

การวิเคราะห์ระดับความเชื่อมั่นของการทดสอบเพื่อประเมินอายุใช้งานของ
ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยวิธีการขยายตัวของรอยร้าว



นางสาวรังสิณี รังกุพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-084-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A CONFIDENCE ANALYSIS FOR LIFE ASSESSMENT TESTING OF MACHINERY
COMPONENT BY PROPAGATION A CRACK GROWTH RATE

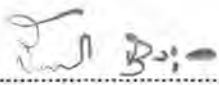
Miss Rangsinee Rangkupan

A thesis Submitted in Patial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Industrial Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996
ISBN 974-833-084-5

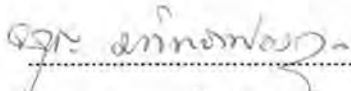
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ระดับความเชื่อมั่นของการทดสอบเพื่อประเมินอายุใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยวิธีการขยายตัวของรอยร้าว
โดย นางสาวรังสินี รังกุพันธุ์
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล

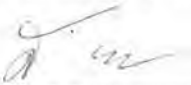



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ อุทธีธรรม)

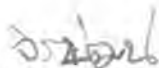
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จรุณ มหาพิงกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ ภูเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ จีรพัฒน์ เมาประเสริฐวงศ์)



รังสิณี รังกุณฑ์ : การวิเคราะห์ระดับการเชื่อมั่นของการทดสอบเพื่อประเมินอายุใช้งานของ
ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยวิธีการขยายตัวของรอยร้าว (A CONFIDENCE ANALYSIS
FOR LIFE ASSESSMENT TESTING OF MACHINERY COMPONENT BY
PROPAGATION A CARCK GROWTH RATE) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ศิริจันทร์
ทองประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล, 233 หน้า.

ISBN 974-633-084-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิจัยเพื่อหาระดับความเชื่อมั่นของการทดสอบอัตราการขยายตัวของ
รอยร้าวเนื่องจากความล้า โดยใช้ข้อมูลการทดสอบจาก 2 แหล่งคือข้อมูลการทดสอบอัตราการขยายตัว
ของรอยร้าวจากความล้าของวัสดุ SA335 P22 และข้อมูลการทดสอบของวัสดุเหล็กเพลลาขาว ซึ่งใช้
ชิ้นทดสอบแบบ compact specimen ที่มีความกว้าง 51 มิลลิเมตรและ 25.50 มิลลิเมตร ในการ
วิเคราะห์ได้เลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการกระจายของข้อมูล นำปัจจัยที่เลือกมาทดสอบความมีนัย
สำคัญของอิทธิพลต่อการกระจายของผลทดสอบ ซึ่งพบว่า การกระจายของข้อมูลเกิดจากอิทธิพลเนื่องจาก
ความผิดพลาดแบบสุ่มโดยไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากปัจจัยที่เลือกมาทดสอบ และในการหาระดับความ
เชื่อมั่นนี้ใช้การประยุกต์จากทฤษฎีการวิเคราะห์ความถดถอย ซึ่งได้ผลว่าระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลการ
ทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจากความล้าของวัสดุ SA335 P22 มีระดับความเชื่อมั่นที่ระดับ
90 % และระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลการทดสอบของวัสดุเหล็กเพลลาขาวมีระดับความเชื่อมั่นที่ระดับ 80%

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต รังสิณี รังกุณฑ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.ศิริจันทร์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาอื่น ๆ

C516343 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD:

CONFIDENCE ANALYSIS / MACHINERY COMPONENT / FATIGUE / CRACK
RANGSINEE RANGKUPAN : A CONFIDENCE ANALYSIS FOR LIFE ASSESSMENT
TESTING OF MACHINERY COMPONENT BY PROPAGATION A CARCK GROWTH RATE.
THESIS ADVISOR : PROF.SIRICHAN TONGPRASERT, Ph.D. CO-ADVISOR ASST.
PROF. KOKIAT BUNCHUKUSOL, Ph.D., 233 pp. ISBN 974-633-084-5

The objective of the thesis was to determine the confidence level of the fatigue crack growth rate testing. Data used in the testing were from fatigue crack growth rate testing of 2 materials : SA335 P22 and cold finished steel bars. The testing parts were compact specimen with 51 mm. width and with 25.50 mm. width. The analysis was focused on factors which were expected to influence data scatter. After testing the significance of their influence, it was found that data scatter was influenced by random error not by the selected factors. In determining the confidence level of fatigue crack growth rate testing, the regression analysis theory was applied. The result of the testing showed that the confidence level for the fatigue crack growth rate testing was 90% for SA335 P22 and 80% for cold finished steel bars.

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

ปีการศึกษา..... 2538.....

ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรณี รุ่งเรือง.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... [Signature].....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... [Signature].....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำอย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ จรุง มหิทธิพงษ์กุล ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ ภูเจริญ และอาจารย์ จีรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ นอกจากนี้ก็ขอขอบคุณ คุณจิระศักดิ์ เจริญสุข คุณอดิศักดิ์ ศรีพูนสุข เจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คุณภาณุ ประทุมพรรัตน์ และคุณจิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ และเก็บข้อมูล

สุดท้ายผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการเงิน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3. ปัจจัยที่มีผลต่อความผันแปรของข้อมูลการทดสอบ.....	36
4. มาตรฐาน ข้อมูลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลของวัสดุ ชิ้นทดสอบ และเครื่องทดสอบ.....	41
5. การวิเคราะห์ระดับความเชื่อมั่น และสรุปผล.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	233

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1	41
แสดงมาตรฐานของส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ SA 335 P11 และ SA335 P22.....	41
ตารางที่ 4.2	42
แสดงมาตรฐานของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SA335 P11 และ SA335 P22.....	42
ตารางที่ 4.3	42
แสดงมาตรฐานส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	42
ตารางที่ 4.4	42
แสดงผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของ วัสดุ SA335 P22.....	42
ตารางที่ 4.5	43
แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SA335 P22.....	43
ตารางที่ 4.6	43
แสดงผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของ วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	43
ตารางที่ 4.7	44
แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	44
ตารางที่ 4.8	46
ตารางสรุปค่าความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนของมิติต่างๆ ของชิ้นทดสอบแบบ C(T).....	46
ตารางที่ 4.9	46
แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนของชิ้นทดสอบที่ความกว้าง 51 และ 25.50 มิลลิเมตร.....	46
ตารางที่ 4.10	49
ตารางแสดงค่ามิติของชิ้นทดสอบที่ความกว้าง 51 มิลลิเมตร.....	49
ตารางที่ 4.11	50
ตารางแสดงค่ามิติของชิ้นทดสอบที่ความกว้าง 25.50 มิลลิเมตร.....	50
ตารางที่ 4.12	54
แสดงระดับภาระที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการขยายตัวของ รอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ SA335 P22 แยกตามค่า Ratio (min load / max load), ระดับภาระ และความหนา.....	54
ตารางที่ 4.13	55
แสดงระดับภาระที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการขยายตัวของ รอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุเหล็กเพลลาขาวแยกตามค่า Ratio (min load / max load), ระดับภาระ และความหนา.....	55
ตารางที่ 4.14	56
แสดงระยะเคลื่อนตัวของ Proving Ring ที่ระดับภาระต่างๆ ของการทดสอบ.....	56
ตารางที่ 4.15	57
แสดงค่าภาระที่เกิดขึ้นในการทดสอบของเครื่อง Dynamic Servo Fatigue Tester และฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นสะสม.....	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.16	แสดงค่าทางสถิติของระดับภาระของเครื่อง Dynamic Servo Fatigue Tester..... 59
ตารางที่ 4.17	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนของระดับภาระต่างๆ ของเครื่อง Dynamic Servo Fatigue Tester..... 60
ตารางที่ 4.18	แสดงอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวของชิ้นทดสอบที่ระดับภาระต่าง ๆ (ความหนา 25.50 มม.) ของด้าน A และด้าน B ที่ 1,500,000 รอบ..... 62
ตารางที่ 4.19	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของระดับภาระของชิ้นทดสอบที่ความหนา 25.50 มม. 62
ตารางที่ 4.20	แสดงอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวของชิ้นทดสอบที่ระดับภาระต่าง ๆ (ความหนา 12.50 มม.) ของด้าน A และด้าน B ที่ 4,400,000 รอบ..... 63
ตารางที่ 4.21	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของระดับภาระของชิ้นทดสอบที่ความหนา 12.50 มม. (ชิ้นทดสอบหมายเลข 16,23)..... 63
ตารางที่ 4.22	แสดงระยะเคลื่อนตัวของ Dial Gauge ของเครื่อง Microscope... 66
ตารางที่ 5.1	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 90 % ของอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN) ของวัสดุ SA335 P22..... 75
ตารางที่ 5.2	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 80 % ของอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN) ของวัสดุเหล็กเพลลาขาว... 80
ตารางที่ ข 1	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ชิ้นทดสอบหมายเลข 5..... 100
ตารางที่ ข 2	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ชิ้นทดสอบหมายเลข 6..... 102
ตารางที่ ข 3	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ชิ้นทดสอบหมายเลข 7..... 104
ตารางที่ ข 4	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ชิ้นทดสอบหมายเลข 8..... 107
ตารางที่ ข 5	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ชิ้นทดสอบหมายเลข 9..... 109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ค 14 แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจาก ความล้า ชั้นทดสอบหมายเลข 44.....	174
ตารางที่ ค 15 แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจาก ความล้า ชั้นทดสอบหมายเลข 45.....	176
ตารางที่ ค 16 แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจาก ความล้า ชั้นทดสอบหมายเลข 46.....	168
ตารางที่ ง 1 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.4 (ชั้นทดสอบหมายเลข 12).....	183
ตารางที่ ง 2 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.5 (ชั้นทดสอบหมายเลข 10,11,24,25).....	184
ตารางที่ ง 3 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.6 (ชั้นทดสอบหมายเลข 5,6,15,16,17).....	185
ตารางที่ ง 4 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.66 (ชั้นทดสอบหมายเลข 13).....	186
ตารางที่ ง 5 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.7 (ชั้นทดสอบหมายเลข 8,9,18,19,20).....	187
ตารางที่ ง 6 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.8 (ชั้นทดสอบหมายเลข 7,21,22,23).....	188
ตารางที่ ง 7 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor รวมทุกชั้นทดสอบ ของวัสดุ SA 335 P22.....	189

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ง 8 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.3 (ขั้นตอนทดสอบหมายเลข 26,27).....	190
ตารางที่ ง 9 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.5 (ขั้นตอนทดสอบหมายเลข 29,30,35,36,37,38,39,40,41).....	191
ตารางที่ ง 10 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.6 (ขั้นตอนทดสอบหมายเลข 42,43,44).....	193
ตารางที่ ง 11 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor ที่ระดับ Ratio 0.7 (ขั้นตอนทดสอบหมายเลข 45,46).....	194
ตารางที่ ง 12 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเติบโต ของความยาวรอยร้าวตามช่วง Stress Intensity Factor รวมทุกขั้นตอนทดสอบของวัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	195
ตารางที่ จ 1 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 99 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	197
ตารางที่ จ 2 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 95 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	199
ตารางที่ จ 3 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 85 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	201
ตารางที่ จ 4 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 80 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	203
ตารางที่ จ 5 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 50 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	205
ตารางที่ จ 6 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 20 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุ SA335 P22.....	207
ตารางที่ ฉ 1 แสดงช่วงความเชื่อมั่น 99 % ของค่าอัตราการเติบโตของความ ยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	210

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ ๑	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 99 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	210
ตารางที่ ๒	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 95 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	213
ตารางที่ ๔	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 85 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	219
ตารางที่ ๕	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 70 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	222
ตารางที่ ๖	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 50 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	225
ตารางที่ ๗	แสดงช่วงความเชื่อมั่น 20 % ของค่าอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าวเนื่องจากความล้า วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	228

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงฟังก์ชันการเสียหายอันตรายรูปอ่างน้ำ..... 1
รูปที่ 1.2	แสดงอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์เชิงกล..... 2
รูปที่ 2.1	แสดงการกระจายแบบต่อเนื่อง..... 6
รูปที่ 2.2	แสดงการกระจายแบบไม่ต่อเนื่อง..... 6
รูปที่ 2.3	แสดงเส้นโค้งปกติ..... 7
รูปที่ 2.4	แสดงเส้นโค้งของการกระจายแบบล็อกนอร์มอล..... 8
รูปที่ 2.5	แสดงค่าเฉลี่ยของประชากร และลักษณะการกระจายของ ความน่าจะเป็นของ e..... 18
รูปที่ 2.6	แสดงค่าเฉลี่ยของประชากร และค่า y ที่จุดใด ๆ..... 18
รูปที่ 2.7	แสดงตัวอย่างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับตัวแปรตาม y 23
รูปที่ 2.8	แสดงลักษณะของการเกิดความล่าช้าทั้ง 3 ช่วง..... 25
รูปที่ 2.9	(a) แสดงกราฟความยาวรอยร้าว และจำนวนรอบ จากความยาว รอยร้าวที่เริ่มตรวจสอบได้ และ (b) กราฟความเค้น และจำนวนรอบ.... 26
รูปที่ 2.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{da}{dN}$ และ ΔK 28
รูปที่ 2.11	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $\frac{da}{dN}$ และ ΔK 29
รูปที่ 2.12	แสดงการหา $\frac{da}{dN}$ จากกราฟความสัมพันธ์ a และ N 30
รูปที่ 2.13	แสดงระดับความเชื่อมั่นโดยรวม (global confidence) 95 % จากงานวิจัยของ Clark และ Hudak 34
รูปที่ 2.14	แสดงผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว จากชั้นทดสอบลักษณะต่าง ๆ กัน..... 35
รูปที่ 4.1	แสดงมาตรฐานของมิติของชั้นทดสอบ Compact-Type C(T) ในการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากความล้า..... 45
รูปที่ 4.2	แสดงเครื่อง Dynamic Servo Fatigue Tester..... 51
รูปที่ 4.3	แสดงหน้าจอควบคุมของเครื่อง Dynamic Servo Fatigue Tester..... 51
รูปที่ 4.4	แสดง Proving Ring..... 52
รูปที่ 4.5	แสดง Proving Ring ที่ติดตั้งกับเครื่อง Dynamic Servo Tester..... 52

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงกล้องไมโครสโคป และ Dial Gauge.....	65
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงช่วงความเชื่อมั่น ของอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 % ของวัสดุ SA335 P22.....	76
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงช่วงความเชื่อมั่น ของอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 80 % ของวัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	82
รูปที่ ก 1 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 0.64 ตัน.....	87
รูปที่ ก 2 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 0.675 ตัน.....	88
รูปที่ ก 3 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 0.72 ตัน.....	89
รูปที่ ก 4 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 0.765 ตัน.....	90
รูปที่ ก 5 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 0.81 ตัน.....	91
รูปที่ ก 6 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 1.32 ตัน.....	92
รูปที่ ก 7 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 1.65 ตัน.....	93
รูปที่ ก 8 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 1.752 ตัน.....	94
รูปที่ ก 9 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 2.12 ตัน.....	95
รูปที่ ก 10 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 2.41 ตัน.....	96
รูปที่ ก 11 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 2.50 ตัน.....	97
รูปที่ ก 12 แสดงการพล็อตข้อมูลการกระจายความน่าจะเป็นสะสมบนกราฟล็อก ของระดับภาระ 3.10 ตัน.....	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ข 15 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 20.....	131
รูปที่ ข 16 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 21.....	133
รูปที่ ข 17 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 22.....	135
รูปที่ ข 18 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 23.....	137
รูปที่ ข 19 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 24.....	139
รูปที่ ข 20 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 25.....	141
รูปที่ ข 21 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของวัสดุ SA355 P22 รวมทุชิ้นทดสอบ.....	142
รูปที่ ค 1 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 26.....	146
รูปที่ ค 2 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 27.....	149
รูปที่ ค 3 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 29.....	151
รูปที่ ค 4 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 30.....	153
รูปที่ ค 5 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 35.....	155
รูปที่ ค 6 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 36.....	158
รูปที่ ค 7 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชิ้นทดสอบหมายเลข 37.....	160

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ค 8 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 38.....	162
รูปที่ ค 9 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 39.....	164
รูปที่ ค 10 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 40.....	167
รูปที่ ค 11 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 41.....	169
รูปที่ ค 12 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 42.....	171
รูปที่ ค 13 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 43.....	173
รูปที่ ค 14 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 44.....	175
รูปที่ ค 15 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 45.....	178
รูปที่ ค 16 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของชั้นทดสอบหมายเลข 46.....	180
รูปที่ ค 17 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของความยาวรอยร้าว และ Delta K ของวัสดุเหล็กเพลลาขาว รวมทุกชั้นการทดสอบ.....	181
รูปที่ จ 1 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % วัสดุ SA335 P22.....	198
รูปที่ จ 2 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % วัสดุ SA335 P22.....	200
รูปที่ จ 3 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 85 % วัสดุ SA335 P22.....	202
รูปที่ จ 4 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 80 % วัสดุ SA335 P22.....	204

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ จ 5 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 50 % วัสดุ SA335 P22.....	206
รูปที่ จ 6 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 20 % วัสดุ SA335 P22.....	208
รูปที่ จ 7 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ ของวัสดุ SA335 P22.....	209
รูปที่ ฉ 1 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	212
รูปที่ ฉ 2 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	215
รูปที่ ฉ 3 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	218
รูปที่ ฉ 4 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 85 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	221
รูปที่ ฉ 5 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 70 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	224
รูปที่ ฉ 6 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 50 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	237
รูปที่ ฉ 7 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 20 % วัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	230
รูปที่ ฉ 8 กราฟ แสดงช่วงความเชื่อมั่นของอัตราการเติบโตของความยาวรอยร้าว ที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ ของวัสดุเหล็กเพลลาขาว.....	231