

## การประเมินอายุที่เหลือสำหรับอุปกรณ์ของระบบผลิตไอน้ำที่เสียหายเนื่องจากความล้า

### The Residual Life Assessment for Steam Generator Under Fatigue Damage

ผศ. ดร. ก่อเกียรติ บุญชูคุณ

นาย อธิศักดิ์ เจริญสุข

นาย อธิศักดิ์ ศรีหุนสุข

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำรุงรักษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องกล

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

#### บทคัดย่อ

เอกสารฉบับนี้แสดงกรณีศึกษา เพื่อหาวิธีการประเมินอายุที่เหลือของ Secondary Superheater Outlet Header ของโรงไฟฟ้าขนาด เครื่องที่ 1 ในกรณีที่เกิดเสียหายเนื่องจากความล้า (Fatigue) โดยลักษณะความเสียหายจะปรากฏให้เห็นในรูปแบบของรอยร้าว (Fatigue Crack) ที่ผิว รอยร้าวสามารถขยายตัวได้จนถึงความยาวค่าหนึ่งที่เป็นค่าวิกฤต (Critical Crack Length) ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลัน

วัตถุประสงค์ของเอกสารนี้เพื่อแสดงลำดับขั้นตอนการประเมินอายุที่เหลือของ Header โดยการใช้นิยามจำลอง ประเมินอายุตามสมการของ Power Law :  $da/dN = 4 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.21}$  ความยาวของรอยร้าววิกฤตที่จะทำให้ Header เกิดความเสียหายคือ รอยร้าวที่ขยายตัวเข้าไปในความหนาของผนัง Header (Through-Thickness-Crack) ซึ่งพิจารณาจาก Leak-Before-Break Criterion ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงในรูปแบบ Operating Limit Lines จะแสดงอายุที่เหลือของ Header ที่ Operating Condition หนึ่งๆ

#### บทนำ

เนื่องจากความเสียหายของ Header จะ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโรงไฟฟ้า Header เป็น อุปกรณ์ที่มีความสำคัญของระบบผลิตไอน้ำของ โรงไฟฟ้า ทำหน้าที่รวบรวมเอาไอน้ำที่ได้จากการผลิตในแต่ละขั้นตอนก่อนที่จะส่งไปตามขั้นตอนต่อไปหรือส่งไปใช้งาน ถือว่าเป็น Critical Components

ในระบบผลิตไอน้ำนั้นจะประกอบด้วย Header หลายประเภท เช่น Superheater Header, Reheater Header เป็นต้น ถ้าอุปกรณ์เหล่านี้เกิดความเสียหายโดยฉับพลัน จะส่งผลให้โรงไฟฟ้า ต้องหยุดทำการผลิตกระแสไฟฟ้า และไม่

สามารถส่งกระแสไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดความเสียหายต่อเศรษฐกิจโดยรวมอย่างมหาศาล

โดยปกติเมื่อมีการปฏิบัติงานของโรงไฟฟ้า Header จะปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ในสถานะที่อุณหภูมิสูง (Elevated Temperature) ภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติงาน (Operating Condition) หนึ่ง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ในบางครั้งหรือหลายครั้งอาจจะไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวต้องมีการเปลี่ยน Operating Condition อยู่บ่อยๆซึ่งจะทำให้เกิดความผันแปรของ Stress และ Strain (Fluctuating Stress and Strain) บนผนังของ Header ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเสียหายแบบล้า (Fatigue) โดยลักษณะความเสียหายจะ

ปรากฏให้เห็นในรูปแบบของรอยร้าว (Fatigue Crack) ที่ผิว รอยร้าวสามารถขยายตัวได้จนถึงความยาวค่าหนึ่งที่เป็นค่าวิกฤต (Critical Crack Length) ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลัน ซึ่งจะส่งผลให้อายุของ Header เปลี่ยนแปลงไปจากอายุงานที่ออกแบบไว้แต่เดิม (Original Design Life) ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทำการประเมินอายุที่เหลือของ Header เพื่อที่ทำการกำหนดเงื่อนไขการปฏิบัติงาน แผนการตรวจสอบและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม

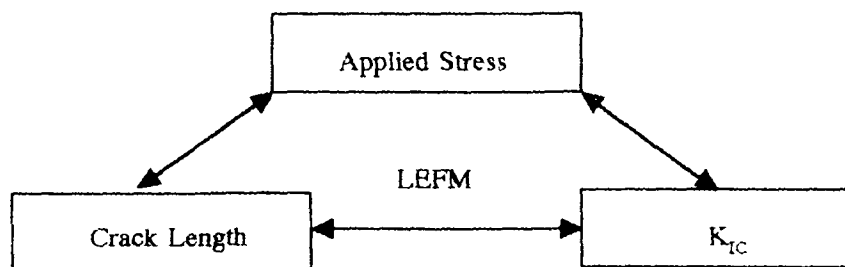
การประเมินอายุที่เหลือของ Header ต้องรวมความสามารถของ วิศวกร นักโลหะวิทยา และผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เพื่อให้สามารถตรวจสอบและเข้าใจลักษณะความเสียหายที่เกิดจาก Fatigue Crack ว่ามีความแตกต่างจาก Creep Crack หรือ Stress Corrosion Cracking สามารถตรวจสอบหา Fatigue Crack ที่ผิวของ Header ทั้งบริเวณด้านในและด้านนอก โดยใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Examination, NDE) ที่เหมาะสม

### วัตถุประสงค์และขอบเขต

เพื่อประเมินอายุที่เหลือของ Secondary Superheater Outlet Header ที่เสียหายเนื่องจาก Fatigue โดยมีขอบเขตศึกษาสาเหตุความเสียหายที่มีอิทธิพลต่ออายุอุปกรณ์เฉพาะสาเหตุจาก Fatigue เพียงอย่างเดียว โดยเลือกกรณีศึกษาเพียงอุปกรณ์เดียวคือ Secondary Superheater Outlet Header ของโรงไฟฟ้าชนอมเครื่องที่ 1 (KN#1)

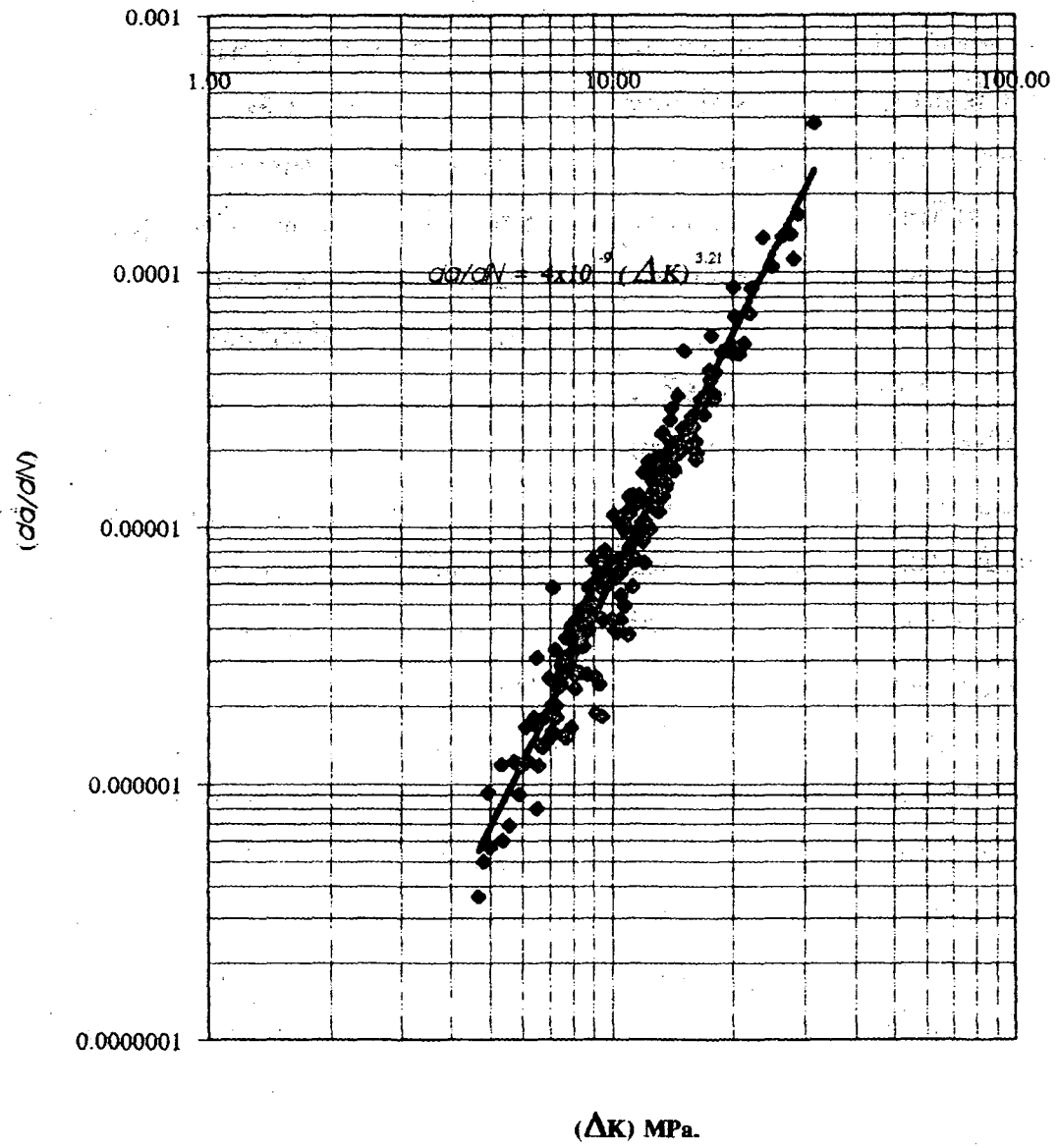
### แนวทางการประเมินอายุที่เหลือของ Header

การประเมินอายุของ Header โดย Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) นั้น มีตัวแปรวิกฤตที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 ตัว คือ Applied Stress, Crack Length และ Critical Stress Intensity Factor ( $K_{IC}$ ) ตัวแปรทั้ง 3 นี้ความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 1 สามารถแสดงในรูปแบบจำลองประเมินอายุตามสมการ Power Law :  $da/dN = 4 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.21}$  ดังรูปที่ 2 [Ref.(1)]



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรวิกฤต

รูปที่ 2 แสดง Fatigue Crack Growth Rate Model



ถ้า Applied Stress ที่เกิดบน Header โดยพิจารณาจาก Operating Condition และ  $K_{IC}$  หาได้จากการทดสอบตาม ASTM E-399 : Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. ดังนั้นสามารถประเมินอายุที่เหลือของ Header ได้ โดยประเมินจากเวลา (Elapsed Cycles) ที่ Initial Crack Length ขยายตัวจนถึงความยาววิกฤต (Critical Crack Length) ซึ่งจะเกิดการเสียหายโดยฉับพลัน (Fracture)

ลำดับขั้นตอนการดำเนินการเพื่อที่จะกำหนดอายุที่เหลือของ Header ที่ตรวจสอบพบรอย Fatigue Crack แล้ว ผลของการดำเนินการจะแสดงในรูปแบบที่เรียกว่า Operating Limit Line ซึ่ง Plots แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุที่เหลือ (Remaining Life, Cycles) vs. Crack Length ที่ Operating Condition (Stress) ค่าหนึ่ง วิธีดำเนินการ ดังนี้

#### (1) Fatigue Stress Analysis

Stress ที่กระทำต่อ Secondary Superheater Outlet Header ของ KN#1 สามารถแบ่งออกเป็น Stress ที่สำคัญ (Principal Stress) ดังนี้

- : Thermal Stress
- : Internal Pressure Stress
- : Stream Flow Stress
- : Header's Weight Stress

จากการวิเคราะห์ Stress ที่เกิดขึ้นแต่ละประเภทโดย Analytical Method สามารถสรุปได้ว่า Thermal Stress เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิด Fatigue Stress อันเนื่องมาจากการผันแปรของอุณหภูมิภายนอก สาเหตุจากสภาพแวดล้อมของ

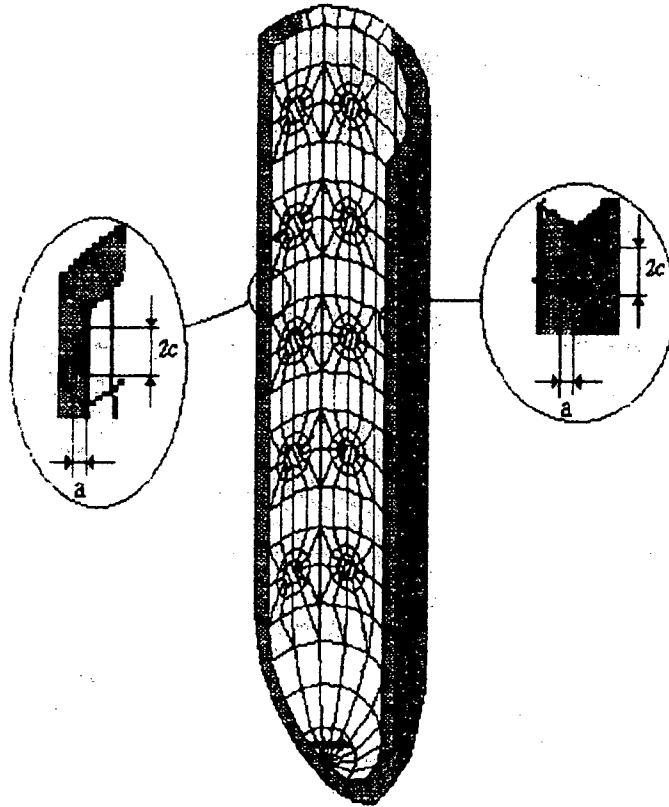
อากาศและฤดูกาล ฉะนั้นนำผลการวิเคราะห์มาสร้าง Equivalent Stress Cycles เพื่อกำหนด Mean Stress และ Amplitude Stress ได้เท่ากับ  $39 \pm 4$  MPa.

#### (2) กำหนดบริเวณที่ทำการตรวจสอบ

ทำการเลือกบริเวณที่คาดว่าจะเกิด Fatigue Crack ซึ่งส่วนมากเริ่มเกิด (Initiate) บริเวณที่มี Stress Concentration สูง เช่น บริเวณ Ligament ของ Header รอย Fatigue Crack อาจเริ่มเกิดที่ผิวในหรือผิวนอก ปรากฏให้เห็นในลักษณะ Surface Crack แล้วขยายตัวในแนวลึกเข้าสู่ความหนาของผนัง Header (รูปที่ 3) ซึ่งจะให้ความหนาของผนัง Header ลดลงเรื่อยๆ จนถึงความลึกวิกฤตค่าหนึ่ง (Critical Crack Depth) Header จะรับ Internal Pressure ไม่ได้จนเกิดการ Fracture

#### (3) กำหนด Critical Crack Length ( $a_{cr}$ )

จากการพิจารณา Leak-Before-Break Criterion ซึ่งเสนอโดย Irwin กล่าวโดยย่อว่ารอย Surface Crack จะขยายตัวไปตามแนว Longitudinal ของผนัง Header และความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ Header เกิดการเสียรูปผิดลักษณะ (Deformation) หรือ เกิดการร้าวก่อนที่จะ Fracture เนื่องจาก Surface Crack ขยายตัวเข้าไปในความหนาของผนัง Header (Through-thickness Crack) ฉะนั้นความยาวประมาณเท่ากับ ความหนาของ Header คือประมาณ 40 mm. (๑) (ดูรูปที่ 3 และ 4 ประกอบ) ดังนั้นเราต้องป้องกันความเสียหายจาก Surface Crack (2C) ที่ความลึก (๑) 40mm. อัตราส่วนที่อาจเป็นไปได้  $a/2C = 0.25$  จะนำมาพิจารณาหาความยาว Surface Crack ได้เท่ากับ 160 mm.



รูปที่ 3 แสดง Fatigue crack Configuration ที่คาดว่าจะ  
เกิดบนผนังของ Header

ฉนั้นจาก Leak-Before-Break Criterion  
ความยาวของ Critical Crack Length ก็คือ  
Surface Crack ซึ่งเท่ากับ 160 mm.

(4) กำหนด Initial Crack Length ( $a$ )

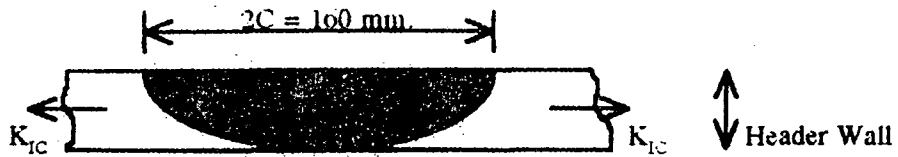
โดยความสามารถและความเชื่อถือ  
ได้ของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDE) จะ  
เป็นตัวกำหนด Initial Crack Length ที่สามารถ  
ตรวจพบ ถ้าตรวจพบ Initial Crack Length ( $a$ )  
ที่ผิวยาวเท่ากับ 10 mm. ฉนั้นเราต้องทำการ  
ประเมินช่วงเวลา Surface Crack ขยายตัวจาก  
10 mm. ไปถึง 160 mm. ต้องใช้เวลาเท่าใด  
ซึ่งก็คืออายุที่เหลือของ Header

(5) คำนวณค่า Stress Intensity Factor  
Range ( $\Delta K$ )

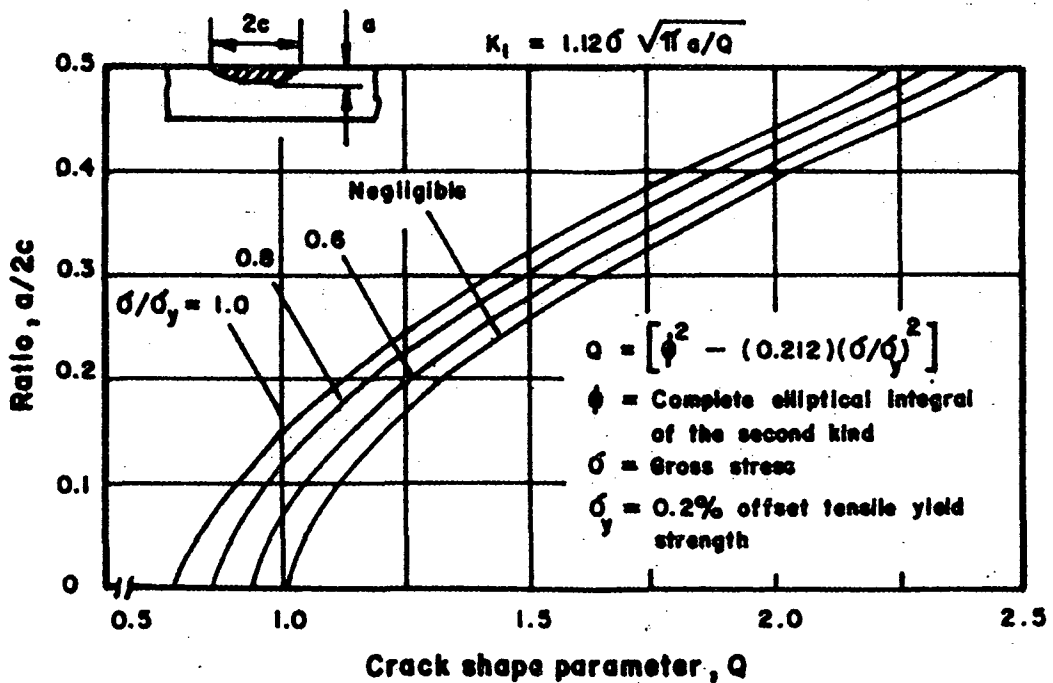
เนื่องจาก Surface Crack ขยายลึก  
เข้าไปในผนังของ Header ในลักษณะที่เรียกว่า  
Part-Through Thumbnail Crack ฉนั้นค่า Stress  
Intensity Factor Range ( $\Delta K$ ) สามารถหาได้จาก  
สูตรดังนี้

$$\Delta K = 1.12 \Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot \frac{a}{Q}} \quad (1) \text{ [Ref.(3)]}$$

โดย  $Q$  คือ Flaw Shape Parameter  
หาได้จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แสดง Critical Crack Length Configuration



รูปที่ 5 Dependence of the Flaw Shape Parameter on the Ratio of Depth and Crack Surface Length

ในกรณีของ Secondary Superheater Outlet Header ของ KN#1 ทำจากวัสดุที่มีค่า  $\sigma_y = 207$  MPa. ค่า  $\sigma_{max}$  ที่เกิดขึ้น 43 MPa. ฉะนั้น  $\sigma/\sigma_y = 0.2$ ,  $a/2C$  Ratio = 0.25 และจากรูปที่ 4 ค่า  $Q = 1.47$   $\Delta\sigma = 8$  MPa. จากสมการ (1) เขียนในรูปความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta K = 14.20 \sqrt{a} \quad (\text{Mpa} \cdot \sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

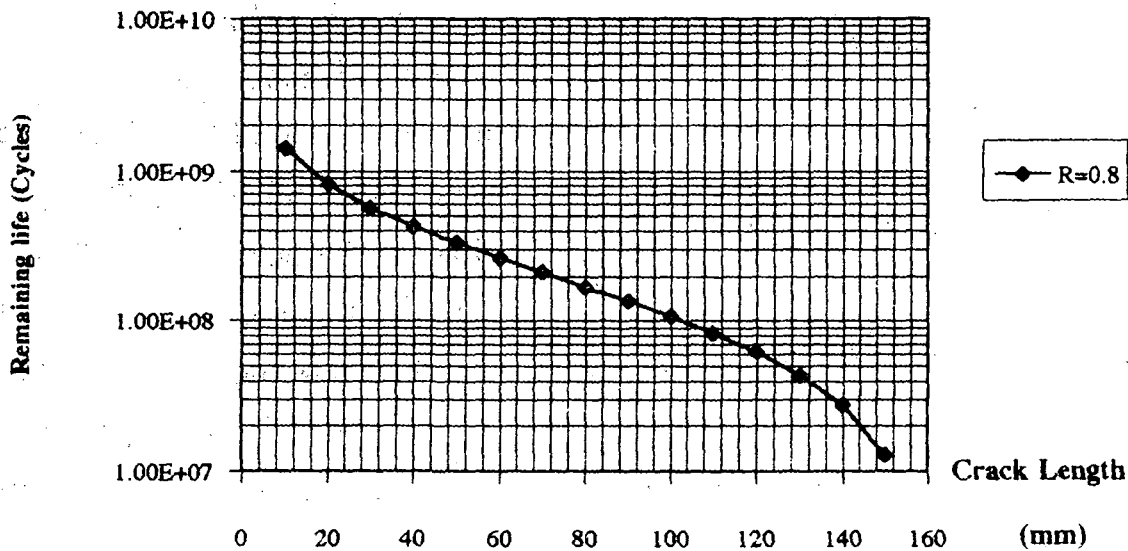
$$= 0.45 \sqrt{\sigma} \quad \text{N/mm}^{3/2}$$

(6) ประเมินอายุที่เหลือของ Header

จากแบบจำลองการประเมินอายุ  $da/dN = 4 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.21}$  (mm/cycle) ในขณะที่ Header รับ Fatigue Stress Cycles จะทำให้ Stress Intensity Factor Rang ( $\Delta K$ ) และความยาวของ Surface Crack เพิ่มขึ้นพร้อมๆกัน

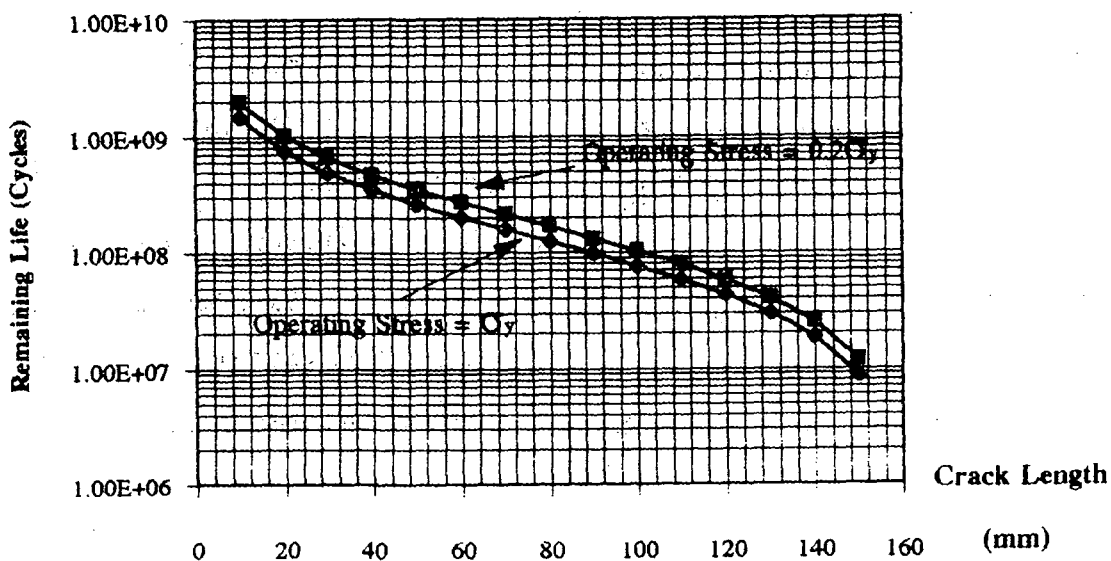
ในเมื่อ Surface Crack Growth Rate ( $da/dN$ ) ขึ้นอยู่กับ  $\Delta K$  ดังนั้นค่า Crack Growth Rate จะไม่คงที่แต่มีค่าเพิ่มมากขึ้นพร้อมกับความยาวของ Surface Crack สภาพการณ์เช่นนี้เราต้องใช้การ Integration เพื่อหาอายุที่เหลือ ที่

รูปที่ 6 กราฟแสดง Operating Limit Line ของ Header



Operating Stress =  $0.2\sigma_y$  ;  $a/2C = 0.25$  ;  $a_c = 160$  mm

รูปที่ 7 แสดง Operating Limit Lines ของ Header ที่เงื่อนไข R=0.8



$a/2C = 0.25$  ; Critical Crack Length = 160 mm

Surface Crack ขยายตัวจาก 10 mm. ถึง 160 mm.

$$\int_{N_i}^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_{cr}} \frac{1}{4 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.21}} da \quad (3)$$

แทนค่า  $\Delta K$  สมการ (2) ใน (3)

$$\int_{N_i}^{N_f} dN = \int_{a_i=10}^{a_{cr}=160} \frac{1}{3.08 \times 10^{-10} a^{-1.61}} da \quad (4)$$

ผลของการ Integration ภายใต้งานชิ้นงานของ Header ที่ Operating Stress เท่ากับ  $0.2 \sigma_y$ ,  $a/2C = 0.25$  ที่ Stress Ratio ( R ) = 0.8 แสดงในรูปแบบของกราฟ Operating Limit Line ดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถหาค่าอายุที่เหลือได้โดยตรงจากกราฟที่ความยาว Crack ใดๆ เช่น ถ้าตรวจพบ Initial Fatigue Crack ที่มีความยาวที่ผิวเท่ากับ 40 mm. ความยาววิกฤตของ Crack ที่ผิวเท่ากับ 160 mm. จากกราฟอายุที่เหลือของ Header มีค่าเท่ากับ  $1.4 \times 10^8$  Cycles

#### Cycle Counting in Fatigue Analysis

ในสภาวะการณ์ในการปฏิบัติงานหรือโรงไฟฟ้ากำลังผลิตกระแสไฟฟ้านั้น Header จะอยู่ภายใต้การผันแปรของ Stress แบบ Variable Amplitude เนื่องจากความผันแปรของอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งความเป็นจริงแล้วจะไม่

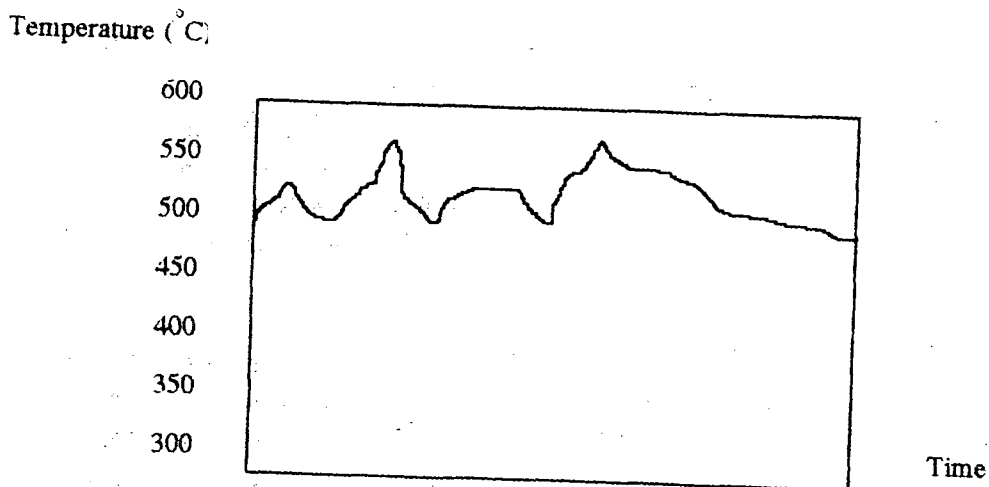
สม่ำเสมอ (Irregular) แสดงดังรูปที่ 8 เป็นลักษณะที่เรียกว่า Board-Band Random Loading ในเมื่อ Fatigue Stress Cycle ไม่เป็นรูปแบบเดียวกันหมด (Nonuniform Cycles) แต่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Irregular) ผลของเหตุการณ์เหล่านี้ทำให้เกิดความเสียหายแบบ Fatigue เหมือนกัน แต่ในแบบจำลองการประเมินอายุ ตามสมการที่ (ดังรูปที่ 2) ได้จากการทดสอบที่ Fatigue Stress Cycles เป็นรูปแบบเดียวกันหมด (Uniform Cycles) ในการนับ Fatigue Cycle ที่เกิดบน Header อาจใช้วิธีนับ Temperature Variation Cycles โดย Range-Pair Method [5] หรือ Rainflow Method ตามข้อแนะนำของ ASTM E-1049 : Standard Method for Cycle Counting in Fatigue Analysis

#### สรุป

การประเมินอายุที่เหลือของ Header โดยการใช้แบบจำลองที่สร้างในรูปความสัมพันธ์ตามสมการ Power Law นั้น อายุที่เหลือของ Header จะขึ้นอยู่กับ Operating Stress , Stress Ratio ( R ) , Crack Depth and Surface Crack Length Ratio (  $a/2C$  ) และ Operating Stress ต้องอยู่ในช่วงของ Elastic Region

Surface Critical Crack Length (2C) นี จากการประยุกต์ Leak-Before-Break Criterion โดยความลึกของรอย Crack มีค่าสูงสุดไม่เกินความหนาของ Header





รูปที่ 8 แสดง Temperature Variation Cycles บนผิว Header

#### เอกสารอ้างอิง

1. ก่อเกียรติ บุญชูกุล, ผศ.ดร. และ คณะ  
การสร้างแบบจำลองประเมินอายุที่เหลือสำหรับอุปกรณ์ของระบบผลิตไอน้ำที่เสียหาย  
เนื่องจากความล้า,
2. Anderson, T.L., Ph.D, Fracture Mechanic Fundamentals and Applications,  
CRC Press, Inc., 1991.
3. Barsom, J.M., Rolfe, S.T., Fracture and Fatigue Control in Structures,  
Applications of Fracture Mechanics, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1977.
4. Ewalds, Holo. Wanhill, R.J.H., Fracture Mechanics, Krips Repro. Mepel,  
Netherlands, 1984.
5. Fuchs, H.O., Stephens, R.I., Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons,  
New York, 1980.
6. Taylor, D., Fatigue Thresholds, Butterworth & Co.Ltd, 1989.
7. Hertzberg, R.W., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.,  
John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 1989.
8. Nijhoff, M., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Netherland, 1986.