.218	-0.219
1.9993	-0.291	-0.291
2.4991	-0.363	-0.363
2.9990	-0.434	-0.436
3.4988	-0.505	-0.508

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการออกแบบและการสร้างคลิปเกจแบบคานคู่ สำหรับการศึกษากิจกรรมการแตกหักของวัสดุ โดยคลิปเกจที่สร้างขึ้นนำไปประยุกต์กับการหาคอมพลาเยนซ์ ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว

6.1 สรุปผลการออกแบบและการสร้างคลิปเกจ

จากการทดสอบคลิปเกจกับการทดสอบการแตกหัก สรุปได้ว่าการออกแบบและการสร้างคลิปเกจสามารถใช้กับการทดสอบหาคอมพลาเยนซ์ ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในวิทยานิพนธ์นี้ได้

เมื่อทำการสอบเทียบคลิปเกจหลังการใช้งานสรุปได้ว่า คลิปเกจที่ผ่านการใช้งานยังคงมีความแม่นยำสูง เมื่อเปรียบเทียบกับคลิปเกจก่อนการใช้งานมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.6 เปอร์เซ็นต์

6.2 สรุปผลการทดสอบหาคอมพลาเยนซ์

การทดสอบคอมพลาเยนซ์ของคลิปเกจ สรุปได้ว่า คอมพลาเยนซ์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อความยาวรอยร้าวมีค่ามากขึ้น โดย

สมการนอร์มัลไลซ์คอมพลาเยนซ์ $C \cdot E \cdot B$ ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s คือ

$$C \cdot E \cdot B = -0.0616 \cdot a_s^5 + 7.4456 \cdot a_s^4 - 336.38 \cdot a_s^3 + 7338.7 \cdot a_s^2 - 76065 \cdot a_s + 320438$$

สมการนอร์มัลไลซ์คอมพลาเยนซ์ $C \cdot E \cdot B$ ของค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} คือ

$$C \cdot E \cdot B = 0.1375 \cdot a_{avg}^5 - 16.972 \cdot a_{avg}^4 + 835.79 \cdot a_{avg}^3 - 20243 \cdot a_{avg}^2 + 242133 \cdot a_{avg} - 1125389$$

เมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวที่ผิว a_s จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า การใช้ค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าว a_{avg} ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับผลเฉลยของ ASTM E399

ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนของคอมพลายแอนซ์ขึ้นอยู่กับ การนิยามของความยาวรอยร้าวที่แตกต่างกัน

6.3 สรุปผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก

การทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก พบว่า โหมดการแตกหักของอลูมิเนียมผสม 7075 T – 651 ทิศทางการวางตัวในแนว T – L เป็นแบบเปราะ ค่าความต้านทานการแตกหักในสถานะความเครียดระนาบ K_{IC} มีค่าเท่ากับ $20.25 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงที่ [13]

โดยที่ความคลาดเคลื่อนของการทดลองหาค่าความต้านทานการแตกหักมาจากผลของการให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบของส่วนควบคุมเครื่องทดสอบ

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความยาวรอยร้าว และความต้านทานการแตกหัก สรุปได้ว่า เมื่อเปลี่ยนความยาวรอยร้าวจะไม่มีผลกับความต้านทานการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Henk F. Jong [6]

6.4 สรุปผลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

คลิปเกจที่ทำการออกแบบ และสร้างขึ้น สามารถทดสอบพฤติกรรมหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุได้ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นหรือช่วงที่ 2 (ดังรูปที่ 2.11) จากสมการของ Paris สามารถทำนายอัตราการเติบโตของรอยร้าวได้ดังนี้

กรณีวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป

$$\frac{da}{dN} = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.81} \quad \text{มม/รอบ}$$

กรณีทำนายความยาวรอยร้าวจากวิธีคอมพลายแอนซ์

$$\frac{da}{dN} = 7.30 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.97} \quad \text{มม/รอบ}$$

อัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากวิธีทั้งสองไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.00005 ขอบเขตบนและล่างของอัตราการเติบโตของรอยร้าว กรณีวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป $(da/dN)_U$ และ $(da/dN)_L$ สามารถแทนได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_U = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{3.01}$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_L = 5.88 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.57}$$

6.5 ข้อเสนอแนะ

จากประสบการณ์ที่ได้ทำการทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางการทดลอง รวมทั้งการแก้ไขปัญหาอันเนื่องมาจากการทดลอง สรุปได้ดังนี้

6.5.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงาน

- 1) การสั่งวัสดุเพื่อนำมาทำชิ้นงานทดสอบควรที่จะเป็นวัสดุที่ผลิตมาพร้อมกัน เพื่อที่จะได้สมบัติของวัสดุที่เหมือนกัน
- 2) การขัดผิวชิ้นงานทดสอบต้องทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเติบโตของรอยร้าว เพื่อให้การวัดความยาวรอยร้าวจากกล้องไมโครสโคปสามารถทำได้อย่างชัดเจน
- 3) การสั่งทำชิ้นงานหรือชิ้นส่วนของคลิปเกจไม่ควรจำกัดเวลาช่างฝีมือให้ผลิตชิ้นงาน เนื่องจากจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ได้เขียนแบบไว้ เป็นผลให้อาจจะต้องมีการสั่งทำซ้ำอีกครั้ง ทำให้เสียเวลาในการทำชิ้นงาน

6.5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการปฏิบัติงาน

- 1) ก่อนการทดสอบ หลังจากอุณหภูมิคงที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ต้องทำการปรับศูนย์ภาระของเครื่องทดสอบทุกครั้ง โดยใช้มิเตอร์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของภาระที่ตัวควบคุม เพื่อให้ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบแสดงผลถูกต้อง
- 2) การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า เพื่อให้รอยร้าวที่ผิวทั้งสองข้างมีความยาวใกล้เคียงกัน อาจต้องกลับด้านชิ้นงาน ไป - มา เมื่อติดตั้งชิ้นงานอีกครั้ง หลังจากถอดชิ้นงานออกมาวัดความยาวรอยร้าวแล้ว
- 3) สายสัญญาณจากคลิปเกจไปยังสเตรนมิเตอร์ ควรมีความยาวน้อยที่สุด และควรไขว้สายสลัดไปมา เพื่อลดสัญญาณรบกวน
- 4) ไม่ควรทำการทดสอบในช่วงที่มีโอกาสเกิด ไฟฟ้าดับ เช่น การเกิดพายุฝนตก เนื่องจากเมื่อเกิดไฟฟ้าดับในช่วงที่กำลังทดลอง จะทำให้เกิดการกระชากของกริปจับชิ้นงานทดสอบ เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย

6.6 งานวิจัยต่อเนื่อง

- 1) ศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำในการวัด คอมพลายแอนซ์ ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ของคลิปเกจแบบคานคู้ และคลิปเกจแบบวงแหวน
- 2) ศึกษาผลของชนิดวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจที่มีต่อความไว และความแม่นยำของคลิปเกจ
- 3) ศึกษาผลของความแม่นยำของคลิปเกจกับการเปลี่ยนแปลงขนาด ชนิด และความต้านทานของสเตรนเกจ
- 4) เพิ่มความไวของคลิปเกจให้สูงขึ้น ด้วยการเปลี่ยนขนาดความต้านทานของสเตรนเกจ
- 5) ศึกษาอายุการใช้งานด้านความทนทานของคลิปเกจ
- 6) ศึกษาผลของผลกระทบทางพลศาสตร์ (dynamic response) ของคลิปเกจที่ความถี่ของการให้ภาระกับชิ้นงานเนื่องจากความล่าช้าต่างๆ
- 7) ทดสอบหาแรงยึดที่เหมาะสมของคานคลิปเกจ กับชิ้นงานทดสอบ

รายการอ้างอิง

1. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. การออกแบบ และสร้างอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับใช้ถนนภูมิ
สูง. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย 2545.
2. ASTM B645 – 95. Standard Practice for Plane – Strain Fracture Toughness Testing
of Aluminum Alloys. American Society for Testing and Materials, Philadelphia,
1995.
3. ASTM E399 – 90. Standard Test Method for Plane – Strain Fracture Toughness of
Metallic Materials. American Society for Testing and Materials,
Philadelphia, 1992.
4. ASTM E647 – 95a. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth
Rates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.
5. Douglas M. Fisher, Raymond T. Bubsey, and John E. Srawley. Design and Use of
Displacement Gage for Crack – Extension Measurements. NASA TND – 3724,
November 1966.
6. Ferdinand P. Beer, and E. Russell Johnston Jr. Mechanics of Materials. (n.p.):
McGraw – Hill, 1992.
7. Fleck N.A. Some Aspects of Clip Gauge Design. Strain (February 1983):
8. Henk F. Jong. Effects of Crack Length and Crack Front Geometry on K_{Ic} – Values of
Aluminum 7075 – T651 CT – Specimens. Engineering Fracture Mechanics.
Vol. 14 1981: 539 – 547.
9. KYOWA. INSTRUCTION MANUAL Strain Gage and Temperature Sensor.
10. KYOWA. Strain Gage. Complete line up of high performance strain gages and
accessories. cat. No. 101D – U1.
11. Meguid S. A. Engineering Fracture Mechanics. (n.p.): Elsevier Applied Science,
1989.
12. Norman E. Dowling. Mechanical Behavior of Materials. (n.p.): Prentice Hall, 1999.
13. Sanford R.J. Principles of Fracture Mechanics. USA.: Prentice Hall, 2003.
14. S. Suresh. Fatigue of Materials. Cambridge University Press, 1988: 344.
15. TecQuipment Ltd, E10 Digital Strain Gauge, (n.p.) 1999.

16. Tobler R. L., and Shepic J. A. Design and Performance of a Ring – Shaped Clip Gage for Fracture Mechanics Testing. Journal of Testing and Evaluation. JTEVA. 13, 4, (July 1985): 299 – 302.
17. William M. Murray, and William R. Miller. The Bonded Electrical Resistance Strain Gage. Oxford University Press, 1992.
18. William Volk. Applied Statistics for Engineers. USA: McGraw – Hill, 1958.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

ตารางที่ ก.1 สมบัติของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

ความเค้นคราก ¹ (MPa)	ความต้านทานการแตกหัก ^[13] (MPa√m)	โมดูลัสความยืดหยุ่น ² (GPa)
461	24	68

¹ ข้อมูลจากบริษัทผู้นำเข้า

² ข้อมูลจากการทดสอบจริง

ตารางที่ ก.2 ส่วนประกอบของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651^[12]

Cu	Cr	Mn	Zn
1.6 %	0.23 %	2.5 %	5.6 %

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลองคอมพลาเยนต์

ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาเยนต์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	675
0.025	1,502
0.038	2,436
0.051	3,406
0.067	4,390
0.084	5,770
0.097	6,776
0.118	7,990
0.135	8,586
0.152	10,864
0.164	12,409
0.185	13,673

ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาเยนต์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	410
0.021	1,157
0.034	2,005
0.046	2,860
0.063	4,275
0.080	5,022
0.097	6,431
0.118	7,544
0.135	8,838
0.152	10,749
0.169	12,631
0.181	13,300
0.202	14,701

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	517
0.021	1,423
0.034	1,638
0.051	3,262
0.067	3,959
0.089	5,705
0.105	6,524
0.126	8,090
0.143	9,384
0.164	10,993
0.177	12,509
0.202	14,111
0.223	14,643

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	1,071
0.030	2,055
0.046	2,429
0.059	3,823
0.076	4,577
0.093	6,057
0.110	7,250
0.126	8,313
0.148	9,398
0.160	10,763
0.173	12,207
0.194	13,084
0.207	14,392

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาวะตั้ง (นิวตัน)
0.017	611
0.030	1,667
0.051	2,091
0.072	2,946
0.093	3,988
0.110	5,259
0.131	5,461
0.156	7,085
0.181	7,774
0.207	9,103
0.232	10,145
0.249	10,770
0.266	12,179

ตาราง ข.6 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาวะตั้ง (นิวตัน)
0.017	956
0.034	1,171
0.055	1,696
0.080	2,709
0.101	3,341
0.131	3,578
0.156	4,843
0.185	5,080
0.211	6,625
0.240	7,142
0.270	8,284
0.303	9,333

ตาราง ข.7 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	575
0.030	1,200
0.051	1,696
0.072	2,393
0.097	3,054
0.118	3,492
0.148	4,419
0.173	5,410
0.198	6,244
0.223	6,273
0.253	6,826
0.278	7,746
0.308	8,953

ตาราง ข.8 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	912
0.038	1,516
0.059	2,292
0.084	2,917
0.110	3,585
0.135	4,239
0.160	4,943
0.185	5,597
0.215	6,122
0.240	7,171
0.266	7,832
0.295	8,572

ตาราง ข.9 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	410
0.030	956
0.055	661
0.084	1,494
0.110	1,969
0.139	2,536
0.173	3,046
0.202	3,521
0.232	3,564
0.261	4,907
0.299	5,001
0.329	5,080
0.363	6,165

ตาราง ข.10 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 1)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	7
0.034	180
0.067	891
0.110	1,516
0.152	1,667
0.190	2,314
0.240	2,170
0.282	3,269
0.325	3,219
0.371	3,937
0.417	4,232

ตาราง ข.11 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	697
0.021	1,336
0.034	2,493
0.042	3,291
0.059	4,325
0.076	5,475
0.089	6,395
0.105	7,595
0.122	8,543
0.139	10,045
0.156	11,216
0.169	13,494
0.190	14,183

ตาราง ข.12 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	776
0.021	1,358
0.034	2,730
0.051	3,808
0.067	5,051
0.084	6,043
0.105	7,322
0.126	8,895
0.143	9,815
0.160	11,316
0.185	13,034
0.207	14,155

ตาราง ข.13 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	201
0.013	912
0.021	1,610
0.034	2,163
0.051	3,054
0.063	4,131
0.084	5,525
0.097	6,229
0.118	7,882
0.131	8,744
0.148	10,059
0.169	10,964
0.190	13,285
0.207	13,803

ตาราง ข.14 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	1,006
0.021	1,394
0.038	2,687
0.055	3,887
0.072	4,850
0.093	5,920
0.110	7,120
0.131	8,421
0.152	9,513
0.169	11,108
0.190	12,021
0.211	14,507
0.223	14,708

ตาราง ข.15 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	920
0.030	1,739
0.046	2,601
0.067	3,183
0.089	3,808
0.110	5,037
0.131	5,669
0.152	7,300
0.177	7,825
0.198	8,708
0.219	9,642
0.240	10,756
0.266	12,042

ตาราง ข.16 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	460
0.025	1,027
0.046	1,868
0.067	2,285
0.093	3,125
0.118	3,937
0.143	4,785
0.169	5,173
0.194	5,920
0.223	7,164
0.253	7,825
0.278	8,040
0.303	9,312

ตาราง ข.17 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	654
0.034	1,092
0.055	2,055
0.080	2,759
0.105	3,549
0.131	4,670
0.156	5,152
0.181	5,475
0.211	6,323
0.236	7,551
0.261	8,076
0.291	8,881
0.312	9,233

ตาราง ข.18 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	108
0.017	675
0.038	1,221
0.063	2,271
0.084	2,924
0.110	3,176
0.135	4,239
0.160	4,821
0.190	5,288
0.215	6,129
0.240	6,761
0.270	7,724
0.299	8,996

ตาราง ข.19 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาวะตึง (นิวตัน)
0.008	381
0.030	553
0.051	1,035
0.076	1,768
0.101	1,890
0.126	2,759
0.156	3,097
0.181	3,571
0.211	3,952
0.240	4,333
0.270	4,728
0.299	5,216
0.329	5,913
0.354	6,359

ตาราง ข.20 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 2)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาวะตึง (นิวตัน)
0.013	467
0.042	582
0.076	891
0.118	1,150
0.160	1,624
0.202	1,976
0.244	2,651
0.291	2,845
0.333	3,736
0.379	3,844
0.409	4,081

ตาราง ข.21 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	754
0.017	1,351
0.030	2,184
0.042	3,327
0.059	4,239
0.076	5,224
0.084	6,215
0.105	7,760
0.122	9,154
0.139	10,770
0.156	11,367
0.173	12,696
0.190	13,989

ตาราง ข.22 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	1,071
0.021	1,954
0.038	3,240
0.055	4,110
0.072	5,245
0.089	6,294
0.110	7,458
0.126	8,888
0.143	10,275
0.160	11,726
0.181	12,567
0.198	14,492
0.211	14,708

ตาราง ข.23 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	1,071
0.025	1,962
0.042	2,436
0.055	3,887
0.072	4,929
0.093	5,497
0.110	7,228
0.126	8,486
0.148	9,319
0.164	11,266
0.190	11,949
0.207	14,205
0.232	14,708

ตาราง ข.24 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	1,214
0.025	2,256
0.042	2,867
0.055	4,361
0.076	5,123
0.093	6,136
0.114	7,559
0.131	8,716
0.152	10,174
0.169	11,719
0.190	12,969

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.25 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	1,099
0.025	2,155
0.042	2,393
0.063	3,427
0.084	4,512
0.105	5,281
0.126	6,265
0.148	6,934
0.173	8,457
0.198	9,068
0.219	9,721
0.244	11,561
0.266	12,703

ตาราง ข.26 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	661
0.030	1,415
0.055	1,717
0.076	2,658
0.101	3,154
0.131	3,830
0.156	4,512
0.190	5,719
0.215	6,998
0.244	7,667
0.270	7,817
0.299	8,486

ตาราง ข.27 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	1,114
0.038	1,049
0.063	2,019
0.084	3,161
0.110	3,715
0.139	4,498
0.164	5,231
0.190	5,676
0.219	6,876
0.249	7,365
0.274	8,521
0.303	8,679

ตาราง ข.28 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	589
0.025	1,099
0.046	1,789
0.067	2,630
0.093	3,090
0.118	3,866
0.148	4,742
0.173	5,425
0.198	6,172
0.228	6,862
0.257	7,767
0.287	9,046
0.308	9,298

ตาราง ข.29 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	338
0.034	740
0.055	1,530
0.080	1,710
0.105	1,962
0.131	2,630
0.160	3,082
0.190	3,327
0.215	3,981
0.249	4,541
0.278	4,915
0.308	5,489
0.337	5,705
0.358	6,560

ตาราง ข.30 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 3)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	417
0.055	1,128
0.093	1,157
0.131	1,387
0.173	1,940
0.211	2,263
0.253	2,802
0.295	3,248
0.341	3,614
0.379	4,117
0.413	4,469

ตาราง ข.31 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	1,315
0.025	2,335
0.038	3,046
0.055	4,498
0.072	6,093
0.089	7,020
0.105	8,292
0.126	9,743
0.143	11,122
0.160	12,581
0.173	13,982
0.194	14,708

ตาราง ข.32 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	855
0.021	1,746
0.034	2,543
0.051	3,945
0.063	4,871
0.084	6,208
0.101	7,437
0.122	8,665
0.143	9,405
0.156	11,302
0.169	12,215
0.194	14,528
0.202	14,679

ตาราง ข.33 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	912
0.030	1,875
0.046	2,508
0.063	3,873
0.080	5,216
0.097	6,050
0.118	7,839
0.139	9,355
0.156	10,440
0.177	11,704
0.190	13,063
0.207	14,298
0.223	14,708

ตาราง ข.34 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.021	1,573
0.034	2,400
0.046	3,363
0.063	4,419
0.080	5,382
0.097	6,301
0.114	7,307
0.131	8,701
0.143	9,700
0.164	10,778
0.181	12,078
0.198	13,328
0.215	14,708

ตาราง ข.35 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	481
0.025	1,480
0.042	2,486
0.063	3,147
0.080	3,945
0.105	4,850
0.126	6,143
0.148	6,704
0.173	8,464
0.194	9,017
0.215	10,174
0.240	11,223
0.261	12,617

ตาราง ข.36 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	1,128
0.038	1,882
0.059	2,371
0.089	3,011
0.114	3,751
0.139	4,498
0.164	5,813
0.194	6,050
0.223	7,063
0.253	7,983
0.282	8,795

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.37 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.013	826
0.034	1,710
0.055	2,199
0.080	3,125
0.101	3,650
0.131	4,455
0.156	4,915
0.181	5,863
0.207	6,237
0.236	7,429
0.266	8,442
0.291	9,606

ตาราง ข.38 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	776
0.034	1,071
0.059	2,299
0.080	2,845
0.101	3,334
0.122	4,182
0.152	5,030
0.173	5,475
0.202	6,093
0.228	7,041
0.249	7,494
0.278	8,256
0.299	8,945

ตาราง ข.39 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาวะตึง (นิวตัน)
0.013	438
0.030	1,085
0.059	1,329
0.080	1,602
0.105	2,637
0.131	2,630
0.156	3,226
0.181	3,542
0.211	4,325
0.236	4,756
0.266	4,598
0.295	5,568
0.320	6,150

ตาราง ข.40 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 4)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาวะตึง (นิวตัน)
0.004	208
0.030	884
0.067	891
0.105	1,150
0.143	1,811
0.190	2,033
0.228	2,917
0.274	2,817
0.316	3,664
0.358	3,722
0.392	4,721

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.41 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 13.27$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	675
0.017	1,760
0.030	2,486
0.046	3,722
0.059	4,512
0.080	5,806
0.097	7,099
0.114	8,069
0.131	10,073
0.148	11,582
0.169	12,380
0.177	13,853
0.190	14,708

ตาราง ข.42 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.23$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	474
0.013	1,286
0.021	2,163
0.038	3,011
0.051	3,636
0.067	4,871
0.089	5,640
0.101	7,832
0.122	8,600
0.139	9,570
0.152	11,345
0.173	12,380
0.190	13,853
0.207	14,708

ตาราง ข.43 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 14.46$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	122
0.021	920
0.034	2,206
0.046	3,032
0.063	4,081
0.080	5,080
0.097	6,416
0.114	7,602
0.135	8,773
0.156	10,469
0.177	11,690
0.194	12,947
0.215	14,600

ตาราง ข.44 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 15.24$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	783
0.021	1,789
0.038	2,644
0.055	3,715
0.076	4,929
0.093	6,179
0.114	7,393
0.131	8,981
0.156	10,433
0.177	11,546
0.194	12,732
0.207	14,485
0.219	14,708
0.228	14,708

ตาราง ข.45 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาเยนซ์ ($a_{avg} = 20.24$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	1,250
0.025	1,904
0.042	2,658
0.063	3,190
0.084	4,484
0.105	5,109
0.126	6,186
0.152	7,063
0.177	8,407
0.198	9,463
0.223	10,684
0.244	11,604
0.261	12,121

ตาราง ข.46 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลาเยนซ์ ($a_{avg} = 25.29$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.025	1,243
0.051	1,732
0.076	2,278
0.101	2,982
0.122	3,894
0.152	5,216
0.177	5,734
0.207	6,416
0.232	7,437
0.261	8,177
0.291	9,161

ตาราง ข.47 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.52$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	762
0.038	1,344
0.059	2,256
0.084	3,183
0.110	3,894
0.135	4,196
0.164	5,101
0.185	6,050
0.215	6,962
0.244	7,343
0.274	9,003
0.295	9,398

ตาราง ข.48 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 25.79$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	783
0.034	1,803
0.055	1,768
0.080	2,249
0.101	3,571
0.126	3,758
0.152	4,498
0.181	5,051
0.202	5,712
0.232	6,826
0.261	7,803
0.287	8,148

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.49 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 30.77$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.008	489
0.030	704
0.051	1,265
0.080	1,286
0.110	2,457
0.139	2,292
0.169	3,003
0.198	3,700
0.232	4,347
0.261	4,929
0.295	5,583
0.329	5,791
0.354	6,402

ตาราง ข.50 ข้อมูลการทดสอบหาคอมพลายแอนซ์ ($a_{avg} = 35.47$ มม., ครั้งที่ 5)

ระยะเปิดหน้าปากกรวยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.017	467
0.055	833
0.093	1,229
0.135	2,076
0.177	1,839
0.219	2,752
0.266	2,946
0.308	3,434
0.350	3,751
0.396	3,981

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลจากการทดสอบหาค่าความต้านทานการแตกหัก

ตาราง ค.1 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.79$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	79
0.008	912
0.013	604
0.017	927
0.025	783
0.030	1,221
0.038	1,746
0.046	1,494
0.051	1,954
0.059	2,227
0.067	2,393
0.076	2,867
0.084	3,090
0.093	3,305
0.101	3,284
0.110	3,506
0.118	3,593
0.126	3,959
0.135	4,282
0.143	4,800
0.156	4,994
0.164	4,915
0.173	5,374
0.181	5,906
0.190	6,079
0.202	6,294
0.211	6,488
0.219	6,984
0.232	6,934
0.236	7,602
0.244	7,386
0.257	7,717
0.266	8,227
0.278	8,493
0.287	8,881
0.299	8,938
0.312	9,362
0.320	10,231
0.329	10,203
0.337	10,325
0.350	10,311
0.367	10,929
0.388	10,303
0.413	10,231
0.443	8,888

ตาราง ค.1(ต่อ) ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.79$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.472	8,622
0.502	7,638

ตาราง ค.2 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.93$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	287
0.008	589
0.013	927
0.017	891
0.021	1,444
0.030	1,135
0.038	1,847
0.042	1,610
0.051	2,120
0.059	2,227
0.067	2,558
0.076	2,917
0.084	2,522
0.093	3,147
0.101	3,765
0.110	3,751
0.118	3,600
0.126	4,203
0.135	4,182
0.143	4,325
0.152	4,864
0.160	4,929
0.169	5,123
0.181	5,813
0.185	5,511
0.198	6,352
0.207	6,603
0.215	6,517
0.223	7,142
0.232	6,646
0.240	7,214
0.253	7,753
0.257	8,083
0.274	8,018
0.278	8,866
0.287	8,874
0.295	8,866
0.308	8,902
0.320	9,772

ตาราง ค.2(ต่อ) ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 26.93$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.329	9,628
0.346	10,655
0.354	10,246
0.375	9,671
0.388	10,131
0.413	9,836
0.443	8,572
0.472	8,435
0.497	7,674

ตาราง ค.3 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 27.25$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	7
0.008	445
0.008	661
0.017	683
0.021	632
0.025	1,221
0.034	1,372
0.038	1,344
0.046	1,336
0.051	2,026
0.059	1,983
0.067	2,206
0.076	2,263
0.084	3,075
0.093	2,917
0.101	3,298
0.110	3,442
0.118	3,715
0.126	4,002
0.135	4,160
0.143	4,347
0.152	4,871
0.164	4,828
0.173	4,986
0.181	5,511
0.190	5,647
0.198	5,942
0.207	6,021
0.219	6,732
0.228	6,977
0.236	6,912
0.244	7,235

ตาราง ค.3(ต่อ) ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 27.25$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.253	7,444
0.266	8,256
0.274	7,954
0.287	8,852
0.291	8,981
0.299	9,103
0.312	9,513
0.320	9,980
0.329	9,772
0.341	10,109
0.358	10,339
0.375	10,497
0.400	10,002
0.430	8,866
0.443	9,161
0.472	8,241
0.502	7,710

ตาราง ค.4 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 16.79$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	158
0.004	1,006
0.008	690
0.008	891
0.013	1,092
0.017	1,279
0.021	1,696
0.021	1,652
0.030	2,227
0.034	2,558
0.034	2,615
0.042	3,205
0.046	3,550
0.055	3,909
0.059	4,038
0.063	4,527
0.067	4,915
0.076	5,360
0.080	5,561
0.089	5,935
0.093	6,280
0.097	6,739
0.105	7,027
0.114	7,817
0.118	7,932
0.122	8,406

ตาราง ค.4(ต่อ) ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 16.79$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.131	8,665
0.135	9,269
0.143	9,298
0.148	10,203
0.156	10,648
0.160	10,893
0.169	11,424
0.177	12,042
0.181	12,272
0.190	12,746
0.198	12,789
0.202	13,752
0.211	13,925
0.215	14,226
0.223	15,103
0.223	15,735
0.236	15,994
0.240	16,483
0.249	17,287
0.257	17,920
0.266	18,279
0.270	18,351
0.282	18,322
0.291	18,983
0.312	18,537
0.329	18,595
0.367	17,689
0.405	16,267

ตาราง ค.5 ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 32.17$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.004	194
0.008	259
0.013	711
0.021	740
0.025	862
0.034	1,042
0.042	1,085
0.051	1,387
0.059	1,171
0.067	1,351
0.076	1,645
0.089	1,746
0.097	2,227
0.105	2,112
0.118	2,278

ตาราง ค.5(ต่อ) ข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ($a_{avg} = 32.17$ มม.)

ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว (มม.)	ภาระดึง (นิวตัน)
0.126	2,436
0.135	2,587
0.148	2,924
0.156	3,104
0.164	3,305
0.177	3,715
0.185	3,557
0.198	3,715
0.207	4,210
0.219	4,117
0.228	4,491
0.240	4,785
0.249	4,649
0.261	4,871
0.270	5,691
0.282	5,166
0.291	5,022
0.308	5,612
0.316	5,576
0.325	6,143
0.337	6,258
0.350	6,308
0.363	6,596
0.371	6,617
0.384	6,926
0.396	7,264
0.409	7,652
0.430	7,221
0.455	7,149
0.481	6,574
0.493	6,366

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากการทดลองหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

ตาราง ง.1 ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวจากกล้องไมโครสโคป

จำนวนรอบ (cycle)	ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราการเติบโต ของรอยร้าว* (mm/cycle)	พิสัยตัวประกอบ ความเข้มของความเค้น* ($MPa\sqrt{m}$)
315000	16.62		
319000	16.87		
323000	17.16		
327000	17.44	6.866E-05	5.33E+06
331000	17.70	6.857E-05	5.40E+06
335000	18.00	7.049E-05	5.47E+06
339000	18.25	7.304E-05	5.55E+06
343000	18.52	7.626E-05	5.64E+06
347000	18.89	7.968E-05	5.73E+06
351000	19.20	8.351E-05	5.83E+06
355200	19.55	8.668E-05	5.93E+06
359000	19.89	8.891E-05	6.03E+06
363000	20.24	9.467E-05	6.15E+06
367100	20.64	1.006E-04	6.27E+06
371000	21.03	1.088E-04	6.41E+06
375000	21.50	1.181E-04	6.54E+06
379050	21.96	1.277E-04	6.69E+06
383000	22.52	1.371E-04	6.86E+06
386000	22.93	1.444E-04	7.04E+06
389000	23.37	1.526E-04	7.25E+06
392000	23.83	1.619E-04	7.47E+06
395000	24.33	1.759E-04	7.64E+06
398000	24.85	1.940E-04	7.84E+06
401000	25.46	2.204E-04	8.06E+06
403000	25.91		
405000	26.40		
407000	26.97		

* ใช้วิธีการลดข้อมูลแบบ Incremental Polynomial Method แบบ 7 successive data point^[4]

ตาราง ง.2 ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากคลิปเกจ

จำนวนรอบ (cycle)	ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราการเติบโต ของรอยร้าวล้า* (mm/cycle)	พิสัยตัวประกอบ ความเข้มของความเค้น* ($MPa\sqrt{m}$)
1400	13.82		
11200	14.14		
19600	14.67		
30800	15.13	4.286E-05	4.78E+06
46200	15.67	4.196E-05	4.92E+06
60200	16.29	4.204E-05	5.00E+06
70000	16.77	4.293E-05	5.11E+06
86800	17.34	4.853E-05	5.23E+06
95200	17.89	5.735E-05	5.34E+06
105000	18.27	6.228E-05	5.51E+06
112000	18.86	7.093E-05	5.71E+06
119000	19.53	7.901E-05	5.86E+06
130200	20.16	9.344E-05	6.06E+06
135800	20.88	1.037E-04	6.19E+06
141700	21.54	1.268E-04	6.35E+06
147100	22.09	1.370E-04	6.70E+06
149800	22.52		
154300	23.43		
158800	23.90		

* ใช้วิธีการลดข้อมูลแบบ Incremental Polynomial Method แบบ 7 successive data point ^[4]

ภาคผนวก จ

ศัพท์เทคนิค

กรณีควบคุมภาระ	load – controlled
กรณีควบคุมระยะเคลื่อนตัว	displacement – controlled
การกระจายตัว	scatter
การแตกหักในสภาวะความเครียดระนาบ	plane strain fracture toughness
การแตกหักแบบเปราะ	brittle fracture
การแตกหักแบบเหนียว	ductile fracture
การเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ	unstable crack growth
เกจบล็อก	gage block
เกณฑ์การคราก	yield criteria
ครึ่งบริดจ์	half bridge
ความเครียด	strain
คอมพลายแอนซ์	compliance
ความต้านทานการแตกหัก	fracture toughness
ความเค้นคราก	yield stress
ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ขีดเริ่ม	threshold stress intensity factor range
ชุดไฮดรอลิก	hydraulic unit
ดิจิทัล	digital
ตัวประกอบความปลอดภัย	safety factor
ตัวประกอบความเข้มของความเค้น	stress intensity factor
ตัวประกอบทางเรขาคณิต	geometry factor
เต็มบริดจ์	full bridge
ไททานเนียมผสม	titanium alloy
นอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์,	normalize compliance

บริดจ์เดี่ยว	single bridge
ผลกระทบทางพลศาสตร์	dynamic response
แผ่นแบนขนาดไม่จำกัด	infinite plate
แผ่นพีกสาย	connector
พอร์ต	port
รอยร้าวทะลุความหนา	through – thickness crack
รอยร้าวล้าก่อนหน้า	fatigue precrack
รอยร้าวล้าเริ่มต้น	fatigue precracking
วิธีทดลอง	experimental method)
วิธีเชิงวิเคราะห์	analytical method
วิธีเชิงตัวเลข	numerical method
ส่วนควบคุม	controller
ส่วนควบคุมหลัก	main controller
ส่วนโค้งของขอบหน้ารอยร้าว	crack front curvature
สอบเทียบ	calibrate
สเตรนเกจ	strain gage
อลูมิเนียมผสม	aluminium alloy
อัตราการเพิ่มภาระ	loading rate
อัตราการปลดปล่อยพลังงาน	energy release rate
อัตราเพิ่มภาระ	loading rate
อะซิโตน	acetone
แอนะล็อก	analog

ภาคผนวก จ

วิธีการเก็บข้อมูลจากโปรแกรม^[1]

PCL – 818L : High – performance DAS card with programable gain

ข้อมูลจำเพาะ (specification)

- 1) Analog input (A/D converter : แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล)
 - จำนวน channel : 16 ช่องแบบ single – ended หรือ 8 ช่องแบบ differential
 - ความละเอียด : 12 bits
 - พิสัยขาเข้า (กระแสตรง) : $\pm 0.625, \pm 1.25, \pm 2.50, 5.0, \pm 10$
 - อัตราเร็วในการแปลง : สูงสุด 40 kHz
 - ความเที่ยงตรง : ± 0.01 เปอร์เซ็นต์
 - โหมดสั่งเริ่มทำงาน (Trigger mode) : Software trigger, Onboard programable pacer trigger, External trigger
- 2) Analog output (D/A converter ; แปลงสัญญาณ digital ไปเป็น analog)
 - จำนวน channel : 1 ช่อง
 - ความละเอียด : 12 bits
 - พิสัยขาออก : 0 – 5 โวลต์ หรือ 0 – 10 โวลต์ โดยมี reference –5 โวลต์ และ –10 โวลต์ ตามลำดับ
- 3) Programable timer/counter
 - IC ที่ใช้ : Intel 8254
 - Counter : มี 3 channel 16 bits (2 channel สำหรับ programmable pacer, 1 channel สำหรับ user)
 - Time base : Pacer channel 1 : 10 MHz หรือ 1 MHz (เลือกได้บน board)
Pacer channel 2 : นำ input มาจาก channel 1

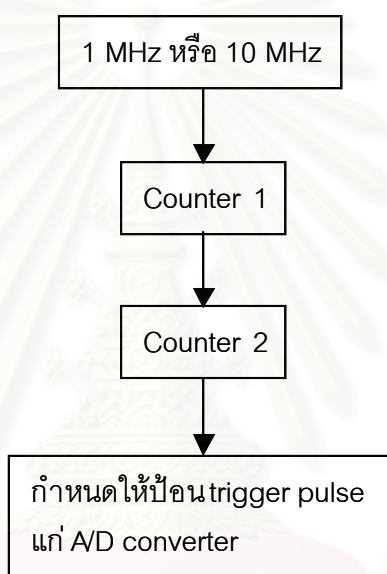
Pacer channel 0 : Internal 100 kHz

External 10 MHz

- Pacer output : 0.00023 Hz – 2.5 MHz

Programable timer/counter

PCL – 818L จะให้สัญญาณความถี่ 1 MHz หรือ 10 MHz และให้กับ Intel 8254 ซึ่ง Intel 8254 จะมี counter (16 bits) 3 อัน (อิสระต่อกัน) ในแต่ละ counter จะประกอบด้วย 1) clock input 2) control gate และ 3) output



Driver structure and programming

Standard driver สามารถทำหน้าที่ ต่อไปนี้

- 1) A/D conversion : แปลงสัญญาณ analog เป็น digital
- 2) Block scan : ทำ A/D conversion ของกลุ่มสัญญาณ input โดยมีช่วงเวลาเท่าๆ กัน
- 3) D/A conversion : แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
- 4) Digital input
- 5) Digital output
- 6) Counter/timer : วัด frequency; นับ event; pulse output; timer interval measurement; timed interrupt generation

ก่อนจะให้โปรแกรมประยุกต์ทำงาน จะต้อง load driver โดยพิมพ์ “ PCL – 818L” ส่วนการจะปลด driver ออกจาก memory ทำโดยการพิมพ์ “Free818L”

Analog to Digital conversion

Basic operation

1. Software data transfer

ฟังก์ชัน ที่ trigger A/D conversion ส่งผ่านข้อมูลไปยัง Buffer A จากนั้นจะรอ trigger pulse จากสัญญาณนาฬิกาบน board (เรียก internal) หรือ external trigger เมื่อ Buffer ได้รับสัญญาณกระตุ้น (pulse) ใดอย่างหนึ่งทีกล่าวนมา จะทำให้การแปลงข้อมูลครั้งถัดไปกระบวนการจะเกิดซ้ำๆ จนกระทั่งจำนวนข้อมูลที่ถูกแปลง N ถึงค่าที่ตั้งไว้ software data transfer จะไม่คืนการควบคุมให้ user จนกว่าจะทำการแปลงข้อมูลเสร็จตามจำนวนที่ตั้งไว้

2. DMA data transfer

ฟังก์ชันนี้จะทำให้การแปลง A/D เกิดขึ้นที่ฉากหลัง และส่งถ่ายข้อมูลผ่าน DMA data transfer ดังนั้นจึงคืนการควบคุมให้กับ user ทันที

เมื่อการ์ดทำการแปลงข้อมูลแต่ละครั้งจะส่งผ่านข้อมูลโดย DMA และจะหยุดทำงานภายหลังจำนวนข้อมูลที่แปลงถึงค่าที่ตั้งไว้

3. Interrupt data transfer

ฟังก์ชันนี้จะทำให้การแปลง A/D เกิดขึ้นที่ฉากหลัง และส่งผ่านข้อมูลโดย interrupt data transfer ดังนั้น จึงคืนการควบคุมให้ user ทันที

การ์ดจะทำการแปลง A/D ในแต่ละ timer หรือ external trigger pulse และทุกครั้งเมื่อแปลงเสร็จจะ generate interrupt ให้กับ PC Driver จะรับ interrupt นี้ และก็อบบี้ข้อมูลจากการ์ดไปยังหน่วยความจำการทำงานทั้งหมดจะสิ้นสุดเมื่อจำนวนข้อมูลที่แปลงถึงจำนวนที่ตั้งไว้

Note

1. ความเร็วของ 3 วิธี คือ

DMA > Interrupt > Software

2. โดยวิธี interrupt data transfer จะสามารถใช้ gain ที่ต่างกันในแต่ละ channel ได้

3. กรณี block scan (สัญญาณเข้ามีหลาย channel) นั้น driver จะ scan ข้อมูลได้จาก channel เริ่มต้นถึง channel สิ้นสุด (จบ 1 block) ก่อนจะกลับไป scan ข้อมูลที่ channel เริ่มต้นอีกครั้ง ซ้ำๆ เช่นนี้จนครบจำนวน block ที่ตั้งไว้

ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

แบบที่ 1 A/D conversion with software data transfer (non – cyclic mode)

- 1) set ค่าพารามิเตอร์ 0, 1, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17
(12 และ 13 เท่ากับศูนย์กรณี single driver)
- 2) เรียก ฟังก์ชัน 3 “PCL818L (3, parm[0])” เมื่อ ทำ initialize driver
(3 คือ ส่งค่าตัวเลขที่จะเรียกฟังก์ชัน)
(parm[0] คือ ตอบรับผลการเรียกฟังก์ชันโดยแสดง error message)
- 3) เรียกฟังก์ชัน 4 “PCL818L(4,param[0]) “ เพื่อทำการ intialize A/D
- 4) เรียกฟังก์ชัน เพื่อทำ A/D conveaion ด้วยวิธี software data transfer
- 5) ถ้าต้องการทำการแปลงข้อมูลอีก ให้แยกฟังก์ชัน 5 ซ้ำโดยไม่ต้องทำการ initialize อีก
การดัดแปลงอื่นๆ
 1. อ่านหลาย channel แต่มี gain เท่ากันในแต่ละ channel
 2. อ่านหลาย channel แต่มี gain ไม่เท่ากันในแต่ละ channel

ความหมาย

Param[0] = card number

Param[1] = base I/O address

Param[5] = pacer rate divider constant C_1

Param[6] = pacer rate divider constant C_2

Param[7] = trigger mode

Param[10] = A/D data buffer A address – offset

Param[11] = A/D data buffer A address – segment

Param[14] = Number of A/D conversions

Param[15] = A/D start channel

Param[16] = A/D stop channel

แบบที่ 2 A/D conversion with DMA data transfer

แบบที่ 3 A/D conversion with interrupt data transfer

แบบที่ 4 Block channel scan A/D conversion with software data transfer

แบบที่ 5 Block channel scan A/D conversion with interrupt data transfer

ใช้โปรแกรมที่ใช้ “ADTRIG4.PAS” จะใช้วิธีเขียนแบบที่ 4

คำอธิบายโปรแกรม

1. โปรแกรมกำหนดให้จำนวนข้อมูลที่แปลงสูงสุดที่ 900 ตัว (จำนวนchannel \times จำนวนข้อมูลที่แปลงในแต่ละ channel)
2. โปรแกรมกำหนดให้พิสัยของสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วง -10 ถึง 10 โวลต์ (ดูที่ V_{max} , V_{min} ในส่วน CONST)
3. สิ่งที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม
 - 1) ชื่อไฟล์ที่บรรจุรายละเอียดที่ต้องการไว้
 - 2) Pacer constant ตัวที่ 1
 - 3) Pacer constant ตัวที่ 2
 - 4) จำนวนข้อมูลที่แปลง (เท่ากับจำนวน channel คูณกับจำนวนข้อมูลที่แปลงในแต่ละ channel)
 - 5) Channel เริ่มต้น
 - 6) Channel สิ้นสุด
 - 7) จำนวนบล็อค
 - 8) ตัวอักษรที่จะวางไว้หน้าจำนวนรอบที่เก็บข้อมูลนั้น
 - 9) หมายเลขของรอบที่ต้องการเก็บข้อมูล (จะมีจำนวนบรรทัดเท่ากับจำนวนบล็อค)

```

{ *****
* Program   : ADTRIG4.PAS                               *
* Description : Demo program for PCL-818L pacer trigger A/D *
*             conversion with software data transfer.     *
***** }

```

Program PCL;

Uses Crt,Dos;

Var

Param : array[0..60] of word;

Data : array[0..1200] of integer; {Size of conversion data buffer}

Gain : array[0..7] of integer; {Size of gain array table buffer}

Func : integer;

{\$L 818LTPF}

{\$F+}

Procedure PCL818L(func:integer;var param:word);external;

Const

Vmax = 10;

Vmin = -10;

VAR

i, j, N : Integer;

Pacer1, Pacer2 : Integer;

StrtChan, StopChan : Integer;

ScanChan : Integer;

Interval : Real;

St : String[8];

DataBuf1 : Real;

DataBuf2 : Real;

DataBuf3 : Real;

```

DataBuf4      : Real;
NumConv       : Integer; {Number of A/D Conversion}
NumBlock      : Integer; {Number of data block}
NumRepeat     : Integer;
BlockNo       : Array[0..50] of Integer;
InFName       : Text;
OutFName      : Text;
FName1, FName2 : String[10];
Hr,Min,Sec,Sec100 : Word;
Period        : Real; {Period of the waveform}
Remain        : Integer;
NumCyc        : Integer; {Number of cycles require to sampling each time}

BEGIN
  Clrscr;
  Write('Enter Filename : '); ReadLn(FName1);
  Assign(InFName,FName1);
  Reset(InFName);

  {Start reading the data}

  ReadLn(InFName, Pacer1);
  ReadLn(InFName, Pacer2);
  ReadLn(InFName, NumConv);
  ReadLn(InFName, StrtChan);
  ReadLn(InFName, StopChan);
  ReadLn(InFName, NumBlock);
  ReadLn(InFName, FName2);

  For i := 1 to NumBlock do
    Begin

```

```
ReadIn(InFName,BlockNo[i]);
```

```
End;
```

```
ReadIn(InFName, Period);
```

```
ReadIn(InFName, NumCyc);
```

```
Param[0] := 0;      { Board number }
```

```
Param[1] := $300;   { Base I/O address }
```

```
Param[5] := Pacer1; { Pacer Rate = 1MHz/R1 }
```

```
Param[6] := Pacer2; { Pacer Rate = 1MHz/R1*R2 }
```

```
Param[7] := 0;      { Internal trigger }
```

```
Param[10] := ofs(data[0]); { Offset of A/D data in buffer A }
```

```
Param[11] := seg(data[0]); { Segment of A/D data in buffer A }
```

```
Param[12] := 0;     { Buffer B, 0 : Not used }
```

```
Param[13] := 0;     { Buffer B, 0 : Not used }
```

```
Param[14] := NumConv; { Number of A/D conversion }
```

```
Param[15] := StrtChan; { Start channel }
```

```
Param[16] := StopChan; { Stop channel }
```

```
Param[17] := 255;    { Gain code specified by user : +/- 10V }
```

```
Gain[0] := 1;        { 2 times }
```

```
Gain[1] := 3;        { 8 times }
```

```
Gain[2] := 2;        { 4 times }
```

```
param[18] := ofs(Gain);
```

```
param[19] := seg(Gain);
```

```
ScanChan := StopChan-StrtChan+1;
```

```
{Hardware Initialization-----}
```

```
Func := 3;
```

```
PCL818L(Func, param[0]);
```

```
  If (param[45] <> 0) then
```

```

Begin
  Writeln('DRIVER INITIALIZATION FAILED !');
  Exit;
End;

```

```
{A/D Block Initialization-----}
```

```

Func := 100;
PCL818L(Func, param[0]);
If (param[45] <> 0) then
  Begin
    Writeln('A/D INITIALIZATION FAILED !');
    exit;
  End;

```

```
{Data Sampling -----}
```

```

For j := 1 to NumBlock do
  Begin
    Str(Numcyc*(BlockNo[j]-1)+1,St);
    Assign(OutFName,FName2 + St);
    Rewrite(OutFName);

    {Get and write time at the beginning of sampling}
    Writeln(OutFName,'Cycle No. ',BlockNo[j]);
    Gettime(Hr,Min,Sec,Sec100);
    Writeln(OutFName,'Start : ',Hr,':',Min,':',Sec,':',Sec100,' ');

```

```
{N times of A/D trigger: N = NumConv}
```

```

Func := 101;
PCL818L(Func, param[0]);
If (param[45] <> 0) then

```



```

Begin
  writeln(' A/D SOFTWARE DATA TRANSFER FAILED !');
  exit;
End;

```

{Get and write time at the end of sampling}

```

Gettime(Hr,Min,Sec,Sec100);
Writeln(OutFName,'Stop : ',Hr,':',Min,':',Sec,':',Sec100,' ');

```

{Display & Write data to File-----}

Case ScanChan of

1 : Begin

```

  For i := 0 to trunc(NumConv/ScanChan)-1 do

```

```

    Begin

```

```

      DataBuf1 := data[i] AND $FFF;

```

```

      DataBuf1 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf1)/4096 - Vmax;

```

```

      Write('No.',i:3,'= ', DataBuf1:7:4,' ');

```

```

      Writeln;

```

```

      Write(OutFName,'No.',i:3,'= ', DataBuf1:7:4,' ');

```

```

      Writeln(OutFName);

```

```

    End;

```

```

    Close(OutFName);

```

```

  End;

```

2 : Begin

```

  For i := 0 to trunc(NumConv/ScanChan)-1 do

```

```

    Begin

```

```

      DataBuf1 := data[2*i] AND $FFF;

```

```

      DataBuf2 := data[2*i+1] AND $FFF;

```

```

      DataBuf1 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf1)/4096 - Vmax;

```

```

      DataBuf2 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf2)/4096 - Vmax;

```

```

      Write('No.',(2*i):3, '= ', DataBuf1:7:4,' ');

```

```

Write('No.',(2*i+1):3,'= ', DataBuf2:7:4,' ');
Writeln;
Write(OutFName,'No.',(2*i):3, '= ', DataBuf1:7:4,' ');
Write(OutFName,'No.',(2*i+1):3,'= ', DataBuf2:7:7,' ');
Writeln(OutFName);
End;
Close(OutFName);
End;
3 : Begin
  For i := 0 to trunc(NumConv/ScanChan)-1 do
    Begin
      DataBuf1 := data[3*i] AND $FFF;
      DataBuf2 := data[3*i+1] AND $FFF;
      DataBuf3 := data[3*i+2] AND $FFF;
      DataBuf1 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf1)/4096 - Vmax;
      DataBuf2 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf2)/4096 - Vmax;
      DataBuf3 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf3)/4096 - Vmax;
      Write('No.',(3*i):3, '= ', DataBuf1:7:4,' ');
      Write('No.',(3*i+1):3,'= ', DataBuf2:7:4,' ');
      Write('No.',(3*i+2):3,'= ', DataBuf3:7:4,' ');
      Writeln;
      Write(OutFName,'No.',(3*i):3, '= ', DataBuf1:7:4,' ');
      Write(OutFName,'No.',(3*i+1):3,'= ', DataBuf2:7:7,' ');
      Write(OutFName,'No.',(3*i+2):3,'= ', DataBuf3:7:4,' ');
      Writeln(OutFName);
    End;
  Close(OutFName);
End;
4 : Begin
  For i := 0 to trunc(NumConv/ScanChan)-1 do
    Begin

```

```

DataBuf1 := data[4*i] AND $FFF;
DataBuf2 := data[4*i+1] AND $FFF;
DataBuf3 := data[4*i+2] AND $FFF;
DataBuf4 := data[4*i+3] AND $FFF;
DataBuf1 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf1)/4096 - Vmax;
DataBuf2 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf2)/4096 - Vmax;
DataBuf3 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf3)/4096 - Vmax;
DataBuf4 := ((Vmax-Vmin)*DataBuf4)/4096 - Vmax;
Write('No.',(4*i):3, '= ', DataBuf1:7:4, ' ');
Write('No.',(4*i+1):3, '= ', DataBuf2:7:4, ' ');
Write('No.',(4*i+2):3, '= ', DataBuf3:7:4, ' ');
Write('No.',(4*i+3):3, '= ', DataBuf4:7:4, ' ');
Writeln;
Write(OutFName,'No.',(4*i):3, '= ', DataBuf1:7:4, ' ');
Write(OutFName,'No.',(4*i+1):3, '= ', DataBuf2:7:4, ' ');
Write(OutFName,'No.',(4*i+2):3, '= ', DataBuf3:7:4, ' ');
Write(OutFName,'No.',(4*i+3):3, '= ', DataBuf4:7:4, ' ');
Writeln(OutFName);
End;
Close(OutFName);
End;
End; {Case}
Writeln('Completed cycle No. ',BlockNo[j]);

If j < NumBlock then
  Interval := ((BlockNo[j+1]-BlockNo[j])-1)*period*1000
else
  Interval := 0;

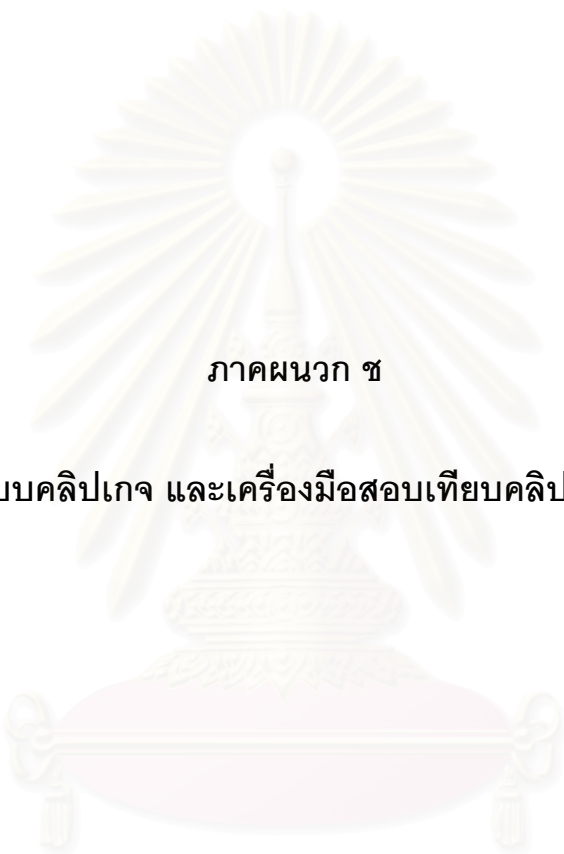
NumRepeat := Trunc(Interval/60000);
Remain := Trunc(Interval - NumRepeat*60*1000);

```

```
Writeln(NumRepeat);  
If Interval <> 0 then  
  begin  
    For i := 1 to NumRepeat do  
      Delay(60000);  
      Delay(Remain);  
    end;  
  End; {For}  
END.
```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

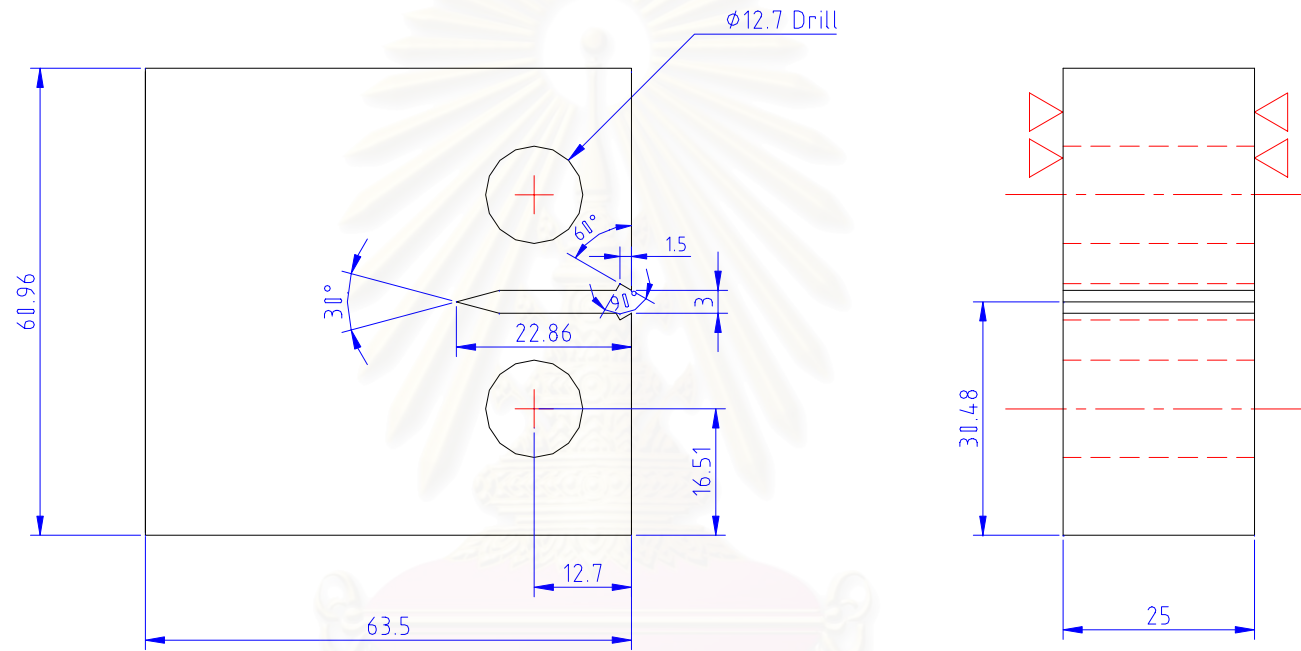


ภาคผนวก ช

แบบคลิปเกจ และเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

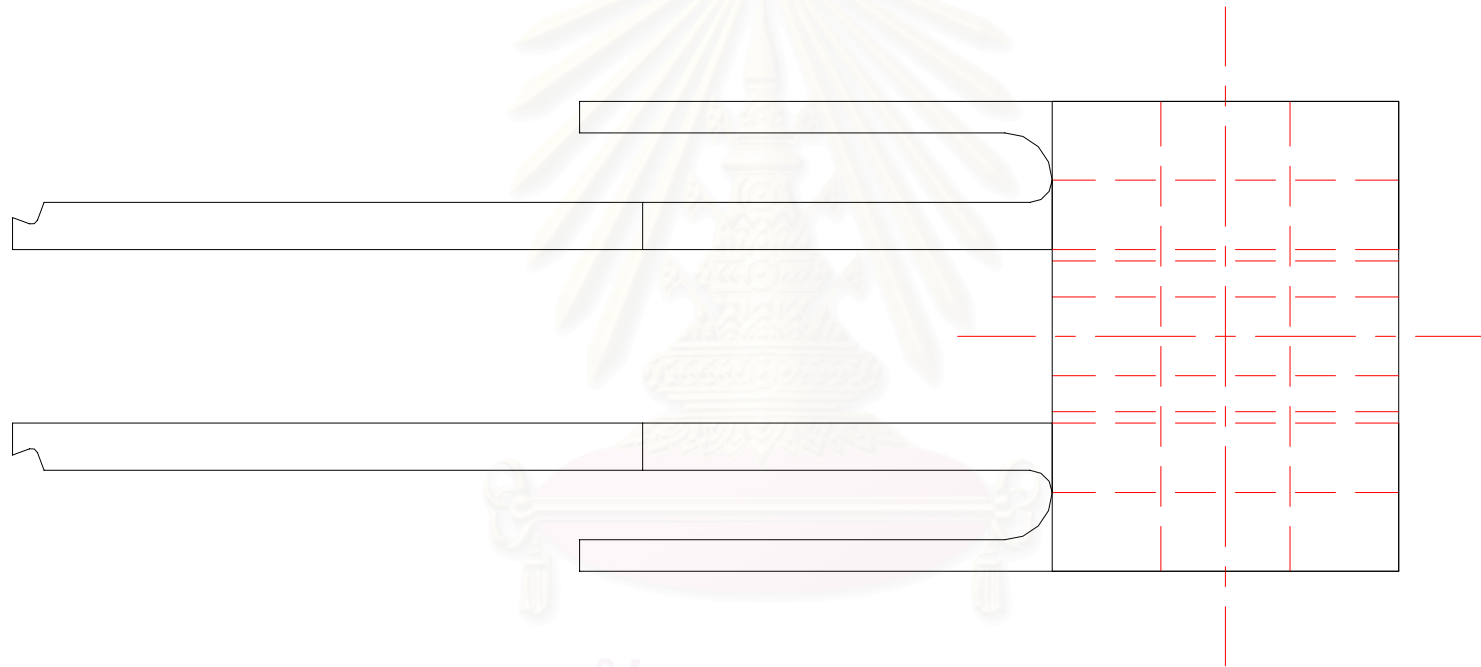
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช.1 ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว



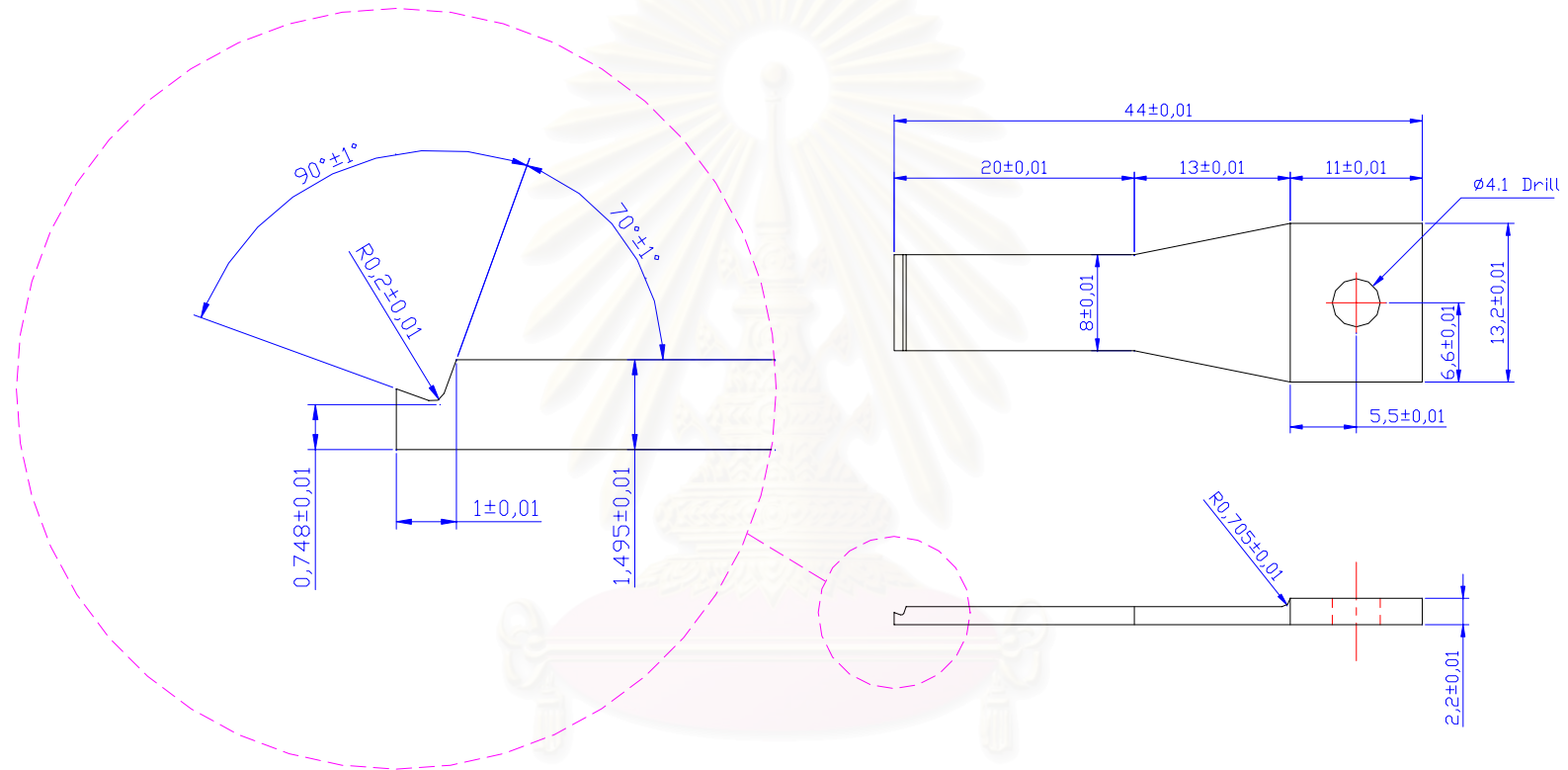
CT Specimen, Aluminium Alloy, 10 pcs.
SCALE 1:1

ช.2 แบบประกอบคลิปเกจ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

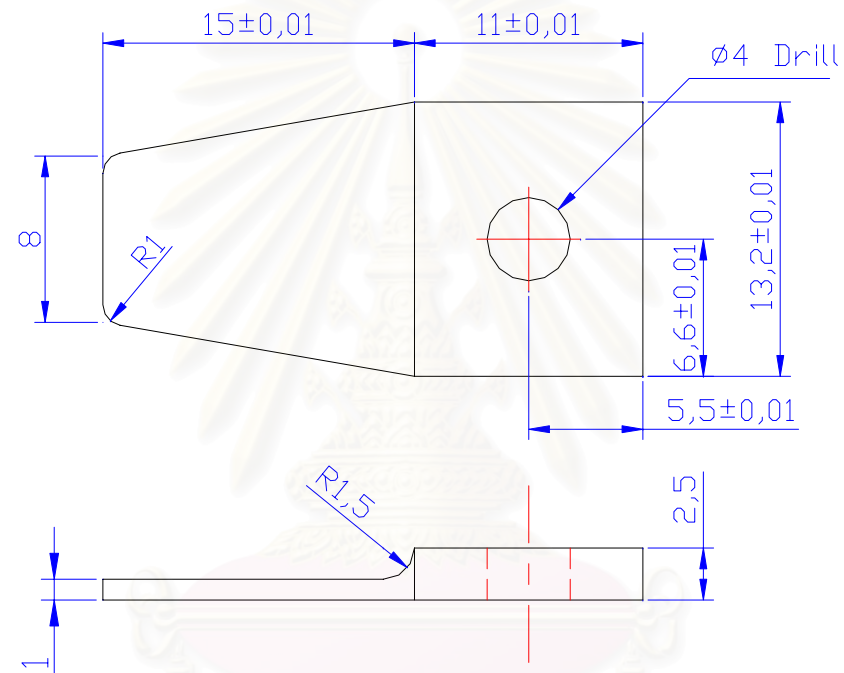
ช.3 คานคลิปเกจ



Clip Gages, Aluminium Alloy,
2 pcs., SCALE 2:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

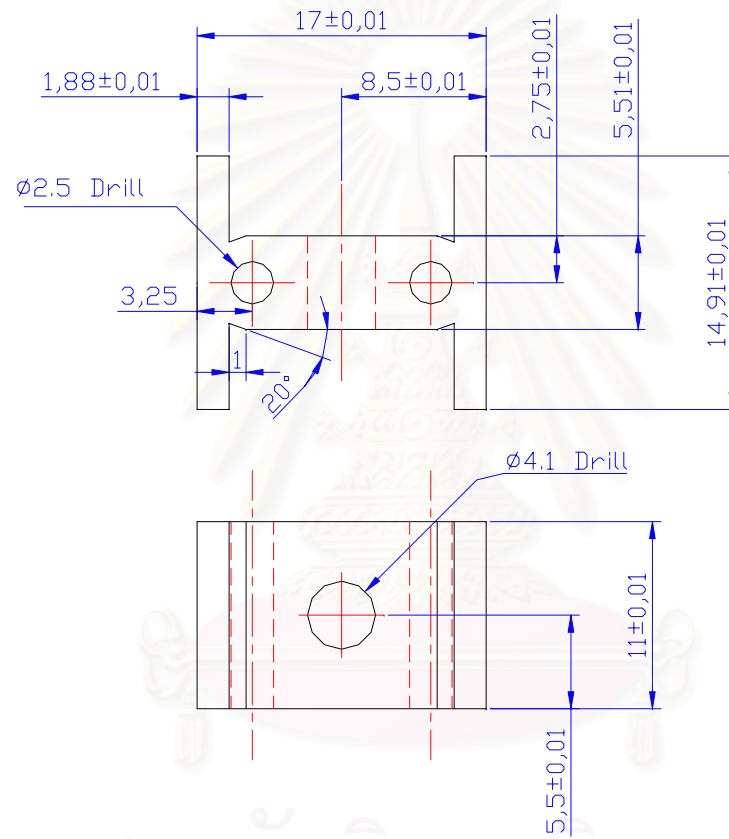
ช.4 แผ่นป้องกันสเตรนเกจ



Cover Gages, Aluminium Alloy,
2 pcs., SCALE 4:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

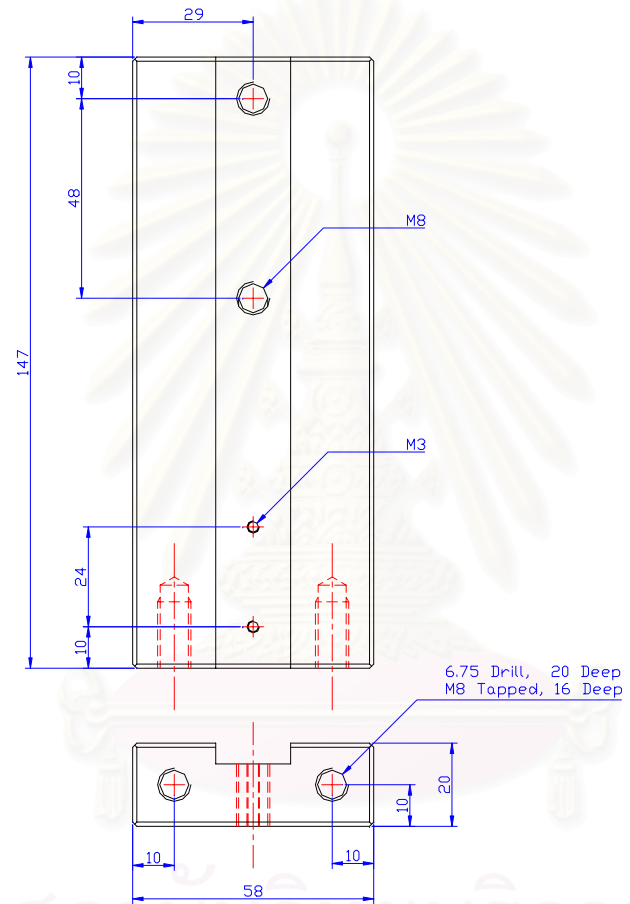
Ø1.5 spacer block



Spacer Block, Aluminium Alloy,
1 piece, SCALE 4:1

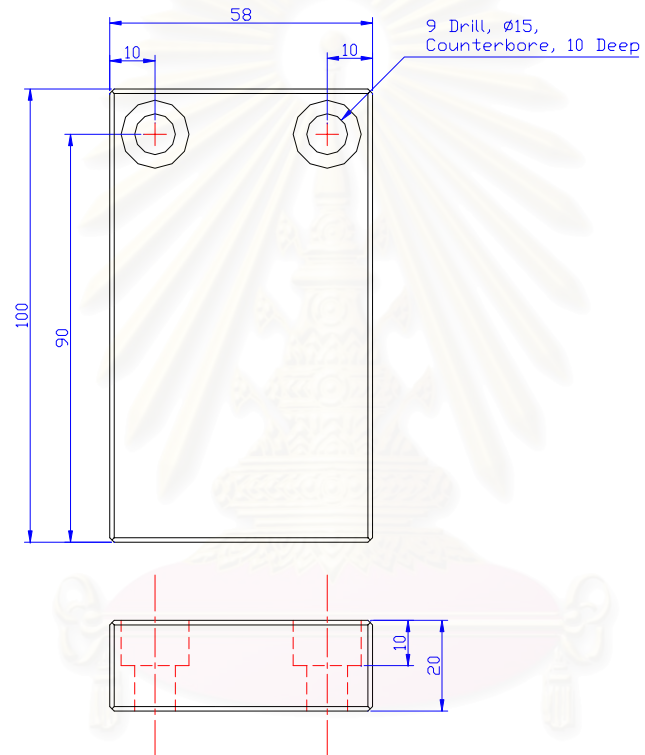
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช.6 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 1



Base1, stainless steel, 1 piece SCALE 1:1
Note All chamfer are 1X45°

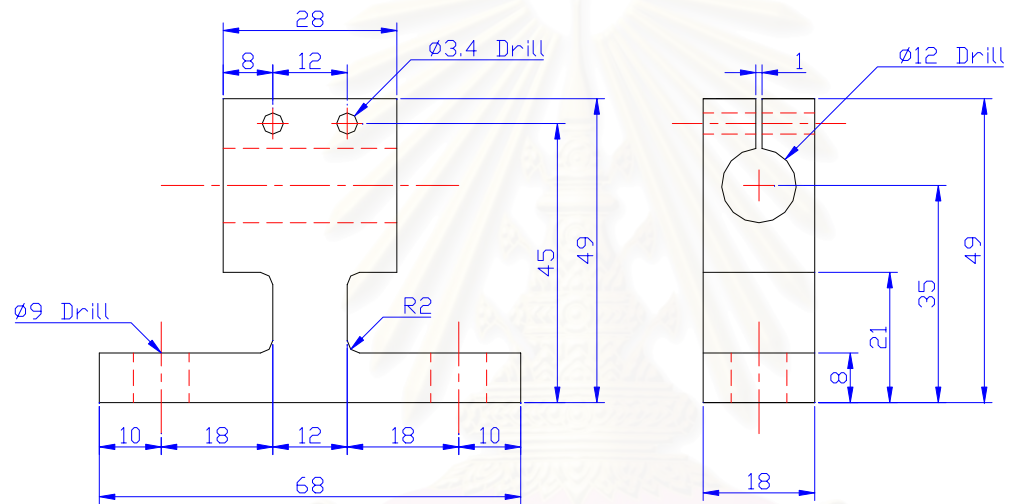
ช.7 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 2



Base2, stainless steel, 1 piece SCALE 1:1
Note All chamfer are 1X45°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

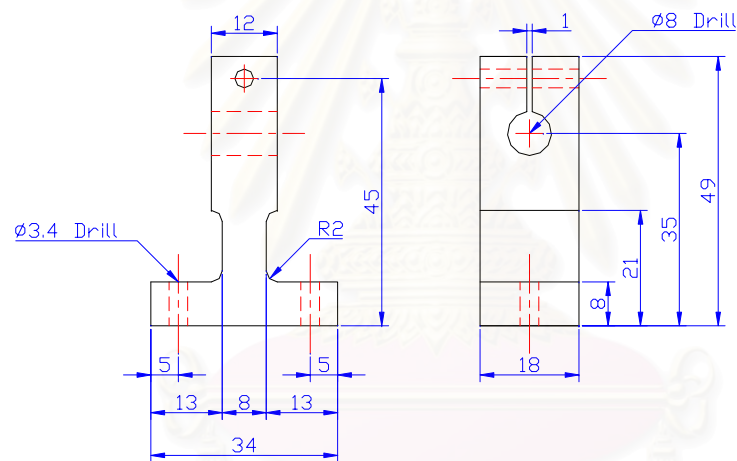
ช.8 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 3



Base3, stainless steel, 1 piece SCALE 1:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

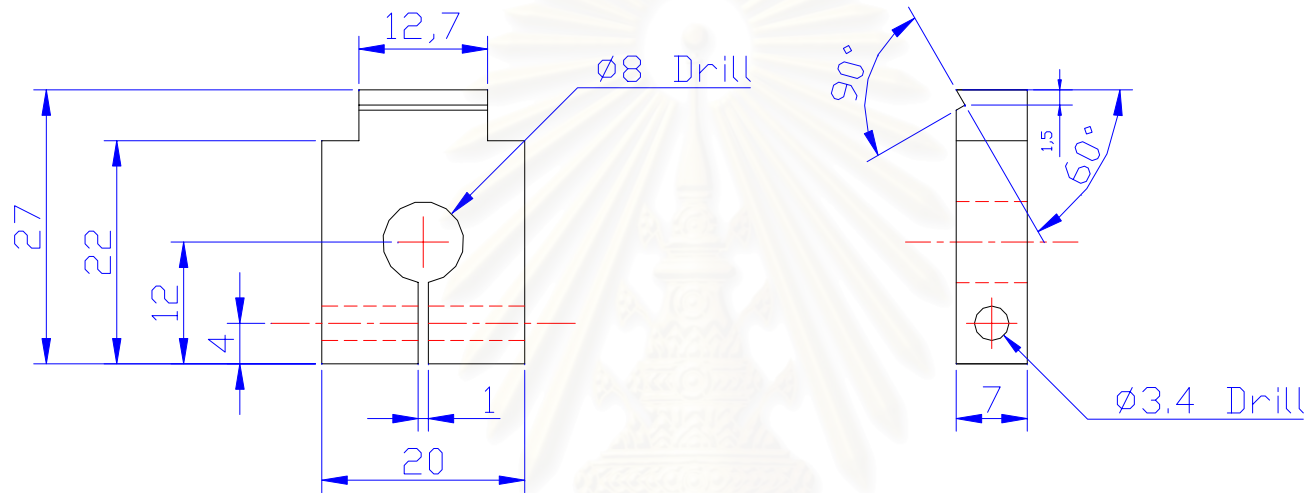
ช.9 ฐานเครื่องมือสอบเทียบ ชั้นที่ 4



Base4, stainless steel, 1 piece SCALE 1:1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซ.10 Grip ติดตั้งคลิปเกจ



Grip, stainless steel, 2 pcs. SCALE 2:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ

การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ

การจะทราบขนาดของคลิปเกจได้ ต้องพิจารณาถึง วัสดุ ชนิด และขนาดของชิ้นงานทดสอบ รวมทั้งสภาวะทดสอบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงพิสัยการวัด และความไวของคลิปเกจที่ต้องการ การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) กำหนดวัสดุ ชนิด และขนาดชิ้นงานทดสอบ

การกำหนดวัสดุ ชนิด และขนาดชิ้นงานทดสอบ แสดงในบทที่ 4 ผลการออกแบบ และการสร้างคลิปเกจ ขั้นตอนที่ 7

2) กำหนดขอบเขตเพื่อการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ

2.1) ขอบเขตความเค้นครากของวัสดุที่ใช้ทำคลิปเกจ

เมื่อนำคลิปเกจไปใช้งานจะต้องไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของคลิปเกจเกิดการครากขึ้น ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดให้มีความเค้นได้ไม่เกิน 75% ของความเค้นครากของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 จากสมการความเค้นที่เกิดกับคาน จากสมการที่ 3.1 จะได้

$$6 \cdot \frac{P_{\max} \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \leq \sigma_{allow} \quad (\text{ซ.1})$$

โดยที่ P_{\max} คือ แรงสูงสุดที่มือสามารถบีบคลิปเกจได้

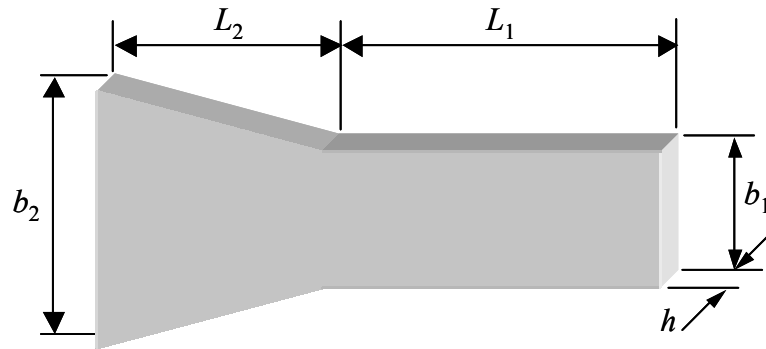
σ_{allow} คือ ความเค้นที่ยอมรับได้²

b_1, h, L_1 คือ มิติของคานคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู ดังแสดงในรูปที่ ซ.1

¹ ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนด P_{\max} เท่ากับ 31.7 นิวตัน จากการคำนวณจากเอกสารอ้างอิง [3]

² ในที่นี้ กำหนดให้ σ_{allow} มีค่าเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นคราก ดังนั้นสำหรับอลูมิเนียมผสม 7075 - T651 จะได้

σ_{allow} เท่ากับ 345 MPa



รูปที่ ๗.1 มิติของคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู

2.2) ขอบเขตความไวของคลิปเกจ

ความไวของคลิปเกจที่ต้องการ มีวิธีการคำนวณดังนี้

2.2.1) ค่าแรงพิสัยภาระต่ำสุด ΔP_{\min} ที่ทำให้รอยร้าวไม่เติบโต จากพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม ΔK_{th}

พิสัยภาระต่ำสุดกำหนดได้จากพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ และพิสัยของตัวประกอบความเข้มของความเค้น จากสมการ ASTM E399^[3]

$$\Delta K_{th} = \left(\frac{\Delta P_{\min}}{B\sqrt{W}} \right) \left\{ \frac{\left(2 + \frac{a}{W} \right)}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \right\} \quad (๗.2)$$

โดยที่

ΔK_{th} คือ พิสัยของตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม

ΔP_{\min} คือ พิสัยของภาระกระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ทำให้เกิด ΔK_{th}

B คือ ความหนาชิ้นงานทดสอบ

W คือ ความกว้างชิ้นงานทดสอบ

a คือ ความยาวรอยร้าวที่เริ่มต้นเก็บข้อมูล

ในวิทยานิพนธ์นี้ ทำการทดสอบกับชิ้นงานทดสอบแบบ CT ทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 จะได้

$$\Delta K_{th} = 4 \text{ MPa}\sqrt{m}^{[13]}$$

$$B = 25 \text{ mm}$$

$$W = 50.8 \text{ mm}$$

$$a = 13.16 \text{ mm}$$

แทนค่าทั้งหมดในสมการที่ ๕.2 จะได้ พิสัยของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ ΔP_{\min} ที่ทำให้เกิด ΔK_{th} คือ

$$\Delta P_{\min} = 4466 \text{ N} \quad (๕.3)$$

จากนั้นทำการคำนวณหา ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว ΔV_m ที่เกิดจาก ΔP_{\min}

2.2.2) คำนวณหาระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว ΔV_m ที่เกิดจาก ΔP_{\min}

สามารถคำนวณระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวที่เกิดจาก ΔP_{\min} ได้จากสมการของ ASTM E399 ดังนี้

$$\Delta V_m = \frac{\Delta P_{\min}}{E'B} \left\{ \left[\frac{19.75}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^2} \left[0.5 + 0.192\left(\frac{a}{W}\right) + 1.385\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2.919\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1.842\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \right] \right\} \quad (๕.4)$$

โดยที่

$$\Delta P_{\min} = 4466 \text{ N} \text{ (จากสมการที่ ๕.3)}$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} = \frac{68 \times 10^9}{1 - 0.3^2} = 74.73 \text{ GPa}$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ ๕.4 จะได้ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าว ΔV_m คือ

$$\Delta V_m = 0.0516 \text{ mm} \quad (๕.5)$$

เมื่อได้ ΔV_m จากนั้นนำไปคำนวณหาระยะโก่งของคานคลิปเกจ ซึ่งนำไปสู่ความไวของคลิปเกจที่ต้องการได้ (ความไวของคลิปเกจ คือ อัตราส่วนความเครียดกับระยะโก่งของคานคลิปเกจ)

2.2.3) คำนวณหาความไวของคลิปเกจที่ต้องการ

จากนิยามความไวของคลิปเกจ คือ อัตราส่วนของความเครียดที่เกิดกับสเตรนเกจ กับ ระยะโค้งของคานคลิปเกจ โดยความไวที่ต้องการขึ้นอยู่กับความสามารถของ 1. การ์ดเปลี่ยนสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Card) ที่สามารถตรวจวัดความแตกต่างของความต่างศักย์ได้ 2. จำนวนจุดที่ต้องการใน 1 รอบของความถี่

โดยความไวของคลิปเกจ S สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\varepsilon_G}{\frac{\Delta V_m}{2}} \cdot \frac{\text{Data}}{2} = \frac{\varepsilon_G}{\Delta V_m} \cdot \text{Data} \quad (\text{ท.6})$$

โดยที่

ε_G คือ ความเครียดที่การ์ดเปลี่ยนสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลสามารถตรวจวัดได้

ΔV_m คือ ระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวน้อยสุดที่เริ่มทำการเก็บข้อมูล

Data คือ จำนวนจุดที่ต้องการใน 1 รอบของการเติบโตรอยร้าว

จากสมการที่ 3.6 และ ท.6 จะได้ความไวของคลิปเกจ คือ

$$S = \frac{\varepsilon_G}{\Delta V_m} \cdot \text{Data} = \frac{\Delta E_{A/D}}{G \cdot E_i \cdot \Delta V_m} \cdot \text{Data} \quad (\text{ท.7})$$

โดยที่ $\Delta E_{A/D}$ คือ ความละเอียดของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่การ์ด A/D สามารถวัดได้

เนื่องจากสเตรนมิเตอร์มีอัตราการขยายของสัญญาณออก 50 เท่า และการ์ด A/D เขียนโปรแกรมเพื่อเพิ่มอัตราการขยายเป็น 8 เท่า จากสมการที่ ท.7 จะได้ความไวของคลิปเกจ คือ

$$S = \frac{1}{50 \cdot 8} \frac{\Delta E_{A/D}}{G \cdot E_i \cdot \Delta V_m} \cdot \text{Data} \quad (\text{ท.8})$$

โดยที่

$$\Delta E_{A/D} = \frac{20}{2^{12}} = 4.88 \times 10^{-3} \text{ โวลต์}$$

$$G = 2.10$$

$$E_i = 4 \text{ โวลต์}$$

$$\Delta V_m = 0.0516 \text{ มม. (สมการที่ ท.5)}$$

$$\text{Data} = 20 \text{ จุด}$$

ดังนั้น จะได้ความไวที่คลิบเกจต้องการ คือ

$$S = 5.63 \times 10^{-4} \frac{1}{mm} \quad (\text{ข.9})$$

2.3) ขอบเขตพิสัยการวัด

พิสัยการวัดของคลิบเกจ พิจารณาจากการทดสอบสภาวะที่ทำให้เกิดระยะเปิดหน้าปาก รอยร้าวมากที่สุด โดยระยะเปิดหน้าปากรอยร้าวจะเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อทำการทดสอบความต้านทานการแตกหักโดยใช้ ชิ้นงานทดสอบที่มีความยาวรอยร้าวมากที่สุด ก่อนที่จะคำนวณขอบเขตพิสัยการวัด ต้องคำนวณภาระกระทำขณะที่เกิดความต้านทานการแตกหัก (P_Q) ซึ่งได้จากสมการ ASTM E399

$$P_Q = \frac{K_Q B \sqrt{W}}{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) + 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]} \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่

- K_Q คือ ค่าความต้านทานการหักของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 มีค่า $29 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$
- B คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ 25 mm
- W คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ 50.8 mm
- a คือ ความยาวรอยร้าวมากที่สุดที่ต้องการทดสอบคือ $0.8W$

จากนั้นจะนำค่า P_Q ไปแทนค่าในสมการ ASTM E399 เพื่อหาพิสัยการวัดของคลิบเกจ (*Range*)

$$\text{Range} = \frac{P_Q}{EB} \left[\frac{19.75}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^2} \left[0.5 + 0.192 \left(\frac{a}{W}\right) + 1.385 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2.919 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1.842 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \right] \quad (\text{ข.11})$$

โดยที่

- E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651 มีค่า 68 GPa

ดังนั้นจะสามารถหาพิสัยการวัดของคลิปเกจ (*Range*) ที่ต้องการ คือ 0.839 mm แต่ค่าที่กำหนดนี้เป็นการกำหนดโดยใช้ช่วงฮิสโตแกรมมาพิจารณาเพียงอย่างเดียว ไม่ได้พิจารณาในช่วงพลาสติก ดังนั้น จึงต้องมีพิสัยการวัดที่ทำการเพื่อสำหรับช่วงพลาสติก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดไว้ว่า ต้องการไม่ต่ำกว่า 4 มม. ดังนั้นจะได้

$$\text{ขอบเขตพิสัยการวัด} \quad \text{Range} \geq 4 \text{ mm} \quad (\text{ข.12})$$

2.4) ขอบเขตการเสียหายเนื่องจากความล้าของคลิปเกจ และกาวติดสเตรนเกจ

2.4.1) พิจารณาขอบเขตการเสียหายเนื่องจากความล้าของคานคลิปเกจ

จากสมการของ Goodman^[12]

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_U} = 1 \quad (\text{ข.13})$$

โดยที่

σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย

σ_e คือ endurance limit ที่ σ_m ใดๆ ของอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

σ_{er} คือ endurance limit ที่ $\sigma_m = 0$ ของอลูมิเนียมผสม 7075 - T651

σ_U คือ ความต้านทานสูงสุด

จากสมการที่ 3.6 จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{(P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1 \cdot \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h^3} = \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2}$$

$$\sigma_e = \frac{(P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1 \cdot \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h^3} = \frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2}$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ ข.13 ได้ขอบเขตการเสียหาย เนื่องจากความล้าของคานคลิปเกจ คือ

$$\frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \leq \sigma_{ar} \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\sigma_U \cdot b_1 \cdot h^2} \right] \quad (\text{ข.14})$$

2.4.2) พิจารณาขอบเขตการเสียหายเนื่องจากความล้าของสเตรนเกจ

จากสมการของ Goodman ^[12]

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_U} = 1 \quad (\text{ข.15})$$

โดยที่

- σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
- σ_e คือ endurance limit ที่ σ_m ใดๆ
- σ_{er} คือ endurance limit ที่ $\sigma_m = 0$
- σ_U คือ ความต้านทานสูงสุด

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้กาวติดสเตรนเกจแบบ CC – 33A จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2}$$

$$\sigma_e = \frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2}$$

แทนค่าในสมการที่ ข.15 จะได้ขอบเขตความล้าของสเตรนเกจ คือ

$$\frac{3 \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{E \cdot b_1 \cdot h^2} \leq \varepsilon_{er} \cdot \left[1 - \frac{3(P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\varepsilon_U \cdot E \cdot b_1 \cdot h^2} \right] \quad (\text{ข.16})$$

2.5) ขอบเขตทางด้านรูปร่างคลิปเกจ

คลิปเกจที่ออกแบบ และสร้างจะต้องวัดชิ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 2 นิ้ว ความหนา 1 นิ้ว ได้อย่างสะดวก และเหมาะสม ซึ่งมีขอบเขตทางด้านรูปร่าง ดังนี้

2.5.1) จับยึดชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม และไม่เกินความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

$$8 \text{ mm} \leq b_1 \leq 25 \text{ mm} \quad (\text{ข.17})$$

2.5.2) ความสามารถขึ้นรูปได้บางที่สุด และสามารถติดตั้งชิ้นงานอย่างสะดวก

$$1.0 \text{ mm} \leq h \leq 1.5 \text{ mm} \quad (\text{ข.18})$$

2.5.3) พื้นที่การจับคลิปเกจ

$$20 \text{ mm} \leq L_1 \quad (\text{ข.19})$$

2.5.4) พื้นที่การติดสเตรนเกจ

$$13 \text{ mm} \leq L_2 \quad (\text{ข.20})$$

2.5.5) รูปร่างที่เหมาะสม

$$\frac{L_1}{L_2} \geq 1.5 \quad (\text{ข.21})$$

3) คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจจากโปรแกรม MathCad

สมบัติของวัสดุอลูมิเนียมผสม 7075 – T651

โมดูลัสความยืดหยุ่น

$$E = 68 \text{ GPa}^3$$

ความเค้นคราก

$$\sigma_Y = 461 \text{ MPa}^4$$

ขีดจำกัดความล้าที่อัตราส่วนภาระเป็นศูนย์

$$\sigma_{ar} = 160 \text{ MPa}^{[10]}$$

ความเค้นสูงสุด

$$\sigma_U = 500 \text{ MPa}^4$$

ค่าอื่นๆ

แรงบีบสูงสุด

$$P_{\max} = 31.7 \text{ N}$$

แรงยึดของคลิปเกจกับชิ้นงานทดสอบต่ำสุด

$$P_{\min} = 10 \text{ N}$$

$$\varepsilon_{UC} = 8000 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_{arC} = 1500 \mu\varepsilon$$

$$\text{Range} = 4 \text{ mm}$$

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีความไวสูงสุด

ความไวที่ต้องการ⁵

$$S = \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{(2 \cdot L_1^2 + 6 \cdot L_1 \cdot L_2 + 3 \cdot L_2^2)} \quad (\text{ข.22})$$

³ ข้อมูลจากการทดสอบจริง

⁴ ข้อมูลจากบริษัทผู้นำเข้า

⁵ อธิบายอย่างละเอียดในภาคผนวก ญ

ขอบเขต

จากสมการที่ ๗.1 ขอบเขตความเค้นคราก

$$6 \frac{P_{\max} \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \leq 0.75 \cdot \sigma_y$$

จากสมการที่ ๗.12 และ ๗.2 ขอบเขตพิสัยการวัด

$$4 \cdot \frac{P_{\max} \cdot L_1}{E \cdot h^3 \cdot b_1} \cdot (2 \cdot L_1^2 + 6 \cdot L_1 \cdot L_2 + 3 \cdot L_2^2) \geq Range$$

จากสมการที่ ๗.14 ขอบเขตความล้าของคานคลิปเกจ

$$3 \cdot \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{b_1 \cdot h^2} \leq \sigma_{ar} \left[1 - \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\sigma_U \cdot b_1 \cdot h^2} \right]$$

จากสมการที่ ๗.16 ขอบเขตความล้าของสเตรนเกจ

$$3 \cdot \frac{(P_{\max} - P_{\min}) \cdot L_1}{b_1 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{E} \leq \varepsilon_{arC} \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot (P_{\max} + P_{\min}) \cdot L_1}{\varepsilon_{UC} \cdot b_1 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{E} \right]$$

จากสมการที่ ๗.17 ~ ๗.21 ขอบเขตด้านรูปร่างของคลิปเกจ

$$8 \cdot mm \leq b_1 \leq 25 \cdot mm$$

$$1 \cdot mm \leq h \leq 1.5 \cdot mm$$

$$20 \cdot mm \leq L_1$$

$$13 \cdot mm \leq L_2$$

$$\frac{L_1}{L_2} \geq 1.5$$

จากขอบเขตที่มีทั้งหมด นำมาทำกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดจากโปรแกรมสำเร็จรูป

MathCad โดยกำหนดให้คลิปเกจมีค่าความไวสูงสุดซึ่งจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$b_1 = 8 \text{ mm}$$

$$b_2 = 13.2 \text{ mm}$$

$$L_1 = 20 \text{ mm}$$

$$L_2 = 13 \text{ mm}$$

$$h = 1.495 \text{ mm}$$

แบบรายละเอียดของ คานคลิปเกจคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงดังรูปที่ ช.3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฅ

ขอบเขตความเชื่อมั่นของ ความชันสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ^[18]

ขอบเขตความเชื่อมั่นของความชันสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ได้แก่

ขอบเขตบน คือ $m + t_{0.000025} \cdot s$

ขอบเขตล่าง คือ $m - t_{0.000025} \cdot s$

โดยที่ m คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

$t_{0.000025}$ คือ การแจกแจงแบบสตีวเดนท์ t ที่ความเชื่อมั่น 99.995 เปอร์เซนต์

s คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยที่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน s คำนวณได้จาก ความแปรปรวน s^2 ดังสมการต่อไปนี้

$$s^2 \left(\frac{da}{dN}, \Delta K \right) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{da}{dN} \right)_i - (m \cdot \log(\Delta K_i) + C) \right]^2}{n - 2} \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^n \Delta K_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (\Delta K_i)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \Delta K_i \right)^2}{n}}$$

โดยที่ $\frac{da}{dN}$ คือ อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากกล้องไมโครสโคป

ΔK คือ พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

n คือ จำนวนข้อมูลของอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากกล้องไมโครสโคป

m, C คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ

การคำนวณความไวของคลิปปเกจ

ในภาคผนวกนี้ แสดงวิธีการคำนวณความไวของคลิปปเกจทางทฤษฎี และความไวที่แท้จริงของคลิปปเกจ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความไวของคลิปปเกจทางทฤษฎี

ความไวของคลิปปเกจทางทฤษฎี S_{th} คือ ความเครียด ε ต่อระยะโก่งของคานคลิปปเกจ v_M มีวิธีการคำนวณ ความเครียด และระยะของคานคลิปปเกจดังนี้

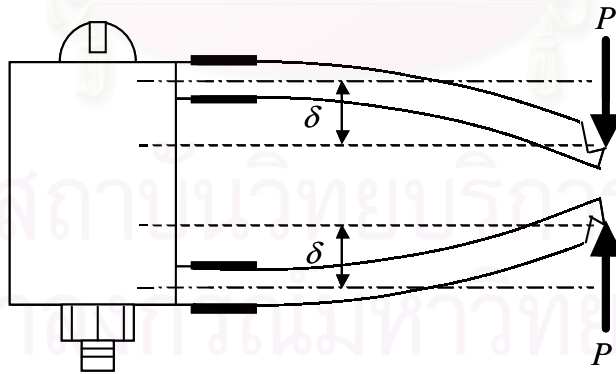
ทฤษฎีความเครียดของคลิปปเกจ ε จะได้

$$\varepsilon = 6 \frac{P \cdot L_1}{E \cdot b_1 \cdot h^2} \quad (\text{ญ.1})$$

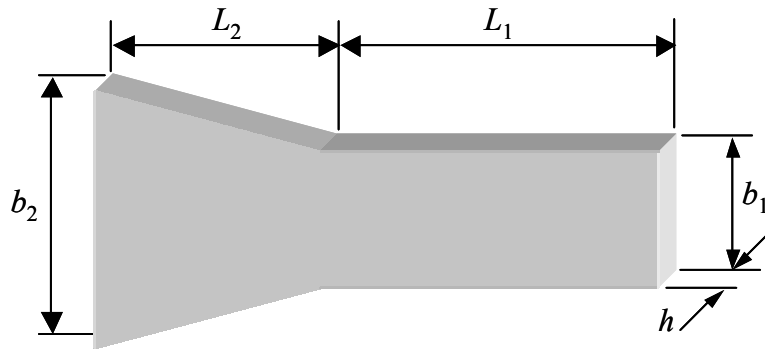
โดยที่ P คือ แรงที่บีบคลิปปเกจ แสดงในรูปที่ ญ.1

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น

b_1, L_1, h คือ มิติของคลิปปเกจ แสดงในรูปที่ ญ.2



รูปที่ ญ.1 ระยะโก่ง และพิสัยของคลิปปเกจ



รูปที่ ๓.๒ มิติของคานาคลิปเกจ

จากรูปที่ ๓.๑ ระยะโก่งของคานาคลิปเกจ δ จาก Energy Method จะได้

$$\delta = \frac{2}{P} \cdot \left(\int_0^{L_1} \frac{P^2 \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h^3 \right)} dx + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{P^2 \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot \frac{b_1 \cdot x}{L_1} \cdot h^3 \right)} dx \right)$$

$$= \frac{12 \cdot P}{E \cdot h^3 \cdot b_1} \cdot \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 \cdot L_2 + \frac{L_1 \cdot L_2^2}{2} \right)$$

พิสัยของคลิบเกจ มีขนาดเป็น 2 เท่าของระยะโก่งคานาคลิปเกจ (เนื่องจากมี 2 คาน) ดังนั้นจะได้

$$v_M = 2 \cdot \delta = \frac{24 \cdot P}{E \cdot h^3 \cdot b_1} \cdot \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 \cdot L_2 + \frac{L_1 \cdot L_2^2}{2} \right) \quad (๓.๒)$$

จากสมการที่ ๓.๑ และ ๓.๒ จะได้ความไวคลิบเกจทางทฤษฎี คือ

$$S_{th} = \frac{\varepsilon}{v_M} = \frac{3}{2} \cdot h \cdot \frac{1}{\left(2 \cdot L_1^2 + 6 \cdot L_1 \cdot L_2 + 3 \cdot L_2^2 \right)} \quad (๓.๓)$$

จากขนาดของคลิบเกจที่ได้ จากการคำนวณหาขนาดเหมาะสมที่สุด คือ

$$b_1 = 8 \text{ mm}, \quad b_2 = 13.2 \text{ mm}, \quad L_1 = 20 \text{ mm}, \quad L_2 = 13 \text{ mm}, \quad h = 1.495 \text{ mm}$$

นำไปแทนค่าในสมการที่ ๓.๓ จะได้

$$S_{th} = 7.82 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}} \quad (๓.๔)$$

ตารางที่ ญ.1 ตารางสอบเทียบคลิปเกจ

ระยะเคลื่อนตัว (mm)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)
0.500	2595.7
1.000	2231.4
1.499	1870.2
1.999	1509.5
2.499	1149.0
2.999	795.5
3.499	442.8

ความไวที่แท้จริงของคลิปเกจ

ความไวที่แท้จริงของคลิปเกจ สามารถหาได้จาก อัตราส่วนของ ระยะเคลื่อนตัว กับ ความเครียดที่เกิดกับคลิปเกจ ดังแสดงในตารางที่ ญ.1 ดังนั้น ความไวที่แท้จริง S_{exp} คือ

$$S_{exp} = \left| \frac{3.499 - 0.500}{442.8 - 2595.7} \right| = 7.18 \times 10^{-4} \frac{1}{mm} \quad (\text{ญ.5})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการสอบเทียบเครื่องมือสอบเทียบคลิปเกจ

เกจบล็อก (มม.)	เครื่องมือสอบเทียบ (มม.)
1	0.9960
2	1.9955
3	2.9958
4	3.9960
5	4.9960
6	5.9980
7	6.9985
8	7.9970
9	9.0000
10	10.0020
11	10.9980
12	11.9990
13	12.9960
14	14.0040
15	14.9960
16	15.9950
17	16.9970
18	17.9960
19	19.0000
20	19.9980
21	20.9980
22	21.9965
23	22.9995
24	23.9970

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ยอดยิ่ง หมวกงาม เกิดเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2522 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย