

ผลของความถี่ต่อความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุ เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-
335 เกรด พี.22



นายภาคภูมิ สิริคุตต์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

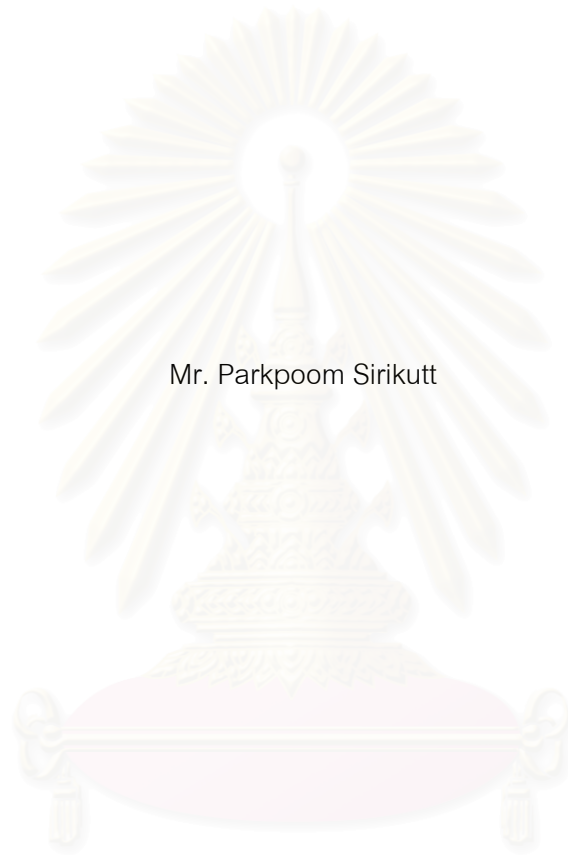
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-031-222-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECT OF FREQUENCY ON FATIGUE FAILURE IN HIGH TEMPERATURE FOR ASME
SA-335 GRADE P22 STEEL



Mr. Parkpoom Sirikutt

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-031-222-5

นายภาคภูมิ สิริคุตต์ : ผลของความถี่ต่อความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุ เอ. เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-335 เกรด พี.22. (The effect of frequency on fatigue failure in high temperature for ASME SA-335 GRADE P22 steel) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล จำนวนหน้า 102 หน้า ISBN 974-031-222-5

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูง สำหรับวัสดุ เอ. เอส. เอ็ม. อี. – เอส. เอ. 335 เกรด พี. 22

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้แก่ ชิ้นงานทดสอบ CT ขนาด 25.5 มม. จัดวางตามแนว C-L เตรียมจากท่อไอน้ำ เอ. เอส. เอ็ม. อี. – เอส. เอ. 335 เกรด พี. 22 ของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ โดยทดสอบกับภาระรูปไซเคิล ขนาด 1.0 ± 0.25 ตัน อัตราส่วนภาระ 0.6 อุณหภูมิ 300 °C โดยทดสอบที่ความถี่ 10, 20 และ 30 เฮิรตซ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลคือ เครื่องทดสอบการแตกร้าวด้วยระบบไฮดรอลิค เตาความต้านทาน การทดสอบทุกอย่างได้กระทำในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศ ผลการวิจัยพบว่าความถี่ของภาระไม่มีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.เอส. เอ็ม. อี. – เอส. เอ. 335 เกรด พี. 22 ภายใต้สภาวะที่ทำการทดสอบ โดยการกระจายตัวของรอบความเสียหายเท่ากับ 4.6 เปอร์เซนต์

เนื่องจากผลที่ได้จากวัสดุที่ทำการศึกษานั้น ความถี่ของภาระไม่มีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้า จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมกับวัสดุ เอ. ไอ. เอส. ไอ. 4140 โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกับวัสดุ เอ. เอส. เอ็ม. อี. – เอส. เอ. 335 เกรด พี. 22 โดยทดสอบที่ความถี่ 10 และ 20 เฮิรตซ์ เพื่อศึกษาว่าวัสดุชนิดอื่นจะมีผลในลักษณะเดียวกันหรือไม่ ผลการวิจัยพบว่าความถี่ของภาระมีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ. ไอ. เอส. ไอ. 4140 ภายใต้สภาวะที่ทำการทดสอบโดยการกระจายตัวของรอบความเสียหายเท่ากับ 43.22 เปอร์เซนต์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4270479821 : MAJOR MECHANICAL

KEYWORD: FREQUENCY / FATIGUE / HIGH TEMPERATURE / ASME SA-335 GRADE P22 / FAILURE

PARKPOOM SIRIKUTT: THE EFFECT OF FREQUENCY ON FATIGUE FAILURE IN HIGH TEMPERATURE FOR ASME SA-335 GRADE P22 STEEL THESIS ADVISOR:

ASSIST.PROF.KAUKEART BOONCHUKOSOL, Dr.Ing, 102 pp. ISBN 974-031-222-5

This research aimed at analyzing the effect of frequency on cycle to fatigue failure at high temperature for ASME SA-335 GRADE P22 steel.

The research samples consisted of compact tension specimen with C-L orientation, prepare from super-heater pipes ASME SA-335 GRADE P22 in steam turbine power plants, test at sinusoidal load shape 1.0 ± 0.25 ton R-ratio 0.6 temperature 300°C at frequency 10, 20 and 30 Hz. The data collection and test instrument was hydraulic servo testing machine and resistance furnace. All tests were carried out at air environment. The result is the frequency has no effect on cycle to fatigue failure for ASME SA-335 GRADE P22 steel under the testing environment. Cycle to fatigue failure distribution is 4.6 percent

According to the result of studied material is frequency has no effect on cycle to fatigue failure. So we make an additional research with AISI 4140 steel under the same environment at frequency 10 and 20 Hz in order to find out if the different type of material has the same result. The result is the frequency has effect on cycle to fatigue failure for AISI 4140 steel under the testing environment. Cycle to fatigue failure distribution is 43.22 percent.

Department Mechanical Engineering Student's Signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพลายุทธ์ ศรีโอฬาร ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องทดสอบและให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับอุปกรณ์ทดสอบอย่างดียิ่ง

อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องด้วยกำลังใจจากคนรอบข้างเพื่อนๆที่คอยห่วงใยถามถึง และให้กำลังใจตลอดมา

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตานุชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภาคภูมิ สิริคุตต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ญ

บทที่	หน้า
1. บทนำ.....	1
งานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	5
ขอบเขตการศึกษาวิจัย.....	5
วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุป.....	6
ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	6
2. กลศาสตร์การแตกหักยึดหยุ่นเชิงเส้น.....	7
ความเป็นมา.....	7
กลศาสตร์การแตกหักยึดหยุ่นเชิงเส้น.....	8
3. การประยุกต์แนวทางของกลศาสตร์การแตกหักกับปัญหาความล้า.....	18
ความเป็นมา.....	18
ความสัมพันธ์พื้นฐานเกี่ยวกับภาวะเป็นรอบ.....	19
การประยุกต์กลศาสตร์การแตกหักกับปัญหาความล้า.....	20
สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า.....	23
4. ปัญหาความล้าภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง.....	24
ความเป็นมา.....	24
ทฤษฎีทางความคืบ (creep).....	25

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
โมเดลที่ใช้ในการศึกษาการเสียชีวิตเนื่องจากความคืบ.....	26
ผลของสภาวะแวดล้อมภายใต้อุณหภูมิสูง.....	27
5. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	30
ชิ้นงานทดสอบ.....	30
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	32
สภาวะทดสอบ.....	40
รายละเอียดของการทดสอบ.....	41
6. ผลการทดสอบ.....	44
7. การอภิปรายผลการศึกษาวิจัย.....	72
8. ข้อเสนอของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
ข้อเสนอของงานวิจัย.....	88
งานวิจัยต่อเนื่อง.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ฟังก์ชันตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปร่างต่างๆ.....	17
ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวัสดุ P22-1.....	45
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวัสดุ P22-2.....	46
ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบวัสดุ P22-3.....	47
ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบวัสดุ P22-4.....	48
ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบวัสดุ P22-5.....	49
ตารางที่ 6.6 ตารางสรุปผลการทดลอง P22.....	55
ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-2.....	62
ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-1.....	63
ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-3.....	64
ตารางที่ 6.10 ตารางสรุปผลการทดลอง AISI4140.....	68
ตารางที่ 7.1 ตารางสรุปผลการทดลอง P22.....	80
ตารางที่ 7.2 ตารางสรุปผลการทดลอง AISI4140.....	83
ตารางที่ ก1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr.P22 (wt.%).....	95
ตารางที่ ก2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก AISI 4140 (wt.%) จากการทดสอบ.....	96
ตารางที่ ก3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก AISI 4140 (wt.%) จากเอกสารอ้างอิง.....	96
ตารางที่ ข1 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-4.....	97
ตารางที่ ข2 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-1.....	98
ตารางที่ ข3 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-2.....	99
ตารางที่ ข4 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ AISI 4140-2.....	100
ตารางที่ ข5 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ AISI 4140-1.....	101

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 กราฟแสดงชิ้นงานภายใต้ภาวะ Δ คงที่.....	10
2.2 กราฟแสดงชิ้นงานภายใต้ภาวะภาระคงที่.....	11
2.3 ชนิดของภาระที่กระทำต่อวัตถุ.....	13
2.4 ระบบแกนบริเวณปลายรอยร้าว และความเค้นที่กระทำบริเวณปลายรอยร้าว.....	14
2.5 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างสมการความเค้นปลายรอยร้าวแบบเต็ม และของ Irwin.....	16
3.1 ลักษณะของภาระกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่แบบต่างๆ.....	19
3.2 ลักษณะของกราฟอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้า.....	21
3.3 กระบวนการการเกิดรอยร้าวเป็นช่วงๆ.....	22
4.1 ลักษณะกราฟการเสียรูปเนื่องจากความเค้นภายใต้ภาระคงที่.....	25
4.2 ผลของสิ่งแวดล้อมต่อการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า.....	27
4.3 การเติบโตของรอยร้าวในอากาศ และในฮีเลียมสำหรับวัสดุ Inconel 718.....	29
5.1 การตัดแบ่งวัสดุจากส่วนที่เป็นท่อ และทิศทางการวางตัวของชิ้นงาน.....	31
5.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
5.3 เครื่องทดสอบ.....	32
5.4 ส่วนควบคุมหลัก.....	33
5.5 Actuator.....	33
5.6 Grip device.....	34
5.7 ชุดไฮดรอลิค.....	34
5.8 Cooling Tower.....	35
5.9 กาลังไมโครสโคป.....	36
5.10 เต้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
5.11 ส่วนควบคุมอุณหภูมิ.....	37
5.12 แบบของอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ในอุณหภูมิสูง.....	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.14 อุปกรณ์ระบายความร้อนของ Grip.....	38
5.15 สลักที่ใช้ในการทดสอบ.....	39
5.16 สเปร์ย์ทำความสะอาด.....	39
5.17 ไดอัลเกจ.....	40
6.1 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-1 ความถี่ 10 Hz.....	50
6.2 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-2 ความถี่ 10 Hz.....	51
6.3 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-3 ความถี่ 20 Hz.....	52
6.4 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-4 ความถี่ 20 Hz.....	53
6.5 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-5 ความถี่ 30 Hz.....	54
6.6 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ AISI4140-1 ความถี่ 10 Hz.....	65
6.7 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ AISI 4140-2 ความถี่ 20 Hz.....	66
6.8 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ AISI 4140-2 ความถี่ 20 Hz.....	67
7.1 ระยะเวลาตัดตัวเปรียบเทียบความถี่ 10 Hz วัสดุ SA-335 Gr. P22.....	73
7.2 สลักก่อนทำการทดสอบ.....	74
7.3 สลักหลังทำการทดสอบ.....	74
7.4 ระยะเวลาตัดตัวเปรียบเทียบความถี่ 20 Hz วัสดุ SA-335 Gr. 22.....	75
7.5 Servo value.....	76
7.6 ระยะเวลาตัดตัวความถี่ 30 Hz วัสดุ SA-335 Gr. P22.....	77
7.7 ระยะเวลาตัดตัวเปรียบเทียบทุกๆความถี่วัสดุ SA-335 Gr. P22.....	79
7.8 ความเสียหายแบบ intergranular.....	83
7.9 ความเสียหายแบบ trangranular.....	84
7.10 การลดลงของค่า K_{IC} ซึ่งมีผลจากสภาวะแวดล้อม.....	84
7.11 ระยะเวลาตัดตัวเปรียบเทียบความถี่ 20 Hz วัสดุ AISI4140.....	86
7.12 ระยะเวลาตัดตัวเปรียบเทียบวัสดุ AISI4140.....	87

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ในโรงไฟฟ้าทั่วไปมีอุปกรณ์และชิ้นส่วนเป็นองค์ประกอบมากมาย และชิ้นส่วนเหล่านี้มีจำนวนมากที่จะต้องทำงานภายใต้ภาวะที่กระทำเป็นคาบ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง หรือภายใต้สภาวะกัดกร่อน (corrosion) วัสดุที่นิยมใช้กันแพร่หลาย คือ Cr-Mo low alloy steels ซึ่งมีอัตราส่วนของ Cr และ Mo แตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งาน สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 มีส่วนผสมของ Cr 2 ¼ % และ Mo 1 % ใช้งานในช่วงอุณหภูมิและความดันระหว่าง -10 ถึง 500 °C และ 45 ถึง 324 kg/cm² ตามลำดับ มักใช้ในท่อลำเลียงไอน้ำในหม้อกำเนิดไอน้ำ ท่อไอน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์ควบแน่นของไอน้ำ

การออกแบบอุปกรณ์เหล่านี้มีความจำเป็นที่จะต้องมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์จะไม่เกิดความเสียหายในขณะใช้งาน และต้องทราบช่วงเวลาที่ควรซ่อมบำรุง การที่จะผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ให้ได้มาตรฐาน และกำหนดช่วงเวลาที่ทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาได้ถูกต้องนั้น จำเป็นที่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในอุปกรณ์เหล่านี้ จึงต้องมีการศึกษาโดยตั้งทฤษฎี และทำการทดลองควบคู่กันไป การศึกษาวัสดุในลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า “Mechanical behavior of materials” เป็นการศึกษาความเสียหายของวัสดุในลักษณะต่างๆกัน ในลักษณะความเสียหายในแต่ละรูปแบบ เช่น การเสียรูปแบบยืดหยุ่น (elastic) การเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น (plastic) ความเสียหายในวัสดุเหนียว และวัสดุเปราะ รวมทั้งความเสียหายเนื่องจากความล้า (fatigue) ความคืบ (creep) และสภาพแวดล้อม เป็นต้น กระบวนการทดสอบและวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้ องค์ประกอบหลักก็คือ การเสียรูปแบบยืดหยุ่น การเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น และความคืบ การเสียรูปแบบยืดหยุ่น วัสดุจะคืนรูปทันทีภายหลังจากที่ลดภาระที่กระทำลง การเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นเป็นการเสียรูปแบบถาวร และการเสียรูปที่เกิดจากความคืบเป็นการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลา นอกจากนี้ยังมี ความเสียหายเนื่องจากความล้า ซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับรอบของภาระ

ในการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความล้าของวัสดุนั้นเป็นการทดสอบที่มีความสำคัญ เนื่องจากวัสดุที่ได้รับภาระกระทำเป็นรอบนั้นจะเกิดความเสียหายภายใต้ภาระที่ต่ำกว่าค่าความเค้นครากมาก ในการทดสอบความล้า นั้น บางครั้งเรามีความจำเป็นที่จะต้องจำลองความถี่ในการทดสอบให้มากกว่าการใช้งานจริง เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องเวลาในการทดสอบ

โดยสามารถกระทำได้ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมไม่ทำให้ความถี่มีผลต่อความเสียหายจากความล้า แต่ในบางกรณี เช่น อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง [17] สภาวะแวดล้อมที่เป็นก๊าซบางชนิด [13] เป็นต้น จะทำให้ความถี่มีผลต่อความเสียหายจากความล้า สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงโดยภาวะที่กระทำเป็นรอบ ซึ่งชิ้นงานจะเกิดความเสียหายเนื่องจากองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ ความล้า ซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับรอบ (cycle dependent process) ความคืบ ซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา (time dependent process) และสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา (time dependent process) เช่นกัน อัตราส่วนอิทธิพลขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ชนิดของสภาวะแวดล้อม ชนิดของภาวะที่กระทำ ความถี่ของภาวะ และปัจจัยภายนอกอื่นๆ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีมาก ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของความถี่ของภาวะเพียงอย่างเดียว

สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบท่อไอน้ำของโรงไฟฟ้าในประเทศไทย เนื่องจากในระบบท่อน้ำนั้น วัสดุจะถูกกระทำภายใต้ภาวะที่กระทำเป็นคาบ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ทำให้ความเสียหายที่อุณหภูมิสูงของวัสดุชนิดนี้ได้รับความสนใจ และเนื่องจากความเสียหายของวัสดุแต่ละชนิดนั้นมีค่าต่างกันมาก ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลของนักวิจัยท่านอื่นที่ทำการทดสอบโดยวัสดุอื่นมาใช้ในการประเมินอายุความล้าได้ เราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาอายุความล้าของวัสดุชนิดนี้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุชนิดนี้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยที่ผ่านมา

P.K. Liaw , T.R.Leax, T.R.Fabis, J.K.Donald [13] ได้ทำการศึกษาผลของความถี่และอัตราส่วนภาระต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของ Mn-Cr Steel ในสภาวะอากาศ และไฮโดรเจน โดยได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับ Mn-Cr Steel เมื่อความถี่ลดลงทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนภาระเพิ่มขึ้นจะทำให้ให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเพิ่มขึ้นเช่นกัน

K.Y.Hour, J.F.Stubbins [17] ได้ทำการศึกษาผลของความถี่ และอัตราส่วนภาระต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของ Alloy 800H ที่อุณหภูมิห้อง และ 650-900 °c แสดงให้เห็นว่าสำหรับ Alloy 800H ที่อุณหภูมิสูงเมื่ออัตราส่วนภาระสูง และความถี่ต่ำ จะทำให้เกิดความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา และเมื่ออัตราส่วนภาระต่ำ และความถี่สูง จะทำให้เกิดความเสียหายที่ขึ้นกับรอบ สำหรับที่อุณหภูมิห้องความถี่และอัตราส่วนภาระไม่มีผลต่อความเสียหายเนื่องจากความล้า

K.V.Jata, D.Maxwell, T.Nicholas [18] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และความถี่ต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ Al Alloy 8009 ที่อุณหภูมิ 25-315 °c โดยทำการทดลองกับวัสดุที่ผ่านการรีด และวัสดุที่เป็นแผ่น แสดงให้เห็นว่าสำหรับวัสดุ Al Alloy 8009 ที่เป็นแผ่นนั้น ที่อุณหภูมิห้องความถี่ไม่มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวแต่ความถี่จะเริ่มมีผลเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200 °c สำหรับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวสูงขึ้น สำหรับวัสดุที่ผ่านการรีดแสดงให้เห็นว่าความถี่ไม่มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในทุกๆอุณหภูมิที่ทดลอง

J.J.Pernot, S.Mall, T.Nicolas [19] ได้ทำการศึกษา Thermomechanical Fatigue เทียบกับการศึกษา Fatigue Failure ที่อุณหภูมิสูง กับวัสดุ Ti-24Al-11Nb โดยในที่นี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องคือ การศึกษา Fatigue Failure ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น โดยแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงนั้น ความถี่ลดลงจะทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเพิ่มขึ้น และที่ความถี่สูงประมาณ 1 Hz ขึ้นไป อัตราการเติบโตของรอยร้าวจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่

L.A.James [20] ได้ทำการศึกษาผลของความถี่ต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า สำหรับวัสดุ 304 Stainless Steel โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 1000F แสดงให้เห็นว่าสำหรับวัสดุ 304 Stainless Steel เมื่อความถี่ลดลงจะทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเพิ่มขึ้น

Cheugpoon, David. W. Hoepfer [12] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASTM A612B STEEL ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (-73 °c) โดยแสดงให้เห็นว่าวัสดุ ASTM A612B STEEL มีอัตราการเติบโตของรอยร้าวลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

L.A.James, W.J.mills [14] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASME SA351 GRADE CF8, CF8M STEEL ที่อุณหภูมิห้อง (24 °c) และอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (371-538 °c) โดยแสดงให้เห็นว่าวัสดุ ASME SA351 GRADE CF8, CF8M STEEL มีอัตราการเติบโตของรอยร้าวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

L.S.Vesier, S.D.Antolovich [16] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ Ti-6242 STEEL ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (700,1000F) โดยแสดงให้เห็นว่าวัสดุ Ti-6242 STEEL ที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการเติบโตของรอยร้าวใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [41] ได้ทำการศึกษาการประเมินอายุที่เหลือสำหรับ SUPERHEAT HEADER ของระบบผลิตไอน้ำที่เสียหายเนื่องจากความล้า โดยได้ทำการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุ ASME SA-335 Gr.P22 ที่อุณหภูมิห้องได้สมการการเติบโตของรอยร้าวในแต่ละอัตราส่วนภาระดังนี้

$$\frac{da}{dN} = 2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27} ; R = 0.6$$

$$\frac{da}{dN} = 1 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.86} ; R = 0.7$$

$$\frac{da}{dN} = 2 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.69} ; R = 0.8$$

$$\frac{da}{dN} = 4 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.21} ; R = \text{Mean.}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

เพื่อศึกษาผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูง สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น low strength และ high toughness

ขอบเขตการศึกษาวิจัย

1. ขอบเขตของเนื้อหา
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีความสนใจที่จะศึกษาผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr. P22
2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr. P22 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในทำท่อสำหรับการส่งไอน้ำของหม้อกำเนิดไอน้ำในโรงผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากวัสดุที่ได้รับมีขนาดใหญ่จึงนำท่อเหล็กนี้มาตัดแบ่งทำเป็นชิ้นงาน CT – specimen ซึ่งเป็นชิ้นงานมาตรฐานตาม ASTM E 647-93 (5) แล้วจึงนำมาทดสอบที่ความถี่ต่างๆกัน
3. ตัวแปรที่ศึกษา
 - 3.1 ตัวแปรอิสระ คือ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งตามความถี่ได้ ดังนี้
 - 3.1.1 ความถี่ 30 Hz จำนวน 1 ชิ้น
 - 3.1.2 ความถี่ 20 Hz จำนวน 2 ชิ้น
 - 3.1.3 ความถี่ 10 Hz จำนวน 2 ชิ้น
 - 3.2 ตัวแปรตาม คือ รอบความเสียหายที่ได้จากชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น

วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุป

แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ทำการติดตั้งชุดทดลองให้สามารถทดสอบที่อุณหภูมิที่ต้องการได้
2. ทำการทดลองหารอบความเสียหายที่ความถี่ต่างๆกัน
3. วิเคราะห์และสรุปผลตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

ขยายความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้ม
ที่อุณหภูมิสูงในวัสดุที่ใช้ที่อุณหภูมิสูง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

สำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความต้องการที่จะศึกษาวัสดุในภาวะเป็นรอบที่อุณหภูมิสูง โดยประยุกต์ทฤษฎีทางกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นทำให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ ทฤษฎีพื้นฐานทาง กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ความล้า ความคืบ เป็นสิ่งจำเป็น จึงได้ ทำการรวบรวม และสรุปทฤษฎีเหล่านี้ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทต่อไปนี้ เพื่อความ สมบูรณ์ของงานวิจัย และเพื่อเพิ่มความเข้าใจในทฤษฎีเหล่านี้แก่ผู้ที่จะศึกษางานวิจัยนี้ ดังต่อไป นี้

ความเป็นมา

ในปี 1913 C.E. Inglis (22) เสนอแนวคิดเกี่ยวกับความเค้นหนาแน่นในโครงสร้างที่ไม่ ต่อเนื่อง โดยเป็นคำอธิบายถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีรอยร้าว หรืออย่างอื่นที่มีลักษณะ คล้ายกัน เจ็ดปีต่อมา A.A. Griffith (23) ได้เสนอสมมุติฐานเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนพลังงานใน บริเวณที่เกิดความเสียหาย และเสนอแนวคิดเกี่ยวกับขนาดรอยร้าวที่ทำให้เกิดความเสียหายใน วัสดุเปราะ ทฤษฎีของเขาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรากที่สองของขนาดความยาว รอยร้าว และได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีนี้ แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จ ในปี 1939 H.M. Westergaard (24) ตีพิมพ์ผลของการวิเคราะห์ความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวในวัตถุยืดหยุ่น โดยเป็นฟังก์ชันกับหนึ่งส่วนรากที่สองของระยะจากปลายรอยร้าว แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้รับการ เชื้อถือจนกระทั่งอีก 20 ปีต่อมา ปี 1948 G.R. Irwin (25) และ E. Orowan (26) ได้เสนอการปรับ ปรงทฤษฎีของ Griffith โดยใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับพลังงานในบริเวณที่ไม่ยืดหยุ่นระหว่างเกิดความเสียหาย จากการปรับปรุงนี้เองทำให้สามารถนำทฤษฎีของ Griffith ไปใช้กับโลหะได้ ในปีเดียวกันนี้ N.F. Mott (27) ได้เสนอการขยายการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Griffith โดยใช้พลังงานจลน์ โดยทำให้ สามารถนำไปหาความเร็วของการเกิดรอยร้าวได้ งานตีพิมพ์นี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และถือเป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่มีความสำคัญเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักแบบพลศาสตร์ (Dynamic fracture mechanic)

ในปีต่อมา งานวิจัยมุ่งไปที่การปรับปรุงทฤษฎีของ Griffith ในวัตถุที่มีรูปร่างต่างๆออกไป ในปี 1956 G.R. Irwin (28) เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการปลดปล่อยพลังงานระหว่างเกิดความเสียหาย

หายทำให้ได้จุดวิกฤตของการเกิดความเสียหายเป็นครั้งแรก นอกจากนี้ Irwin ยังได้ปรับปรุงงานวิจัยของ Westergaard เพื่อแสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดความเค้น และระยะยึดตัวหน้ารอยร้าวในวัสดุยืดหยุ่น สามารถสรุปเป็นตัวแปรตัวเดียวเรียกว่า ความเข้มของความเค้น (Stress intensity parameter, K) โดยมีค่าขึ้นกับ ความเค้นจากภายนอก ความยาวรอยร้าว รูปร่าง และขนาดของวัตถุ เขายังได้แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีการปลดปล่อยพลังงาน และทฤษฎีความเข้มของความเค้นมีความสอดคล้องกัน หลังจากนั้นไม่นาน M.L. Williams (29) ได้ใช้หลากหลายวิธี และเสนอลักษณะการกระจายความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวที่สมบูรณ์กว่าเดิม โดยผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีของ Irwin

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

สองทฤษฎีสำคัญที่ใช้ทำนายความเสียหายของวัสดุเปราะภายใต้สภาพยืดหยุ่น ทฤษฎีแรกมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีพลังงาน ทฤษฎีที่สองมีพื้นฐานมาจาก ทฤษฎีความเข้มของความเค้น โดยในตอนนี้จะกล่าวถึงสองทฤษฎีนี้เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีความเสียหายในส่วนต่อไป

ทฤษฎีพลังงานสมดุลของกริฟฟิต (Energy Balance Approaches to Fracture, Griffith)

ทฤษฎีนี้มีพื้นฐานมาจากงานของ Griffith และการปรับปรุงเพื่อให้ใช้กับโลหะที่มีบริเวณพลาสติกได้โดย Orowan และ Irwin

แนวคิดของทฤษฎีดังกล่าวคือ ในวัสดุยืดหยุ่นที่มีรอยแตกร้าวอยู่ก่อนแล้ว การขยายตัวของรอยแตกร้าวดังกล่าวก็คือการเพิ่มพื้นที่ของรอยแตกร้าวนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานเท่ากับพลังงานที่จำเป็นในการคงรูปของวัตถุที่บริเวณด้านหน้าของรอยแตกร้าวเหล่านั้น การสมดุลจะต้องเกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวขยายตัวไประหว่างพลังงานศักย์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการคายพลังงานยืดหยุ่นและงานจากภาวะภายนอก และการเพิ่มของพลังงานผิวเนื่องมาจากการขยายตัวของรอยร้าวดังกล่าว

ถ้าเราพิจารณาพื้นที่ที่เกิดรอยร้าว A ในวัตถุที่การเสียรูปภายใต้ภาระค่าหนึ่ง เราสามารถสมการการสมดุลของพลังงานได้

$$\dot{W} = \dot{U} + \dot{K}_E + 2\gamma_s \dot{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ W = งานจากภาวะภายนอก

U = การเพิ่มขึ้นของพลังงานยืดหยุ่น U_e รวมกับพลังงานสำหรับทำให้เกิดความเสียหายแบบไม่ยืดหยุ่น U_p

K_E = พลังงานจลน์ของวัตถุ

γ_s = พลังงานต่อพื้นที่ที่ต้องการสำหรับการขยายพื้นที่รอยร้าว ถ้าเราสมมติให้ภาระไม่ขึ้นกับเวลาเราจะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial t} \frac{\partial}{\partial A} = \dot{A} \frac{\partial}{\partial A} \quad (2.2)$$

โดย A = พื้นที่รอยร้าว

เมื่อแทนสมการ 2.1 ด้วยสมการ 2.2 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial A} &= \left(\frac{\partial U_e}{\partial A} + \frac{\partial U_p}{\partial A} \right) + 2\gamma_s \\ \frac{\partial W}{\partial A} - \frac{\partial U_e}{\partial A} &= \frac{\partial U_p}{\partial A} + 2\gamma_s \end{aligned} \quad (2.3)$$

ในพจน์แรกด้านขวาของสมการ 2.3 เป็นรูปแบบของพลังงานเช่นเดียวกับ γ_s เราสามารถแทน $\frac{\partial U_p}{\partial A}$ ด้วย $2\gamma_p$ และเขียน $\gamma_s + \gamma_p = \gamma$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial A} - \frac{\partial U_e}{\partial A} &= 2\gamma \\ \frac{\partial}{\partial A} (W - U_e) &= 2\gamma \end{aligned} \quad (2.4)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นถ้าความแตกต่างระหว่างงานที่กระทำจากภายนอก และการเพิ่มของพลังงานความเครียดในวัตถุเพียงพอกับพลังงานที่ต้องการสำหรับการสร้างความเสียหาย โดยพลังงานในการสร้างความเสียหายเกิดจากการรวมกันของพลังงานใน

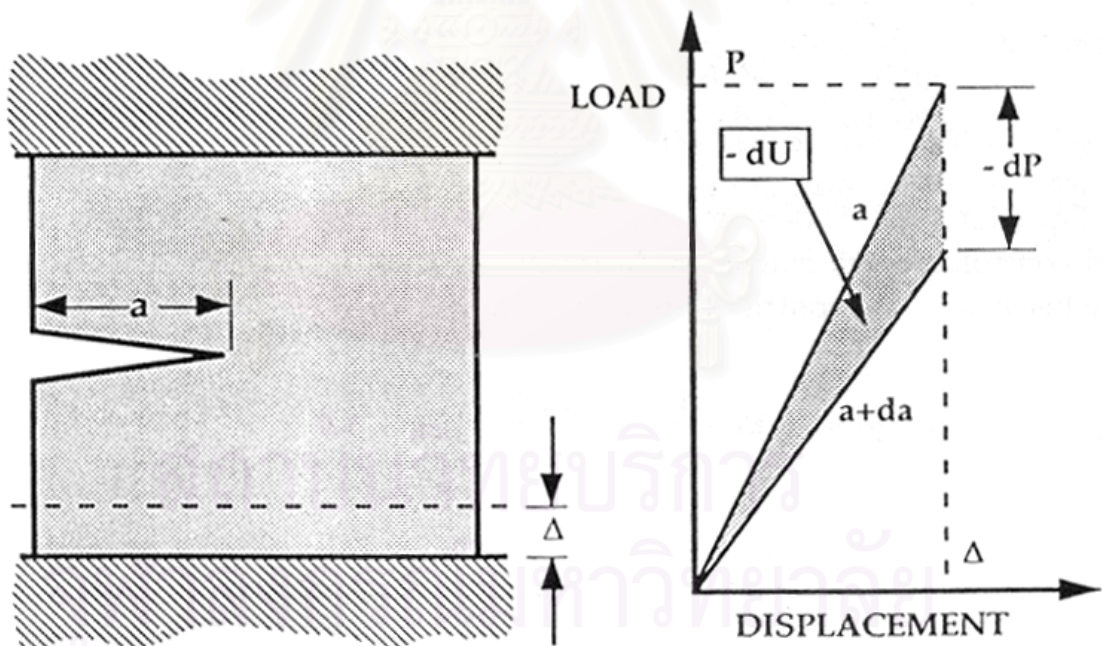
การสร้างการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น และพลังงานในการสร้างพื้นที่ผิวรอยร้าวใหม่ ในด้านซ้ายของสมการ 2.4 ถูกเรียกว่า แรงในการขยายรอยร้าวของ Griffith (Griffith's crack extension force, G) เนื่องจากสามารถเขียนอิสระจากด้านขวา โดยถ้ามีค่าน้อยกว่า 2γ แสดงว่ามีความโน้มเอียงที่จะไม่เกิดความเสียหาย และถ้ามีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 2γ แสดงว่าเกิดความเสียหาย

ถ้าเราสมมติให้วัตถุที่มีรอยร้าวในรูป 2.2 อยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดตัว (Δ) และภาระที่กระทำ (P) เป็นเส้นตรง นั่นคือจะได้

$$\Delta = CP \quad (2.5)$$

เมื่อ $C = \text{compliance}$ ของวัตถุที่มีรอยร้าว โดย compliance ขึ้นกับขนาดรอยร้าว

ถ้าเราพิจารณา ขนาดรอยร้าวเพิ่มขึ้นด้วยขนาด Δa ภายใต้ภาวะ Δ คงที่ (Displacement control) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงชิ้นงานภายใต้ภาวะ Δ คงที่

นั่นคือ $dW = 0$ และได้

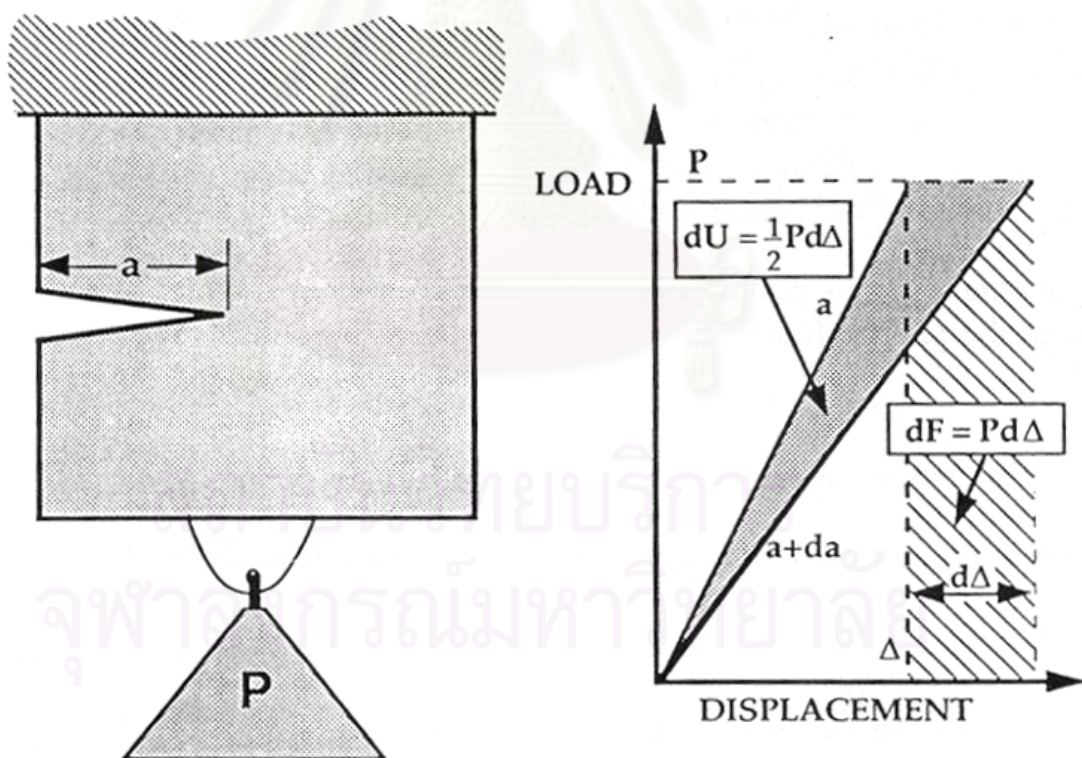
$$-dU = \left[\frac{P\Delta}{2} + Pd\Delta \right] - P \left[\frac{\Delta + d\Delta}{2} \right] \quad (2.6)$$

แทนในสมการที่ 2.4 ได้

$$-\frac{dU_e}{dA} = G = -\frac{1}{B} \frac{dU_e}{da} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.7)$$

เมื่อ $B =$ ความหนาของวัตถุ

สำหรับกรณีที่ภาระคงที่ (Load control) จากรูป 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงชิ้นงานภายใต้ภาวะภาระคงที่

จะได้

$$dW = Pd\Delta$$

$$dU = \left[\frac{P\Delta}{2} + Pd\Delta \right] - P \left[\frac{\Delta + d\Delta}{2} \right] \quad (2.9)$$

$$dU = \frac{1}{2} Pd\Delta$$

และ

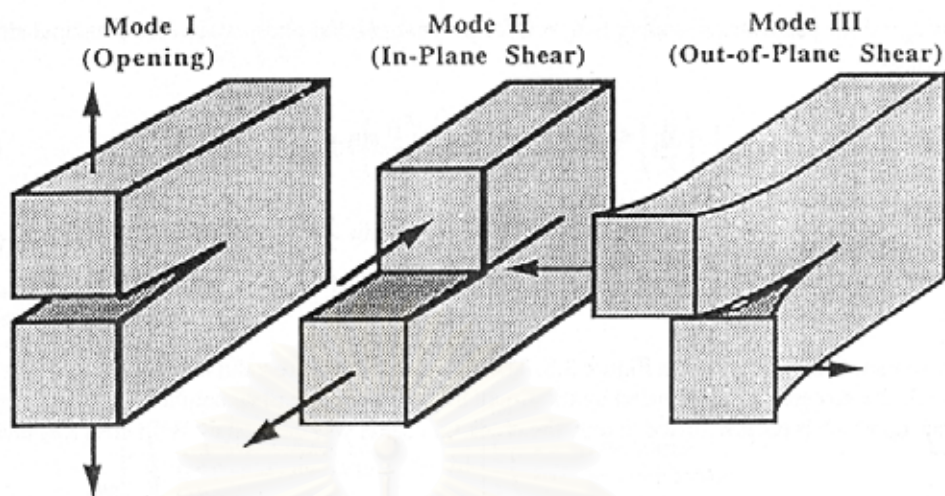
$$G = \frac{1}{B} \frac{d}{da} \left(\frac{1}{2} Pd\Delta \right) = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.10)$$

จากทั้งสองกรณี คือ Load control และ Displacement control จะได้ $G = (P^2/2B)(dC/da)$ และเมื่อเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง compliance ต่อความยาวรอยร้าวสำหรับชิ้นงานทดสอบที่กำหนดได้ และทราบแรงในขณะที่เกิดการแตกร้าวโดยที่พยายามให้เกิดการเสียรูปในช่วงแบบไม่ยืดหยุ่นบริเวณปลายรอยร้าวให้น้อยที่สุด เราจะสามารถคำนวณหา G_c ได้

ทฤษฎีตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Parameter Approach)

รูปที่ 2.3 แสดงชนิดของภาระที่กระทำต่อรอยร้าว (Mode of loading) สามารถจำแนกได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แบบเปิด (Opening mode) จะมีลักษณะคือ ผิวหน้าของรอยร้าว (crack faces) ทั้งสองจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน โดยภาระที่กระทำต่อรอยร้าวแบบนี้ 1 นี้พบมากในทางปฏิบัติ และมักจะนำไปสู่ความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างมากกว่าภาระที่กระทำต่อรอยร้าวในแบบอื่นๆ เป็นเหตุให้ภาระที่กระทำต่อรอยร้าวในแบบนี้ 1 นั้นถูกนำมาศึกษาวิจัยมากที่สุด
2. แบบเฉือน (In-Plane Shear mode) จะมีลักษณะคือ ผิวหน้าของรอยร้าวทั้งสองจะไถลสัมผัสกันไปในทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าว
3. แบบฉีก (Out-of-Plane Shear mode) จะมีลักษณะคือ ผิวหน้าของรอยร้าวทั้งสองจะไถลสัมผัสกันไปในทิศทางขนานกับขอบหน้าของรอยร้าว



รูปที่ 2.3 ชนิดของภาระที่กระทำต่อวัตถุ

ในส่วนของทฤษฎีตัวประกอบความเข้มของความเค้นนี้ เราจะกล่าวถึงกระบวนการภาระแบบที่ 1 เนื่องจากส่วนใหญ่ของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดจากกระบวนการชนิดนี้

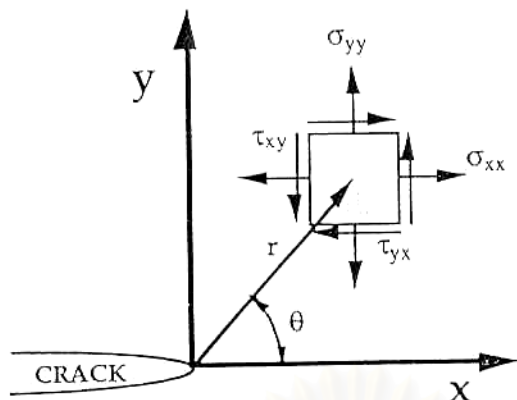
กระบวนการ Westergaard semi-inverse (24) เป็นกระบวนการง่าย ๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาในกรณีระนาบ โดย Irwin ได้นำสมการจากกระบวนการนี้มาใช้ สำหรับภาระแบบที่ 1 จะได้ความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวดังสมการ

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.11ก)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.11ข)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.11ค)$$

และทิศทางของตัวแปรต่างๆแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.4 ระบบแกนบริเวณปลายรอยร้าว และความเค้นที่กระทำบริเวณปลายรอยร้าว

สำหรับกรณีความเค้นระนาบจะได้

$$\sigma_x = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.12)$$

แต่ $\sigma_z = 0$ สำหรับกรณีความเค้นระนาบ และ $\tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ สำหรับทั้งสองกรณี ค่า principal stress จะได้

$$\sigma_1 = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.13ก)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.13ข)$$

เมื่อ r และ θ แสดงในรูป 2.3 สมการข้างต้นนี้ใช้ได้เฉพาะบริเวณปลายรอยร้าวเท่านั้น สมการที่สามารถใช้ได้มากกว่าบริเวณปลายรอยร้าวสร้างโดย William (29) เป็นดังนี้

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^n A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2.14)$$

พจน์แรกของสมการนี้ สอดคล้องกับพจน์ในสมการ 2.11 พจน์สูงๆของสมการนี้จะมีผลเมื่อ r มีค่ามากเท่านั้น

รูปที่ 2.5 แสดงกราฟของความเค้น σ_y เป็นฟังก์ชันของขนาดรอยร้าว 2 ขนาดคือ 0.25 มม. และ 6.25 มม. เมื่อชิ้นงานกว้าง 25 มม. โดยชิ้นงานได้รับภาระแบบกระจาย (distribute load) และความเค้นถูกปรับเพื่อให้ได้ค่าความเข้มของความเค้น K คงที่ โดยเท่ากับ $22.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ในการศึกษานี้ Talug และ Reifsnider (1977) หาค่าคงที่ในพจน์สูงๆของสมการ 2.14 โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณใกล้รอยร้าวสมการ 2.11 สามารถใช้แทนสมการ 2.14 ได้เป็นอย่างดี ขณะที่ระยะห่างออกไปสมการ 2.11 ต่างไปจากสมการ 2.14 มาก โดยค่าอัตราส่วนระหว่างระยะจากปลายรอยร้าวกับความยาวรอยร้าวสูงสุดที่สามารถใช้สมการ 2.11 แทนสมการ 2.14 ได้ คือ 0.15 นั่นคือ ระยะที่ค่าความเข้มของความเค้นสามารถใช้ได้นั้นไม่เกิน 15% ของความยาวรอยร้าว

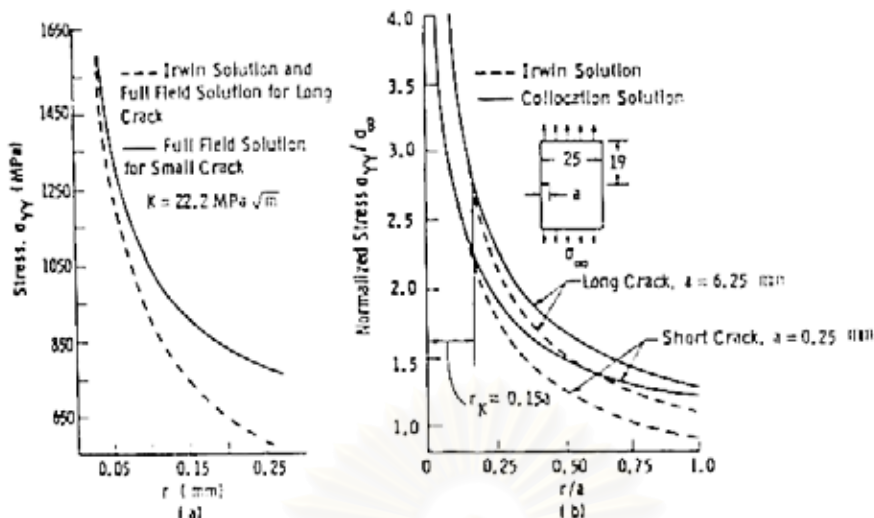
สำหรับ ระยะยึดแบบยึดหยุนบริเวณใกล้รอยร้าว คือ

$$u = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (2.15ก)$$

$$v = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[k - 1 + 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (2.15ข)$$

เมื่อ $G =$ ค่าโมดูลัสของการเฉือน $K = 3 - 4\nu$ สำหรับความเคียดระนาบ $K = (3 - \nu)(1 + \nu)$ สำหรับความเคียดระนาบ และ $\nu =$ ค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ (Poisson's ratio)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างสมการความเค้นปลายรอยร้าวแบบเต็ม และสมการความเค้นของ Irwin ที่ใช้เฉพาะพจน์แรกของสมการ

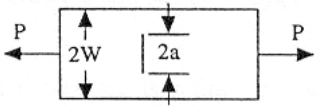
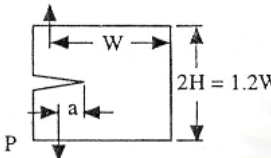
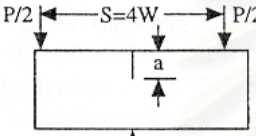
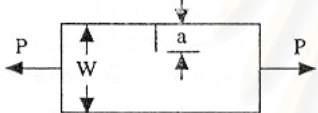
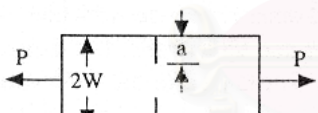
ค่าความเข้มของความเค้นนั้นแสดงถึงขนาดของแอมพลิจูดของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว โดยมีค่าขึ้นกับ รูปร่างของวัตถุ, ขนาดความยาวรอยร้าว, ขนาดภาระ และรูปแบบของภาระ ขนาดของความเข้มของความเค้นสำหรับภาระแบบที่ 1 สำหรับชิ้นงานบางรูปแบบสามารถหาได้ในคู่มือทางเครื่องกลทั่วไป สำหรับรูปแบบง่าย ๆ บางรูปแบบแสดงในตารางที่ 2.1 โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบดังสมการ a สำหรับภาระเป็นจุด

$$K = \frac{P}{BW^{1/2}} F\left(\frac{a}{W}\right) \tag{2.16}$$

และอยู่ในรูปแบบดังสมการ b สำหรับภาระแบบกระจาย

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{2.17}$$

โดย σ แสดงถึง ความเค้นกระจายคงที่จากภายนอก W หมายถึงขนาดของชิ้นงาน a หมายถึงขนาดความยาวรอยร้าว และ B หมายถึงความหนาของชิ้นงาน สำหรับ $f(a/W)$ นั้นได้มาจากการทดสอบ แต่นี่สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างเหมือนกัน

Geometry	F(a/W)
 <p data-bbox="400 483 592 528">Center Crack Tension (CCT)</p>	$\frac{1}{2} \sqrt{\pi \left(\frac{a}{W}\right) \sec \frac{\pi}{2} \left(\frac{a}{W}\right) \left[1 - 0.25 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + .06 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]}$
 <p data-bbox="360 719 647 752">Compact Type (CT) Specimen</p>	$\frac{(2+aW)}{(1-aW)^{1.5}} (0.886 + 4.64aW - 13.32(aW)^2 + 14.72(aW)^3 - 5.6(aW)^4)$
 <p data-bbox="392 931 616 976">Single Edge Notch Bend (SENB)</p>	$\frac{3 \left(\frac{S}{W}\right) \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} (1-a/W) (2.15 - 3.93(a/W) + 2.7(a/W)^2) \right]}{2(1+2a/W)(1-a/W)^{\frac{3}{2}}}$
 <p data-bbox="376 1144 632 1189">Single Edge Notch Tension (SENT)</p>	$\frac{\left(2 \tan \frac{\pi a}{2W}\right)^{\frac{1}{2}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W}\right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W}\right)^3 \right]$
 <p data-bbox="376 1379 632 1413">Double Edge Notch (DEN)</p>	$\frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\pi a}{W}\right)^{\frac{1}{2}}}{(1-a/W)^{\frac{1}{2}}} \left[1.122 - 0.561(a/W) - 0.205(a/W)^2 + 0.471(a/W)^3 - 0.190(a/W)^4 \right]$

ตารางที่ 2.1 ฟังก์ชันตัวประกอบความเข้มของความเค้นในรูปร่างต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การประยุกต์แนวทางของกลศาสตร์การแตกหัก กับปัญหาความล้ม

ความเป็นมา

ช่วงกลางทศวรรษ 1950 นั้นกลศาสตร์การแตกหักได้ถูกเร่งรัดในการพัฒนา เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องบิน โดยเป็นการร่วมมือกันระหว่างบริษัทเครื่องบินพาณิชย์ และหน่วยงานทางทหาร ต่อมาในช่วง กลางทศวรรษ 1960 แนวคิดของตัวประกอบความเข้มของความเค้น เริ่มได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง

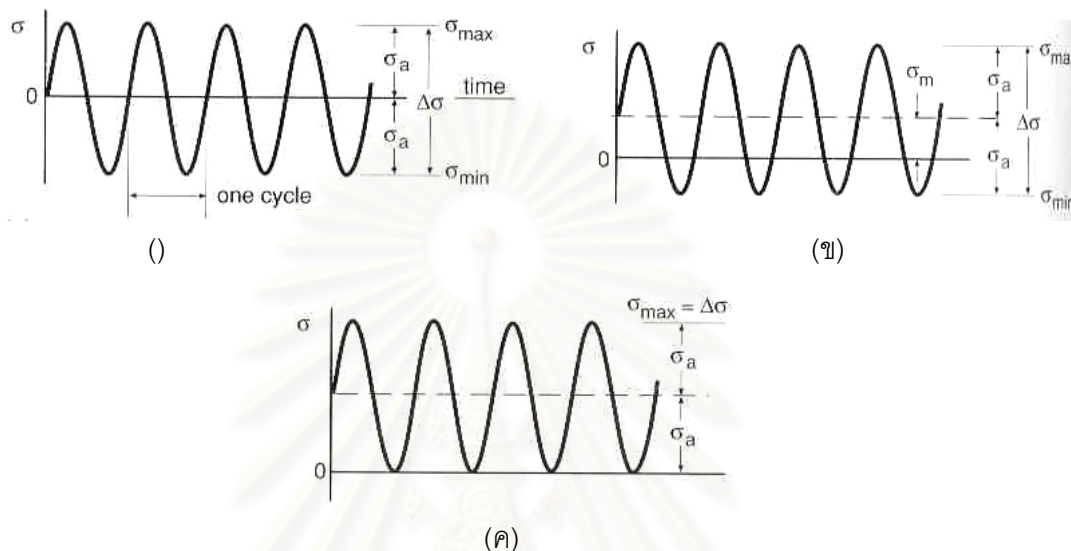
ในปี 1960, P.C. Paris (31) และผู้ร่วมงาน ได้เสนอแนวคิดของการนำความเข้มของความเค้นมาสัมพันธ์กับอัตราการเติบโตของรอยร้าวเป็นครั้งแรก แต่ยังไม่ได้รับการยอมรับมากนักแม้ว่าจะได้พยายามทำการทดลองเพื่อพิสูจน์แนวคิดนี้แล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดีในปัจจุบันแนวคิดนี้ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางแล้ว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์พื้นฐานเกี่ยวกับภาระเป็นรอบ

ในกาทดสอบทั่วไปมักจะใช้ภาระที่มีความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นต่ำสุด และสูงสุดคงที่ เรียกว่า Constant amplitude stress ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของภาระกระทำเป็นรอบแอมพลิจูดคงที่แบบต่างๆ รูป (ก) กรณีที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ รูป (ข) กรณีที่ความเค้นเฉลี่ยเป็นบวก รูป (ค) กรณีภาระกระทำจากศูนย์จนเป็นแรงดึง

ช่วงของความเค้น $\Delta\sigma$ คือค่าแตกต่างระหว่างความเค้นน้อยสุด และความเค้นมากที่สุด ภาระเฉลี่ย σ_m คือค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุด และความเค้นต่ำสุด ค่าแอมพลิจูดความเค้น σ_a คือค่าครึ่งหนึ่งของช่วงความเค้น และต่อไปนี้เป็นสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างแต่ละตัวแปร

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (3.1)$$

โดย เครื่องหมายของ σ_a และ $\Delta\sigma$ เป็นบวกเสมอ นั่นคือค่า σ_{\max} ต้องมากกว่า σ_{\min} และ กำหนดให้แรงดึงเป็นบวก อัตราส่วนระหว่างตัวแปรบางตัวที่นิยมใช้ คือ

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3.2)$$

ค่า R เรียกว่าอัตราส่วนภาวะ และ A เรียกว่าอัตราส่วนแอมพลิจูด ความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่นิยมใช้มีดังนี้

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{\max}(1-R) \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}(1+R)$$

$$R = \frac{1-A}{1+A} \quad A = \frac{1-R}{1+R} \quad (3.3)$$

การกำหนดขนาดของภาวะในการกระทำเป็นคาบนั้น จะต้องกำหนดตัวแปรอิสระขึ้นมา สองตัวแปรจึงจะสามารถครอบคลุมรูปแบบของภาวะได้

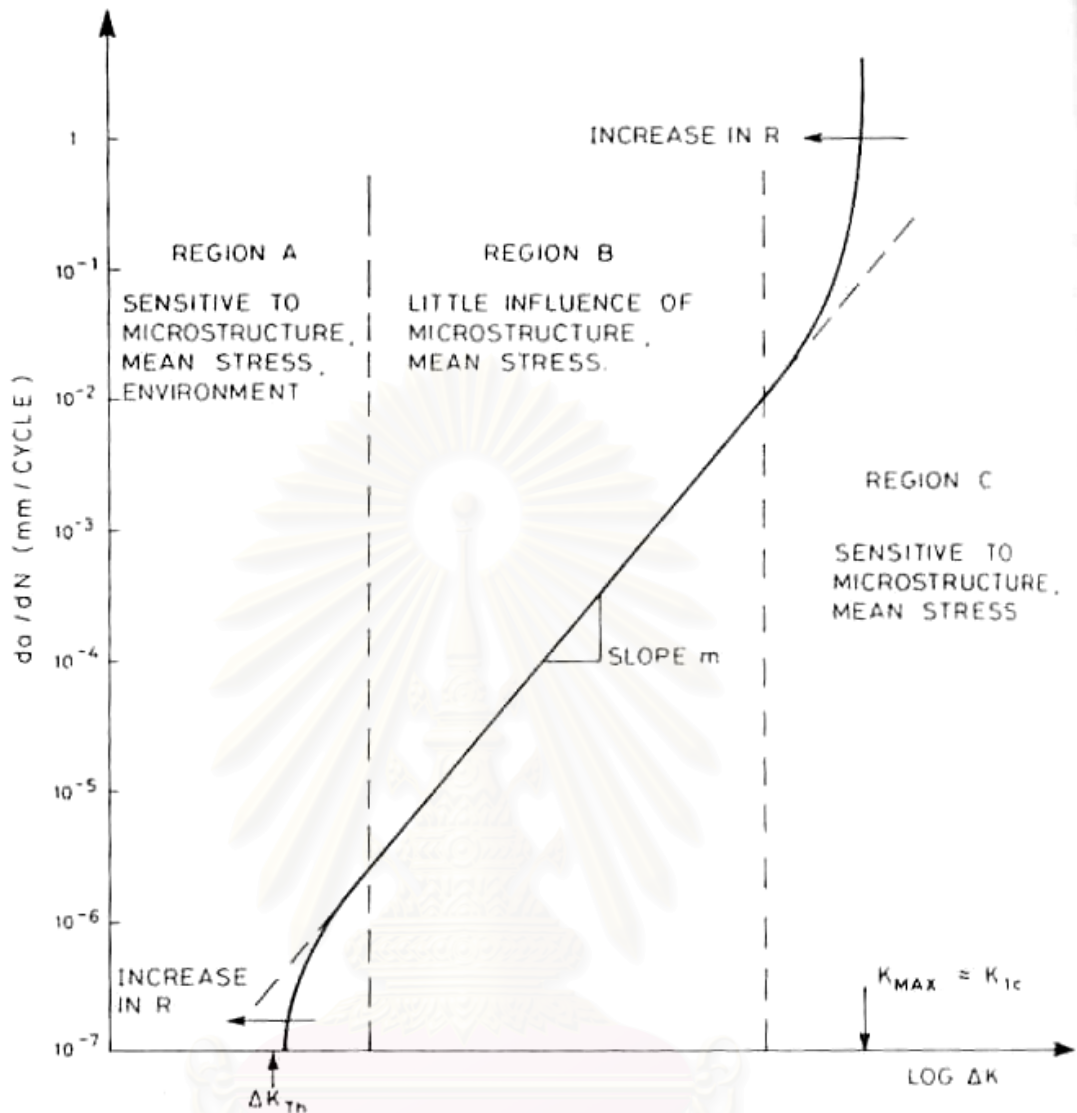
การประยุกต์กลศาสตร์การแตกหักกับปัญหาความล้า

รูปร่างของกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า

ข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้ามักถูกแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเติบโตของรอยร้าวต่อรอบ, da/aN และช่วงตัวประกอบความเข้มของความเค้น ΔK โดย ΔK เป็นตามสมการ

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (3.4)$$

โดยรูปกราฟทั่วไปของการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าแสดงดังรูปที่ 3.2



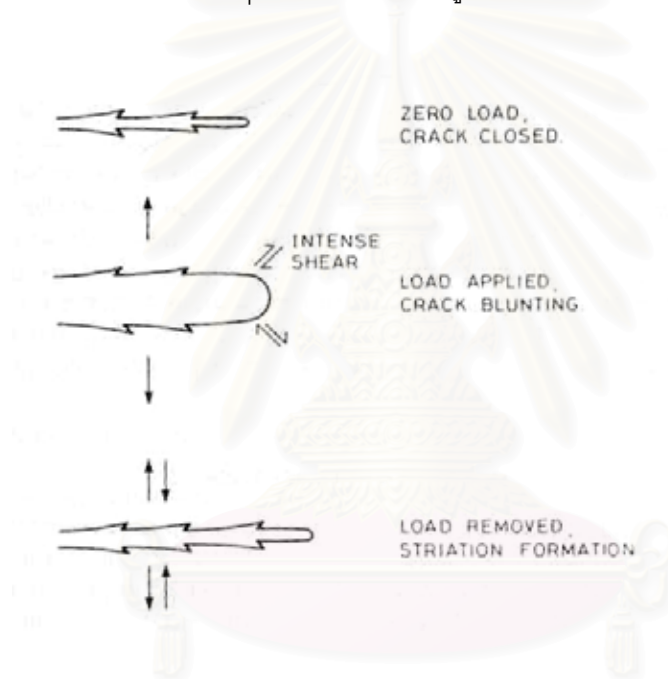
รูปที่ 3.2 ลักษณะของกราฟอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้า

โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยช่วง A เป็นช่วงที่เริ่มเกิดรอยร้าว อัตราการเติบโตของรอยร้าวช่วงนี้มีค่าน้อยกว่า 10^{-6} มม/รอบ และมีค่า ΔK -threshold เป็นค่าต่ำสุดที่มีการเติบโตของรอยร้าว ช่วง B เป็นช่วงที่อัตราการเติบโตรอยร้าวเสถียร กราฟการเติบโตรอยร้าวเป็นเส้นตรงภายใต้ log-scale อัตราการเติบโตของรอยร้าวช่วงนี้มีค่าระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-2} มม/รอบ โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายช่วงนี้ คือ

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (3.5)$$

เมื่อ m คือความชันของเส้นตรง และ C คือค่าคงที่ขึ้นกับชนิดวัสดุและ R-ratio สมการนี้รู้จักกันในชื่อของ Paris Law ในช่วง C อัตราการเติบโตของรอยร้าวมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดความเสียหาย

ความเสียหายเนื่องจากความล้าในช่วง B นั้นมักจะเป็นในลักษณะการขยายตัวเป็นช่วงๆ ที่ละน้อยโดยสังเกตได้บริเวณผิวรอยร้าว ในแต่ละการขยายตัวถูกสร้างจากภาวะในแต่ละรอบขณะที่ในช่วง A นั้น ทุกๆรอบของภาวะไม่จำเป็นจะต้องเกิดการขยายตัวเสมอไป กระบวนการเกิดการขยายตัวเป็นช่วงๆนี้ แสดงให้เห็นดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการการเกิดรอยร้าวเป็นช่วงๆ

โดยทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิห้องอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในช่วง B นั้นไม่ขึ้นกับความถี่ รูปร่างของภาวะ และขนาดชิ้นงาน (ยกเว้นกรณีชิ้นงานเป็นแผ่นบาง) แต่ในช่วง A และ C นั้น ขึ้นกับโครงสร้างของวัสดุ (Microstructure) และภาวะเฉลี่ย โดยสองค่านี้มีผลน้อยกับช่วง B ส่วนสภาพแวดล้อมนั้น มีผลต่อทุกๆช่วงของกราฟการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้า โดยผลจะมากหรือน้อยขึ้นกับองค์ประกอบภายในของวัสดุด้วย

สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า

สมการที่นิยมใช้มากที่สุดของสมการการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า คือสมการ Paris' law ดังแสดงไปในหัวข้อที่แล้ว แต่สมการนี้มีข้อเสียคือยังไม่ได้คิดผลของตัวแปรอื่น เช่น ค่าภาระเฉลี่ย เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้เฉพาะช่วง B ของกราฟการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าเท่านั้น จึงมีผู้พยายามสร้างสมการที่สามารถครอบคลุมได้มากกว่านั้น สมการหนึ่งที่ครอบคลุมผลของภาระเฉลี่ย และสามารถใช้ใน ช่วง B และ C ของกราฟคือสมการของ Forman

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (3.6)$$

เมื่อ C_0 และ m เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง สมการนี้เป็นการพัฒนามาจากสมการของ Paris โดยเพิ่มผลของภาระเฉลี่ยเข้าไป นอกจากนี้ยังมีสมการของ Walker

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{(1-R)^{m(1-\gamma)}} (\Delta K)^m \quad (3.7)$$

ซึ่งรวมผลของภาระเฉลี่ย แต่ใช้ได้เฉพาะช่วง B ของกราฟเท่านั้น

บทที่ 4

ปัญหาความล้าภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง

ความเป็นมา

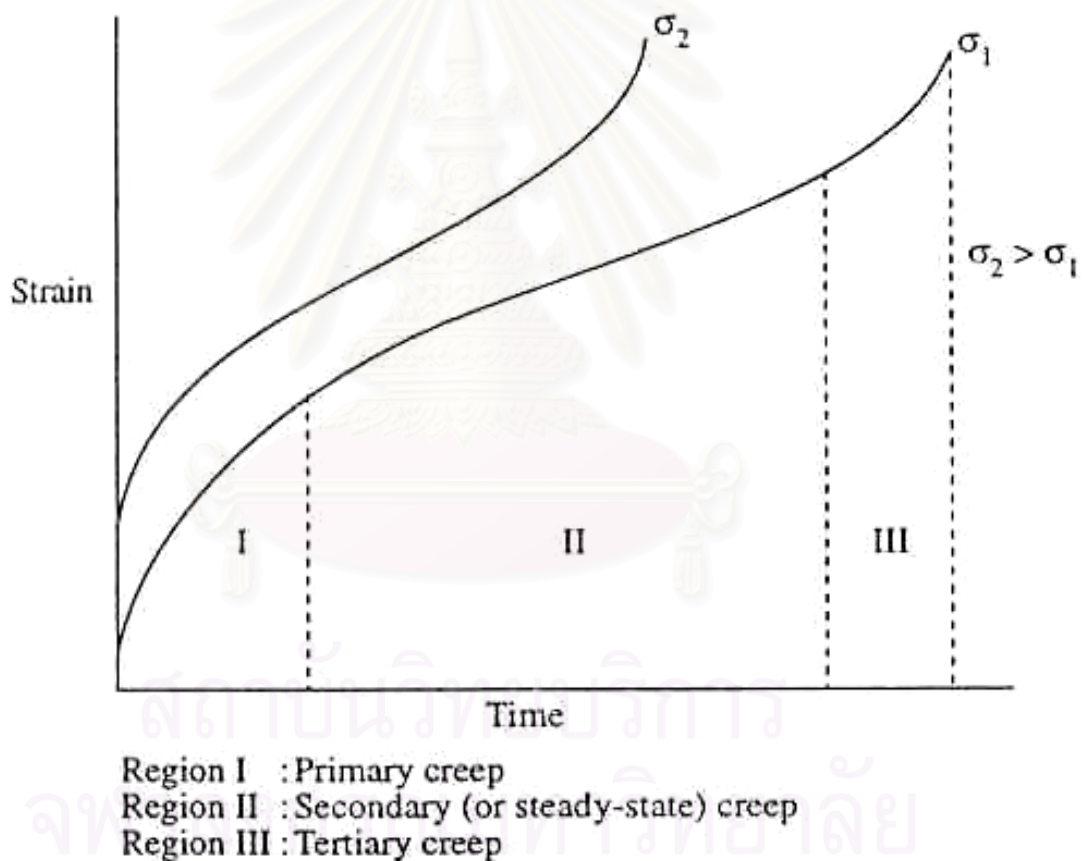
ในช่วงกลางทศวรรษที่ 70 ความรู้ทางด้านกลศาสตร์การแตกหักเริ่มมีมากพอที่จะนำมาใช้กับความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา ผู้ริเริ่มในการนำกลศาสตร์การแตกหักมาใช้คือ Siverns และ Price (32) และ L.A. James (20) โดยได้ใช้ค่าพิสัยความเข้มของความเค้น, K มาอธิบายความเสียหายเนื่องจากความคืบ (creep) และความเสียหายเนื่องจากความล้าและความคืบ (creep-fatigue) ในปี 1976 Landes และ Begley (33) และ Nikbin, Webster และ Turner (34) ได้เสนอการใช้ค่าตัวแปร C^* ในการอธิบายการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความคืบ หลังจากนั้นไม่นาน ได้มีการทดลองของ Taira และผู้ร่วมงานในญี่ปุ่น (35) และการทดลองของ Saxena (36) ในสหรัฐอเมริการับรองการใช้ค่าตัวแปร C^* ในปัญหาความคืบ โดยในช่วงแรกนี้สามารถใช้ได้แค่ช่วงอัตราการเติบโตความคืบคงที่เท่านั้น ต่อมา Ohiji, Ogura และ Kubo (37), Riedel และ Rice (38) และ McClintock และ Bassani (39) เริ่มนำมาใช้กับปัญหาความคืบช่วงเริ่มต้นที่มีขนาดเล็ก หลังจากนั้น Saxena (40) ได้พัฒนาการใช้ตัวแปร C_c ในการอธิบายปัญหาความคืบช่วงเริ่มต้นที่มีขนาดเล็ก หลังจากนั้นจนถึงปัจจุบันเป็นการศึกษาจำนวนรอบของภาระสำหรับความเสียหายเนื่องจากความล้าและความคืบ (creep-fatigue) และการเสียรูปจากความคืบในช่วงเริ่มก็ตัว

สำหรับปัญหาความเสียหายเนื่องจากความล้า นั้น อัตราความเสียหายที่ขึ้นกับเวลาเริ่มมีผลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเกิดจากผลของความคืบ (creep) และสภาวะแวดล้อม ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีทางความคืบ และผลของสภาวะแวดล้อมเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในงานวิจัยนี้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทฤษฎีทางความคืบ (creep)

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าหนึ่งการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลาเริ่มจะต้องให้ความสนใจ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงโมเดลพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเสียรูปเนื่องจากความคืบที่มีความสำคัญ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมความคืบภายใต้ภาวะ ดังรูป 4.1 แสดงกราฟระหว่างความเครียดกับเวลาภายใต้ภาวะคงที่ การเสียรูปจากกราฟสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง 1 อัตราการยืดตัวลดลงตามเวลา เรียกว่า Primary creep ในช่วงที่ 2 อัตราการขยายตัวคงที่ เรียกว่า steady-state creep ในช่วงที่ 3 อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดความเสียหาย เรียกว่า tertiary creep สำหรับในทางวิศวกรรมนั้นเราจะสนใจพิจารณาเฉพาะช่วงที่ 1 และ 2 เท่านั้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะกราฟการเสียรูปเนื่องจากความคืบภายใต้ภาวะคงที่

โมเดลที่ใช้ในการศึกษาการเสียรูปเนื่องจากความเค้น

เมื่อพิจารณาในส่วนของการเสียรูปด้วยอัตราคงที่ในช่วงที่ 2 สมการที่ใช้ในการอธิบายช่วงนี้ เรียกว่า Norton's Law

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (4.1)$$

โดย n เป็นความชันของเส้นกราฟ และ A เป็นค่าคงที่
ในส่วนของ Primary creep นั้น พฤติกรรมการเสียรูปในช่วงนี้ถูกอธิบายโดยสมการ

$$\dot{\epsilon}_p = A_1 \epsilon^{-p} \sigma^{n_1(1+p)} \quad (4.2)$$

เมื่อ p , A_1 และ n_1 คือ ค่าคงที่การถดถอย และ $\dot{\epsilon}'_p$ คือ primary creep rate ในบางครั้งได้ทำการรวม 2 สมการนี้เข้าด้วยกันเพื่ออธิบายทั้ง 2 ช่วงของสมการพร้อมกันโดยอยู่ในรูป

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_p + \epsilon_{ss} \quad (4.3)$$

เพราะฉะนั้น การเสียรูปโดยรวมภายใต้ภาวะจิ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเสียรูปแบบยืดหยุ่น primary creep และ steady-state creep ทำให้ได้สมการการยืดตัวโดยรวม คือ

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{E} + A_1 \epsilon^{-p} \sigma^{n_1(1+p)} + A\sigma^n \quad (4.4)$$

เมื่อ ϵ_{el} = การยืดตัวแบบยืดหยุ่น, ϵ_p = primary creep และ ϵ_{ss} = steady-state creep โดย $\epsilon_{el} = \sigma/E$ ดังนั้นเราจะได้

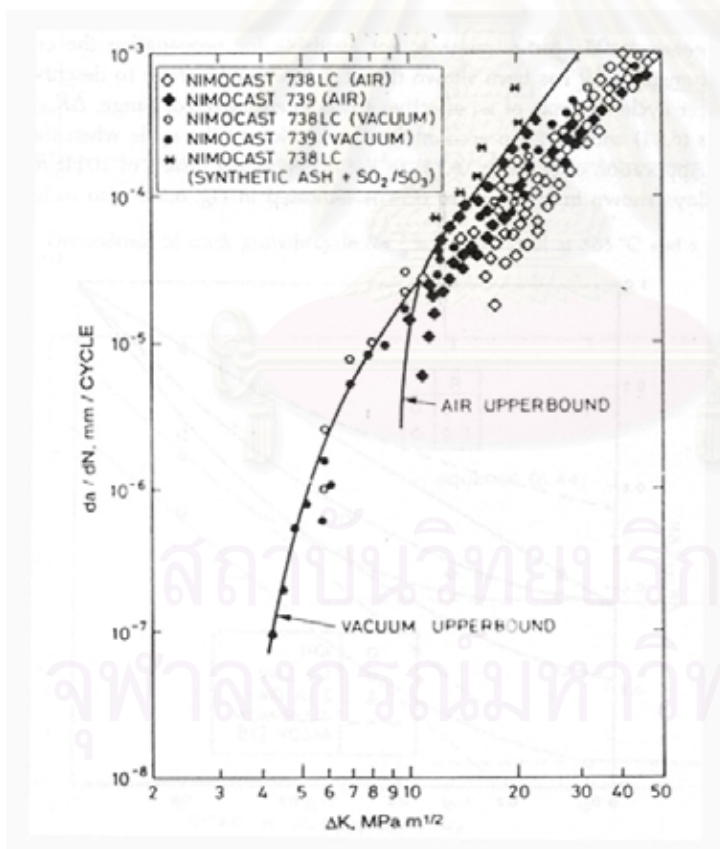
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + [A_1(1+p)t]^{1/(1+p)} \sigma^{n_1} + A\sigma^{n_1} + A\sigma^n t \quad (4.5)$$

โดยสมการนี้แสดงให้เห็นถึงการยึดตัวที่รวมแก่การเสียรูปแบบยืดหยุ่น primary creep และ steady-state creep ไว้ด้วยกัน

ผลของสภาวะแวดล้อมภายใต้อุณหภูมิสูง

ทั้งความคืบในส่วนที่ผ่านมาและผลของสภาวะแวดล้อม เป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา โดยเป็นลักษณะของปฏิกิริยาเชิงความร้อน กระบวนการเหล่านี้ขึ้นกับอุณหภูมิ ความถี่ของภาระ และภาระเฉลี่ย การทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ หรือในสภาวะแวดล้อมที่เป็นก๊าซเฉื่อยถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลของสภาวะแวดล้อม

ตัวอย่างผลการทดลองที่แสดงถึงผลของอากาศต่อความเสียหายเป็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของสิ่งแวดล้อมต่อการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ Nimocast 738LC และ 739 ที่ 850 °C ความถี่ภาระ 10 และ 100 Hz อัตราส่วนภาระ 0.1 (42)

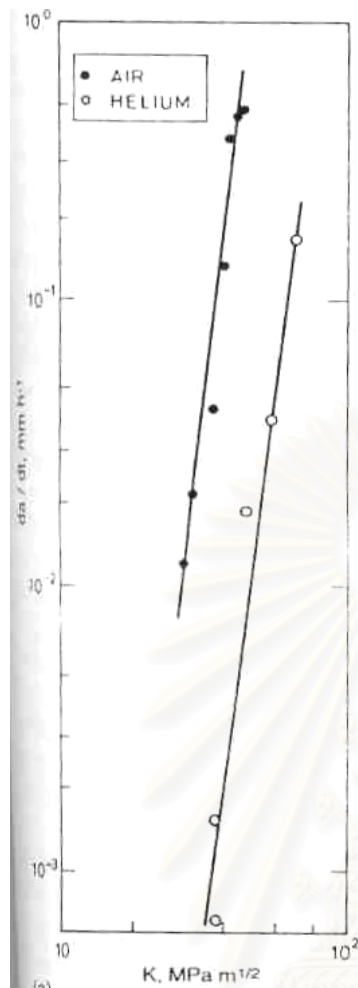
โดยเป็นการทดสอบใน 2 วัสดุที่เป็น nickel base alloy ที่ความถี่ 10 ถึง 100 Hz ที่อุณหภูมิ 850 °C ในตัวอย่างนี้ ไม่แสดงถึงความแตกต่างในช่วง B ของกราฟการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า แต่มีแนวโน้มความแตกต่างในช่วง A โดยค่า K-Threshold ในอากาศมากกว่าในสุญญากาศ ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่สูงความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดเนื่องจากความล้าเป็นส่วนใหญ่

งานวิจัยต่อมาเป็นการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศ และฮีเลียมที่ 650 °C โดยใช้วัสดุ Inconel 718 ภายใต้ภาระคงที่ และภาระกระทำเป็นรอบ ได้ผลดังรูป 4.3 ข้อมูลจากกราฟ (ก) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวในอากาศเร็วกว่าในฮีเลียม จากข้อมูลดังกล่าวระบุได้ว่า ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เป็นฮีเลียมความเสียหายเกิดจากผลของความคืบและความเสียหายที่เกิดในอากาศเกิดจากผลของสภาวะแวดล้อม

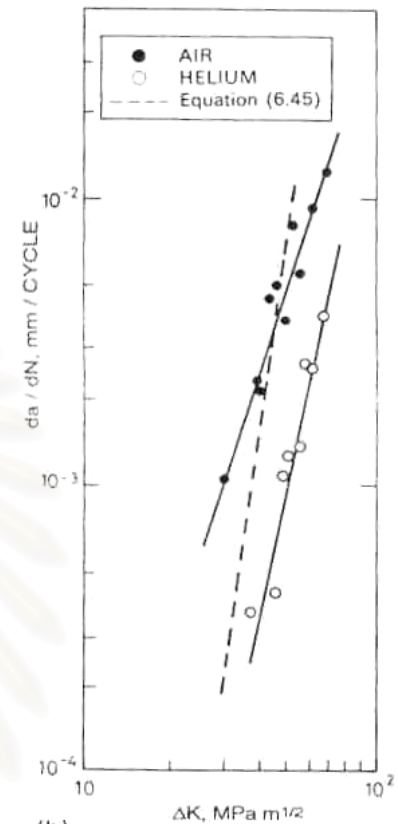
การเปรียบเทียบในรูป (ข) นั้นเป็นการทดสอบในภาระแบบเป็นรอบและค่าอัตราส่วนภาระต่ำ แสดงให้เห็นว่าการเติบโตของรอยร้าวในอากาศสูงกว่าในฮีเลียม การทดลองนี้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นฮีเลียมความเสียหายเกิดเนื่องจากความล้า และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศความเสียหายเกิดเนื่องจากความล้าและสภาวะแวดล้อมรวมกันเนื่องจากการทดสอบนี้กระทำที่อัตราส่วนภาระต่ำ ทำให้ความเสียหายเนื่องจากความคืบมีน้อย

จากข้อมูลที่ผ่านมาสรุปได้ว่า ผลของความถี่เกิดจากการรวมกันของกระบวนการที่ขึ้นกับรอบ (Cycle dependent) และขึ้นกับเวลา (Time dependent) โดยภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เป็นฮีเลียม ความเสียหายเกิดจากความคืบและความล้า และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศ ความเสียหายเกิดจากความเสียหายเกิดจากความคืบ ความล้า และสภาวะแวดล้อมรวมกัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเหล็ก ASME SA-335 Gr. P22 ภายใต้ภาระเป็นคาบที่อุณหภูมิ 300 °C ความเสียหายที่เกิดกับวัสดุจึงมีโอกาสเกิดได้จากทั้งความล้า ความคืบ และผลของสภาวะแวดล้อม ทฤษฎีพื้นฐานเหล่านี้จึงนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นและเนื่องจากงานวิจัยนี้เราไม่สามารถติดตามรอยร้าวได้เนื่องจากปัญหาของอุปกรณ์ เราจึงสามารถศึกษาผลการทดลองในเชิงวิเคราะห์เท่านั้น โดยไม่นำสมการการเติบโตรอยร้าวในทฤษฎีมาใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 การเติบโตของรอยร้าวในอากาศ และในฮีเลียมสำหรับวัสดุ Inconel 718 ที่ 650°C โดยรูป (ก) ภายใต้ภาวะสถิต (ข) ภายใต้ภาวะเป็นรอบที่ $R = 0.1$ และ $f = 0.1$ Hz (43)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

การวิเคราะห์ผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ในบทนี้จะกล่าวถึง ชิ้นงานทดสอบ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย สภาวะทดสอบ และ รายละเอียดของการทดสอบตามลำดับ

ชิ้นงานทดสอบ

รายละเอียดเกี่ยวกับชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ประกอบด้วย

— วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

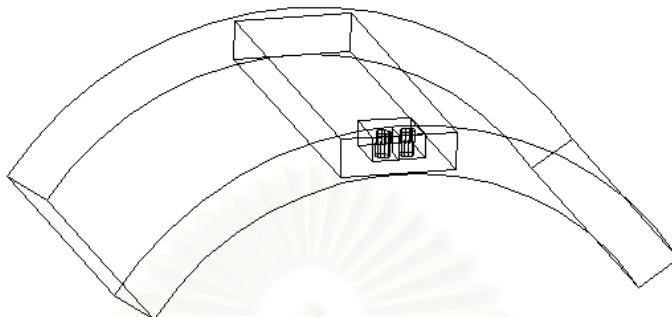
ชนิดวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ เหล็ก ASME SA-335 Gr. P22 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของ Cr 2 ¼% และ Mo 1% ใช้งานในช่วงอุณหภูมิและความดันระหว่าง -10 ถึง 500 °C และ 45 ถึง 324 Kg/cm² ตามลำดับ มีคุณสมบัติทางโลหะดั่งภาคผนวก ก มักเป็นวัสดุที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่อลำเลียงไอน้ำในหม้อกำเนิดไอน้ำ ท่อน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น

— ชนิดของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชิ้นงาน CT (Compact tension) ซึ่งเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E647-93 (5) มีขนาดเล็ก สะดวกแก่การสร้างและขนส่งเข้ากับอุปกรณ์ที่มีอยู่

– ทิศทางการวางตัวของชิ้นงานทดสอบ

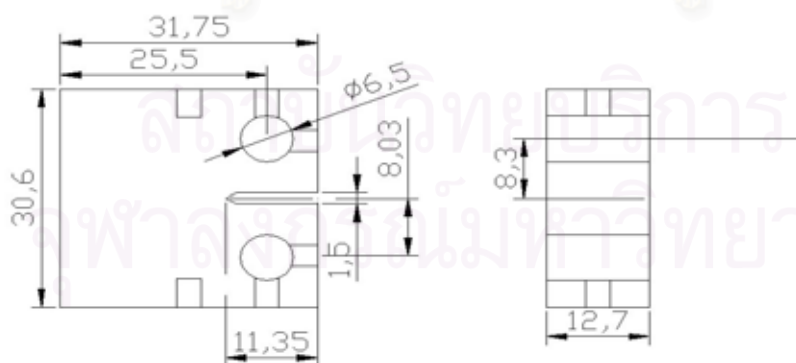
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบนำมาจากท่อไอน้ำ โดยตัดมาในแนวดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 การตัดแบ่งวัสดุจากส่วนที่เป็นท่อ และทิศทางการวางตัวของชิ้นงาน

– ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

ขนาดของชิ้นงานทดสอบถูกกำหนดโดยขนาดของ Grip ที่มีอยู่ โดย Grip สำหรับอุณหภูมิสูงที่ใช้ ออกแบบไว้สำหรับชิ้นงาน CT ขนาด $W = 1$ " และความหนา $B = 0.5$ " เมื่อสร้างตามมาตรฐาน ASTM E 647-93 (5) จึงได้ชิ้นงานมีรูปร่างและขนาด ดังรูป 5.2



Dimension are in mm.

รูปที่ 5.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

Hydraulic servo testing machine

เครื่องทดสอบที่ใช้เป็นของบริษัท Saginomiya มีขีดความสามารถในการสร้างภาระสูงสุดเท่ากับ 30 ตัน ควบคุมโดยส่วนควบคุมรุ่น 2405 ดังรูป 5.3



รูป 5.3 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบนี้ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนหลักๆ ดังนี้

— ส่วนควบคุมหลัก (main controller)

ดังแสดงในรูป 5.4 ทำหน้าที่ควบคุมสภาวะทดสอบ ได้แก่ ขนาดของภาระเฉลี่ย ขนาดของแอมพลิจูดภาระ ความถี่ รูปทรงของคลื่น และจำนวนรอบของการกระทำของภาระต่อชิ้นงานทดสอบ



รูป 5.4 ส่วนควบคุมหลัก

— Actuator และ grip device

ดังแสดงในรูป 5.5 และ 5.6 ทำหน้าที่จับยึด และให้ภาระแก่ชิ้นงาน
ทดสอบ



รูป 5.5 Actuator



รูป 5.6 Grip device

— ชุดไฮดรอลิก (hydraulic unit)

ดังแสดงในรูป 5.7 ทำหน้าที่สร้างความดันแก่ระบบเพื่อใช้ในการสร้าง
ภาวะที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ



รูป 5.7 ชุดไฮดรอลิก

– ระบบระบายความร้อน (cooling tower)

ดังแสดงในรูป 5.8 ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับชุดไฮดรอลิค



รูป 5.8 Cooling Tower

กล้องไมโครสโคป

ดังแสดงในรูป 5.9 เป็นกล้อง Nikon AFX-II มีกำลังขยาย 100, 200, 400 และ 1000 เท่า โดยนำมาช่วยในการวัดความยาวรอยร้าว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 5.9 กล้องไมโครสโคป

เตาและอุปกรณ์ประกอบ

– เตาความต้านทาน (Resistance Furnace)

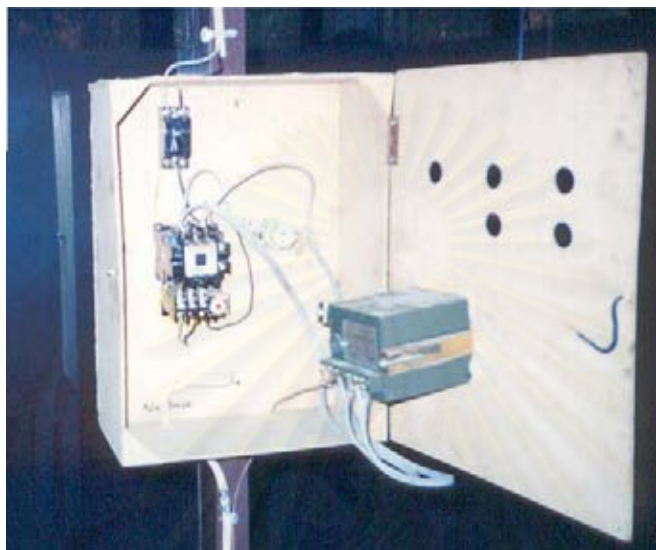
ดังแสดงในรูป 5.10 เป็นเตาความต้านทานขนาด 3500 W มีขนาด 35 ซม สูง 30 ซม สร้างอุณหภูมิสูงสุดได้ 500 °C



รูปที่ 5.10 เตาที่ใช้ในการทดสอบ

– ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ดังแสดงในรูป 5.11 เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ Thermostat ควบคุมอุณหภูมิสูงสุด $900 \pm 1^{\circ}\text{C}$



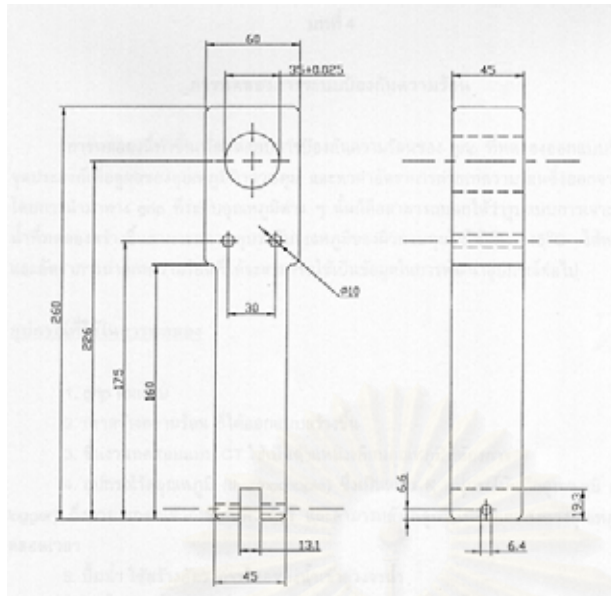
รูป 5.11 ส่วนควบคุมอุณหภูมิ

– อุปกรณ์จับยึดที่ใช้ในอุณหภูมิสูง (High Temperature Grip)

ดังแสดงในรูป 5.12 เป็นอุปกรณ์จับยึดที่มีระบบระบายความร้อน ออกแบบให้มีน้ำวิ่งผ่านด้านที่สัมผัสกับ Actuator เพื่อไม่ให้อุณหภูมิบริเวณ

Actuator สูงเกินไป สามารถใช้ได้สูงสุด 900°C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.12 แบบของอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ในอุณหภูมิสูง

— ระบบระบายความร้อน

มีลักษณะดังรูป 5.13 เป็นระบบระบายความร้อนที่ใช้หลักการของ Cooling Tower



รูป 5.13 อุปกรณ์ระบายความร้อนของ Grip

อุปกรณ์ช่วยเหลืออื่นๆ

– สลัก (Pin)

ดังรูป 5.14 ทำหน้าที่ยึดชิ้นงานกับอุปกรณ์จับยึด



รูปที่ 5.14 สลักที่ใช้ในการทดสอบ

– สเปรย์ทำความสะอาด

ดังรูป 5.15 สำหรับทำความสะอาดผิวชิ้นงานทดสอบเพื่อง่ายแก่การสังเกตรอยร้าว



รูป 5.15 สเปรย์ทำความสะอาด

– ไดอัลเกจ (Dial Gauge)

ดังรูป 5.16 ใช้เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัดความยาวรอยร้าว



รูป 5.16 ไดอัลเกจ

สภาวะทดสอบ

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แก่ ความถี่ของภาระ เงื่อนไขในการกำหนดความถี่ที่จะทำการทดลอง คือข้อจำกัดของแต่ละอุปกรณ์ เนื่องจากที่ภาระค่าหนึ่ง เครื่องทดสอบมีความสามารถที่จะสร้างความถี่ของภาระได้สูงสุดค่าหนึ่ง (30 ตัน เมื่อไม่มีภาระ) ทำให้ข้อจำกัดของเครื่องทดสอบเป็นข้อจำกัดด้านสูงของความถี่ที่จะทดสอบ สำหรับเตา และระบบระบายความร้อนนั้น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิบริเวณผิวเตาสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ไม่สามารถทดลองที่ความถี่ต่ำ (ใช้เวลานานขึ้น) ได้ ทำให้ข้อจำกัดของเตาและระบบระบายความร้อนเป็นข้อจำกัดด้านต่ำของความถี่ที่จะทดสอบ

สรุปสภาวะแวดล้อมที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

– ความถี่ที่ทดสอบ

ทดสอบที่ความถี่ 10, 20, 30 เฮิรตซ์ โดยทำการทดลองซ้ำความถี่ละ 2 ครั้งยกเว้นที่ความถี่ 30 เฮิรตซ์ เนื่องจากเกิดเสียงดังบริเวณส่วนควบคุมภาระของเครื่องทดสอบในช่วงท้ายของการทดสอบทำให้ไม่ทดลองซ้ำเนื่องจากเสียงต่อความเสียหายของเครื่องทดสอบ

— อุณหภูมิที่ทดสอบ

ทดสอบที่อุณหภูมิ 300°C เนื่องจากเตาความต้านทานที่ใช้ในการทดสอบมีอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้โดยปลอดภัยไม่เกิน 500 °C

— ภาระที่ใช้ทดสอบ

ทดสอบที่ภาระเฉลี่ย 1.0 ตัน และแอมป์ลิจูดภาระ 0.25 ตัน อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.6

โดยทำการทดลองในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศ

รายละเอียดของการทดสอบ

การทดสอบจะเริ่มต้นโดยการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าที่ภาระเท่ากับ 1.0 ± 0.25 ตัน กับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ซึ่งเป็นวัสดุเหล็กกล้าออกแบบให้ใช้งานที่อุณหภูมิ 0-500°C หลังจากนั้นทำการติดตามความยาวรอยร้าว จนกระทั่งรอยร้าวมีความยาวเท่ากับ 1.5 มม. จึงหยุดให้ภาระ และนำชิ้นงานมาทดสอบในเตา โดยเพิ่มอุณหภูมิที่เตาทีละ 50°C จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 300°C ที่ซึ่งอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ จึงเริ่มใส่ภาระขนาดเท่ากับ 1.0 ± 0.25 ตัน และทำการเก็บข้อมูลระยะยืดตัวในแต่ละรอบ (Displacement) อุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาทำการทดสอบและค่ารอบความเสียหายของชิ้นงาน โดยทำการทดลองจนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย ทำการทดลองซ้ำที่ความถี่เดิม และความถี่ต่างกัน รอบความเสียหายแตกต่างกันที่ความถี่เดียวกัน กับรอบความเสียหายแตกต่างกันที่ความถี่ต่างกัน และเปรียบเทียบกราฟระยะยืดตัวของแต่ละความถี่ เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่ารอบความเสียหายแตกต่างกันที่ความถี่เดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกับรอบความ

เสียหายแตกต่างกันที่ความถี่ต่างกัน และกราฟระยะยืดตัวของแต่ละความถี่ไม่แตกต่างกัน ทำให้สรุปได้ว่าความถี่ไม่มีผลต่อรอบเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ในสภาวะที่ทำการทดสอบ

ต่อมาได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อขยายผลการศึกษากับวัสดุ AISI 4140 สาเหตุที่เลือกใช้วัสดุนี้เนื่องจาก วัสดุ AISI 4140 เป็นวัสดุเพลลาออกแบบให้ใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ทำให้โอกาสที่ความถี่จะมีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้านั้นมีสูง หลังจากทำการทดสอบโดยกระบวนการเดียวกันกับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ที่ความถี่ 10 และ 20 Hz พบว่า ระยะยืดตัว รอบความเสียหาย และผิวรอยแตกร้าวของชิ้นงาน แตกต่างกันชัดเจนดังจะกล่าวในส่วนต่อไป

ข้อแนะนำในการทดสอบ

เกี่ยวกับชิ้นงาน

- การสร้างรอยร้าวแรกเริ่มจะต้องทำการวัดอย่างระมัดระวังในช่วงที่มีความยาวรอยร้าวใกล้กับความยาวรอยร้าวแรกเริ่มที่กำหนด (1.5 mm) โดยทำการวัดถี่ขึ้นเพื่อให้ได้ขนาดรอยร้าวแรกเริ่มใกล้เคียงกับที่กำหนดมากที่สุด
- การวัดความยาวรอยร้าวที่ถี่เกินไปอาจทำให้รอยร้าวหยุดการเติบโตได้ จึงต้องเว้นระยะในการวัดแต่ละครั้งพอสมควร
- ควรมีการขัดผิวของชิ้นงานก่อนทำการสร้างรอยร้าวแรกเริ่ม โดยทำการขัดในแนวขวางกับรอยร้าวที่จะสร้างเพื่อสะดวกในการวัดรอยร้าว และห้ามขัดผิวหลังจากเริ่มทำการสร้างรอยร้าวไปแล้วเนื่องจากเศษผงจากการขัดจะไปอุดรอยร้าวทำให้การวัดผิดพลาด
- ภายหลังจากที่ทำการสร้างรอยร้าวแรกเริ่มเสร็จแล้วควรเก็บชิ้นงานใส่วัสดุชนิดที่ไม่มีอากาศเข้าเพื่อป้องกันการเกิดสนิม แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตามไม่ควรเก็บชิ้นงานไว้นานเกินไปเพราะอาจจะทำให้รอยร้าวไม่เดินในช่วงแรกของการทดลอง และทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้

เกี่ยวกับเตา

เนื่องจากเตาที่ใช้สร้างเปลือกนอกเป็นวัสดุนำไฟฟ้าจึงต้องระมัดระวัง
เกี่ยวกับการรั่วไหลของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ถ้าไม่
ระมัดระวัง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะแสดงผลการทดสอบผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 โดยจะแสดงผลของรอบความเสียหายในแต่ละความถี่ การยืดตัวของแต่ละความถี่ที่รอบต่าง ๆ กัน และตัวแปรแวดล้อมอื่นๆ ดังกราฟและตารางต่อไปนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPECIMEN P22-1		FREQUENCY 10 Hz			TEMPERATURE 300 °C	
					LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE (°C)	
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)		
0	3.33	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
20000	3.34	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
40000	3.36	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
60000	3.37	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298	
80000	3.38	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298	
100000	3.39	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
110000	3.34	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
120000	3.41	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
130000	3.42	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
140000	3.43	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
150000	3.44	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
160000	3.46	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	299	
170000	3.48	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	299	
175000	3.50	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
180000	3.51	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
185000	3.53	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
190000	3.56	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
195000	3.59	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
200000	3.63	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
205000	3.68	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
210000	3.74	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
212000	3.78	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
216000	3.84	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
220000	3.94	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
222000	3.99	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
226000	4.14	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
230000	4.34	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299	
CYCLE TO FAILURE 234152						

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวัสดุ P22-1

SPECIMEN P22-2		FREQUENCY 10 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
				LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE (°C)
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	
0	1.26	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
20000	1.27	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
40000	1.29	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
60000	1.30	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	300
80000	1.33	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
100000	1.34	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
110000	1.34	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
120000	1.35	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
130000	1.36	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
140000	1.38	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
150000	1.38	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
160000	1.40	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	299
170000	1.43	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	299
175000	1.44	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
180000	1.46	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
185000	1.48	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
190000	1.50	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
195000	1.55	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
200000	1.59	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
205000	1.65	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
210000	1.73	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
212000	1.76	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
216000	1.84	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
220000	1.95	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
222000	2.03	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
226000	2.22	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
230000	2.70	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
<u>CYCLE TO FAILURE 230893</u>					

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวัสดุ P22-2

SPECIMEN P22-3		FREQUENCY 20 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
LOAD 1.00 ± 0.25 TON					
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE (°C)
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	
0	2.95	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	300
20,000	2.99	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
40,000	2.99	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
60,000	3.01	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
80,000	3.03	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
100,000	3.03	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
110,000	3.04	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
120,000	3.05	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
130,000	3.06	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
140,000	3.07	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
150,000	3.08	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
160,000	3.09	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
165,000	3.10	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
170,000	3.11	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
175,000	3.13	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
180,000	3.13	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
185,000	3.15	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
190,000	3.18	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
195,000	3.21	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
200,000	3.25	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
204,000	3.29	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
208,000	3.34	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
212,000	3.41	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
216,000	3.49	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
220,000	3.59	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
222,000	3.66	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
224,000	3.75	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
226,000	3.87	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
228,000	4.04	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
230,000	4.21	0.10	0.965-0.975	0.235-0.240	299
CYCLE TO FAILURE 230094					

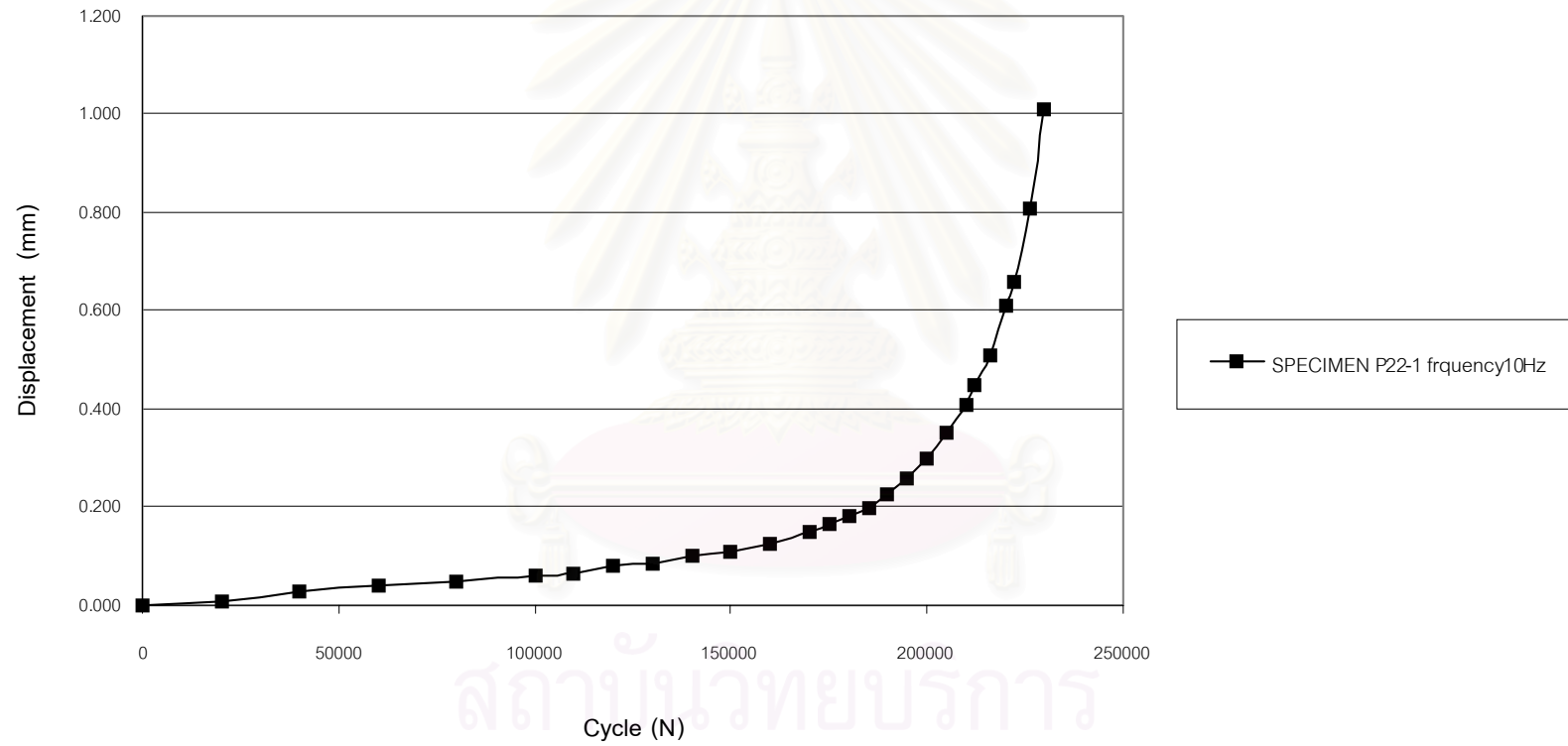
ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบวัสดุ P22-3

SPECIMEN P22-4		FREQUENCY 20 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
				LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE (°C)
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	
0	2.98	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
20,000	3.00	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
40,000	3.01	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
60,000	3.03	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
80,000	3.04	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
100,000	3.05	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
110,000	3.06	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
120,000	3.06	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
130,000	3.08	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
140,000	3.08	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
150,000	3.09	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
160,000	3.10	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	298
165,000	3.11	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	298
170,000	3.13	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
175,000	3.13	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
180,000	3.15	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
185,000	3.17	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
190,000	3.19	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
195,000	3.22	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
200,000	3.25	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
204,000	3.29	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
208,000	3.34	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
212,000	3.39	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
216,000	3.46	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
220,000	3.54	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
222,000	3.59	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	299
224,000	3.66	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
226,000	3.75	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
228,000	3.84	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
230,000	3.96	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	299
<u>CYCLE TO FAILURE 235263</u>					

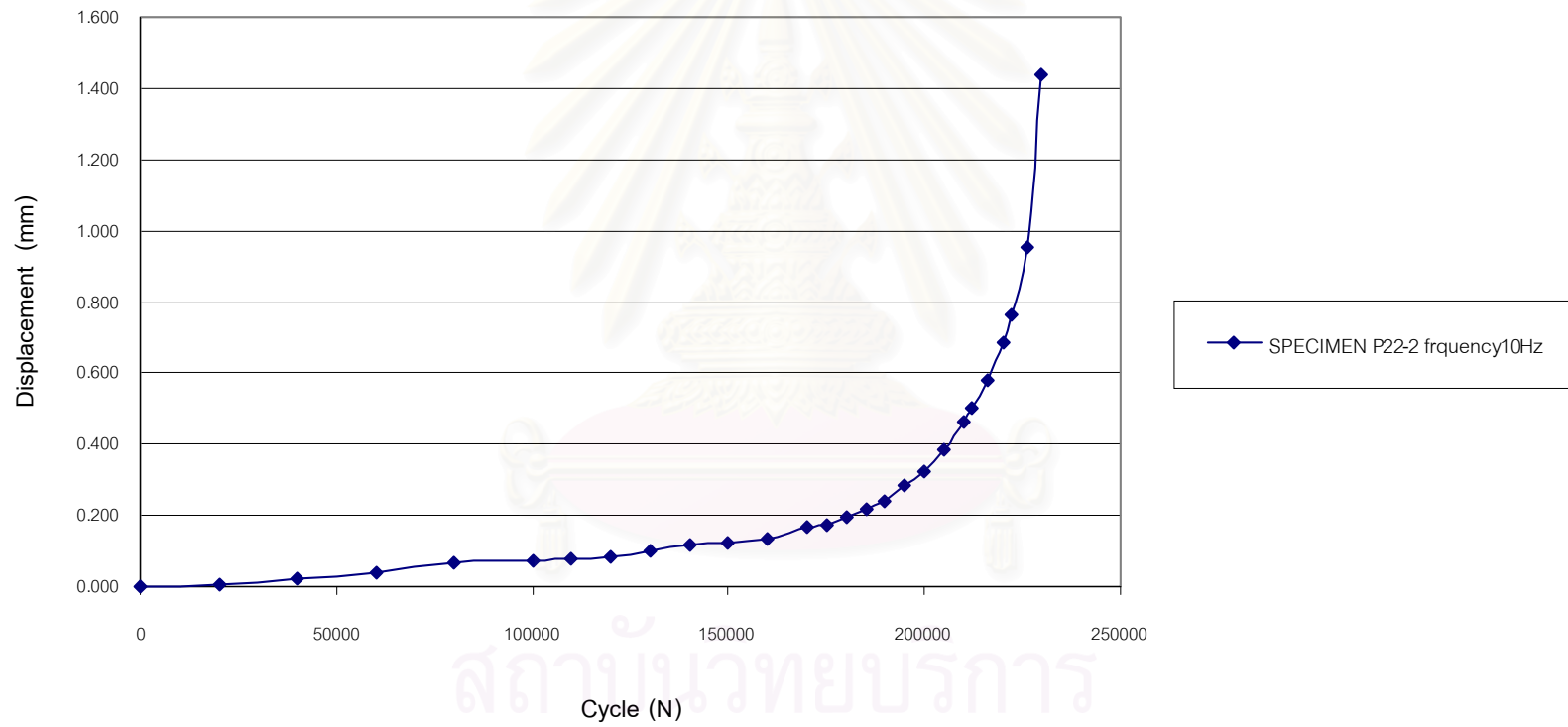
ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบวัสดุ P22-4

SPECIMEN P22-5		FREQUENCY 30 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
				LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE (°C)
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	
0	-0.09	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	302
20,000	-0.09	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	302
40,000	-0.09	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	302
60,000	-0.06	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	301
80,000	-0.05	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	300
100,000	-0.04	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	301
110,000	-0.04	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	301
120,000	-0.03	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	301
130,000	-0.02	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	301
140,000	-0.01	0.06	0.965-0.975	0.235-0.245	300
150,000	0.01	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
160,000	0.03	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
165,000	0.03	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
170,000	0.04	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
175,000	0.04	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
180,000	0.07	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
185,000	0.07	0.07	0.965-0.975	0.235-0.245	300
190,000	0.13	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	300
195,000	0.18	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	300
200,000	0.21	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	300
205,000	0.28	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	300
210,000	0.38	0.08	0.965-0.975	0.235-0.245	300
215,000	0.51	0.09	0.965-0.975	0.235-0.245	300
220,000	0.74	0.09	0.965-0.975	0.235-0.245	300
222,000	0.90	0.09	0.965-0.975	0.235-0.245	300
224,000	1.26	0.10	0.965-0.975	0.235-0.245	300
CYCLE TO FAILURE 224673					

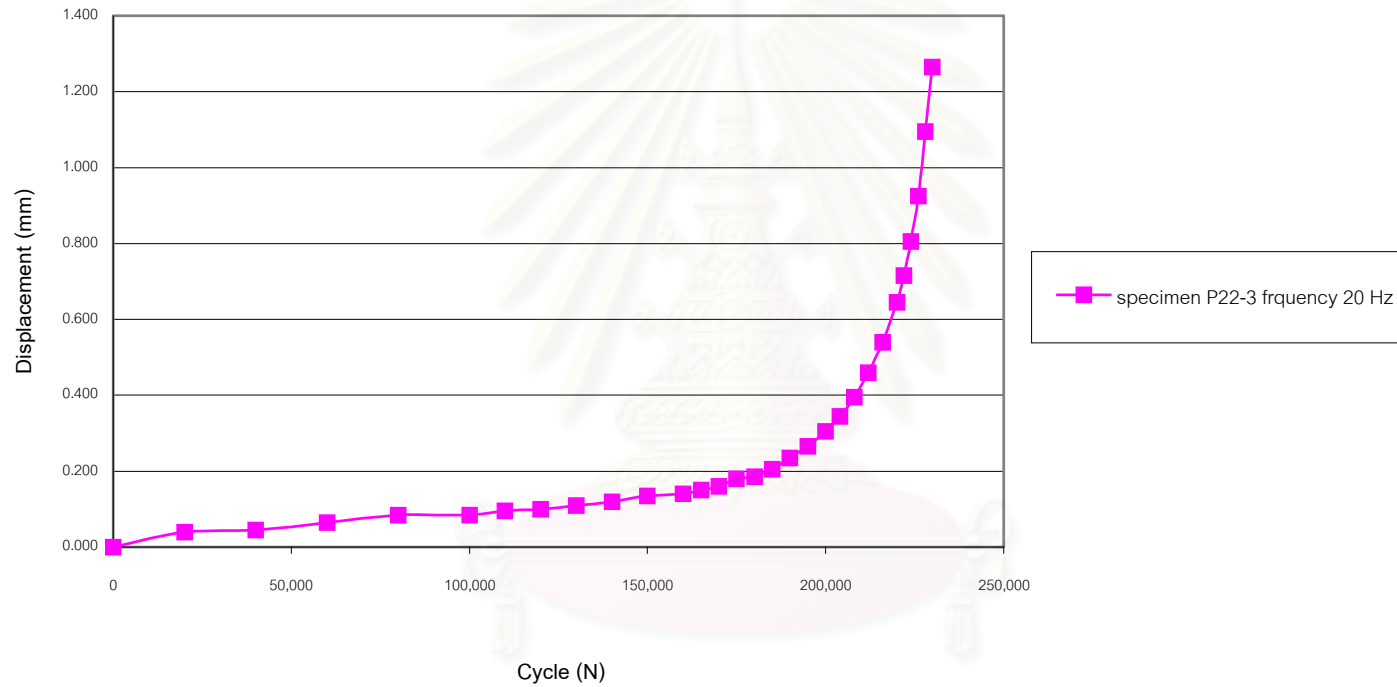
ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบวัสดุ P22-5



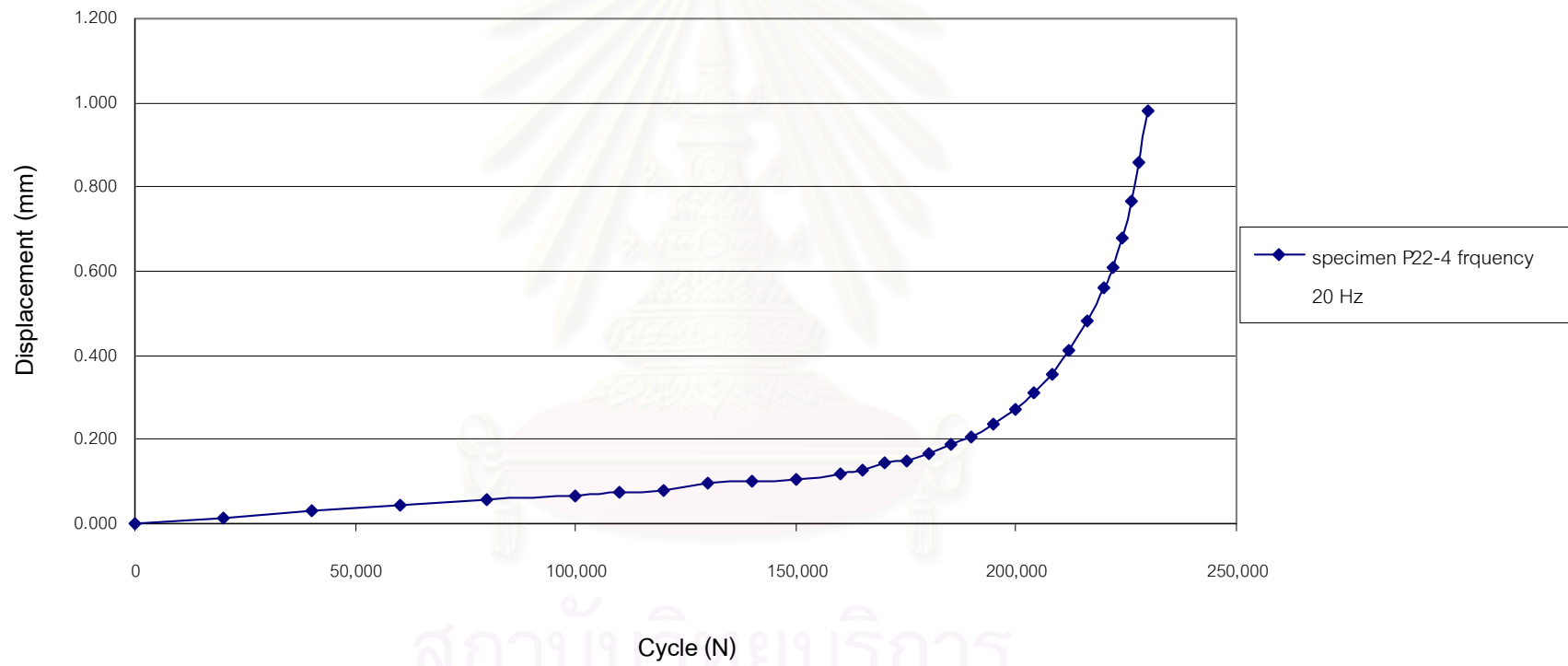
รูปที่ 6.1 ระยะเวลาขดตัวชิ้นงานที่ P22-1 ความถี่ 10 Hz



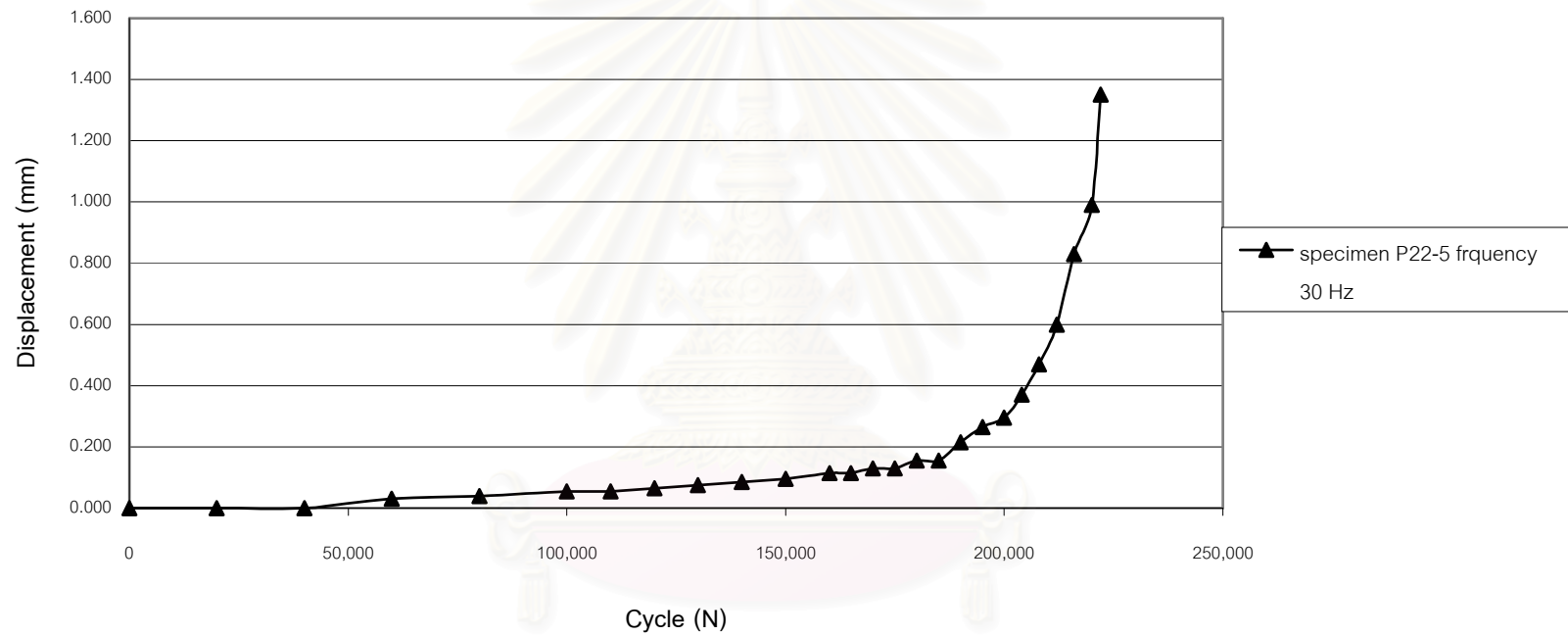
รูปที่ 6.2 ระยะยืดตัวชิ้นงานที่ P22-2 ความถี่ 10 Hz



รูปที่ 6.3 ระยะยืดตัวชิ้นงานที่ P22-2 ความถี่ 20 Hz



รูปที่ 6.4 ระยะเวลาตัดตัวชิ้นงานที่ P22-4 ความถี่ 20 Hz



รูปที่ 6.5 ระยะยืดตัวที่งานที่ P22-5 ความถี่ 30 Hz

specimen	frequency	load(ton)		Temperature (°C)	crack start (mm)	crack end (mm)	cycle to failure(N)
		mean	amplitude				
P22-1	10	0.970	0.238	299.1	6.6	16.1	234152
P22-3	20	0.970	0.238	298.3	6.6	16.1	235263
P22-4	20	0.970	0.238	298.5	6.6	16.1	230094
P22-5	30	0.970	0.240	300.3	6.6	16.1	224673
P22-2	10	0.970	0.238	298.9	6.6	16.1	230893

ตารางที่ 6.6 ตารางสรุปผลการทดลอง P22

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผิวยรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ P22-1

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 10 Hz รอบความเสียหาย 234152 รอบ ลักษณะผิวยรอยร้าวแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ ส่วน A ผิวยที่เกิดจากความเสียหายแบบรวดเร็ว ส่วน B ผิวยที่เกิดจากการเติบโตของรอยร้าวจากการทดสอบ ส่วน C ผิวยที่เกิดจากการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้า ส่วน D ผิวยที่เกิดจากการสร้างชิ้นงาน ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ

ด้านบน



ด้านล่าง



ชิ้นงาน P22-2

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 10 Hz รอบความเสียหาย 230893 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านมา และมีความยาวรอยร้าวใกล้เคียงกัน

ด้านบน



ด้านล่าง



บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน P22-3

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 20 Hz รอบความเสียหาย 235263 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านมา และมีความยาวรอยร้าวใกล้เคียงกัน

ด้านบน



ด้านล่าง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน P22-4

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 20 Hz รอบความเสียหาย 230094 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านมา และมีความยาวรอยร้าวใกล้เคียงกัน

ด้านบน



ด้านล่าง



ศูนย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

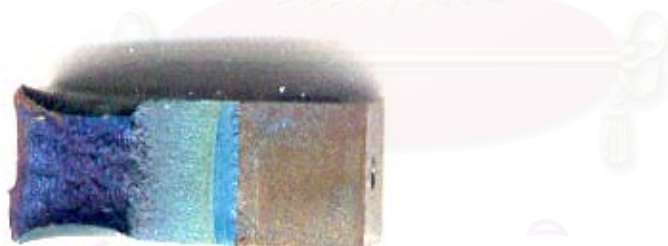
ชิ้นงาน P22-5

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 30 Hz รอบความเสียหาย 224673 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านมา และมีความยาวรอยร้าวใกล้เคียงกัน

ด้านบน



ด้านล่าง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากเมื่อทดสอบกับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ซึ่งเป็นวัสดุเตาแล้วความถี่ไม่มีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าดังจะกล่าวในบทต่อไป เนื่องจากยังไม่ทราบว่าผลลักษณะนี้เกิดกับทุกวัสดุหรือไม่จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมกับวัสดุ AISI 4140 ซึ่งเป็นวัสดุเพลลาที่ใช้งานที่อุณหภูมิห้อง

ผลการทดสอบวัสดุ AISI 4140

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะแสดงผลการทดสอบผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ AISI 4140 โดยจะแสดงผลของรอบความเสียหายในแต่ละความถี่ การยึดตัวของแต่ละความถี่ที่รอบต่างๆกัน และตัวแปรแวดล้อมอื่นๆดังกราฟและตารางต่อไปนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AISI 4140-2		FREQUENCY 20 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
				LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE °C
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	
0	3.87	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
20000	3.88	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
30000	3.89	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
40000	3.89	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
50000	3.89	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
60000	3.91	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
70000	3.93	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
80000	3.94	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
90000	3.94	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
103000	3.97	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
116000	4.00	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
130000	4.05	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
135000	4.08	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
140000	4.10	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
145000	4.13	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
150000	4.18	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
155000	4.22	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
160000	4.27	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
165000	4.33	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
170000	4.38	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	298
172000	4.42	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
174000	4.45	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
176000	4.48	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
178000	4.51	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
180000	4.54	0.08	0.965-0.976	0.235-0.240	298
182000	4.58	0.07	0.965-0.977	0.235-0.240	298
184000	4.63	0.08	0.965-0.978	0.235-0.240	298
186000	4.68	0.08	0.965-0.979	0.235-0.240	298
188000	4.73	0.07	0.965-0.980	0.235-0.240	298
190000	4.79	0.08	0.965-0.981	0.235-0.240	298
192000	4.86	0.08	0.965-0.982	0.235-0.240	298
194000	4.93	0.08	0.965-0.983	0.235-0.240	298
196000	5.02	0.09	0.965-0.975	0.235-0.240	298
198000	5.13	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
200000	5.28	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	298
CYCLE TO FAILURE 204950					

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-2

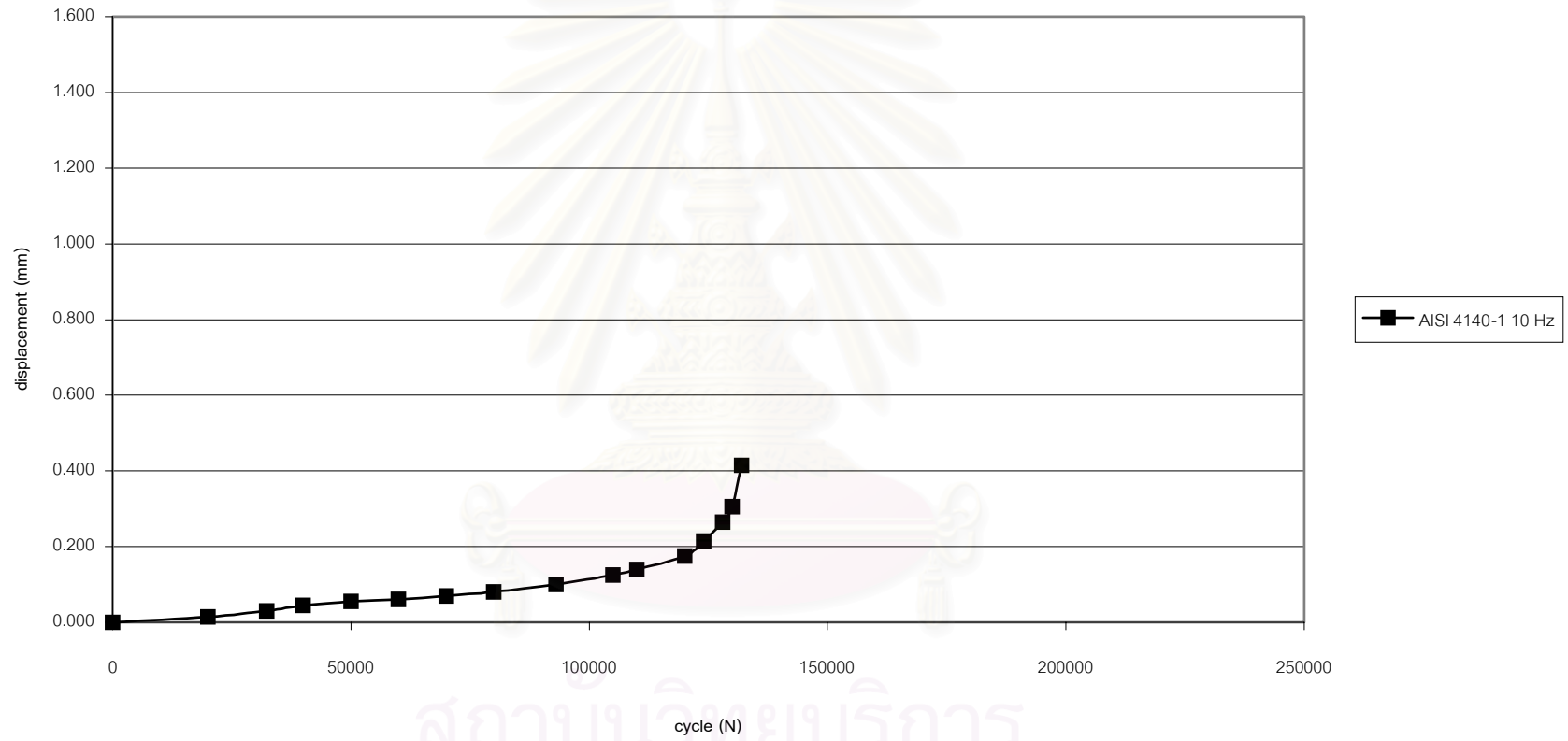
AISI 4140-1		FREQUENCY 10 Hz		TEMPERATURE 300 °C	
				LOAD 1.00 ± 0.25 TON	
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	°C
0	2.07	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
20000	2.08	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
32300	2.10	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	298
40000	2.11	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
50000	2.12	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
60000	2.13	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
70000	2.14	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
80000	2.15	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
93000	2.17	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	299
105000	2.19	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
110000	2.21	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
120000	2.24	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
124000	2.28	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
128000	2.33	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
130000	2.37	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
132000	2.48	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
CYCLE TO FAILURE 132117					

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-1

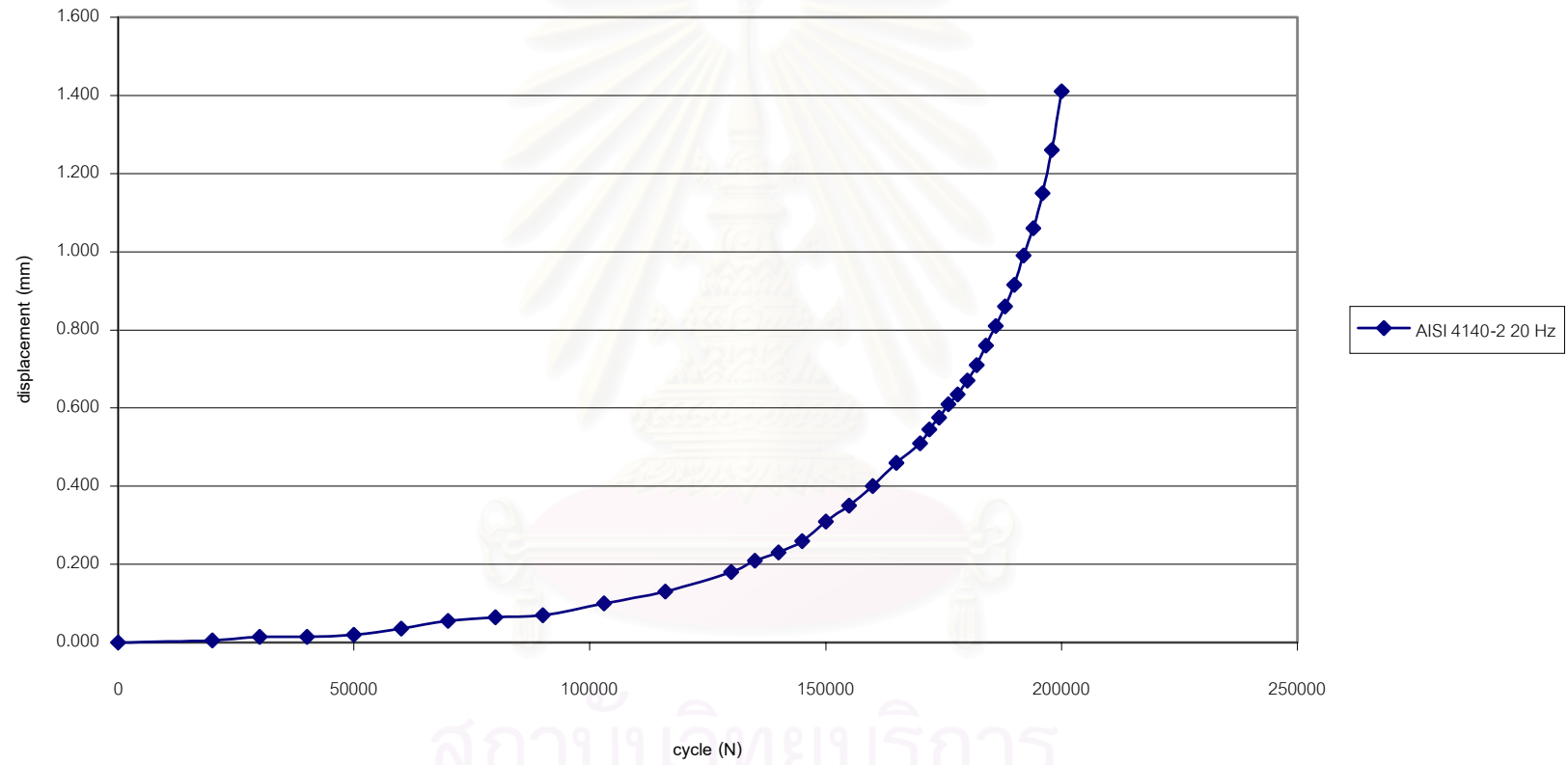
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AISI 4140-3		FREQUENCY 20 Hz			TEMPERATURE 300 °
					LOAD 1.00 ± 0.25
CYCLE	DISPLACEMENT		LOAD		TEMPERATURE
	AVERAGE(mm)	AMPLITUDE(mm)	AVERAGE(ton)	AMPLITUDE(ton)	°C
0	3.13	0.06	0.965-0.975	0.235-0.240	300
20000	3.14	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
30000	3.16	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
40000	3.16	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
50000	3.18	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
60000	3.18	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
70000	3.20	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
80000	3.21	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
90000	3.22	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	299
100000	3.24	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
110000	3.25	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
120000	3.28	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
130000	3.31	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
140000	3.35	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
144000	3.38	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
148000	3.39	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
152000	3.42	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
156000	3.45	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
160000	3.48	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
164000	3.50	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
168000	3.55	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
172000	3.59	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
176000	3.67	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
180000	3.71	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
184000	3.75	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
188000	3.83	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
190000	3.89	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
194000	4.00	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
198000	4.11	0.07	0.965-0.975	0.235-0.240	300
202000	4.24	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
206000	4.37	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
210000	4.50	0.08	0.965-0.975	0.235-0.240	300
CYCLE TO FAILURE 212494					

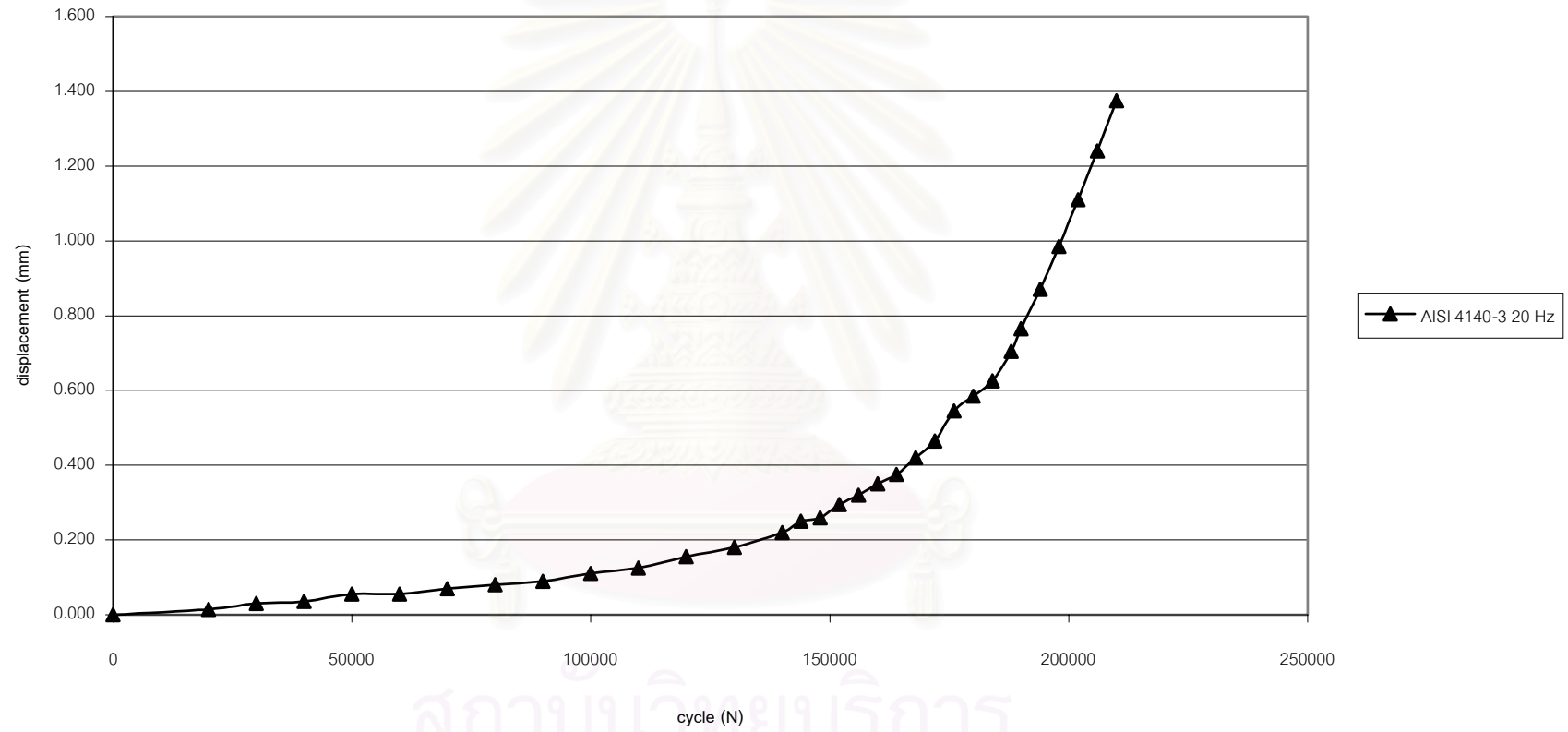
ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบวัสดุ AISI4140-3



รูปที่ 6.6 ระยะยืดตัวที่งานที่ AISI4140-1 ความถี่ 10 Hz



รูปที่ 6.7 ระยะยืดตัวที่งานที่ AISI 4140-2 ความถี่ 20 Hz



รูปที่ 6.8 ระยะยืดตัวที่งานที่ AISI 4140-3 ความถี่ 20 Hz

specimen	frequency (Hz)	load(ton)		temperature (C)	crack start (mm)	crack end (mm)	cycle to failure (N)	time to failure (hr)
		mean	amplitude					
AISI 4140-2	20	0.970	0.238	298.29	6.6	13.6	204950	2.85
AISI 4140-3	20	0.970	0.238	299.66	6.6	13.6	212494	2.95
AISI 4140-1	10	0.970	0.238	298.70	6.6	11.1	132117	3.76

ตารางที่ 6.10 ตารางสรุปผลการทดลอง AISI4140



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผิวรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงาน AISI 4140-1

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 10 Hz รอบความเสียหาย 132117 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างหยาบ และสั้นเมื่อเทียบกับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22

ด้านบน



ด้านล่าง



ชิ้นงาน AISI 4140-2

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 20 Hz รอบความเสียหาย 204950 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และยาวกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz

ด้านบน



ด้านล่าง



สถาบันส่งเสริมบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน AISI 4140-3

ชิ้นงานทดสอบความถี่ 20 Hz รอบความเสียหาย 212494 รอบ ความเสียหายแบ่งเป็น 4 ส่วนเหมือนชิ้นทดสอบที่ผ่านมา ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ลักษณะของรอยร้าวจากการทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และยาวกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz และมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงานในรูปที่ผ่านมา

ด้านบน



ด้านล่าง



บทที่ 7

การอภิปรายผลการศึกษาวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงรอบความเสียหายในแต่ละชิ้นงานทดสอบ และระยะยึดตัวในแต่ละชิ้นงาน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างความถี่เดียวกัน และระหว่างแต่ละความถี่ เพื่อนำไปหาข้อสรุปถึงผลของความถี่ต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าต่อไป

อภิปรายผลการทดสอบวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22

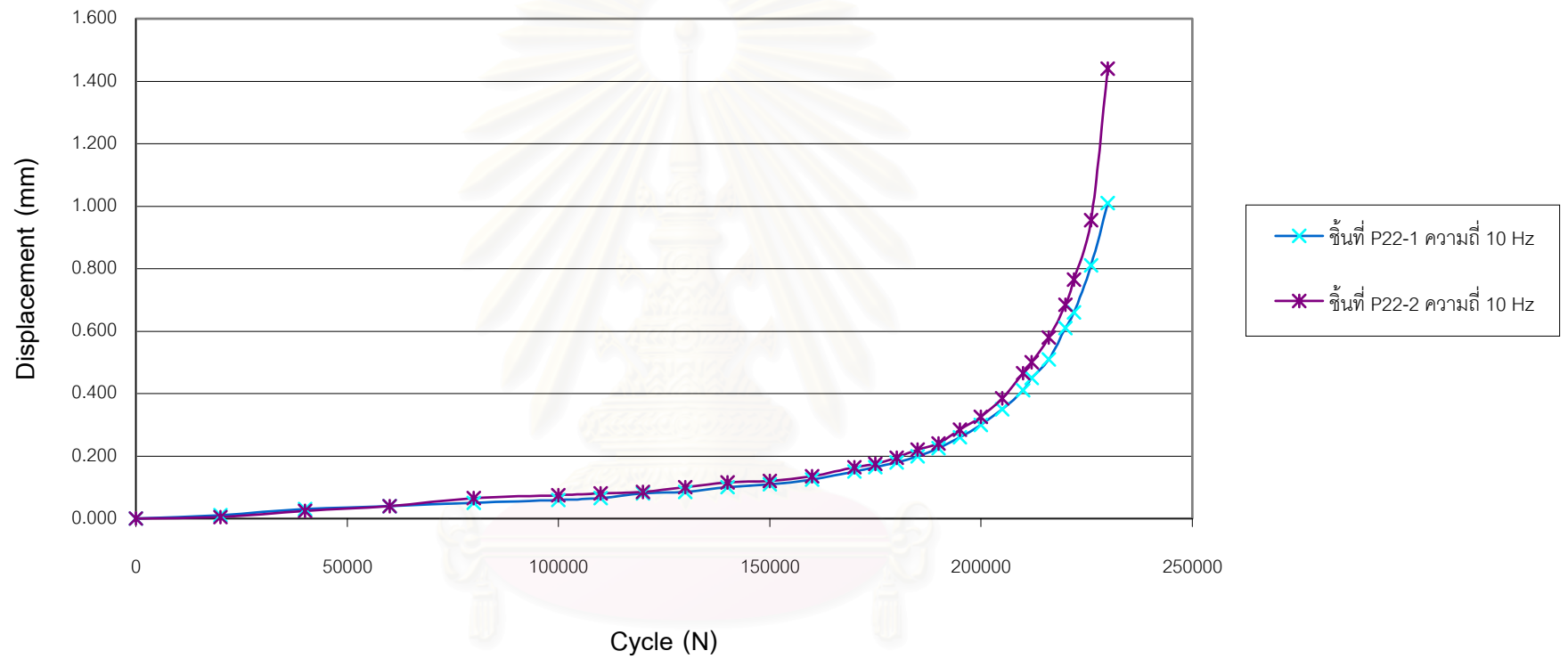
ระยะยึดตัวเปรียบเทียบที่ความถี่เดียวกัน

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะอธิบายถึงแนวโน้มของระยะยึดตัวในแต่ละความถี่เพื่ออธิบายถึงลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้น และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและสาเหตุที่เกิด

สภาวะทดสอบความถี่ภาวะ 10 Hz

กราฟระยะยึดตัวของความถี่ภาวะ 10 Hz เป็นดังรูป 7.1 กราฟการยึดตัวของความถี่นี้มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะในช่วงแรกของการทดลอง และเริ่มต่างกันเล็กน้อยหลังจากช่วง 200,000 รอบ ไปแล้ว โดยมีรอบความเสียหายเท่ากับ 230,893 และ 234,152 โดยมีความยาวรอยร้าวเท่ากัน และรอบความเสียหายต่างกันประมาณ 1.4 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.1 ระยะยืดตัวเปรียบเทียบความถี่ 10 Hz วัสดุ SA-335 Gr. P22

สภาวะทดสอบความถี่ภาระ 20 Hz

กราฟระยะยืดตัวของความถี่ภาระ 20 Hz เป็นดังรูป 7.4 กราฟระยะยืดตัวที่ความถี่นี้ต่างกันเล็กน้อยในช่วงแรก โดยภายหลังจากทดลองเสร็จได้พบว่าเกิดการงอของสลักซึ่งทำให้ระยะยืดตัวในช่วงแรกของการทดลองผิดไป ดังรูป 7.2 และ 7.3



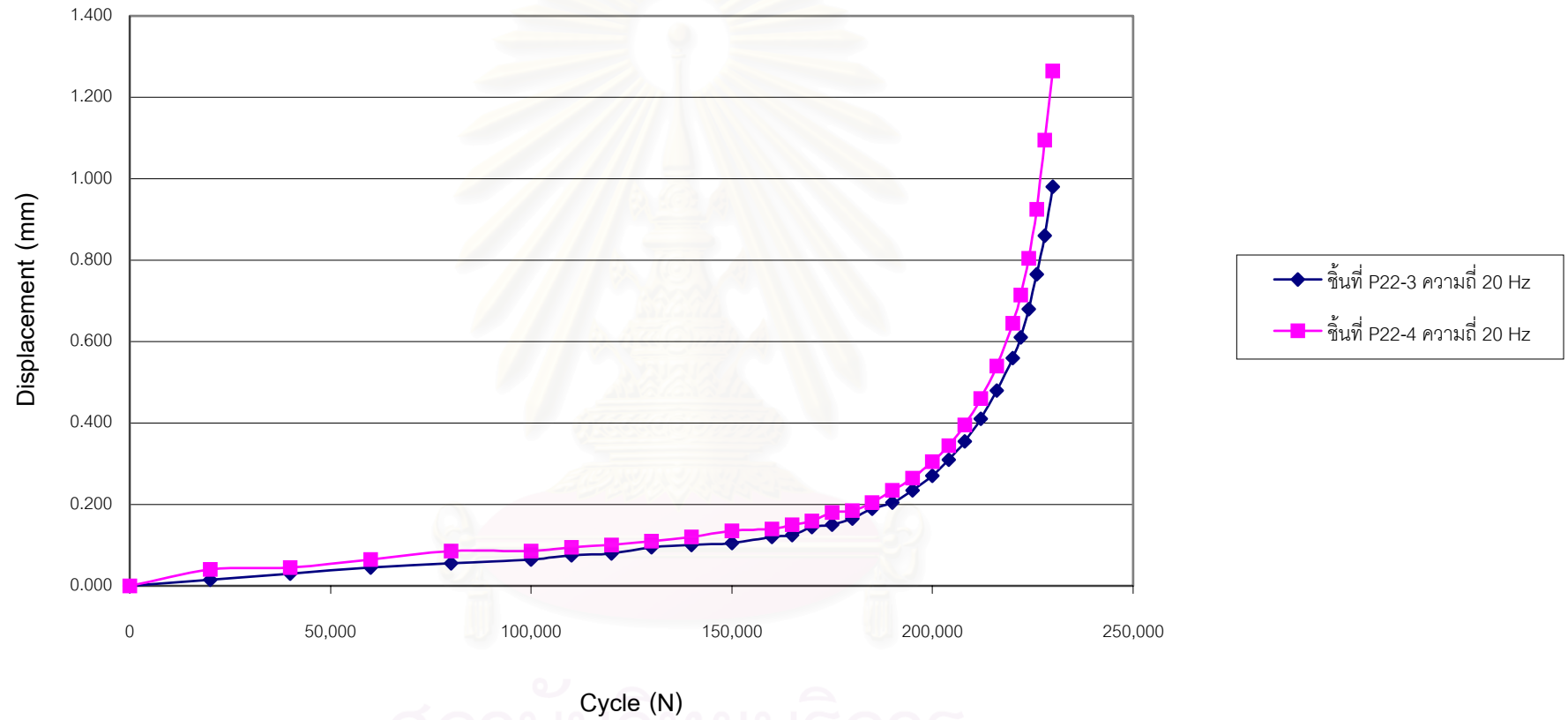
รูปที่ 7.2 สลักก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 7.3 สลักหลังทำการทดสอบ

โดยการงอของสลักมักจะพบได้กรณีที่ใช้สลักใหม่ในการทดลอง และพบบ่อยครั้งในช่วงการทำรอยร้าวก่อนหน้าเนื่องจากมักจะใช้สลักใหม่ในการทำรอยร้าวก่อนหน้า จากความเสียหายของสลักดังกล่าว และจากข้อมูลของการทำรอยร้าวก่อนหน้า ทำให้สรุปได้ว่าระยะยืดตัวที่ต่างกันในช่วงแรกนั้นเกิดจากการงอของสลัก การทดสอบครั้งต่อมาจึงได้หลีกเลี่ยงการใช้สลักใหม่ในการทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดชนิดนี้ และไม่พบความผิดพลาดชนิดนี้อีกในการทดสอบครั้งต่อๆมา

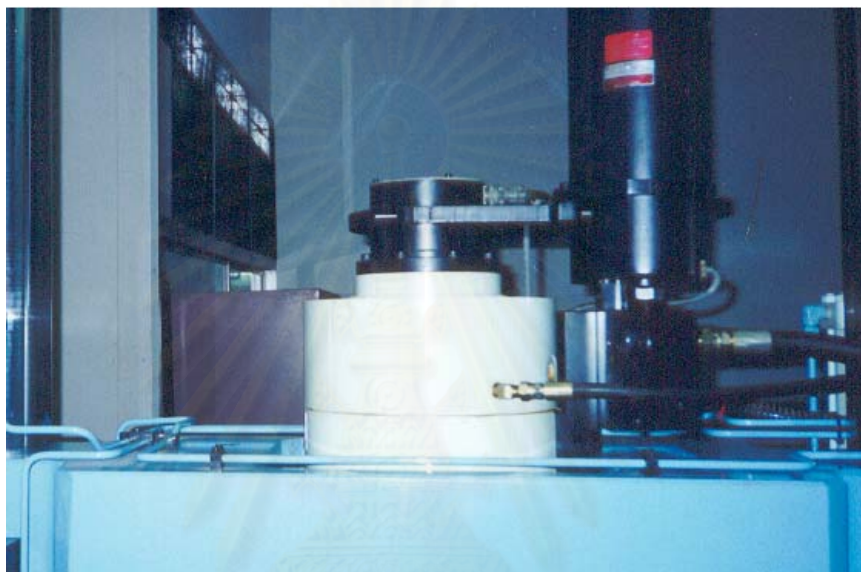
ในช่วงหลังจาก 200,000 รอบไปแล้วกราฟระยะยืดตัวต่างกันเล็กน้อย โดยรอบความเสียหายเท่ากับ 230,094 และ 235,263 รอบ โดยมีความยาวรอยร้าวเท่ากัน และรอบความเสียหายต่างกัน 2.2 %



รูปที่ 7.4 ระยะยืดตัวเปรียบเทียบความถี่ 20 Hz วัสดุ SA-335 Gr. P22

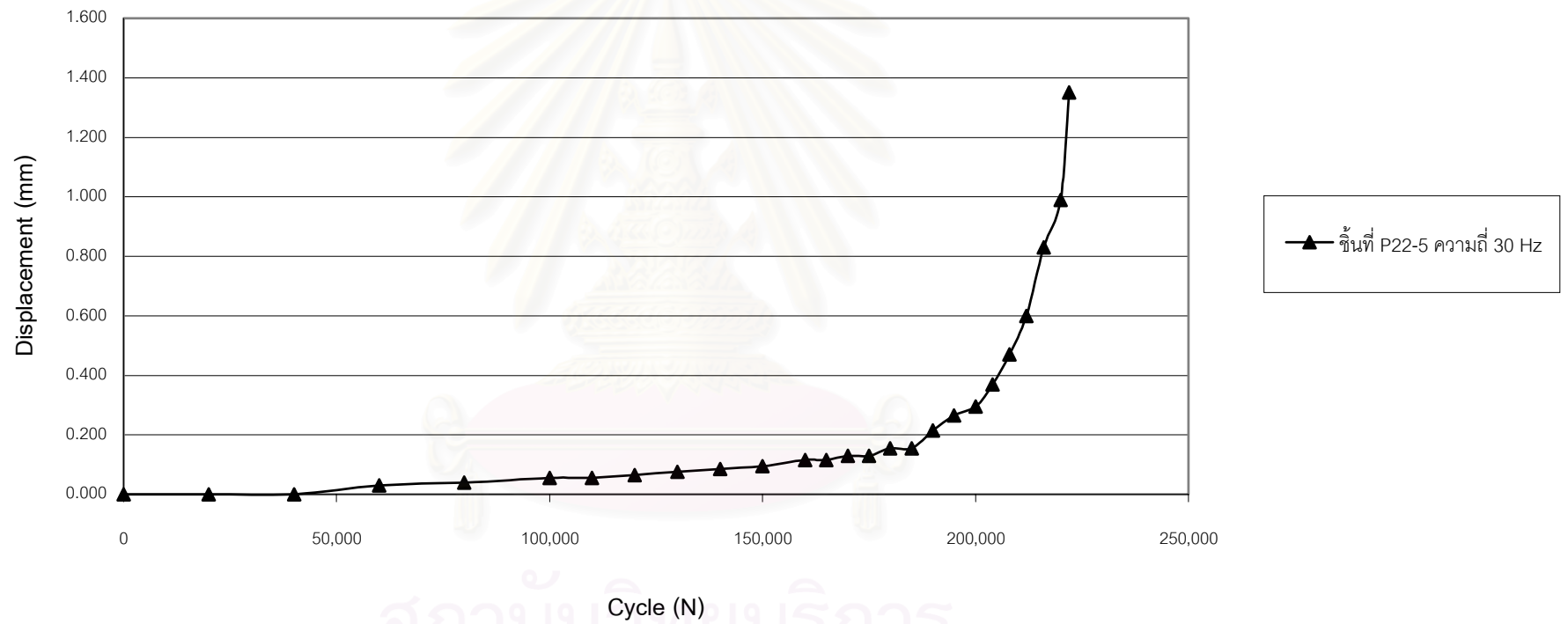
สภาวะทดสอบความถี่ภาระ 30 Hz

ที่ความถี่นี้ได้ทำการทดลองเพียงขึ้นเดียวเนื่องจากเกิดเสียงดังบริเวณ Servo value ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมภาระของเครื่องดังรูป 7.5 ในช่วงท้ายของการทดลอง อันแสดงให้เห็นว่าเกินความสามารถของเครื่องที่ความถี่นี้จึงไม่ทำการทดลองซ้ำ เนื่องจากเกรงว่าจะเกิดความเสียหายกับเครื่องทดสอบ กราฟระยะยืดตัวของความถี่นี้ เป็นดังรูป 7.6



รูป 7.5 Servo value

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.6 ระยะเวลาปิดตัวความถี่ 30 Hz วัสดุ SA-335 Gr. P22

ระยะยัดตัวเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกัน

กราฟการยัดตัวของทุกๆความถี่เป็นดังรูป 7.7 จะเห็นได้ว่าระยะยัดตัวในทุกๆความถี่นั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยในช่วงแรกของการทดลองขึ้นงานที่ความถี่ 20 Hz 1 ขึ้น มีการยัดตัวสูงกว่าขึ้นอื่น เนื่องจากเหตุผลเรื่องการงอของสลักดั่งที่กล่าวไว้ในส่วนที่ผ่านมา ในช่วงทำynnั้น แนวโน้มการยัดตัวที่ความถี่ 30 Hz มีการกระจายตัวออกจากค่าเฉลี่ยมากกว่าความถี่อื่นเล็กน้อย โดยรอบความเสียหายกระจายตัวออกจากค่าเฉลี่ย 2.7%

เนื่องจากจากการศึกษาของงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่นพบว่า ถ้าความถี่จะมีผลต่อความเสียหายเนื่องจากความล้า จะมีแนวโน้มในลักษณะของความถี่ต่ำจะมีรอบความเสียหายน้อยกว่าความถี่สูงเนื่องจากผลของความคืบ (8, 9, 10, 11, 17) และจากข้อมูลการทดลองที่ความถี่ 10 และ 20 Hz ไม่มีความแตกต่างกัน ทำให้เชื่อได้ว่าการกระจายตัวที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากผลของความถี่ และข้อมูลจากตาราง 7.1 จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดภาระของความถี่ 30 Hz สูงกว่าความถี่อื่นเนื่องจากการเกินภาระของเครื่องทดสอบดังที่กล่าวไว้ในส่วนที่แล้ว ทำให้ความเสียหายที่ความถี่นี้มีการกระจายตัวออกจากค่าเฉลี่ยมากกว่าความถี่อื่น โดยจากสมการของ Paris

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

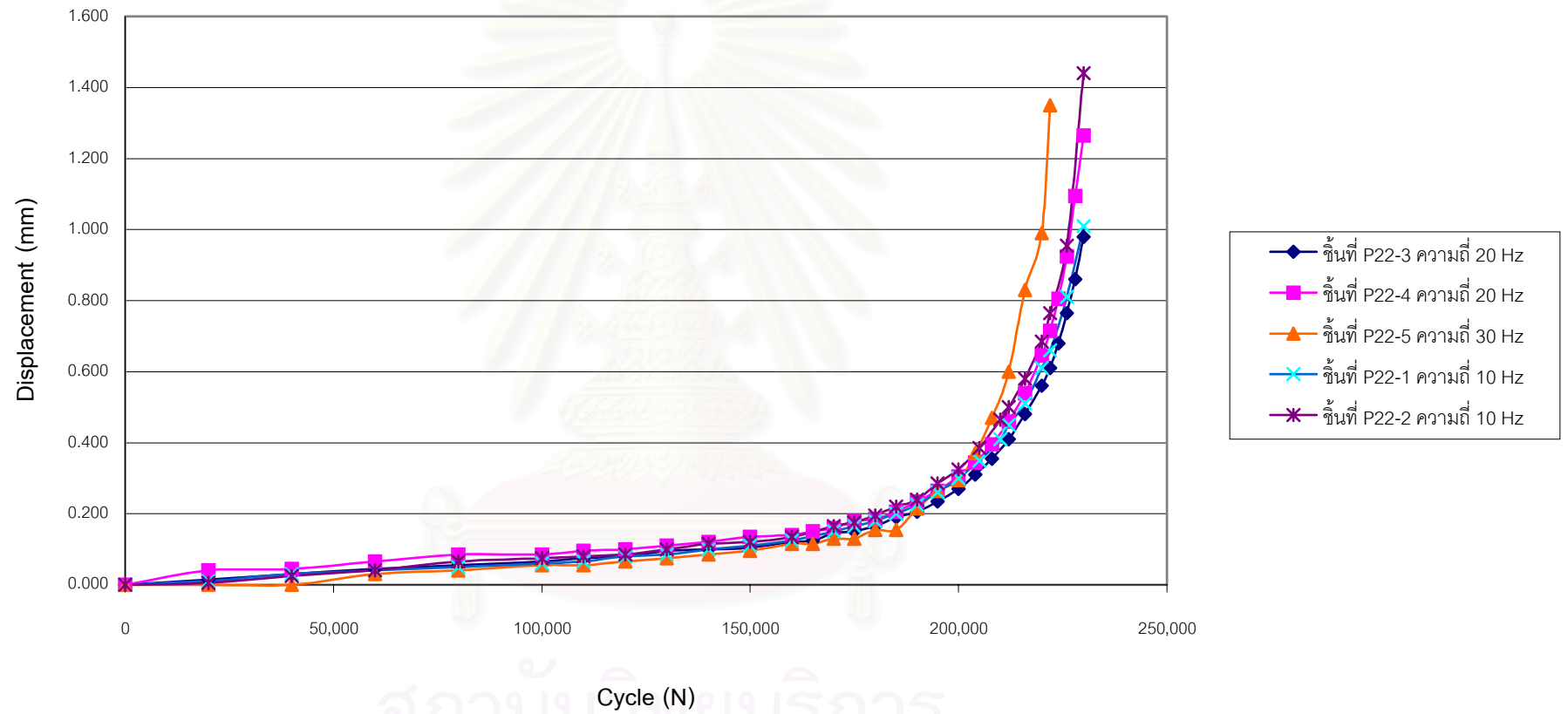
อินทิเกรตทั้งสองข้างจะได้

$$\int \frac{1}{\Delta K^m} da = \int CdN$$

และ

$$\frac{1}{\Delta P^m} \int \frac{1}{f\left[\left(\frac{a}{W}\right), B, W\right]} da = N$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อแอมพลิจูดภาระสูงขึ้นจะทำให้รอบความเสียหายน้อยลงจึงทำให้ความเสียหายที่ความถี่นี้กระจายออกจากค่าเฉลี่ยมากกว่าความถี่อื่น



รูปที่ 7.7 ระยะยืดตัวเปรียบเทียบทุกๆความถี่ วัสดุ SA-335 Gr. P22

รอบความเสียหายเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกัน

จากตารางที่ 7.1

specimen	frequency (Hz)	load(ton)		Temperature (°C)	crack start (mm)	crack end (mm)	cycle to failure(N)
		mean	amplitude				
P22-1	10	0.970	0.238	299.1	6.6	16.1	234152
P22-3	20	0.970	0.238	298.3	6.6	16.1	235263
P22-4	20	0.970	0.238	298.5	6.6	16.1	230094
P22-5	30	0.970	0.240	300.3	6.6	16.1	224673
P22-2	10	0.970	0.238	298.9	6.6	16.1	230893

ตารางที่ 7.1 ตารางสรุปผลการทดลอง P22

รอบความเสียหายมีการกระจายตัว 4.6 % เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย คือ 231,015 รอบ และการกระจายตัวที่ความถี่ 10 Hz และ 20 Hz เท่ากับ 1.4 % และ 2.2 % ตามลำดับ โดยการกระจายตัวของความถี่ 30 Hz กับค่าเฉลี่ยทุกความถี่นั้นประมาณ 2.7 % เกิดจากเหตุผลดังที่กล่าวมา

และเมื่อทำการเปรียบเทียบรอบความเสียหายที่ได้กับผลการทดสอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (41) โดยทำการคำนวณรอบความเสียหายจากสมการการเติบโตรอยร้าวโดยใช้สมการอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.6

ดังนี้

$$\frac{da}{dN} = 2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27}$$

$$da = 2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27} dN$$

$$\frac{1}{2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27}} da = dN$$

อินทิกรัลทั้งสองข้าง

$$\int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27}} da = \int_0^N dN$$

โดยสำหรับชิ้นงาน CT

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W}(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = a/W$$

B คือ ความหนาของชิ้นงาน 12.7 มม.

W คือ ความกว้างของชิ้นงาน 25.5 มม.

ΔP คือ ความแตกต่างระหว่างภาระสูงสุดและต่ำสุด 5 kN

a คือ ความยาวรอยร้าว เริ่มต้น 6.6 มม. สิ้นสุด 16.1 มม.

แทนค่าและอินทิเกรตได้

$$\int_{6.6}^{16.1} \frac{1}{2 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.27}} da = N$$

$$N = 2.35 \times 10^5 \text{ รอบ}$$

ซึ่งได้รอบความเสียหายมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ คือ 231,015 รอบ เล็กน้อย นั่นคือ
คุณสมบัตินี้ไม่มีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22
เลย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะผิวรอยแตกที่ที่เกิดจากการเติบโตของรอยร้าวจากการ
ทดสอบของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และมีความเสียหายแบบวัสดุเหนียวคือเกิด
คอ (Neck) ขึ้นบริเวณที่เกิดความเสียหายอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีลักษณะดังกล่าวนี้เหมือนกันทุกๆชิ้น
งาน จากข้อมูลที่กล่าวมาแล้วทำให้สรุปได้ว่า ความล้าไม่มีผลต่อความเสียหายเนื่องจากความล้า
สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ในสภาวะที่ทำการทดสอบ

อภิปรายผลการทดลองวัสดุ AISI4140

ระยะยึดตัวเปรียบเทียบที่ความถี่ 20 Hz

กราฟระยะยึดตัวชิ้นงานที่ความถี่การะ 20 Hz เป็นดังรูป 7.11 กราฟการยึดตัวของความถี่นี้มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงแรกของการทดลอง และเริ่มต่างกันเล็กน้อยหลังช่วง 150000 รอบไปแล้ว โดยมีรอบความเสียหายเท่ากับ 204950 และ 212494 รอบ ความยาวรอยร้าวเท่ากัน รอบความเสียหายต่างกัน 3.6% เมื่อเปรียบเทียบผิวรอยร้าวชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีผิวรอยร้าวละเอียดใกล้เคียงกัน ความยาวรอยร้าวเท่ากัน การทดสอบในสภาวะเดียวกันลักษณะนี้ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ใกล้เคียงกันมากทั้งรอบความเสียหาย ระยะยึดตัว และผิวรอยแตกร้าวของชิ้นงาน

ระยะยึดตัวเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกัน

กราฟการยึดตัวของทุกความถี่เป็นดังรูป 7.12 จะเห็นได้ว่าระยะยึดตัวระหว่างสองความถี่มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงแรก และต่างกันในช่วงหลัง 110000 รอบไปแล้ว โดยชิ้นงานความถี่ 10 Hz มีอัตราการยึดตัวสูงกว่า 20 Hz และขาดก่อนความถี่ 20 Hz รอบความเสียหายของการทดสอบ 10 Hz เป็น 132117 รอบ และรอบความเสียหายของการทดสอบ 20 Hz เป็น 204950 รอบ และ 212494 รอบ โดยรอบความเสียหายของการทดสอบความถี่ 10 Hz น้อยกว่าการทดสอบความถี่ 20 Hz 43.22% และ 46.6% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากข้อมูลที่มีอยู่เราได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

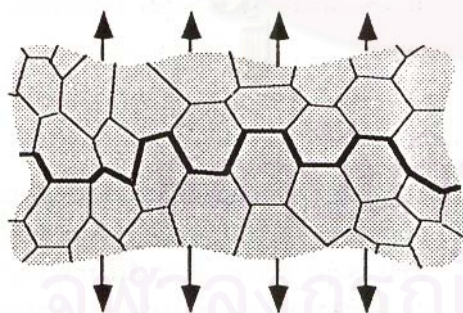
จากทฤษฎีเรื่องความเสียหายที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิสูง วัสดุที่เสียหายภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบที่อุณหภูมิสูงจะเกิดความเสียหายจาก 3 ส่วนคือ ความเสียหายเนื่องจากความล้าซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับรอบ ความเสียหายเนื่องจากความคืบซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา และความเสียหายจากสภาวะแวดล้อมซึ่งเป็นความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา จากตารางที่ 7.2 ชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz มีรอบความเสียหาย 204950 รอบ และ 212494 รอบ ใช้เวลาในการทดสอบ 2.85 ชม. และ 2.95 ชม. ขณะที่ ชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz มีรอบความเสียหาย 132117 รอบ ใช้เวลาในการทดสอบ 3.76 ชม แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz มีผลของความเสียหายที่ขึ้นกับเวลามากกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz นั่นคือชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz ใช้เวลาในการทดสอบมากกว่าชิ้นงานความถี่ 20 Hz ทำให้ความเสียหายที่ขึ้นกับเวลามีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ใช้

ความถี่นี้มากกว่า ทำให้รอบความเสียหายน้อยกว่าจึงทำให้ชิ้นงานที่ความถี่ต่ำมีรอบความเสียหายน้อยกว่าชิ้นงานที่ความถี่สูง แต่จะใช้เวลาในการทดลองมากกว่า

Specimen	frequency (Hz)	load(ton)		temperature (C)	crack start (mm)	crack end (mm)	cycle to failure (N)	time to failure (hr)
		mean	Amplitude					
AISI 4140-2	20	0.970	0.238	298.29	6.6	13.6	204950	2.85
AISI 4140-3	20	0.970	0.238	299.66	6.6	13.6	212494	2.95
AISI 4140-1	10	0.970	0.238	298.70	6.6	11.1	132117	3.76

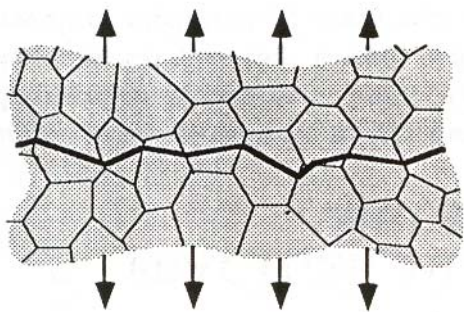
ตารางที่ 7.2 ตารางสรุปผลการทดลอง AISI4140

จากรอยแตกของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz สองชิ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองความถี่ดังรูปแสดงผิวชิ้นงานพบว่า บริเวณผิวรอยร้าวของชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz จะหยากกว่าผิวรอยร้าวของชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz จากการพบว่า ผลของความเสียหายที่ขึ้นกับเวลาทั้งผลของสภาวะแวดล้อม และผลของความคืบ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ intergranular นั่นคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดรอบๆ grain ดังรูป 7.8



รูป 7.8 ความเสียหายแบบ intergranular

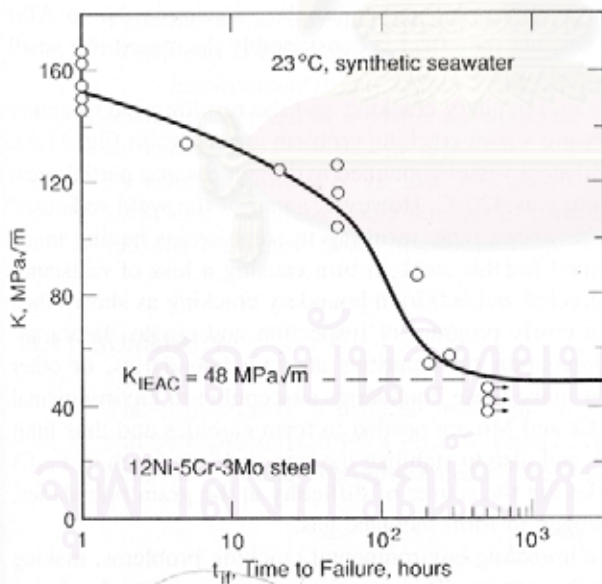
ส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากความล้า เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นแบบ transgranular นั่นคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดทะลุผ่าน grain ดังรูป 7.9



รูป 7.9 ความเสียหายแบบ transgranular

โดยเมื่อมองจากผิววัสดุจะพบว่า ความเสียหายที่เกิดจาก intergranular จะมีผิวรอยร้าวหยากกว่า transgranular (10) จึงสอดคล้องกับข้ออภิปรายข้างต้น นั่นคือ ความเสียหายที่ความถี่ 10 Hz นั้นมีผลต่อความเสียหายที่ขึ้นกับเวลามากกว่าที่ 20 Hz

นอกจากนี้จากรูปรอยร้าวของชิ้นงานพบว่า ความยาวรอยร้าวของชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz น้อยกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz จากการศึกษาพบว่าผลของสภาวะแวดล้อมนอกจากจะทำให้เกิดความเสียหายที่ขึ้นกับเวลาแล้วยังทำให้ค่า K_{IC} ซึ่งเป็นค่าวิกฤติที่จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วนั้นลดลงตามเวลา ตัวอย่างดังรูป 7.10



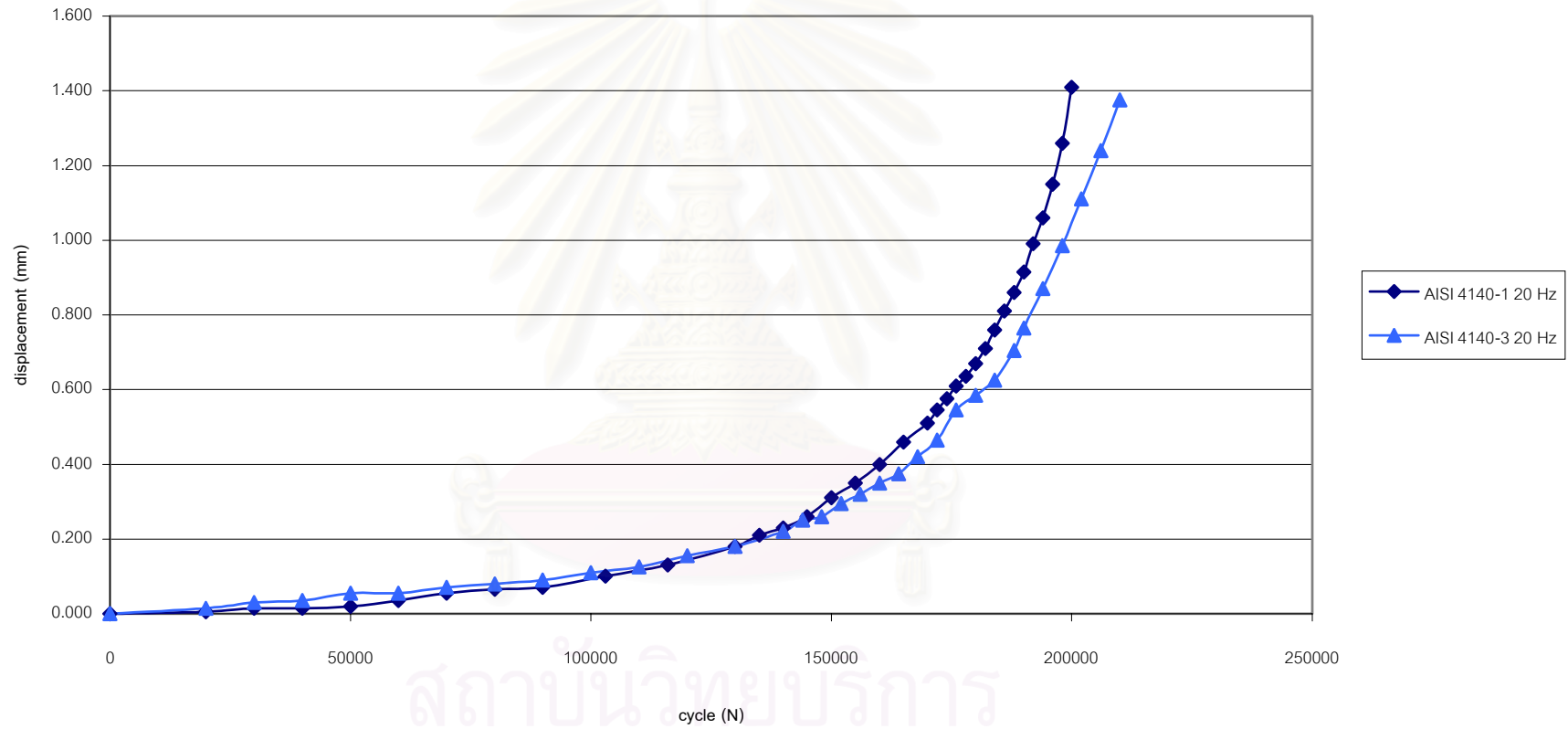
รูปที่ 7.10 การลดลงของค่า K_{IC} ซึ่งมีผลจากสภาวะแวดล้อม

ซึ่งเป็นการทดสอบภายใต้สภาวะน้ำทะเล และ K_{IEAC} คือค่าตัวประกอบความเค้นเมื่อมีผลของสภาวะแวดล้อม โดยการทดสอบภายใต้อากาศนั้น สามารถมีผลในลักษณะเดียวกันนี้ (10)

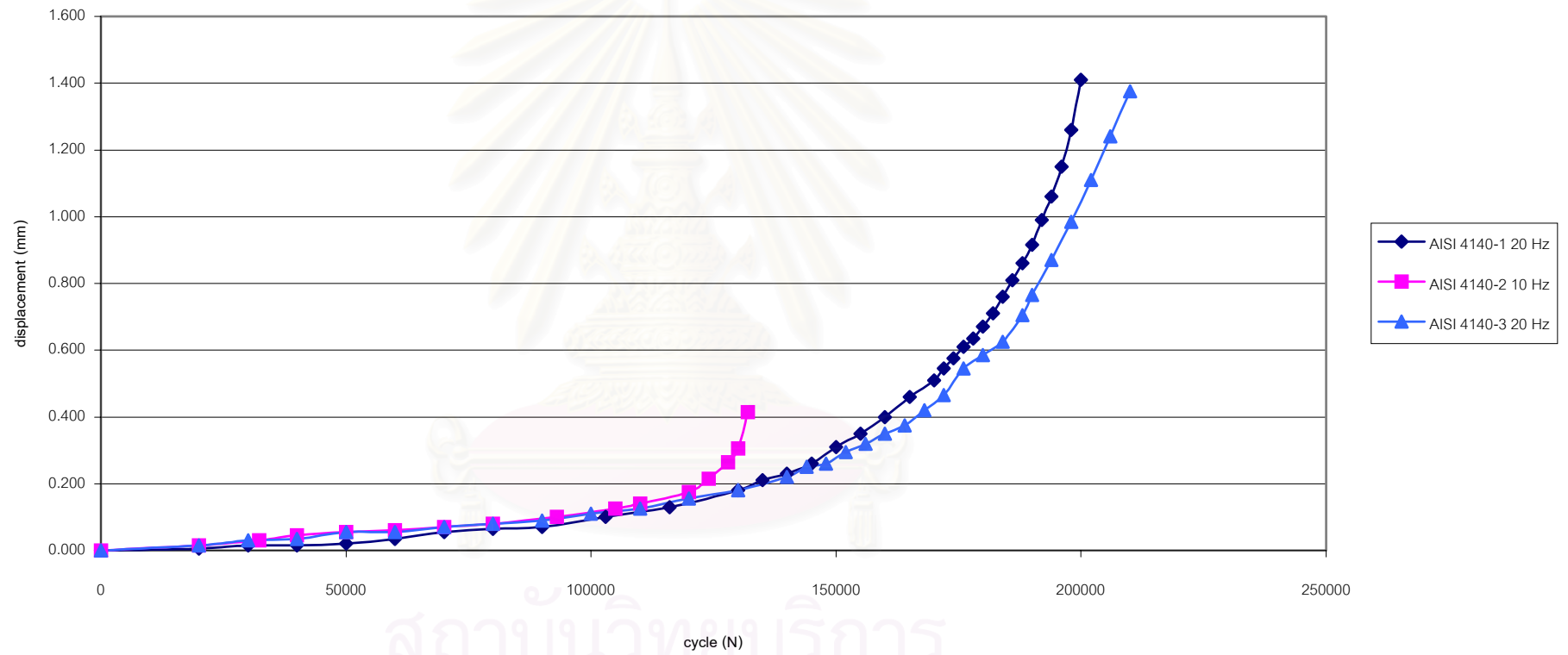
จากข้อมูลส่วนนี้และจากตารางสรุปผลการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ในการทดสอบของชิ้นงานความถี่ 10 Hz มากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 20 Hz ทำให้ค่า K ที่เป็นค่าวิกฤติที่ทำให้เกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วนั้น ชิ้นงานที่ความถี่ 10 Hz จะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 7.11 ระยะยืดตัวเปรียบเทียบความถี่ 20 Hz วัสดุ AISI4140



รูป 7.12 ระยะยืดตัวเปรียบเทียบวัสดุ AISI4140

บทที่ 8

ข้อสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงข้อสรุปของการศึกษาวิจัย ข้อเสนอแนะ และงานวิจัยสืบเนื่องสำหรับผู้ที่มีความสนใจจะทำการศึกษาต่อไป

ข้อสรุปของงานวิจัย

ข้อสรุปของงานวิจัยนี้ คือ

- ความถี่ของภาระไม่มีผลต่อความเสียหายเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr. P22 ภายใต้อุณหภูมิ 300°C อัตราส่วนภาระ 0.6 ความถี่มากกว่า 10 Hz โดยการกระจายตัวของรอบความเสียหาย 4.6%
- สำหรับวัสดุ AISI 4140 ความถี่มีผลต่อรอบความเสียหายเนื่องจากความล้าภายใต้อุณหภูมิ 300°C อัตราส่วนภาระ 0.6 ความถี่มากกว่า 10 Hz โดยการกระจายตัวของรอบความเสียหายที่ความถี่เดียวกันเท่ากับ 3.6% การกระจายตัวของรอบความเสียหายระหว่าง 2 ความถี่ 43.22% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเกิดเนื่องจากความเสียหายที่ขึ้นกับเวลา 2 ส่วนคือ ผลของความคืบ และผลของสภาวะแวดล้อม ทำให้ชิ้นงานที่ทดสอบที่ความถี่ 10 Hz มีรอบความเสียหายน้อยกว่าชิ้นงานที่ความถี่ 20 Hz แต่ใช้เวลาในการทดสอบมากกว่า

งานวิจัยต่อเนื่อง

พื้นฐานความรู้ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้นำไปสู่งานวิจัยสืบเนื่องดังต่อไปนี้

- พัฒนาคุณภาพเตาเพื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่างานวิจัยนี้
- พัฒนาวิธีการติดตามรอยร้าวเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลให้ละเอียดกว่าเดิม
- ทดสอบความล้าที่อุณหภูมิสูงกับวัสดุชนิดอื่นเพื่อเป็นฐานข้อมูลในงานวิจัยในอนาคตต่อไป

- ศึกษาผลของตัวแปรอื่น เช่น รูปแบบภาวะ อัตราส่วนภาวะ ต่อความเสียหาย
เนื่องจากความล้ม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. ยุทธนา เจริญวงศ์, การวิเคราะห์อายุความล้าภายใต้ภาระเกินพิกัดในวัสดุเพลลาขาว
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
2. ภาณุ ประทุมพรรัตน์, การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นระดับของท่อเหล็ก เอ.เอส.เอ็ม.อี เอส.เอ.-335 เกรด พี.22 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
3. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, การศึกษาลักษณะของภาวะเฉื่อย และแอมพลิฟิเคชันการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า สำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. พลายุทธ์ ศรีโอฬาร, การศึกษาลักษณะการเติบโตของรอยร้าวภายใต้อุณหภูมิสูง วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
5. ASTM E 647-93. Standard Test method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
6. Douglas C. Montgomery Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons. Inc, 1997.
7. Anderson, T.L. Fracture mechanics : Fundamentals and application. Boston: CRC Press Inc, 1991.
8. Ashok Saxena Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers, CRC Press, 1998.
9. G.A. Webster, R.A. Ainsworth High Temperature Component Life Assessment, CHAPMAN & HALL, 1994.
10. Norman E. Dowling Mechanical Behavior of Materials. PRENTICE HALL INTERNATIONAL, INC, 1999.
11. R. Viswanathan Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components. ASM INTERNATIONAL, 1989.
12. Cheugpoon, David. W. Hoeppe, The Effect of Temperature and R ratio on Fatigue Crack Growth in A612 Grade B Steel, Engineering Fracture Mechanics Vol 12, pp.23-31, 1979.
13. P.K. Liaw , T.R.Leax, T.R.Fabis, J.K.Donald, Fatigue Crack Growth Behavior in an Mn-Cr Austenitic Steel, Engineering Fracture Mechanics Vol 26.No 1.pp.1-13, 1987.

14. L.A.James, W.J.mills Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness Behavior of Cast Stainless Steels, Engineering Fracture Mechanics Vol 24.pp.423-434, 1988.
15. N.S.Raghavendran, M.E.Fourney, Fatigue–Fracture Behavior of 5083-0 Aluminium-Magnesium Alloy for LNG Applications, Engineering Fracture Mechanics Vol 29.No 6.pp.647-662, 1988.
16. L.S.Vesier, S.D.Antolovich, Fatigue Crack Growth of Ti-6242 as a Function of Temperature and Waveform, Engineering Fracture Mechanics Vol 37.No 4.pp.753-775, 1990.
17. K.Y.Hour, J.F.Stubbins, Fatigue Crack Growth Behavior of Alloy 800H at Evaluated Temperature, Journal of Engineering Materials and Technology Vol 113.pp. 271-279, 1991.
18. K.V.Jata, D.Maxwell, T.Nicholas, Influence of Environment and Creep on Fatigue Crack Growth in a High Temperature Aluminum Alloy 8009, Journal of Engineering Materials and Technology Vol 116.pp. 45-53, 1994.
19. J.J.Pernot, S.Mall, T.Nicolas, Fatigue Crack Growth Behavior of a Titanium-Aluminide Alloy During Isothermal and Nonisothermal Conditions, Transactions of the ASME Vol 117.pp.118-126
20. L.A.James, The Effect of Frequency Upon the Fatigue-Crack Growth of Type 304 Stainless Steel at 1000F, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972., pp. 218-229
21. S.Floreen and R.H.Kane, An Investigation of Creep-Fatigue-Environment Interaction in Ni Base Super Alloy, Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 2, 1980., pp. 401-412.
22. C.E. Inglis, Stress in Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners, Transactions of the Institute of Naval Architects, Vol. 55, 1913., pp.219-241.
23. A.A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions, Series A, Vol. 221, 1920., pp. 163-198.
24. H.M. Westergaard, Bearing Pressure and Cracks, Journal of Applied Mechanics, Vol. 6, 1939., pp. 49-53.
25. G.R. Irwin, Fracture Dynamics, Fracturing of Metals, American Society for Metals,

- Cleveland, 1948., pp. 147-166.
26. E. Orowan, Fracture and Strength of Solids, Reports on Progress in Physics, Vol. XII, 1948., pp. 185-232.
 27. N.F. Mott, Fracture of Metals: Theoretical Considerations, Engineering, Vol. 165, 1948., pp. 16-18.
 28. G.R. Irwin, Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminum Alloys, Sagamore Research Conference Proceedings, Vol. 2, 1956., pp. 289-305.
 29. M.L. Williams, On the Stress Distribution at Base of a Stationary Crack, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, 1957., pp. 109-114.
 30. A. Talug and K. Reifsnider, Analysis and Investigations of Small Flaws, ASTM STP 637, 1977., pp. 81-96.
 31. P.C. Paris, M.P. Gomez, and W.P. Anderson, A Rational Analytic Theory of fatigue, The Trend in Engineering, Vol. 13, 1961., pp. 9-14.
 32. M.J. Siverns and A.T. Price, Crack Propagation Under Creep Conditions in Quenched 2.25Cr – 1Mo steel, International Journal of Fracture, Vol. 9, 1973., pp. 199-207.
 33. J.D. Landes and J.A. Begley, A Fracture Mechanic Approach to Creep Crack Growth, Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials, 1976., pp. 128-148.
 34. K.M. Nikbin, G.A. Webster, and C.E. Turner, Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking, Cracks and Fracture, ASTM STP 601, 1976., pp. 47-62.
 35. S. Taira, R. Ohtani, and T. Komatsu, Application of J-Integral to High Temperature Crack Propagation, Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials Technology, Vol. 101, 1979., pp. 163-167.
 36. A. Saxena, Evaluation of C^* for Characterization of Creep Crack Growth Behavior of 304 Stainless-Steel, in Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, American Society for Testing and Materials, 1980., pp. 131-151.
 37. K. Ohji, K.Ogura, and S. Kubo, Stress-Strain Field and Modified J-Integral in the

- Vicinity of the Crack Tip Under Transient Creep Considerations, Japan Society of Mechanical Engineers, No 790-13, 1979., pp. 18-20
38. H. Riedel and J.R. Rice, Tensile Cracks in Creeping Solids, Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, American Society for Testing and Materials, 1980., pp. 112-130.
39. J.L. Bassani and F.A. McClintock, Creep Relaxation of Stress Around a Crack Tip, International Journal of Solids and Structures, Vol. 17, 1981., pp. 79-89.
40. A. Saxena, Creep Crack Growth Under Nonsteady-State Conditions, in Fracture Mechanics Seventeenth Volume, ASTM STP 905, American Society for Testing and Materials, 1986., pp. 185-201.
41. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การประเมินอายุที่เหลือสำหรับ SUPERHEAT HEADER ของระบบผลิตไอน้ำที่เสียหายเนื่องจากความล้า, รหัสวิจัยเลขที่ 10-59, 2538.
42. Holdsworth, S.R. and Hoffelner, W., Fracture mechanics and crack growth in fatigue,
in High Temperature Alloys for Gas Turbines, Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1982., pp. 345-368.
43. Floreen, S. and Kane, R.H., An investigation of the creep-fatigue-environment interaction in a Ni-base superalloy, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2, 1979., pp. 401-412.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

วัสดุ ASME SA-335 Gr. P22

ASME SA-335 Gr. P22 มีชื่อเรียกตามมาตรฐานว่า “ Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe “ เป็นท่อเหล็กกล้าใช้ในงานที่อุณหภูมิและความดันสูง มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ ก1

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0.087	0.531	0.014	0.007	0.230	1.186	0.761

ตารางที่ ก1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr.P22 (wt.%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุ AISI 4140

วัสดุ AISI 4140 มีชื่อเรียกตามมาตรฐานประเทศไทยว่า วัสดุเหล็กเพลาขาว (cold-finished steel bars) ตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกาว่า AISI 4140 และ ASSAB 709 ตามมาตรฐานสวีเดน เมื่อนำไปทดสอบองค์ประกอบทางเคมี ได้ผลดังตารางที่ ก2

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0.110	0.500	0.013	0.003	0.350	2.130	0.910

ตารางที่ ก2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก AISI 4140 (wt.%) จากการทดสอบ

โดยจากข้อมูลการทดสอบนี้พบว่าต่างจากข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง (3) ดังตารางพอสมควร

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.42	0.25	0.75	1.10	0.20

ตารางที่ ก3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก AISI 4140 (wt.%) จากเอกสารอ้างอิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้า

เนื่องจากการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าในแต่ละวัสดุจะเสียเวลามาก หากไม่ทราบข้อมูลของภาวะและรอบโดยประมาณที่เริ่มเกิดรอยร้าว ในส่วนนี้จะแสดงถึงข้อมูลบางส่วนของ การเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่จะทำงานวิจัยต่อเนื่องต่อไป

รอบ	ระยะยึดตัว (มม)		ความยาวรอยร้าว (มม)		หมายเหตุ
	ค่าเฉลี่ย	แอมพลิจูด	หน้า	หลัง	
366000	0.00	0.05	-	-	กำหนดภาวะ 0.800 ± 0.200 ตัน ความถี่ 10 Hz
480000	0.01	0.05	-	-	
530000	0.01	0.06	-	-	
598000	0.01	0.06	-	-	
647000	0.01	0.05	-	-	เปลี่ยนสลัก
708000	0.02	0.06	-	-	กำหนดภาวะ 1.000 ± 0.250 ตัน
777000	0.03	0.05	0.250	0.050	
811000	0.04	0.06	0.463	0.313	
836000	0.05	0.05	0.675	0.500	
873000	0.07	0.05	0.925	0.575	
896000	0.07	0.05	1.000	0.900	
918000	0.07	0.06	1.150	1.000	
946000	0.07	0.05	1.400	1.300	
952300	0.07	0.05	1.450	1.400	
955000	-	-	1.500	1.400	
958000	-	-	1.500	1.450	
960000	-	-	1.525	1.450	รอยร้าวเฉลี่ย 1.49 มม.

ตารางที่ ข1 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-4

รอบ	ระยะยึดตัว(มม)		ความยาวรอยร้าว(มม)		หมายเหตุ
	ค่าเฉลี่ย	แอมป์ลิจูด	หน้า	หลัง	
1800000	0.00	0.05	-	-	กำหนดภาวะ 0.800 ± 0.200 ตัน ความถี่ 10 Hz สลักใหม่
1850000	0.02	0.05	-	-	
1900000	0.04	0.06	0.075	-	
1940000	0.05	0.06	0.150	0.125	
1990000	0.05	0.06	0.225	0.238	
2035000	0.06	0.06	0.275	0.363	
2082000	0.06	0.05	0.400	0.413	
2139000	0.07	0.05	0.525	0.500	
2167000	0.07	0.06	0.625	0.550	กำหนดภาวะ 1.000 ± 0.250 ตัน
2200000	0.07	0.05	0.800	0.650	
2228000	0.08	0.06	1.000	0.850	เปลี่ยนสลัก
2261000	0.09	0.05	1.150	1.000	
2285000	0.09	0.06	1.300	1.175	
2299000	0.09	0.05	1.425	1.250	
2306000	0.09	0.05	1.500	1.300	
2312000	-	-	1.550	1.400	
2314000	-	-	1.550	1.400	
2316000	-	-	1.575	1.425	รอยร้าวเฉลี่ย 1.50 มม.

ตารางที่ ข2 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-1

รอบ	ระยะยึดตัว(มม)		ความยาวรอยร้าว(มม)		หมายเหตุ
	ค่าเฉลี่ย	แอมป์ลิจูด	หน้า	หลัง	
347000	0.01	0.05	0.650	0.700	กำหนดภาวะ 1.000 ± 0.250 ต้น ความถี่ 10 Hz
391000	0.01	0.05	1.000	1.000	
421000	0.01	0.06	1.200	1.200	
444000	0.01	0.05	1.400	1.450	
449000	0.01	0.05	1.480	1.500	รอยร้าวเฉลี่ย 1.49 มม.

ตารางที่ ๗3 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ P22-2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รอบ	ระยะยืดตัว(มม)		ความยาวรอยร้าว(มม)		หมายเหตุ
	ค่าเฉลี่ย	แอมป์ลิจูด	หน้า	หลัง	
120000	0.00	0.04	-	-	กำหนดภาระ 0.800 ± 0.200 ตัน ความถี่ 10 Hz, สลักใหม่
183500	0.03	0.04	-	-	
322800	0.04	0.05	-	-	
369000	0.05	0.04	-	-	กำหนดภาระ 1.000 ± 0.250 ตัน
417500	0.06	0.05	-	-	
466500	0.13	0.06	-	-	
521000	0.15	0.06	-	-	
577500	0.16	0.06	-	-	
601400	0.19	0.06	-	-	กำหนดภาระ 1.200 ± 0.300 ตัน
617000	0.20	0.07	-	-	กำหนดภาระ 1.000 ± 0.250 ตัน
647500	0.23	0.06	0.700	0.650	
671400	0.17	0.06	0.750	0.700	
690600	0.18	0.05	0.950	0.700	
710000	0.18	0.06	1.100	1.000	
728500	0.18	0.06	1.250	1.100	
753000	0.18	0.05	1.400	1.300	
763000	0.19	0.05	1.500	1.400	
768000	0.19	0.05	1.550	1.450	รอยร้าวเฉลี่ย 1.50 มม.

ตารางที่ ๗4 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าขึ้นงานที่ AISI 4140-2

รอบ	ระยะยึดตัว(มม)		ความยาวรอยร้าว(มม)		หมายเหตุ
	ค่าเฉลี่ย	แอมป์ลิจูด	หน้า	หลัง	
0	0.00	0.06	-	-	กำหนดภาวะ 1.000 ± 0.250 ตัน
175300	0.00	0.05	-	-	
291000	0.01	0.05	0.800	1.300	
305757	0.02	0.06	1.100	1.400	
315000	0.03	0.06	1.200	1.500	
324000	0.04	0.05	1.350	1.600	
326000	0.04	0.05	1.350	1.650	รอยร้าวเฉลี่ย 1.50 มม.

ตารางที่ ข5 ข้อมูลการเตรียมรอยร้าวก่อนหน้าชิ้นงานที่ AISI 4140-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	ภาคภูมิ สิริคุตต์
วัน-เดือน-ปีเกิด	15 ตุลาคม พ.ศ.2520
ที่อยู่	45/8 ซ.สุนทรพิมล ถ.จารุเมือง ต.รองเมือง อ.ปทุมวัน จ.กรุงเทพฯ 10330
สถานที่ทำงาน	-
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนสีตบุตรบำรุง กรุงเทพฯ พ.ศ.2531
มัธยมศึกษา	โรงเรียนเทพศิรินทร์ กรุงเทพฯ พ.ศ.2536
ปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(เครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ พ.ศ.2541
ปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(เครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ พ.ศ.2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย