

การพัฒนาแบบจำลองความเสียหายล้อมรอบตำที่อุณหภูมิตั้งสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316

โดยใช้แนวคิดของการสูญเสียความเหนียว



นายแผนพิชิต คุรุสรณานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE LOW-CYCLE FATIGUE DAMAGE MODEL
FOR SS 316 BASED ON DUCTILITY EXHAUSTION CONCEPT**



Mr. Phaenpichit Khurusorananont

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลองความเสียหายล้ารอบค้ำที่อุณหภูมิสูง
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยใช้แนวคิดของการสูญเสีย
ความเหนียว

โดย

นายแผนพิชิต คุรุสรณานนท์

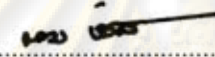
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

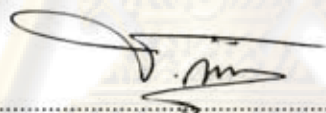
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ

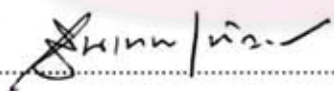
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

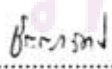


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ชินเทพ เพ็ญชาติ)

 
..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธัญญารัตน์ สิงหนาท)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนพิจิต คุรุศรณานนท์ : การพัฒนาแบบจำลองความเสียหายล้ารอบต่ำที่อุณหภูมิสูง
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยใช้แนวคิดของการสูญเสียความเหนียว

(DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE LOW-CYCLE FATIGUE DAMAGE
MODEL FOR SS 316 BASED ON DUCTILITY EXHAUSTION CONCEPT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ. ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, 149 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาแบบจำลองความเสียหายล้ารอบต่ำสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่
อุณหภูมิสูง ด้วยแนวคิดของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง ตัวแปรความเสียหายล้านิยามว่าเป็น
การลดลงของความเหนียว จากนั้นจึงนำแบบจำลองความเสียหายไปประยุกต์กับปัญหาการะสอง
ระดับ

การทดสอบเพื่อสร้างแบบจำลองความเสียหาย ประกอบด้วย 1) การทดสอบแรงดึงที่
อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าและชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าแต่ผ่านความร้อน 2) การ
ทดสอบความล้าที่อุณหภูมิ 650 °C ที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0% ภายใต้รูปคลื่น
สามเหลี่ยมสมมาตรที่มีอัตราความเครียดเท่ากับ 10^{-1} ต่อวินาที และ 3) การทดสอบแรงดึงที่
อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ กัน ผลการทดสอบพบว่าความ
เหนียวมีแนวโน้มลดลง (หรือความเสียหายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น) เมื่ออัตราส่วนอายุความล้าเพิ่มขึ้น
และเส้นโค้งการสะสมความเสียหายขึ้นกับพิสัยความเครียด

แบบจำลองความเสียหายถูกนำไปประยุกต์เพื่อทำนายจำนวนรอบจนกระทั่งเสียหายภายใต้
ภาระบล็อกที่สองของภาระสองระดับ ผลการทำนายอยู่ในช่วงตัวประกอบ 2 เท่า ของผลการ
ทดสอบ

การวิเคราะห์พื้นผิวแตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่า
การกำเนิดรอยร้าวจากผิวชิ้นงานและการเติบโตของรอยร้าวคือสาเหตุของการสูญเสียความเหนียว
เมื่อพื้นที่รอยร้าวเพิ่มขึ้นระดับความเสียหายล้าก็เพิ่มขึ้น และพื้นที่รอยร้าวที่เล็กที่สุดที่มีผลต่อการ
สูญเสียความเหนียวคือ 0.29 มม.²

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2551.....

4870601521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LOW-CYCLE FATIGUE / CONTINUUM DAMAGE MECHANICS /
DUCTILITY EXHAUSTION / DAMAGE ACCUMULATION MODEL

PHAENPICHIT KHURUSORANANONT : DEVELOPMENT OF HIGH
TEMPERATURE LOW-CYCLE FATIGUE DAMAGE MODEL FOR SS 316
BASED ON DUCTILITY EXHAUSTION CONCEPT. ADVISOR: ASST. PROF.
JIRAPONG KASIVITAMNUAY, D. ENG. 149 pp.

This thesis develops a high temperature low cycle fatigue damage model for stainless steel 316 using a continuum damage mechanics concept. A fatigue damage variable is defined as ductility exhaustion. Then, the damage model is applied to a two-step loading.

The necessary experiments for developing the damage model are 1) tensile test at a room temperature of virgin specimens and thermal-aged specimens 2) fatigue test at 650 °C, strain ranges of 0.6%, 1.0% and 2.0% and strain rate of 10^{-3} /sec under a symmetrical triangular waveform and 3) tensile test at room temperature of the pre-fatigued specimens at a different cycle ratios. The results show that the ductility decreases, i.e. the damage increases, as the cycle ratio increases and the damage accumulation curves depend on the strain ranges.

The damage model is applied to predict a number of cycles to failure in the second block of a two-step loading. The prediction results lie within a factor of 2 of the experimental results.

The fracture surfaces of the specimens are examined with a scanning electron microscope. The results reveal that the cause of ductility exhaustion is a crack initiation and propagation from a specimen surface. The level of damage varies with the crack area and the minimum crack area that affects the ductility loss is 0.29 mm^2 .

Department : Mechanical Engineering.....

Student's Signature

Field of Study : Mechanical Engineering.....

Advisor's Signature

Academic Year : 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ คน โดยเฉพาะการช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านวัสดุอุปกรณ์การทดสอบ เงินทุน รวมทั้ง ความรู้ แนวคิด และกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณช่างเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือในทุกครั้งที่มมีปัญหา ทำให้การทดสอบสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้

ขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือเวลาที่มีปัญหา

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา และพี่ชาย ที่สนับสนุนด้านการศึกษา และช่วยเหลือในหลาย ๆ เรื่องตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ทำให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์มีกำลังใจ และทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความแข็งแรงล้าของวัสดุ.....	7
2.2 แบบจำลองการสะสมความเสียหายล้า.....	8
2.21 แบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น.....	8
2.22 แบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น.....	10
2.3 กลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง.....	12
2.31 ตัวแปรความเสียหาย.....	12
2.32 การสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหาย.....	13
2.4 การทดสอบความล้า.....	22
2.5 การทดสอบแรงดึง.....	24
2.6 สรุป.....	25

บทที่ 3 การเตรียมการทดสอบและวิธีทดสอบ

31 ระบบทดสอบ.....	26
32 ชิ้นงานทดสอบ.....	28
33 การทดสอบ extensometer	30
34 การสอบเทียบ โหลดเซลล์.....	33
35 การสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุม.....	33
36 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	36
361 ชิ้นงานใหม่.....	36
362 ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อน.....	37
363 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า.....	37
364 ชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง.....	37
37 การทดสอบ.....	38
371 การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง.....	38
371.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	38
371.2 การเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล.....	38
371.3 การติดตั้งชิ้นงานและการให้ความร้อน.....	38
371.4 การเตรียมไฟล์คำสั่ง.....	40
371.5 ขั้นตอนการทดสอบ.....	41
372 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง.....	42
38 สรุป.....	43

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองความเสียหาย

41 การทดสอบ.....	44
41.1 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า.....	44
41.2 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า แต่ผ่านความร้อน.....	45
41.3 การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง.....	45
41.4 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า.....	46

42 ผลการทดสอบ.....	47
421 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด และความเหนียวของชิ้นงาน ที่ไม่ผ่านภาระล้า.....	47
422 พฤติกรรมการเสียรูปและอายุความล้า.....	51
423 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด และความเหนียวของชิ้นงาน ที่ผ่านภาระล้า.....	54
43 การหาค่าคงตัวในแบบจำลอง.....	59
44 สรุป.....	62
บทที่ 5 การทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ	
51 สภาวะทดสอบและผลการทดสอบ.....	63
52 สรุป.....	68
บทที่ 6 อภิปรายผลการทดสอบ	
61 อายุความล้าภายใต้ภาระแบบพิสัยความเครียดคงที่.....	69
62 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายกับโหมคความเสียหาย.....	70
63 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับพื้นที่รอยร้าว.....	76
64 ข้อจำกัดของตัวแปรความเสียหาย.....	78
65 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายของข้อมูล.....	80
66 การทำนายอายุความล้า.....	82
67 คุณสมบัติทางกลอื่นที่อาจใช้เป็นตัวแปรความเสียหาย.....	83
67.1 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0%.....	84
67.2 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 2.0%.....	86
บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
71 สรุปผล.....	88
72 ข้อเสนอแนะ.....	89
7.21 การเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล และการติดตั้ง extensometer.....	89
7.22 สภาพภูมิอากาศ.....	89

73 งานวิจัยต่อเนื่อง.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94
ก.1 ตัวอย่างการคำนวณความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า.....	94
ก.2 ตัวอย่างการหาพื้นที่รอยร้าว.....	96
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่ใช้หาอายุความล้า.....	100
ข.1 การทดสอบชิ้นงาน FF06.....	100
ข.2 การทดสอบชิ้นงาน FF10.....	103
ข.3 การทดสอบชิ้นงาน FF20.....	106
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบแรงดึง.....	109
ค.1 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าและไม่ผ่านการให้ความร้อน.....	109
ค.2 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าแต่ผ่านการให้ความร้อน.....	113
ค.3 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	116
ภาคผนวก ง ข้อมูลพิคัดบนขอบรอยร้าว.....	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	149

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
31	ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (โดยน้ำหนัก, %)	29
32	คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง	29
33	การสอบเทียบ extensometer ครั้งที่ 1	32
34	การสอบเทียบ extensometer ครั้งที่ 2	32
35	ผลการสอบเทียบโพลดเซล	33
41	สถานะการทดสอบความล้า (ก่อนถูกดึง)	47
42	ความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า	51
43	อายุความล้าของชิ้นงานทดสอบที่พิสัยความเครียดต่าง ๆ	53
44	ความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0%	58
45	ความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 20%	58
51	สถานะทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ	63
52	ผลการทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาระสองระดับ	64
61	ความเหนียวและพื้นที่รอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ	76
ก.1	การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน PFB05 ก่อนถูกดึง	94
ก.21	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวที่อยู่เหนือเส้นแบ่งของชิ้นงานรหัส PFA06	98
ก.22	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวที่อยู่ใต้เส้นแบ่งของชิ้นงานรหัส PFA06	98
ข.1.1	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน FF06	100
ข.1.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 1,350 ของชิ้นงาน FF06	101
ข.2.1	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน FF10	103
ข.2.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 370 ของชิ้นงาน FF10	104
ข.3.1	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน FF20	106
ข.3.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 99 ของชิ้นงาน FF20	107
ค.1.1	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T01	109
ค.1.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T02	111
ค.1.3	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T03	112
ค.2.1	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T04	113
ค.2.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T05	114

ตารางที่		หน้า
ค.23	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T06.....	115
ค.31.1	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA01.....	116
ค.31.2	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA02.....	118
ค.31.3	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA03.....	120
ค.31.4	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA04.....	122
ค.31.5	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA05.....	124
ค.31.6	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA06.....	126
ค.31.7	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA07.....	128
ค.31.8	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA08.....	130
ค.321	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB01.....	131
ค.322	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB02.....	133
ค.323	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB03.....	135
ค.324	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB04.....	137
ค.325	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB05.....	139
ค.326	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB06.....	141
ค.327	ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFB07.....	143
ง.1	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 421 รอบ.....	144
ง.2	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 466 รอบ.....	144
ง.3	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 501 รอบ.....	145
ง.4	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 534 รอบ.....	145
ง.5	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 539 รอบ.....	146
ง.6	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงาน PFA07(ผ่านภาระด้า 575 รอบ).....	146
ง.7	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของที่ชิ้นงานผ่านภาระด้า 601 รอบ.....	147
ง.8	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงาน PFA08(ผ่านภาระด้า 647 รอบ).....	147
ง.9	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของที่ชิ้นงานผ่านภาระด้า 742 รอบ.....	147
ง.10	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของที่ชิ้นงานผ่านภาระด้า 832 รอบ.....	148
ง.11	พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของที่ชิ้นงานผ่านภาระด้า 885 รอบ.....	148

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ความเหนียวลดลงเมื่อรับภาระด้าที่อุณหภูมิห้องเป็นจำนวนรอบมากขึ้น	
	(ก) ชี้นงานทำจากทองเหลือง.....	4
	(ข) ชี้นงานทำจากเหล็กกล้าโครงสร้าง.....	4
1.2	ความเหนียวลดลงเมื่อรับภาระด้าที่อุณหภูมิสูงเป็นจำนวนรอบมากขึ้น.....	5
21	การสองระดับ	
	(ก) การทดสอบแบบ high-low	9
	(ข) การทดสอบแบบ low-high	9
22	การสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นของการทดสอบแบบ low-high	
	(ก) การทดสอบแบบ low-high	10
	(ข) การสะสมความเสียหาย.....	10
23	การสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นของการทดสอบแบบ high-low	
	(ก) การทดสอบแบบ high-low	11
	(ข) การสะสมความเสียหาย.....	11
24	การสะสมความเสียหายของการทดสอบแบบ high-low	21
25	รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร.....	23
31	เครื่องทดสอบความด้าและแรงดึง.....	26
32	extensometer วัดระยะเสียรูปบริเวณความยาวเกจ ของชี้นงานทดสอบความด้าที่อุณหภูมิสูง.....	28
33	extensometer วัดระยะเสียรูปบริเวณความยาวเกจ ของชี้นงานทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง.....	28
34	ชี้นงานทดสอบ	
	(ก) แบบผลิตชี้นงาน.....	29
	(ข) ชี้นงานที่สร้างเสร็จ.....	29
35	อุปกรณ์สอบเทียบ extensometer วัดระยะเสียรูปบริเวณความยาวเกจ ของชี้นงานทดสอบความด้าที่อุณหภูมิสูง.....	30

รูปที่		หน้า
36	การสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุม	
	(ก) ตำแหน่งการเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลกับชิ้นงาน.....	34
	(ข) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	34
	(ค) อุปกรณ์แสดงค่าอุณหภูมิ.....	34
	(ง) อุปกรณ์แสดงค่าอุณหภูมิ.....	34
37	การกระจายอุณหภูมิตามความยาวเกจ.....	36
38	ตำแหน่งและทิศทางการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	37
39	ตำแหน่งเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล.....	39
41	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความยาวรอยร้าวกับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $2a/D$ กับอัตราส่วนของความเค้นขณะใด ๆ กับความเค้นในช่วงสถานะคงตัว $s/s_{N_{f/2}}$	46
42	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า.....	48
43	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าหลังการทดสอบแรงดึง.....	49
44	ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าหลังการทดสอบแรงดึง	
	(ก) ชิ้นงาน T02 ที่กำลังขยาย 25 เท่า.....	49
	(ข) ชิ้นงาน T04 ที่กำลังขยาย 30 เท่า.....	49
45	พื้นผิวแตกหักบริเวณวงกลม A (รูปที่ 44(ก)) ที่กำลังขยาย 400 เท่า.....	50
46	พื้นผิวแตกหักบริเวณวงกลม B (รูปที่ 44(ข)) ที่กำลังขยาย 400 เท่า.....	50
47	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0%.....	51
48	วงปิดฮิสเทอรีซิสที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0%.....	52
49	ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยความเครียดรวมกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย.....	53
410	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า ที่พิสัยความเครียด 1.0%.....	55
411	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า ที่พิสัยความเครียด 2.0%.....	56
412	ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ หลังทดสอบแรงดึง.....	57
413	ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 2.0% เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ หลังทดสอบแรงดึง.....	57

รูปที่		หน้า
414	ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ของกรณี $\Delta e = 1.0\%$	60
415	ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ของกรณี $\Delta e = 2.0\%$	60
416	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายกับอัตราส่วนอายุความลำ.....	61
51	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ high-low ($n_1/N_1=0.30$).....	65
52	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ high-low ($n_1/N_1=0.50$).....	65
53	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ high-low ($n_1/N_1=0.60$).....	66
54	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ low-high ($n_1/N_1=0.26$).....	66
55	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ low-high ($n_1/N_1=0.44$).....	67
56	ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ low-high ($n_1/N_1=0.52$).....	67
61	ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยความเครียดรวมกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย....	69
62	การแบ่งระดับความเสียหาย.....	70
63	ลักษณะการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน ที่มีความเสียหายน้อยกว่า Q15	
	(ก) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 503 รอบ (PFA05).....	71
	(ข) พิสัยความเครียด 2.0% จำนวน 155 รอบ (PF04).....	71
64	ลักษณะการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน ที่มีความเสียหายมากกว่า Q48	
	(ก) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 575 รอบ (PFA07).....	71
	(ข) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 647 รอบ (PFA08).....	71
65	ภาพถ่ายวงกลม A (รูปที่ 63(ก)).....	72
66	ภาพถ่ายวงกลม B (รูปที่ 63(ข))	72
67	ภาพถ่ายวงกลม C (รูปที่ 64(ก))	73
68	ภาพถ่ายวงกลม D (รูปที่ 64(ข))	73
69	striation ของภาพถ่ายวงกลม C (รูปที่ 64(ก))	74
610	striation ของภาพถ่ายวงกลม D (รูปที่ 64(ข))	74
611	การแตกหักแบบ cup และ cone	75
612	การแตกหักแบบเฉียง.....	75
613	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดกับพื้นที่รอยร้าว.....	77
614	ระดับความเสียหายสมมูลกับพื้นที่รอยร้าว.....	78

รูปที่	หน้า
615	ข้อจำกัดของตัวแปรความเสียหาย..... 79
616	ความแตกต่างของจุดข้อมูลที่อัตราส่วนอายุความล้าเท่ากัน ($\Delta e = 1.0\%$)..... 80
617	กระบวนการเกิดความเสียหายล้า..... 81
618	ความไม่เท่ากันของอายุการกำเนิครอยร้าว..... 81
619	ระดับความแม่นยำของการทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกหลัง ด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น..... 82
620	ระดับความแม่นยำของการทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกหลัง ด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น..... 83
621	(ก) มอดูลัสของความยืดหยุ่น และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)..... 84
622	(ก) ความเค้นคราก และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)..... 85
623	(ก) ความเค้นสูงสุด และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)..... 85
624	(ก) มอดูลัสของความยืดหยุ่น และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 2.0\%$)..... 86
625	(ก) ความเค้นคราก และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 2.0\%$)..... 87
626	(ก) ความเค้นสูงสุด และ (ข) ความเสียหาย ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 2.0\%$)..... 87
ก.1	การเลือกรูปแบบความยาวเกจของชิ้นงาน PFBO5..... 94
ก.21	การเตรียมชิ้นงานสำหรับสแกน (ก) การติดตั้งชิ้นงานกับอุปกรณ์ช่วย..... 96 (ข) ชิ้นงานที่พร้อมสแกน..... 96
ก.22	การหาพื้นที่รอยร้าวโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู..... 97
ก.23	ภาพสแกนพื้นที่รอยร้าวของชิ้นงานรหัส PFA06..... 97
ก.24	เส้นทางของจุดที่อยู่บนขอบหน้ารอยร้าวหรือขอบชิ้นงาน..... 99

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A_i	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ
A_f	พื้นที่หน้าตัดตรงตำแหน่งคอคอด
b	เลขชี้กำลังความแข็งแรงล้า
c	เลขชี้กำลังความเหนียวล้า
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ
d_f	เส้นผ่านศูนย์กลางตรงตำแหน่งคอคอด
d_{HT}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่อุณหภูมิ $650^\circ C$
d_{RT}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง
$disp.$	ระยะเสียรูปที่ควบคุม
D	ตัวแปรความเสียหาย
\mathcal{D}	อัตราการสะสมความเสียหาย
E	มอดูลัสของความยืดหยุ่น
f	ความถี่
F	แรงดึงขณะเวลาใด ๆ
GL_{HT}	ความยาวเกจที่อุณหภูมิ $650^\circ C$
k	จำนวนบล็อก
L_i	ความยาว ณ เวลาใด
L_o	ความยาวเกจเริ่มต้น
ΔL_{stroke}	ระยะชักที่เปลี่ยนไป
n	จำนวนรอบภาระ
n_{f2}	จำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของบล็อกหลัง
n_i	อายุการกำเนิดรอยร้าว
n_p	อายุการเติบโตของรอยร้าว
N_f	อายุความล้า
T	อุณหภูมิทดสอบ
Y	อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด
e_m	ความเครียดเฉลี่ย

ϵ	อัตราความเครียด
e_f	ความเครียดแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาวะล้า
\tilde{e}_f	ความเครียดแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านภาวะล้า
e'_f	สัมประสิทธิ์ความเหนียวล้า
e_{\max}	ความเครียดสูงสุด
e_{\min}	ความเครียดต่ำสุด
Δe	พิสัยความเครียดรวม
Δe_e	พิสัยความเครียดยืดหยุ่น
Δe_p	พิสัยความเครียดพลาสติก
s	ความเค้น
s_u	ความเค้นสูงสุด
s_y	ความเค้นคราก
s'_f	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงล้า
Δs	พิสัยความเค้น
Δs_{eq}	พิสัยความเค้นสมมูลของ von Mises
Δs_m	พิสัยความเค้นอุทกสถิต
a	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
f	dissipation potential
n	อัตราส่วนปัวซอง
y	อัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ทางกลเมื่อรับภาระกระทำเป็นรอบ (cyclic loading) อาจเกิดความเสียหายล้ม (fatigue failure) ได้ แม้ว่าความเค้นสูงสุดที่กระทำจะมีค่าต่ำกว่าความเค้นคราก (yield stress) เช่น สวิตช์รีเลย์ สลักเกลียว เพลาส่งกำลัง [1] และสะพาน [2] เป็นต้น

ความเสียหายล้านำไปสู่การสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและชีวิต ความเสียหายล้านับเป็นต้นเหตุ ความเสียหายอันดับต้น ๆ ของความเสียหายชนิดต่าง ๆ [2] ยิ่งไปกว่านั้นความเสียหายล้ามักจะเกิดขึ้นโดยไม่มีอาการเตือนล่วงหน้า [1,3] ดังนั้นการออกแบบชิ้นส่วนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายล้าจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

ในการออกแบบชิ้นส่วนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายล้า ก่อนอื่นผู้ออกแบบจะต้องกำหนดอายุใช้งานของชิ้นส่วน จากนั้นจึงออกแบบชิ้นส่วน (หรือการกำหนดรูปร่าง ขนาด ชนิดวัสดุ ฯลฯ) โดยมีการประเมินไม่ให้ความเสียหายสะสมจนถึงระดับวิกฤติ (critical damage) ภายในอายุใช้งานที่กำหนด เนื่องจากข้อมูลความล้าส่วนใหญ่ได้มาจากการทดสอบชิ้นส่วนภายใต้แอมพลิจูดภาระคงที่ (constant amplitude loading) แต่ในสภาวะการใช้งานจริงส่วนใหญ่ชิ้นส่วนอยู่ภายใต้แอมพลิจูดภาระไม่คงที่ (variable amplitude loading) เพราะฉะนั้นการออกแบบดังกล่าวจำเป็นต้องทราบ 1) ข้อมูลสมบัติการล้าของวัสดุ ซึ่งมักอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเค้นกับอายุความล้า (fatigue life) หรือความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเครียดกับอายุความล้า 2) สภาวะใช้งาน ขนาดภาระหรือความเค้นหรือความเครียด ที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนขณะใช้งานบนโดเมนของเวลา และ 3) แบบจำลองการสะสมความเสียหายล้า (fatigue damage accumulation model)

การเสนอแบบจำลองการสะสมความเสียหายล้าเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1924 โดย Palmgren จากนั้นในปี ค.ศ. 1945 Miner ได้นำแนวคิดนี้มาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ปัจจุบันนิยมเรียกว่า กฎความเสียหายเชิงเส้น (linear damage rule) หรือ Palmgren - Miner's rule [2] แบบจำลองนี้นิยามความเสียหายล้าที่สะสมในวัสดุ ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบ D มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของจำนวนรอบภาระที่กระทำกับชิ้นส่วน n ต่อจำนวนรอบภาระที่กระทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย (ภายใต้แอมพลิจูดภาระเดียวกัน) N_f หรือ $D = n/N_f$ ดังนั้นความเสียหาย D จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับจำนวนรอบภาระ n ซึ่งสอดคล้องกับชื่อที่ใช้เรียกแบบจำลอง แบบจำลองนี้กำหนดให้ความเสียหายวิกฤติ

มีค่าเท่ากับ 1 ข้อดีของแบบจำลองนี้คือ ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอัตราการสะสมความเสียหายมีค่าคงที่เท่ากับ $1/N_f$ และไม่ขึ้นกับแอมพลิจูดของภาระ (หรือแอมพลิจูดความเค้น หรือแอมพลิจูดความเครียด) แบบจำลองจึงทำนายอายุความล้าภายใต้แอมพลิจูดภาระไม่คงที่ได้ไม่แม่นยำ เพราะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดภาระจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่งจะมีผลต่อการสะสมความเสียหายล้า กล่าวอีกอย่างคือ แบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงผลของปฏิสัมพันธ์ภาระ (load interaction effect) [4]

จากข้อจำกัดของแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้นเพื่อให้การทำนายอายุความล้าภายใต้สภาวะใช้งานจริง (แอมพลิจูดภาระไม่คงที่) มีความแม่นยำมากขึ้นแล้ว การออกแบบชิ้นส่วนควรใช้แบบจำลองการสะสมความเสียหายแบบไม่เชิงเส้น และความไม่เป็นเชิงเส้นต้องขึ้นกับขนาดของแอมพลิจูดความเค้น (หรือความเครียด) ที่กระทำต่อชิ้นส่วน

ในปี ค.ศ. 1954 Marco และ Starkey [45] เสนอแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของ $D = (n/N_f)^{a_i}$ โดย a_i คือ ค่าคงตัวสำหรับวัสดุและสภาพแวดล้อมที่กำหนด และขึ้นกับแอมพลิจูดของภาระล้า การหาค่าคงตัวนี้ต้องการผลการทดสอบภายใต้ภาระล้าแบบบล็อกสองระดับจำนวนหนึ่ง สำหรับปรับค่า a_i จนสามารถทำนายอายุความล้าของข้อมูลที่น่ามาใช้ได้แม่นยำ จุดอ่อนสำคัญในแบบจำลองของ Marco และ Starkey คือ ตัวแปรความเสียหาย และค่าคงตัวขาดความหมายทางกายภาพ สาเหตุหลักซึ่งทำให้ตัวแปรความเสียหายที่มีความหมายทางกายภาพมีความสำคัญก็คือ ความต้องการทราบสภาพของวัสดุหลังจากผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง ในปัญหานี้ถ้าทราบว่าสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นเท่าใดเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น ก็จะทราบความเสียหายขณะนั้นซึ่งจะทำให้สามารถทำนายอายุที่เหลือได้

การพัฒนาแบบจำลองการสะสมความเสียหายล้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ตัวแปรความเสียหายที่มีความหมายทางกายภาพ เริ่มจากการเลือกสมบัติทางกายภาพที่คิดว่าเหมาะสมกับชนิดของความเสียหายล้า กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต้องมีสหสัมพันธ์กับระดับความเสียหายสมบัติทางกายภาพในระดับมหภาคที่เหมาะสมกับความเสียหายล้า [6] ได้แก่ ความเหนียว [5] มอดูลัสของความยืดหยุ่น [6] ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า [7] ความแข็ง [8] เป็นต้น ต่อมาคือ นิยามตัวแปรความเสียหายในเทอมของสมบัติทางกายภาพ โดยตัวแปรความเสียหายต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ขณะที่วัสดุยังไม่มี ความเสียหาย และโดยทั่วไปกำหนดให้มีค่าวิกฤติเท่ากับหนึ่ง สุดท้ายคือ การสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหาย ซึ่งทำได้หลายแนวทาง [5] เช่น แนวทางของกลศาสตร์จุลภาค (micromechanics) แนวทางของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง (continuum damage mechanics) เป็นต้น

แนวทางกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่องถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย **Kachanov [5]** ซึ่งศึกษาปัญหาความเสียหายคืบ (**creep damage**) และเสนอตัวแปรความเสียหาย (**damage variable**) D ดังสมการที่ (1.1)

$$D = \frac{S_D}{S} \quad (1.1)$$

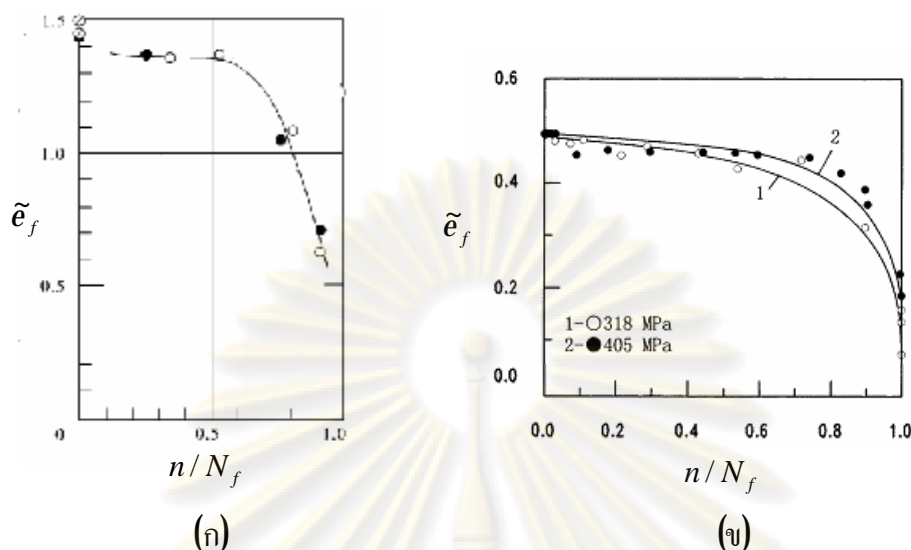
เมื่อ S_D, S คือ พื้นที่ของรอยร้าวหรือรอยบกพร่อง และพื้นที่หน้าตัดก่อนจะมีรอยร้าวหรือรอยบกพร่องเกิดขึ้น ตามลำดับ

การนิยามตัวแปรความเสียหายในสมการที่ (1.1) นั้นแม้จะมีความหมายทางกายภาพชัดเจน แต่การวัดพื้นที่ของรอยร้าวหรือรอยบกพร่องโดยตรงนั้นทำได้ยาก จึงมีการประยุกต์หลักการทางกายภาพ [6] เช่น ความต้านทานไฟฟ้า ความเร็วของเสียงในวัสดุ ฯลฯ เพื่อเขียนสมการที่ (1.1) ใหม่ในเทอมของปริมาณทางกายภาพที่สามารถวัดได้ง่ายกว่า

การประยุกต์แนวทางของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่องเพื่อสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหายล่า อาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัญหาความล้ารอบสูง (**high cycle fatigue**) และปัญหาความล้ารอบต่ำ (**low cycle fatigue**) สำหรับปัญหาความล้ารอบสูง ได้แก่ แบบจำลองของ **B. Sun** และคณะ [7] ซึ่งใช้ความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นตัวแปรความเสียหาย เป็นต้น สำหรับปัญหาความล้ารอบต่ำ ได้แก่ แบบจำลองของ **Cheng** และคณะ [9,10] ซึ่งใช้ตัวแปรความเสียหายเป็นความเหนียว และแบบจำลองของ **Y. Duij** และคณะ [11] ซึ่งใช้ **static toughness** เป็นตัวแปรความเสียหาย เป็นต้น

สำหรับการนิยามตัวแปรความเสียหายในเทอมของความเหนียวนั้น ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน และมีการศึกษาในวัสดุหลายชนิด เช่น ทองเหลือง [12] พบว่าความเหนียวมีแนวโน้มลดลงเมื่อรับจำนวนรอบภาระเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 1.1 (ก) นอกจากวัสดุทองเหลืองแล้วยังพบการลดลงของความเหนียวในวัสดุเหล็กกล้าโครงสร้าง [11] ดังรูป 1.1 (ข) รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำภาชนะความดัน [9,10] และโพลีคาร์บอเนต (**polycarbonate**) [13] เป็นต้น จากงานวิจัยข้างต้นสรุปว่าระดับความเสียหายล้ามีสหสัมพันธ์กับความเหนียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 ความเหนียวลดลงเมื่อรับภาระล้าที่อุณหภูมิห้องเป็นจำนวนรอบมากขึ้น

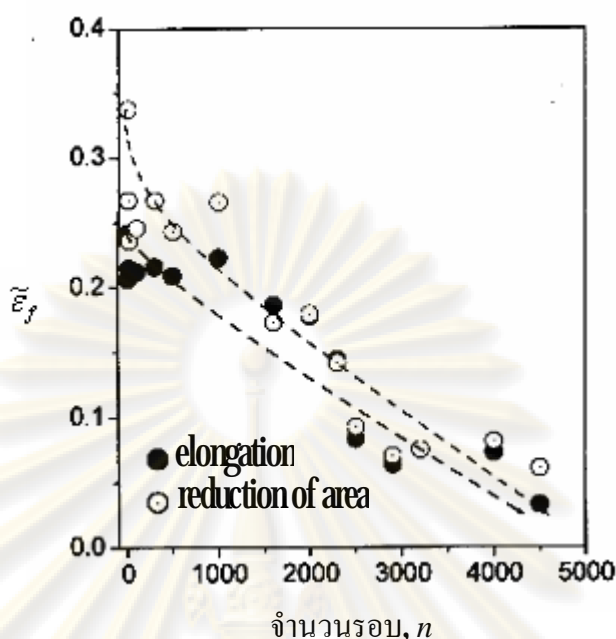
(ก) ชิ้นงานทำจากทองเหลือง

(ข) ชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าโครงสร้าง

Cheng และคณะ [9, 10] และ B. Wang [13] เสนอแบบจำลองการสะสมความเสียหายล้าซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นกับอัตราส่วนอายุความล้า โดยใช้ความเหนียวเป็นตัวแปรความเสียหาย เพื่อทำนายอายุความล้าภายใต้แอมพลิจูดภาระคงที่ [9,10,13] และภายใต้ภาระสองระดับ (แอมพลิจูดภาระเปลี่ยนแปลงจากต่ำไปสูง หรือจากสูงไปต่ำ) [10] พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายอายุความล้าได้แม่นยำ

อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนที่รับภาระกระทำเป็นรอบและทำงานที่อุณหภูมิสูง เช่น เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ [14] หรือใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ [15] เป็นต้นนั้น อาจเกิดความเสียหายล้าที่อุณหภูมิสูง (high temperature fatigue) ได้ ดังนั้นการหาตัวแปรที่ใช้บ่งบอกระดับความเสียหายที่อุณหภูมิสูงก็เป็นเรื่องที่สำคัญ

Duyi [16] ศึกษาผลของความเสียหายล้าที่อุณหภูมิสูงต่อการลดลงของความเหนียวของชิ้นงานที่ทำจากวัสดุ nickel-based super alloy GH4145/SQ พบว่า ความเหนียวมีแนวโน้มลดลงเมื่อชิ้นงานรับภาระล้าเป็นจำนวนรอบมากขึ้น ดังรูปที่ 1.2 จากรูปจะเห็นว่าระดับความเสียหายล้าที่อุณหภูมิสูงก็มีสหสัมพันธ์กับความเหนียวเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่แนวโน้มนี้จะเป็นอย่างไรสำหรับวัสดุที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงชนิดอื่น เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม 316 ซึ่งก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบท่อ หรือชิ้นส่วนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [14] เป็นต้น อย่างไรก็ดี ยังไม่มีการศึกษาการลดลงของความเหนียวของวัสดุนี้เนื่องจากการรับภาระกระทำเป็นรอบ



รูปที่ 1.2 ความเหนียวลดลงเมื่อรับภาระด้าที่อุณหภูมิสูงเป็นจำนวนรอบมากขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษา ผลของความเสียหายด้ารอบด้าที่อุณหภูมิสูงต่อความเหนียวของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ภายใต้ภาระด้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองความเสียหายด้าซึ่งมีตัวแปรความเสียหายในรูปของความเหนียว สุดท้ายเป็นการนำแบบจำลองความเสียหายด้าไปทำนายอายุความด้าภายใต้ภาระสองระดับ

1.2 วัตถุประสงค์

1. หาความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (empirical relation) ระหว่างระดับความเสียหายด้ากับอัตราส่วนอายุความด้า
2. ประยุกต์แบบจำลองความเสียหายด้าเพื่อทำนายอายุความด้าภายใต้ภาระสองระดับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทดสอบความด้าของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ในสภาพแวดล้อมอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 650 °C ส่วนการทดสอบแรงดึงทำในสภาพแวดล้อมอากาศที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบความด้ากำหนดให้รูปคลื่นที่ใช้เป็นแบบสามเหลี่ยมสมมาตร (symmetrical triangular waveform) อัตราความเครียด 10^3 ต่อวินาที โดยควบคุมพิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0% สำหรับพิสัยความเครียด 0.6% ทดสอบเพื่อหาอายุความด้าเท่านั้น ส่วนที่พิสัยความเครียด 1.0% และ 2.0% ทดสอบเพื่อหาอายุความด้าและทดสอบที่อัตราส่วนอายุความด้าตั้งแต่ 0.22 ถึง 0.97 สำหรับพิสัยความเครียด 1.0% และอัตราส่วนอายุความด้าตั้งแต่ 0.18 ถึง 0.81 สำหรับพิสัยความเครียด 2.0%

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการสะสมความเสียหายเนื่องจากความล้า
2. ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองแบบความเสียหายล้า ซึ่งมีความเหนียวเป็นตัวแปรความเสียหาย
3. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเสียหายล้าที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิห้อง
4. จัดทำชิ้นงานทดสอบ
5. ศึกษาการใช้เครื่องทดสอบ
6. ทดสอบแรงดึงชิ้นงานหน้าตัดกลมในสภาพแวดล้อมอากาศที่อุณหภูมิห้องเพื่อหาความเหนียวของวัสดุ
7. ทดสอบความล้ากับชิ้นงานหน้าตัดกลมในสภาพแวดล้อมอากาศ ณ อุณหภูมิคงที่ 650°C ภายใต้พิสัยความเครียดคงที่ เพื่อหาอายุความล้า
8. ทดสอบความล้าที่อุณหภูมิคงที่ 650°C ภายใต้แอมพลิจูดภาระคงที่ จนได้อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบภาระต่ออายุความล้า (ต่อไปจะเรียกว่าอัตราส่วนอายุความล้า) เท่ากับที่กำหนด จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องเพื่อหาความเหนียวคงเหลือ ในรูปของอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด และทำเช่นนี้ซ้ำที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ
9. วิเคราะห์ข้อมูลความเหนียวคงเหลือ ณ อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ร่วมกับข้อมูลความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการรับภาระล้า เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลองความเสียหาย
10. ทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ
11. ประยุกต์แบบจำลองที่ได้ในขั้นตอนที่ 9 กับผลการทดสอบที่ได้ในขั้นตอนที่ 10
12. ถ่ายภาพพื้นผิวแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (scanning electron microscope : SEM) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความล้าจนมีอัตราส่วนอายุความล้าเท่ากับที่กำหนดและชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความล้าจนกระทั่งแตกหัก เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของพื้นผิวแตกหัก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างแบบจำลองความเสียหายล้า ซึ่งสามารถทำนายอายุความล้าภายใต้แอมพลิจูดภาระเปลี่ยนแปลงแบบเป็นขั้น (step-block loading) ได้แม่นยำกว่าการใช้แบบจำลองความเสียหายเชิงเส้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย หัวข้อที่ 21 ความแข็งแรงล้าของวัสดุ หัวข้อที่ 22 จะกล่าวถึง แบบจำลองการสะสมความเสียหายล้า หัวข้อที่ 23 กลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง จากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ คือ การทดสอบความล้า ในหัวข้อที่ 24 สุดท้าย หัวข้อที่ 25 จะกล่าวถึงการทดสอบแรงดึง ส่วนวิธีการและขั้นตอนการทดสอบจะกล่าวในบทถัดไป

21 ความแข็งแรงล้าของวัสดุ

โดยทั่วไปปัญหาความล้าแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ความล้ารอบสูงและความล้ารอบต่ำ สำหรับชิ้นส่วนที่มีอายุความล้ามากกว่า 10^4 รอบและน้อยกว่า 10^4 รอบ ตามลำดับ [6]

สำหรับความล้ารอบสูง การเสีรูปร่างจะอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ความแข็งแรงล้า (fatigue strength) ภายใต้ภาระแอมพลิจูดคงที่ นิยมเขียนในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้า N_f กับพิสัยความเค้น (stress range) Δs ในรูปของ

$$\frac{\Delta s}{2} = s'_f (2N_f)^b \quad (21)$$

โดย s'_f คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงล้า (fatigue strength coefficient)

b คือ เลขชี้กำลังความแข็งแรงล้า (fatigue strength exponent)

สมการที่ (21) สามารถเขียนในเทอมของพิสัยความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain range) Δe_e ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta e_e}{2} = \frac{s'_f}{E} (2N_f)^b \quad (22)$$

โดย E คือ มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus)

สำหรับความล้ารอบต่ำ ความเครียดพลาสติกจะมีขนาดมากขึ้น ความแข็งแรงล้าภายใต้ภาระแอมพลิจูดคงที่ นิยมเขียนในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอายุความล้า N_f กับพิสัยความเครียดพลาสติก (plastic strain range) Δe_p ในรูปของ

$$\frac{\Delta e_p}{2} = e'_f (2N_f)^c \quad (23)$$

โดย e'_f คือ สัมประสิทธิ์ความเหนียวล้า (fatigue ductility coefficient)

c คือ เลขชี้กำลังความเหนียวล้า (fatigue ductility exponent)

เมื่อรวมสมการ (22) และ (23) จะได้ความสัมพันธ์ที่แสดงความแข็งแรงด้าในรูปของพิสัยความเค้นรวม Δe ดังนี้

$$\frac{\Delta e}{2} = \frac{s'_f}{E} (2N_f)^b + e'_f (2N_f)^c \quad (24)$$

ค่าคงตัว e'_f , s'_f , b และ c ในสมการที่ (24) หาจากผลการทดสอบความด้าของวัสดุ

2.2 แบบจำลองการสะสมความเสียหายด้า

เมื่อวัสดุรับภาระด้าจะมีความเสียหายด้าสะสมเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบภาระ เมื่อความเสียหายสะสมถึงค่าวิกฤติแล้ววัสดุจะเสียหาย

การทำนายอายุความด้าของชิ้นส่วนที่รับภาระแอมพลิจูดคงที่ ทำได้โดยแทนพิสัยความเค้นรวมในสมการที่ (24) แล้วแก้สมการหาอายุความด้าออกมา แต่ในสภาวะใช้งานจริง โครงสร้างหรือชิ้นส่วนทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะรับภาระด้าซึ่งมีขนาดแอมพลิจูดไม่คงที่ การทำนายอายุความด้าต้องการแบบจำลองการสะสมความเสียหายด้า ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง แบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น และแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น

2.2.1 แบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น

Palmgren และ **Miner** เสนอแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น โดยนิยามความเสียหายคือ จำนวนรอบภาระที่กระทำหารด้วยจำนวนรอบภาระที่วัสดุเกิดความเสียหายที่ระดับภาระเดียวกัน ดังนี้

$$D = \frac{n}{N_f} \quad (25)$$

โดย D คือ ตัวแปรความเสียหาย

n คือ จำนวนรอบของภาระ

N_f คือ จำนวนรอบของภาระที่ทำให้เกิดความเสียหาย

แบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้นใช้ทำนายอายุความเสียหายด้าของชิ้นส่วนเมื่ออยู่ภายใต้แอมพลิจูดภาระคงที่และไม่คงที่ กรณีที่รับภาระแบบบล็อก (ในบล็อกมีขนาดแอมพลิจูดภาระคงที่) ที่มีขนาดแอมพลิจูดภาระแต่ละบล็อกไม่เท่ากัน การสะสมความเสียหายหา คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

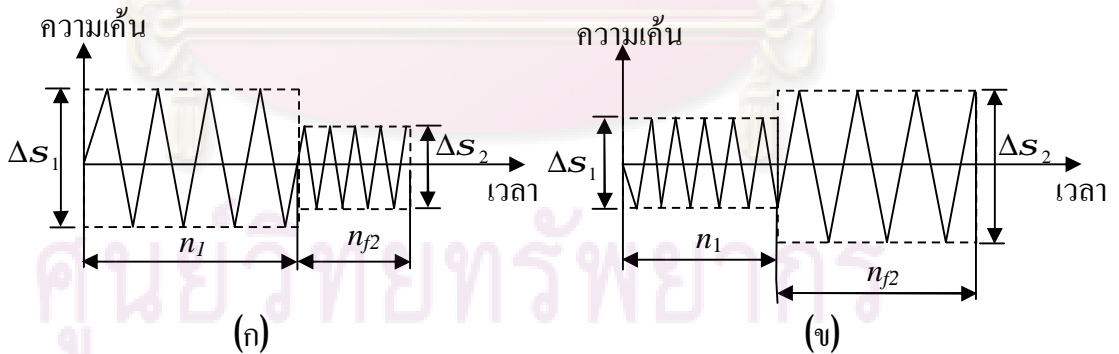
$$D = \sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right) \quad (26)$$

โดย k คือ จำนวนบล็อก

แบบจำลองนี้กำหนดว่า ถ้าผลรวมอัตราส่วนอายุความล่าของบล็อกต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว
 ชีงงานจะเสียหาย

$$\sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right) = 1 \quad (27)$$

อย่างไรก็ตาม การทำนายอายุความล่าด้วยแบบจำลองเชิงเส้นกับการทดสอบความล่าภายใต้
 ภาระสองระดับ ดังในรูปที่ 21 รูปที่ 21 (ก) เป็นการทดสอบแบบ **high-low** ชีงงานได้รับพิสัย
 ความเค้น ΔS_1 จำนวน n_1 รอบ ก่อนจะได้รับพิสัยความเค้น ΔS_2 จนกระทั่งเสียหาย สำหรับการ
 ทดสอบแบบ **low-high** แสดงอยู่ในรูปที่ 21 (ข) ชีงงานได้รับพิสัยความเค้น ΔS_1 ก่อน จากนั้นรับ
 พิสัยความเค้น ΔS_2 จนเกิดความเสียหาย การทดสอบของ Marco และ Starkey [5] พบว่า การ
 ทดสอบแบบ **high-low** เกิดความเสียหายเมื่อผลรวมอัตราส่วนอายุความล่า น้อยกว่า 1 ขณะที่แบบ
low-high เกิดเมื่อผลรวมมากกว่า 1 ผลของลำดับภาระนี้ เรียกอีกชื่อว่า ปฏิสัมพันธ์ภาระ (**load
 interaction**) สรุปว่า การทำนายอายุด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้นไม่แม่นยำ
 เท่าที่ควร



รูปที่ 21 ภาระสองระดับ

- (ก) การทดสอบแบบ **high-low**
 (ข) การทดสอบแบบ **low-high**

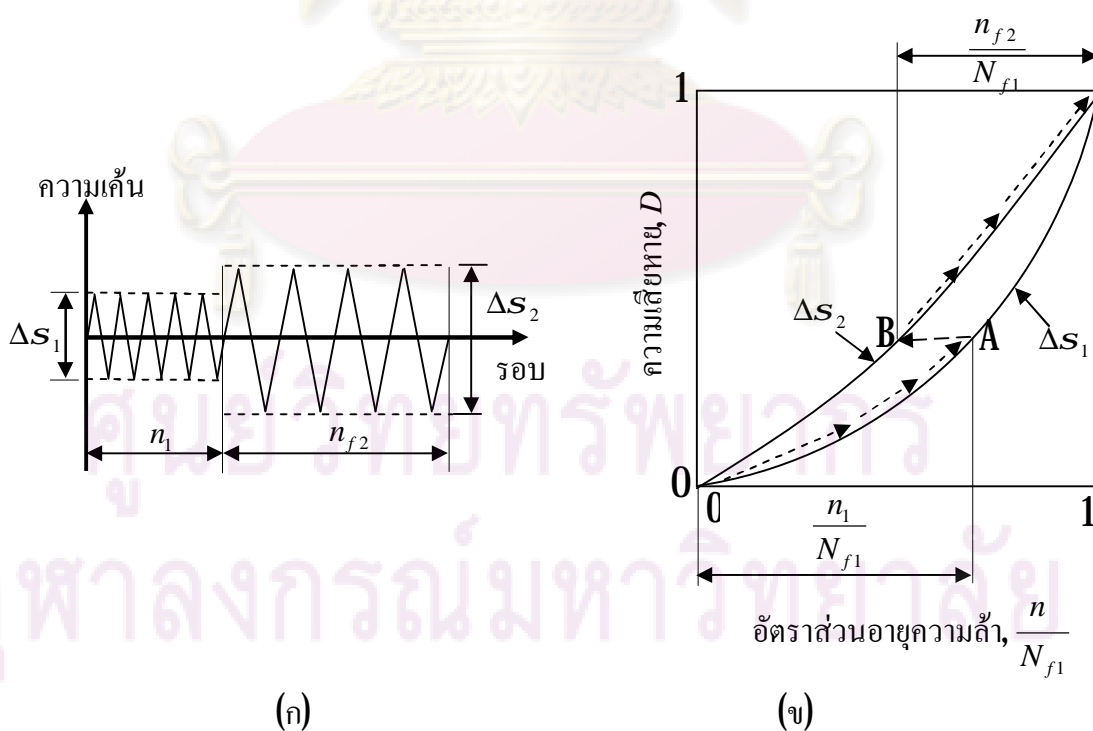
2.2.2 แบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น

Marco และ Starkey [4] เสนอสมการ ต่อไปนี้

$$D = \left(\frac{n}{N_f} \right)^{a_i} \quad (28)$$

โดย a_i เป็นเลขชี้กำลังที่ขึ้นอยู่กับพิสัยความเค้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

การอธิบายแนวคิดของแบบจำลองการสะสมความเสียหายแบบไม่เชิงเส้น ใช้การอธิบายร่วมกับรูปที่ 22 รูปที่ 22(ก) แสดงการทดสอบแบบ **low-high** ที่สถานะเริ่มต้น ชิ้นงานรับภาระค่าที่พิสัยความเค้น ΔS_1 เป็นจำนวน n_1 รอบ จากนั้นชิ้นงานรับภาระค่าที่พิสัยความเค้น ΔS_2 จนกระทั่งเสียหาย (เป็นจำนวน n_{f2} รอบ) การสะสมความเสียหายแสดงในรูปที่ 22 (ข) จากรูปความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง ΔS_1 จากจุด 0 ถึงจุด A ในขณะที่พิสัยความเค้นเปลี่ยนจาก ΔS_1 เป็น ΔS_2 นั้น ความเสียหายยังคงเดิม ดังนั้นเส้นทางของการสะสมความเสียหายจะเปลี่ยนจากจุด A ไปยังจุด B และความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง ΔS_2 จนกระทั่งความเสียหายเท่ากับหนึ่ง เมื่อพิจารณารูป พบว่าการทดสอบแบบ **low-high** จะเกิดความเสียหายเมื่อ ผลรวมอัตราส่วนอายุความล้า $(n_1 / N_{f1} + n_{f2} / N_{f2})$ มากกว่าหนึ่ง

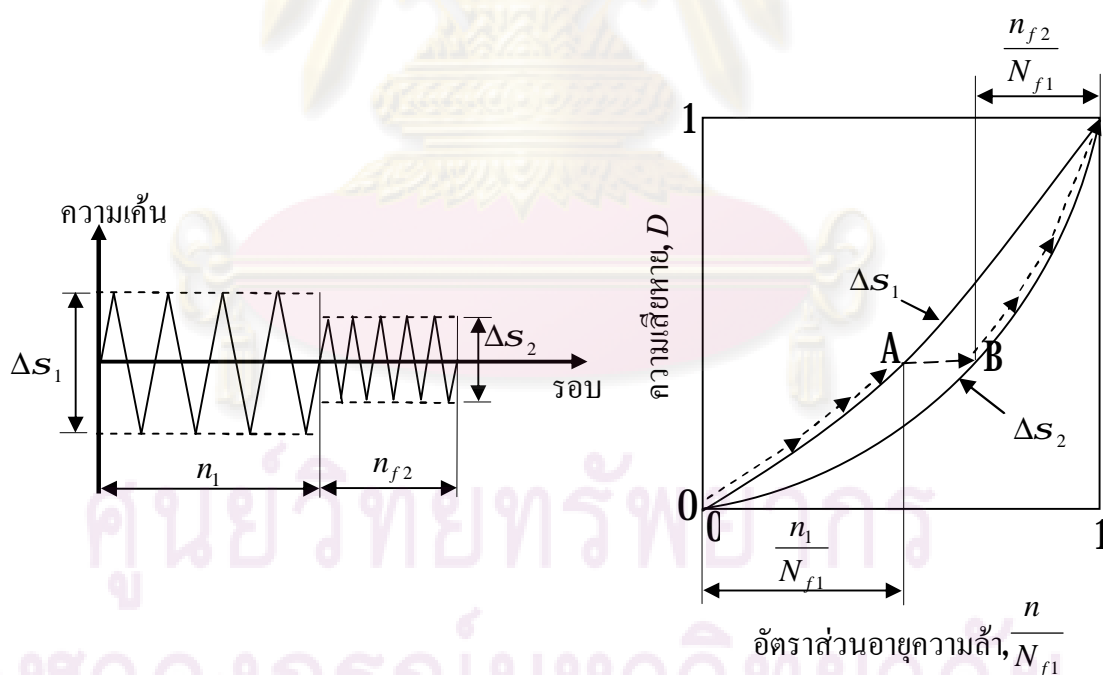


รูปที่ 22 การสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นของการทดสอบแบบ **low-high**

(ก) การทดสอบแบบ **low-high** (ข) การสะสมความเสียหาย

กรณีการทดสอบแบบ **high-low** ดังรูปที่ 23 (ก) ชิ้นงานรับภาระดัดที่พิสัยความเค้น ΔS_1 เป็นจำนวน n_1 รอบก่อนที่จะรับภาระดัดที่พิสัยความเค้น ΔS_2 จะกระทั่งเสียหาย การสะสมความเสียหายแสดงในรูปที่ 23 (ข) จากรูปที่สภาวะเริ่มต้นความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง ΔS_1 จากจุด 0 ถึงจุด A จากนั้นชิ้นงานเปลี่ยนมารับภาระดัด ΔS_2 การสะสมความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง ΔS_2 โดยเริ่มจากจุด B จนกระทั่งความเสียหายเท่ากับหนึ่ง เมื่อพิจารณารูปพบว่า การทดสอบแบบ **high-low** เกิดความเสียหายเมื่อผลรวมอัตราส่วนอายุความล้า $(n_1 / N_{f1} + n_{f2} / N_{f2})$ น้อยกว่าหนึ่ง

การทำนายอายุความล้าด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นของการทดสอบทั้งสองแบบข้างต้น สอดคล้องกับผลการทดสอบของชิ้นงานที่ทำจากวัสดุ A-201, A-517 [19] ทดสอบที่อุณหภูมิ $1,675^\circ F$ วัสดุที่ใช้ทำท่อผนังบางและวัสดุ A-516 Gr [20] พบว่า ชิ้นงานเกิดความเสียหายเมื่อผลรวมอัตราส่วนอายุความล้ามากกว่า 1 สำหรับการทดสอบแบบ **low-high** และน้อยกว่า 1 สำหรับการทดสอบแบบ **high-low** แสดงว่าแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นสามารถทำนายผลของปฏิสัมพันธ์ภาระได้



รูปที่ 23 การสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้นของการทดสอบแบบ **high-low**

(ก) การทดสอบแบบ **high-low** (ข) การสะสมความเสียหาย

แบบจำลองไม่เชิงเส้นนี้ให้ผลการทำนายที่มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น อย่างไรก็ตามตัวแปรความเสียหายในแบบจำลองของ Marco และ Starkey ที่นิยามขึ้นยังไม่มี ความหมายทางกายภาพ จึงเกิดแนวทางใหม่เกี่ยวกับการหาตัวแปรที่มีความหมายทางกายภาพ เช่น สมบัติทางกลของวัสดุ เป็นต้น และการสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหาย ซึ่งทำได้หลายแนวทาง เช่น แนวทางของกลศาสตร์จุลภาค (micromechanics) แนวทางของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง (continuum damage mechanics) เป็นต้น

2.3 กลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง

กลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่องเป็นแนวทางหนึ่งในการสร้างสมการการสะสมความเสียหาย แนวคิดของวิธีนี้คือ การแทนความเสียหายในวัสดุด้วยตัวแปรต่อเนื่อง ซึ่งใช้บ่งบอกปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุก่อนที่จะมีรอยร้าวขนาดใหญ่ (macro crack) แนวคิดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การนิยามตัวแปรความเสียหาย และการสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหาย

2.3.1 ตัวแปรความเสียหาย

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพต้องมีสหสัมพันธ์กับระดับความเสียหาย สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การลดลงของความเหนียวเป็นตัวบ่งบอกระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุ

ความเหนียว [18] คือ ความสามารถของวัสดุในการยืดตัวก่อนที่จะขาด การนิยามความเหนียวของวัสดุทำได้ 2 แบบ คือ นิยามในรูปของระยะยืดตัว (elongation) และนิยามในรูปของการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (reduction of area) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้นิยามที่สอง ซึ่งกำหนดให้อัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด y คือ

$$y = \left(\frac{A_i - A_f}{A_i} \right) \quad (29)$$

โดย A_i คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดตรงตำแหน่งคอคอด

ในกรณีที่หน้าตัดชิ้นงานทดสอบเป็นวงกลม สามารถเขียนสมการที่ (29) อยู่ในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลาง ได้ดังนี้

$$y = \left(\frac{d_i^2 - d_f^2}{d_i^2} \right) \quad (210)$$

โดย d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

d_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตรงตำแหน่งคอคอด

นิยามตัวแปรความเสียหายในรูปของอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด [91013]

$$D = 1 - \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\tilde{y}}\right)}{\ln\left(\frac{1}{1-y}\right)} \quad (211)$$

โดย y คือ อัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า

\tilde{y} คือ อัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

ในสมการที่ (211) ถ้า $y = \tilde{y}$ จะหมายความว่าชิ้นงานไม่สูญเสียความเหนียวหรือไม่มี
ความเสียหายสะสมอยู่ ($D = 0$) แต่ถ้า $\tilde{y} = 0$ จะหมายความว่าชิ้นงานสูญเสียความเหนียวทั้งหมด
หรือชิ้นงานเกิดความเสียหาย ($D = 1$)

วิทยานิพนธ์นี้อาจใช้คำว่า “ความเหนียว” สลับกับคำว่า “อัตราส่วนการลดลงของ
พื้นที่หน้าตัด” บ้างในบางครั้ง ขอให้เข้าใจว่ามีความหมายเหมือนกัน

2.3.2 การสร้างแบบจำลองการสะสมความเสียหาย

การสร้างแบบจำลองตามหลักการของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยเริ่มจากอสมการของ
Clausius-Duhem [21] ต่อไปนี้

$$s_{ij} \dot{e}_{ij} - r(j + sT) - \frac{q_i}{T} \cdot T_{,i} \geq 0 \quad (212)$$

โดย s_{ij} คือ เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor)

e_{ij} คือ เทนเซอร์ความเครียด (strain tensor)

r คือ ความหนาแน่น (density)

j คือ specific Helmholtz free energy

s คือ เอนโทรปี (specific entropy)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

q_i คือ ฟลักซ์ความร้อน (heat flux)

Helmholtz free energy j [21] เป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่าง ๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$j = j(e_{ij}^e, T, D, V_k) \quad (213)$$

โดย e_{ij}^e คือ เทนเซอร์ความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain tensor)

D คือ ตัวแปรความเสียหาย

V_k คือ กลุ่มของตัวแปรสถานะภายใน (internal state variables)

เนื่องจาก $e_{ij}^e = e_{ij} - e_{ij}^p$ สมการที่ (213) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$j = j(e_{ij}, e_{ij}^p, T, D, V_k) \quad (214)$$

โดย e_{ij}^p คือ เทนเซอร์ความเครียดพลาสติก (plastic strain tensor)

ตัวแปรสถานะภายในอาจจะเป็นสเกลาร์ เวกเตอร์ หรือเทนเซอร์ ตัวแปรเหล่านี้จะแทนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในวัสดุระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูปพลาสติกและกระบวนการเกิดความเสียหาย

หาอนุพันธ์สมการที่ (214) จะได้

$$dj = \frac{\partial j}{\partial e_{ij}} de_{ij} + \frac{\partial j}{\partial e_{ij}^p} de_{ij}^p + \frac{\partial j}{\partial T} dT + \frac{\partial j}{\partial D} dD + \frac{\partial j}{\partial V_k} dV_k \quad (215)$$

แทนสมการที่ (215) ในสมการที่ (212) จะได้

$$s_{ij} = r \frac{\partial j}{\partial e_{ij}} \quad (216)$$

สมการที่ (216) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$s_{ij} = -r \frac{\partial j}{\partial e_{ij}^p} \quad (217)$$

$$s = -\frac{\partial j}{\partial T} \quad (218)$$

และ

$$-r \frac{\partial j}{\partial e_{ij}^p} de_{ij}^p - r \frac{\partial j}{\partial D} dD - r \frac{\partial j}{\partial V_k} dV_k - \frac{1}{T} q_i T_i \geq 0 \quad (219)$$

สามเทอมแรกในสมการที่ (219) คือ การสูญเสียทางกล (**mechanical dissipation**) และ เทอมสุดท้าย คือ การสูญเสียทางความร้อน (**thermal dissipation**) กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ กำหนดว่าการสูญเสียทางกลมีค่าเป็นบวก ดังนั้น

$$-r \frac{\partial j}{\partial e_{ij}^p} \dot{e}_{ij}^p - r \frac{\partial j}{\partial D} \dot{D} - r \frac{\partial j}{\partial V_k} \dot{V}_k \geq 0$$

กำหนดให้ $Y = r \frac{\partial j}{\partial D}$ และ $A_k = -r \frac{\partial j}{\partial V_k}$ สมการข้างบน จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$s_{ij} \dot{e}_{ij}^p - Y \dot{D} + A_k \dot{V}_k \geq 0 \quad (2.20)$$

โดย A_k คือ **thermodynamics conjugate forces**

Y คือ อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (**strain energy density release rate**)

การได้มาของ **kinetic evolution law** [21] ได้จากการสมมุติการมีอยู่ของ **potential dissipation** f ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่าง ๆ ต่อไปนี้

$$f = f(s_{ij}, A_k, Y, e_{ij}^e, V_k, D) \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21)

$$\dot{e}_{ij}^p = \dot{f} \frac{\partial f}{\partial s_{ij}} \quad (2.22)$$

$$\dot{V}_k = \dot{f} \frac{\partial f}{\partial A_k} \quad (2.23)$$

$$\dot{D} = \dot{f} \frac{\partial f}{\partial Y} \quad (2.24)$$

โดย \dot{f} คือ การกำหนดจากสถานะตรงกันของ **plastic dissipation potential** **Lemaitre** [6] กำหนดว่า

$$\dot{f} = \dot{f} (1 - D) \quad (2.25)$$

โดย \dot{f} คือ อัตราการสะสมความเครียดพลาสติก ($\dot{f} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p$)

รูปแบบของฟังก์ชันการสูญเสียขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา รูปแบบที่แน่นอนของฟังก์ชันสามารถหาได้จากการพิจารณากลไกจุลภาค **Lemaitre [21]** พิจารณาจากคำจำกัดความของกลไกจุลภาค ซึ่งกระบวนการเกิดความเสียหายประกอบด้วย การเติบโตของรอยร้าวล้า (**fatigue crack growth**) การเริ่มต้นและเติบโตของการคืบ (**creep cavity nucleation and growth**) สรุปว่า อัตราความเสียหายสำหรับกระบวนการเกิดความเสียหายของทั้งสามแบบนี้เป็นส่วนสำคัญของอัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด Y กับอัตราการสะสมความเครียดพลาสติก $\dot{\epsilon}$ คือ

$$\dot{\epsilon} \propto Y \dot{\epsilon} \quad (2.26)$$

โดย $\dot{\epsilon}$ คือ อัตราการเติบโตของความเสียหาย (**damage growth rate**)

แทนค่าสมการที่ (2.26) และ (2.25) ในสมการที่ (2.24) จะได้

$$f \propto \frac{Y^2}{2(1-D)}$$

หรือ

$$f = \frac{Y^2}{2S_0(1-D)} \quad (2.27)$$

โดย S_0 คือ ค่าคงตัวของวัสดุ

เมื่อใช้สมการที่ (2.24) และ (2.25) จะได้

$$\dot{\epsilon} = \frac{Y}{S_0} \dot{\epsilon} \quad (2.28)$$

ถ้าดับต่อไปพิจารณาตัวแปร Y สมมุติว่าไม่มีผลคู่ควบระหว่างตัวแปรสถานะภายใน V_k และผลของความเสียหายต่อคุณสมบัติในช่วงยืดหยุ่น [21] จะได้

$$j = j_e(e_{ij}^e, T, D) + j_p(T, V_k) \quad (2.29)$$

โดย j_e คือ ส่วนความยืดหยุ่นของพลังงานอิสระ

j_p คือ ส่วนพลาสติกของพลังงานอิสระ

ส่วนความยืดหยุ่นของพลังงานอิสระ j_e คือ

$$j_e = \frac{1}{2r} (1-D) C_{ijkl} e_{ij}^e e_{kl}^e \quad (2.30)$$

โดย C_{ijkl} คือ **elastic modulus**

ดังนั้นการใช้สมการที่ (216) จะเขียนเทนเซอร์ความเค้น ได้ดังนี้

$$s_{ij} = r \frac{\partial j_e}{\partial e_{ij}} = C_{ijkl} e_{kl}^e (1-D) \quad (231)$$

จาก
$$Y = r \frac{\partial j_e}{\partial D} \quad (232)$$

ดังนั้น
$$-Y = \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij}^e e_{kl}^e \quad (233)$$

จากคำจำกัดความของพลังงานความเครียดยืดหยุ่น w_e (elastic strain energy)

$$w_e = \int s_{ij} de_{ij}^e \quad (234)$$

ภายใต้ความเค้นคงที่ สมการที่ (234) จะได้

$$w_e = \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij}^e e_{kl}^e \quad (235)$$

รวมสมการที่ (231), (233) และ (235) จะได้

$$-Y = \frac{w_e}{1-D} \quad (236)$$

ลำดับต่อไป พิจารณากฎความยืดหยุ่นกับความเสียหาย

$$e_{ij}^e = \frac{1+n}{E} \frac{s_{ij}}{1-D} - \frac{n}{E} \frac{s_{kk}}{1-D} d_{ij} \quad (237)$$

โดย n คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

E คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

d_{ij} คือ Kronecker delta ($d_{ij} = 1$ ถ้า $i = j$, $d_{ij} = 0$ ถ้า $i \neq j$)

การแยกระหว่างเทนเซอร์ความเค้นและเทนเซอร์ความเครียดยืดหยุ่นต่อเทอมของความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นอุทกสถิต

$$s_{ij} = s_{ij} + s_H d_{ij} \quad (238)$$

$$e_{ij}^e = e_{ij}^e + e_H^e d_{ij} \quad (239)$$

โดย s_{ij} และ s_H คือ เทนเซอร์ความเค้นเบี่ยงเบน (**deviatoric stress tensors**) และความเค้นอุทกสถิต (**hydrostatic stress**)

e_{ij}^e และ e_H^e คือ เทนเซอร์ความเครียดยืดหยุ่นเบี่ยงเบน (**deviatoric elastic strain tensors**) และ เทนเซอร์ความเครียดยืดหยุ่นอุทกสถิต (**hydrostatic elastic strain tensors**)

แทนสมการที่ (2.39) และ (2.38) ในสมการที่ (2.34) จะได้

$$w_e = \int s_{ij} de_{ij}^e + d_{ij} d_{ij} \int s_H de_H^e$$

$$w_e = \frac{1}{2} \left(\frac{1+n}{E} \frac{s_{ij} s_{ij}}{1-D} + 3 \frac{1-2n}{E} \frac{s_H^2}{1-D} \right) \quad (2.40)$$

ความเค้นสมมูลของ **von Mises** s_{eq} (**von Mises equivalent stress**) คือ

$$s_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (2.41)$$

ดังนั้น

$$-Y = \frac{w_e}{1-D} = \frac{s_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+n) + 3(1-2n) \left(\frac{s_H}{s_{eq}} \right)^2 \right] \quad (2.42)$$

โดย $\frac{s_H}{s_{eq}}$ คือ อัตราส่วนสามแกน (**triaxiality ratio**)

สำหรับกรณีความเค้นแกนเดียว (**uniaxial stress**) สมการที่ (2.42) และ (2.28) จะลดรูปได้ดังนี้

$$-Y = \frac{s^2}{2E(1-D)^2} \quad (2.43)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{s^2}{2ES_0(1-D)^2} \dot{\epsilon}_p \quad (2.44)$$

สำหรับความเสียหาย **Lemaitre [9]** เสนอ **dissipation potential** อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี

$$f = \frac{S_0}{\frac{b}{2} + 1} \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^{\frac{b}{2} + 1} f(D) \quad (2.45)$$

โดย S_0 และ b คือ ค่าคงตัวของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

$f(D)$ คือ ฟังก์ชันของตัวแปรความเสียหาย

Cheng [9], B. Wang [13] เสนอฟังก์ชันของตัวแปรความเสียหายอยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$f(D) = [1 - (1 - D)^{1+b}]^Y \quad (246)$$

นำสมการที่ (246) แทนในสมการที่ (245) จะได้

$$f = \frac{S_0}{\frac{b}{2} + 1} \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^{\frac{b}{2} + 1} [1 - (1 - D)^{1+b}]^Y \quad (247)$$

อัตราการเติบโตของความเสียหาย \mathcal{I} เขียนได้ดังนี้

$$\mathcal{I} = -\frac{\partial f}{\partial Y} \quad (248)$$

นำสมการที่ (247) แทนในสมการที่ (248) จะได้

$$\mathcal{I} = -\frac{\partial f}{\partial Y} = \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^{\frac{b}{2}} [1 - (1 - D)^{1+b}]^Y \quad (247)$$

สมการที่ (249) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dD}{dn} = \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^{\frac{b}{2}} [1 - (1 - D)^{1+b}]^Y \quad (250)$$

แทนสมการที่ (243) ในสมการที่ (250) จะได้

$$\frac{dD}{dn} = \left[\frac{S^2}{2ES_0(1-D)^2} \right]^{\frac{b}{2}} [1 - (1 - D)^{(1+b)}]^Y \quad (251)$$

กำหนดให้ตัวแปรความเสียหายในสถานะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ ($n = 0, D = 0$) เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (251) จะได้

$$\int_0^D \frac{d[1 - (1 - D)^{1+b}]}{[1 - (1 - D)^{1+b}]^Y} = \int_0^n (1 + b) \left(\frac{S^2}{2ES_0} \right)^{\frac{b}{2}} dn$$

$$[1 - (1 - D)^{(1+b)}]^{(1-Y)} = (1 + b) \left[\frac{S^2}{2ES_0} \right]^{\frac{b}{2}} n \quad (252)$$

ความเสียหายล่าเกิดขึ้นเมื่อ $D = 1$ และ $n = N_f$ แทนค่าในสมการที่ (252) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\left(\frac{s^2}{2ES_0}\right)^{\frac{b}{2}} = \frac{1}{(1+b)N_f} \quad (253)$$

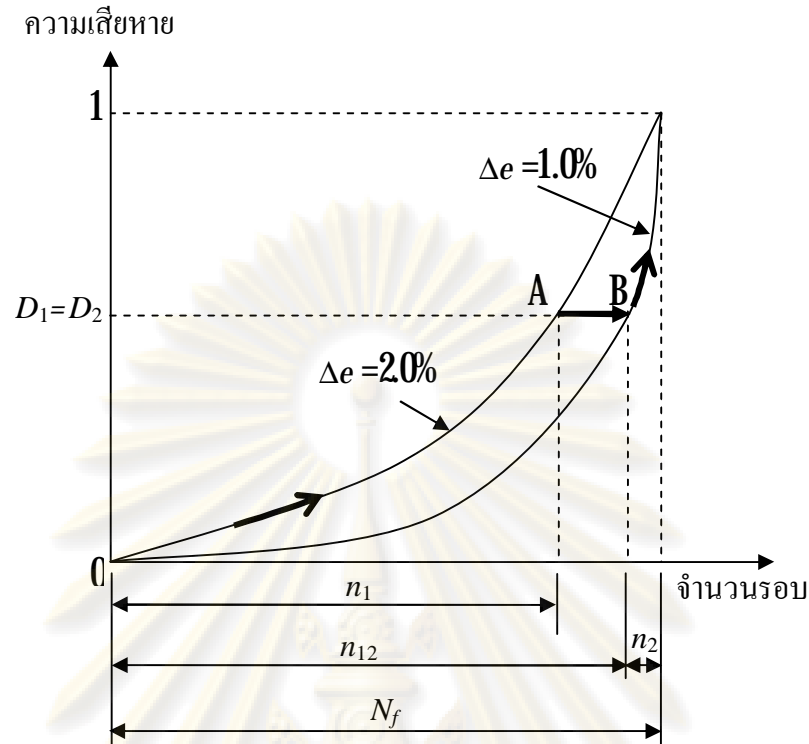
แทนค่าสมการที่ (253) ในสมการที่ (252) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเสียหายล่ากับอัตราส่วนอายุความล่า และค่าคงตัวที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและการทดสอบความล่า ดังนี้

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-y}} \right]^{\frac{1}{1+b}} \quad (254)$$

สมการที่ (254) สามารถทำนายการสะสมความเสียหายล่าได้ เมื่อทราบค่าคงตัวของวัสดุ y และ b สำหรับ y หาค่าได้จากการวัดพื้นที่หน้าตัดก่อนและหลังการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปต่อพื้นที่หน้าตัดเดิม ในสมการที่ (210) สำหรับ b หาได้จากการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ของสมการ (254) กับข้อมูลความเหนียวที่อัตราส่วนอายุความล่าต่าง ๆ

ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงการนำสมการที่ (254) ไปประยุกต์กับปัญหาการะล่าสองระดับ เพื่อคำนวณอัตราส่วนอายุความล่าของบล็อกหลัง รูปที่ 24 แสดงการสะสมความเสียหายของการทดสอบแบบ **high-low** ซึ่งเป็นการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับความเสียหายเส้นโค้งบนและล่างในรูป คือ เส้นทางการสะสมความเสียหายของชิ้นงานที่รับภาระล่าที่พิสัยความเครียดคงที่ 2.0% และ 1.0% ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 24 การสะสมความเสียหายของการทดสอบแบบ high-low

สถานะเริ่มต้นชิ้นงานรับภาระค่าที่พิสัยความเครียดคงที่ 2.0% เป็นจำนวน n_1 รอบ การสะสมความเสียหายจะวิ่งบนเส้น $\Delta e = 2.0\%$ จนไปหยุดที่จุด A ซึ่งมีความเสียหายเท่ากับ D_1 จากนั้นกำหนดให้ชิ้นงานรับภาระค่าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% (การสะสมความเสียหายเริ่มจากจุด B บนเส้น $\Delta e = 1.0\%$) จนกระทั่งเสียหาย จากรูปพบว่า ก่อนที่ชิ้นงาน จะรับภาระค่าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% ชิ้นงานมีการสะสมความเสียหายเท่ากับ D_2 ที่ระดับความเสียหายนี้ (จุด B) เทียบเท่ากับว่า ชิ้นงานรับภาระค่าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% เป็นจำนวน n_{12} รอบ ซึ่งจำนวนรอบ n_{12} นี้คือจำนวนรอบภายใต้ภาระบล็อกหลังที่ทำให้ความเสียหายเท่ากับความเสียหายเนื่องจากการรับภาระของบล็อกแรก จากสมการที่ (254) จะหาค่าอัตราส่วนอายุความล้าของบล็อกหลังได้โดยกำหนดให้ $D_1 = D_2$ จะได้

$$1 - \left[1 - \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{1}{1-y} \right)^{\left(\frac{1}{1+b_1} \right)}} \right] = 1 - \left[1 - \left(\frac{n_{12}}{N_{f2}} \right)^{\left(\frac{1}{1-y} \right)^{\left(\frac{1}{1+b_2} \right)}} \right] \quad (255)$$

ในสมการที่ (255) ตัวห้อย (sub scrip) 1 และ 2 คือ การทดสอบความล้าของบล็อกแรกและบล็อกหลัง ตามลำดับ เมื่อจัดรูปแบบสมการที่ (255) จะได้

$$\frac{n_{12}}{N_{f2}} = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{1}{1-y}} \right]^{\frac{1+b_2}{1+b_1}} \right\}^{1-y} \quad (256)$$

เนื่องจาก $n_{12} = N_{f2} - n_2$ แทนค่า n_{12} ในสมการที่ (256) จะได้

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = 1 - \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{1}{1-y}} \right]^{\frac{1+b_2}{1+b_1}} \right\}^{1-y} \quad (257)$$

สมการที่ (257) ใช้คำนวณหาอัตราส่วนอายุความล้าของบล็อกหลังเมื่อชิ้นงานรับภาระล้าสองระดับ

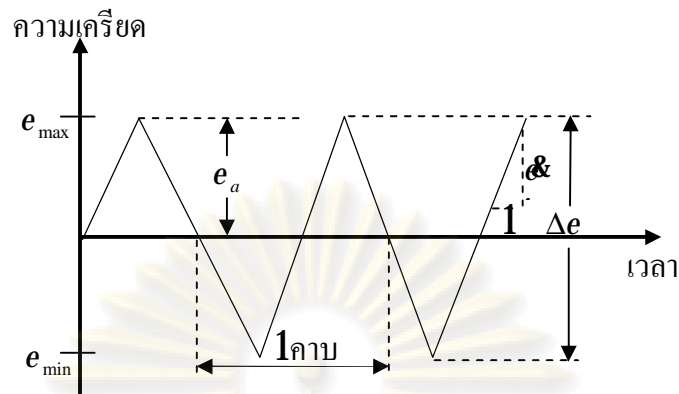
2.4 การทดสอบความล้า

การทดสอบความล้าทำเพื่อหาความแข็งแรงล้า บิดจำกัดความทนทาน (**endurance limit**) เป็นต้น การทดสอบแบ่งได้ 2 ประเภท [15] คือ แบบควบคุมภาระ (**load control**) และแบบควบคุมความเครียด (**strain control**)

1. การทดสอบแบบควบคุมภาระ คือ การกำหนดให้ชิ้นงานรับภาระที่มีขนาดภาระสูงสุดคงที่ ในแต่ละรอบการทดสอบ จนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย

2. การทดสอบแบบควบคุมความเครียด คือ การควบคุมระยะยืดหรือหดของช่วงความยาวเกจ ให้คงที่ตลอดการทดสอบ

การทดสอบความล้ารอบด้าที่อุณหภูมิสูงนิยมใช้คลื่นรูปสามเหลี่ยมสมมาตร ที่มีอัตราความเครียดตั้งแต่ 1×10^3 ต่อวินาที ขึ้นไป [19] ดังรูปที่ 25 เหตุผลที่ใช้รูปคลื่นนี้เนื่องจาก 1) ความเสียหายล้าขึ้นกับอัตราความเครียด ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของความล้าที่รับพิสัยความเครียดคงที่ จำเป็นต้องควบคุมอัตราความเครียดให้คงที่ ซึ่งการใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตรสามารถควบคุมอัตราความเครียดคงที่ได้ แม้ว่าจะทดสอบที่พิสัยความเครียดต่างกัน 2) กำจัดผลของการกีดต่อความเสียหาย จากรูปที่ 25 มีนิยามศัพท์ต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 25 รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร

ความเครียดสูงสุด (**maximum strain, e_{\max}**) คือ ตัวเลขที่มีค่ามากที่สุดทางพีชคณิตในแต่ละคาบ กำหนดให้ความเครียดตึงมีค่าบวก ความเครียดกดมีค่าลบ

ความเครียดต่ำสุด (**minimum strain, e_{\min}**) คือ ตัวเลขที่มีค่าต่ำสุดทางพีชคณิตในแต่ละคาบ

พิสัยความเครียดรวม (**total strain range, Δe**) คือ ผลต่างทางพีชคณิตระหว่างความเครียดสูงสุดกับความเครียดต่ำสุด

$$\Delta e = e_{\max} - e_{\min} \quad (258)$$

แอมพลิจูดความเครียด (**strain amplitude, e_a**) คือ ครึ่งหนึ่งของพิสัยความเครียด

$$e_a = \frac{\Delta e}{2} \quad (259)$$

ความเครียดเฉลี่ย (**mean strain, e_m**) คือ ครึ่งหนึ่งของผลรวมทางพีชคณิตระหว่างความเครียดสูงสุดกับความเครียดต่ำสุด

$$e_m = \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2} \quad (260)$$

อัตราความเครียด (**strain rate, $\&$**) คือ อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดความเครียดต่อหนึ่งคาบเวลา

$$\& = \frac{4e_a}{1 \text{ cycle}}$$

หรือ

$$\& = 2f\Delta e \quad (261)$$

โดย f คือ ความถี่ (Hz)

2.5 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อวัดสมบัติทางกลของวัสดุต่อแรงที่มากระทำ ชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงด้วยแรงแนวแกน (**uniaxial**) เพียงแนวเดียว จนชิ้นงานทดสอบขาดจากกัน ภาคตัดของชิ้นงานทดสอบจะเป็นวงกลม หรือสี่เหลี่ยมก็ใช้ทดสอบได้เช่นกัน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ และมาตรฐานการทดสอบ [18] เช่น มาตรฐานของ **ASTME8** เป็นต้น นอกจากนี้ยังกำหนดความเร็วในการเพิ่มภาระหรืออัตราการยืดของชิ้นงานทดสอบเอาไว้ด้วย

เครื่องทดสอบแรงดึงถูกออกแบบมาให้สามารถดึงชิ้นงานด้วยความเร็วในการดึงคงที่พร้อมกับวัดขนาดของภาระที่กระทำด้วยโพลีเซลล์ และวัดการยืดตัวที่เกิดขึ้นด้วย **extensometer** ขนาดภาระและระยะการยืดของชิ้นงานถูกประมวลผลด้วยชุดควบคุมเพื่อปรับแก้ค่าที่ผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ผลการทดสอบแรงดึงมักถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น s กับความเครียด e ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$s = \frac{F}{A_i} \quad (262)$$

$$e = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (263)$$

โดย F คือ แรงดึง ณ เวลาใด ๆ (นิวตัน)

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ (มม.²)

L_i คือ ความยาว ณ เวลาใด (มม.)

L_o คือ ความยาวเดิมหรือความยาวเกจ (มม.)

กรณีที่ชิ้นงานยืดมากกว่าพิสัยการวัดของ **extensometer** การคำนวณความเครียดจะคิดจากระยะ **stroke** ที่เปลี่ยนไป ΔL_{stroke} ซึ่งเทียบเท่ากับความยาวเกจที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเกจ ดังสมการ

$$e = \frac{\Delta L_{stroke}}{L_o} \quad (264)$$

26สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย โดยเริ่มจากประเภทของปัญหาความล่า คือ ความล่ารอบต่ำซึ่งมี อายุความล่า N_f น้อยกว่า 10^4 รอบ และความล่ารอบสูงซึ่งมี อายุความล่า N_f มากกว่า 10^4 รอบ ต่อไปกล่าวถึงแบบจำลองการสะสมความเสียหายล่า ซึ่งประกอบด้วย 1) แบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น ผลการทำนายด้วยแบบจำลองนี้ไม่แม่นยำสำหรับชิ้นงานที่รับภาระสองระดับ และ 2) แบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น เริ่มจากแบบจำลองของ **Marco** และ **Starkey** แม้ว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายผลของปฏิสัมพันธ์ภาระได้ แต่ตัวแปรความเสียหายในแบบจำลองยังขาดความหมายทางกายภาพ ข้อจำกัดนี้นำไปสู่การประยุกต์แนวทางของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง และการสร้างแบบจำลองความเสียหาย สุดท้ายกล่าวถึงการทดสอบความล่า และการทดสอบแรงดึง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

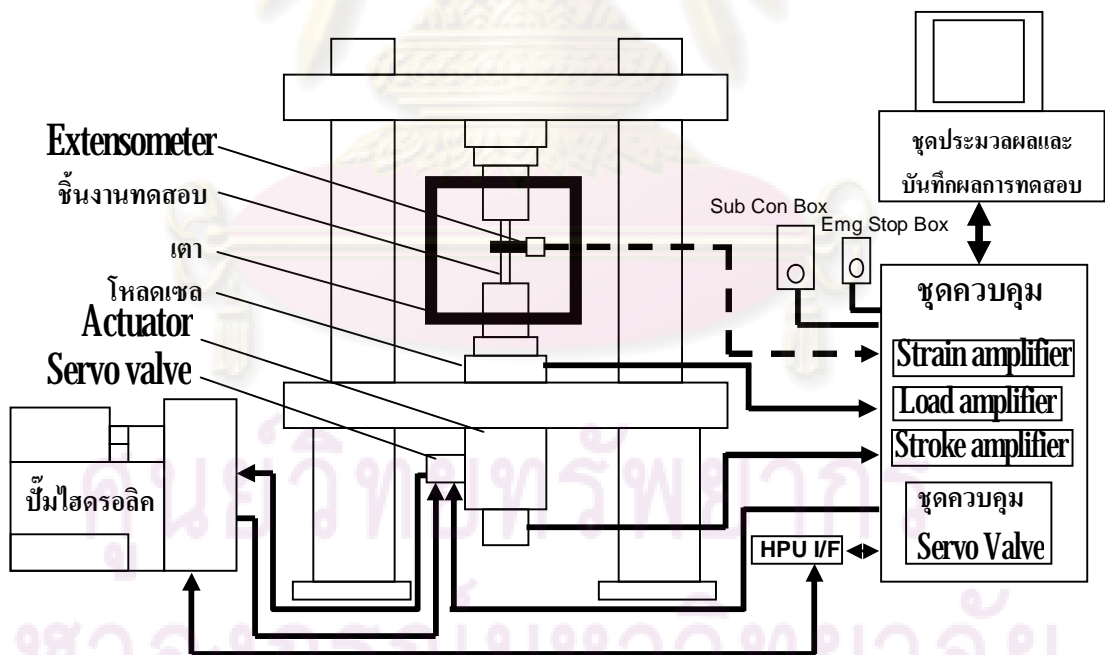
บทที่ 3

การเตรียมการทดสอบและวิธีทดสอบ

หัวข้อในบทนี้ประกอบด้วย หลักการทำงานของระบบทดสอบ อุปกรณ์ในระบบ รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ เช่น วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน คุณสมบัติทางกล แบบชิ้นงาน เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึง การสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเสียรูปของชิ้นงาน (**extensometer**) การสอบเทียบโหลดเซลล์ และการสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุมบนความยาวเกจของชิ้นงาน จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง หัวข้อสุดท้ายคือ ขั้นตอนการทดสอบ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องและการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง

3.1 ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) ชุดไฮดรอลิก (**hydraulic unit**) 2) เครื่องทดสอบ 3) ชุดควบคุม (**controller**) และ 4) ชุดควบคุมอุณหภูมิและเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความล้าและแรงดึง

จากรูปที่ 31 การทำงานของระบบทดสอบเริ่มจากชุดควบคุมส่งสัญญาณไฟฟ้าให้เซอร์โววาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกที่เข้า **actuator** เพื่อสร้างภาระให้แก่ชิ้นงาน ภาระที่กระทำกับชิ้นงานจะถูกตรวจวัดด้วยโพลคเซล โพลคเซลจะส่งสัญญาณไฟฟ้ากลับไปยังชุดควบคุม ขณะเดียวกัน **extensometer** จะส่งสัญญาณไฟฟ้าซึ่งแสดงระยะเสยรูปของชิ้นงานกลับไปยังชุดควบคุม ชุดควบคุมจะเปรียบเทียบสัญญาณป้อนกลับนี้กับสภาวะทดสอบที่ต้องการ แล้วจะปรับแก้สัญญาณควบคุมเพื่อให้สภาวะที่เกิดขึ้นจริงใกล้เคียงกับสภาวะทดสอบที่ต้องการมากที่สุด เตาทำหน้าที่ให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยรับคำสั่งจากชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำงานอิสระจากชุดควบคุม

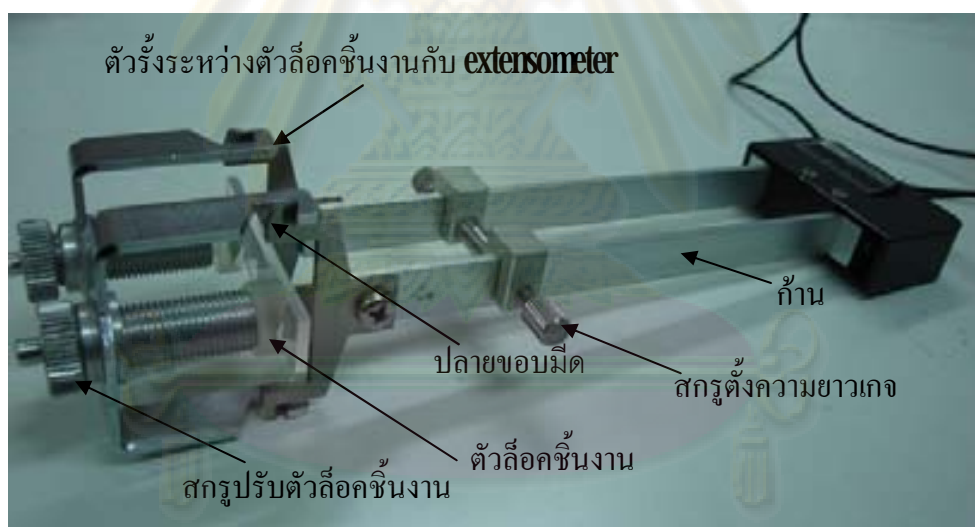
สำหรับ **extensometer** วัดระยะเสยรูปที่อุณหภูมิสูงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 32 ซึ่งมีพิสัยการวัดอยู่ในช่วง ± 1 มม. ความยาวเกจ 20 มม. ในการติดตั้ง **extensometer** ปลายข้างหนึ่งของแท่งควอร์ตซ์จะสัมผัสกับผิวชิ้นงาน และมีสปริงรังก้านยึดสลักเซรามิกซึ่งสัมผัสผิวชิ้นงานด้านตรงข้ามกับปลายแท่งควอร์ตซ์ ปลายแท่งควอร์ตซ์ซึ่งเคลื่อนที่ตามการเสยรูปแนวแกนของชิ้นงาน และทำให้ปลายอีกข้างหนึ่งเคลื่อนที่ด้วย ระยะเคลื่อนที่ที่ปลายนี้ถูกวัดด้วย LVDT (**linear variable differential transformer**) ซึ่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้ากลับไปยังชุดควบคุม

สำหรับ **extensometer** วัดระยะเสยรูปที่อุณหภูมิห้อง ใช้รุ่น SG25-100 มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 33 ซึ่งมีพิสัยการวัด 10 มม. ความยาวเกจเท่ากับ 25 มม. การติดตั้ง **extensometer** จะติดตั้งบริเวณความยาวขนาน (**parallel length**) โดยให้สกรูของตัวล้อครึ่งปลายด้านที่เป็นขอบมีด (**knife edge**) มากดผิวชิ้นงานด้วยแรงที่เหมาะสม ปลายขอบมีดจะเคลื่อนที่ตามการเสยรูปแนวแกนของชิ้นงาน และ **extensometer** จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดควบคุม

เตาใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบ PID การให้ความร้อนชิ้นงานใช้หลักการขดลวดความต้านทาน โดยมีขดลวด 3 ชุด อยู่ที่ส่วน คือ ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ขดลวดแต่ละตำแหน่งมีกำลังความร้อนไม่เท่ากัน เตาสามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด 1200 °C ชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ให้คงที่ได้ในพิสัย $\pm 3^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.2 extensometer วัดระยะเสียดรูปบริเวณความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.3 extensometer วัดระยะเสียดรูปบริเวณความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

3.2 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 316 รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบทำตามแบบของกลุ่มมือการใช้เครื่องทดสอบ [22] ดังแสดงในรูป 3.4 เนื่องจากปากจับ (grip) รับแรงได้ไม่เกิน 5 ตัน ดังนั้นจึงใช้ชิ้นงานขนานเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ในการทดสอบ ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้อง แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 31 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (โดยน้ำหนัก, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.012	0.350	1.820	0.028	0.027	10.050	16.770	2.040

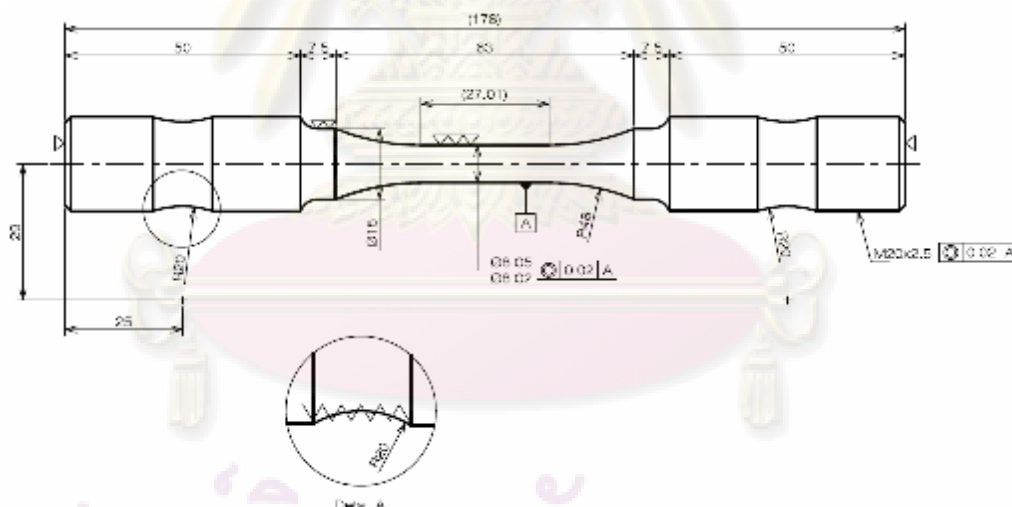
หมายเหตุ มาตรฐาน JIS กำหนด $C \leq 0.030$, $Si \leq 1.000$, $Mn \leq 2.000$, $P \leq 0.045$, $S \leq 0.030$,
 $10.000 \leq Ni \leq 14.000$, $16.000 \leq Cr \leq 18.000$ และ $2.000 \leq Mo \leq 3.000$

ตารางที่ 32 คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง

ความเค้นดึง สูงสุด, s_u (MPa) ¹	ความเค้นคราก, s_y (MPa) ²	มอดูลัสของความ ยืดหยุ่น, E (GPa) ³	อัตราส่วนการลดลง ของพื้นที่หน้าตัด, y (%) ⁴	ความแข็ง (HRB) ⁵
668	480	195	78	99

1, 2, 3, 4 คือ ผลการทดสอบที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้⁵ คือ ข้อมูลผู้ผลิต

ข้อมูลผู้ผลิต $s_u = 696 \text{ MPa}$, $s_y = 618 \text{ MPa}$ และ $y = 78\%$



(ก)



(ข)

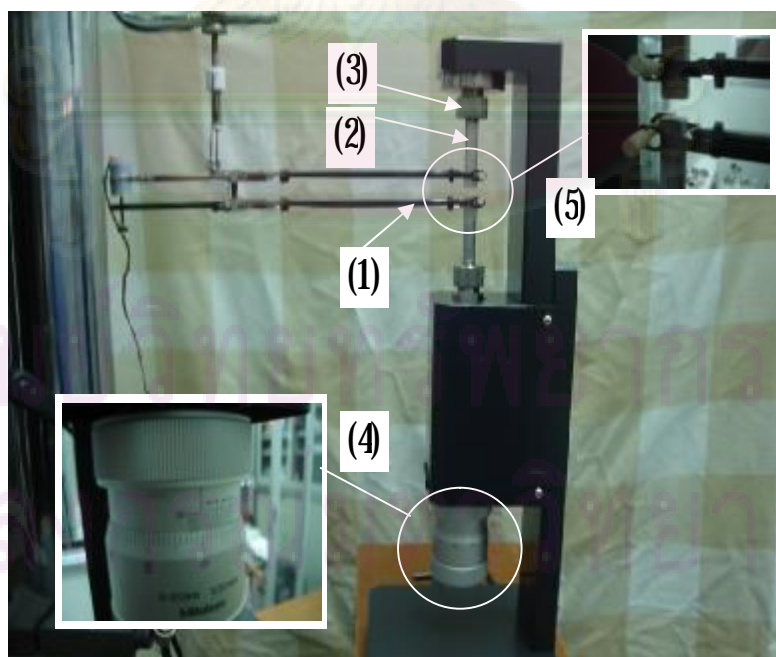
รูปที่ 34 ชิ้นงานทดสอบ

(ก) แบบผลิตชิ้นงาน (ข) ชิ้นงานที่สร้างขึ้น

3.3 การสอบเทียบ extensometer

การสอบเทียบ **extensometer** ทำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวัดระยะ โดยการเปรียบเทียบค่าที่ **extensometer** วัดกับค่าที่กำหนดโดยเครื่องมือสอบเทียบ (**calibrator**) ในรูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสอบเทียบ **extensometer** วัดระยะยึดที่อุณหภูมิสูง มีดังนี้

1. หมุนด้ามไมโครมิเตอร์ (4) ทวนเข็มนาฬิกาเพื่อเลื่อนก้านไมโครมิเตอร์ติดตั้ง **extensometer** (2) ลง
2. คลายสกรู (3) ด้านบนและด้านล่าง แล้วหมุนก้านไมโครมิเตอร์ (2) ให้ด้านผิวโค้งหันออกด้านนอก (5)
3. ขันสกรู (3) ทั้งด้านบนและด้านล่างให้แน่น
4. หมุนด้ามไมโครมิเตอร์ (4) จนสเกลบนด้ามตรงกับค่าศูนย์
5. ติดตั้ง **extensometer** (1) เข้ากับก้านไมโครมิเตอร์ (2) ของเครื่องมือสอบเทียบ
6. คลิกปุ่ม **Auto zero** ของ **extensometer** (ช่องสัญญาณ TD3) บนจอคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ค่าที่อ่านเป็นศูนย์
7. หมุนด้ามไมโครมิเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาจนอ่านค่าได้ 100 ไมโครเมตร (ก้านไมโครมิเตอร์จะเลื่อนลง 100 ไมโครเมตร หรือ 0.1 มม.) แล้วบันทึกค่า บันทึกค่าของช่องสัญญาณ TD3 บนหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์สอบเทียบ **extensometer** วัดระยะเสียรูป บริเวณความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง

8 ทำขั้นตอนที่ 7 ซ้ำ โดยหมุนด้ามไมโครมิเตอร์ในทิศทางเดิม แต่เพิ่มระยะคร่าวละ 100 ไมโครเมตร จนกระทั่งระยะรวมเท่ากับ 1 มม. (1000 ไมโครเมตร)

9 ทำขั้นตอนที่ 7 และ 8 ซ้ำ แต่หมุนด้ามไมโครมิเตอร์ในทิศทางตรงกันข้าม (ตามเข็มนาฬิกา) จนกระทั่งก้านไมโครมิเตอร์เคลื่อนที่ขึ้นเป็นระยะทาง 1 มม. เทียบกับตำแหน่งศูนย์ตอนเริ่มต้น (ทุกครั้งก่อนการหมุนด้ามไมโครมิเตอร์ในทิศทางตรงข้าม ให้หมุนด้ามไมโครมิเตอร์ต่อไปในทิศทางเดิมอีกเล็กน้อย เพื่อกำจัดความผิดพลาดเนื่องจาก Backlash)

การสอบเทียบ extensometer ทำทั้งหมด 2 ครั้ง ผลการสอบเทียบครั้งที่ 1 และ 2 แสดงอยู่ในตารางที่ 33 และ 34 ตามลำดับ การสอบเทียบครั้งที่ 2 ทำเพราะเปลี่ยนแท่งควอร์ตซ์ใหม่

การสอบเทียบครั้งที่ 1 บันทึกระยะที่ป้อนโดยเครื่องมือสอบเทียบและค่าที่ extensometer (TD3) วัดในช่วงการดึง คือ ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงระยะที่ป้อนเท่ากับ 1.000 มม. และในช่วงการกลับตำแหน่งเดิม โดยเริ่มจากระยะสุดท้ายของช่วงการดึง (1.000 มม.) กลับมายังระยะเริ่มต้นของเครื่องสอบเทียบ (เท่ากับศูนย์) เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 33 พบว่า ผลต่างของระยะที่ป้อนโดยเครื่องสอบเทียบกับค่าที่ extensometer วัด ต่างกันมากที่สุดเท่ากับ 0.016 มม. เมื่อคิดเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์การผิดพลาด (span error) เท่ากับ 1.6% เมื่อพิจารณาการใช้งานที่พิสัยความเครียด 2.0% ซึ่งเป็นช่วงใช้งานสูงสุด (สภาวะทดสอบที่พิสัยความเครียดสูงสุด) ระยะที่ extensometer วัด คือ 0.202 มม. ดังนั้นความผิดพลาดจะลดเหลือ 0.5%

การสอบเทียบครั้งที่ 2 ทำเหมือนกับครั้งที่ 1 เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 34 พบว่า ผลต่างของระยะที่ป้อนโดยเครื่องสอบเทียบกับค่าที่ extensometer วัด ต่างกันมากที่สุดเท่ากับ 0.018 มม. เมื่อคิดเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์การผิดพลาด เท่ากับ 1.8% เมื่อพิจารณาการใช้งานที่พิสัยความเครียด 2.0% ซึ่งเป็นช่วงใช้งานสูงสุด ระยะที่ extensometer วัด คือ 0.204 มม. ดังนั้นความผิดพลาดจะลดเหลือ 1.0%

จากข้อมูลในตารางที่ 33 และ 34 พบว่าค่า TD3 ในช่วงการดึงและช่วงการกลับตำแหน่งเดิมของการสอบเทียบทั้งสองครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อคำนวณค่าความผิดพลาด ณ ช่วงการใช้งานสูงสุด ($\Delta e = 2.0\%$) พบว่า ค่าความผิดพลาดน้อยมาก จึงสรุปได้ว่า extensometer อ่านค่าได้ถูกต้อง

ตารางที่ 33 การสอบเทียบ extensometer ครั้งที่ 1

ช่วงการดึง			ช่วงการกลับตำแหน่งเดิม		
ลำดับที่	ระยะที่ป้อน (มม.)	TD3 (มม.)	ลำดับที่	ระยะที่ป้อน (มม.)	TD3 (มม.)
1	0.000	0.000	12	1.000	0.984
2	0.100	0.101	13	0.900	0.903
3	0.200	0.202	14	0.800	0.803
4	0.300	0.300	15	0.700	0.703
5	0.400	0.401	16	0.600	0.602
6	0.500	0.500	17	0.500	0.501
7	0.600	0.602	18	0.400	0.402
8	0.700	0.702	19	0.300	0.302
9	0.800	0.802	20	0.200	0.202
10	0.900	0.902	21	0.100	0.102
11	1.000	0.984	22	0.000	0.001

ตารางที่ 34 การสอบเทียบ extensometer ครั้งที่ 2

ช่วงการดึง			ช่วงการกลับตำแหน่งเดิม		
ลำดับที่	ระยะที่ป้อน (มม.)	TD3 (มม.)	ลำดับที่	ระยะที่ป้อน (มม.)	TD3 (มม.)
1	0.000	0.000	12	1.000	1.016
2	0.100	0.099	13	0.900	0.914
3	0.200	0.204	14	0.800	0.812
4	0.300	0.305	15	0.700	0.710
5	0.400	0.407	16	0.600	0.608
6	0.500	0.510	17	0.500	0.506
7	0.600	0.610	18	0.400	0.402
8	0.700	0.713	19	0.300	0.302
9	0.800	0.813	20	0.200	0.202
10	0.900	0.915	21	0.100	0.102
11	1.000	1.018	22	0.000	-0.004

34 การสอบเทียบโหลดเซล

ขั้นตอนมีดังนี้

1. เดินเครื่องทดสอบ ตั้งความดันปั๊มไฮดรอลิกที่ **10 MPa** (เท่ากับความดันที่ใช้ในการทดสอบ)
2. กดปุ่ม **Auto zero** ของภาระ (ช่องสัญญาณ **TD1**) บนจอคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ค่าที่แสดงเป็นศูนย์
3. วางค้อนน้ำหนักขนาด **10 กก.** บนโหลดเซล แล้วบันทึกค่าสัญญาณ **TD1** ที่แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์
4. เพิ่มน้ำหนัก เป็น **20 และ 30 กก.** ตามลำดับ และบันทึกค่าสัญญาณ **TD1**

ตารางที่ **35** แสดงผลการสอบเทียบโหลดเซล จากตารางจะเห็นว่าโหลดเซลอ่านค่าได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักรวม (ของค้อนน้ำหนัก) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโหลดเซลมีความแม่นยำ

ตารางที่ **35** ผลการสอบเทียบโหลดเซล

น้ำหนักรวม (กก.)	ค่าสัญญาณ TD1 (กก.)
10.00	9.98
20.00	20.07
30.00	29.95

35 การสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุม

ในการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิบนความยาวเกจจะต้องถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับที่ต้องการและสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ใ้การทดสอบ ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลจะอยู่นอกช่วงความยาวเกจ ดังนั้นจึงต้องหาว่า อุณหภูมิของจุดควบคุมต้องเป็นเท่าใด จึงจะได้อุณหภูมิบนความยาวเกจตามต้องการ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เครื่องเชื่อมเฉพาะจุด (spot weld) ยี่ห้อ **Kyowa** รุ่น **GW-3C**, (ตั้งค่ากระแส ค่า **coarse** ที่ **low** และค่า **fine** ที่ **8**) เทอร์โมคัปเปิล **type k** อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ ยี่ห้อ **Center** (รูปที่ 36 (ง)) และ ยี่ห้อ **Omron** (รูปที่ 36 (ค)) ขั้นตอนการสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุม มีดังนี้

1. จัดผิวชิ้นงานในทิศตามแนวแกนเพื่อกำจัดรอยบกพร่องในแนวเส้นรอบวง เช่น รอยจากการกลึง เป็นต้น เนื่องจากการทดสอบกำหนดค่าให้กระทำให้กระทำในแนวแกน ดังนั้นรอยบกพร่องแนวเส้นรอบวงอาจจะเป็นจุดกำเนิดของความเสียหาย การขัดผิวเริ่มจากใช้กระดาษทรายเบอร์ที่มีความหยาบไปจนกระทั่งเบอร์ที่มีความละเอียด ในที่นี้เริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 280, 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ แล้วทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (acetone)

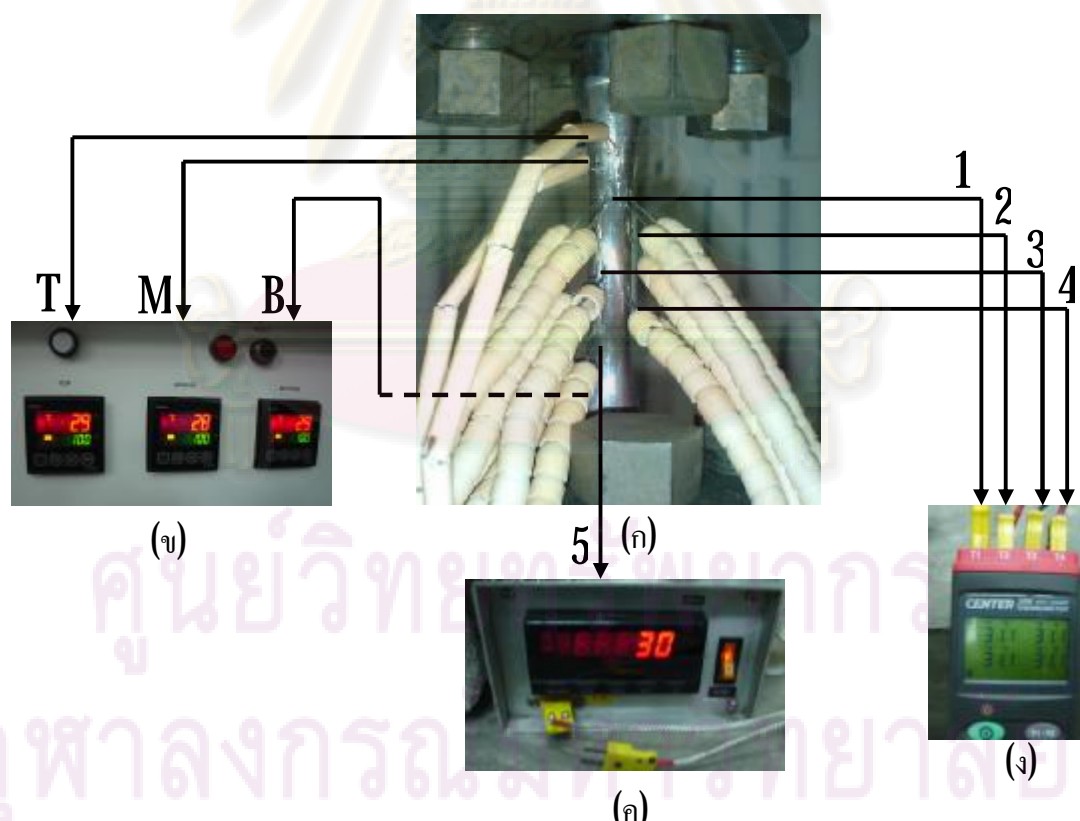
2. วัดความยาวชิ้นงานด้วยเกจวัดความสูง (height gauge)

3. กำหนดตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานแล้วใช้ปลายมีดของเกจวัดความสูงขีดเส้นไปบนผิวชิ้นงานจนครบรอบ

4. ขีดเส้นรอบชิ้นงานด้วยปลายมีดของเกจวัดความสูง ที่ตำแหน่งสูงกว่าตำแหน่งกึ่งกลางเป็นระยะทาง 6.5 และ 13 มม. และที่ต่ำกว่าตำแหน่งกึ่งกลางเป็นระยะทาง 6.5 และ 13 มม.

5. ขีดเส้นรอบชิ้นงานด้วยปลายมีดของเกจวัดความสูง ที่ตำแหน่งสูงกว่าตำแหน่งกึ่งกลาง 17 และ 20 มม. และที่ตำแหน่งต่ำกว่าตำแหน่งกึ่งกลางเป็นระยะ 19.5 มม.

6. ติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องทดสอบ



รูปที่ 36 การสอบเทียบหาอุณหภูมิควบคุม (ก) ตำแหน่งเชื่อมเทอร์โมคัปเปิลกับชิ้นงาน (ข) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ค) และ (ง) อุปกรณ์แสดงค่าอุณหภูมิ

7. เชื่อมเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ระบุไว้ในขั้นตอนที่ 4 แล้วต่อสายไปเข้าเครื่องวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 36(ค), (ง))

8. เชื่อมเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ระบุไว้ในขั้นตอนที่ 5 เทอร์โมคัปเปิลที่อยู่ตำแหน่งล่างสุด ถัดขึ้นไป และบนสุด จะต่อกับชุดควบคุมอุณหภูมิส่วนล่าง กลาง และส่วนบนของเตา (รูปที่ 36(ข)) ตามลำดับ

9. เปลี่ยนโหมดการควบคุมเป็นการควบคุมภาวะ (TD1-controlled)

10. ปรับภาระที่ทำกับชิ้นงานจนกระทั่งค่าที่อ่านจากช่องสัญญาณ TD1 เท่ากับศูนย์

11. ปรับศูนย์ค่าที่แสดงในช่องสัญญาณของ TD2 และ TD3

12. ปิดเตา

13. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 °C เมื่ออุณหภูมิที่ชุดควบคุมแสดงผลถึงค่าที่กำหนดแล้ว ทั้ง 3 จุด (ตำแหน่ง T, M และ B) ให้เพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50°C จนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

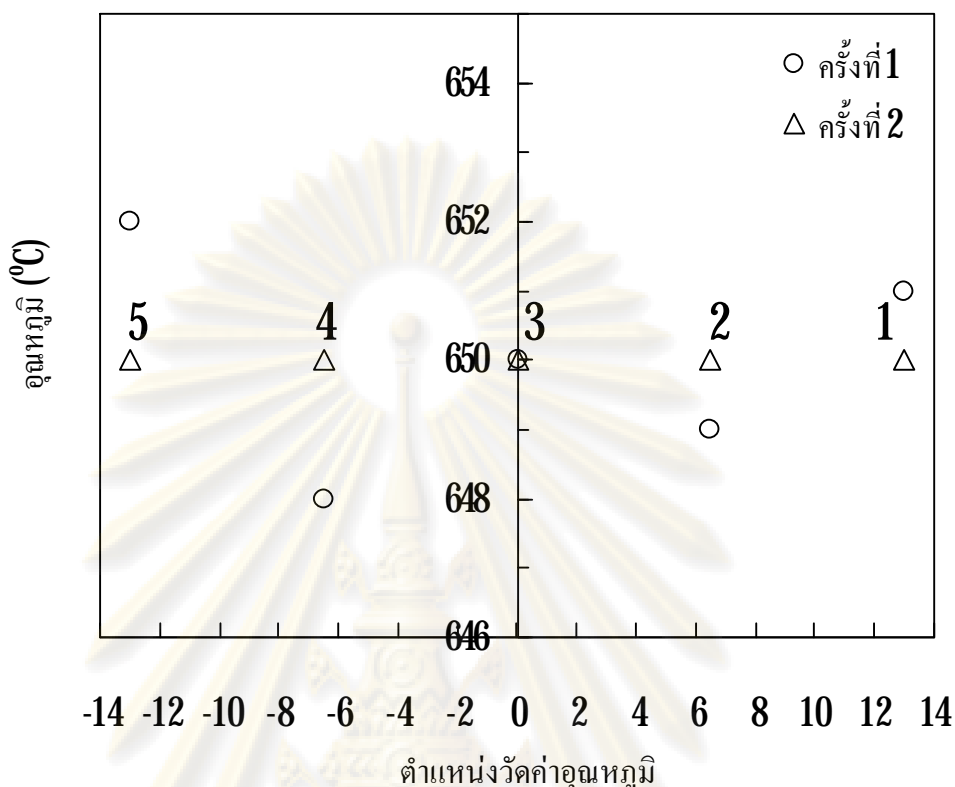
14. ปล่อยให้ชิ้นงานไว้จนกว่าอุณหภูมิชิ้นงานจะเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ในที่นี้กำหนดว่า ระยะเวลา (stroke) ซึ่งอ่านจากช่องสัญญาณ TD2 เปลี่ยนแปลงในช่วง ± 0.03 มม.

15. ปรับค่าอุณหภูมิที่ชุดควบคุมจนกว่าอุณหภูมิชิ้นงานในช่วงความยาวเกจจะมีค่าเท่ากับที่ต้องการ (ในที่นี้คือ 650°C) และมีค่าสม่ำเสมอ (หลังจากปรับแล้วต้องรอให้ระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ด้วย)

16. บันทึกค่าอุณหภูมิที่ชุดควบคุม

รูปที่ 37 แสดงการกระจายของอุณหภูมิบริเวณความยาวขนานโดยทดสอบ 2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งใช้ชิ้นงานต่างกัน เหตุผลที่ต้องทดสอบครั้งที่ 2 เนื่องจากการปรับระยะความสูง-ต่ำของเตา (สำหรับการทดสอบประเภทอื่น) เปลี่ยนไปจากครั้งที่ 1 การทดสอบทั้ง 2 ครั้งพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ควบคุมเท่ากัน (เพื่อต้องการให้อุณหภูมิบนความยาวขนาน เท่ากับ 650°C) คือ 643°C, 646°C และ 643°C ที่ตำแหน่งควบคุม T, M และ B ตามลำดับ มาตรฐาน ASTM E606-92 [23] กำหนดให้การกระจายของอุณหภูมิ แตกต่างกันไม่เกิน $\pm 2^\circ\text{C}$ ดังนั้นจึงสามารถใช้อุณหภูมิควบคุมนี้สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 650°C ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ศูนย์ คือ ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน ด้านค่าบวกและค่าลบ คือ ด้านบนและด้านล่างกึ่งกลางชิ้นงาน (มม.) ตามลำดับ หมายเลข 1 ถึง 5 ในรูปแสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลดังรูปที่ 36)

รูปที่ 37 การกระจายอุณหภูมิบนความยาวเกจ

36 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะแบ่งตามประเภทของชิ้นงาน ได้แก่ 1) ชิ้นงานใหม่ คือ ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระดัดและความร้อน 2) ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อน 3) ชิ้นงานที่ผ่านภาระดัด และ 4) ชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

361 ชิ้นงานใหม่

เครื่องมือที่ใช้คือ ไมโครมิเตอร์ชนิดวัดนอกหน้าสัมผัสสกลม (outside micrometer) ความจำแนกชัด 0.01 มม. ตำแหน่งที่วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีทั้งหมด 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งอยู่ห่างกัน 3 มม. และสมมาตรกับตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน (รูปที่ 38) ที่แต่ละตำแหน่งจะวัดขนาดในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน (แกน X และ Y ในรูปที่ 38) แล้วนำมาเฉลี่ยเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ

ตำแหน่งนั้น เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละตำแหน่ง จะนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 5 ตำแหน่งมาเฉลี่ยเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น d_i

362 ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อน

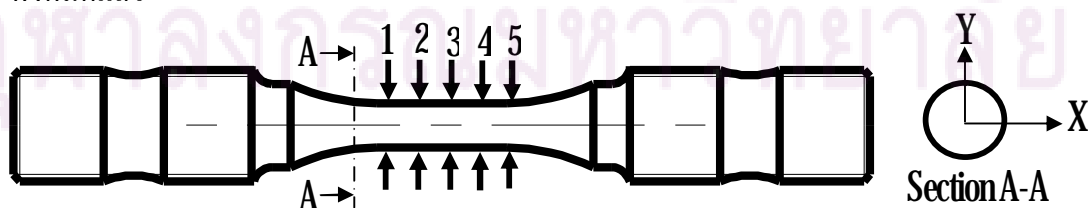
เนื่องจากการให้ความร้อนใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงและไม่มีภาระกระทำ (ควบคุมภาระเท่ากับศูนย์) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยังมีขนาดสม่ำเสมอตลอดความยาวเกจ เพราะฉะนั้นการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถใช้ไมโครมิเตอร์ได้ วิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้วิธีเดียวกับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานใหม่ ในหัวข้อที่ 361

363 ชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า

เครื่องมือที่ใช้คือ เวอร์เนีย (vernier) ความจำแนกชัด 0.02 มม. สาเหตุที่ไม่ใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดขนาด เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านภาระด้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณความยาวเกจไม่สม่ำเสมอ [ภาคผนวก ก.1] การเลือกตำแหน่งในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะพิจารณาจากตำแหน่งที่ชิ้นงานมีโอกาสแตกหักมากที่สุด เช่น ตำแหน่งรอยร้าว ตำแหน่งที่เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด เป็นต้น ที่แต่ละตำแหน่งจะวัดขนาดในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน (แกน X และแกน Y ในรูปที่ 38) เมื่อทดสอบแรงดึง ต้องสังเกตบริเวณที่ชิ้นงานเริ่มเสียรูปจนชิ้นงานขาด เพราะจะใช้ตำแหน่งที่ชิ้นงานขาดเป็นตำแหน่งกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น d_i

364 ชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

สำหรับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังจากทดสอบแรงดึง d_f จะนำชิ้นงานที่ขาดมาประกบให้สนิทกันจากนั้นใช้เวอร์เนียดิจิทัล (digital vernier) ความจำแนกชัด 0.01 มม. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยการวัดสองทิศทางแล้วนำค่ามาเฉลี่ย สาเหตุที่ใช้ความละเอียดของเวอร์เนียไม่เท่ากับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้าในหัวข้อที่ 363 เนื่องจากได้เวอร์เนียความจำแนกชัด 0.01 มม. หลังจากทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านภาระด้าทั้งหมดแล้ว



รูปที่ 38 ตำแหน่งและทิศทางการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

37 การทดสอบ

การทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง และการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

37.1 การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง แบ่งเป็น การทดสอบภายใต้ภาระแอมพลิจูดคงที่ และการทดสอบภายใต้ภาระสองระดับ การทดสอบทั้งสองแบบมีขั้นตอน คือ 1) การเตรียมชิ้นงาน 2) การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล 3) การติดตั้งและการให้ความร้อนชิ้นงาน 4) การเตรียมไฟล์คำสั่ง และ 5) ขั้นตอนการทดสอบ

37.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

1. จ้างทำชิ้นงานตามแบบ (รูปที่ 34(ก))
2. จัดผิวชิ้นงานในทิศตามแนวแกนด้วยกระดาษทรายเบอร์ 280 , 1000, 1500 และ 2000 ตามลำดับ (หัวข้อที่ 35 ข้อที่ 1)
- 2 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (หัวข้อที่ 36)
- 3 กำหนดจุดเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล (หัวข้อที่ 35 ข้อที่ 2, 3 และ 5)
- 4 ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยอะซิโตน (เพื่อให้รอยเชื่อมแข็งแรง)

37.1.2 การเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล

เริ่มจากใช้กระดาษทรายเบอร์ 1000 ขัดปลายลวดเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นตัดปลายลวดเทอร์โมคัปเปิลให้เชื่อมต่อได้สะดวกและไม่ขวางการทำงานอื่น ๆ เช่น การขันสลักเกลียว การติดตั้ง **extensometer** เป็นต้น การเชื่อมที่ดีจะเห็นประกายไฟกระเด็นออกมาระหว่างเชื่อม

37.1.3 การติดตั้งชิ้นงานและการให้ความร้อน

1. เปิดสวิทช์ชุดลิ่งทาวเวอร์ สวิทช์ปั๊มไฮดรอลิก สวิทช์เครื่องควบคุมอุณหภูมิ เปิดเมนสวิทช์ไฟที่ชุดปั๊มไฮดรอลิก เปิด **controller**, คอมพิวเตอร์ และเปิดปั๊มไฮดรอลิก โดยตั้งความดันที่ 10MPa
2. ติดตั้งชิ้นงานกับปากจับตัวบนโดยหมุนเข้าไปให้สุดเกลียว จากนั้นหมุนกลับประมาณ 1 รอบ

3. วัดระยะห่างระหว่างตัวล๊อคชิ้นงานด้านบนกับจุดเชื่อมสายเทอร์โมคัปเปิล ตำแหน่ง T และ M (รูปที่ 3.9) ด้วยเวอร์เนียร์ ในที่นี้กำหนดให้ระยะดังกล่าวมีค่าประมาณ 19 มม. และ 22 มม. ตามลำดับ

4. วัดระยะห่างระหว่างตัวล๊อคชิ้นงานด้านล่างกับจุดเชื่อมสายเทอร์โมคัปเปิล ตำแหน่ง B (รูปที่ 3.9) ด้วยเวอร์เนียร์ ในที่นี้กำหนดให้ระยะดังกล่าวมีค่าประมาณ 19 มม.

5. เชื่อมเทอร์โมคัปเปิลกับชิ้นงาน (หัวข้อ 3.6.2)

6. ปรับศูนย์ค่าสัญญาณภาวะ (ช่องสัญญาณ TD1)

7. ติดตั้งปากจับตัวล่างกับชิ้นงาน วัดระยะระหว่างตัวล๊อคชิ้นงานด้านบนและล่างให้ห่างกันประมาณ 77.5 มม. (รูปที่ 3.9)

8. เลื่อน actuator ขึ้น จนกระทั่งชิ้นงานรับแรงกดเล็กน้อย

9. ยึดปากจับกับโหลดเซลล์

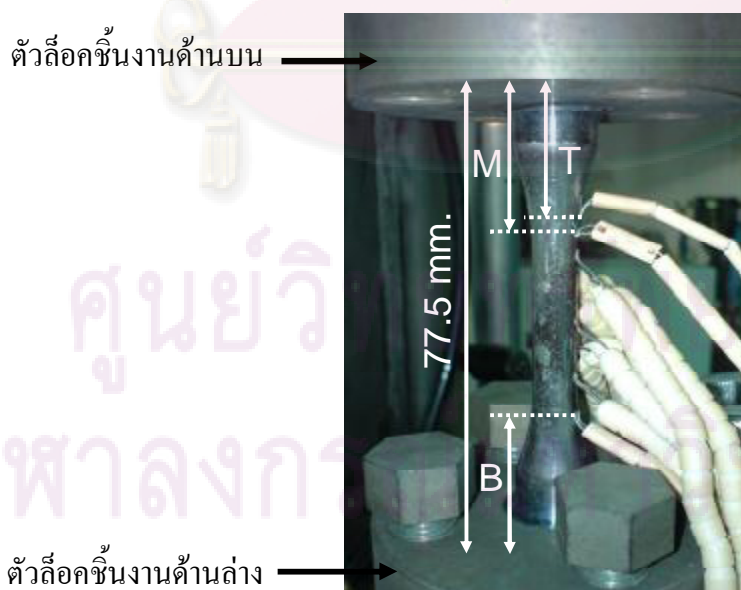
10. ชั้นสติกเกลียวล๊อคชิ้นงานให้แน่น

11. เปลี่ยนโหมดการควบคุม ไปเป็นการควบคุมภาวะ (TD1)

12. ปิดเตา (ระวังอย่าให้หนีบสายเทอร์โมคัปเปิล) และล๊อค

13. ปรับศูนย์ค่าสัญญาณของ TD2 และ TD3

14. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิเตา โดยตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 °C เมื่ออุณหภูมิถึง 100 °C ให้ปรับอุณหภูมิเพิ่มครั้งละ 50 °C จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากชุดควบคุมอุณหภูมิตำแหน่งบน (T) กลาง (M) และล่าง (B) เท่ากับ 643°C, 646°C และ 643°C ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล

15. เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด รอจนกว่าอุณหภูมิอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) เมื่ออุณหภูมิอยู่ในสถานะคงตัว ค่า TD2 และ TD3 จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ($TD2 \pm 0.03 \text{ mm}$, $TD3 \pm 0.005 \text{ mm}$)

3.7.1.4 การเตรียมไฟล์คำสั่ง

การทดสอบความล้าต้องมีการป้อนคำสั่งเพื่อกำหนดสภาวะทดสอบ คำสั่งที่ต้องป้อน ได้แก่ โหมดการควบคุม ความถี่ รูปคลื่น พิสัยความเครียด เป็นต้น พิสัยความเครียดต้องคำนวณจากสภาวะการทดสอบ สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง ชิ้นงานจะขยายตัวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจึงใหญ่ขึ้นและความยาวเกจเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณความยาวเกจของชิ้นงานคำนวณได้จากสมการ

$$d_{HT} = d_{RT} + a(T - T_R)d_{RT} \quad (31)$$

โดย d_{HT} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C (มม.)

d_{RT} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง (มม.)

T, T_R คือ อุณหภูมิทดสอบและอุณหภูมิห้อง ($^\circ\text{C}$) ตามลำดับ

a คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (thermal expansion coefficient)

สำหรับวัสดุนี้ $a = 17.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 500°C [24]

ระยะเสียรูปตามแนวแกนที่ต้องควบคุมของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง คำนวณได้จากสมการ

$$\text{disp.} = \Delta e \times GL_{HT} \quad (32)$$

โดย disp. คือ ระยะเสียรูปที่ควบคุม (มม.)

GL_{HT} คือ ความยาวเกจที่อุณหภูมิ 650°C (มม.)

Δe คือ พิสัยความเครียดรวม

การบันทึกข้อมูลการทดสอบ สำหรับการทดสอบความล้าจะเก็บข้อมูล 200 ข้อมูลต่อหนึ่งรอบ สำหรับการทดสอบแรงดึง จะบันทึกทุก 0.1 วินาที

37.1.5 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูงแบ่งเป็นการทดสอบความล้าที่แอมพลิจูดภาระคงที่และการทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ

เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ในสถานะคงตัว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดสภาวะทดสอบ มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบความล้าภายใต้ภาระแอมพลิจูดคงที่

1. เลือกเมนู **Fatigue test**
2. เปิดไฟล์เพื่อกำหนดสภาวะทดสอบ
3. กำหนดสภาวะทดสอบ เช่น โหมดควบคุม พิสัยความเครียด ความถี่ จำนวนรอบ เป็นต้น
4. ระบุหมายเลขของรอบภาระที่ต้องการเก็บข้อมูล
5. เริ่มทดสอบ
6. (หลังการทดสอบสิ้นสุด) บันทึกข้อมูล
7. เปลี่ยนโหมดควบคุม เป็นโหมดควบคุมภาระแล้วปรับค่า **TD1** เท่ากับศูนย์
8. ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (คู่มือของเครื่องมือควบคุม ตำแหน่ง **T, M และ B**)
9. เปลี่ยนโหมดควบคุม เป็นจับคอนโทรล
10. ถอดชิ้นงานและปิดเครื่องทดสอบ

2. การทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ

1. เลือกเมนู **Multipurpose**
2. เปิดไฟล์เพื่อกำหนดสภาวะทดสอบ
3. กำหนดสภาวะทดสอบของบล็อกที่ **1** เช่น โหมดการควบคุม พิสัยความเครียด ความถี่ จำนวนรอบ เป็นต้น
4. กำหนดสภาวะทดสอบของบล็อกที่ **2** เช่น โหมดควบคุม พิสัยความเครียด ความถี่ จำนวนรอบ เป็นต้น
5. ระบุหมายเลขของรอบภาระที่ต้องการเก็บข้อมูล
6. เริ่มทดสอบ
7. (หลังการทดสอบสิ้นสุด) บันทึกข้อมูล เช่น จำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของบล็อกหลัง และความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด เป็นต้น

8. เปลี่ยนโหมดควบคุม เป็นการควบคุมภาระแล้วปรับค่า **TD1** เท่ากับศูนย์
9. ปลดปล่อยชิ้นงานไว้ในเตาจนมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (คู่ได้จากอุณหภูมิของเครื่องควบคุม ตำแหน่ง **T, M** และ **B**)
10. เปลี่ยนโหมดควบคุมจาก **TD1** เป็นจับคอนโทรล
11. ถอดชิ้นงานและปิดเครื่องทดสอบ

3.7.2 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ การทดสอบชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าและความร้อน การทดสอบชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าแต่ผ่านความร้อน และการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า (กรณีทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าและผ่านความร้อน ไม่ต้องทำขั้นตอนที่ 1) ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย

1. จัดผิวชิ้นงานตามแนวแกน (หัวข้อที่ 3.5 ข้อ 1)
2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (หัวข้อที่ 3.6)
3. ติดตั้งชิ้นงาน (หัวข้อย่อยที่ 3.7.1.3 ข้อที่ 2-4, 6-10)
4. เปลี่ยนโหมดควบคุมเป็น **TD1** แล้วปรับค่า **TD1** เท่ากับศูนย์
5. ติดตั้ง **extensometer** (รูปที่ 3.3) วัดระยะยืดที่อุณหภูมิห้องบริเวณความยาวแกนของชิ้นงาน
6. ถอดตัวตั้งระยะความยาวแกน **extensometer** ออก
7. ปรับศูนย์ค่าสัญญาณจาก **TD2** และ **TD4**
8. เปิดเมนู **Static test** จากนั้นเปิดไฟล์เพื่อตั้งสภาวะทดสอบ
9. กำหนดสภาวะทดสอบ เช่น โหมดควบคุม ระยะยืดของความยาวแกน หน่วยของระยะยืด เป็นต้น
10. ระบุอัตราการเก็บข้อมูล จากนั้นเริ่มทดสอบ
11. เมื่อทดสอบเสร็จให้บันทึกข้อมูล
12. เปลี่ยนโหมดควบคุมจาก **TD2** เป็นจับคอนโทรล
13. ถอดชิ้นงานและปิดเครื่องทดสอบ

38สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการทำงานของระบบทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ชุดไฮดรอลิก ชุดทดสอบ ชุดควบคุมการทดสอบ และชุดควบคุมอุณหภูมิ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ 8 มม. ความยาวขนาน 27 มม. จากนั้นกล่าวถึงการสอบเทียบ **extensometer** และ โหลดเซลล์ ผลการสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ดังกล่าวอ่านค่าได้ถูกต้อง การตั้งค่าอุณหภูมิของชุดควบคุมเพื่อให้อุณหภูมิบริเวณความยาวเกจเท่ากับ 650 °C ทำได้โดยการตั้งค่าอุณหภูมิตำแหน่ง บน(T) กลาง(M) และ ล่าง(B) เท่ากับ 643 °C 646 °C และ 643 °C ตามลำดับ การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบ่งตามประเภทของชิ้นงาน ขั้นตอนการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง และการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองความเสียหาย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองความเสียหาย หัวข้อที่ 41 จะกล่าวถึงประเภทของการทดสอบ และสภาวะทดสอบ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความเสียหาย หัวข้อที่ 42 จะสรุปผลการทดสอบต่อไปนี้ ความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า อายุความล้าที่พิสัยความเครียดต่าง ๆ ของชิ้นงาน และความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ กัน สุดท้ายในหัวข้อที่ 43 จะแสดงการหาค่าคงตัวในแบบจำลอง

41 การทดสอบ

การทดสอบเพื่อสร้างแบบจำลองความเสียหาย แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- 1) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า
- 2) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าแต่ผ่านความร้อน
- 3) การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง
- 4) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

รายละเอียดของการทดสอบทั้ง 4 ชนิดจะกล่าวในหัวข้อที่ 41.1 ถึง 41.4 ตามลำดับ

41.1 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า

การทดสอบทำเพื่อหาความเหนียวของวัสดุกรณีไม่มีความเสียหายล้าสะสม (ค่าคงตัว y ในสมการที่ 254) การทดสอบกำหนดอัตราการยืดของความยาวเกจเท่ากับ 25 มม. ต่อ นาที [25] ข้อมูลความยาวเกจของชิ้นงานจะวัดด้วย extensometer (รูปที่ 33) เมื่อความยาวเกจเพิ่มขึ้น 10 มม. จะถอด extensometer ออก แล้วเปลี่ยนการทดสอบเป็นแบบควบคุม stroke จนกระทั่งชิ้นงานขาด ข้อมูลภาระที่ดึงชิ้นงานจะวัดด้วยโหลดเซลล์ การเก็บข้อมูลการทดสอบตั้งแต่เริ่มดึงจนถึง 1 นาทีแรก จะบันทึกทุก ๆ 0.1 วินาที และหลังจากนั้นจะบันทึกทุก ๆ 5 วินาที จนสิ้นสุดการทดสอบ การทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง

ข้อมูลภาระที่ดึงชิ้นงานจะนำไปคำนวณความเค้นโดยแทนในสมการ (262) ข้อมูลความยาวเกจของชิ้นงานจะนำไปคำนวณความเครียดของชิ้นงานโดยแทนในสมการ (263) กรณีความยาวเกจยืดไม่เกิน 10 มม. และสมการ (264) กรณีความยาวเกจยืดมากกว่า 10 มม. ผลการคำนวณความเค้นและความเครียดจะถูกนำไปพล็อตกราฟความเค้น-ความเครียด

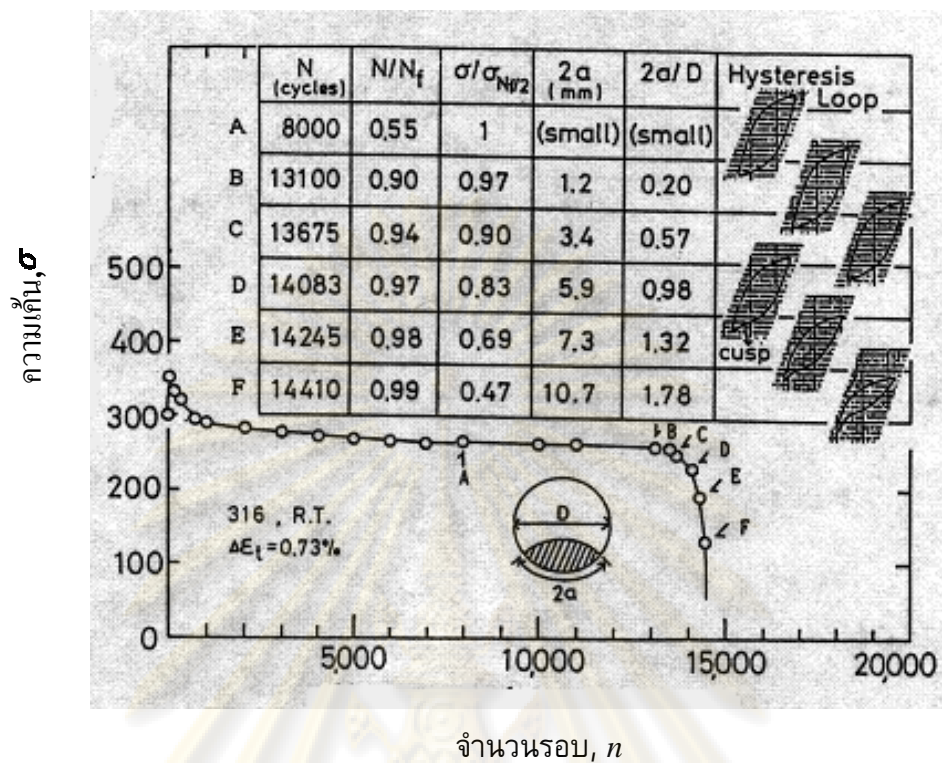
41.2 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า แต่ผ่านความร้อน

เนื่องจากชิ้นงานทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง ภายใต้รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร จะเกิดความเสียหายเนื่องจากออกซิเดชันและความล้า [15] ดังนั้นเพื่อให้ทราบว่าการลดลงของความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่อุณหภูมิ 650°C เกิดจากความเสียหายล้าเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่มีความเสียหายเนื่องจากออกซิเดชันเท่านั้น เงื่อนไขการทดสอบดังกล่าวคือ การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ถูกทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิ 650°C ในสภาพไม่มีภาระกระทำเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง นับจากอุณหภูมิเริ่มเข้าสู่สถานะคงตัว (อ้างอิงจากระยะเวลาทดสอบความล้าที่นานที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้) การทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง ต่อไปจะเรียกชิ้นงานเหล่านี้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านความร้อน

41.3 การทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบทำเพื่อหาอายุความล้าที่พิสัยความเครียดต่าง ๆ กัน ทดสอบที่อุณหภูมิ 650°C และทดสอบโดยควบคุมพิสัยความเครียดแนวแกน รูปคลื่นความเครียด-เวลาเป็นรูปสามเหลี่ยมสมมาตร ดังรูปที่ 2.5 มีความเครียดเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และอัตราความเครียดเท่ากับ 10^3 ต่อวินาที พิสัยความเครียดที่ทดสอบประกอบด้วย 0.6%, 1.0% และ 2.0% รหัสชิ้นงานทดสอบคือ FF06, FF10 และ FF20 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบที่ 1.0% ทำซ้ำ 2 ชิ้น และที่ 2.0% ทำซ้ำ 2 ชิ้น

ในการทดสอบ ชิ้นงานจะรับภาระล้าซึ่งมีพิสัยความเครียดคงที่ที่กำหนด จนกระทั่งการะสูงสุดค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากชิ้นงานเกิดรอยร้าว การนิยามอายุความล้าจะกำหนดให้อยู่ในขอบเขตการใช้งานของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง ซึ่งกำหนดว่าความลึกของรอยร้าวประมาณ 1 มม. [26] วิทยานิพนธ์นี้ใช้ผลการศึกษาในรูปที่ 41 [27] เป็นแนวทางในการกำหนดอายุความล้า รูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความยาวรอยร้าวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $2a/D$ (คอลัมน์ที่ 5) กับอัตราส่วนของความเค้นขณะใด ๆ กับความเค้นในช่วงสถานะคงตัว $s/s_{N_{f/2}}$ (จุด A) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่อุณหภูมิห้องจากรูป ถ้าความเค้นลดลง 5% ($s/s_{N_{f/2}}$ เท่ากับ 0.95) แล้วจะได้ค่า $2a/D$ จากตารางได้เท่ากับ 0.3 โดยประมาณ วิทยานิพนธ์นี้ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 มม. ดังนั้น $2a$ เท่ากับ 24 มม. ถ้าสมมุติให้รอยร้าวเป็นรูปครึ่งวงกลมแล้ว จะได้ความลึกเท่ากับ 1.2 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับขอบเขตการใช้งานของกลศาสตร์ความเสียหายต่อเนื่อง ดังนั้นการกำหนดอายุความล้า จึงใช้เกณฑ์การลดลงของความเค้น 5% จากความเค้นในช่วงสถานะคงตัว



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความยาวรอยร้าวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $2a/D$ กับอัตราส่วนของความเค้นขณะใด ๆ กับความเค้นในช่วงสถานะคงตัว $s/s_{N_f/2}$

41.4 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

การทดสอบทำเพื่อหาความเหนียวของชิ้นงานที่มีระดับความเสียหายล้าต่าง ๆ กัน (ตัวแปร \tilde{y} ในสมการที่ (211)) ในการทดสอบชิ้นงานจะผ่านภาระล้าที่มีพิสัยความเครียดคงที่เท่ากับจำนวนรอบที่กำหนด (แต่ไม่เท่ากันสำหรับชิ้นงานแต่ละชิ้นที่พิสัยความเครียดเดียวกัน) แสดงในตารางที่ 41 ชิ้นงานเหล่านี้จะถูกนำไปดึงจนขาดเพื่อคำนวณความเหนียว (สมการที่ (210))

การหาค่า y และ \tilde{y} ในสมการที่ (211) เพื่อหาระดับความเสียหายที่เกิดจากการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิ 650°C นั้น สามารถทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ ได้ แต่ต้องทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกัน เหตุผลที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องเพื่อหาค่า y กับ \tilde{y} เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือ คือ ไม่มี **extensometer** สำหรับการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามค่า y และ \tilde{y} ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ ค่าที่ได้อาจจะมีค่าเท่ากับหรือต่างกับการทดสอบแรงดึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งต้องได้รับการทดสอบต่อไป

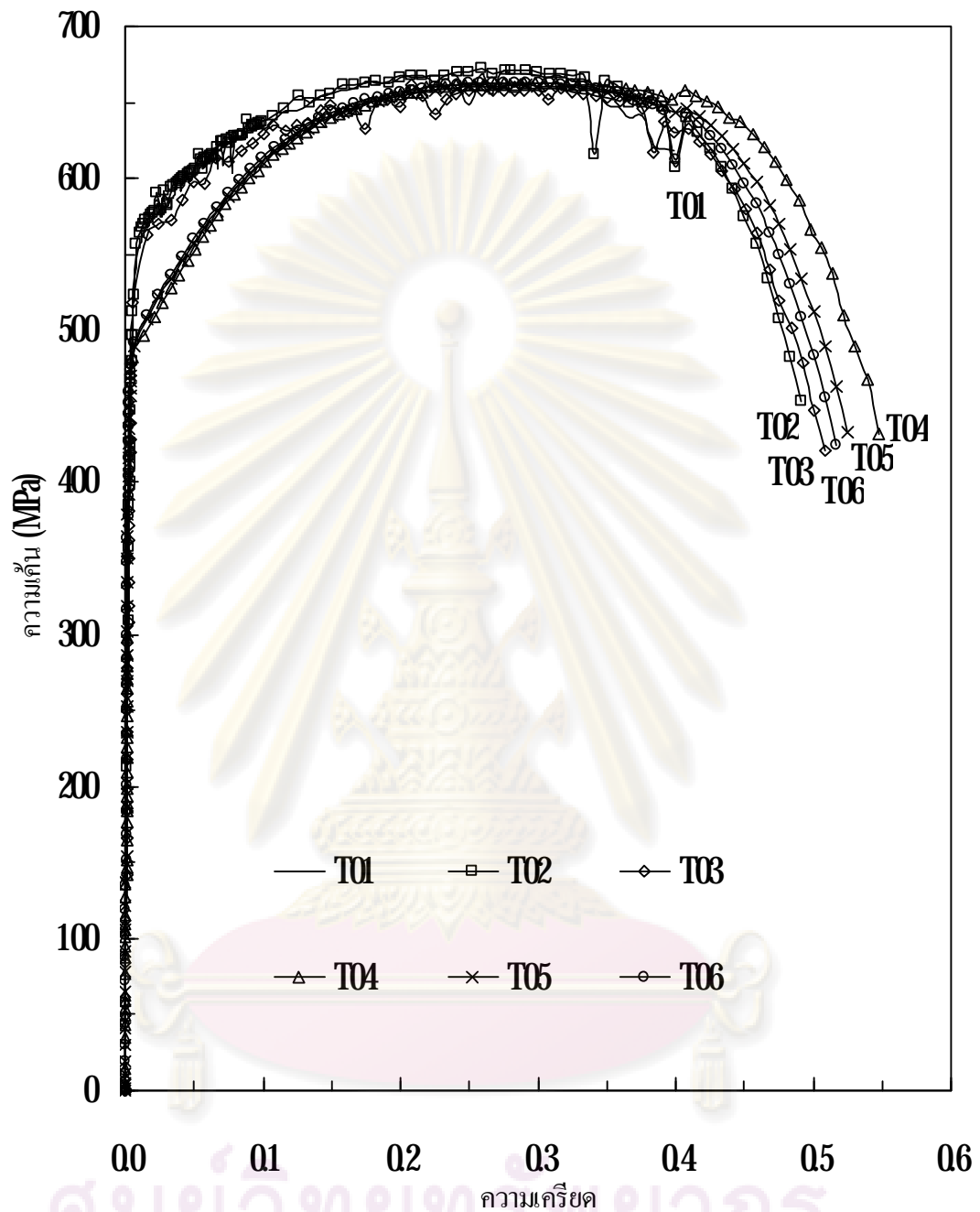
ตารางที่ 41 สภาวะการทดสอบความล้า (ก่อนถูกดึง)

พิสัยความเครียด Δe (%)	รหัสชิ้นงาน	จำนวนรอบ ภาระล้า, n (รอบ)	อัตราส่วน อายุความล้า n/N_f
1.0	PFA01	145	0.22
	PFA02	288	0.43
	PFA03	432	0.65
	PFA04	434	0.65
	PFA05	503	0.75
	PFA06	534	0.80
	PFA07	575	0.86
	PFA08	647	0.97
2.0	PFB01	37	0.18
	PFB02	110	0.54
	PFB03	145	0.71
	PFB04	155	0.76
	PFB05	156	0.80
	PFB06	164	0.81
	PFB07	166	0.81

4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 เส้น โถ้ถึงความเค้น-ความเครียด และความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า

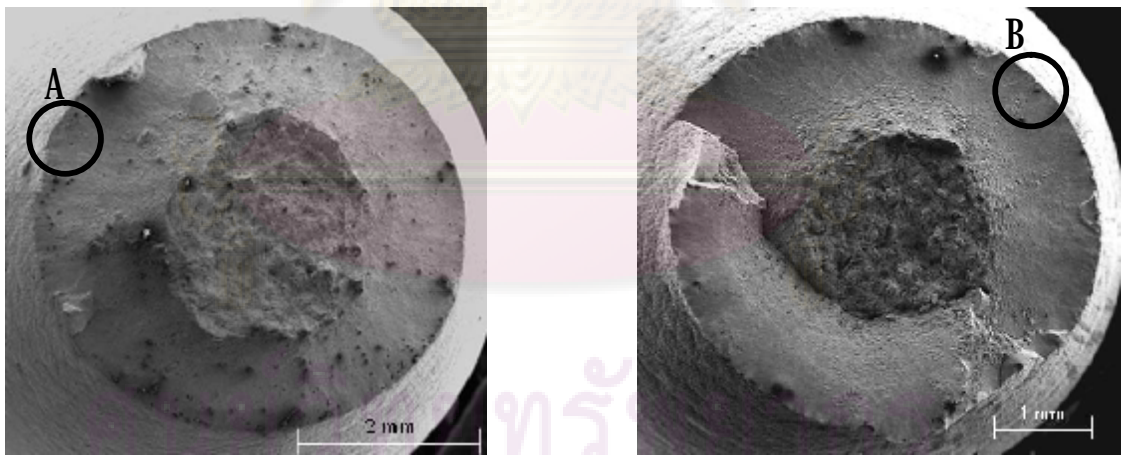
กราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า (รหัสชิ้นงาน คือ T01, T02 และ T03) และชิ้นงานที่ผ่านความร้อน (รหัสชิ้นงาน คือ T04, T05 และ T06) แสดงอยู่ในรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าชิ้นงานทั้งสองชนิดมีความเค้นสูงสุด ความเค้นคราก (ที่ 0.2% ของความเครียด) และความเครียดที่จุดแตกหักใกล้เคียงกัน ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทั้งสองประเภทเป็นแบบ cup และ cone ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เมื่อเพิ่มกำลังขยายบริเวณวงกลม A และ B ที่พื้นผิวแตกหักพบเฉพาะ dimple ซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักเนื่องจากแรงดึง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระด้า
(หมายเหตุ ชิ้นงาน T01 ไม่ได้บันทึกผลการทดสอบหลังจากความยาวเกจยืดมากกว่า 10 มม.)



รูปที่ 43 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาวะล้าหลังการทดสอบแรงดึง



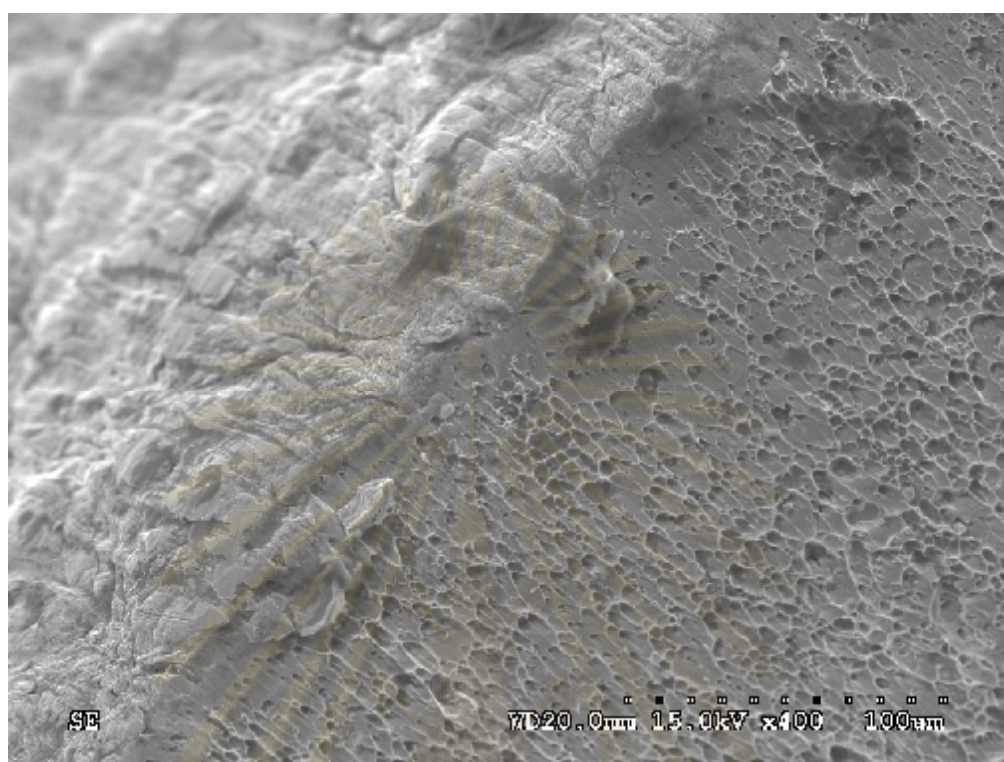
(ก)

(ข)

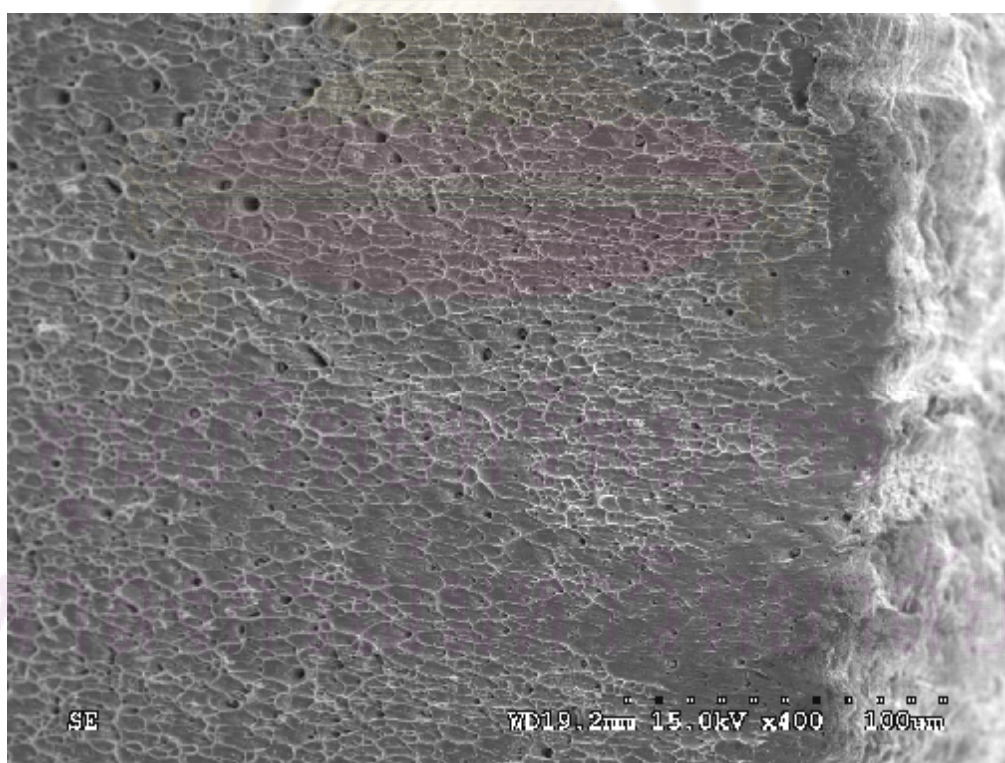
รูปที่ 44 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาวะล้าหลังการทดสอบแรงดึง

(ก) ชิ้นงาน T02 ที่กำลังขยาย 25 เท่า

(ข) ชิ้นงาน T04 ที่กำลังขยาย 30 เท่า



รูปที่ 45 พื้นผิวแตกหักบริเวณวงกลม A (รูปที่ 44(ก)) ที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 46 พื้นผิวแตกหักบริเวณวงกลม B (รูปที่ 44(ข)) ที่กำลังขยาย 400 เท่า

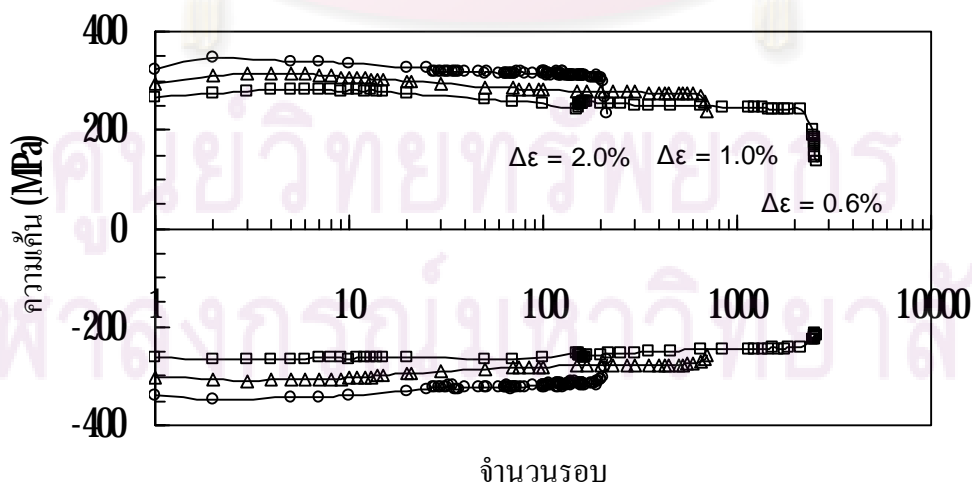
ตารางที่ 42 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านภาระล้า เมื่อแทนค่าเหล่านี้ในสมการที่ (210) จะให้ความเหนียว y (ในเทอมของอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด) ของชิ้นงานแต่ละชิ้น เนื่องจากค่าความเหนียวไม่แตกต่างกันมากจึงใช้ค่าเฉลี่ยเป็นความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า ดังนั้น y เท่ากับ 0.78

ตารางที่ 42 ความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า

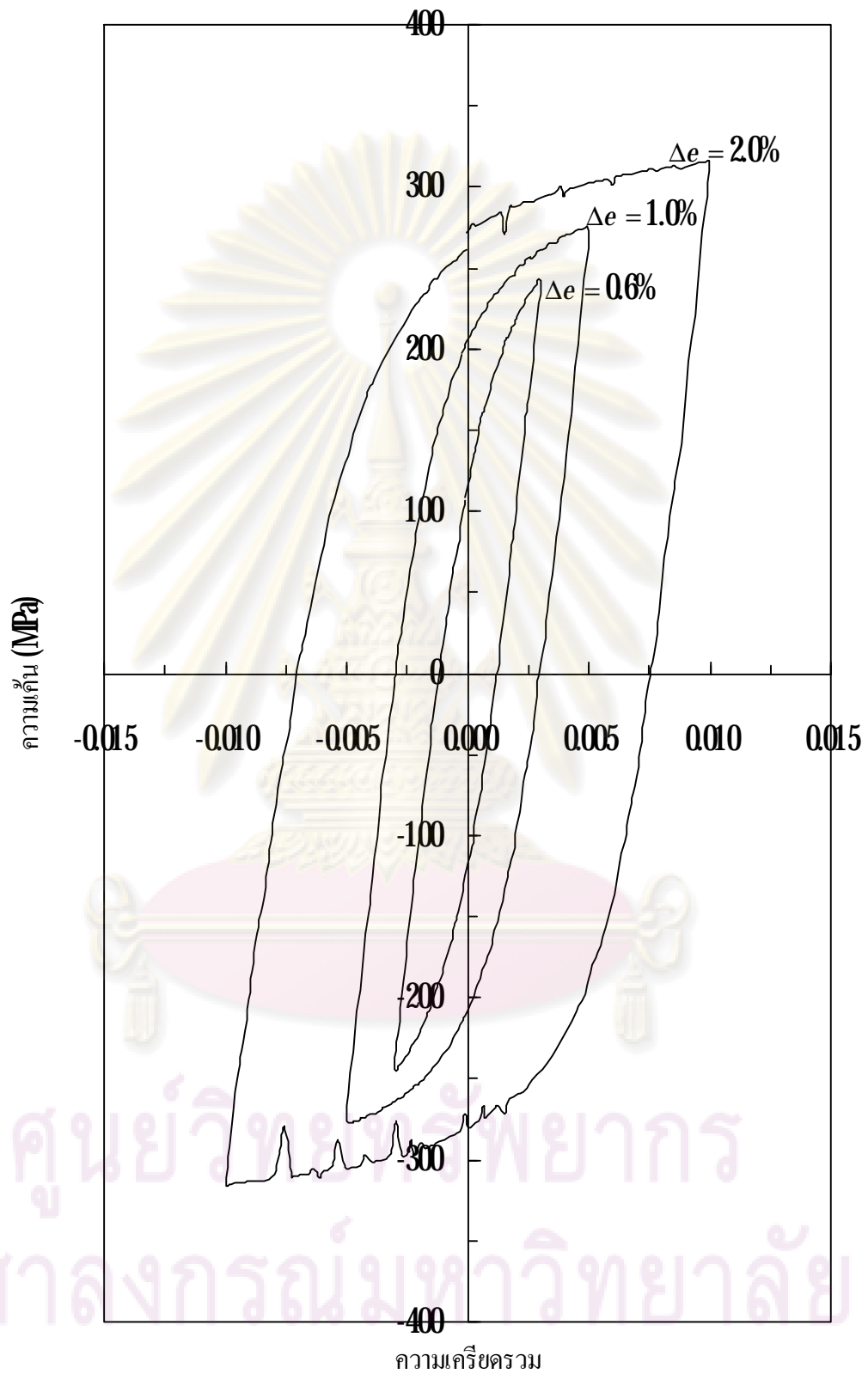
หมวด	รหัส ชิ้นงาน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		อัตราส่วนการลดลง ของพื้นที่หน้าตัด y
		ก่อนดึง d_i	หลังดึง d_f	
ไม่ผ่านความ ร้อน	T01	7.83	3.56	0.79
	T02	7.91	3.86	0.76
	T03	8.03	3.60	0.80
ผ่านความ ร้อน	T04	7.96	3.78	0.77
	T05	8.14	3.78	0.78
	T06	8.12	3.80	0.78

4.2.2 พฤติกรรมการเสียรูปและอายุความล้า

พฤติกรรมการเสียรูปภายใต้ภาระล้าที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0% แสดงอยู่ในรูปที่ 47 จากรูป วัสดุมีพฤติกรรมแบบ cyclic hardening ในช่วง 10 รอบแรก จากนั้น softening และเข้าสู่สถานะคงตัวในที่สุด รูปที่ 48 แสดงวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ครั้งหนึ่งของอายุความล้า



รูปที่ 47 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0%



รูปที่ 48 วงปิดฮิสเตอริซิสที่พิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0%

ตารางที่ 43 สรุปความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด และอายุความล้าที่พิสัยความเครียดรวมต่าง ๆ สำหรับการทดสอบเพื่อหาอายุความล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% นั้น ทดสอบชิ้นงาน 2 ชิ้น ชิ้นงานที่ 1 หรือ ชิ้นงาน FF10 อายุความล้าเท่ากับ 667 รอบ และชิ้นงานที่ 2 อายุความล้าเท่ากับ 539 รอบ กรณีใช้ค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทั้งสอง จะได้อายุความล้าเท่ากับ 603 รอบ เนื่องจากชิ้นงาน PFA08 รับภาระล้าเป็นจำนวน 647 รอบ ซึ่งมากกว่าอายุความล้าที่ได้จากการเฉลี่ย ทำให้อัตราส่วนอายุความล้าเกิน 1 และความเสียหายน้อยกว่า 1 ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า เมื่ออัตราส่วนอายุความล้าเท่ากับหนึ่งความเสียหายจะเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงานที่มีจำนวนรอบมากที่สุด เพื่อกำจัดปัญหาดังที่กล่าวมา รูปที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยความเครียดรวมกับอายุความล้า ($\Delta\epsilon - N_f$)

ตารางที่ 43 อายุความล้าของชิ้นงานทดสอบที่พิสัยความเครียดต่าง ๆ

รหัสชิ้นงาน	พิสัยความเครียดแนวแกน (%)			ความเค้น (MPa)		อายุความล้า N_f (รอบ)
	$\Delta\epsilon$	$\Delta\epsilon_e$	$\Delta\epsilon_p$	สูงสุด	ต่ำสุด	
FF06	0.59	0.32	0.27	242.7	-244.9	2,222
FF10	0.99	0.37	0.62	276.2	-277.5	667*
FF20	1.99	0.42	1.58	314.9	-315.5	204

* คือ จำนวนรอบมากที่สุด จากการทดสอบชิ้นงาน 2 ชิ้น



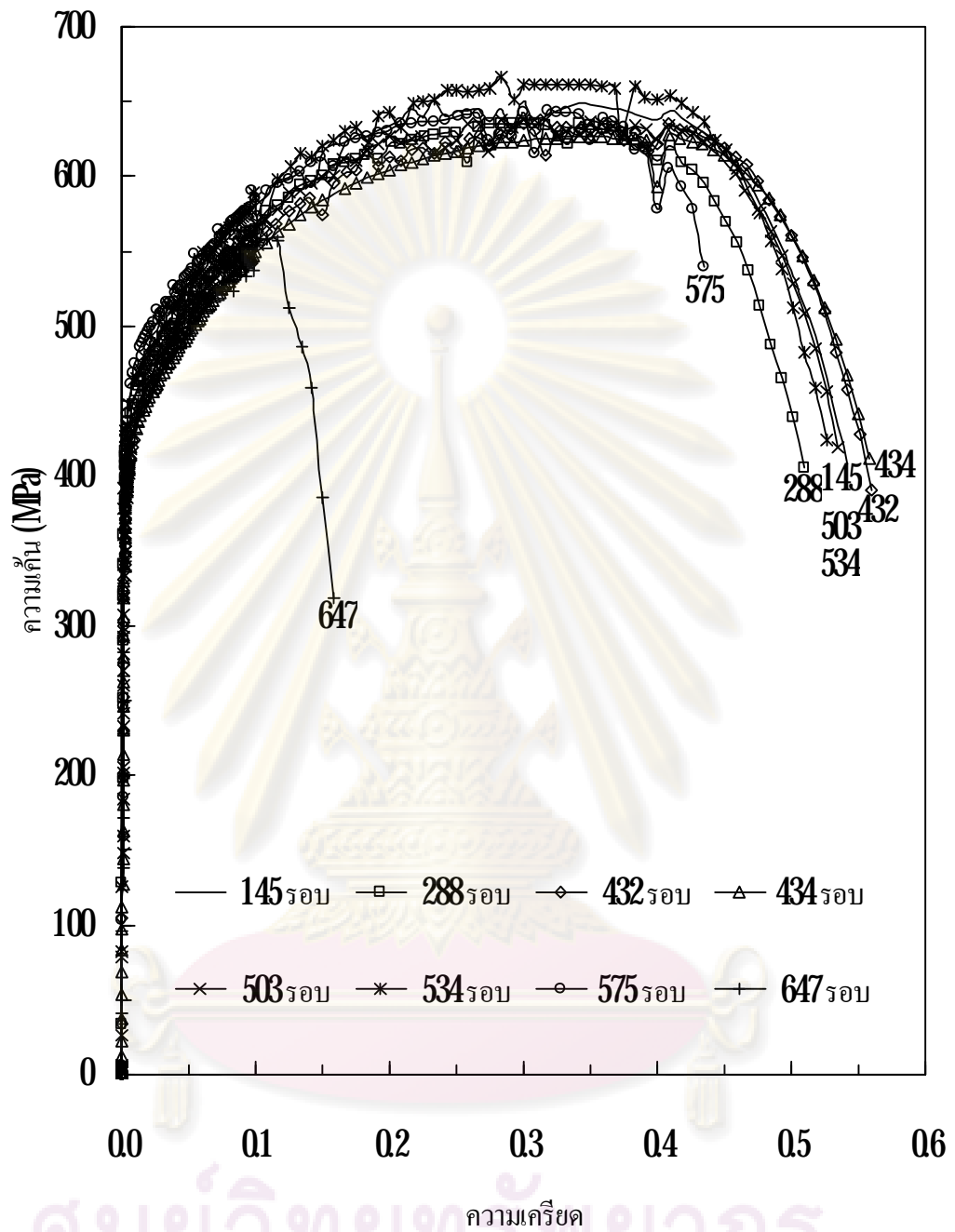
รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยความเครียดรวมกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย

423 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด และความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% และ 2.0% เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 410 และรูปที่ 411 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าความเครียดแตกหัก (หรือเปอร์เซ็นต์การยืด) มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนรอบภาระล้าเพิ่มขึ้น

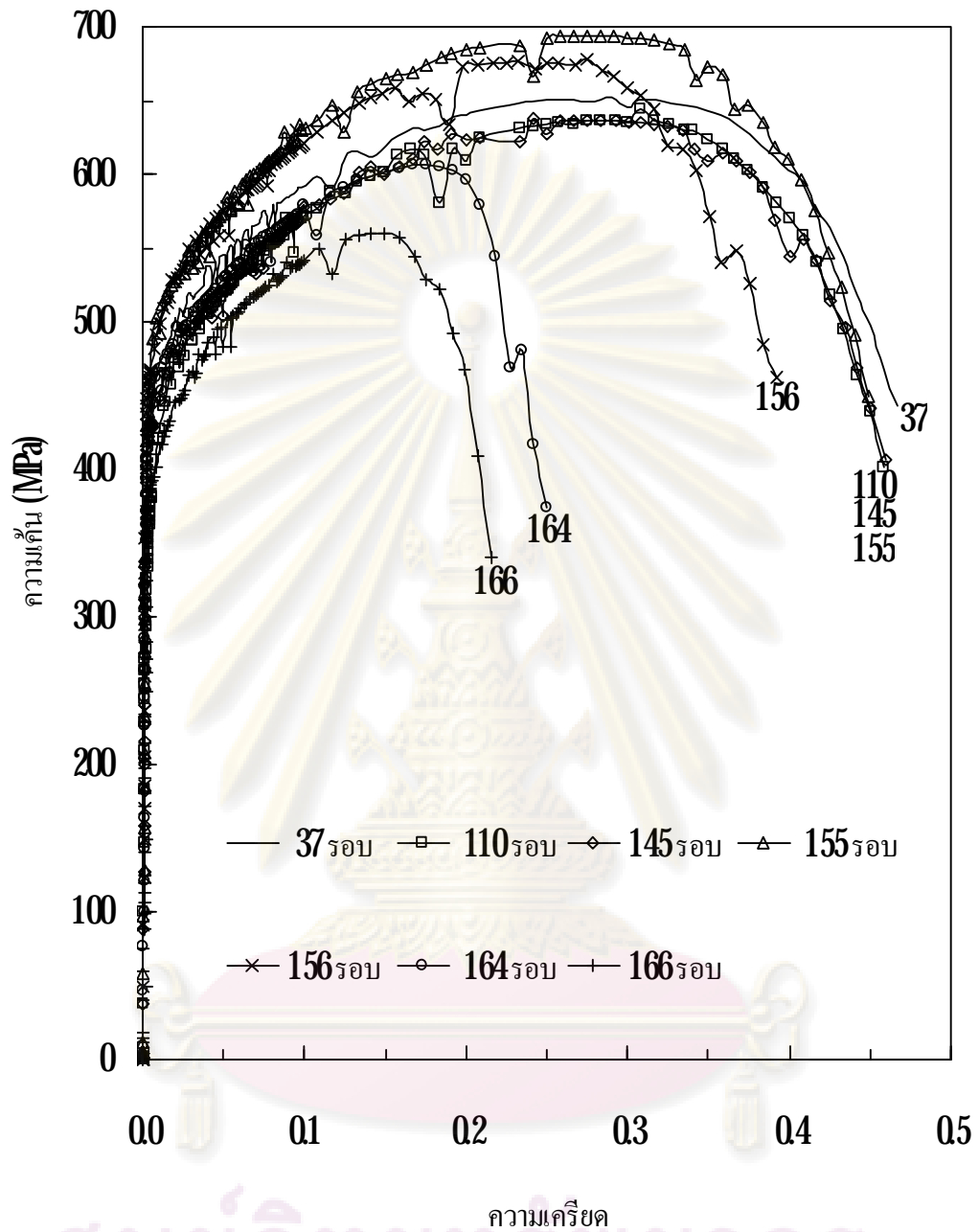
รูปที่ 412 และ 413 แสดงการแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% และ 2.0% เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ กัน ตามลำดับ จากรูปที่ 412 จะเห็นว่าชิ้นงานที่รับภาระล้าน้อยกว่า 534 รอบ ($n/N_f = 0.80$) จะมีการแตกหักแบบ cup และ cone แต่ถ้าชิ้นงานรับภาระล้ามากกว่า 575 รอบ ($n/N_f = 0.86$) จะมีการแตกหักแบบเฉียง จากรูปที่ 413 จะเห็นว่าชิ้นงานที่รับภาระล้าน้อยกว่า 156 รอบ ($n/N_f = 0.76$) จะมีการแตกหักแบบ cup และ cone แต่ถ้าชิ้นงานรับภาระล้ามากกว่า 164 รอบ ($n/N_f = 0.80$) จะมีการแตกหักแบบเฉียง การศึกษาของ Y. Murakami [12] พบว่า ลักษณะการแตกหักขึ้นอยู่กับความยาวรอยร้าว กล่าวคือ ถ้ารอยร้าวมีความยาวมากกว่าความยาวรอยร้าววิกฤต การแตกหักจะเป็นแบบเฉียง ถ้าน้อยกว่าจะเป็นแบบ cup และ cone

ตารางที่ 44 และ 45 คอลัมน์ที่ 4 และ 5 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านภาระล้าที่ 1.0% และ 2.0% ตามลำดับ เมื่อแทนค่าเหล่านี้ในสมการที่ (210) จะได้ความเหนียว (ในเทอมของอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด) \bar{y} ในคอลัมน์ที่ 6



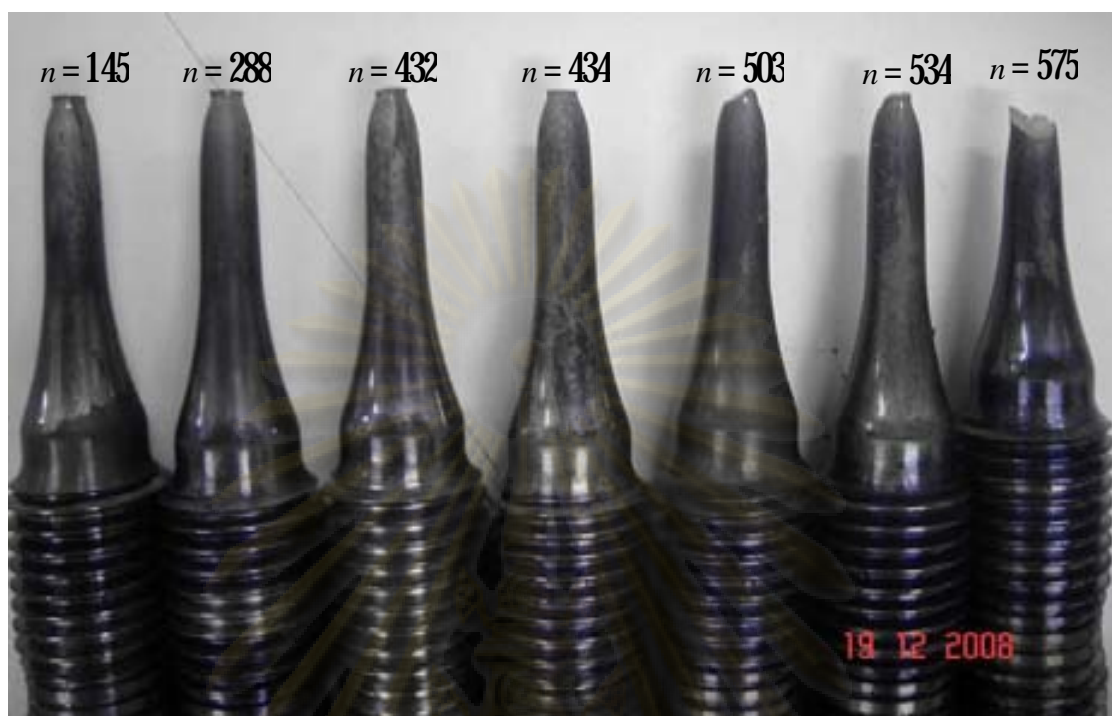
รูปที่ 410 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ผ่านภาระซ้ำที่พิสัยความเครียด 1.0%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 411 เส้น โคงความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้าที่พิสัยความเครียด 20%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 412 ชิ้นงานที่ผ่านภาะล้าที่พิสัยความเครียด 1.0%
เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ หลังทดสอบแรงดึง



รูปที่ 413 ชิ้นงานที่ผ่านภาะล้าที่พิสัยความเครียด 2.0%
เป็นจำนวนรอบต่าง ๆ หลังทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 44 ความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0%

รหัส ชิ้นงาน	จำนวนรอบ ภาระล้า	อัตราส่วน อายุความล้า	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		อัตราส่วนการลดลง ของพื้นที่หน้าตัด \bar{y}
			ก่อนดึง d_i	หลังดึง d_f	
PFA01	145	0.22	7.93	3.82	0.77
PFA02	288	0.43	7.84	3.78	0.77
PFA03	432	0.65	7.93	3.60	0.79
PFA04	434	0.65	7.91	3.60	0.79
PFA05	503	0.75	7.81	3.92	0.75
PFA06	534	0.80	7.80	3.80	0.76
PFA07	575	0.86	7.92	5.38	0.54
PFA08	647	0.97	7.94	6.30	0.37

ตารางที่ 45 ความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 20%

รหัส ชิ้นงาน	จำนวนรอบ ภาระล้า	อัตราส่วน อายุความล้า	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		อัตราส่วนการลดลง ของพื้นที่หน้าตัด \bar{y}
			ก่อนดึง d_i	หลังดึง d_f	
PFB01	37	0.18	7.88	3.80	0.77
PFB02	110	0.54	7.87	3.58	0.79
PFB03	145	0.71	7.89	3.60	0.79
PFB04	155	0.76	7.57	3.86	0.74
PFB05	156	0.76	7.60	3.90	0.74
PFB06	164	0.80	7.88	6.00	0.42
PFB07	166	0.81	7.69	5.30	0.52

43 การหาค่าคงตัวในแบบจำลอง

ค่าคงตัวในแบบจำลอง (สมการที่ (254)) ที่ยังไม่ทราบค่า และต้องหาจากผลการทดลองคือ ค่าคงตัว b ขั้นตอนการหาเริ่มจากการจัดสมการให้อยู่ในรูปที่สามารถทำการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดได้ ดังนี้

จาก
$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{1-y} \right]^{\frac{1}{1+b}} \quad (254)$$

จะได้
$$\log(1-D) = \frac{1}{1+b} \log \left[1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^{1-y} \right] \quad (51)$$

กำหนดตัวแปรใหม่ดังนี้

$$X = \log \left[1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^{1-y} \right] \quad (52)$$

$$Y = \log(1-D) \quad (53)$$

$$M = \frac{1}{1+b} \quad (54)$$

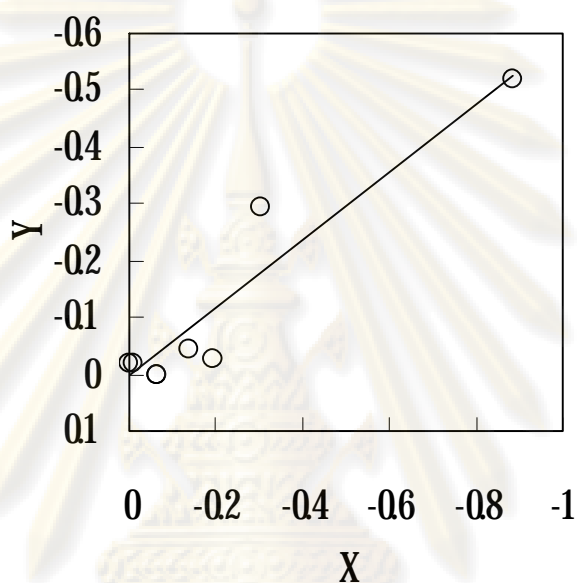
ดังนั้น สมการที่ (51) อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง $Y = MX$

เนื่องจากการกระจายของข้อมูล ความเหนียวที่คงเหลือ \tilde{y} ของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า บางชิ้นมีค่ามากกว่าความเหนียวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านภาระล้า y ทำให้ความเสียหายล้า D ที่คำนวณจากสมการที่ (211) มีค่าติดลบ กล่าวคือขัดแย้งกับสมมติฐานที่ว่า ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าจะมีความเหนียวน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเสียหายในกรณีดังกล่าวมีค่าเท่ากับศูนย์

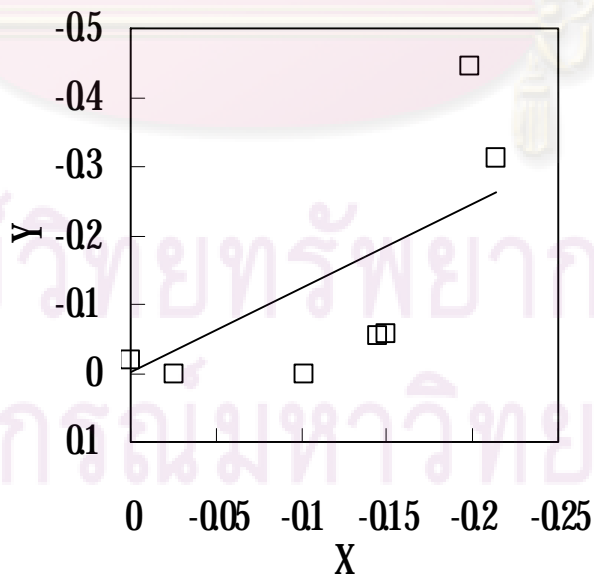
การหาค่า b ของพิสัยความเครียด 1.0% เริ่มจากการหาค่า D โดยแทนค่า \tilde{y} ในตารางที่ 44 และค่า $y = 0.78$ (ความเหนียวที่ใช้อ้างอิง) ลงในสมการที่ (211) จากนั้นแทนค่า D ในสมการที่ (53) เพื่อหาค่า Y ต่อมาแทนอัตราส่วนอายุความล้า n/N_f ในตารางที่ 44 ลงในสมการที่ (52) เพื่อหาค่า X จากนั้นพล็อตกราฟโดยให้ X เป็นแกนนอน และ Y เป็นแกนตั้ง สูดท้ายประยุกต์การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาความชันของกราฟ M แล้วคำนวณหา b ด้วยสมการที่ (54)

รูปที่ 414 แสดงกราฟ X-Y ของกรณีนี้ จากกราฟจะได้อัตราชันของเส้นตรงคือ 0.595 และจะคำนวณ b ได้เท่ากับ 0.681

สำหรับค่า b ของกรณีพิสัยความเครียด 20% ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกัน แต่ใช้ข้อมูล \bar{y} จากตารางที่ 45 รูปที่ 415 แสดงกราฟ X-Y ของกรณีนี้ จากกราฟจะได้อัตราชันของเส้นตรงคือ 1.230 และจะคำนวณ b ได้เท่ากับ -0.187



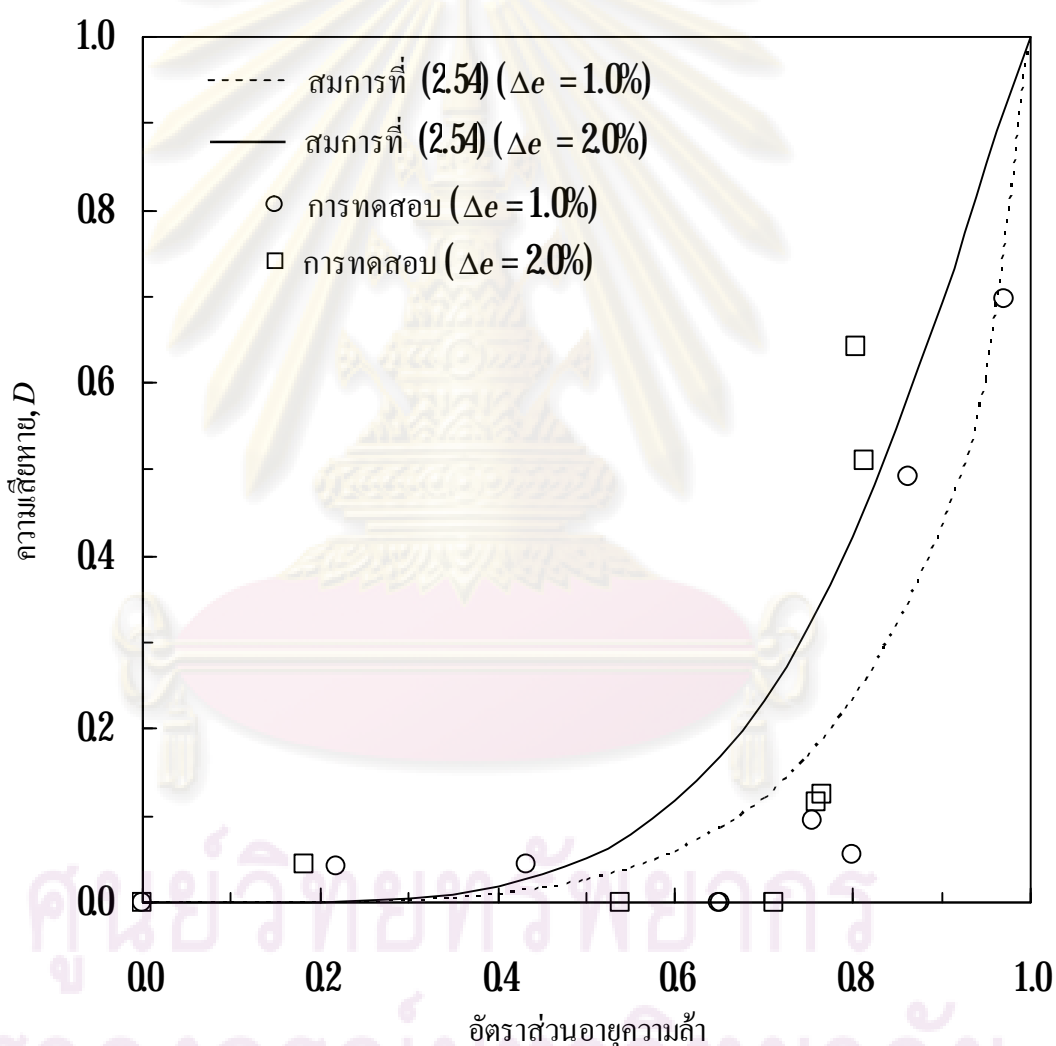
รูปที่ 414 ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ของกรณี $\Delta e = 1.0\%$



รูปที่ 415 ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ของกรณี $\Delta e = 2.0\%$

เนื่องจากค่าคงตัว b ได้จากการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นการทำนายอายุความล้าด้วยแบบจำลองนี้จึงใช้ได้เฉพาะการทดสอบที่อุณหภูมิ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความล้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน อัตราการสะสมความเสียหายจะไม่เท่ากัน [19]

เมื่อเขียนเส้นโค้งความเสียหายล้า D ที่คำนวณจากสมการ (254) โดยให้อัตราส่วนอายุความล้าเป็นแกนนอน (ตารางที่ 44 และ 45) และพล็อตจุดข้อมูลความเสียหายล้าที่อัตราส่วนอายุต่าง ๆ ของแต่ละพิสัยความเครียดลงบนแกนเดียวกัน จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 416 จากรูปจะเห็นว่าเส้นโค้งการสะสมความเสียหายที่พิสัยความเครียด 2.0% จะอยู่เหนือกรณีพิสัยความเครียด 1.0%



รูปที่ 416 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายกับอัตราส่วนอายุความล้า

44สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองความเสียหาย เพื่อใช้ทำนายอายุความล่าของชิ้นงาน ที่รับภาระสองระดับ การวิเคราะห์ผลการทดสอบนำไปสู่การหาค่าคงตัวในแบบจำลอง คือ y เท่ากับ **0.78** และ b ซึ่งมี 2 ค่า คือ ที่พิสัยความเครียด **1.0%** เท่ากับ **0.681** และที่พิสัยความเครียด **2.0%** เท่ากับ **-0.187** เมื่อนำแบบจำลองไปพล็อตกราฟระหว่างความเสียหายกับอัตราส่วนอายุความล่า พบว่า เส้นโค้งการสะสมความเสียหายที่พิสัยความเครียด **2.0%** อยู่เหนือกว่าที่พิสัยความเครียด **1.0%** สรุปว่า ชิ้นงานที่ผ่านภาระล่าที่พิสัยความเครียด **2.0%** มีการสะสมความเสียหายมากกว่าที่พิสัยความเครียด **1.0%** ณ อัตราส่วนอายุความล่าเดียวกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ

5.1 สภาวะทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของบล็อกล้างด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

การทดสอบความล้าจะทำที่อุณหภูมิ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร มีอัตราความเครียดเท่ากับ 10^3 ต่อวินาที สภาวะการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.1 ประกอบด้วย ภาระชนิด **high-low (H-L)** และ **low-high (L-H)**

วิธีการทดสอบกำหนดให้ชิ้นงานรับภาระล้าที่พิสัยความเครียดของบล็อกแรกก่อน จนถึงอัตราส่วนอายุความล้า n_1/N_f ที่กำหนด จากนั้นให้ชิ้นงานรับภาระล้าที่พิสัยความเครียดของบล็อกหลังจนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย

การกำหนดอายุความล้าของชิ้นงานที่บล็อกล้าง n_2 พิจารณาจาก จำนวนรอบภาระที่มีขนาดความเค้นสูงสุดลดลง **5%** จากความเค้นสูงสุดในช่วงสถานะคงตัวที่พิสัยความเครียดเดียวกัน

ตารางที่ 5.1 สภาวะการทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ

การทดสอบ	รหัสชิ้นงาน	พิสัยความเครียด Δe (%)		อัตราส่วนอายุความล้า ของบล็อกแรก n_1/N_f
		บล็อกแรก	บล็อกหลัง	
H-L	HL030	20	1.0	0.30
	HL050	20	1.0	0.50
	HL060	20	1.0	0.60
L-H	LH026	1.0	20	0.26
	LH044	1.0	20	0.44
	LH052	1.0	20	0.52

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.2 และในรูปที่ 5.1 ถึง 5.6 จากตารางที่ 5.2 พบว่า การทดสอบแบบ H-L ผลรวมอัตราส่วนอายุความล้าน้อยกว่า 1 ขณะที่การทดสอบแบบ L-H ผลรวมอัตราส่วนอายุความล้าประมาณ 1

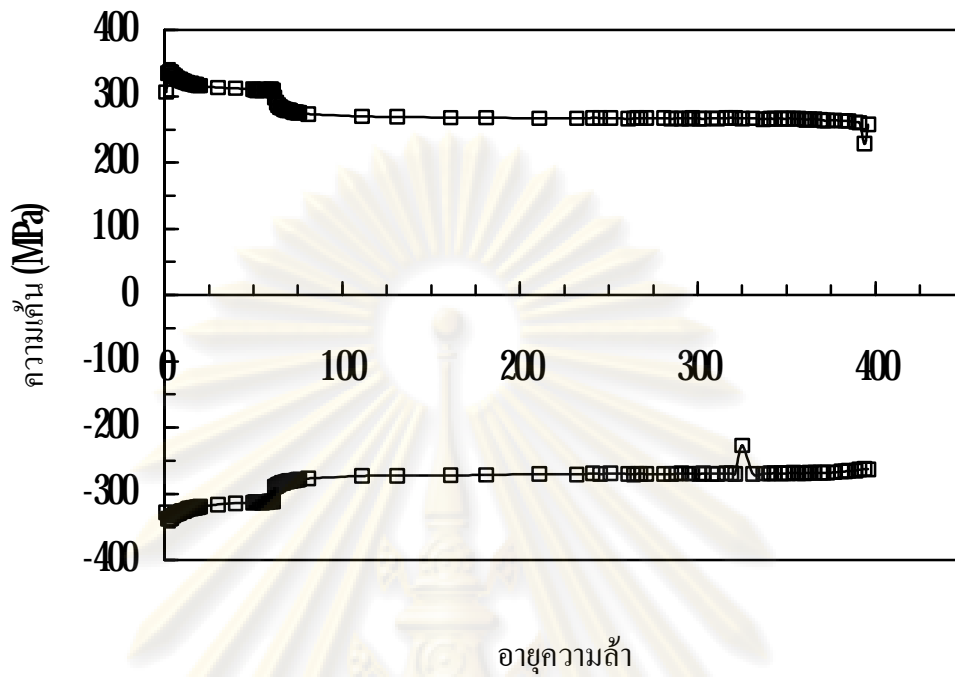
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาระสองระดับ

การทดสอบ	รหัสชิ้นงาน	อัตราส่วนอายุความล้า		ผลรวม อัตราส่วนอายุความล้า
		บล็อกแรก n_1/N_{f1}	บล็อกหลัง n_2/N_{f2}	
H-L	HL030	0.30	0.50*	0.80
	HL050	0.50	0.32	0.82
	HL060	0.60	0.17*	0.77
L-H	LH026	0.26	0.75*	1.01
	LH044	0.44	0.55	0.99
	LH052	0.52	0.50	1.02

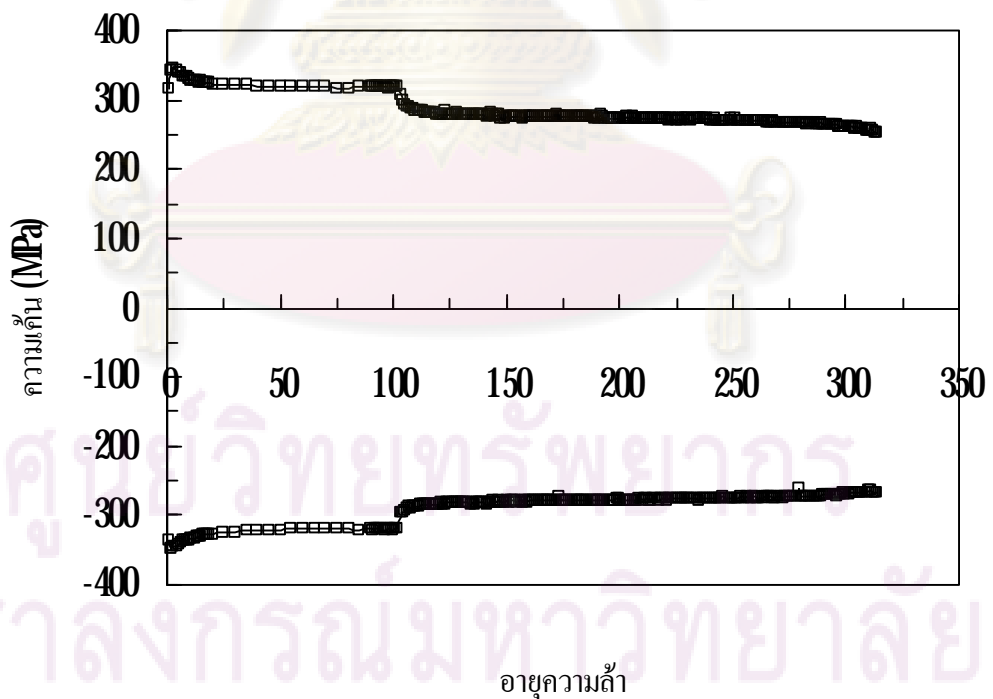
* หักทดสอบก่อนที่ความเค้นสูงสุดลดลง 5% จากความเค้นสูงสุดในช่วงสถานะคงตัว

จากรูปที่ 5.1 ถึง 5.6 พบว่าพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นงานที่สภาวะทดสอบของบล็อกแรก เหมือนกับ รูปที่ 4.7 คือ วัสดุมีพฤติกรรมแบบ **cyclic hardening** ในช่วง 10 รอบแรก จากนั้น **softening** และเข้าสู่สถานะคงตัวในที่สุด สำหรับพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นงาน กรณีการทดสอบแบบ H-L (รูปที่ 5.1 ถึง 5.3) ที่สภาวะทดสอบของบล็อกหลังพบว่า ในช่วงเริ่มต้น วัสดุมีพฤติกรรมแบบ **softening** จากนั้นเข้าสู่สถานะคงตัว จนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย กรณีการทดสอบแบบ L-H (รูปที่ 5.4 ถึง 5.6) ที่สภาวะทดสอบของบล็อกหลัง พบว่า ในช่วงเริ่มต้นวัสดุมีพฤติกรรมแบบ **cyclic hardening** จากนั้นเข้าสู่สถานะคงตัว จนทั้งชิ้นงานเสียหาย

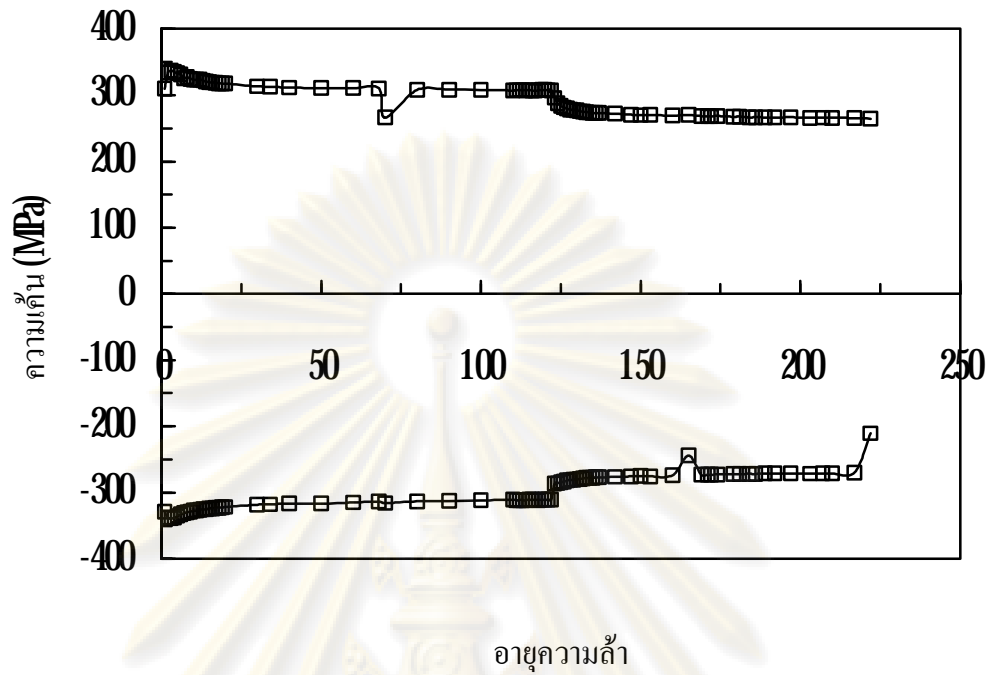
ในการทดสอบชิ้นงาน HL030, HL060 และ LH026 ผู้วิจัยใช้ขนาดความเค้นสูงสุดในช่วงสถานะคงตัวของชิ้นงาน FF10 (กรณี H-L) หรือ FF20 (กรณี L-H) เป็นค่าอ้างอิงในการระบุจำนวนรอบจนกระทั่งเสียหายในบล็อกที่สอง n_2 แต่ต่อมาผู้วิจัยเปลี่ยนไปใช้ขนาดความเค้นสูงสุดในช่วงสถานะคงตัวของบล็อกที่สองเป็นค่าอ้างอิงในการระบุค่า n_2 เมื่อกลับไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ 3 สภาวะแรกโดยใช้ค่าอ้างอิงค่าใหม่ก็พบว่า การใช้ค่าอ้างอิงเดิมทำให้การทดสอบหยุดก่อนเวลาอันควร กล่าวคือเมื่อใช้ค่าอ้างอิงใหม่ ความเค้นสูงสุดในชิ้นงาน HL03, HL06 และ LH03 ลดลงเพียง 3.6%, 1.2% และ 0.9% ตามลำดับ ดังนั้นจำนวนรอบจนกระทั่งเสียหายในบล็อกที่สอง n_2 จึงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น กล่าวอีกอย่างหนึ่งคืออัตราส่วน n_2/N_{f2} ของชิ้นงาน HL030, HL060 และ LH026 ในตารางที่ 5.2 มีแนวโน้มมากกว่าค่าในตาราง



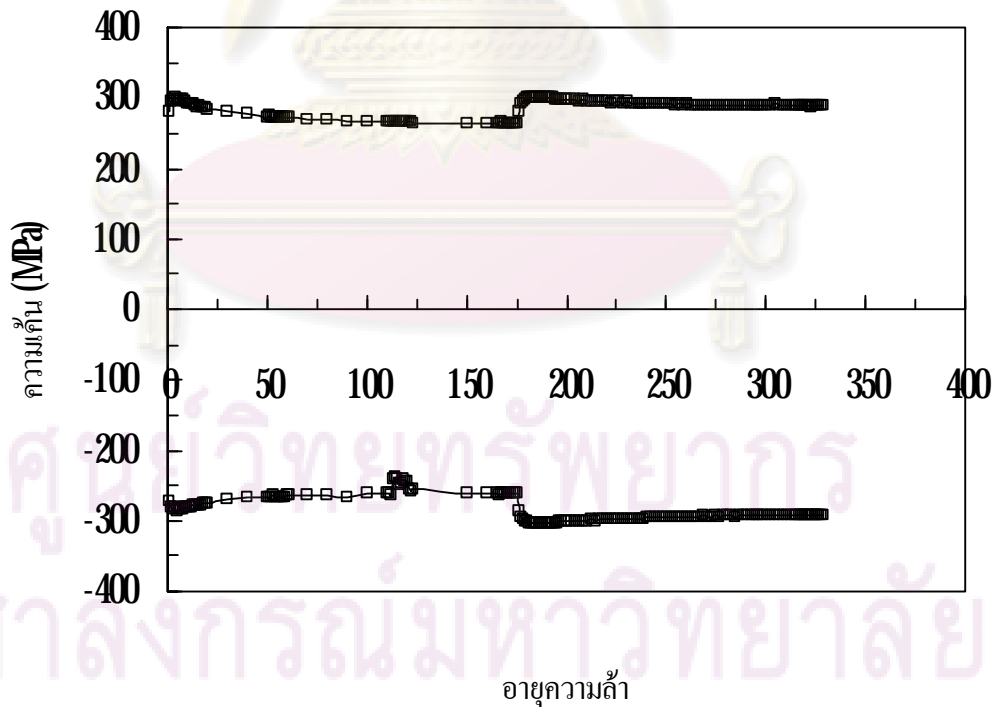
รูปที่ 5.1 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ high-low ($n_1/N_T = 0.30$)



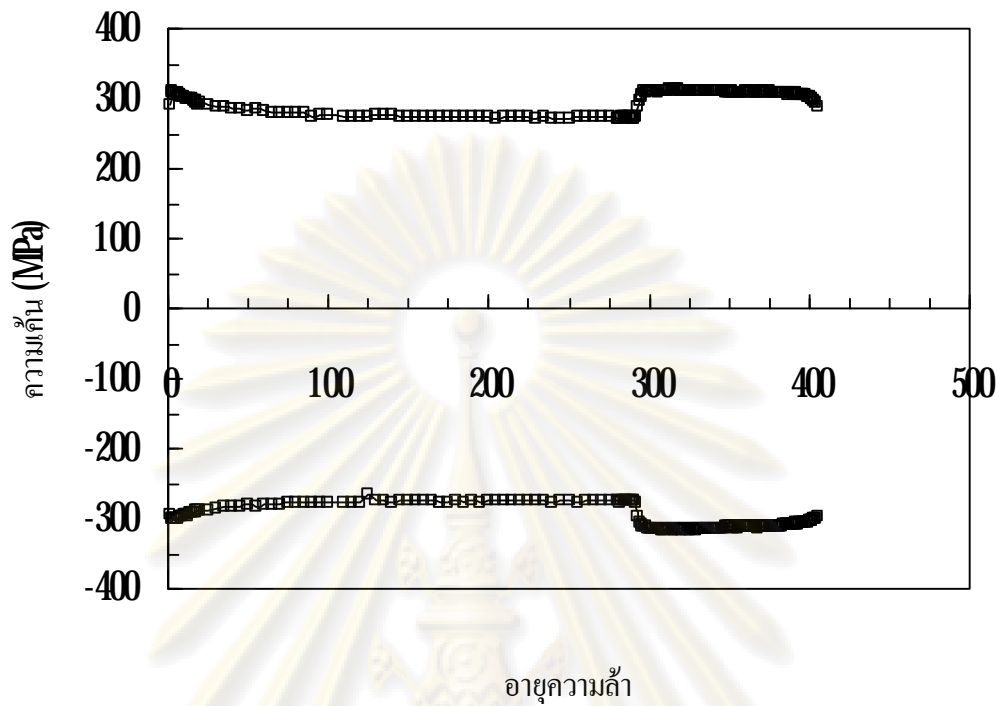
รูปที่ 5.2 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ high-low ($n_1/N_T = 0.50$)



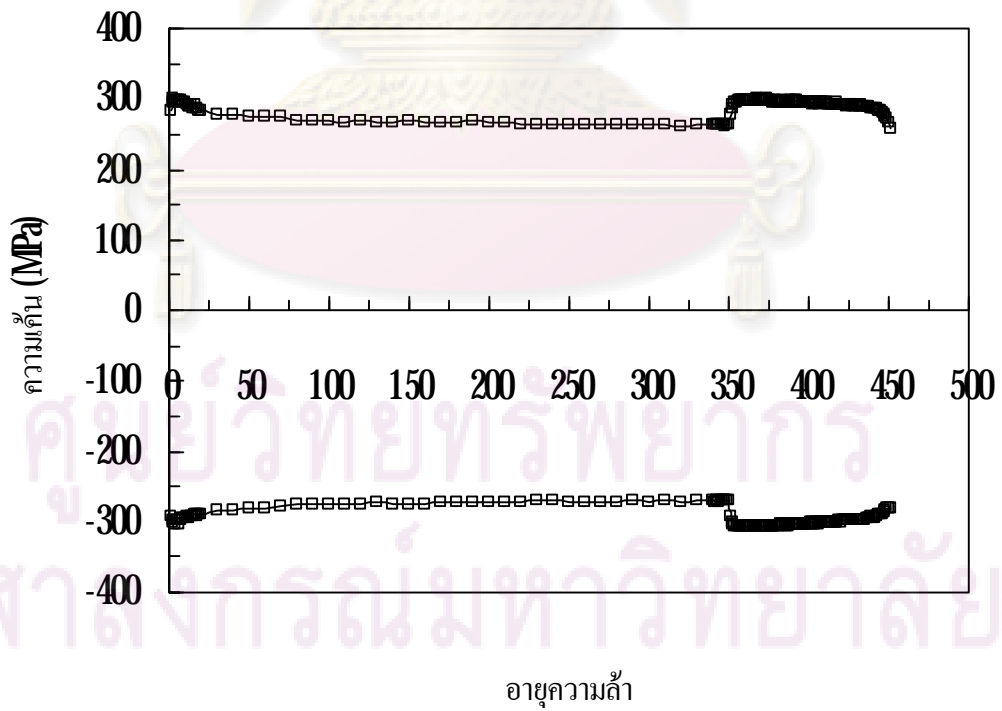
รูปที่ 5.3 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ **high-low** ($n_1/N_{f1} = 0.60$)



รูปที่ 5.4 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ **low-high** ($n_1/N_{f1} = 0.26$)



รูปที่ 5.5 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ low-high ($n_1/N_{f1} = 0.44$)



รูปที่ 5.6 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุดของการทดสอบแบบ low-high ($n_1/N_{f1} = 0.52$)

5.2สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงสถานะและผลการทดสอบความถี่ภายใต้ภาวะสองระดับ 2 แบบคือ แบบ **high-low** และ **low-high** ผลรวมอัตราส่วนอายุความถี่ของการทดสอบแบบ **high-low** น้อยกว่า 1 และการทดสอบแบบ **low-high** ประมาณ 1 สำหรับพฤติกรรมการเสียชีวิตในบล็อกแรกเหมือนกับชิ้นงานที่ใช้หาอายุความถี่ (**FF10** และ **FF20**) ส่วนบล็อกหลังพฤติกรรมการเสียชีวิตขึ้นอยู่กับระดับความถี่สูงสุดของบล็อกแรกว่าจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

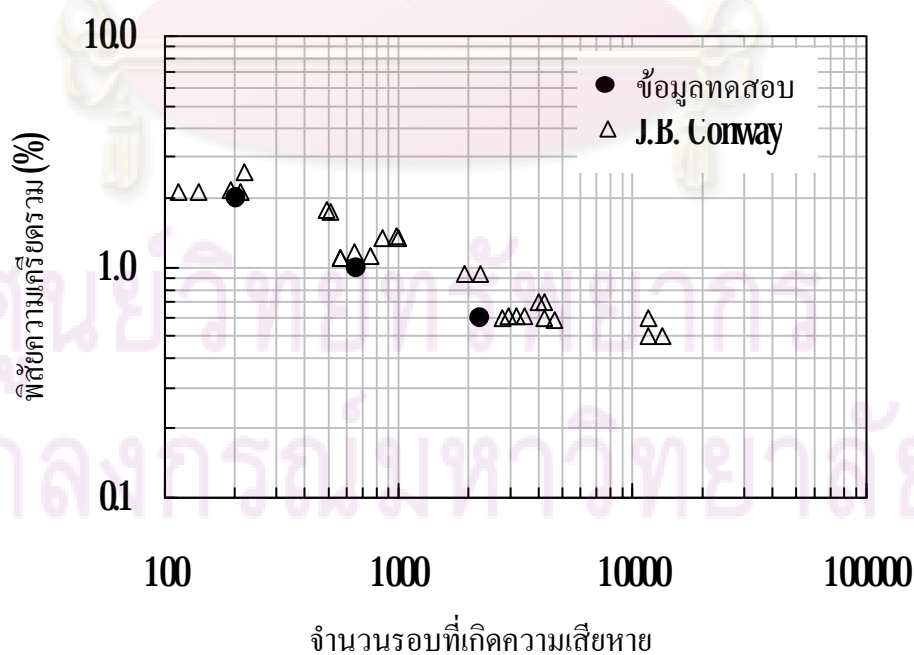
บทที่ 6

อภิปรายผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การเปรียบเทียบอายุความล้มภายใต้พิสัยความเครียดคงที่กับผลการทดสอบของงานวิจัยอื่น จากนั้นจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายกับโหมดความเสียหาย ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับพื้นที่รอยร้าว ข้อจำกัดของตัวแปรความเสียหาย ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายของข้อมูล การทำนายอายุความล้มภายใต้ภาระสองระดับ สุดท้ายกล่าวถึง การพิจารณาความเป็นไปได้ของคุณสมบัติทางกลอื่นที่จะนำมาใช้เป็นตัวแปรความเสียหาย ได้แก่ มอดูลัสของความยืดหยุ่น ความเค้นคราก และความเค้นสูงสุด

6.1 อายุความล้มภายใต้ภาระแบบพิสัยความเครียดคงที่

อายุความล้มที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานที่พิสัยความเครียดต่าง ๆ น่าเชื่อถือหรือไม่ ทำได้โดยการนำอายุความล้มที่พิสัยความเครียดคงที่ 0.6%, 1.0% และ 2.0% (ตารางที่ 4.3) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ J.B. Conway [19] ที่สภาวะทดสอบเดียวกัน เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายกับพิสัยความเครียดรวม ด้วยสเกลล็อก-ล็อก จะได้ดังรูปที่ 6.1 จากรูปพบว่า ผลการทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้อยู่ในขอบเขตของผลการทดสอบของ Conway สรุปว่า อายุความล้มของวิทยานิพนธ์นี้มีความน่าเชื่อถือ

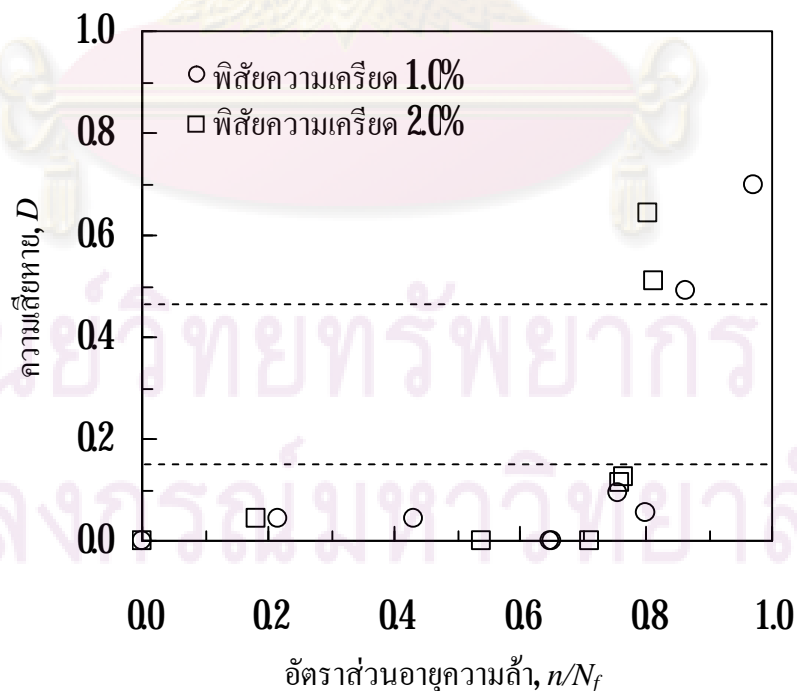


รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยความเครียดรวมกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย

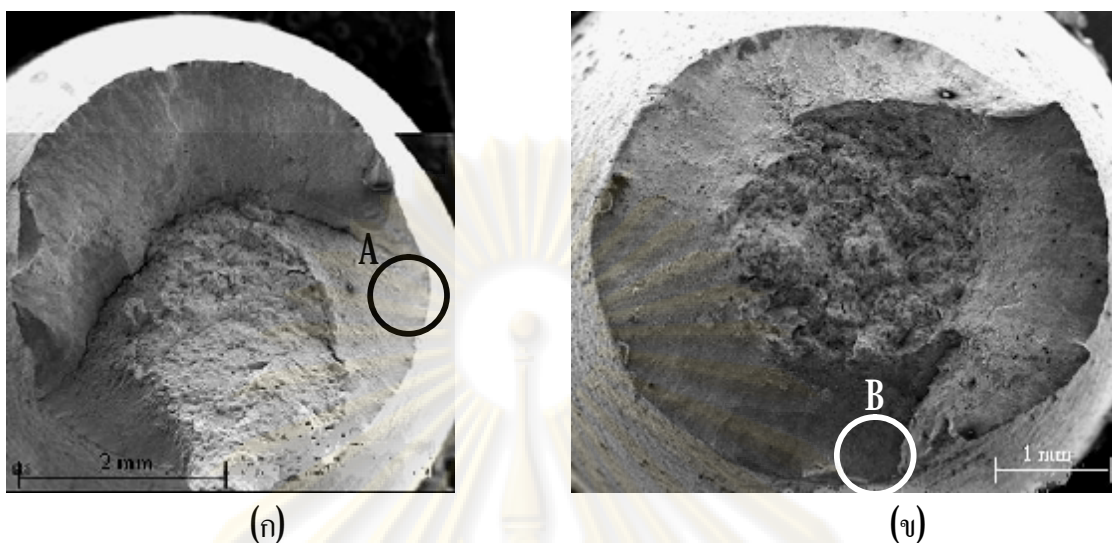
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายกับโหมดความเสียหาย

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอายุความล้า n/N_f กับความเสียหาย D ที่ได้จากการทดสอบความล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% และ 2.0% จะได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปจะแบ่งระดับความเสียหายได้ 2 บริเวณ คือ บริเวณที่ความเสียหายไม่เกิน 0.15 (เส้นประเส้นล่าง) และบริเวณที่ความเสียหายมากกว่า 0.48 โดยประมาณ (เส้นประเส้นบน) เมื่อนำชิ้นงาน (บางชิ้น) ที่มีระดับความเสียหายน้อยกว่า 0.15 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าการแตกหักเป็นแบบ cup และ cone ซึ่งเป็นลักษณะแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ดังรูปที่ 6.3 ในขณะที่ระดับความเสียหายมากกว่า 0.48 การแตกหักเป็นแบบเฉียง (slant fracture) ดังรูปที่ 6.4

เมื่อพิจารณาบริเวณวงกลม A ในรูปที่ 6.3(ก) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า บริเวณพื้นผิวแตกหักพบเฉพาะ dimple ซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวแตกหักเนื่องจากแรงดึงของวัสดุเหนียว ดังรูปที่ 6.5 เช่นเดียวกับภาพขยายบริเวณวงกลม B ในรูปที่ 6.3(ข) ก็พบเฉพาะ dimple ดังรูปที่ 6.6 ในขณะที่พื้นผิวแตกหักบริเวณวงกลม C และ D ในรูปที่ 6.4 พบจุดกำเนิดรอยร้าวที่ผิว และ ridge ดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 เมื่อเพิ่มกำลังขยาย 1,500 เท่า พบ striation ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากภาระล้า ดังรูปที่ 6.9 และ 6.10 สรุปว่าโหมดความเสียหายขึ้นกับระดับความเสียหาย 1) การแตกหักแบบ cup และ cone ความเสียหายน้อยกว่า 0.15 2) การแตกหักแบบเฉียง ความเสียหายมากกว่า 0.48



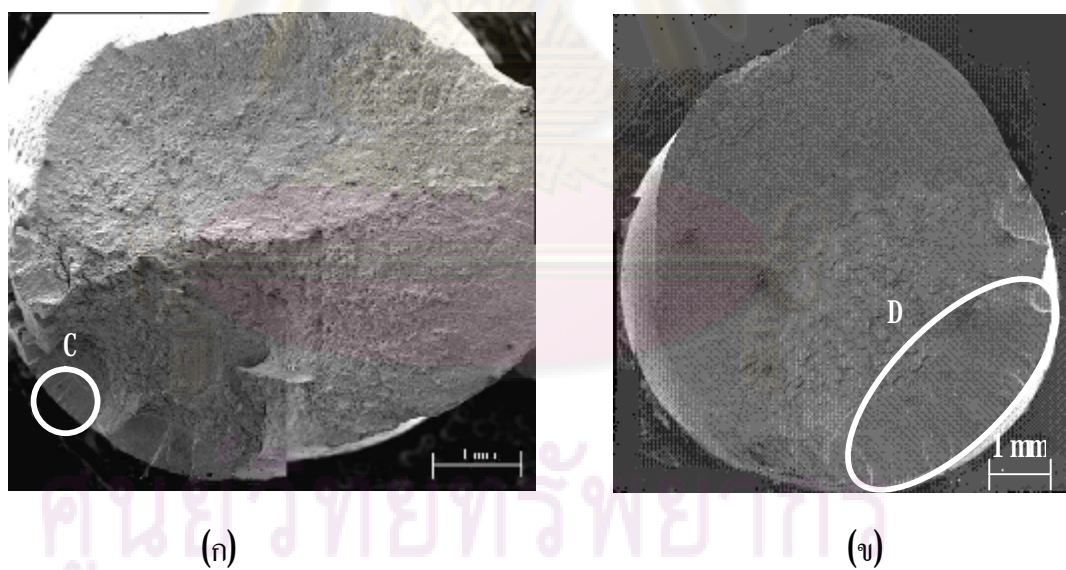
รูปที่ 6.2 การแบ่งระดับความเสียหาย



รูปที่ 63 ลักษณะการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีความเสียหายน้อยกว่า 0.15

(ก) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 503 รอบ (PFA05)

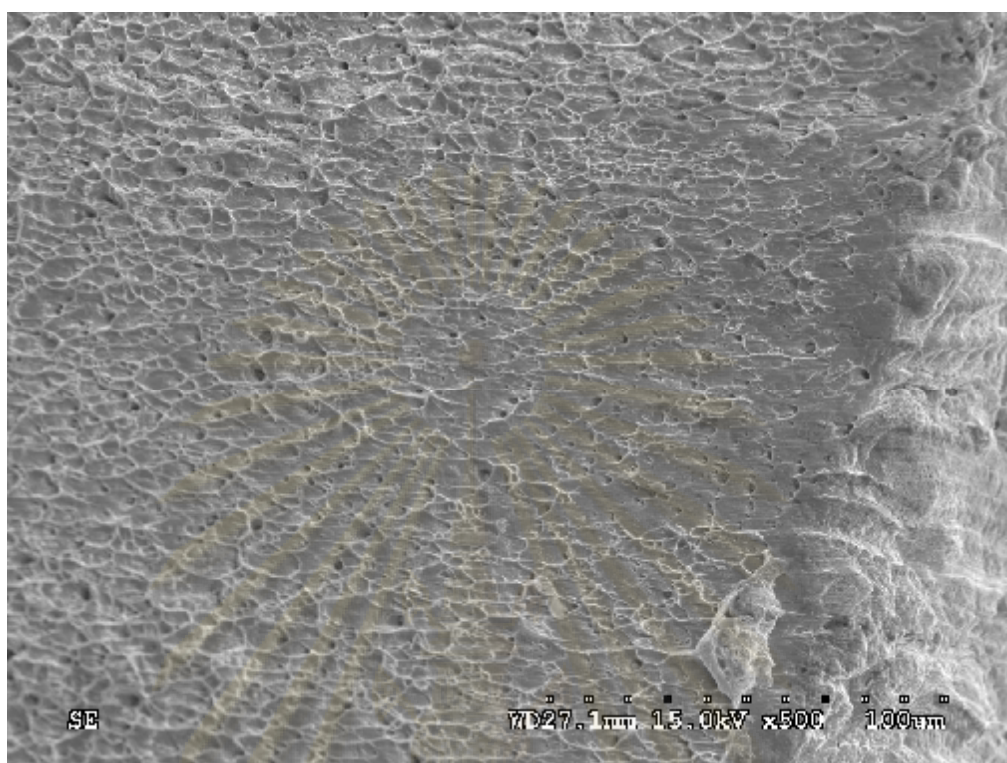
(ข) พิสัยความเครียด 2.0% จำนวน 155 รอบ (PFB04)



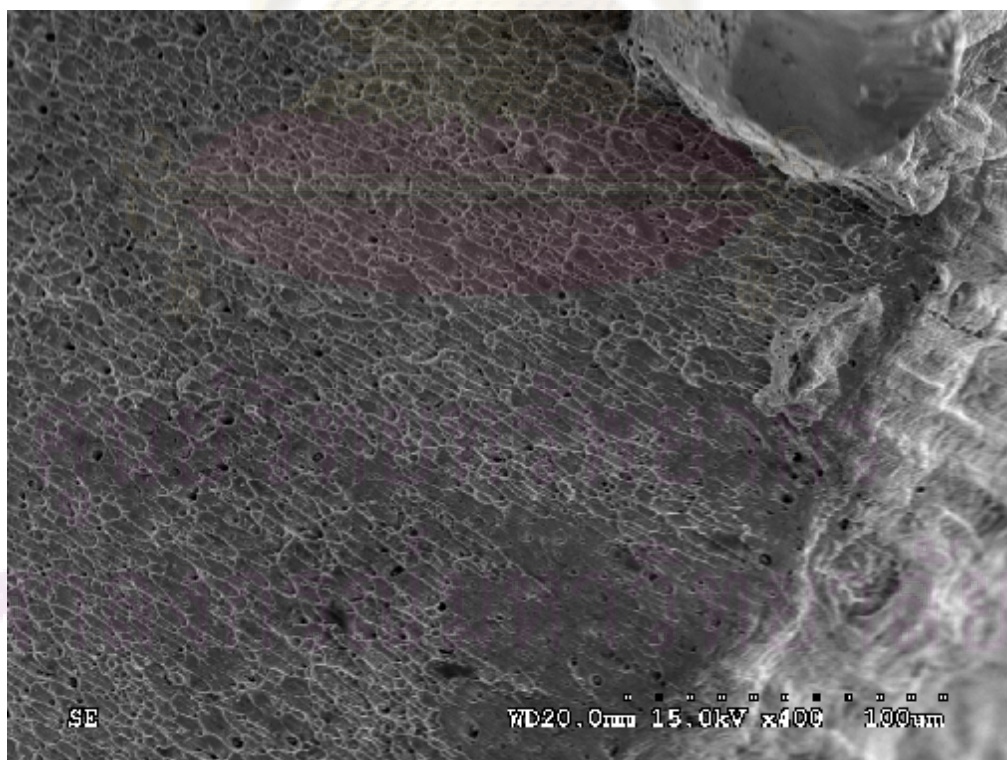
รูปที่ 64 ลักษณะการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีความเสียหายมากกว่า 0.48

(ก) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 575 รอบ (PFA07)

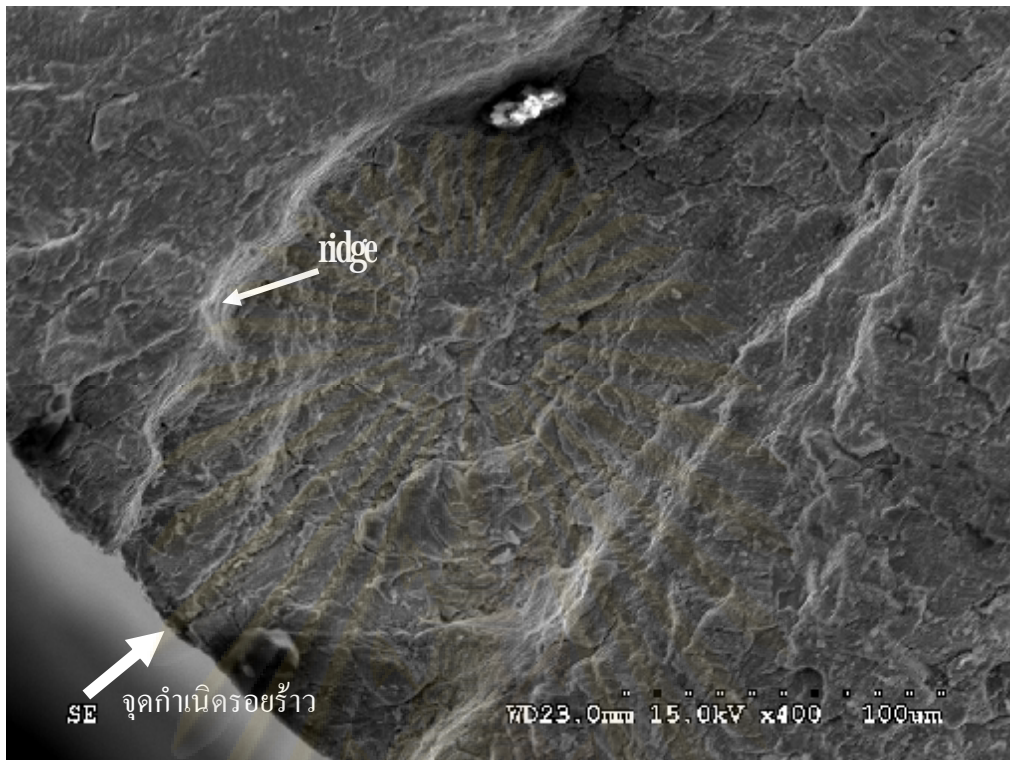
(ข) พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 647 รอบ (PFA08)



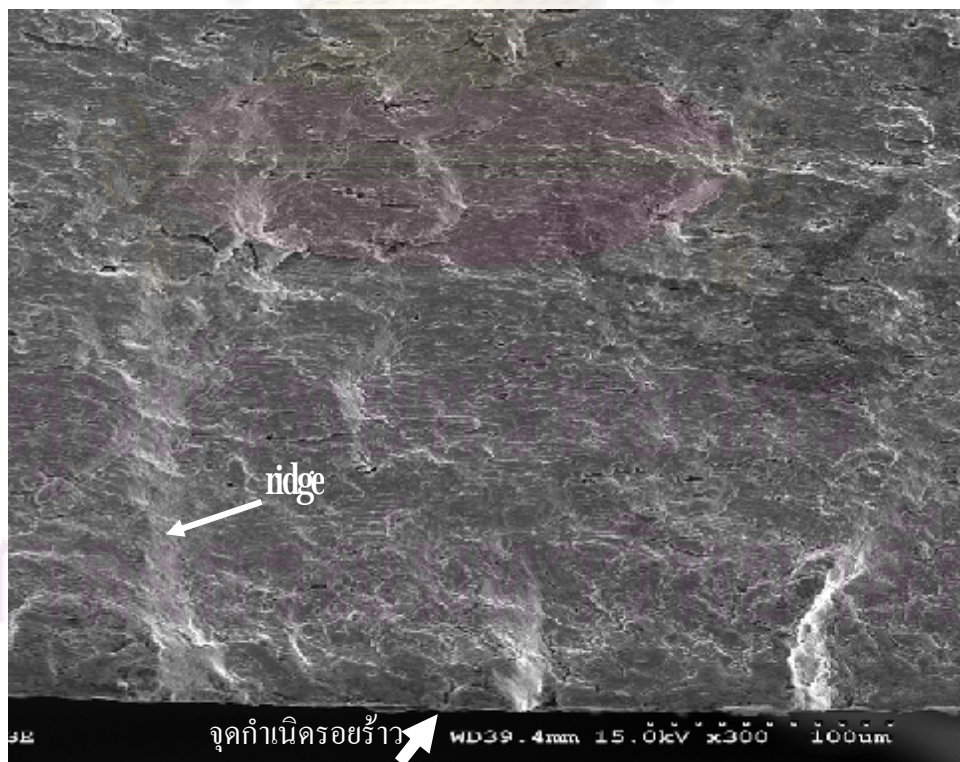
รูปที่ 6.5 ภาพขยายวงกลม A (รูปที่ 6.3(ก))



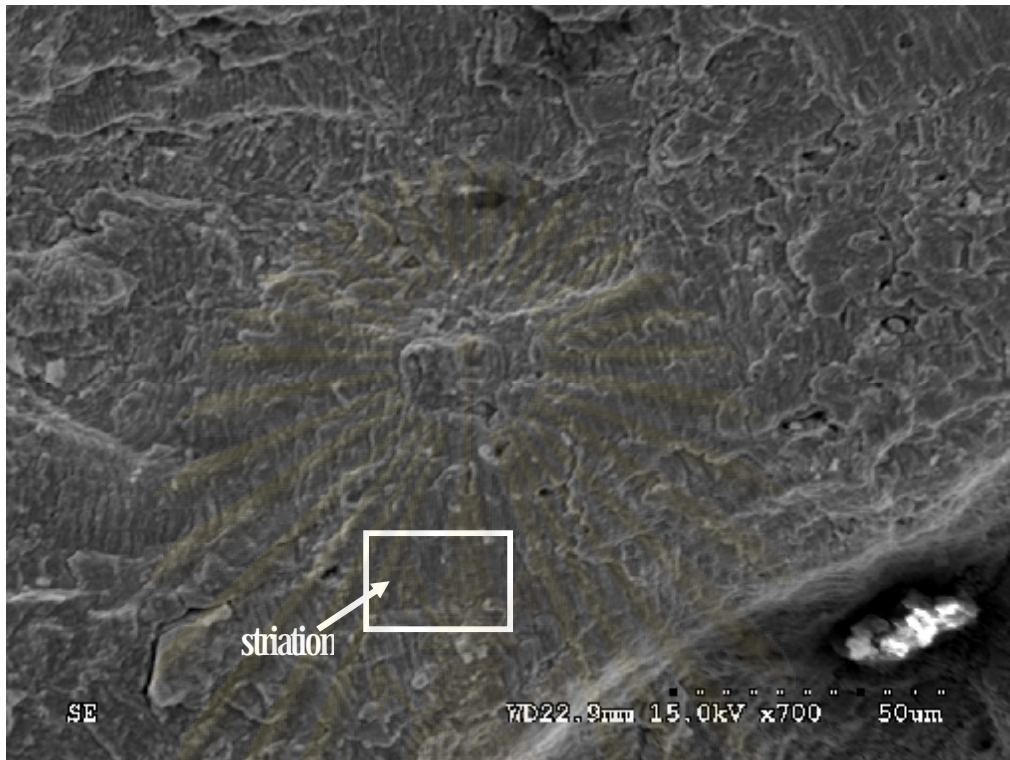
รูปที่ 6.6 ภาพขยายวงกลม B (รูปที่ 6.3(ข))



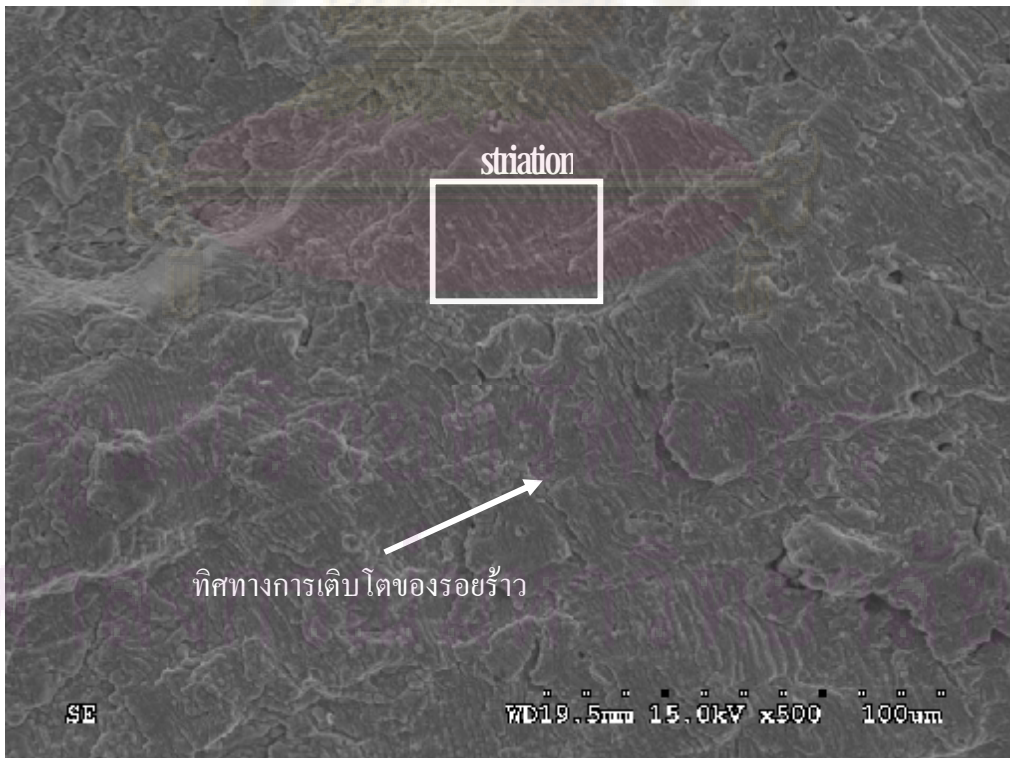
รูปที่ 6.7 ภาพขยายวงกลม C (รูปที่ 6.4(ก))



รูปที่ 6.8 ภาพขยายวงกลม D (รูปที่ 6.4(ข))



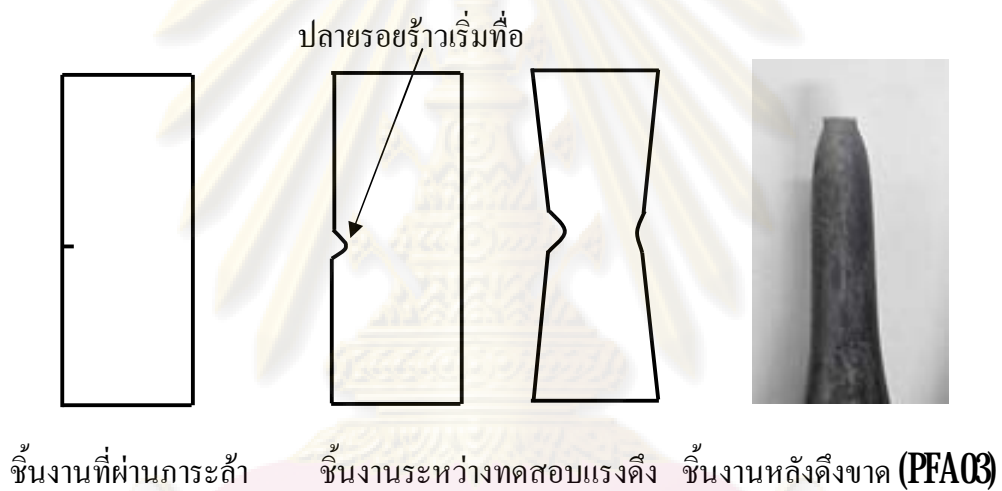
รูปที่ 6.9 striation ของภาพขยายวงกลม C (รูปที่ 6.4(ก))



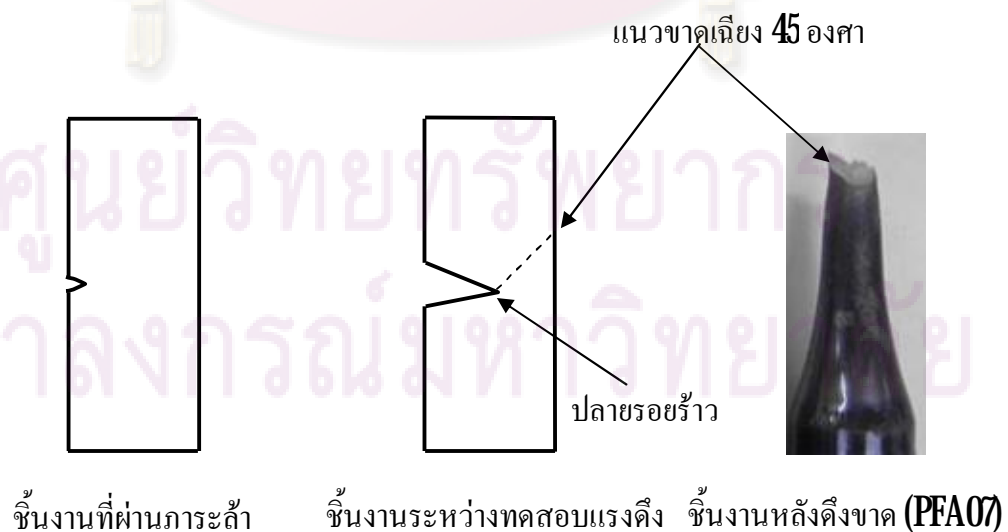
รูปที่ 6.10 striation ของภาพขยายวงกลม D (รูปที่ 6.4(ข))

จากข้อสรุป 1 ที่ว่า ระดับความเสียหายน้อยกว่า 0.15 การแตกหักจะเป็นแบบ **cup** และ **cone** สันนิษฐานว่า ชี้นงานเกิดรอยร้าวขนาดเล็กมากหลังจากผ่านภาระล้า เมื่อนำไปดึง บริเวณปลายรอยร้าวจะเริ่มทื่อ และรอยร้าวจะหายไปขณะเกิดคอคอด (เนื่องจากชี้นงานมีความเหนียวมาก) การเสียรูปเกิดทั่วบริเวณความยาวเกจ จนกระทั่งขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 611

จากข้อสรุป 2 ที่ว่า ระดับความเสียหายมากกว่า 0.48 การแตกหักจะเป็นแบบเฉียง สันนิษฐานว่า ชี้นงานเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่หลังจากผ่านภาระล้า เมื่อนำไปดึง บริเวณปลายรอยร้าวจะเกิดความเค้นหนาแน่น (**stress concentration**) ส่งผลให้ตรงปลายรอยร้าวเกิดความเสียหายรุนแรง การเสียรูปส่วนใหญ่จะเกิดตรงปลายรอยร้าว ที่ปลายรอยร้าวจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียรูป จนกระทั่งชี้นงานขาดออกจากกัน บริเวณแตกหักสุดท้ายจะทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวระนาบ ดังรูปที่ 612



รูปที่ 611 การแตกหักแบบ **cup** และ **cone**



รูปที่ 612 การแตกหักแบบเฉียง

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับพื้นที่รอยร้าว

ชิ้นงานที่ผ่านภาระด้าที่พิสัยความเครียด **1.0%** เมื่อนำไปดึงจนขาด แล้วพิจารณาบริเวณพื้นผิวแตกหักจะพบรอยร้าว (บางชิ้นก็ไม่พบ) ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน (การหาขนาดรอยร้าวจะกล่าวต่อไป) ชิ้นงานที่พบพื้นที่รอยร้าวแบ่งได้ **2** กลุ่ม คือ รอยร้าวเกิดในความยาวเกจ และ รอยร้าวเกิดที่จุดสัมผัสของ **extensometer** ดังตารางที่ **61** รหัสชิ้นงาน **A** คือ ชิ้นงานที่หยุดทดสอบเมื่อความเค้นสูงสุดลดลงประมาณ **20%** จากความเค้นสูงสุดในช่วงสถานะคงตัว จุดข้อมูลนี้ไม่ได้นำมาใช้หาค่าคงตัว y และ b ในแบบจำลอง เนื่องจากความเค้นสูงสุดลดลงมากกว่า **5%**

การหาพื้นที่รอยร้าว ใช้วิธีสแกนพื้นผิวที่แตกหัก [28] ด้วยเครื่องสแกนเนอร์ (ตัวอย่างการหาพื้นที่รอยร้าวอยู่ในภาคผนวก ก.2) เริ่มจากการเลือกชิ้นงานแตกหัก ไปสแกน เมื่อได้รูปสแกนจะใช้โปรแกรม **techdig** ระบุพิกัด x, y สุดท้ายคำนวณพื้นที่รอยร้าวด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

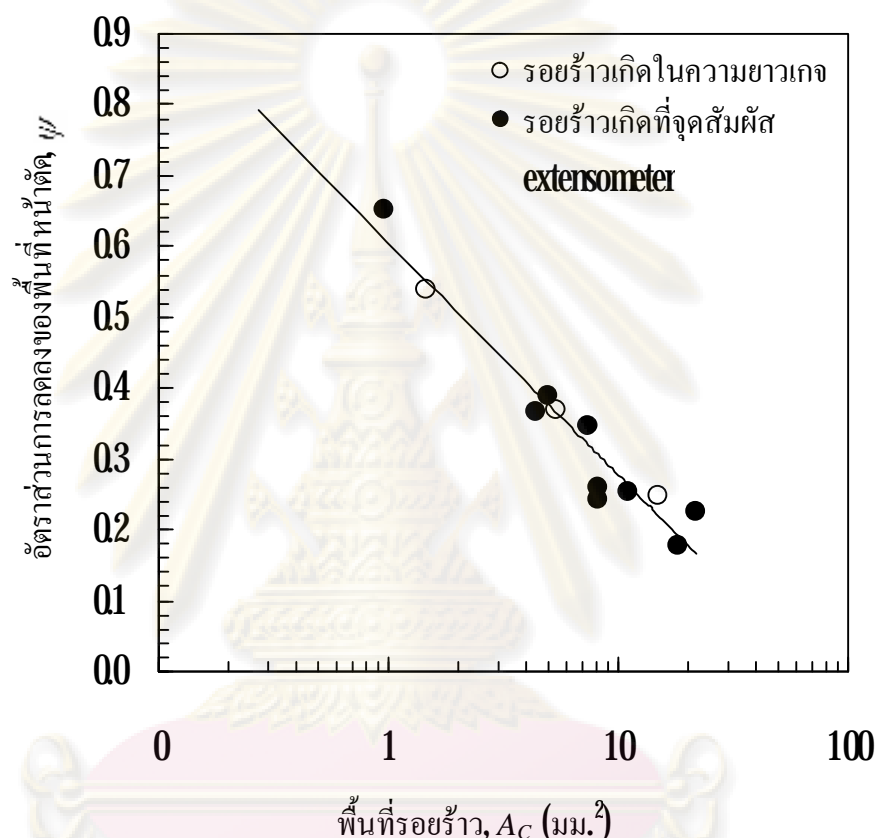
ตารางที่ **61** ความเหนียวและพื้นที่รอยร้าวของชิ้นงานทดสอบ

กลุ่มชิ้นงาน	รหัสชิ้นงาน	อัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด \bar{y}	พื้นที่รอยร้าว A_c (มม. ²)
1. รอยร้าวเกิดในความยาวเกจ	PFA07	0.54	1.46
	PFA08	0.37	5.41
	A	0.25	14.90
2. รอยร้าวเกิดที่จุดสัมผัสของ extensometer	-	0.65	0.97
	-	0.39	4.94
	-	0.37	4.39
	-	0.35	7.41
	-	0.25	11.09
	-	0.24	8.22
	-	0.23	21.84
	-	0.23	21.84
-	0.18	18.21	

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพและ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัด กับพื้นที่รอยร้าว ในตารางที่ 61 จะได้กราฟดังรูปที่ 613 จากรูป เมื่อสร้างสมการเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลจะมีความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองดังสมการที่ 61

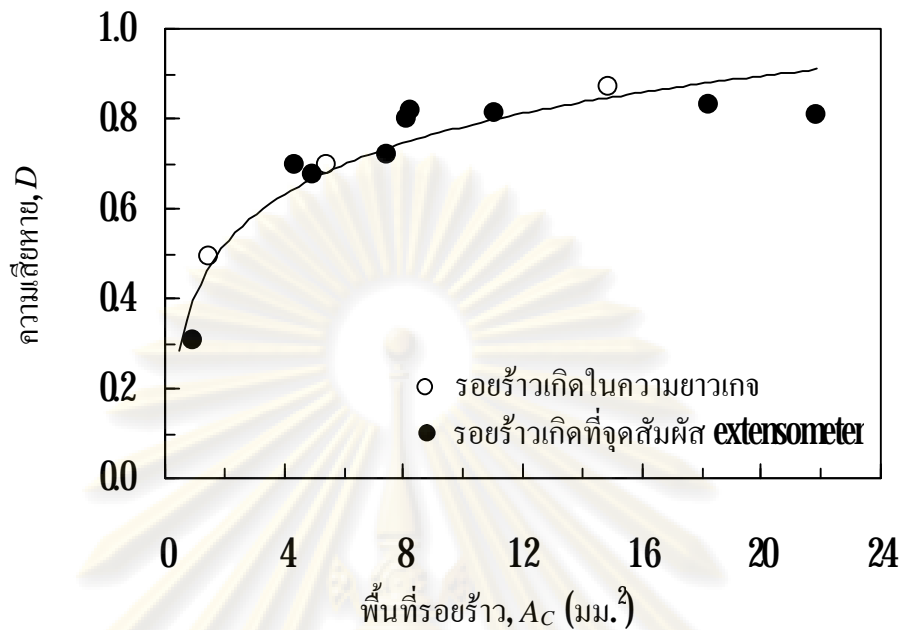
$$\bar{y} = -0.142 \ln(A_c) + 0.605 \quad (R^2 = 0.93) \quad (61)$$



รูปที่ 613 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดกับพื้นที่รอยร้าว

รูปที่ 613 แสดงให้เห็นว่าความเหนียวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่รอยร้าว กล่าวคือ ถ้าพื้นที่รอยร้าวเพิ่มขึ้นการสูญเสียความเหนียวก็จะมากขึ้น แนวโน้มนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Murakami [12]

เนื่องจากความเสียหายคำนวณได้จากการสูญเสียความเหนียว เพราะฉะนั้นความเสียหายก็มีความสัมพันธ์กับพื้นที่รอยร้าวด้วยเช่นกัน เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายกับพื้นที่รอยร้าว จะได้กราฟดังรูปที่ 614 จากรูปพบว่าระดับความเสียหายขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่รอยร้าว กล่าวคือ เมื่อพื้นที่รอยร้าวมีขนาดมากขึ้น ความเสียหายก็จะมากขึ้นเช่นเดียวกัน กล่าวได้ว่า การสะสมความเสียหายก็คือการเติบโตของรอยร้าว



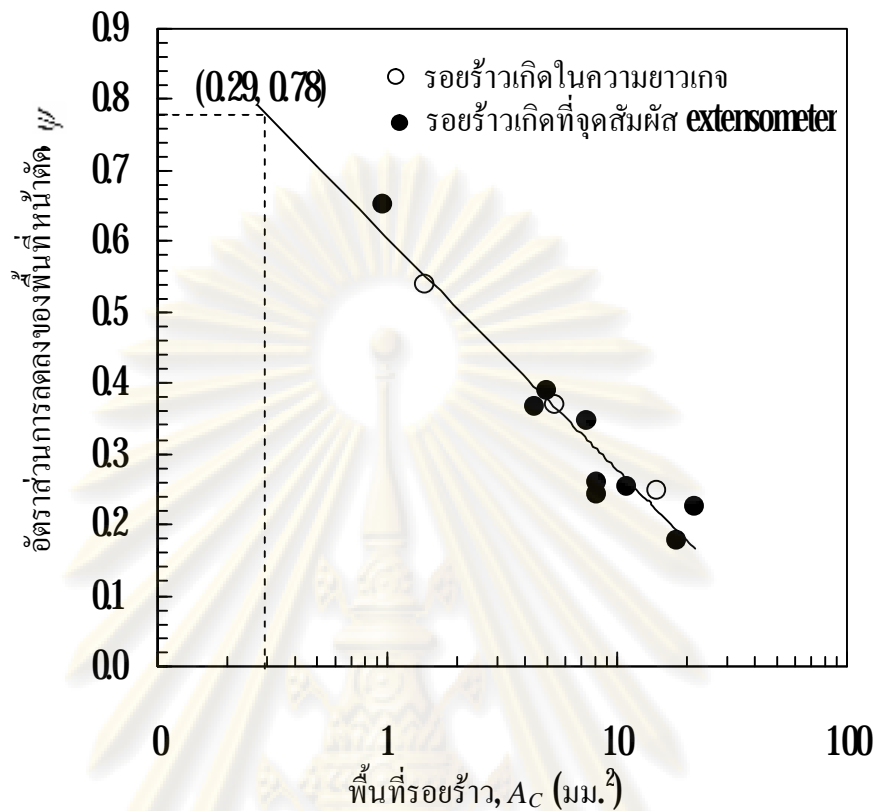
รูปที่ 614 ระดับความเสียหายสมมูลกับพื้นที่รอยร้าว

6.4 ข้อจำกัดของตัวแปรความเสียหาย

จากข้อสรุปที่ว่า การสะสมความเสียหาย คือ การเติบโตของรอยร้าว เนื่องจากการเติบโตของรอยร้าวมีความสัมพันธ์กับการลดลงของความเหนียว เพราะฉะนั้นจะพิจารณากระบวนการเกิดรอยร้าวต่อการสูญเสียความเหนียว

รูปที่ 615 ได้จากกราฟรูปที่ 613 โดยลากเส้นตรงขนานกับแกนอนมีจุดเริ่มต้นที่ความเหนียวเท่ากับ 0.78 (ความเหนียวที่ใช้สำหรับอ้างอิง) ไปตัดกับเส้นตรงที่ได้จากสมการที่ (61) จะได้จุดตัดของเส้นทั้งสอง จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดตัดลงในแนวดิ่งไปตัดกับเส้นแกนอน จะได้คู่ค่าดับ x, y ของจุดตัดเส้นทั้งสาม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



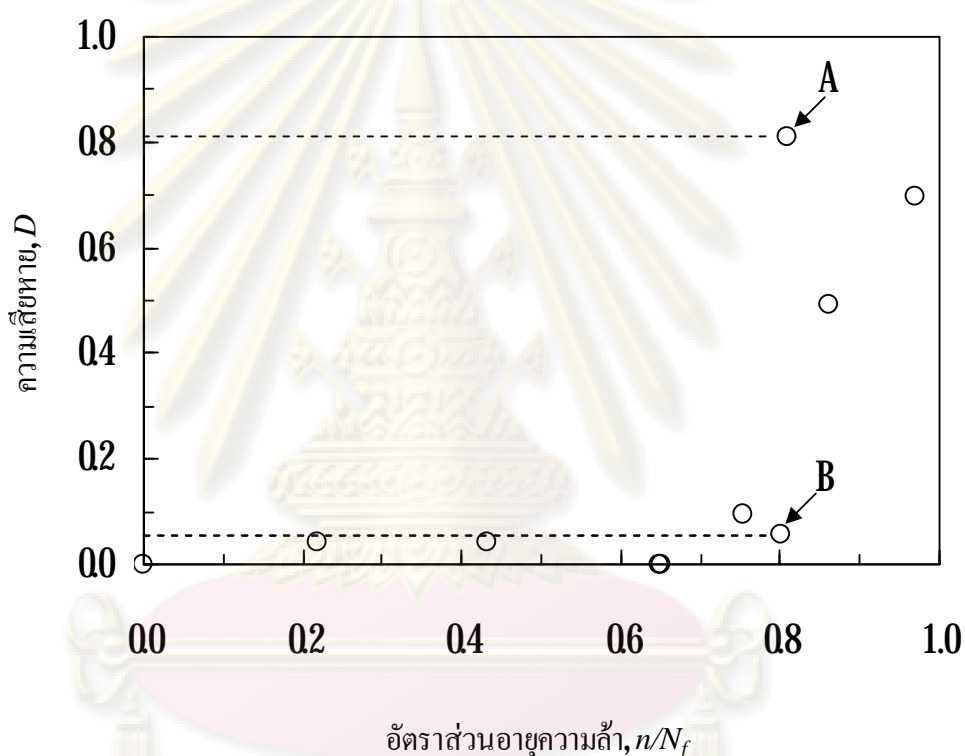
รูปที่ 615 ข้อจำกัดของตัวแปรความเสียหาย

จากรูปที่ 615 พบว่า ชิ้นงานที่ยังไม่มีรอยร้าวไปจนถึงมีพื้นที่รอยร้าวเท่ากับ 0.29 มม.^2 ความเสียหายจะไม่ลดลง ตั้งแต่พื้นที่รอยร้าวมากกว่า 0.29 มม.^2 ความเสียหายจึงจะลดลง ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (6.1) สรุปว่า ถ้าพื้นที่รอยร่วมน้อยกว่า 0.29 มม.^2 ความเสียหายจะไม่สะท้อนว่าเกิดความเสียหาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

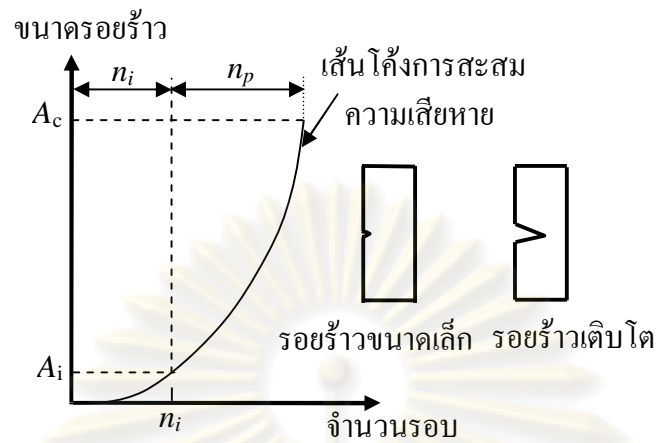
6.5 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายของข้อมูล

จากการทดสอบเมื่อนำจุดข้อมูล A ในตารางที่ 6.1 พล็อตร่วมกับจุดข้อมูลที่พิสัยความเครียด 1.0% ในรูปที่ 6.2 จะได้กราฟดังรูปที่ 6.16 โดยมีเส้นประแสดงระดับความเสียหายของจุด A และ B (รหัสชิ้นงาน คือ PFA06) จากรูปพบว่า มีการกระจายของจุดข้อมูล กล่าวคือ ที่อัตราส่วนอายุความล้าเท่ากัน จุด A เกิดความเสียหายประมาณ 0.8 ซึ่งอยู่สูงกว่าจุด B ที่เกิดความเสียหายประมาณ 0.05 ดังที่กล่าวมาแล้วว่าระดับความเสียหายมีความสัมพันธ์กับพื้นที่รอยร้าว แสดงว่า จุด A มีพื้นที่รอยร้าวมากกว่า จุด B

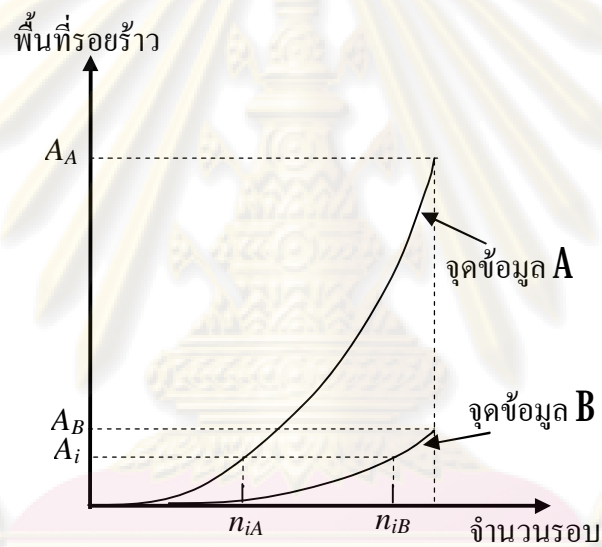


รูปที่ 6.16 ความแตกต่างของจุดข้อมูลที่อัตราส่วนอายุความล้าเท่ากัน ($\Delta\epsilon = 1.0\%$)

เมื่อพิจารณากระบวนการเกิดความเสียหายล้า ซึ่งแบ่งได้ 2 ช่วง คือ ช่วงกำเนิดรอยร้าว (**crack initiation**) กับ ช่วงรอยร้าวเติบโต (**crack propagation**) ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ในสภาวะเริ่มต้น ชิ้นงานยังไม่มีรอยร้าว เมื่อชิ้นงานรับภาระล้าเป็นจำนวนรอบรอบหนึ่ง ชิ้นงานจะเกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ผิว ซึ่งจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก A_i เรียกว่า อายุการกำเนิดรอยร้าว n_i (**crack initiation life**) จากนั้นเมื่อชิ้นงานรับภาระล้าต่อไปอีก รอยร้าวจะเติบโตจนกระทั่งรอยร้าวมีขนาดเท่ากับรอยร้าววิกฤต A_c ที่สภาวะนี้กำหนดให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย จำนวนรอบหลังจากเกิดรอยร้าวขนาดเล็กจนกระทั่งเสียหาย เรียกว่า อายุการเติบโตของรอยร้าว n_p (**crack propagation life**)



รูปที่ 6.17 กระบวนการเกิดความเสียหายล้า

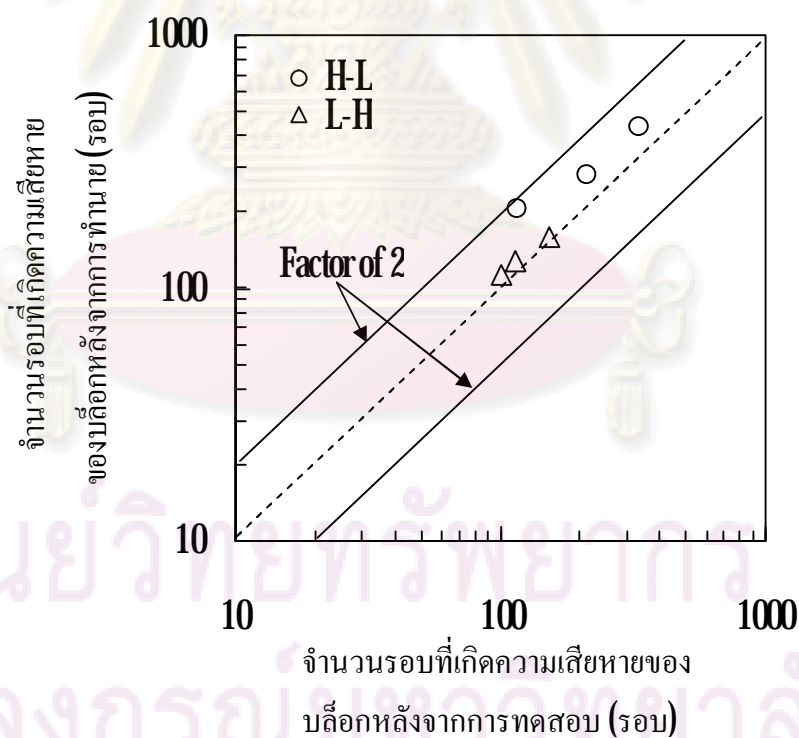


รูปที่ 6.18 ความไม่เท่ากันของอายุการกำเนิดรอยร้าว

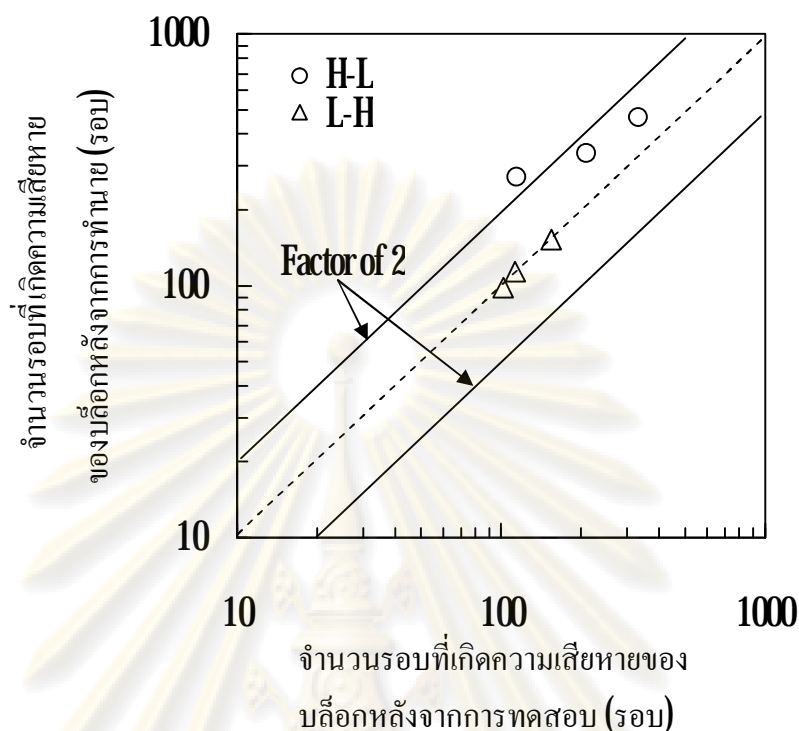
รูปที่ 6.18 แสดง schematic กระบวนการเกิดความเสียหายล้าของจุดข้อมูล A และ B แกนตั้ง คือ พื้นที่รอยร้าว และแกนนอนคือ จำนวนรอบภาระ จากรูป พบว่าที่จำนวนรอบเท่ากัน ชิ้นงาน A มี พื้นที่รอยร้าว A_A มากกว่าพื้นที่รอยร้าว A_B ของชิ้นงาน B เนื่องจากอายุการกำเนิดรอยร้าวของ ชิ้นงาน A น้อยกว่าชิ้นงาน B ($n_{iA} < n_{iB}$)

6.6 การทำนายอายุความล่า

เมื่อพล็อตกราฟจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของบล็อกหลังจากการทำนาย (แกนตั้ง) กับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของบล็อกหลังจากการทดสอบ (แกนนอน) จะได้รูปที่ 6.19 จากรูปเส้นประเอียง 45 องศา แสดงระดับความแม่นยำของผลการทำนาย กรณีที่จุดอยู่บนหรือใกล้แนวเส้นประ แสดงว่า ผลการทำนายมีความแม่นยำ เส้นที่บ่งสองเส้นที่ขนานกับเส้นประ คือ เส้นที่แสดงขอบเขตของผลการทำนายว่ามีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ นิยมบอกเป็นช่วงตัวประกอบ 2 เท่า (factor of 2) จากรูปพบว่า การทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกหลัง ด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น (สมการที่ (2.57)) มีความแม่นยำ ในช่วงตัวประกอบ 2 เท่า ขณะที่การทำนายด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น มีความแม่นยำอยู่ในช่วงตัวประกอบ 2 เท่า สำหรับการทดสอบแบบ low-high อย่างไรก็ตาม การทดสอบแบบ high-low การทำนายไม่ค่อยแม่นยำ ดังรูปที่ 6.20 สรุปว่า การทำนายอายุความล่าด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น มีความแม่นยำมากกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงเส้น



รูปที่ 6.19 ระดับความแม่นยำของการทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกหลังด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายไม่เชิงเส้น



รูปที่ 6.20 ระดับความแม่นยำของการทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกล้างด้วยแบบจำลองการสะสมความเสียหายเชิงเส้น

6.7 คุณสมบัติทางกลอื่นที่อาจใช้เป็นตัวแปรความเสียหาย

ในงานวิจัยของ Ye Duyi และ Wang Zhenlin [11] พบว่ามีการทดสอบชิ้นงานเพื่อหาคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวแปรความเสียหาย เช่น มอดูลัสของความยืดหยุ่น ความเค้นสูงสุด เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้หาคุณสมบัติทางกลอื่นที่อาจจะใช้เป็นตัวแปรความเสียหายได้ ได้แก่ ความเค้นสูงสุด ความเค้นคราก และมอดูลัสของความยืดหยุ่น สำหรับการหาความเค้นครากทำได้โดยสร้างเส้นขนานกับเส้นกราฟช่วงอีลาสติก โดยเส้นขนานมีจุดเริ่มต้นที่ความเครียดเท่ากับ 0.2% ดังนั้นความเค้นครากที่ได้คือความเค้นพิสูจน์ 0.2% (0.2% proof stress)

การหาคุณสมบัติทางกลเหล่านี้ แบ่งเป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับประเภทของชิ้นงานที่นำมาทดสอบแรงดึง คือ ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% และ 2.0% ข้อมูลที่นำมาพล็อตกราฟพิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่เกิดการแตกหักภายในบริเวณความยาวเกจ เพื่อให้เหมือนกับข้อมูลที่ใช้หาความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

ข้อมูลที่น่าเสนออยู่ในรูปแบบของกราฟ กราฟด้านซ้าย รูป (ก) เป็นการพล็อตระหว่างคุณสมบัติทางกลที่สนใจกับอัตราส่วนอายุความล้า กราฟด้านขวา รูป (ข) เป็นการพล็อตระหว่างความเสียหายที่หาค่าได้จากสมการที่ 6.2 กับอัตราส่วนอายุความล้า

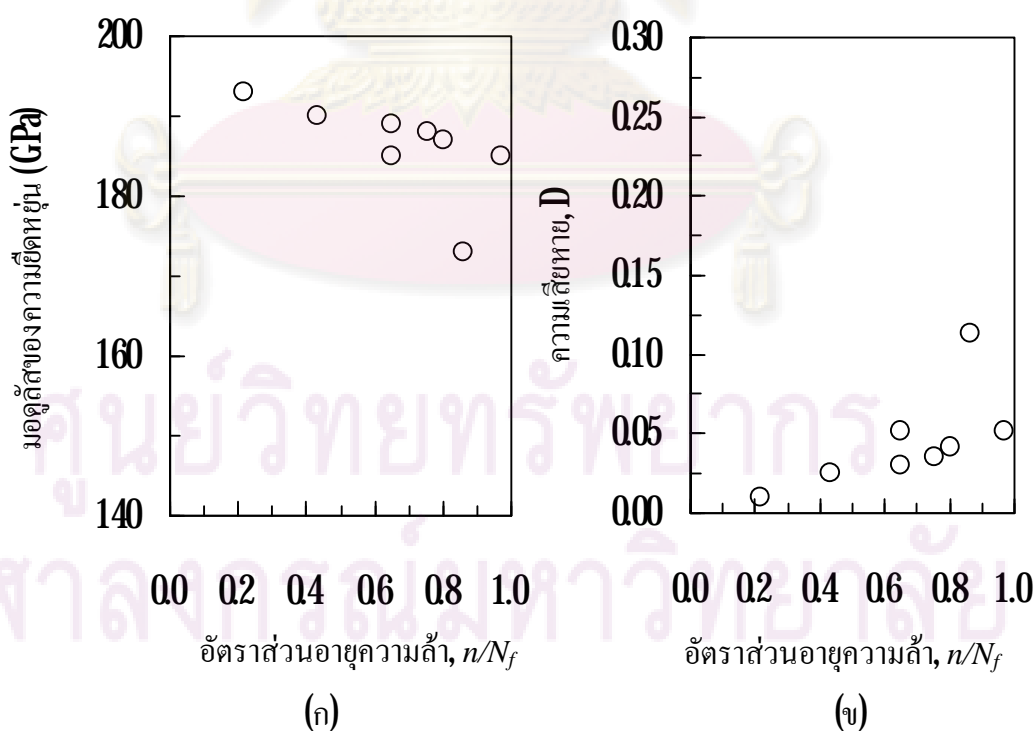
$$D = 1 - \left(\frac{X}{X_o} \right) \quad (6.2)$$

โดย X คือ คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ

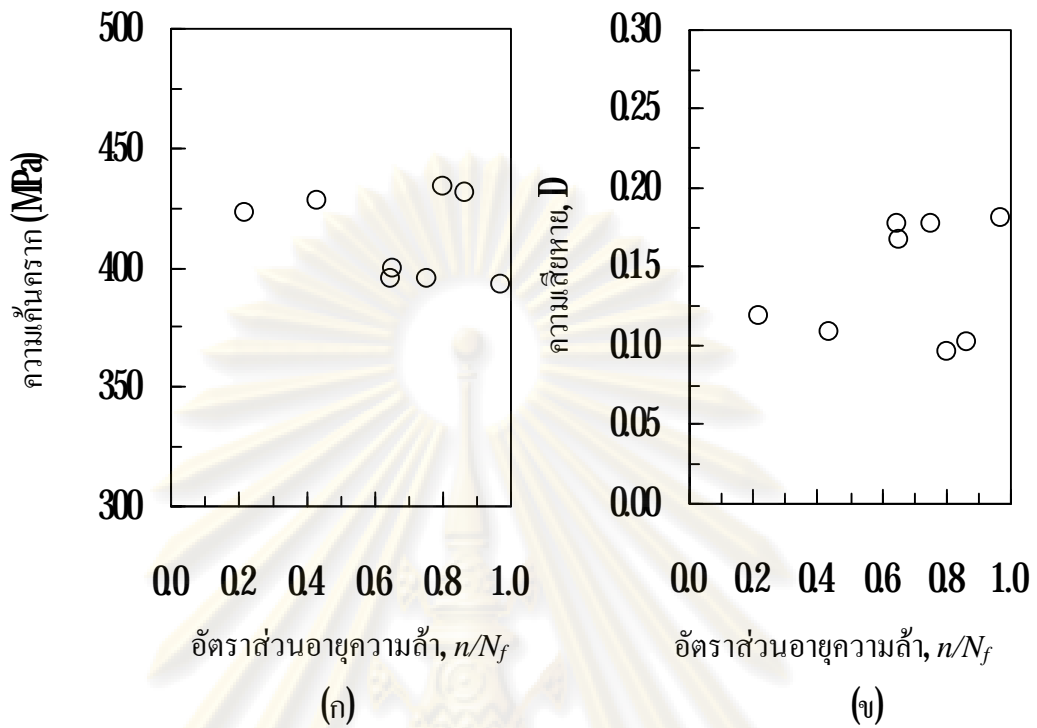
X_o คือ คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้า

6.71 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0%

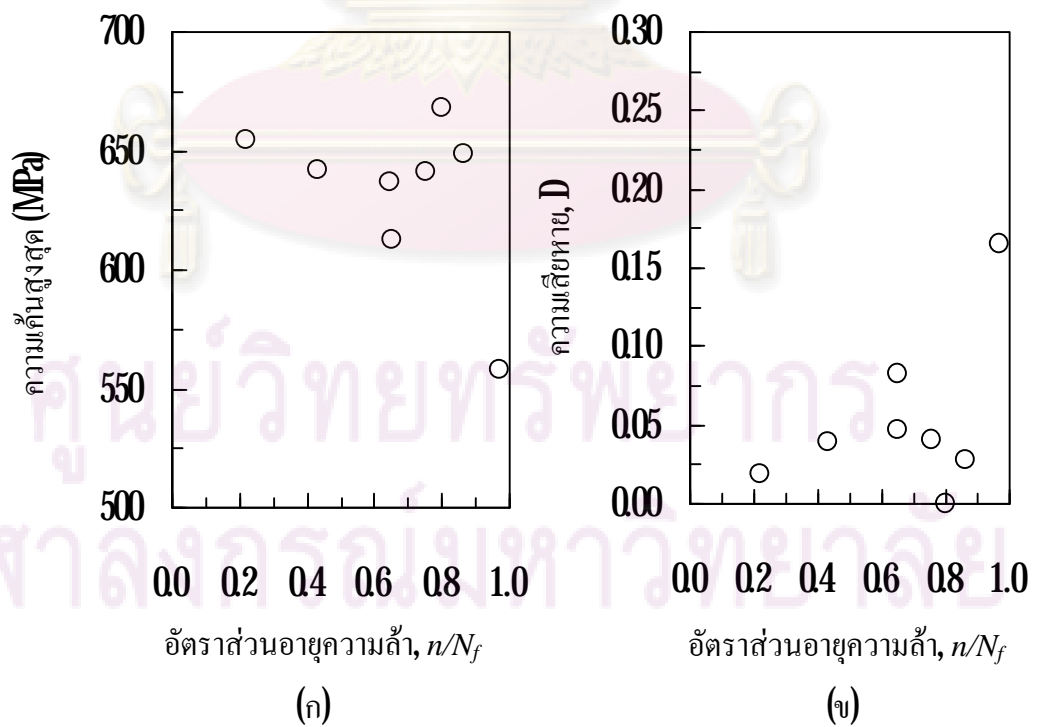
ผลการพล็อตกราฟระหว่างมอดูลัสของความยืดหยุ่นกับอัตราส่วนอายุความล้า รูป 6.21 (ก) และความเสียหายกับอัตราส่วนอายุความล้า รูปที่ 6.21 (ข) จากรูปที่ 6.21 (ก) พบว่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อรับจำนวนรอบภาระมากขึ้น ขณะที่ความเค้นสูงสุดและความเค้นครากมีการกระจายของข้อมูลมาก ดังรูปที่ 6.22 และ 6.23 ตามลำดับ สรุปว่าการทดสอบความล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% มอดูลัสของความยืดหยุ่นน่าจะใช้เป็นตัวแปรความเสียหายได้ แต่ความเค้นสูง และความเค้นครากไม่ควรใช้เป็นตัวแปรความเสียหายเนื่องจากมีการกระจายของข้อมูลมาก



รูปที่ 6.21 (ก) มอดูลัสของความยืดหยุ่น และ(ข) ความเสียหาย
ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)



รูปที่ 6.22 (ก) ความเค้นคราก และ(ข) ความเสียหาย
ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)

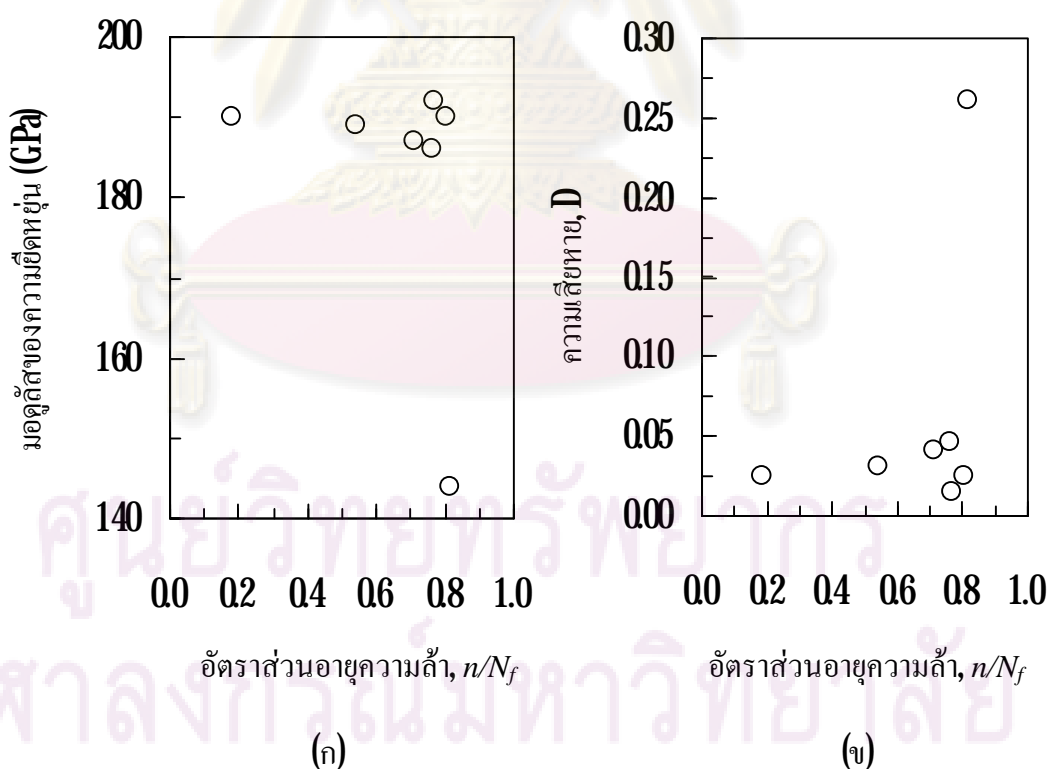


รูปที่ 6.23 (ก) ความเค้นสูงสุด และ(ข) ความเสียหาย
ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 1.0\%$)

6.7.2 ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 20%

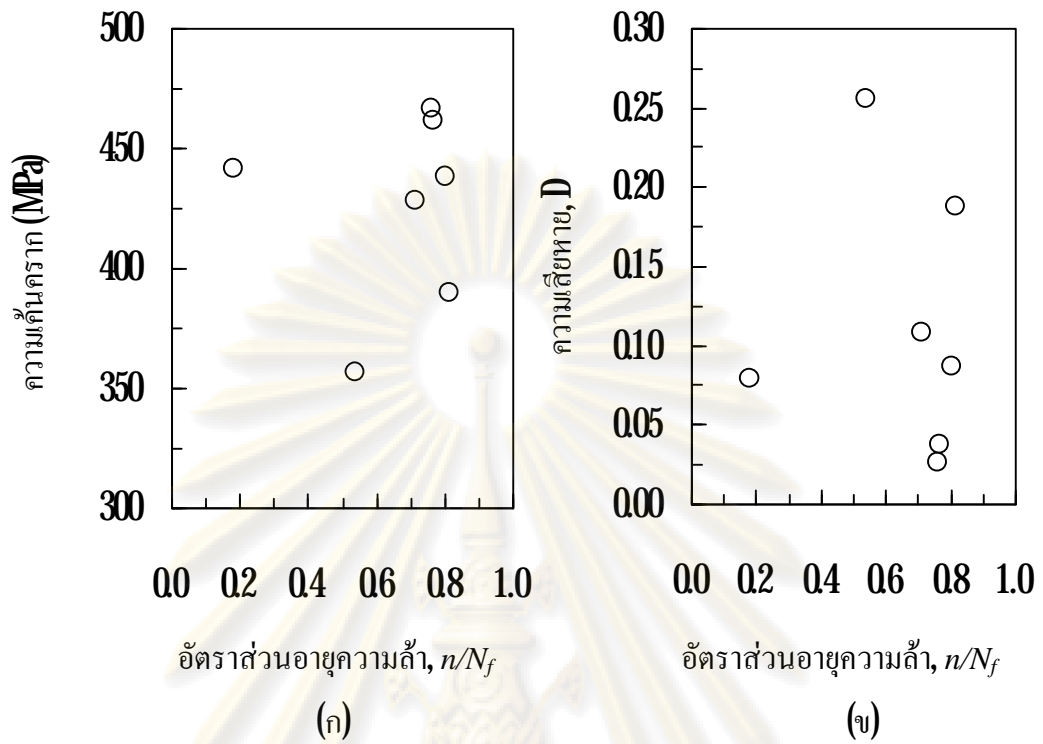
ผลการพล็อตกราฟระหว่างมอดูลัสของความยืดหยุ่นกับอัตราส่วนอายุความล้าในรูปแบบที่ 6.24 (ก) พบว่า มอดูลัสของความยืดหยุ่น ในสภาวะเริ่มต้นมีค่า 195 GPa จากนั้นมีค่าคงที่ประมาณ 190 GPa จนกระทั่งอัตราส่วนอายุความล้าเท่ากับ 0.8 และที่อัตราส่วนอายุความล้าเดียวกันนี้ มีจุดข้อมูลที่มีมอดูลัสของความยืดหยุ่นเท่ากับ 143 GPa แสดงว่า จุดข้อมูลมีการกระจาย เช่นเดียวกับความเค้นครากและความเค้นสูงสุด ก็ไม่มีสหสัมพันธ์กับอัตราส่วนอายุความล้า ดังรูปที่ 6.25 และ 6.26 ตามลำดับ ในรูปที่ 6.26 จะเห็นว่าความเสียหายมีค่าติดลบ เนื่องจากความเค้นสูงสุดที่สภาวะนี้มีค่ามากกว่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากค่าอ้างอิง สาเหตุน่าจะเกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กมาก (ผิดจากขนาดเดิมจนเห็นได้ชัด) หลังจากรับภาระล้า เมื่อนำไปดึงจนขาด แล้วคำนวณความเค้น (สมการที่ (2.62)) จึงทำให้ผลการคำนวณมีค่ามาก

สรุปว่า คุณสมบัติทางกลของการทดสอบความล้าที่พิสัยความเครียด 20% ได้แก่ มอดูลัสของความยืดหยุ่น ความเค้นครากและความเค้นสูงสุด ไม่เหมาะกับการเลือกเป็นตัวแปรความเสียหาย เนื่องจากมีการกระจายของข้อมูลค่อนข้างมาก

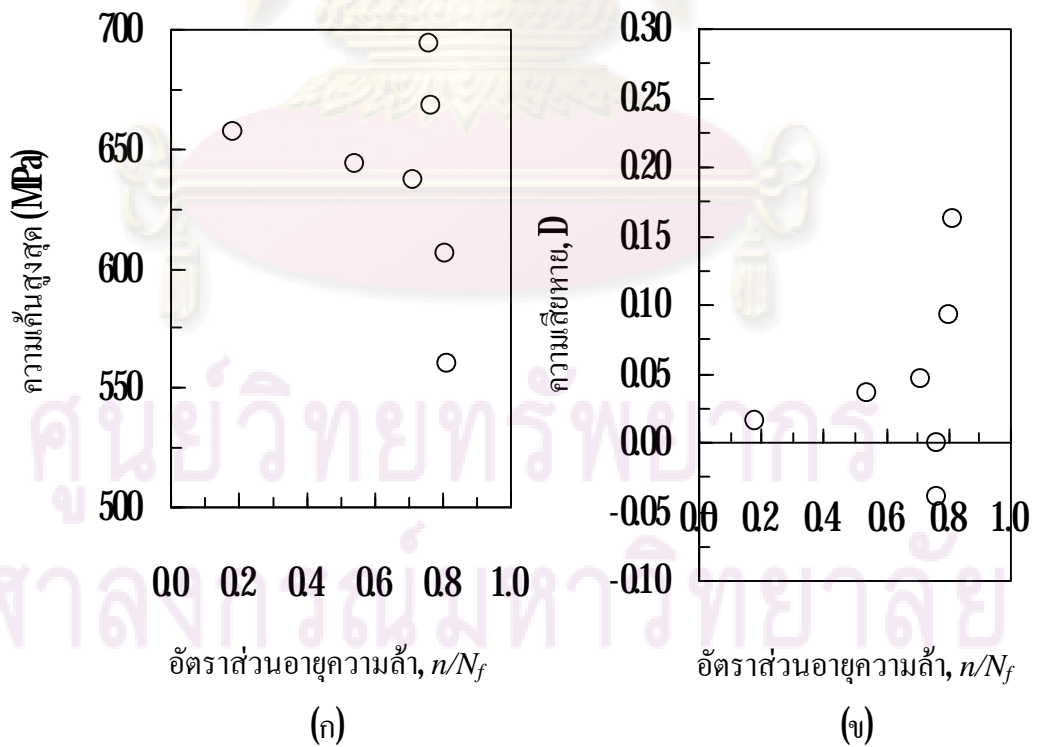


รูปที่ 6.24 (ก) มอดูลัสของความยืดหยุ่น และ (ข) ความเสียหาย

ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 20\%$)



รูปที่ 6.25 (ก) ความเค้นคราก และ(ข) ความเสียหาย
ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 2.0\%$)



รูปที่ 6.26 (ก) ความเค้นสูงสุด และ(ข) ความเสียหาย
ที่อัตราส่วนอายุความล้าต่าง ๆ ($\Delta e = 2.0\%$)

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาแบบจำลองการสะสมความเสียหายล้ารอบต่ำสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ตัวแปรความเสียหายอยู่ในรูปของการลดลงของความเหนียว การทดสอบเพื่อสร้างแบบจำลองมี 4 ประเภท คือ 1) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาวะล้าและไม่ผ่านความร้อน 2) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาวะล้าแต่ผ่านความร้อน 3) การทดสอบความล้าทำที่อุณหภูมิ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในสภาพแวดล้อมอากาศ โดยใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร มีอัตราความเครียด 10^3 ต่อวินาที และพิสัยความเครียด 0.6%, 1.0% และ 2.0% ที่พิสัยความเครียด 0.6% ทดสอบเพื่อหาอายุความล้าเท่านั้น ส่วนที่พิสัยความเครียด 1.0% และ 2.0% ทดสอบเพื่อหาอายุความล้า N_f และ 4) การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของชิ้นงานที่ผ่านภาวะล้าที่อัตราส่วนอายุความล้า n/N_f ต่าง ๆ แบบจำลองการสะสมความเสียหายที่ได้จากผลการทดสอบข้างต้นคือ

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^{1-y} \right]^{\frac{1}{1+b}} \quad (7.1)$$

โดย y เท่ากับ 0.78 และ b ที่พิสัยความเครียด 1.0% เท่ากับ 0.681 และ 2.0% เท่ากับ -0.187

เมื่อนำแบบจำลองในสมการที่ (7.1) ประยุกต์กับการทดสอบความล้าภายใต้ภาระสองระดับ พบว่า การทำนายจำนวนรอบที่เสียหายของบล็อกหลังอยู่ในช่วงตัวประกอบ 2 เท่าและแม่นยำกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงเส้น

การลดลงของความเหนียวเกิดจาก การเกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ผิวและการเติบโตของรอยร้าว การใช้ความเหนียวเป็นตัวแปรความเสียหายสามารถบ่งบอกระดับความเสียหายได้ เมื่อพื้นที่รอยร้าวมีขนาดใหญ่พอ ซึ่งพื้นที่รอยร้าวต้องมีขนาดมากกว่า 0.29 มม.² ตัวแปรความเสียหายในรูปของความเหนียวจึงจะสะท้อนว่าเกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุ

7.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ จากประสบการณ์ของผู้ทดสอบ มีคำแนะนำดังต่อไปนี้

7.2.1 การเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล และการติดตั้ง extensometer

การเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล ต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เนื่องจากถ้ากระแสมากเกินไป บริเวณรอยเชื่อมอาจจะเป็นจุดกำเนิดรอยร้าว หรือ ถ้าใช้กระแสน้อยไปรอยเชื่อมอาจจะไม่แข็งแรง ทำให้ลวดเทอร์โมคัปเปิลอาจจะหลุดระหว่างทดสอบ สิ่งที่ต้องระวังอีกอย่างคือ ความสะอาดของปลายลวดเทอร์โมคัปเปิล ต้องขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อกำจัดออกซิเดชันก่อนเชื่อมทุกครั้ง และทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดความมันหรือสิ่งสกปรก ซึ่งจะช่วยให้รอยเชื่อมแข็งแรงขึ้น

การติดตั้ง **extensometer** สิ่งที่ต้องระวัง คือ ต้องให้ปลายแท่งควอร์ตซ์ทั้งด้านบนและล่าง สัมผัสกับผิวชิ้นงานด้วยแรงที่เหมาะสม วิธีตรวจสอบก็คือ เมื่อติดตั้ง **extensometer** เรียบร้อย ให้แตะที่แท่งควอร์ตซ์ เพื่อดูว่าปลายแท่งควอร์ตซ์ขยับจากตำแหน่งที่ติดตั้งหรือไม่ ถ้าตำแหน่งปลายแท่งควอร์ตซ์ไม่เปลี่ยนแปลงว่าการติดตั้งแน่นพอ (ค่า **TD3** ไม่เปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย)

7.2.2 สภาพภูมิอากาศ

จากประสบการณ์ของผู้วิจัยพบว่าเมื่อมีฝนตกหรือลมแรงไม่ควรจะทดสอบ เนื่องจากเสี่ยงต่อปัญหาไฟฟ้าดับหรือไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนต่ำกว่าปกติ ซึ่งส่งผลต่ออุปกรณ์หรือชิ้นงานทดสอบ ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานนั้นไปวิเคราะห์ผลการทดสอบได้

7.3 งานวิจัยต่อเนื่อง

1. ทวนสอบความสามารถของแบบจำลองนี้กับผลการทดสอบความกล้าหลายแกน
2. สร้างแบบจำลองโดยใช้แนวคิดของการสูญเสียความเหนียวเป็นตัวแปรความเสียหายกับวัสดุอื่นที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม **304 310** หรือ **348** เป็นต้น
3. เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแบบทำลาย (**destructive test**) เพราะฉะนั้นข้อมูลที่ได้มาแต่ละจุดต้องใช้ชิ้นงานอย่างน้อย **1** ชิ้น เพราะฉะนั้นควรจะกำหนดตัวแปรความเสียหายใหม่ที่สามารถบ่งบอกระดับความเสียหายที่เกิดในเหล็กกล้าไร้สนิม **316** ได้ เช่น การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า หรือความเร็วเสียง เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Donald J. Wulpi. Understanding How Component Fail. Second edition. USA: Printed in the United States of America, 2001.
- [2] S.S. Manson and G.R. Halford. Fatigue and durability of structure materials. ASM International. 2006.
- [3] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2548.
- [4] V.Dattoma, S.Giancane, R.Nobile and F.W.Panella. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model. International Journal of Fatigue 28 (2006): 89-95.
- [5] A. Fatemi and L. Yangt. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. International Journal of Fatigue 20, 1 (1998): 9-34.
- [6] Jean Lemaître. A course on damage mechanics. Second edition. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [7] B. Sun, L. Yang and Y. Guo. A high-cycle fatigue accumulation model based on electrical resistance for structural steels. Fatigue & Fracture of Engineering & Materials Structure 30 (2007): 1052-1062.
- [8] Ye Duyi and Wang Zhenlin. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests. International Journal of Fatigue 23 (2001): 85-91.
- [9] Guang-xu Cheng, Jian-Zheng Zuo, Zhi-Wen Lou and Zhen-Bang Kuang. Continuum damage model of low cycle fatigue and fatigue damage analysis of welded joint. Engineering Fracture Mechanics 55, 1 (1996): 155-161.
- [10] Guangxu Cheng and Alan Plumtree. A fatigue damage accumulation model based on continuum damage mechanics and ductility exhaustion. International Journal of Fatigue 20, 7 (1998): 495-501.
- [11] Ye Duyi and Wang Zhenlin. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. International Journal of Fatigue 23 (2001): 679-687.

- [12] Y. Murakami, K.J. Miller. What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. International Journal of Fatigue 27 (2005): 991-1005.
- [13] B. wang, H. Lu, G. Tan and W. Chen. Strength of damaged polycarbonate after fatigue. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 39 (2003): 163-168.
- [14] Seong-Gu Hong, Soon-Book Lee. The tensile and low cycle fatigue behavior of cold worked 316L stainless steel: influence of dynamic strain aging. International Journal of Fatigue 26 (2004): 899-910.
- [15] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens and Henry O. Fuchs. Metal fatigue in engineering. Second edition. A Wiley-Interscience Publication, 2001.
- [16] Duyi Ye. Effect of cycle straining at elevated-temperature on static mechanical properties, microstructures and fracture behavior of nickel-based superalloy GH4145/SQ. International Journal of Fatigue 27 (2005): 1102-1114.
- [17] Julie A. Banhartine, Jess J. Comer and James L. Handrock. Fundamentals of metal fatigue analysis. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [18] Norman E. Dowling. Mechanical behavior of materials. Second edition. Prentice Hall, 1998.
- [19] Conway, R.H. stentz and J.T. Berling. Fatigue, tensile and relaxation of stainless steels. Technical Information Center. United state atomic energy commission, 1975.
- [20] F. Ellyin. Fatigue Damage Crack Growth and Life Prediction. New York: Chapman & Hall, 1997.
- [21] Jirapong Kasivitanuay. "Development and evaluation of creep-fatigue damage models for $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel in high vacuum environment," (Doctoral dissertation, Mechanical engineering, The University of Tokey, 2000)
- [22] Shimadzu serevopulser model EHF-EM100kN-20L instruction manual. Shimadzu Coporation Kyoto Japan 2004.
- [23] ASTM E606-92, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing¹. American Society for Testing and Material, 1996.
- [24] Automation Creations. Available from: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3ed757f205d141e3b03a0c1e5c26227c&ckck=1> [2008, June 20]
- [25] ASTM E8M-96. Standard Test Method for Tension Testing of Maetallic. American Society for Testing and Material, 1996.

- [26] J.L. Chaboche. Continuum damage mechanics: Present state and future trends. Nuclear Engineering and Design 105 (1987): 19-33.
- [27] S. Loveday และ B. Gibbons. Harmonisation of testing practice for high temperature materials. Printed in Great Britain by Hartnolls Ltd, 1992.
- [28] I. Korin, C. Lanainzar and J. Perez Ipina. Crack length and stable crack extension measurements from images acquired by means of a conventional flatbed scanner. Fatigue & Fracture of Engineering & Materials Structure 30 (2008): 876-884.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

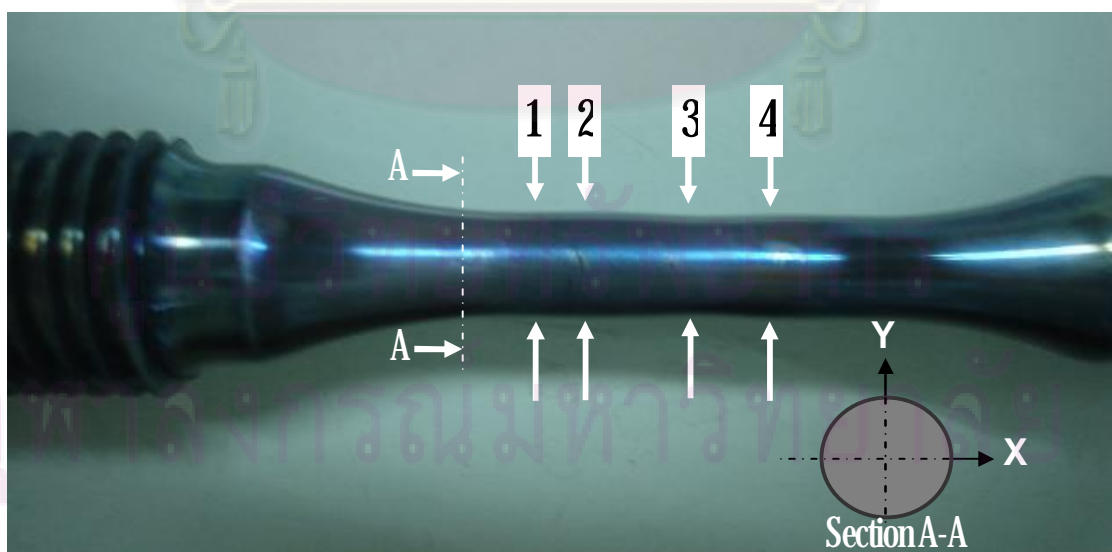
ภาคผนวก ก

ก.1 ตัวอย่างการคำนวณความเหนียวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามวิธีที่อธิบายในหัวข้อที่ 36 ตัวอย่างที่นำมาแสดงคือชิ้นงานรหัส PFBO5 ชิ้นงานนี้ผ่านภาระล้าภายใต้พิสัยความเครียดคงที่ 20% เป็นจำนวน 156 รอบ ($n/N_f = 0.76$) รูปที่ ก.1 แสดงการเลือกรูปบนความยาวเกจของชิ้นงาน PFBO5 จากรูปที่ ก.1 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านภาระล้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณความยาวเกจไม่สม่ำเสมอ การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นจะพิจารณาจากตำแหน่งที่ชิ้นงานมีโอกาสแตกหักมากที่สุด สำหรับกรณีในรูป ก.1 ได้แก่ตำแหน่งหมายเลข 1 ถึง 4 เพราะตำแหน่งที่ 1, 4 มีรอยร้าวขนาดเล็ก ตำแหน่งที่ 2 มีรอยร้าวขนาดโต และตำแหน่งที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งหมายเลข 1 ถึง 4 แสดงอยู่ในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน PFBO5 ก่อนถูกดึง

ตำแหน่ง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		
	ในทิศแกน X	ในทิศแกน Y	ค่าเฉลี่ย
1	7.82	7.82	7.82
2	7.90	7.86	7.88
3	7.60	7.60	7.60
4	8.00	7.96	7.98



รูปที่ ก.1 การเลือกรูปบนความยาวเกจของชิ้นงาน PFBO5

หลังจากทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานขนาดที่ตำแหน่งที่ 3 ดังนั้นในการคำนวณความเหนียว จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของตำแหน่งที่ 3 (7.60 มม.)

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตรงบริเวณที่ขาดดังรูปที่ 413 นั้น เริ่มจากนำชิ้นงานที่ขาด มาประกบให้รอยขาดสนิทกัน และใช้เวอร์เนียวัดตรงตำแหน่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย ที่สุด คือ 3.90 มม. ดังนั้นความเหนียว y คือ $(7.60^2 - 3.90^2) / 7.60^2$ เท่ากับ 0.737



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 ตัวอย่างการหาพื้นที่รอยร้าว

การหาพื้นที่รอยร้าว มีขั้นตอนดังนี้

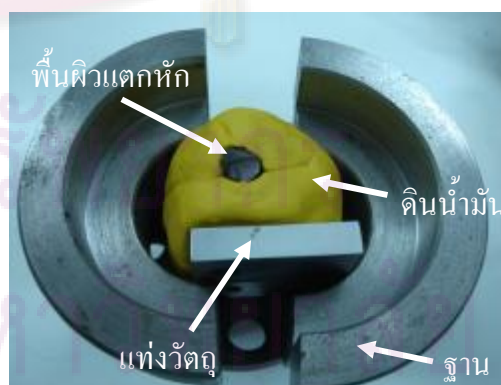
1. เลือกชิ้นงานที่ต้องการหาพื้นที่รอยร้าว
2. ติดตั้งชิ้นงานกับอุปกรณ์ช่วย (รูปที่ ก.21(ก))
3. ใช้ดินน้ำมันโอบรอบชิ้นงาน นำแท่งวัตถุที่ทราบขนาด (อุปกรณ์อ้างอิงระยะพิกัด x, y) ไปติดกับดินน้ำมัน (รูปที่ ก.21 (ข)) แล้ววางบนจอของสแกนเนอร์
4. ปรับตำแหน่งพื้นผิวแตกหักให้แนบกับจอของสแกนเนอร์
5. สแกนภาพ (ด้วยความละเอียด 4800 dpi)
6. นำภาพสแกนไปเข้าโปรแกรม **techdig** เพื่อระบุพิกัด x, y ของขอบรอยร้าว (ถ้านำไปพล็อตจะได้กราฟดังรูปที่ ก.22)
7. ลากเส้นตรงเชื่อมจุดซึ่งมีพิกัด x น้อยที่สุดและมากที่สุด เพื่อแบ่งจุดเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่อยู่เหนือเส้นแบ่ง และใต้เส้นแบ่ง
8. คำนวณพื้นที่ใต้กราฟของจุดที่อยู่เหนือเส้นแบ่ง และอยู่ใต้เส้นแบ่ง โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับพื้นที่ย่อย A_i คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$A_i = \frac{1}{2}(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (\text{ก.1})$$

9. หาผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟของจุดที่อยู่เหนือเส้นแบ่งกับที่อยู่ใต้เส้นแบ่ง ผลลัพธ์คือพื้นที่รอยร้าว



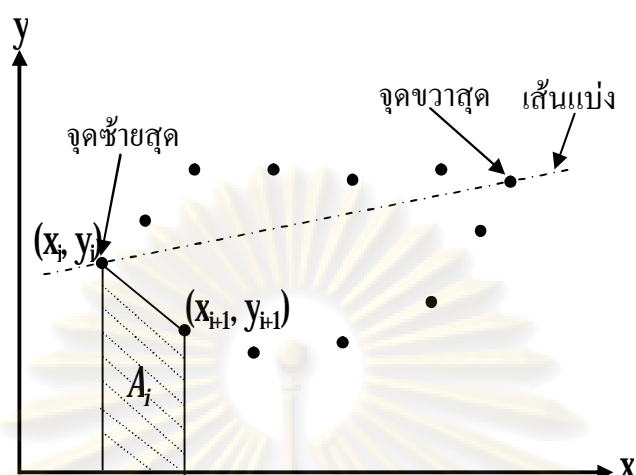
(ก)



(ข)

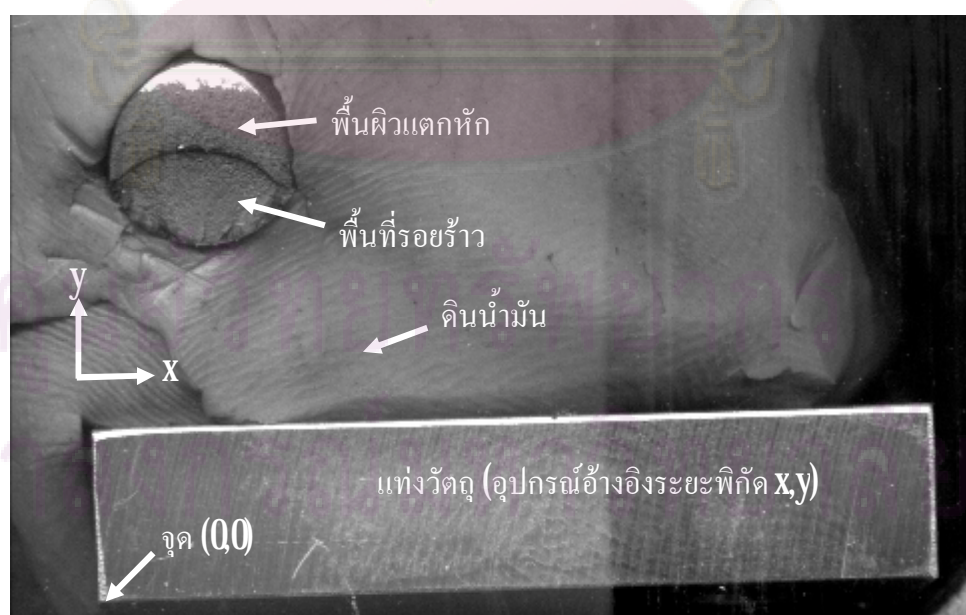
รูปที่ ก.21 การเตรียมชิ้นงานสำหรับสแกน

(ก) การติดตั้งชิ้นงานกับอุปกรณ์ช่วย (ข) ชิ้นงานที่พร้อมสแกน



รูปที่ ก.22 การหาพื้นที่รอยร้าวโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู

ถัดไปจะแสดงตัวอย่างการหาพื้นที่รอยร้าวด้วยขั้นตอนที่กล่าวมา รูปที่ ก.23 คือ ภาพสแกนของชิ้นงานรหัส PFA06 ชิ้นงานนี้ผ่านภาระล้าที่พิสัยความเครียด 1.0% จำนวน 534 รอบ พิกัดของจุดบนขอบรอยร้าวที่อยู่เหนือเส้นแบ่งและใต้เส้นแบ่งแสดงอยู่ในตารางที่ ก.21 และ ก.22 ตามลำดับ เมื่อนำจุดในตารางทั้งสองมาพล็อตจะได้กราฟดังรูปที่ ก.24 พื้นที่ใต้กราฟที่อยู่เหนือเส้นแบ่งเท่ากับ 11662 มม.² พื้นที่ใต้กราฟที่อยู่ใต้เส้นแบ่งเท่ากับ 9841 มม.² พื้นที่รอยร้าว คือ ผลต่างของพื้นที่ทั้งสองเท่ากับ 1821 มม.²



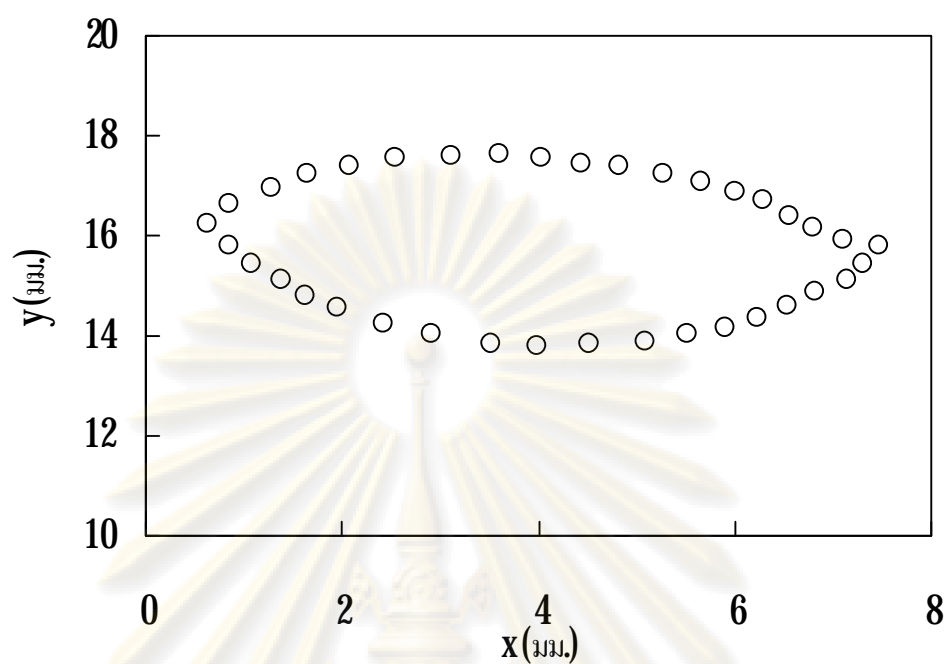
รูปที่ ก.23 ภาพสแกนพื้นที่รอยร้าวของชิ้นงานรหัส PFA06

ตารางที่ ก.21 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวที่อยู่เหนือเส้นแบ่งของชิ้นงานรหัส PFA06

ลำดับที่ i	x (มม.)	y (มม.)	ลำดับที่ i	x (มม.)	y (มม.)
1	0.64	16.26	11	4.52	13.83
2	0.86	15.80	12	5.08	13.87
3	1.08	15.46	13	5.52	14.03
4	1.38	15.14	14	5.91	14.16
5	1.63	14.81	15	6.22	14.36
6	1.95	14.57	16	6.54	14.61
7	2.43	14.23	17	6.82	14.86
8	2.91	14.03	18	7.14	15.14
9	3.52	13.85	19	7.30	15.43
10	3.98	13.82	20	7.46	15.80

ตารางที่ ก.22 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวที่อยู่ใต้เส้นแบ่งของชิ้นงานรหัส PFA06

ลำดับที่ i	x (มม.)	y (มม.)	ลำดับที่ i	x (มม.)	y (มม.)
1	0.64	16.26	11	4.82	17.40
2	0.86	16.63	12	5.28	17.25
3	1.27	16.95	13	5.66	17.09
4	1.64	17.23	14	6.01	16.90
5	2.08	17.38	15	6.29	16.71
6	2.54	17.54	16	6.56	16.42
7	3.11	17.61	17	6.81	16.18
8	3.60	17.65	18	7.11	15.91
9	4.03	17.57	19	7.46	15.80
10	4.44	17.45			



รูปที่ ก.24 เส้นทางของจุดที่อยู่บนขอบหน้ารอยร้าวหรือขอบชิ้นงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่ใช้หาอายุความล้า

ข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่ใช้หาอายุความล้า **FF06**, **FF10** และ **FF20** นำเสนอในรูปแบบของตาราง

ข.1 การทดสอบชิ้นงาน **FF06**

การทดสอบที่สภาวะนี้ แบ่งเป็น 2 ครั้ง เนื่องจากครั้งที่ 1 ระหว่างทดสอบเครื่องหยุด ณ รอบที่ 100 เพราะผู้ทดสอบตั้งคำสั่งหยุด ครั้งที่ 2 การทดสอบปกติ การนับอายุความล้าคิดจากผลรวมของจำนวนรอบที่ทดสอบสองครั้ง

ข้อมูลที่น่าเสนอประกอบด้วย 1) ข้อมูลความเค้นและความเครียดสูงสุด-ต่ำสุด ในรอบตัวอย่างที่จัดเก็บ ดังตารางที่ ข.1.1 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 47) 2) ข้อมูลความเค้นและความเครียดกับเวลา ณ รอบที่ 1,350 หรือประมาณครึ่งอายุ ดังตารางที่ ข.1.2 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 48)

ตารางที่ ข.1.1 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน **FF06**

รอบ	s (MPa)		รอบ	s (MPa)	
	สูงสุด	ต่ำสุด		สูงสุด	ต่ำสุด
1	266.6	-261.4	20	275.3	-262.9
2	275.2	-265.0	50	262.9	-265.6
3	278.3	-266.4	70	259.0	-266.9
4	280.3	-264.5	100	255.5	-263.9
5	280.4	-265.1	170	257.9	-259.3
6	281.2	-265.9	200	254.6	-255.9
7	284.2	-263.2	250	254.2	-254.2
8	282.2	-263.9	300	251.3	-253.1
9	279.8	-263.9	650	247.7	-246.9
10	280.9	-264.3	850	245.9	-246.0
11	281.8	-263.9	1,550	243.6	-242.5
12	279.9	-262.7	2,150	240.7	-243.1
13	281.1	-262.8	2,501	177.8	-224.3
14	278.6	-263.0	2,557	138.0	-217.4
15	279.9	-261.1			

ตารางที่ ข.1.2 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 1,350 ของชิ้นงาน FF06

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.00	-1.15E-04	108.1	2.16	2.10E-03	221.6	4.32	1.76E-03	68.0
0.06	-4.66E-05	113.0	2.22	2.16E-03	223.9	4.38	1.70E-03	60.7
0.12	1.85E-05	117.2	2.28	2.23E-03	225.2	4.44	1.64E-03	53.2
0.18	7.25E-05	121.2	2.34	2.30E-03	226.3	4.50	1.58E-03	45.7
0.24	1.33E-04	126.0	2.40	2.35E-03	228.0	4.56	1.52E-03	38.3
0.30	1.97E-04	130.0	2.46	2.40E-03	230.1	4.62	1.46E-03	31.3
0.36	2.57E-04	134.1	2.52	2.47E-03	232.1	4.68	1.40E-03	24.6
0.42	3.15E-04	137.7	2.58	2.54E-03	233.2	4.74	1.35E-03	17.6
0.48	3.73E-04	142.6	2.64	2.60E-03	234.4	4.80	1.29E-03	9.6
0.54	4.31E-04	147.3	2.70	2.66E-03	236.1	4.86	1.23E-03	2.1
0.60	4.96E-04	151.7	2.76	2.72E-03	237.6	4.92	1.17E-03	-4.8
0.66	5.59E-04	155.5	2.82	2.78E-03	239.1	4.98	1.11E-03	-11.6
0.72	6.24E-04	159.1	2.88	2.85E-03	240.2	5.04	1.05E-03	-18.8
0.78	6.84E-04	161.9	2.94	2.90E-03	241.4	5.10	9.89E-04	-25.7
0.84	7.40E-04	165.5	3.00	2.96E-03	242.7	5.16	9.30E-04	-32.1
0.90	8.07E-04	169.3	3.06	2.99E-03	238.7	5.22	8.72E-04	-37.9
0.96	8.67E-04	172.3	3.12	2.94E-03	228.6	5.28	8.15E-04	-44.0
1.02	9.30E-04	175.6	3.18	2.88E-03	219.3	5.34	7.58E-04	-50.3
1.08	9.88E-04	178.9	3.24	2.82E-03	210.3	5.40	6.98E-04	-56.7
1.14	1.05E-03	181.7	3.30	2.76E-03	201.9	5.46	6.33E-04	-62.8
1.20	1.12E-03	184.7	3.36	2.70E-03	193.7	5.52	5.75E-04	-68.8
1.26	1.18E-03	187.0	3.42	2.64E-03	185.6	5.58	5.15E-04	-74.7
1.32	1.24E-03	189.9	3.48	2.59E-03	177.9	5.64	4.50E-04	-79.6
1.38	1.29E-03	193.3	3.54	2.53E-03	170.0	5.70	3.87E-04	-83.8
1.44	1.36E-03	195.9	3.60	2.47E-03	162.0	5.76	3.34E-04	-88.2
1.50	1.42E-03	198.3	3.66	2.41E-03	155.1	5.82	2.81E-04	-94.2
1.56	1.48E-03	200.4	3.72	2.35E-03	147.9	5.88	2.23E-04	-100.8
1.62	1.54E-03	202.6	3.78	2.29E-03	140.2	5.94	1.58E-04	-106.8
1.68	1.60E-03	205.6	3.84	2.23E-03	131.9	6.00	9.46E-05	-111.8
1.74	1.67E-03	207.6	3.90	2.17E-03	124.2	6.06	3.27E-05	-116.1
1.80	1.73E-03	209.2	3.96	2.12E-03	116.6	6.12	-2.53E-05	-120.7
1.86	1.79E-03	211.4	4.02	2.05E-03	109.1	6.18	-8.97E-05	-124.9
1.92	1.85E-03	214.2	4.08	2.00E-03	101.5	6.24	-1.46E-04	-129.3
1.98	1.92E-03	216.0	4.14	1.94E-03	92.8	6.30	-2.06E-04	-133.7
2.04	1.98E-03	217.2	4.20	1.88E-03	83.7	6.36	-2.70E-04	-137.9
2.10	2.04E-03	219.3	4.26	1.82E-03	75.4	6.42	-3.25E-04	-142.1

ตาราง ข.1.2(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
6.48	-3.83E-04	-147.0	8.34	-2.29E-03	-229.9	10.20	-1.91E-03	-89.0
6.54	-4.47E-04	-151.6	8.40	-2.35E-03	-231.5	10.26	-1.85E-03	-81.8
6.60	-5.13E-04	-155.3	8.46	-2.41E-03	-233.1	10.32	-1.79E-03	-74.5
6.66	-5.73E-04	-158.6	8.52	-2.48E-03	-234.6	10.38	-1.73E-03	-67.2
6.72	-6.34E-04	-162.0	8.58	-2.54E-03	-235.7	10.44	-1.68E-03	-59.6
6.78	-6.92E-04	-165.6	8.64	-2.60E-03	-237.1	10.50	-1.62E-03	-51.6
6.84	-7.53E-04	-169.3	8.70	-2.66E-03	-238.7	10.56	-1.56E-03	-43.6
6.90	-8.16E-04	-172.7	8.76	-2.72E-03	-240.0	10.62	-1.50E-03	-36.0
6.96	-8.76E-04	-175.7	8.82	-2.79E-03	-241.1	10.68	-1.43E-03	-28.8
7.02	-9.37E-04	-178.9	8.88	-2.85E-03	-242.2	10.74	-1.38E-03	-21.6
7.08	-1.00E-03	-182.0	8.94	-2.90E-03	-243.5	10.80	-1.31E-03	-14.5
7.14	-1.06E-03	-184.7	9.00	-2.96E-03	-244.9	10.86	-1.25E-03	-7.9
7.20	-1.12E-03	-187.6	9.06	-3.00E-03	-241.4	10.92	-1.19E-03	-1.4
7.26	-1.18E-03	-190.7	9.12	-2.94E-03	-232.1	10.98	-1.13E-03	4.9
7.32	-1.24E-03	-193.6	9.18	-2.88E-03	-222.8	11.04	-1.07E-03	11.1
7.38	-1.30E-03	-196.0	9.24	-2.82E-03	-214.2	11.10	-1.01E-03	17.8
7.44	-1.36E-03	-199.0	9.30	-2.77E-03	-206.6	11.16	-9.53E-04	24.3
7.50	-1.42E-03	-202.1	9.36	-2.71E-03	-198.5	11.22	-8.96E-04	30.7
7.56	-1.49E-03	-204.5	9.42	-2.66E-03	-190.6	11.28	-8.34E-04	37.2
7.62	-1.55E-03	-206.2	9.48	-2.60E-03	-182.4	11.34	-7.77E-04	43.5
7.68	-1.61E-03	-208.5	9.54	-2.54E-03	-174.3	11.40	-7.18E-04	49.9
7.74	-1.67E-03	-210.9	9.60	-2.49E-03	-166.3	11.46	-6.57E-04	56.4
7.80	-1.74E-03	-213.2	9.66	-2.43E-03	-158.7	11.52	-5.94E-04	62.2
7.86	-1.79E-03	-215.1	9.72	-2.37E-03	-150.7	11.58	-5.35E-04	68.1
7.92	-1.86E-03	-217.6	9.78	-2.31E-03	-143.1	11.64	-4.74E-04	73.7
7.98	-1.92E-03	-219.5	9.84	-2.26E-03	-135.5	11.70	-4.15E-04	79.4
8.04	-1.98E-03	-221.4	9.90	-2.20E-03	-127.9	11.76	-3.53E-04	84.9
8.10	-2.04E-03	-223.2	9.96	-2.14E-03	-120.0	11.82	-2.94E-04	90.4
8.16	-2.10E-03	-224.9	10.02	-2.09E-03	-111.9	11.88	-2.37E-04	95.9
8.22	-2.17E-03	-226.5	10.08	-2.03E-03	-104.1	11.94	-1.73E-04	101.5
8.28	-2.23E-03	-228.2	10.14	-1.97E-03	-96.5	12.00	-1.12E-04	106.3

ข.2 การทดสอบชิ้นงาน FF10

ข้อมูลการทดสอบความล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% ประกอบด้วย 1) ข้อมูลความเค้นและความเครียดสูงสุด-ต่ำสุด ในรอบตัวอย่างที่จัดเก็บ ดังตารางที่ ข.21 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 47) 2) ข้อมูลความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 370 หรือประมาณครึ่งอายุ ดังตารางที่ ข.22 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 48)

ตารางที่ ข.21 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน FF10

รอบ	s (MPa)		รอบ	s (MPa)	
	สูงสุด	ต่ำสุด		สูงสุด	ต่ำสุด
1	295.4	-301.1	50	287.1	-286.6
2	310.3	-308.3	70	284.9	-282.7
3	313.0	-310.4	100	281.7	-281.3
4	314.3	-308.2	150	279.7	-279.1
5	313.3	-307.4	170	278.4	-278.5
6	313.1	-307.8	200	277.8	-277.9
7	311.5	-305.7	270	278.1	-278.1
8	311.5	-305.8	300	276.4	-277.7
9	308.6	-305.0	350	275.3	-277.6
10	307.9	-302.6	400	275.2	-277.4
11	306.9	-301.3	450	274.1	-276.6
12	305.0	-301.3	500	274.3	-276.4
13	304.3	-300.7	550	273.7	-275.9
14	302.5	-299.7	600	272.6	-274.9
15	302.4	-299.0	650	268.1	-271.1
20	298.0	-295.9	680	258.6	-265.1
30	293.4	-290.5	700	238.9	-258.9

ตารางที่ ข.22 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 370 ของชิ้นงาน FF10

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	0.00E+00	189.0	36	1.78E-01	258.9	72	3.56E-01	2.2
0.1	4.94E-03	192.2	37	1.83E-01	260.1	73	3.61E-01	-8.8
0.2	9.88E-03	195.5	38	1.88E-01	261.2	74	3.66E-01	-18.7
0.3	1.48E-02	199.6	39	1.93E-01	261.1	75	3.71E-01	-29.2
0.4	1.98E-02	203.2	40	1.98E-01	262.9	76	3.75E-01	-38.8
0.5	2.47E-02	205.1	41	2.03E-01	263.8	77	3.80E-01	-49.8
0.6	2.96E-02	208.4	42	2.08E-01	263.6	78	3.85E-01	-58.8
0.7	3.46E-02	211.0	43	2.12E-01	265.1	79	3.90E-01	-67.7
0.8	3.95E-02	213.4	44	2.17E-01	266.4	80	3.95E-01	-76.7
0.9	4.45E-02	215.8	45	2.22E-01	266.3	81	4.00E-01	-85.3
1.0	4.94E-02	218.8	46	2.27E-01	267.9	82	4.05E-01	-93.6
1.1	5.43E-02	221.9	47	2.32E-01	267.9	83	4.10E-01	-101.5
1.2	5.93E-02	222.9	48	2.37E-01	267.9	84	4.15E-01	-110.1
1.3	6.42E-02	225.4	49	2.42E-01	269.2	85	4.20E-01	-117.5
1.4	6.92E-02	227.2	50	2.47E-01	269.8	86	4.25E-01	-124.8
1.5	7.41E-02	229.1	51	2.52E-01	256.5	87	4.30E-01	-131.9
1.6	7.91E-02	231.1	52	2.57E-01	241.4	88	4.35E-01	-137.3
1.7	8.40E-02	233.0	53	2.62E-01	227.1	89	4.40E-01	-143.3
1.8	8.89E-02	235.3	54	2.67E-01	213.5	90	4.45E-01	-150.5
1.9	9.39E-02	236.7	55	2.72E-01	200.8	91	4.50E-01	-155.0
2.0	9.88E-02	238.4	56	2.77E-01	188.3	92	4.55E-01	-160.2
2.1	1.04E-01	239.8	57	2.82E-01	175.8	93	4.59E-01	-165.0
2.2	1.09E-01	241.3	58	2.87E-01	162.8	94	4.64E-01	-170.6
2.3	1.14E-01	243.2	59	2.92E-01	150.5	95	4.69E-01	-174.4
2.4	1.19E-01	244.6	60	2.96E-01	138.1	96	4.74E-01	-179.5
2.5	1.24E-01	246.2	61	3.01E-01	126.2	97	4.79E-01	-183.9
2.6	1.28E-01	247.5	62	3.06E-01	114.0	98	4.84E-01	-187.7
2.7	1.33E-01	248.5	63	3.11E-01	102.3	99	4.89E-01	-192.3
2.8	1.38E-01	249.4	64	3.16E-01	91.1	100	4.94E-01	-195.1
2.9	1.43E-01	251.2	65	3.21E-01	80.0	101	4.99E-01	-198.5
3.0	1.48E-01	252.6	66	3.26E-01	69.2	102	5.04E-01	-202.7
3.1	1.53E-01	253.3	67	3.31E-01	56.9	103	5.09E-01	-205.3
3.2	1.58E-01	254.8	68	3.36E-01	44.6	104	5.14E-01	-209.0
3.3	1.63E-01	255.7	69	3.41E-01	33.8	105	5.19E-01	-212.1
3.4	1.68E-01	256.9	70	3.46E-01	23.2	106	5.24E-01	-214.8
3.5	1.73E-01	258.0	71	3.51E-01	13.2	107	5.29E-01	-217.6

ตารางที่ ข.22(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
108	5.34E-01	-219.7	139	6.87E-01	-265.4	170	8.40E-01	-26.8
109	5.39E-01	-222.0	140	6.92E-01	-266.2	171	8.45E-01	-15.4
11.0	5.43E-01	-224.7	141	6.97E-01	-265.6	172	8.50E-01	-4.0
11.1	5.48E-01	-227.2	142	7.02E-01	-266.8	173	8.55E-01	6.3
11.2	5.53E-01	-229.4	143	7.07E-01	-268.0	174	8.60E-01	17.3
11.3	5.58E-01	-231.5	144	7.11E-01	-268.7	175	8.65E-01	27.8
11.4	5.63E-01	-233.3	145	7.16E-01	-269.4	176	8.70E-01	37.5
11.5	5.68E-01	-235.1	146	7.21E-01	-269.6	177	8.75E-01	46.8
11.6	5.73E-01	-237.0	147	7.26E-01	-270.0	178	8.79E-01	56.2
11.7	5.78E-01	-239.0	148	7.31E-01	-270.8	179	8.84E-01	65.7
11.8	5.83E-01	-240.6	149	7.36E-01	-271.7	180	8.89E-01	74.9
11.9	5.88E-01	-242.1	150	7.41E-01	-272.0	181	8.94E-01	83.4
120	5.93E-01	-244.1	151	7.46E-01	-259.5	182	8.99E-01	91.4
121	5.98E-01	-246.3	152	7.51E-01	-246.5	183	9.04E-01	99.1
122	6.03E-01	-247.8	153	7.56E-01	-235.0	184	9.09E-01	106.8
123	6.08E-01	-248.9	154	7.61E-01	-223.2	185	9.14E-01	114.0
124	6.13E-01	-249.7	155	7.66E-01	-211.1	186	9.19E-01	120.8
125	6.18E-01	-251.5	156	7.71E-01	-196.4	187	9.24E-01	127.3
126	6.23E-01	-252.3	157	7.76E-01	-184.0	188	9.29E-01	134.1
127	6.27E-01	-253.3	158	7.81E-01	-173.7	189	9.34E-01	140.5
128	6.32E-01	-255.4	159	7.86E-01	-164.1	190	9.39E-01	145.2
129	6.37E-01	-256.8	160	7.91E-01	-151.9	191	9.44E-01	150.7
130	6.42E-01	-256.0	161	7.95E-01	-138.7	192	9.49E-01	155.6
131	6.47E-01	-258.0	162	8.00E-01	-125.4	193	9.54E-01	160.7
132	6.52E-01	-259.4	163	8.05E-01	-113.0	194	9.58E-01	165.4
133	6.57E-01	-260.2	164	8.10E-01	-100.4	195	9.63E-01	170.4
134	6.62E-01	-260.7	165	8.15E-01	-88.1	196	9.68E-01	174.8
135	6.67E-01	-262.8	166	8.20E-01	-75.9	197	9.73E-01	179.0
136	6.72E-01	-262.5	167	8.25E-01	-64.0	198	9.78E-01	182.3
137	6.77E-01	-263.1	168	8.30E-01	-51.2	199	9.83E-01	186.1
138	6.82E-01	-264.6	169	8.35E-01	-38.6	200	9.88E-01	190.1

ข.3 การทดสอบชิ้นงาน FF20

ข้อมูลการทดสอบความล้าที่พิสัยความเครียดคงที่ 20% ประกอบด้วย 1) ข้อมูลความเค้นและความเครียดสูงสุด-ต่ำสุด ในรอบตัวอย่างที่จัดเก็บ ดังตารางที่ ข.31 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 47) 2) ข้อมูลความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 99 หรือประมาณครึ่งอายุ ดังตารางที่ ข.32 (ผลการพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 48)

ตารางที่ ข.31 ความเค้นสูงสุด-ต่ำสุด ของชิ้นงาน FF20

รอบ	s (MPa)		รอบ	s (MPa)	
	สูงสุด	ต่ำสุด		สูงสุด	ต่ำสุด
1	323.3	-339.2	129	311.9	-317.2
2	345.7	-347.6	140	310.1	-314.3
5	340.8	-341.6	155	309.6	-314.0
7	338.4	-343.3	160	309.0	-316.0
10	337.0	-340.3	161	309.5	-316.6
20	326.6	-329.9	180	307.8	-315.1
30	318.8	-322.0	190	307.8	-310.5
40	317.7	-323.9	195	307.0	-310.5
50	315.1	-324.4	199	302.9	-306.7
60	313.7	-322.1	200	305.0	-307.8
70	314.6	-323.5	205	297.7	-302.2
100	317.2	-324.3	211	266.7	-282.7
120	313.4	-313.9	213	233.6	-264.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.32 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ที่รอบภาระ 99 ของชิ้นงาน FF20

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	-4.19E-05	272.2	7.2	7.17E-03	309.4	144	5.69E-03	-156.1
0.2	1.53E-04	277.1	7.4	7.41E-03	310.3	146	5.49E-03	-167.7
0.4	3.50E-04	276.5	7.6	7.57E-03	310.8	148	5.31E-03	-175.4
0.6	5.55E-04	277.5	7.8	7.77E-03	310.3	15.0	5.09E-03	-184.9
0.8	7.62E-04	278.7	8.0	7.97E-03	310.7	15.2	4.91E-03	-192.6
1.0	9.59E-04	281.1	8.2	8.17E-03	311.9	15.4	4.69E-03	-201.4
1.2	1.16E-03	282.0	8.4	8.37E-03	312.3	15.6	4.49E-03	-208.4
1.4	1.36E-03	284.1	8.6	8.57E-03	312.9	15.8	4.29E-03	-214.7
1.6	1.53E-03	271.0	8.8	8.73E-03	311.0	16.0	4.09E-03	-221.3
1.8	1.76E-03	287.7	9.0	8.96E-03	311.7	16.2	3.89E-03	-226.3
2.0	1.96E-03	287.5	9.2	9.17E-03	313.6	16.4	3.69E-03	-231.9
2.2	2.16E-03	289.0	9.4	9.37E-03	314.5	16.6	3.48E-03	-235.7
2.4	2.33E-03	291.3	9.6	9.57E-03	314.8	16.8	3.28E-03	-240.0
2.6	2.55E-03	291.1	9.8	9.78E-03	314.9	17.0	3.08E-03	-244.1
2.8	2.76E-03	291.3	10.0	9.97E-03	314.9	17.2	2.88E-03	-247.1
3.0	2.96E-03	293.4	10.2	9.83E-03	286.2	17.4	2.68E-03	-250.6
3.2	3.16E-03	294.5	10.4	9.64E-03	260.4	17.6	2.48E-03	-253.5
3.4	3.36E-03	295.3	10.6	9.45E-03	234.3	17.8	2.27E-03	-257.8
3.6	3.56E-03	296.0	10.8	9.24E-03	206.7	18.0	2.08E-03	-259.0
3.8	3.83E-03	300.4	11.0	9.06E-03	178.7	18.2	1.88E-03	-261.2
4.0	3.95E-03	294.6	11.2	8.87E-03	154.4	18.4	1.68E-03	-264.3
4.2	4.16E-03	298.7	11.4	8.66E-03	129.0	18.6	1.51E-03	-272.2
4.4	4.36E-03	299.5	11.6	8.48E-03	108.7	18.8	1.27E-03	-266.2
4.6	4.57E-03	300.3	11.8	8.27E-03	84.0	19.0	1.06E-03	-269.7
4.8	4.77E-03	301.0	12.0	8.08E-03	59.5	19.2	6.46E-04	-273.5
5.0	4.97E-03	302.4	12.2	7.89E-03	37.3	19.4	6.64E-04	-266.0
5.2	5.18E-03	302.7	12.4	7.68E-03	12.7	19.6	4.59E-04	-275.8
5.4	5.37E-03	303.7	12.6	7.50E-03	-5.6	19.8	2.53E-04	-278.2
5.6	5.57E-03	304.0	12.8	7.28E-03	-29.2	20.0	5.58E-05	-280.3
5.8	5.77E-03	305.0	13.0	7.11E-03	-46.0	20.2	-1.08E-04	-272.0
6.0	5.97E-03	301.4	13.2	6.89E-03	-68.9	20.4	-3.40E-04	-282.0
6.2	6.17E-03	306.7	13.4	6.71E-03	-84.6	20.6	-5.55E-04	-284.8
6.4	6.37E-03	306.8	13.6	6.49E-03	-102.9	20.8	-7.49E-04	-285.9
6.6	6.57E-03	308.2	13.8	6.30E-03	-117.1	21.0	-9.50E-04	-287.6
6.8	6.77E-03	308.3	14.0	6.11E-03	-129.7	21.2	-1.16E-03	-288.6
7.0	6.97E-03	308.6	14.2	5.90E-03	-143.2	21.4	-1.35E-03	-290.5

ตารางที่ ข.32(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
21.6	-1.55E-03	-290.9	27.8	-7.76E-03	-295.9	34.0	-6.09E-03	71.5
21.8	-1.76E-03	-292.5	28.0	-7.96E-03	-308.4	34.2	-5.88E-03	85.9
22.0	-1.96E-03	-289.5	28.2	-8.17E-03	-312.4	34.4	-5.70E-03	97.1
22.2	-2.26E-03	-297.2	28.4	-8.37E-03	-312.6	34.6	-5.50E-03	108.1
22.4	-2.34E-03	-288.2	28.6	-8.57E-03	-312.7	34.8	-5.29E-03	119.2
22.6	-2.55E-03	-297.4	28.8	-8.76E-03	-313.3	35.0	-5.09E-03	129.5
22.8	-2.76E-03	-297.4	29.0	-8.97E-03	-313.6	35.2	-4.89E-03	138.6
23.0	-2.95E-03	-276.4	29.2	-9.17E-03	-314.5	35.4	-4.69E-03	148.3
23.2	-3.14E-03	-296.1	29.4	-9.37E-03	-314.4	35.6	-4.49E-03	157.5
23.4	-3.37E-03	-299.2	29.6	-9.57E-03	-314.6	35.8	-4.28E-03	166.1
23.6	-3.57E-03	-300.8	29.8	-9.77E-03	-315.5	36.0	-4.08E-03	175.0
23.8	-3.77E-03	-300.9	30.0	-9.97E-03	-315.2	36.2	-3.91E-03	178.8
24.0	-3.97E-03	-301.9	30.2	-9.84E-03	-292.3	36.4	-3.70E-03	185.5
24.2	-4.22E-03	-297.4	30.4	-9.65E-03	-269.2	36.6	-3.48E-03	192.7
24.4	-4.35E-03	-301.5	30.6	-9.46E-03	-246.8	36.8	-3.28E-03	199.1
24.6	-4.56E-03	-304.5	30.8	-9.28E-03	-227.1	37.0	-3.07E-03	204.4
24.8	-4.77E-03	-304.1	31.0	-9.05E-03	-201.3	37.2	-2.88E-03	209.8
25.0	-4.97E-03	-305.3	31.2	-8.88E-03	-184.2	37.4	-2.68E-03	215.0
25.2	-5.08E-03	-304.8	31.4	-8.66E-03	-160.7	37.6	-2.47E-03	219.5
25.4	-5.36E-03	-287.4	31.6	-8.49E-03	-143.4	37.8	-2.28E-03	224.1
25.6	-5.56E-03	-303.2	31.8	-8.27E-03	-120.2	38.0	-2.04E-03	229.3
25.8	-5.77E-03	-307.0	32.0	-8.10E-03	-104.1	38.2	-1.88E-03	232.8
26.0	-5.97E-03	-307.9	32.2	-7.88E-03	-80.6	38.4	-1.67E-03	234.8
26.2	-6.15E-03	-311.3	32.4	-7.68E-03	-59.8	38.6	-1.45E-03	241.7
26.4	-6.36E-03	-305.9	32.6	-7.49E-03	-43.8	38.8	-1.28E-03	243.3
26.6	-6.57E-03	-309.0	32.8	-7.28E-03	-23.8	39.0	-1.07E-03	247.8
26.8	-6.77E-03	-309.1	33.0	-7.11E-03	-7.9	39.2	-8.65E-04	250.5
27.0	-6.97E-03	-310.1	33.2	-6.88E-03	11.2	39.4	-6.81E-04	253.0
27.2	-7.17E-03	-310.3	33.4	-6.71E-03	23.7	39.6	-4.42E-04	255.3
27.4	-7.27E-03	-311.2	33.6	-6.50E-03	40.0	39.8	-2.79E-04	258.9
27.6	-7.58E-03	-278.8	33.8	-6.30E-03	56.0	40.0	-5.87E-05	260.7

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดสอบแรงดึง

ข้อมูลการทดสอบแรงดึง แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ข้อมูลของ 1) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าและไม่ผ่านความร้อน (T01-T03) จะแสดงในตารางที่ ค.1.1 ถึง ค.1.3 2) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าแต่ผ่านความร้อน (T04-T06) จะแสดงในตารางที่ ค.21 ถึง ค.23 และ 3) ชิ้นงานที่ผ่านภาระล้าเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ (PFA01 ถึง PFA08 และ PFB01 ถึง PFB07) จะแสดงในตารางที่ ค.31.1 ถึง ค.31.8 และในตารางที่ ค.321 ถึง ค.327 ตามลำดับ

ค.1 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระล้าและไม่ผ่านการให้ความร้อน

ตาราง ค.1.1 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T01

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0	3.50E-05	44	21	3.49E-02	587.4	41	6.77E-02	621.2
1	4.50E-05	45	22	3.60E-02	588.8	42	7.03E-02	621.5
2	3.20E-04	54.5	23	3.86E-02	599.6	43	7.12E-02	608.3
3	2.20E-03	333.7	24	4.00E-02	592.2	44	7.28E-02	623.2
4	3.63E-03	438.2	24	4.00E-02	592.2	45	7.50E-02	623.9
5	5.59E-03	514.4	25	4.12E-02	593.8	46	7.71E-02	624.3
6	7.59E-03	547.7	26	4.24E-02	595.0	47	7.75E-02	604.0
7	1.07E-02	557.1	27	4.47E-02	605.5	48	7.92E-02	625.7
8	1.19E-02	559.6	28	4.66E-02	598.2	49	8.10E-02	626.4
9	1.40E-02	572.3	29	4.78E-02	599.6	50	8.28E-02	627.2
10	1.63E-02	568.1	30	4.89E-02	600.8	51	8.46E-02	628.1
11	1.78E-02	570.3	31	5.18E-02	609.2	52	8.63E-02	628.8
12	1.93E-02	572.0	32	5.35E-02	606.0	53	8.79E-02	629.4
13	2.07E-02	574.0	33	5.50E-02	607.4	54	8.95E-02	630.1
14	2.33E-02	585.4	34	5.66E-02	608.5	55	9.11E-02	630.8
15	2.54E-02	575.2	35	5.80E-02	609.3	56	9.26E-02	631.5
16	2.62E-02	575.9	36	5.94E-02	610.1	57	9.40E-02	632.3
17	2.83E-02	589.3	37	6.07E-02	611.2	58	9.55E-02	633.0
18	3.00E-02	580.7	38	6.21E-02	612.0	59	9.87E-02	636.9
19	3.10E-02	582.5	39	6.49E-02	619.2	60	1.00E-01	632.6
20	3.38E-02	587.1	40	6.66E-02	606.5	65	1.08E-01	637.7

ตาราง ค.1.1 (ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
70	1.17E-01	645.3	130	2.17E-01	666.5	190	3.16E-01	667.7
75	1.25E-01	645.1	135	2.25E-01	667.0	195	3.25E-01	664.4
80	1.32E-01	648.3	140	2.33E-01	667.3	200	3.33E-01	664.9
85	1.42E-01	654.1	145	2.40E-01	667.8	205	3.42E-01	659.9
90	1.50E-01	655.0	150	2.50E-01	648.0	210	3.50E-01	648.0
95	1.57E-01	658.0	155	2.59E-01	669.3	215	3.58E-01	647.1
100	1.66E-01	659.3	160	2.66E-01	655.3	220	3.67E-01	639.3
105	1.74E-01	664.3	165	2.74E-01	670.5	225	3.75E-01	641.6
110	1.83E-01	663.3	170	2.82E-01	669.2	230	3.83E-01	621.4
115	1.92E-01	663.6	175	2.91E-01	668.2	235	3.92E-01	619.6
120	2.00E-01	667.4	180	3.00E-01	667.3	240	3.99E-01	618.8
125	2.08E-01	666.1	185	3.09E-01	666.1			

หมายเหตุ การเก็บข้อมูลที่สภาวะนี้ เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งชิ้นงานยืด 10 มม. หลังจากนั้น ไม่ได้จัดเก็บข้อมูล ทำให้ไม่มีข้อมูลของชิ้นงานที่ยืดมากกว่า 10 มม. จนกระทั่งขาด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1.2 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T02

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	3.75E-05	-7.5	30.0	4.91E-02	605.0	115.0	1.92E-01	662.6
0.3	1.00E-04	1.7	31.0	5.03E-02	606.0	120.0	2.01E-01	665.9
0.5	1.40E-03	213.3	32.0	5.32E-02	615.7	125.0	2.08E-01	667.2
0.8	2.24E-03	308.8	33.0	5.54E-02	611.6	130.0	2.16E-01	667.9
1.0	2.84E-03	357.3	34.0	5.70E-02	611.5	135.0	2.25E-01	664.4
1.3	3.24E-03	384.5	35.0	5.84E-02	612.5	140.0	2.33E-01	667.8
1.5	3.50E-03	400.5	36.0	5.98E-02	613.4	145.0	2.42E-01	669.7
1.8	3.68E-03	410.9	37.0	6.12E-02	614.3	150.0	2.49E-01	670.2
2.0	3.81E-03	417.7	38.0	6.24E-02	615.1	155.0	2.59E-01	672.9
2.3	3.96E-03	422.6	39.0	6.37E-02	616.3	160.0	2.67E-01	669.3
2.5	3.99E-03	426.4	40.0	6.69E-02	621.0	165.0	2.76E-01	670.8
2.8	4.26E-03	447.3	45.0	5.81E-02	613.4	169.0	2.81E-01	671.2
3.0	4.63E-03	467.8	46.0	7.57E-02	623.4	175.0	2.91E-01	670.7
3.3	5.03E-03	480.4	47.0	7.72E-02	626.7	180.0	3.00E-01	670.1
3.5	5.35E-03	496.9	48.0	7.89E-02	628.1	185.0	3.09E-01	669.2
3.8	5.86E-03	512.8	49.0	8.21E-02	627.9	190.0	3.17E-01	668.4
4.0	6.29E-03	523.2	50.0	8.34E-02	627.2	195.0	3.25E-01	667.4
5.0	8.18E-03	556.6	51.0	8.46E-02	628.1	200.0	3.34E-01	665.9
6.0	1.08E-02	564.6	52.0	8.58E-02	629.2	205.0	3.41E-01	615.9
7.0	1.24E-02	568.1	53.0	8.86E-02	638.3	210.0	3.49E-01	664.0
8.0	1.40E-02	570.5	54.0	9.05E-02	633.1	215.0	3.58E-01	660.4
9.0	1.54E-02	572.4	55.0	9.20E-02	634.1	225.0	3.75E-01	649.8
10.0	1.69E-02	574.0	56.0	9.36E-02	634.7	229.0	3.82E-01	654.9
11.0	1.83E-02	575.6	57.0	9.50E-02	635.5	235.0	3.91E-01	646.9
15.0	2.57E-02	578.3	58.0	9.65E-02	636.1	240.0	4.00E-01	607.1
16.0	2.65E-02	579.9	59.0	9.78E-02	636.7	245.0	4.08E-01	639.3
17.0	2.84E-02	591.7	60.0	9.92E-02	637.4	250.0	4.16E-01	629.9
18.0	3.08E-02	583.3	65.0	1.07E-01	641.1	255.0	4.25E-01	619.6
19.0	3.13E-02	581.7	70.0	1.16E-01	645.8	260.0	4.33E-01	607.1
20.0	3.32E-02	594.5	75.0	1.26E-01	653.8	265.0	4.42E-01	593.3
23.0	3.90E-02	598.2	80.0	1.34E-01	649.4	270.0	4.50E-01	575.1
24.0	4.04E-02	599.2	85.0	1.42E-01	653.8	275.0	4.59E-01	556.7
25.0	4.20E-02	600.2	90.0	1.49E-01	655.8	280.0	4.67E-01	534.6
26.0	4.36E-02	601.1	95.0	1.59E-01	661.5	285.0	4.75E-01	507.4
27.0	4.50E-02	602.3	100.0	1.66E-01	661.4	290.0	4.84E-01	482.7
28.0	4.65E-02	603.2	105.0	1.75E-01	662.5	295.0	4.92E-01	453.3
29.0	4.78E-02	604.1	110.0	1.83E-01	663.7			

ตาราง ก.1.3 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T03

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	0.00E+00	0.4	3.4	2.82E-03	371.6	140.0	2.33E-01	651.7
0.1	6.50E-05	0.4	3.5	2.96E-03	381.7	145.0	2.41E-01	655.9
0.2	2.50E-06	0.4	3.6	3.09E-03	397.2	150.0	2.50E-01	658.3
0.3	4.00E-05	0.3	3.7	3.27E-03	409.2	155.0	2.59E-01	658.2
0.4	-1.00E-05	0.4	3.8	3.45E-03	419.2	160.0	2.67E-01	657.9
0.5	5.50E-05	0.4	3.9	3.59E-03	428.4	165.1	2.75E-01	657.9
0.6	-2.50E-05	0.4	4.0	3.75E-03	439.4	170.0	2.83E-01	658.0
0.7	5.50E-05	0.4	5.0	5.80E-03	518.1	175.0	2.90E-01	658.2
0.8	3.00E-05	0.5	10.0	1.66E-02	562.4	180.0	3.01E-01	657.8
0.9	3.25E-05	0.4	15.0	2.46E-02	569.9	185.0	3.08E-01	651.4
1.0	-5.00E-06	0.5	20.0	3.34E-02	573.0	190.0	3.16E-01	658.7
1.1	7.50E-06	0.7	25.0	4.18E-02	585.7	195.0	3.24E-01	657.0
1.2	5.75E-05	0.8	30.0	5.02E-02	598.1	200.0	3.33E-01	655.7
1.3	3.00E-05	1.0	35.0	5.76E-02	596.1	205.0	3.42E-01	654.4
1.4	3.00E-05	1.4	40.0	6.61E-02	613.5	210.0	3.51E-01	652.5
1.5	3.50E-05	6.9	45.0	7.46E-02	610.5	215.0	3.59E-01	650.1
1.6	2.73E-04	49.8	50.0	8.45E-02	618.8	220.0	3.66E-01	654.7
1.7	4.75E-04	84.4	55.0	9.21E-02	623.1	225.0	3.76E-01	645.7
1.8	5.73E-04	112.3	60.0	1.00E-01	628.5	230.0	3.84E-01	616.4
1.9	7.20E-04	142.2	65.0	1.08E-01	634.8	235.0	3.92E-01	637.1
2.0	8.58E-04	165.8	70.0	1.17E-01	631.7	240.0	3.99E-01	629.8
2.1	1.04E-03	184.4	75.0	1.25E-01	634.5	245.0	4.09E-01	633.1
2.2	1.17E-03	199.0	80.0	1.33E-01	636.5	250.0	4.17E-01	624.4
2.3	1.33E-03	218.1	85.0	1.42E-01	644.7	255.0	4.26E-01	615.9
2.4	1.45E-03	235.8	90.0	1.49E-01	648.3	260.0	4.34E-01	604.9
2.5	1.54E-03	249.7	95.0	1.59E-01	643.9	265.0	4.43E-01	592.6
2.6	1.72E-03	261.2	100.0	1.66E-01	646.0	270.0	4.51E-01	579.5
2.7	1.84E-03	278.0	105.0	1.75E-01	632.1	275.0	4.59E-01	563.5
2.8	1.94E-03	294.8	110.0	1.83E-01	650.4	281.0	4.69E-01	539.7
2.9	2.12E-03	308.2	115.0	1.91E-01	651.3	285.0	4.76E-01	520.1
3.0	2.21E-03	319.1	120.0	2.00E-01	647.7	290.0	4.84E-01	502.0
3.1	2.37E-03	334.5	125.0	2.08E-01	661.6	295.0	4.93E-01	478.6
3.2	2.56E-03	349.8	130.0	2.16E-01	654.7	300.0	5.01E-01	447.7
3.3	2.68E-03	361.7	135.0	2.26E-01	642.8	305.0	5.09E-01	420.4

ค.2 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านภาระด้าแต่ผ่านการให้ความร้อน

ตาราง ค.21 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T04

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	4.50E-05	1.8	5.0	1.86E-03	355.0	205.0	2.47E-01	661.4
0.1	2.00E-05	2.0	10.0	5.46E-03	481.9	210.0	2.54E-01	661.8
0.2	1.50E-05	2.0	15.0	1.36E-02	497.1	215.0	2.61E-01	662.0
0.3	8.00E-05	14.8	20.0	2.12E-02	508.7	220.0	2.68E-01	662.4
0.4	2.03E-04	34.8	25.0	2.73E-02	518.9	225.0	2.75E-01	662.6
0.5	1.95E-04	43.2	30.0	3.32E-02	528.0	230.0	2.83E-01	660.7
0.6	2.50E-04	49.5	35.0	3.94E-02	537.0	235.0	2.90E-01	662.9
0.7	2.58E-04	54.7	40.0	4.53E-02	545.7	240.0	2.97E-01	662.7
0.8	2.58E-04	58.9	45.0	5.06E-02	553.8	245.0	3.05E-01	662.6
0.9	2.45E-04	62.9	50.0	5.58E-02	561.3	250.0	3.13E-01	662.4
1.0	3.30E-04	76.6	55.0	6.14E-02	568.8	255.0	3.21E-01	662.0
1.1	4.05E-04	87.4	60.0	6.72E-02	575.8	260.0	3.29E-01	661.7
1.2	4.28E-04	95.1	65.0	7.30E-02	582.9	265.0	3.37E-01	661.1
1.3	4.50E-04	101.1	70.0	7.87E-02	588.8	270.0	3.45E-01	660.5
1.4	5.15E-04	105.6	75.0	8.45E-02	594.7	275.0	3.54E-01	659.8
1.5	5.43E-04	109.7	80.0	9.03E-02	600.4	281.0	3.64E-01	658.6
1.6	5.73E-04	115.8	85.0	9.61E-02	605.3	285.0	3.71E-01	657.6
1.7	6.18E-04	127.1	90.0	1.02E-01	610.6	290.0	3.80E-01	656.2
1.8	6.43E-04	135.5	95.0	1.08E-01	615.5	295.0	3.89E-01	654.5
1.9	6.88E-04	142.1	100.0	1.13E-01	618.8	300.0	3.98E-01	652.5
2.0	6.88E-04	147.2	105.0	1.19E-01	623.5	305.0	4.06E-01	658.0
2.1	7.35E-04	151.8	110.0	1.25E-01	627.1	310.0	4.14E-01	654.2
2.2	7.83E-04	164.9	115.0	1.31E-01	630.1	315.0	4.23E-01	651.1
2.3	8.25E-04	176.4	120.0	1.37E-01	634.1	320.0	4.31E-01	646.9
2.4	8.83E-04	183.6	125.0	1.43E-01	637.0	325.0	4.39E-01	640.0
2.5	8.90E-04	189.2	130.0	1.49E-01	640.0	330.0	4.48E-01	637.4
2.7	9.68E-04	198.3	135.0	1.55E-01	642.4	335.0	4.56E-01	629.2
2.8	9.85E-04	209.6	150.0	1.74E-01	648.6	340.0	4.64E-01	620.0
2.9	1.07E-03	219.3	155.0	1.80E-01	650.5	345.0	4.73E-01	610.4
3.0	1.05E-03	226.2	160.0	1.87E-01	652.3	350.0	4.81E-01	598.7
3.1	1.12E-03	231.8	165.0	1.93E-01	653.7	355.0	4.89E-01	585.6
3.2	1.19E-03	236.4	170.0	1.99E-01	655.2	360.0	4.98E-01	566.7
3.3	1.24E-03	246.0	175.0	2.06E-01	656.6	365.0	5.06E-01	554.4
3.4	1.25E-03	256.7	180.0	2.13E-01	657.2	370.0	5.14E-01	538.0
3.5	1.32E-03	264.2	185.0	2.19E-01	659.9	375.0	5.23E-01	510.1
3.6	1.35E-03	270.0	190.0	2.26E-01	660.0	380.0	5.31E-01	489.5
3.9	1.42E-03	288.0	195.0	2.33E-01	659.9	385.0	5.39E-01	468.3
4.0	1.47E-03	297.8	200.0	2.40E-01	660.9	390.0	5.48E-01	431.7

ตาราง ก.22 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T05

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	2.00E-05	0.2	3.5	3.22E-03	450.2	150.0	2.50E-01	660.2
0.1	7.50E-06	1.6	3.6	3.36E-03	456.5	155.0	2.58E-01	660.5
0.2	3.00E-05	4.6	3.7	3.59E-03	461.8	160.0	2.67E-01	660.6
0.3	2.25E-05	10.8	3.8	3.77E-03	466.3	165.1	2.75E-01	660.9
0.4	1.03E-04	19.6	3.9	4.04E-03	470.4	170.0	2.83E-01	661.0
0.5	1.30E-04	29.6	4.0	4.25E-03	473.5	175.0	2.92E-01	660.9
0.6	1.98E-04	40.5	5.0	6.48E-03	489.8	180.0	3.00E-01	660.5
0.7	2.53E-04	52.4	10.0	1.59E-02	508.0	185.0	3.08E-01	660.5
0.8	3.25E-04	64.9	15.0	2.46E-02	521.6	190.0	3.17E-01	660.1
0.9	3.78E-04	77.8	20.0	3.31E-02	534.1	195.0	3.25E-01	659.8
1.0	4.40E-04	90.9	25.0	4.15E-02	546.0	200.0	3.33E-01	659.0
1.1	5.00E-04	105.6	30.0	4.98E-02	557.3	205.0	3.42E-01	658.1
1.2	5.45E-04	120.9	35.0	5.82E-02	567.9	210.0	3.50E-01	657.2
1.3	6.48E-04	137.0	40.0	6.65E-02	578.2	215.0	3.58E-01	655.7
1.4	7.53E-04	153.4	45.0	7.48E-02	587.8	220.0	3.67E-01	654.3
1.5	8.20E-04	169.4	50.0	8.31E-02	596.7	225.0	3.75E-01	652.3
1.6	9.23E-04	186.0	55.0	9.15E-02	604.1	230.0	3.83E-01	649.7
1.7	1.01E-03	202.6	60.0	9.98E-02	611.5	235.0	3.92E-01	646.8
1.8	1.05E-03	219.2	65.0	1.08E-01	617.9	240.0	4.00E-01	643.3
1.9	1.16E-03	236.1	70.0	1.17E-01	623.6	245.0	4.08E-01	646.2
2.0	1.21E-03	253.0	75.0	1.25E-01	628.7	250.0	4.17E-01	641.1
2.1	1.35E-03	269.3	80.0	1.33E-01	633.1	255.0	4.25E-01	634.8
2.2	1.37E-03	285.7	85.0	1.42E-01	637.4	260.0	4.34E-01	627.7
2.3	1.49E-03	302.4	90.0	1.50E-01	640.7	265.0	4.42E-01	619.3
2.4	1.59E-03	318.5	95.0	1.58E-01	643.8	270.0	4.50E-01	609.3
2.5	1.69E-03	334.5	100.0	1.67E-01	646.4	275.0	4.59E-01	598.0
2.6	1.83E-03	349.6	105.0	1.75E-01	649.0	281.0	4.69E-01	582.0
2.7	1.92E-03	364.3	110.0	1.83E-01	651.0	285.0	4.75E-01	570.0
2.8	1.99E-03	378.3	115.0	1.92E-01	652.9	290.0	4.84E-01	553.2
2.9	2.15E-03	392.3	120.0	2.00E-01	654.6	295.0	4.92E-01	534.3
3.0	2.31E-03	404.7	125.0	2.08E-01	655.6	300.0	5.00E-01	512.9
3.1	2.49E-03	416.0	130.0	2.17E-01	656.9	305.0	5.09E-01	489.2
3.2	2.60E-03	426.0	135.0	2.25E-01	657.8	310.0	5.17E-01	462.5
3.3	2.84E-03	435.1	140.0	2.33E-01	658.8	315.0	5.25E-01	432.7
3.4	2.96E-03	443.0	145.0	2.42E-01	659.3			

ตาราง ก.23 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน T06

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	-4.75E-05	-0.1	3.5	3.13E-03	452.6	150.0	2.50E-01	662.4
0.1	-3.75E-05	-0.1	3.6	3.33E-03	459.3	155.0	2.58E-01	662.8
0.2	-2.75E-05	0.3	3.7	3.54E-03	465.1	160.0	2.67E-01	663.0
0.3	-5.00E-06	3.9	3.8	3.77E-03	469.7	165.1	2.75E-01	663.3
0.4	2.50E-06	10.3	3.9	3.98E-03	473.9	170.0	2.83E-01	663.2
0.5	8.75E-05	19.0	4.0	4.21E-03	477.3	175.0	2.92E-01	663.3
0.6	1.20E-04	30.2	5.0	6.51E-03	492.4	180.0	3.00E-01	662.7
0.7	2.33E-04	43.6	10.0	1.59E-02	510.4	185.0	3.08E-01	662.3
0.8	2.60E-04	57.8	15.0	2.46E-02	523.8	190.0	3.17E-01	662.0
0.9	3.60E-04	72.3	20.0	3.32E-02	536.2	195.0	3.25E-01	661.3
1.0	4.03E-04	87.9	25.0	4.15E-02	548.8	200.0	3.33E-01	660.2
1.1	4.70E-04	102.8	30.0	4.99E-02	560.0	205.0	3.42E-01	659.2
1.2	5.75E-04	118.6	35.0	5.82E-02	570.4	210.0	3.50E-01	657.9
1.3	6.33E-04	134.9	40.0	6.65E-02	580.5	215.0	3.58E-01	656.2
1.4	7.40E-04	151.8	45.0	7.49E-02	590.1	220.0	3.67E-01	654.1
1.5	8.50E-04	168.0	50.0	8.32E-02	598.9	225.0	3.75E-01	651.5
1.6	9.20E-04	184.5	55.0	9.16E-02	606.6	230.0	3.83E-01	648.0
1.7	9.73E-04	201.4	60.0	9.99E-02	613.7	235.0	3.92E-01	644.3
1.8	1.05E-03	217.8	65.0	1.08E-01	620.2	240.0	4.00E-01	612.5
1.9	1.13E-03	234.5	70.0	1.17E-01	625.9	245.0	4.08E-01	642.1
2.0	1.25E-03	250.8	75.0	1.25E-01	630.7	250.0	4.17E-01	635.7
2.1	1.33E-03	267.0	80.0	1.33E-01	635.4	255.0	4.25E-01	628.2
2.2	1.45E-03	283.4	85.0	1.42E-01	639.6	260.0	4.34E-01	619.4
2.3	1.51E-03	300.0	90.0	1.50E-01	643.0	265.0	4.42E-01	608.8
2.4	1.56E-03	316.2	95.0	1.58E-01	646.4	270.0	4.50E-01	596.9
2.5	1.69E-03	332.2	100.0	1.67E-01	649.0	275.0	4.59E-01	583.0
2.6	1.77E-03	348.1	105.0	1.75E-01	651.4	281.0	4.68E-01	564.2
2.7	1.90E-03	363.4	110.0	1.83E-01	653.4	285.0	4.75E-01	550.0
2.8	2.04E-03	377.8	115.0	1.92E-01	655.6	290.0	4.84E-01	530.1
2.9	2.16E-03	391.4	120.0	2.00E-01	657.1	295.0	4.92E-01	508.2
3.0	2.29E-03	404.1	125.0	2.08E-01	658.2	300.0	5.00E-01	483.3
3.1	2.44E-03	415.6	130.0	2.17E-01	659.5	305.0	5.09E-01	455.4
3.2	2.58E-03	426.4	135.0	2.25E-01	660.3	310.0	5.17E-01	424.4
3.3	2.75E-03	436.5	140.0	2.33E-01	661.4			
3.4	2.97E-03	445.3	145.0	2.42E-01	661.9			

ค.3 ชิ้นงานที่ผ่านภาระด้าเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ

ค.3.1 ชิ้นงานที่ทดสอบที่พิสัยความเครียด 1.0%

ตารางที่ ค.31.1 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA01

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	1.75E-05	0.4	3.4	2.88E-03	396.1	35.0	5.84E-02	534.4
0.1	4.50E-05	0.3	3.5	3.00E-03	399.2	39.0	6.40E-02	540.6
0.2	4.00E-05	0.4	3.6	3.18E-03	403.7	40.0	6.69E-02	550.1
0.3	0.00E+00	0.4	3.7	3.50E-03	414.2	41.0	6.84E-02	544.7
0.4	7.00E-05	0.4	3.8	3.79E-03	419.0	42.0	6.96E-02	546.2
0.5	8.25E-05	0.4	3.9	4.20E-03	422.9	43.0	7.12E-02	558.7
0.6	2.50E-05	0.4	4.0	4.56E-03	426.2	44.0	7.38E-02	553.7
0.7	4.00E-05	0.5	5.0	7.16E-03	444.0	45.0	7.55E-02	555.5
0.8	1.75E-05	0.4	6.0	8.91E-03	450.8	46.0	7.72E-02	557.2
0.9	7.00E-05	0.4	7.0	1.05E-02	455.0	47.0	7.88E-02	558.6
1.0	6.25E-05	0.4	8.0	1.18E-02	458.3	48.0	8.03E-02	559.8
1.1	4.50E-05	0.5	9.0	1.37E-02	473.3	49.0	8.17E-02	560.9
1.2	5.50E-05	0.4	10.0	1.63E-02	462.4	50.0	8.30E-02	562.2
1.3	2.50E-05	0.5	11.0	1.73E-02	476.7	55.0	9.12E-02	573.8
1.4	6.25E-05	0.5	12.0	1.98E-02	470.6	56.0	9.33E-02	575.2
1.5	2.25E-05	0.5	13.0	2.06E-02	472.4	57.0	9.53E-02	576.5
1.6	6.25E-05	0.6	15.0	2.43E-02	479.8	58.0	9.71E-02	577.8
1.7	3.50E-05	0.6	16.0	2.66E-02	494.0	59.0	9.88E-02	579.1
1.8	6.25E-05	0.7	19.0	3.20E-02	497.2	60.0	1.00E-01	580.3
1.9	3.60E-04	60.7	20.0	3.35E-02	498.8	65.0	1.08E-01	585.6
2.0	6.25E-04	118.0	21.0	3.49E-02	500.9	70.0	1.17E-01	596.8
2.1	8.15E-04	161.2	22.0	3.63E-02	502.7	75.0	1.25E-01	599.5
2.2	9.50E-04	193.6	23.0	3.77E-02	504.6	80.0	1.32E-01	603.7
2.3	1.12E-03	218.3	24.0	4.00E-02	517.7	85.0	1.42E-01	593.4
2.4	1.20E-03	241.0	25.0	4.24E-02	514.5	90.0	1.51E-01	617.6
2.5	1.34E-03	273.2	26.0	4.29E-02	498.8	95.0	1.59E-01	621.3
2.6	1.52E-03	298.5	27.0	4.50E-02	519.6	100.0	1.66E-01	622.7
2.7	1.62E-03	317.7	28.0	4.73E-02	521.7	105.0	1.76E-01	627.8
2.8	1.76E-03	340.0	29.0	4.77E-02	508.1	110.0	1.83E-01	627.2
2.9	2.01E-03	358.9	30.0	4.97E-02	525.1	115.0	1.93E-01	632.0
3.0	2.21E-03	372.0	31.0	5.17E-02	527.1	120.0	2.00E-01	633.8
3.1	2.37E-03	381.3	32.0	5.35E-02	529.1	125.0	2.07E-01	636.3
3.2	2.59E-03	387.9	33.0	5.53E-02	531.1	130.0	2.16E-01	644.7
3.3	2.69E-03	392.6	34.0	5.69E-02	532.8	135.0	2.25E-01	639.7

ตารางที่ ค.3.1.1 (ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
140.0	2.33E-01	650.6	205.0	3.42E-01	649.0	270.0	4.51E-01	612.4
145.0	2.41E-01	640.2	210.0	3.51E-01	648.0	275.0	4.60E-01	606.0
150.0	2.51E-01	643.8	215.0	3.58E-01	646.6	280.0	4.68E-01	595.4
155.0	2.59E-01	643.8	220.0	3.67E-01	645.5	285.0	4.76E-01	582.5
160.0	2.66E-01	645.4	225.0	3.76E-01	643.8	290.0	4.85E-01	568.4
165.0	2.75E-01	636.3	230.0	3.84E-01	641.0	295.0	4.93E-01	552.0
170.0	2.83E-01	645.6	235.0	3.92E-01	639.7	300.0	5.01E-01	534.0
175.0	2.92E-01	631.1	240.0	4.00E-01	637.9	301.0	5.03E-01	529.5
180.0	3.00E-01	650.2	245.0	4.10E-01	644.0	305.0	5.10E-01	513.0
185.0	3.08E-01	633.9	250.0	4.18E-01	638.7	310.0	5.18E-01	493.4
190.0	3.17E-01	639.8	255.0	4.26E-01	634.5	315.0	5.26E-01	464.5
195.0	3.25E-01	643.7	260.0	4.35E-01	629.6	320.0	5.35E-01	433.5
200.0	3.33E-01	646.9	265.0	4.43E-01	623.1	324.0	5.41E-01	408.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.2 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA02

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	3.25E-05	3.8	3.7	3.64E-03	420.8	38.0	6.37E-02	530.2
0.1	1.00E-05	3.6	3.8	3.88E-03	423.9	39.0	6.52E-02	531.8
0.2	1.00E-05	3.7	3.9	4.11E-03	426.3	40.0	6.67E-02	533.0
0.3	1.50E-05	3.8	4.0	4.36E-03	428.7	41.0	6.80E-02	534.4
0.4	3.50E-05	3.7	5.0	6.41E-03	441.5	42.0	6.94E-02	535.7
0.5	5.00E-06	3.7	6.0	8.05E-03	447.6	43.0	7.07E-02	539.9
0.6	2.00E-05	3.7	7.0	1.09E-02	456.5	44.0	7.36E-02	541.3
0.7	0.00E+00	3.7	8.0	1.26E-02	459.7	45.0	7.53E-02	543.1
0.8	5.50E-05	3.8	9.0	1.41E-02	462.2	46.0	7.69E-02	544.6
0.9	2.00E-05	3.8	10.0	1.55E-02	464.3	47.0	7.84E-02	545.7
1.0	2.50E-05	3.8	11.0	1.83E-02	471.3	48.0	7.98E-02	546.9
1.1	5.75E-05	3.8	12.0	2.01E-02	473.4	49.0	8.12E-02	548.2
1.2	0.00E+00	3.9	13.0	2.16E-02	475.9	50.0	8.26E-02	549.5
1.3	1.50E-05	3.9	14.0	2.32E-02	477.7	51.0	8.42E-02	560.2
1.4	0.00E+00	3.8	15.0	2.47E-02	479.8	52.0	8.71E-02	555.6
1.5	1.25E-05	3.8	16.0	2.61E-02	481.9	53.0	8.79E-02	541.7
1.6	2.75E-05	3.9	17.0	2.74E-02	484.0	54.0	8.96E-02	559.5
1.7	2.50E-05	3.9	18.0	3.04E-02	489.6	55.0	9.16E-02	560.5
1.8	5.00E-06	3.9	19.0	3.22E-02	491.7	56.0	9.37E-02	562.0
1.9	-7.50E-06	3.9	20.0	3.39E-02	493.7	57.0	9.55E-02	562.9
2.0	3.25E-05	3.9	21.0	3.55E-02	495.3	58.0	9.72E-02	563.7
2.1	2.00E-05	3.9	22.0	3.69E-02	497.0	59.0	9.85E-02	563.8
2.2	2.00E-05	3.9	23.0	3.83E-02	498.4	60.0	9.98E-02	564.9
2.3	5.75E-05	4.0	24.0	3.96E-02	500.0	65.0	1.08E-01	577.1
2.4	1.18E-04	33.4	25.0	4.08E-02	501.5	70.0	1.17E-01	580.5
2.5	6.80E-04	127.4	26.0	4.30E-02	513.3	75.0	1.25E-01	585.1
2.6	1.06E-03	198.0	27.0	4.53E-02	509.7	80.0	1.33E-01	594.3
2.7	1.30E-03	250.6	28.0	4.68E-02	501.4	85.0	1.41E-01	596.4
2.8	1.48E-03	290.0	29.0	4.75E-02	513.6	90.0	1.50E-01	600.1
2.9	1.62E-03	319.2	30.0	4.97E-02	516.7	95.0	1.59E-01	607.7
3.0	1.84E-03	340.6	31.0	5.19E-02	518.5	100.0	1.67E-01	609.0
3.1	2.04E-03	360.2	32.0	5.36E-02	508.1	105.0	1.75E-01	611.8
3.2	2.25E-03	382.6	33.0	5.41E-02	519.3	110.0	1.83E-01	614.0
3.3	2.54E-03	396.9	34.0	5.57E-02	522.1	115.0	1.92E-01	612.3
3.4	2.82E-03	406.0	35.0	5.75E-02	524.0	120.0	2.01E-01	622.3
3.5	3.13E-03	412.4	36.0	5.92E-02	530.3	125.0	2.08E-01	621.6
3.6	3.40E-03	417.0	37.0	6.21E-02	528.5	130.0	2.16E-01	624.1

ตารางที่ ค.3.1.2(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
135.0	2.26E-01	627.1	195.0	3.26E-01	626.8	255.0	4.26E-01	604.6
140.0	2.34E-01	628.3	200.0	3.34E-01	621.5	260.0	4.34E-01	595.4
145.0	2.41E-01	629.4	205.0	3.42E-01	635.1	265.0	4.43E-01	583.2
150.0	2.50E-01	629.5	210.0	3.50E-01	633.9	270.0	4.51E-01	569.6
155.0	2.58E-01	609.6	215.0	3.59E-01	632.2	275.0	4.59E-01	555.3
160.0	2.66E-01	632.9	220.0	3.66E-01	632.6	280.0	4.68E-01	536.8
165.0	2.75E-01	634.8	225.0	3.75E-01	628.8	285.0	4.76E-01	513.5
170.0	2.84E-01	635.2	230.0	3.83E-01	620.5	290.0	4.84E-01	487.8
175.0	2.92E-01	635.6	235.0	3.92E-01	619.2	295.0	4.93E-01	465.2
180.0	2.99E-01	635.7	239.0	4.01E-01	610.5	300.0	5.01E-01	438.9
185.0	3.09E-01	634.9	245.0	4.09E-01	620.7	305.0	5.09E-01	404.9
190.0	3.17E-01	634.6	250.0	4.18E-01	609.0			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.3 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA03

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	5.25E-05	0.2	3.7	5.94E-03	408.2	38.0	6.40E-02	518.2
0.1	7.50E-05	0.2	3.8	6.14E-03	409.3	39.0	6.55E-02	519.6
0.2	8.75E-05	0.2	3.9	6.36E-03	410.6	40.0	6.70E-02	521.0
0.3	9.25E-05	0.2	4.0	6.56E-03	411.6	41.0	6.83E-02	522.4
0.4	1.08E-04	0.2	5.0	8.13E-03	419.2	42.0	6.97E-02	523.7
0.5	1.13E-04	0.3	6.0	9.36E-03	424.1	43.0	7.10E-02	525.1
0.6	9.75E-05	0.2	7.0	1.07E-02	440.7	44.0	7.22E-02	526.5
0.7	1.00E-04	0.3	8.0	1.36E-02	443.0	45.0	7.54E-02	532.6
0.8	6.75E-05	0.2	9.0	1.53E-02	446.7	46.0	7.65E-02	524.4
0.9	1.13E-04	0.3	10.0	1.68E-02	449.4	47.0	7.79E-02	539.2
1.0	2.43E-04	33.3	11.0	1.83E-02	451.7	48.0	8.01E-02	528.6
1.1	5.60E-04	104.8	12.0	1.95E-02	453.7	49.0	8.09E-02	541.5
1.2	8.55E-04	158.8	13.0	2.06E-02	456.0	50.0	8.39E-02	539.3
1.3	1.10E-03	199.3	14.0	2.37E-02	464.5	51.0	8.46E-02	534.5
1.4	1.23E-03	229.6	15.0	2.56E-02	466.9	52.0	8.66E-02	547.7
1.5	1.33E-03	252.5	16.0	2.70E-02	457.2	53.0	8.85E-02	536.4
1.6	1.49E-03	273.9	17.0	2.76E-02	471.6	54.0	8.94E-02	549.9
1.7	1.68E-03	299.3	18.0	2.96E-02	474.2	55.0	9.23E-02	552.0
1.8	1.86E-03	317.7	19.0	3.16E-02	476.4	56.0	9.30E-02	541.4
1.9	2.02E-03	330.9	20.0	3.34E-02	478.6	57.0	9.48E-02	555.6
2.0	2.12E-03	340.5	21.0	3.50E-02	480.4	58.0	9.71E-02	542.1
2.1	2.30E-03	347.7	22.0	3.66E-02	482.4	59.0	9.78E-02	555.1
2.2	2.37E-03	353.1	23.0	3.81E-02	484.1	60.0	9.98E-02	556.9
2.3	2.49E-03	358.4	24.0	3.94E-02	485.9	65.0	1.09E-01	562.9
2.4	2.77E-03	370.5	25.0	4.09E-02	496.7	70.0	1.16E-01	567.9
2.5	2.95E-03	377.5	26.0	4.39E-02	487.3	75.0	1.26E-01	576.5
2.6	3.27E-03	382.4	27.0	4.46E-02	488.9	80.0	1.34E-01	581.4
2.7	3.53E-03	386.4	28.0	4.72E-02	496.2	85.0	1.41E-01	585.5
2.8	3.73E-03	389.9	29.0	4.83E-02	495.7	90.0	1.50E-01	573.8
2.9	3.99E-03	392.8	30.0	4.94E-02	497.5	95.0	1.58E-01	596.1
3.0	4.24E-03	395.3	31.0	5.22E-02	502.3	100.0	1.68E-01	603.3
3.1	4.48E-03	397.6	32.0	5.35E-02	504.1	105.0	1.75E-01	603.9
3.2	4.77E-03	399.7	33.0	5.49E-02	505.7	110.0	1.83E-01	616.8
3.3	4.97E-03	401.7	34.0	5.61E-02	507.1	115.0	1.91E-01	607.0
3.4	5.25E-03	403.4	35.0	5.82E-02	519.2	120.0	2.00E-01	612.4
3.5	5.46E-03	405.2	36.0	6.06E-02	514.8	125.0	2.09E-01	610.4
3.6	5.67E-03	406.7	37.0	6.24E-02	516.5	130.0	2.17E-01	617.6

ตารางที่ ค.3.1.3(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
135.0	2.25E-01	619.4	210.0	3.50E-01	631.9	265.0	4.42E-01	623.9
140.0	2.34E-01	615.8	215.0	3.58E-01	631.8	270.0	4.50E-01	618.6
145.0	2.42E-01	622.8	220.0	3.66E-01	631.6	275.0	4.58E-01	612.9
150.0	2.51E-01	616.9	205.0	3.42E-01	632.2	280.0	4.67E-01	608.4
156.0	2.60E-01	625.1	210.0	3.50E-01	631.9	285.0	4.75E-01	597.2
160.0	2.68E-01	625.8	215.0	3.58E-01	631.8	290.0	4.83E-01	584.1
165.0	2.75E-01	620.7	220.0	3.66E-01	631.6	295.0	4.92E-01	573.5
170.0	2.84E-01	628.0	225.0	3.75E-01	624.7	300.0	5.00E-01	561.0
175.0	2.91E-01	631.8	230.0	3.84E-01	628.6	305.0	5.08E-01	545.8
180.0	3.00E-01	635.6	235.0	3.92E-01	616.9	310.0	5.17E-01	528.6
185.0	3.08E-01	630.0	240.0	4.00E-01	621.2	315.0	5.25E-01	509.3
190.0	3.17E-01	614.2	245.0	4.08E-01	634.9	320.0	5.34E-01	482.8
195.0	3.26E-01	632.8	250.0	4.17E-01	631.8	325.0	5.42E-01	457.7
200.0	3.33E-01	633.3	255.0	4.25E-01	630.1	330.0	5.52E-01	427.6
205.0	3.42E-01	632.2	260.0	4.33E-01	627.1	335.0	5.60E-01	390.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.4 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA04

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	6.50E-05	0.9	31	3.10E-03	378.2	26.0	4.33E-02	486.1
0.1	7.50E-05	0.8	32	3.25E-03	383.5	27.0	4.50E-02	488.3
0.2	6.00E-05	1.4	33	3.42E-03	388.2	28.0	4.67E-02	490.1
0.3	1.03E-04	4.8	34	3.60E-03	392.3	29.0	4.83E-02	492.5
0.4	1.25E-04	12.1	35	3.83E-03	396.0	30.0	5.00E-02	494.7
0.5	2.00E-04	22.9	36	4.01E-03	399.0	31.0	5.18E-02	497.3
0.6	2.28E-04	37.5	37	4.21E-03	401.9	32.0	5.33E-02	499.1
0.7	3.18E-04	53.4	38	4.42E-03	404.2	33.0	5.50E-02	501.4
0.8	4.63E-04	68.8	39	4.64E-03	406.1	34.0	5.66E-02	503.2
0.9	5.05E-04	83.3	40	4.84E-03	407.7	35.0	5.83E-02	505.2
1.0	5.73E-04	97.6	5.0	6.84E-03	419.0	36.0	6.00E-02	507.3
1.1	6.63E-04	112.0	6.0	8.75E-03	426.2	37.0	6.17E-02	509.6
1.2	7.23E-04	127.4	7.0	1.07E-02	431.8	38.0	6.33E-02	511.7
1.3	7.68E-04	144.0	8.0	1.25E-02	436.5	39.0	6.52E-02	513.5
1.4	8.78E-04	162.4	9.0	1.43E-02	439.8	40.0	6.67E-02	515.3
1.5	1.04E-03	179.7	10.0	1.61E-02	443.4	41.0	6.83E-02	517.6
1.6	1.09E-03	196.7	11.0	1.79E-02	446.6	42.0	7.00E-02	519.2
1.7	1.17E-03	213.6	12.0	1.96E-02	449.9	43.0	7.17E-02	521.0
1.8	1.25E-03	230.0	13.0	2.14E-02	452.7	44.0	7.33E-02	522.8
1.9	1.39E-03	246.7	14.0	2.30E-02	456.0	45.0	7.50E-02	524.9
2.0	1.43E-03	262.7	15.0	2.47E-02	459.1	46.0	7.66E-02	526.6
2.1	1.54E-03	278.3	16.0	2.65E-02	461.4	47.0	7.83E-02	528.3
2.2	1.63E-03	293.0	17.0	2.82E-02	464.1	48.0	8.00E-02	530.0
2.3	1.81E-03	306.4	18.0	2.99E-02	467.0	49.0	8.17E-02	531.8
2.4	1.92E-03	318.5	19.0	3.15E-02	469.4	50.0	8.33E-02	533.6
2.5	2.08E-03	329.6	20.0	3.32E-02	471.9	51.0	8.50E-02	535.2
2.6	2.24E-03	339.7	21.0	3.49E-02	474.4	52.0	8.67E-02	537.0
2.7	2.38E-03	349.3	22.0	3.66E-02	476.8	53.0	8.84E-02	538.6
2.8	2.54E-03	358.0	23.0	3.84E-02	479.2	54.0	9.00E-02	540.0
2.9	2.70E-03	365.7	24.0	4.00E-02	481.4	55.0	9.17E-02	541.5
3.0	2.91E-03	372.3	25.0	4.16E-02	483.7	56.0	9.33E-02	543.2

หมายเหตุ การทดสอบความล้าที่สภาวะนี้ เกิดไฟดับระหว่างทดสอบ ที่รอบภาระ 434 จึงหยุดทดสอบ ก่อนจะนำมาทดสอบแรงดึง

ตารางที่ ค.3.1.4(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
57.0	9.50E-02	544.7	150.0	2.50E-01	617.2	250.0	4.17E-01	625.5
58.0	9.67E-02	546.2	155.0	2.58E-01	618.8	256.0	4.27E-01	623.3
59.0	9.83E-02	547.6	160.0	2.67E-01	620.2	260.0	4.34E-01	621.2
60.0	1.00E-01	549.2	165.0	2.75E-01	621.4	265.0	4.42E-01	617.9
65.0	1.08E-01	555.9	170.0	2.83E-01	622.3	270.0	4.50E-01	613.8
70.0	1.17E-01	562.6	175.0	2.92E-01	623.2	275.0	4.59E-01	608.6
75.0	1.25E-01	568.7	180.0	3.00E-01	623.9	280.0	4.67E-01	602.0
80.0	1.33E-01	574.1	190.0	3.17E-01	625.2	285.0	4.75E-01	594.3
85.0	1.42E-01	579.4	195.0	3.25E-01	625.6	290.0	4.84E-01	585.2
90.0	1.50E-01	583.9	200.0	3.33E-01	626.0	295.0	4.92E-01	574.2
100.0	1.67E-01	591.8	205.0	3.42E-01	626.3	300.0	5.00E-01	561.3
105.0	1.75E-01	596.0	210.0	3.50E-01	626.4	305.0	5.09E-01	547.1
110.0	1.83E-01	599.1	215.0	3.58E-01	626.1	310.0	5.17E-01	530.9
115.0	1.92E-01	602.2	220.0	3.67E-01	626.0	315.0	5.25E-01	512.3
120.0	2.00E-01	604.7	225.0	3.75E-01	625.8	320.0	5.34E-01	491.3
125.0	2.08E-01	607.5	230.0	3.83E-01	625.0	325.0	5.42E-01	467.5
130.0	2.17E-01	609.8	235.0	3.92E-01	624.1	330.0	5.50E-01	441.0
135.0	2.25E-01	612.0	240.0	4.00E-01	592.6	335.0	5.59E-01	411.0
140.0	2.33E-01	613.8	245.0	4.09E-01	627.3	340.0	5.67E-01	206.5
145.0	2.42E-01	615.5						

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.5 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA05

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	-1.00E-05	1.2	37	4.86E-03	402.1	38.0	6.38E-02	531.4
0.1	-1.25E-05	1.1	38	5.03E-03	404.4	39.0	6.52E-02	527.0
0.2	2.75E-05	1.1	39	5.22E-03	405.8	40.0	6.64E-02	528.8
0.3	1.75E-05	1.2	40	5.40E-03	407.5	41.0	6.78E-02	530.1
0.4	1.25E-05	1.3	5.0	6.72E-03	418.1	42.0	6.96E-02	540.8
0.5	-3.50E-05	1.2	6.0	9.58E-03	436.6	43.0	7.21E-02	536.1
0.6	1.25E-05	1.2	7.0	1.12E-02	442.0	44.0	7.36E-02	537.6
0.7	1.25E-05	1.3	8.0	1.26E-02	445.7	45.0	7.52E-02	539.2
0.8	-2.50E-05	1.4	9.0	1.39E-02	449.0	46.0	7.66E-02	540.5
0.9	-1.50E-05	1.5	10.0	1.69E-02	459.1	47.0	7.78E-02	541.9
1.0	2.25E-05	1.6	11.0	1.88E-02	460.6	48.0	7.91E-02	542.9
1.1	-2.50E-05	1.8	12.0	2.03E-02	462.9	49.0	8.06E-02	552.4
1.2	-2.25E-05	1.9	13.0	2.16E-02	465.2	50.0	8.38E-02	551.0
1.3	-4.00E-05	2.2	14.0	2.28E-02	467.1	51.0	8.48E-02	536.8
1.4	-1.00E-05	2.9	15.0	2.40E-02	469.3	52.0	8.64E-02	554.8
1.5	4.18E-04	78.3	16.0	2.70E-02	477.4	53.0	8.88E-02	556.3
1.6	7.30E-04	147.6	17.0	2.89E-02	479.7	54.0	8.98E-02	540.3
1.7	1.03E-03	200.8	18.0	3.05E-02	481.7	55.0	9.11E-02	559.2
1.8	1.26E-03	240.8	19.0	3.21E-02	483.6	56.0	9.34E-02	560.3
1.9	1.42E-03	270.4	20.0	3.35E-02	485.5	57.0	9.54E-02	561.6
2.0	1.58E-03	291.7	21.0	3.48E-02	487.3	58.0	9.67E-02	547.1
2.1	1.71E-03	307.0	22.0	3.61E-02	488.9	59.0	9.72E-02	560.8
2.2	1.85E-03	318.3	23.0	3.73E-02	490.8	60.0	1.00E-01	568.4
2.3	2.00E-03	327.0	24.0	4.00E-02	500.6	61.0	1.01E-01	555.0
2.4	2.16E-03	333.8	25.0	4.18E-02	491.5	65.0	1.08E-01	572.2
2.5	2.18E-03	339.6	26.0	4.24E-02	492.4	70.0	1.16E-01	577.6
2.6	2.37E-03	349.9	27.0	4.50E-02	506.9	75.0	1.25E-01	589.0
2.7	2.67E-03	360.7	28.0	4.65E-02	495.3	80.0	1.33E-01	591.1
2.8	2.95E-03	368.6	29.0	4.76E-02	510.7	85.0	1.42E-01	595.4
2.9	3.20E-03	375.1	30.0	5.02E-02	512.9	90.0	1.50E-01	599.2
3.0	3.41E-03	380.4	31.0	5.15E-02	502.5	95.0	1.58E-01	600.7
3.1	3.67E-03	385.0	32.0	5.24E-02	517.0	100.0	1.66E-01	611.8
3.2	3.90E-03	388.9	33.0	5.50E-02	519.0	105.0	1.75E-01	611.0
3.3	4.07E-03	392.3	34.0	5.71E-02	514.0	110.0	1.84E-01	618.3
3.4	4.31E-03	395.2	35.0	5.75E-02	510.7	115.0	1.92E-01	622.0
3.5	4.51E-03	397.8	36.0	5.90E-02	521.7	120.0	2.00E-01	626.4
3.6	4.67E-03	400.3	37.0	6.07E-02	523.7	125.0	2.09E-01	622.5

ตารางที่ ค.3.1.5(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
130.0	2.17E-01	624.9	195.0	3.25E-01	626.9	260.0	4.34E-01	622.3
135.0	2.24E-01	626.7	200.0	3.32E-01	630.8	274.0	4.58E-01	602.2
140.0	2.33E-01	615.5	205.0	3.42E-01	627.3	279.0	4.66E-01	590.6
145.0	2.41E-01	618.8	210.0	3.50E-01	636.9	284.0	4.74E-01	578.4
150.0	2.50E-01	624.3	215.0	3.59E-01	636.0	290.0	4.84E-01	563.4
155.0	2.59E-01	634.9	220.0	3.67E-01	634.7	295.0	4.93E-01	547.5
160.0	2.67E-01	635.6	225.0	3.74E-01	630.0	300.0	5.01E-01	528.4
165.0	2.74E-01	616.9	230.0	3.84E-01	634.1	305.0	5.09E-01	508.4
170.0	2.83E-01	638.3	235.0	3.91E-01	631.9	310.0	5.18E-01	485.1
175.0	2.92E-01	633.4	240.0	3.99E-01	625.5	315.0	5.26E-01	456.8
180.0	3.00E-01	637.5	245.0	4.09E-01	634.2	320.0	5.34E-01	419.3
185.0	3.08E-01	638.1	250.0	4.17E-01	630.6			
190.0	3.17E-01	637.7	255.0	4.26E-01	629.1			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.6 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA06

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	2.50E-06	3.9	37	3.16E-03	426.9	38.0	6.34E-02	544.7
0.1	3.50E-05	3.9	38	3.41E-03	429.8	39.0	6.49E-02	546.5
0.2	1.00E-05	3.9	39	3.62E-03	432.2	40.0	6.64E-02	548.0
0.3	-2.25E-05	3.9	40	3.92E-03	434.3	41.0	6.79E-02	549.6
0.4	0.00E+00	3.9	5.0	5.93E-03	447.0	42.0	6.93E-02	551.1
0.5	4.50E-05	3.9	6.0	8.36E-03	463.7	43.0	7.07E-02	552.8
0.6	3.50E-05	4.0	7.0	1.09E-02	465.3	44.0	7.37E-02	558.4
0.7	2.00E-05	4.1	8.0	1.27E-02	468.8	45.0	7.57E-02	560.1
0.8	-2.25E-05	4.1	9.0	1.44E-02	471.7	46.0	7.64E-02	542.4
0.9	3.25E-05	4.3	10.0	1.57E-02	474.5	47.0	7.78E-02	564.0
1.0	3.00E-05	4.2	11.0	1.72E-02	480.0	48.0	8.00E-02	565.4
1.1	1.00E-05	4.4	12.0	2.05E-02	486.4	49.0	8.20E-02	567.0
1.2	4.00E-05	4.6	13.0	2.15E-02	480.6	50.0	8.38E-02	568.5
1.3	0.00E+00	4.8	14.0	2.28E-02	493.8	51.0	8.55E-02	569.8
1.4	2.50E-05	5.0	15.0	2.53E-02	488.3	52.0	8.71E-02	570.9
1.5	4.00E-05	5.1	16.0	2.63E-02	490.4	53.0	8.86E-02	572.1
1.6	-5.00E-06	5.5	17.0	2.78E-02	503.4	54.0	9.00E-02	573.4
1.7	1.75E-05	6.0	18.0	3.02E-02	498.2	55.0	9.14E-02	574.5
1.8	8.75E-05	26.7	19.0	3.16E-02	500.3	56.0	9.28E-02	575.8
1.9	3.80E-04	82.4	20.0	3.28E-02	502.3	57.0	9.41E-02	577.1
2.0	5.93E-04	125.7	21.0	3.47E-02	514.2	58.0	9.54E-02	578.3
2.1	7.55E-04	158.9	22.0	3.71E-02	509.8	59.0	9.81E-02	589.1
2.2	8.55E-04	184.6	23.0	3.86E-02	512.1	60.0	1.00E-01	585.2
2.3	1.01E-03	205.4	24.0	4.00E-02	513.9	61.0	1.01E-01	567.5
2.4	1.13E-03	231.9	25.0	4.14E-02	515.6	65.0	1.08E-01	571.2
2.5	1.28E-03	259.3	26.0	4.28E-02	517.3	70.0	1.16E-01	597.5
2.6	1.36E-03	281.1	27.0	4.41E-02	519.4	75.0	1.26E-01	606.5
2.7	1.47E-03	298.8	28.0	4.72E-02	525.2	80.0	1.34E-01	615.4
2.8	1.58E-03	318.6	29.0	4.91E-02	527.5	85.0	1.42E-01	613.1
2.9	1.66E-03	340.5	30.0	5.08E-02	529.4	90.0	1.51E-01	620.4
3.0	1.77E-03	360.1	31.0	5.23E-02	530.6	95.0	1.58E-01	624.1
3.1	1.93E-03	378.1	32.0	5.38E-02	532.1	100.0	1.67E-01	630.4
3.2	2.08E-03	391.7	33.0	5.51E-02	533.4	105.0	1.74E-01	632.8
3.3	2.26E-03	403.2	34.0	5.64E-02	535.0	110.0	1.84E-01	623.4
3.4	2.40E-03	412.5	35.0	5.76E-02	536.3	115.0	1.91E-01	640.1
3.5	2.67E-03	418.9	36.0	5.89E-02	538.0	120.0	2.00E-01	642.4
3.6	2.88E-03	423.5	37.0	6.16E-02	549.3	125.0	2.09E-01	633.5

ตารางที่ ค.31.6(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
130.0	2.17E-01	649.6	195.0	3.25E-01	661.5	260.0	4.35E-01	636.5
135.0	2.25E-01	650.0	200.0	3.33E-01	661.5	265.0	4.43E-01	624.7
140.0	2.33E-01	651.7	205.0	3.41E-01	661.4	270.0	4.51E-01	617.9
145.0	2.42E-01	657.6	210.0	3.50E-01	661.2	275.0	4.60E-01	605.3
150.0	2.50E-01	657.4	215.0	3.59E-01	660.5	285.0	4.76E-01	576.0
155.0	2.58E-01	656.9	220.0	3.68E-01	659.1	290.0	4.85E-01	557.6
160.0	2.66E-01	657.8	225.0	3.74E-01	626.3	295.0	4.93E-01	537.9
165.0	2.74E-01	658.9	230.0	3.84E-01	660.8	300.0	5.01E-01	512.2
170.0	2.84E-01	666.0	235.0	3.91E-01	652.2	305.0	5.10E-01	481.9
175.0	2.93E-01	651.6	240.0	4.00E-01	651.6	310.0	5.18E-01	459.0
180.0	2.99E-01	661.6	245.0	4.10E-01	654.4	315.0	5.26E-01	424.4
185.0	3.08E-01	661.5	250.0	4.18E-01	648.9			
190.0	3.17E-01	661.6	255.0	4.26E-01	643.3			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.7 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA07

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	1.25E-05	3.1	3.7	3.68E-03	421.8	38.0	6.38E-02	550.0
0.1	2.50E-05	3.2	3.8	3.95E-03	431.5	39.0	6.53E-02	551.0
0.2	4.50E-05	3.2	3.9	4.27E-03	436.8	40.0	6.66E-02	552.5
0.3	5.00E-05	3.3	4.0	4.57E-03	441.2	41.0	6.78E-02	553.5
0.4	3.25E-05	3.2	5.0	6.83E-03	461.6	42.0	6.90E-02	555.0
0.5	1.00E-05	3.3	6.0	8.53E-03	469.3	43.0	7.21E-02	565.1
0.6	2.75E-05	3.3	7.0	1.01E-02	474.6	44.0	7.37E-02	559.8
0.7	1.25E-05	3.4	8.0	1.33E-02	485.7	45.0	7.52E-02	561.2
0.8	1.50E-05	3.4	9.0	1.52E-02	488.5	46.0	7.64E-02	562.1
0.9	2.50E-05	3.5	10.0	1.68E-02	491.3	47.0	7.76E-02	563.4
1.0	4.75E-05	3.5	11.0	1.83E-02	493.8	48.0	7.89E-02	564.7
1.1	2.25E-05	3.5	12.0	1.98E-02	496.1	49.0	8.21E-02	569.8
1.2	2.50E-05	3.5	13.0	2.12E-02	498.1	50.0	8.39E-02	570.7
1.3	1.50E-05	3.6	14.0	2.26E-02	500.0	51.0	8.56E-02	572.0
1.4	4.25E-05	3.9	15.0	2.39E-02	501.9	52.0	8.72E-02	573.4
1.5	-2.00E-05	4.0	16.0	2.68E-02	510.8	53.0	8.87E-02	574.4
1.6	3.75E-05	4.1	17.0	2.86E-02	506.3	54.0	9.01E-02	575.4
1.7	-2.50E-06	4.3	18.0	2.97E-02	508.2	55.0	9.16E-02	576.5
1.8	3.25E-05	4.5	19.0	3.07E-02	510.1	56.0	9.29E-02	577.5
1.9	1.50E-05	4.8	20.0	3.38E-02	516.4	57.0	9.42E-02	578.4
2.0	4.75E-05	5.0	21.0	3.49E-02	514.8	58.0	9.56E-02	579.4
2.1	4.75E-05	5.8	22.0	3.59E-02	516.5	59.0	9.73E-02	590.3
2.2	5.73E-04	102.8	23.0	3.86E-02	527.7	60.0	1.00E-01	585.5
2.3	9.85E-04	185.5	23.9	4.01E-02	522.8	61.0	1.02E-01	573.2
2.4	1.40E-03	246.3	25.0	4.16E-02	524.6	65.0	1.08E-01	590.9
2.5	1.67E-03	290.9	26.0	4.27E-02	526.0	70.0	1.16E-01	595.3
2.6	1.91E-03	323.5	27.0	4.40E-02	527.6	75.0	1.26E-01	598.3
2.7	2.16E-03	347.1	28.0	4.71E-02	531.9	80.0	1.33E-01	603.3
2.8	2.36E-03	364.9	29.0	4.86E-02	533.5	85.0	1.42E-01	609.7
2.9	2.53E-03	377.7	30.0	5.00E-02	535.0	90.0	1.49E-01	613.0
3.0	2.72E-03	387.5	31.0	5.13E-02	536.3	95.0	1.59E-01	606.3
3.1	2.87E-03	394.9	32.0	5.26E-02	537.7	100.0	1.66E-01	623.4
3.2	3.07E-03	400.8	33.0	5.41E-02	548.8	105.0	1.75E-01	624.9
3.3	3.20E-03	405.7	34.0	5.70E-02	541.8	110.0	1.84E-01	627.0
3.4	3.36E-03	409.5	35.0	5.82E-02	543.5	115.0	1.92E-01	628.6
3.5	3.45E-03	412.8	36.0	5.95E-02	544.9	120.0	1.99E-01	630.4
3.6	3.56E-03	415.8	37.0	6.07E-02	546.6	125.0	2.08E-01	635.4

ตารางที่ ค.3.1.7(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
130.0	2.17E-01	635.3	180.0	3.00E-01	643.1	230.0	3.83E-01	618.0
135.0	2.26E-01	636.4	185.0	3.08E-01	615.5	235.0	3.92E-01	618.2
140.0	2.34E-01	637.1	190.0	3.17E-01	643.9	239.0	4.01E-01	578.3
145.0	2.41E-01	637.9	195.0	3.26E-01	642.5	245.0	4.09E-01	605.2
150.0	2.51E-01	640.0	200.0	3.33E-01	642.3	250.0	4.17E-01	593.5
155.0	2.58E-01	641.4	205.0	3.42E-01	641.3	255.0	4.26E-01	578.3
160.0	2.67E-01	641.2	210.0	3.49E-01	624.1	260.0	4.34E-01	539.9
165.0	2.74E-01	623.6	215.0	3.59E-01	639.6	265.0	4.43E-01	444.7
170.0	2.83E-01	628.4	220.0	3.67E-01	636.3	270.0	4.51E-01	230.6
175.0	2.92E-01	626.2	225.0	3.75E-01	632.4	275.0	4.59E-01	44.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.31.8 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFA08

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	7.50E-06	-0.2	3.2	3.61E-03	386.3	36.0	5.94E-02	516.9
0.1	1.25E-05	-0.2	3.3	3.76E-03	388.9	37.0	6.08E-02	518.2
0.2	3.25E-05	-0.2	3.4	3.97E-03	391.3	38.0	6.20E-02	519.6
0.3	1.00E-05	-0.2	3.5	4.18E-03	393.3	39.0	6.52E-02	522.7
0.4	-5.00E-06	-0.2	3.6	4.33E-03	395.1	40.0	6.65E-02	524.3
0.5	-2.50E-06	-0.2	3.7	4.47E-03	396.8	45.0	7.45E-02	525.5
0.6	2.75E-05	-0.2	3.8	4.63E-03	398.2	46.0	7.59E-02	535.5
0.7	1.00E-05	-0.2	3.9	4.80E-03	399.5	47.0	7.75E-02	540.6
0.8	-1.50E-05	-0.2	4.0	4.93E-03	401.0	48.0	8.04E-02	540.9
0.9	7.50E-06	-0.1	5.0	7.27E-03	425.0	49.0	8.23E-02	542.5
1.0	1.25E-05	-0.1	6.0	9.22E-03	429.2	50.0	8.37E-02	523.5
1.1	3.75E-05	-0.1	7.0	1.06E-02	434.5	51.0	8.43E-02	543.6
1.2	2.38E-04	41.6	8.0	1.22E-02	448.8	52.0	8.60E-02	544.9
1.3	4.45E-04	96.2	9.0	1.49E-02	450.1	53.0	8.75E-02	546.0
1.4	7.13E-04	138.3	10.0	1.67E-02	453.6	54.0	8.91E-02	547.3
1.5	8.45E-04	171.1	15.0	2.39E-02	465.8	55.0	9.23E-02	552.5
1.6	1.01E-03	198.7	16.0	2.70E-02	475.3	56.0	9.32E-02	533.6
1.7	1.18E-03	227.3	17.0	2.77E-02	467.5	57.0	9.51E-02	553.6
1.8	1.23E-03	249.0	18.0	3.01E-02	481.7	58.0	9.73E-02	554.4
1.9	1.37E-03	265.7	19.0	3.12E-02	471.5	59.0	9.88E-02	537.6
2.0	1.43E-03	282.5	20.0	3.32E-02	486.7	60.0	9.95E-02	554.9
2.1	1.60E-03	302.5	21.0	3.51E-02	475.9	61.0	1.01E-01	555.5
2.2	1.71E-03	317.2	22.0	3.63E-02	491.5	65.0	1.08E-01	557.7
2.3	1.85E-03	328.1	23.0	3.88E-02	493.9	70.0	1.16E-01	557.2
2.4	1.97E-03	336.4	24.0	3.93E-02	482.4	75.0	1.25E-01	511.8
2.5	2.04E-03	342.9	25.0	4.15E-02	498.2	80.0	1.34E-01	486.1
2.6	2.28E-03	356.1	30.0	5.04E-02	507.8	85.0	1.41E-01	459.1
2.7	2.55E-03	364.6	31.0	5.21E-02	509.5	90.0	1.50E-01	385.3
2.8	2.74E-03	370.9	32.0	5.37E-02	511.3	95.0	1.59E-01	318.4
2.9	2.97E-03	375.9	33.0	5.53E-02	512.8	100.0	1.67E-01	231.2
3.0	3.20E-03	379.9	34.0	5.67E-02	514.2	105.0	1.75E-01	161.0
3.1	3.44E-03	383.4	35.0	5.81E-02	515.7	110.0	1.83E-01	85.8

ค.32 ชิ้นงานที่ทดสอบที่พิสัยความเครียด 20%

ตารางที่ ค.321 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO1

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	6.25E-05	-3.0	3.4	6.26E-03	444.1	32.0	5.30E-02	550.1
0.1	2.45E-04	28.8	3.5	6.30E-03	442.2	33.0	5.56E-02	550.3
0.2	5.73E-04	100.4	3.6	6.36E-03	441.2	34.0	5.60E-02	539.5
0.3	8.58E-04	155.9	3.7	6.38E-03	440.9	35.0	5.81E-02	555.7
0.4	1.12E-03	198.0	3.8	6.37E-03	440.8	36.0	6.05E-02	552.9
0.5	1.23E-03	230.4	3.9	6.41E-03	440.9	37.0	6.09E-02	542.6
0.6	1.39E-03	255.3	4.0	6.46E-03	441.2	38.0	6.32E-02	560.8
0.7	1.49E-03	274.4	5.0	8.38E-03	464.3	39.0	6.54E-02	562.5
0.8	1.54E-03	289.2	6.0	1.06E-02	472.6	40.0	6.68E-02	546.6
0.9	1.62E-03	300.9	7.0	1.25E-02	478.4	41.0	6.75E-02	563.6
1.0	1.66E-03	310.0	8.0	1.39E-02	482.4	42.0	6.93E-02	565.1
1.1	1.69E-03	317.2	9.0	1.53E-02	485.4	43.0	7.09E-02	566.6
1.2	1.77E-03	323.6	10.0	1.65E-02	487.9	44.0	7.25E-02	568.1
1.3	1.88E-03	345.1	11.0	1.75E-02	490.3	45.0	7.42E-02	575.7
1.4	2.01E-03	364.0	12.0	2.01E-02	502.6	46.0	7.75E-02	571.2
1.5	2.11E-03	377.5	13.0	2.17E-02	495.3	47.0	7.80E-02	563.2
1.6	2.15E-03	387.2	14.0	2.26E-02	509.6	48.0	8.04E-02	579.2
1.7	2.30E-03	394.4	15.0	2.53E-02	503.9	49.0	8.19E-02	563.8
1.8	2.32E-03	400.0	16.0	2.63E-02	505.9	50.0	8.29E-02	580.3
1.9	2.49E-03	410.6	17.0	2.83E-02	519.6	51.0	8.48E-02	581.1
2.0	2.72E-03	418.1	18.0	3.04E-02	516.0	52.0	8.66E-02	582.3
2.1	2.99E-03	423.8	19.0	3.21E-02	518.0	53.0	8.83E-02	583.8
2.2	3.17E-03	428.3	20.0	3.36E-02	520.0	54.0	9.00E-02	585.0
2.3	3.46E-03	432.2	21.0	3.50E-02	521.7	55.0	9.15E-02	586.2
2.4	3.72E-03	435.6	22.0	3.64E-02	523.4	56.0	9.31E-02	587.4
2.5	3.98E-03	438.6	23.0	3.77E-02	525.0	57.0	9.46E-02	588.4
2.6	4.29E-03	441.1	24.0	3.95E-02	537.6	58.0	9.60E-02	589.3
2.7	4.56E-03	443.6	25.0	4.22E-02	534.4	59.0	9.74E-02	590.7
2.8	4.83E-03	445.6	26.0	4.30E-02	521.7	60.0	1.01E-01	591.7
2.9	5.16E-03	447.7	27.0	4.50E-02	539.7	65.0	1.08E-01	598.5
3.0	5.41E-03	449.3	28.0	4.68E-02	525.8	70.0	1.17E-01	591.5
3.1	5.69E-03	450.9	29.0	4.78E-02	543.8	75.0	1.25E-01	611.4
3.2	5.94E-03	452.2	30.0	5.04E-02	545.7	80.0	1.33E-01	615.1
3.3	6.18E-03	449.4	31.0	5.14E-02	532.2	85.0	1.42E-01	611.8

ตารางที่ ค.321 (ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
90.0	1.50E-01	619.9	165.0	2.76E-01	649.6	230.0	3.83E-01	619.8
95.0	1.58E-01	625.9	170.0	2.84E-01	651.0	235.0	3.91E-01	611.6
100.0	1.68E-01	631.6	175.0	2.91E-01	651.3	240.0	3.99E-01	602.6
105.0	1.74E-01	630.0	180.0	3.00E-01	645.7	245.0	4.09E-01	594.7
110.0	1.83E-01	632.8	185.0	3.07E-01	650.1	250.0	4.17E-01	575.5
115.0	1.93E-01	639.5	190.0	3.17E-01	650.1	255.0	4.26E-01	564.1
120.0	2.00E-01	640.4	195.0	3.27E-01	648.7	260.0	4.34E-01	544.5
125.0	2.07E-01	642.4	200.0	3.35E-01	647.0	265.0	4.42E-01	518.1
140.0	2.33E-01	648.3	205.0	3.42E-01	645.1	270.0	4.50E-01	497.9
145.0	2.41E-01	649.3	210.0	3.50E-01	642.6	275.0	4.59E-01	467.2
150.0	2.50E-01	650.3	215.0	3.58E-01	640.1	280.0	4.67E-01	442.7
155.0	2.58E-01	650.7	220.0	3.67E-01	633.2			
160.0	2.67E-01	651.0	225.0	3.75E-01	627.0			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.322 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO2

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	0.00E+00	0.1	3.7	5.17E-03	376.9	38.0	6.35E-02	535.1
0.1	2.50E-06	0.1	3.8	5.24E-03	378.3	39.0	6.51E-02	536.6
0.2	1.25E-05	0.1	3.9	5.39E-03	379.9	40.0	6.65E-02	538.1
0.3	0.00E+00	0.1	4.0	5.49E-03	381.4	41.0	6.79E-02	539.3
0.4	-5.25E-05	0.2	5.0	8.39E-03	413.1	42.0	6.93E-02	540.6
0.5	1.50E-05	0.2	6.0	9.60E-03	421.3	43.0	7.05E-02	541.8
0.6	2.50E-06	0.3	7.0	1.06E-02	427.3	44.0	7.34E-02	553.6
0.7	-1.75E-05	0.1	8.0	1.34E-02	442.9	45.0	7.55E-02	548.6
0.8	1.75E-04	37.1	9.0	1.43E-02	445.6	46.0	7.72E-02	550.1
0.9	4.53E-04	99.5	10.0	1.65E-02	464.8	47.0	7.89E-02	551.3
1.0	7.38E-04	147.2	11.0	1.82E-02	456.9	48.0	8.04E-02	552.6
1.1	9.20E-04	183.1	12.0	1.91E-02	475.0	49.0	8.18E-02	553.7
1.2	1.09E-03	209.6	13.0	2.21E-02	474.2	50.0	8.32E-02	554.7
1.3	1.26E-03	228.9	14.0	2.26E-02	469.4	51.0	8.45E-02	555.9
1.4	1.41E-03	243.6	15.0	2.50E-02	487.5	52.0	8.58E-02	557.1
1.5	1.53E-03	255.0	16.0	2.65E-02	477.2	53.0	8.71E-02	558.1
1.6	1.62E-03	264.0	17.0	2.75E-02	493.4	54.0	8.91E-02	569.8
1.7	1.74E-03	271.2	18.0	3.05E-02	486.7	55.0	9.20E-02	565.6
1.8	1.82E-03	277.6	19.0	3.11E-02	486.9	56.0	9.32E-02	547.0
1.9	2.04E-03	293.7	20.0	3.32E-02	502.5	57.0	9.41E-02	567.5
2.0	2.32E-03	307.2	21.0	3.51E-02	495.0	58.0	9.61E-02	568.6
2.1	2.60E-03	317.9	22.0	3.60E-02	497.1	59.0	9.80E-02	569.8
2.2	2.83E-03	326.4	23.0	3.83E-02	509.9	60.0	9.98E-02	571.1
2.3	3.00E-03	333.4	23.9	4.02E-02	505.0	65.0	1.08E-01	576.3
2.4	3.21E-03	339.5	25.0	4.17E-02	507.0	70.0	1.17E-01	587.9
2.5	3.45E-03	344.6	26.0	4.31E-02	508.8	75.0	1.26E-01	587.6
2.6	3.64E-03	349.0	27.0	4.43E-02	510.5	80.0	1.33E-01	594.4
2.7	3.77E-03	352.8	28.0	4.56E-02	512.4	85.0	1.41E-01	599.0
2.8	3.92E-03	356.6	29.0	4.87E-02	517.2	90.0	1.49E-01	601.4
2.9	4.08E-03	359.6	30.0	5.03E-02	519.5	95.0	1.58E-01	613.3
3.0	4.24E-03	362.6	31.0	5.19E-02	521.2	100.0	1.66E-01	617.1
3.1	4.43E-03	365.0	32.0	5.34E-02	522.7	105.0	1.75E-01	612.6
3.2	4.58E-03	367.4	33.0	5.47E-02	524.1	110.0	1.83E-01	580.2
3.3	4.66E-03	369.7	34.0	5.61E-02	525.6	115.0	1.92E-01	617.5
3.4	4.79E-03	371.7	35.0	5.74E-02	527.1	120.0	2.01E-01	609.4
3.5	4.93E-03	373.6	36.0	5.96E-02	538.8	125.0	2.08E-01	624.9
3.6	5.02E-03	375.3	37.0	6.19E-02	533.4	140.0	2.33E-01	631.2

ตารางที่ ค.3.22(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
145.0	2.42E-01	632.3	190.0	3.16E-01	636.8	235.0	3.92E-01	580.7
150.0	2.50E-01	633.3	195.0	3.26E-01	633.4	240.0	4.00E-01	569.7
155.0	2.57E-01	634.5	200.0	3.36E-01	630.4	245.0	4.09E-01	558.3
160.0	2.66E-01	634.4	205.0	3.40E-01	629.8	250.0	4.17E-01	539.9
165.0	2.74E-01	636.8	210.0	3.50E-01	623.3	255.0	4.26E-01	518.6
170.0	2.84E-01	636.7	215.0	3.59E-01	617.1	260.0	4.34E-01	494.8
175.0	2.92E-01	635.9	220.0	3.66E-01	610.6	265.0	4.42E-01	463.8
180.0	3.00E-01	635.2	225.0	3.75E-01	602.9	270.0	4.50E-01	438.3
185.0	3.08E-01	644.2	230.0	3.84E-01	590.8	275.0	4.59E-01	401.8



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.323 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO3

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	-1.00E-05	-2.3	37	6.00E-03	428.6	38.0	6.27E-02	535.7
0.1	2.35E-04	37.5	38	6.08E-03	428.9	39.0	6.40E-02	537.1
0.2	4.65E-04	88.2	39	6.14E-03	429.1	40.0	6.59E-02	548.9
0.3	6.70E-04	127.6	40	6.30E-03	429.4	41.0	6.90E-02	545.8
0.4	8.25E-04	158.4	5.0	7.70E-03	444.8	42.0	6.98E-02	532.9
0.5	9.58E-04	182.2	6.0	1.03E-02	446.5	43.0	7.15E-02	549.2
0.6	1.03E-03	200.6	7.0	1.11E-02	448.9	44.0	7.39E-02	550.9
0.7	1.13E-03	215.1	8.0	1.31E-02	465.5	45.0	7.48E-02	535.9
0.8	1.14E-03	226.7	9.0	1.52E-02	463.8	46.0	7.62E-02	553.1
0.9	1.21E-03	239.7	10.0	1.62E-02	466.5	47.0	7.83E-02	554.4
1.0	1.35E-03	265.0	11.0	1.78E-02	480.7	48.0	8.03E-02	555.9
1.1	1.43E-03	284.6	12.0	2.02E-02	477.8	49.0	8.21E-02	557.4
1.2	1.50E-03	299.8	13.0	2.15E-02	480.1	50.0	8.38E-02	558.7
1.3	1.55E-03	311.9	14.0	2.27E-02	482.1	51.0	8.56E-02	559.9
1.4	1.58E-03	321.7	15.0	2.45E-02	494.5	52.0	8.71E-02	561.1
1.5	1.67E-03	337.6	16.0	2.71E-02	491.4	53.0	8.87E-02	562.3
1.6	1.80E-03	357.4	17.0	2.88E-02	493.7	54.0	9.01E-02	563.4
1.7	1.90E-03	372.1	18.0	3.03E-02	495.8	55.0	9.16E-02	564.4
1.8	2.05E-03	383.3	19.0	3.18E-02	497.6	56.0	9.29E-02	565.4
1.9	2.18E-03	391.6	20.0	3.33E-02	499.4	57.0	9.42E-02	566.4
2.0	2.26E-03	397.9	21.0	3.46E-02	501.1	58.0	9.56E-02	567.2
2.1	2.36E-03	402.5	22.0	3.59E-02	502.8	59.0	9.69E-02	568.6
2.2	2.50E-03	406.3	23.0	3.73E-02	504.6	60.0	9.99E-02	577.4
2.3	2.67E-03	413.0	24.0	4.03E-02	511.8	65.0	1.09E-01	578.8
2.4	2.96E-03	419.1	25.0	4.21E-02	502.4	70.0	1.16E-01	583.2
2.5	3.32E-03	422.1	26.0	4.27E-02	515.0	75.0	1.24E-01	587.4
2.6	3.66E-03	424.3	27.0	4.50E-02	518.0	80.0	1.34E-01	601.7
2.7	3.95E-03	426.5	28.0	4.71E-02	520.1	85.0	1.41E-01	604.6
2.8	4.30E-03	428.4	29.0	4.90E-02	521.3	90.0	1.49E-01	599.5
2.9	4.60E-03	430.1	30.0	4.97E-02	504.4	95.0	1.59E-01	605.8
3.0	4.95E-03	431.4	31.0	5.07E-02	522.6	100.0	1.67E-01	610.7
3.1	5.20E-03	432.6	32.0	5.23E-02	529.6	105.0	1.75E-01	622.3
3.2	5.48E-03	431.6	33.0	5.54E-02	528.0	110.0	1.82E-01	616.7
3.3	5.62E-03	428.7	34.0	5.69E-02	529.9	115.0	1.91E-01	627.0
3.4	5.72E-03	428.0	35.0	5.85E-02	531.5	120.0	2.00E-01	623.2
3.5	5.83E-03	428.0	36.0	6.00E-02	532.9	125.0	2.08E-01	624.8
3.6	5.92E-03	428.3	37.0	6.14E-02	534.3	140.0	2.34E-01	622.7

ตารางที่ ค.3.23(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
145.0	2.41E-01	637.2	190.0	3.16E-01	634.0	235.0	3.91E-01	568.6
150.0	2.49E-01	627.1	195.0	3.25E-01	632.6	240.0	4.00E-01	544.7
155.0	2.58E-01	636.7	200.0	3.34E-01	630.3	245.0	4.09E-01	556.1
160.0	2.67E-01	636.9	205.0	3.41E-01	617.5	250.0	4.17E-01	541.2
165.0	2.75E-01	636.5	210.0	3.50E-01	609.6	255.0	4.26E-01	514.7
170.0	2.84E-01	636.5	215.0	3.59E-01	614.2	260.0	4.34E-01	496.4
175.0	2.92E-01	636.2	220.0	3.67E-01	609.7	265.0	4.43E-01	469.5
180.0	3.01E-01	635.5	225.0	3.76E-01	601.3	270.0	4.51E-01	441.0
185.0	3.08E-01	635.0	230.0	3.84E-01	591.2	275.0	4.59E-01	406.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.324 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO4

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	2.00E-05	46	37	2.66E-03	418.9	38.0	6.43E-02	595.6
0.1	3.00E-05	46	38	2.85E-03	429.8	39.0	6.47E-02	579.7
0.2	3.00E-05	47	39	3.09E-03	439.1	40.0	6.64E-02	598.2
0.3	1.00E-05	45	40	3.30E-03	447.0	41.0	6.85E-02	600.0
0.4	2.00E-05	45	5.0	6.19E-03	487.9	42.0	7.06E-02	601.8
0.5	-2.25E-05	47	6.0	8.87E-03	502.6	43.0	7.25E-02	603.5
0.6	-2.50E-06	47	7.0	1.06E-02	491.8	44.0	7.42E-02	605.1
0.7	6.00E-05	46	8.0	1.18E-02	511.3	45.0	7.58E-02	606.3
0.8	6.00E-05	47	9.0	1.40E-02	516.3	46.0	7.73E-02	607.5
0.9	2.50E-05	46	10.0	1.60E-02	520.5	47.0	7.88E-02	608.8
1.0	5.00E-06	47	11.0	1.77E-02	524.1	48.0	8.01E-02	610.0
1.1	1.00E-05	47	12.0	1.93E-02	527.1	49.0	8.15E-02	611.3
1.2	6.50E-05	47	13.0	2.07E-02	529.9	50.0	8.28E-02	612.5
1.3	4.00E-05	47	14.0	2.21E-02	532.8	51.0	8.41E-02	613.8
1.4	3.50E-05	47	15.0	2.55E-02	541.6	52.0	8.54E-02	615.0
1.5	5.50E-05	47	16.0	2.65E-02	532.6	53.0	8.74E-02	628.4
1.6	8.00E-05	48	17.0	2.82E-02	548.3	54.0	9.04E-02	618.7
1.7	4.25E-05	47	18.0	3.03E-02	536.3	55.0	9.17E-02	620.6
1.8	3.00E-05	48	19.0	3.11E-02	552.3	56.0	9.30E-02	621.9
1.9	7.50E-05	11.5	20.0	3.38E-02	555.1	57.0	9.42E-02	623.5
2.0	2.58E-04	58.7	21.0	3.49E-02	539.9	58.0	9.67E-02	634.4
2.1	4.95E-04	97.5	22.0	3.64E-02	558.8	59.0	9.88E-02	629.3
2.2	6.85E-04	128.7	23.0	3.87E-02	561.0	60.0	1.00E-01	630.6
2.3	8.43E-04	157.6	24.0	4.08E-02	563.2	65.0	1.08E-01	636.4
2.4	9.03E-04	184.8	25.0	4.19E-02	544.7	70.0	1.18E-01	646.4
2.5	1.02E-03	207.6	26.0	4.26E-02	565.4	75.0	1.25E-01	628.8
2.6	1.09E-03	232.1	27.0	4.44E-02	567.3	80.0	1.33E-01	656.2
2.7	1.28E-03	254.0	28.0	4.60E-02	569.2	85.0	1.42E-01	661.1
2.8	1.37E-03	276.2	29.0	4.76E-02	570.9	90.0	1.50E-01	664.5
2.9	1.54E-03	298.2	30.0	4.91E-02	573.0	95.0	1.58E-01	667.8
3.0	1.64E-03	316.7	31.0	5.20E-02	584.3	100.0	1.67E-01	669.5
3.1	1.69E-03	337.0	32.0	5.40E-02	574.7	105.0	1.75E-01	673.9
3.2	1.88E-03	354.3	33.0	5.48E-02	576.7	110.0	1.85E-01	679.1
3.3	1.98E-03	369.5	34.0	5.66E-02	588.4	115.0	1.91E-01	682.4
3.4	2.14E-03	386.2	35.0	5.91E-02	580.1	120.0	2.01E-01	684.2
3.5	2.35E-03	399.1	36.0	5.97E-02	579.8	125.0	2.09E-01	685.6
3.6	2.48E-03	409.6	37.0	6.17E-02	593.7	140.0	2.34E-01	687.4

ตารางที่ ค.324(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
145.0	2.42E-01	666.6	190.0	3.17E-01	690.3	235.0	3.91E-01	617.8
150.0	2.49E-01	692.4	195.0	3.26E-01	687.7	240.0	3.99E-01	609.8
155.0	2.58E-01	693.2	200.0	3.35E-01	684.0	245.0	4.08E-01	595.6
160.0	2.67E-01	693.6	205.0	3.42E-01	664.1	250.0	4.16E-01	575.2
165.0	2.75E-01	693.6	210.0	3.49E-01	673.0	255.0	4.24E-01	547.3
170.0	2.84E-01	693.3	215.0	3.59E-01	667.2	260.0	4.33E-01	523.3
175.0	2.92E-01	693.0	220.0	3.67E-01	644.0	265.0	4.41E-01	491.4
180.0	3.00E-01	692.4	225.0	3.75E-01	646.2	270.0	4.49E-01	448.9
185.0	3.08E-01	691.6	231.0	3.84E-01	635.7			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.325 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO5

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	7.75E-05	-0.4	3.7	4.36E-03	462.8	38.0	6.43E-02	589.5
0.1	7.75E-05	-0.3	3.8	4.50E-03	464.6	39.0	6.57E-02	589.2
0.2	1.10E-04	-0.1	3.9	4.68E-03	466.2	40.0	6.71E-02	590.7
0.3	9.75E-05	0.0	4.0	4.89E-03	467.5	41.0	6.82E-02	592.0
0.4	8.00E-05	0.1	5.0	6.84E-03	481.4	42.0	6.95E-02	593.6
0.5	7.50E-05	0.3	6.0	8.80E-03	490.8	43.0	7.07E-02	595.1
0.6	1.08E-04	0.4	7.0	1.05E-02	498.5	44.0	7.37E-02	601.5
0.7	9.00E-05	0.7	8.0	1.33E-02	508.8	45.0	7.58E-02	602.6
0.8	1.25E-04	2.3	9.0	1.48E-02	513.2	46.0	7.74E-02	592.4
0.9	2.88E-04	48.8	10.0	1.60E-02	516.4	47.0	7.77E-02	602.6
1.0	4.95E-04	90.7	11.0	1.75E-02	528.7	48.0	7.96E-02	606.9
1.1	6.50E-04	123.6	12.0	2.01E-02	527.6	49.0	8.15E-02	608.3
1.2	7.80E-04	149.4	13.0	2.17E-02	530.3	50.0	8.32E-02	609.7
1.3	8.53E-04	169.5	14.0	2.31E-02	532.8	51.0	8.49E-02	610.9
1.4	9.58E-04	185.9	15.0	2.46E-02	535.0	52.0	8.66E-02	612.2
1.5	1.01E-03	205.6	16.0	2.60E-02	537.3	53.0	8.81E-02	613.5
1.6	1.18E-03	236.2	17.0	2.82E-02	550.0	54.0	8.96E-02	614.8
1.7	1.26E-03	260.3	18.0	3.07E-02	547.0	55.0	9.11E-02	616.1
1.8	1.40E-03	279.6	19.0	3.19E-02	537.5	56.0	9.26E-02	617.4
1.9	1.44E-03	295.0	20.0	3.31E-02	553.9	57.0	9.49E-02	629.9
2.0	1.50E-03	307.8	21.0	3.54E-02	544.9	58.0	9.74E-02	618.1
2.1	1.60E-03	329.7	22.0	3.61E-02	557.2	59.0	9.85E-02	619.8
2.2	1.76E-03	353.3	23.0	3.89E-02	560.7	60.0	9.96E-02	621.0
2.3	1.85E-03	372.0	24.0	3.96E-02	550.9	65.0	1.08E-01	629.2
2.4	1.97E-03	387.4	25.0	4.16E-02	565.6	70.0	1.17E-01	636.9
2.5	2.09E-03	403.4	26.0	4.35E-02	554.1	75.0	1.25E-01	641.0
2.6	2.30E-03	419.6	27.0	4.46E-02	570.1	80.0	1.34E-01	648.6
2.7	2.44E-03	430.5	28.0	4.72E-02	571.7	85.0	1.42E-01	652.0
2.8	2.62E-03	438.1	29.0	4.79E-02	558.2	89.0	1.48E-01	654.6
2.9	2.77E-03	443.4	30.0	5.00E-02	575.4	94.0	1.56E-01	658.0
3.0	2.92E-03	447.6	31.0	5.24E-02	577.3	99.0	1.65E-01	649.4
3.1	3.12E-03	450.6	32.0	5.30E-02	558.3	100.0	1.73E-01	655.0
3.2	3.34E-03	453.4	33.0	5.44E-02	578.1	110.0	1.82E-01	650.2
3.3	3.50E-03	455.6	34.0	5.61E-02	579.8	115.0	1.89E-01	633.5
3.4	3.69E-03	457.8	35.0	5.77E-02	581.5	120.0	1.98E-01	672.3
3.5	3.91E-03	459.6	36.0	5.92E-02	583.6	125.0	2.07E-01	673.4
3.6	4.09E-03	461.5	37.0	6.24E-02	588.5	130.0	2.17E-01	674.8

ตารางที่ ค.3.25(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
135.0	2.25E-01	675.7	170.0	2.84E-01	670.3	205.0	3.43E-01	602.8
140.0	2.33E-01	676.3	175.0	2.91E-01	666.8	210.0	3.51E-01	570.9
145.0	2.42E-01	671.0	180.0	3.00E-01	659.1	215.0	3.58E-01	540.2
150.0	2.50E-01	675.1	185.0	3.08E-01	652.7	220.0	3.67E-01	548.4
155.0	2.58E-01	675.7	190.0	3.16E-01	644.0	225.0	3.75E-01	525.8
160.0	2.67E-01	674.0	195.0	3.25E-01	619.3	230.0	3.84E-01	484.7
165.0	2.74E-01	677.6	200.0	3.35E-01	617.0	235.0	3.93E-01	462.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.326 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO6

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	-7.50E-06	0.2	37	2.84E-03	408.3	38.0	6.25E-02	541.8
0.1	-7.50E-06	0.2	38	3.04E-03	414.3	39.0	6.44E-02	552.4
0.2	2.25E-05	0.3	39	3.20E-03	419.6	40.0	6.76E-02	549.0
0.3	2.50E-06	0.2	40	3.47E-03	424.6	41.0	6.83E-02	534.4
0.4	4.75E-05	0.2	5.0	6.03E-03	451.6	42.0	7.01E-02	552.9
0.5	1.75E-05	0.3	6.0	8.78E-03	462.7	43.0	7.25E-02	553.9
0.6	2.75E-05	0.2	7.0	1.13E-02	468.5	44.0	7.31E-02	537.6
0.7	1.50E-05	0.2	8.0	1.23E-02	453.5	45.0	7.48E-02	557.0
0.8	2.50E-06	0.3	9.0	1.38E-02	474.6	46.0	7.70E-02	558.0
0.9	2.25E-05	0.3	10.0	1.56E-02	478.4	47.0	7.91E-02	559.1
1.0	5.75E-05	0.2	11.0	1.73E-02	481.6	48.0	7.98E-02	540.0
1.1	0.00E+00	0.3	12.0	1.89E-02	484.3	49.0	8.08E-02	559.9
1.2	2.75E-05	0.4	13.0	2.15E-02	495.6	50.0	8.25E-02	562.6
1.3	2.25E-05	0.5	14.0	2.35E-02	492.0	51.0	8.44E-02	563.9
1.4	9.50E-05	0.4	15.0	2.50E-02	494.3	52.0	8.63E-02	565.0
1.5	9.00E-05	9.7	16.0	2.63E-02	496.1	53.0	8.80E-02	566.1
1.6	3.33E-04	46.9	17.0	2.76E-02	497.8	54.0	8.97E-02	567.4
1.7	4.55E-04	76.5	18.0	2.90E-02	505.2	55.0	9.13E-02	568.6
1.8	6.35E-04	100.3	19.0	3.21E-02	506.2	56.0	9.29E-02	569.5
1.9	6.60E-04	120.8	20.0	3.39E-02	508.5	57.0	9.44E-02	571.0
2.0	7.80E-04	143.1	21.0	3.56E-02	510.2	58.0	9.60E-02	572.8
2.1	8.80E-04	163.2	22.0	3.73E-02	512.0	59.0	9.91E-02	579.0
2.2	9.65E-04	183.3	23.0	3.88E-02	513.7	60.0	1.01E-01	571.2
2.3	1.09E-03	204.3	24.0	4.01E-02	515.1	65.0	1.08E-01	558.5
2.4	1.21E-03	225.6	25.0	4.15E-02	516.7	70.0	1.16E-01	586.5
2.5	1.28E-03	244.8	26.0	4.28E-02	518.2	75.0	1.25E-01	591.2
2.6	1.35E-03	264.2	27.0	4.41E-02	519.8	80.0	1.33E-01	595.5
2.7	1.45E-03	285.7	28.0	4.53E-02	521.4	85.0	1.42E-01	599.0
2.8	1.58E-03	305.7	29.0	4.84E-02	527.8	90.0	1.50E-01	601.8
2.9	1.66E-03	320.9	30.0	5.05E-02	529.9	95.0	1.58E-01	604.2
3.0	1.79E-03	338.0	31.0	5.23E-02	530.6	100.0	1.67E-01	605.9
3.1	1.90E-03	351.7	32.0	5.25E-02	521.3	105.0	1.75E-01	606.5
3.2	1.99E-03	362.1	33.0	5.44E-02	534.1	110.0	1.83E-01	605.6
3.3	2.13E-03	371.4	34.0	5.61E-02	535.4	115.0	1.92E-01	602.5
3.4	2.28E-03	383.1	35.0	5.78E-02	537.2	120.0	2.00E-01	596.7
3.5	2.43E-03	393.2	36.0	5.94E-02	538.6	125.0	2.09E-01	579.1
3.6	2.65E-03	401.3	37.0	6.10E-02	540.1	130.0	2.18E-01	544.2

ตารางที่ ค.3.26(ต่อ)

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
135.0	2.27E-01	468.3	150.0	2.50E-01	374.6	165.0	2.75E-01	91.3
140.0	2.34E-01	480.9	155.0	2.58E-01	266.6	170.0	2.84E-01	20.3
145.0	2.42E-01	416.8	160.0	2.68E-01	158.8			



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.327 ความเค้นและความเครียดที่เวลาใด ๆ ของชิ้นงาน PFBO7

เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)	เวลา (s)	e	s (MPa)
0.0	1.75E-05	-0.1	3.8	4.65E-03	389.5	40.0	6.64E-02	515.3
0.1	7.50E-06	-0.2	3.9	5.01E-03	391.3	41.0	6.82E-02	516.8
0.2	-1.25E-05	0.0	4.0	5.36E-03	392.0	42.0	6.99E-02	518.3
0.3	2.50E-05	0.7	5.0	6.75E-03	394.4	43.0	7.17E-02	519.6
0.4	5.50E-05	3.6	6.0	7.97E-03	400.8	44.0	7.33E-02	520.9
0.5	6.50E-05	7.8	7.0	1.14E-02	416.8	45.0	7.48E-02	522.4
0.6	1.03E-04	11.5	8.0	1.32E-02	421.8	46.0	7.63E-02	523.6
0.7	1.58E-04	14.6	9.0	1.46E-02	425.6	47.0	7.78E-02	525.1
0.8	1.53E-04	17.5	10.0	1.59E-02	429.4	48.0	8.08E-02	533.0
0.9	3.30E-04	39.7	11.0	1.71E-02	432.7	49.0	8.27E-02	526.8
1.0	4.05E-04	59.9	12.0	1.98E-02	445.8	50.0	8.39E-02	528.4
1.1	5.05E-04	76.0	13.0	2.21E-02	446.2	51.0	8.51E-02	529.7
1.2	6.08E-04	88.7	14.0	2.33E-02	448.0	52.0	8.63E-02	531.1
1.3	6.80E-04	99.0	15.0	2.45E-02	450.5	53.0	8.87E-02	540.9
1.4	7.60E-04	107.0	16.0	2.55E-02	453.0	54.0	9.09E-02	536.8
1.5	7.78E-04	113.4	17.0	2.84E-02	463.5	55.0	9.27E-02	537.6
1.6	8.70E-04	119.9	18.0	3.07E-02	465.9	56.0	9.44E-02	538.1
1.7	9.88E-04	140.6	19.0	3.19E-02	461.9	57.0	9.58E-02	538.7
1.8	1.09E-03	157.8	20.0	3.27E-02	464.5	58.0	9.72E-02	539.3
1.9	1.15E-03	171.4	21.0	3.47E-02	478.5	59.0	9.85E-02	540.4
2.0	1.30E-03	182.1	22.0	3.67E-02	474.0	60.0	9.98E-02	541.3
2.1	1.32E-03	190.8	23.0	3.80E-02	476.4	65.0	1.09E-01	549.1
2.2	1.41E-03	198.0	24.0	3.92E-02	478.5	70.0	1.17E-01	532.6
2.3	1.48E-03	213.8	25.0	4.06E-02	486.2	75.0	1.25E-01	555.7
2.4	1.65E-03	233.7	26.0	4.40E-02	489.6	80.0	1.34E-01	557.9
2.5	1.75E-03	249.3	27.0	4.53E-02	477.6	85.0	1.41E-01	559.3
2.6	1.85E-03	261.8	28.0	4.62E-02	494.9	90.0	1.49E-01	559.6
2.7	1.87E-03	271.9	29.0	4.90E-02	496.7	95.0	1.58E-01	557.6
2.8	1.97E-03	282.9	30.0	4.94E-02	482.8	100.0	1.68E-01	544.6
2.9	2.16E-03	306.4	31.0	5.17E-02	500.7	105.0	1.75E-01	528.8
3.0	2.26E-03	325.0	32.0	5.40E-02	502.3	110.0	1.84E-01	521.9
3.1	2.42E-03	339.3	33.0	5.46E-02	483.8	115.0	1.92E-01	492.0
3.2	2.57E-03	350.3	34.0	5.59E-02	503.4	120.0	1.99E-01	467.5
3.3	2.69E-03	358.5	35.0	5.76E-02	505.0	125.0	2.07E-01	408.8
3.4	2.94E-03	371.1	36.0	5.92E-02	506.9	130.0	2.16E-01	340.4
3.5	3.36E-03	379.8	37.0	6.08E-02	508.8	135.0	2.26E-01	235.6
3.6	3.82E-03	384.2	38.0	6.26E-02	511.2	140.0	2.34E-01	146.7
3.7	4.24E-03	387.3	39.0	6.46E-02	513.6	145.0	2.42E-01	80.5

ภาคผนวก ง

ข้อมูลพิกัดบนขอบรอยร้าว

ข้อมูลการนำเสนอได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นงานที่พิสัยความเครียดคงที่ 1.0% ประกอบด้วย 1) ชิ้นงานที่รอยร้าวเกิดในความยาวเกจ (valid) และ 2) ชิ้นงานที่รอยร้าวเกิดตรงจุดสัมผัสของ extensometer (invalid) ซึ่งจะไม่รหัสนี้ชิ้นงาน

ชิ้นงานจะรับภาระล้าเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ กัน ดังนี้ 1) 421 รอบ 2) 466 รอบ 3) 501 รอบ 4) 534 รอบ 5) 539 รอบ 6) PFA06 (575 รอบ) 7) 601 รอบ 8) PFA08 (647 รอบ) 9) 742 รอบ 10) 832 รอบ และ 11) 885 รอบ โดยข้อมูลจะแสดงในตารางที่ ง.1 ถึง ง.11 ตามลำดับ

ตารางที่ ง.1 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า 421 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับ	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	309	1279	6	486	1262	11	368	1329
2	341	1263	7	471	1283	12	337	1320
3	382	1257	8	446	1307	13	323	1302
4	416	1248	9	424	1320			
5	457	1250	10	400	1329			

ตารางที่ ง.2 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระล้า 466 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	217	1498	10	622	1415	19	465	1622
2	240	1457	11	664	1438	20	432	1626
3	278	1427	12	677	1470	21	384	1626
4	326	1400	13	640	1500	22	340	1609
5	369	1379	14	616	1530	23	301	1583
6	419	1370	15	590	1554	24	277	1560
7	484	1369	16	565	1574	25	241	1525
8	542	1380	17	539	1601			
9	587	1395	18	507	1613			

ตารางที่ ง.3 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระค่า 501 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	2.24	15.80	10	5.99	14.79	19	4.74	15.98
2	2.43	15.43	11	6.32	15.03	20	4.51	15.83
3	2.76	15.18	12	6.49	15.30	21	4.10	15.84
4	3.06	14.97	13	6.66	15.45	22	3.75	15.87
5	3.48	14.72	14	6.28	15.45	23	3.40	15.85
6	3.92	14.56	15	5.94	15.70	24	3.08	15.82
7	4.54	14.53	16	5.67	15.91	25	2.79	15.85
8	5.06	14.55	17	5.35	15.92	26	2.44	15.89
9	5.61	14.67	18	5.08	16.07			

ตารางที่ ง.4 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระค่า 534 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	0.64	16.26	14	5.91	14.16	27	5.28	17.25
2	0.86	15.80	15	6.22	14.36	28	4.82	17.40
3	1.08	15.46	16	6.54	14.61	29	4.44	17.45
4	1.38	15.14	17	6.82	14.86	30	4.03	17.57
5	1.63	14.81	18	7.14	15.14	31	3.60	17.65
6	1.95	14.57	19	7.30	15.43	32	3.11	17.61
7	2.43	14.23	20	7.46	15.80	33	2.54	17.54
8	2.91	14.03	21	7.11	15.91	34	2.08	17.38
9	3.52	13.85	22	6.81	16.18	35	1.64	17.23
10	3.98	13.82	23	6.56	16.42	36	1.27	16.95
11	4.52	13.83	24	6.29	16.71	37	0.86	16.63
12	5.08	13.87	25	6.01	16.90			
13	5.52	14.03	26	5.66	17.09			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.5 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระค่า 539 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	-1.09	11.87	13	3.28	8.34	25	2.90	11.11
2	-0.96	11.24	14	3.73	8.53	26	2.69	11.28
3	-0.79	10.89	15	4.21	8.72	27	2.41	11.58
4	-0.62	10.49	16	4.55	8.94	28	2.22	11.86
5	-0.49	10.02	17	4.74	9.27	29	1.90	11.98
6	-0.24	9.64	18	4.97	9.49	30	1.55	11.93
7	0.08	9.32	19	4.69	9.81	31	1.23	11.92
8	0.46	8.99	20	4.52	10.07	32	0.89	12.01
9	0.88	8.76	21	4.21	10.40	33	0.39	12.01
10	1.47	8.48	22	3.95	10.68	34	0.09	12.01
11	2.13	8.28	23	3.61	10.89	35	-0.23	11.88
12	2.72	8.28	24	3.32	11.00	36	-0.65	11.93

ตารางที่ ง.6 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงาน PFA07(ผ่านภาระค่า 575 รอบ)

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	219	905	1	285	867	1	431	895
2	242	886	2	324	851	2	457	868
3	267	874	3	364	845	3	490	877
4	297	885	4	399	854	4	533	890
5	310	896	5	441	860	5	564	906
6	296	915	6	478	866	6	585	931
7	275	904	7	453	868	7	600	959
8	247	912	8	439	884	8	584	968
			9	414	886	9	556	963
			10	391	884	10	526	947
			11	367	876	11	495	937
			12	341	879	12	471	922
			13	316	879	13	445	913

หมายเหตุ พื้นผิวแตกหักมีรอยร้าว 3 แห่ง

ตารางที่ ง.7 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระค่า 601 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	-0.87	9.47	11	3.68	7.76	21	2.17	10.30
2	-0.71	9.11	12	4.01	7.96	22	1.73	10.28
3	-0.48	8.81	13	4.36	8.34	23	1.33	10.25
4	-0.17	8.51	14	4.67	8.65	24	0.84	10.27
5	0.19	8.28	15	4.44	9.19	25	0.42	10.26
6	0.57	7.99	16	4.13	9.49	26	0.06	10.11
7	1.12	7.76	17	3.79	9.76	27	-0.31	9.93
8	1.72	7.61	18	3.42	10.01	28	-0.67	9.73
9	2.43	7.60	19	3.04	10.15			
10	3.08	7.62	20	2.61	10.25			

ตารางที่ ง.8 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงาน PFA08 (ผ่านภาระค่า 647 รอบ)

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	2.03	12.54	8	5.71	11.18	15	4.29	12.51
2	2.25	12.02	9	6.13	11.37	16	3.87	12.72
3	2.69	11.63	10	6.44	11.71	17	3.32	12.86
4	3.29	11.33	11	6.14	12.05	18	2.92	12.96
5	3.87	11.09	12	5.75	12.28	19	2.36	12.83
6	4.54	10.98	13	5.22	12.42			
7	5.15	11.05	14	4.73	12.49			

ตารางที่ ง.9 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระค่า 742 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	2.06	16.21	8	5.09	17.02	15	3.91	14.92
2	2.32	16.60	9	5.49	16.70	16	3.34	15.09
3	2.67	16.96	10	5.77	16.39	17	2.94	15.28
4	3.12	17.20	11	6.11	15.78	18	2.60	15.50
5	3.55	17.35	12	5.71	15.23	19	2.26	15.68
6	4.12	17.37	13	5.14	14.97			
7	4.63	17.30	14	4.48	14.92			

ตารางที่ ง.10 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 832 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	2.41	14.96	10	6.45	14.71	19	5.18	16.52
2	2.71	14.53	11	6.72	15.02	20	4.69	16.52
3	3.21	14.32	12	6.89	15.36	21	4.32	16.49
4	3.70	14.16	13	7.02	15.69	22	3.72	16.40
5	4.28	14.10	14	6.72	16.15	23	3.21	16.18
6	4.83	14.10	15	6.26	16.00	24	2.93	15.88
7	5.28	14.19	16	6.04	15.78	25	2.68	15.60
8	5.71	14.32	17	5.89	16.09	26	2.45	15.39
9	6.11	14.56	18	5.56	16.43			

ตารางที่ ง.11 พิกัด x, y บนขอบรอยร้าวของชิ้นงานที่ผ่านภาระด้า 885 รอบ

ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)	ลำดับที่	x(มม.)	y(มม.)
1	2.27	15.14	9	5.70	14.47	17	4.40	16.17
2	2.65	14.86	10	6.03	14.62	18	3.99	16.11
3	3.02	14.63	11	6.21	14.80	19	3.59	16.05
4	3.42	14.47	12	5.92	15.19	20	3.32	15.89
5	3.85	14.33	13	5.65	15.55	21	3.05	15.68
6	4.36	14.29	14	5.31	15.80	22	2.89	15.52
7	4.85	14.29	15	5.07	15.98	23	2.52	15.40
8	5.33	14.38	16	4.74	16.09			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายแผนพิชิต คุรุสรณานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2524 ที่ อำเภอแก่งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย