

การพัฒนาโปรแกรมทดสอบสำหรับหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า



นาย ทรงพล เพิ่มทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

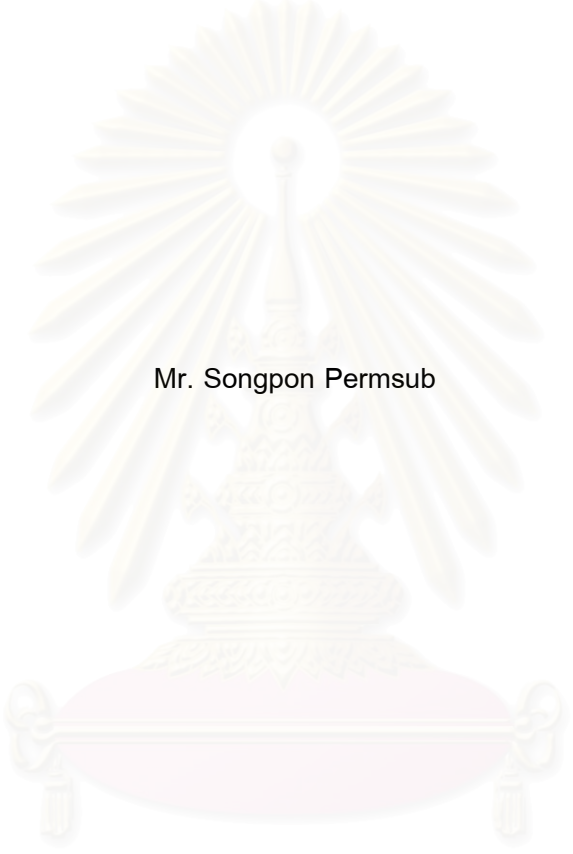
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT SOFTWARE FOR FATIGUE CRACK GROWTH RATE TEST



Mr. Songpon Permsub

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Program Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2007  
Copyright of Chulalongkorn University

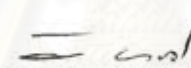
หัวข้อวิทยานิพนธ์  
โดย  
สาขาวิชา  
อาจารย์ที่ปรึกษา


การพัฒนาโปรแกรมทดสอบสำหรับหาอัตราการใช้ของรอยร้าวลำ  
นาย ทรงพล เพิ่มทรัพย์  
วิศวกรรมเครื่องกล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัณย์ศิริ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ทรงพล เพิ่มทรัพย์ : การพัฒนาโปรแกรมทดสอบสำหรับหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า. (DEVELOPMENT SOFTWARE FOR FATIGUE CRACK GROWTH RATE TEST) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 197 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ซอฟต์แวร์แล็บVIEW เพื่อพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าแบบต่าง ๆ ดังนี้ 1) แบบควบคุมภาระ 2) แบบโหลด  $\Delta K$  และ 3) แบบควบคุม  $\Delta K$  การทำงานของโปรแกรมใช้ข้อแนะนำในมาตรฐาน ASTM E647 โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วยโมดูลรับค่าสภาวะทดสอบ โมดูลวิเคราะห์ผล โมดูลแสดงผล โมดูลบันทึกผล โมดูลสร้างสัญญาณควบคุม และโมดูลปรับแก้สัญญาณควบคุม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปประยุกต์กับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าของอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดกว้าง 2 นิ้วหนา 1 นิ้ว ในสภาพแวดล้อมอากาศ การทดสอบทั้งหมดใช้ภาระรูปไซน์ ความถี่ 10 เฮิรตซ์ สำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระ และแบบโหลด  $\Delta K$  ใช้อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 สำหรับการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 และควบคุม  $\Delta K$  ที่ 4, 7 และ 10  $MPa\sqrt{m}$  ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า สำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระ โปรแกรมสามารถควบคุมความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระได้ในขอบเขต  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับการทดสอบแบบโหลด  $\Delta K$  กับแบบควบคุม  $\Delta K$  สามารถควบคุมความผิดพลาดได้ในขอบเขต  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ การควบคุมภาระจะแม่นยำขึ้น เมื่อคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานมีค่าน้อยกว่า  $3.5 \times 10^{-5}$  มม./ตัน และ  $\Delta K$  มีค่ามากกว่า  $2.5 MPa\sqrt{m}$  ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าของอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 ขึ้นอยู่กับ  $\Delta K$  และอัตราส่วนภาระ

นอกจากนี้ การทดสอบที่อัตราส่วนภาระ 0.1 ได้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอื่นที่มีโปรแกรมสำเร็จรูป Gluon ควบคุมจึงสรุปได้ว่าโปรแกรมสามารถควบคุมการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าได้อย่างน่าเชื่อถือ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา 2550

## 4770630621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: fatigue crack growth rate, LabVIEW

SONGPON PERMSUB : DEVELOPMENT SOFTWARE FOR FATIGUE  
CRACK GROWTH RATE TEST.THESIS ADVISOR : JIRAPONG  
KASIVITAMUAY, D.Eng, 197 pp..

This thesis developed a program for fatigue crack growth rate using LabVIEW software. The program can perform 1) load-controlled test, 2)  $\Delta K$  -decreasing test and  $\Delta K$  -constant test. The program was designed follow the ASTM E647 standard. The program consists of user interface, test type, conversion, sampling&save, analysis, waveform generation and load compensation modules.

The developed program is used in fatigue crack growth rate test of aluminum alloy 7075-T6. The specimen is compact tension type, having a width of 2 in. and a thickness of 1 in. Tests were conducted in an air environment, under sine waveform of a frequency 10 Hz. For  $\Delta K$  -increasing and  $\Delta K$  -decreasing tests, the tests were conducted under a load ratio of 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7. For  $\Delta K$  -constant tests, the tests were conducted under a load ratio of 0.1 and  $\Delta K$  equals to 4, 7 and 10  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , respectively.

It can be concluded from the experimental results that the program can correctly control the mean load and load amplitude within a specified limit e.g. within 2% for  $\Delta K$  -increasing test, and within 10% for  $\Delta K$  -decreasing and constant tests. The accuracy of the controlled load was improved if the specimen's compliance is lower than  $3.5 \times 10^{-8}$  mm/ton and  $\Delta K$  higher than  $2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . These results revealed that fatigue crack growth rate of Al 7075-T6 depends on  $\Delta K$  and load ratio but independent of test type.

Comparison of crack growth rate data obtained from the developed program with that obtained from commercial software at load ratio of 0.1 revealed that both experiments give a similar result. Thus, the program can perform the test well.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....*Sangpon*.....  
Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....*[Signature]*.....  
Academic year 2007

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการทำงานในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ ครูและช่างเทคนิค รวมถึงบุคลากรธุรการประจำภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยอำนวยความสะดวก ตลอดจนการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อน ๆ และรุ่นพี่ปริญญาโทและปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการวิจัย กลศาสตร์การคำนวณทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่งที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา และคุณค่าอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
รายการสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	8
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	8
1.4 วิธีดำเนินงานโดยสรุป.....	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 พารามิเตอร์ $K$ .....	9
2.2 การประยุกต์พารามิเตอร์ $K$ กับปัญหาความล่า.....	11
2.3 วิธีคำนวณความยาวรอยร้าว.....	13
2.4 วิธีคำนวณอัตราการเติบโตของรอยร้าว.....	14
2.5 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า.....	14
2.6 ชนิดของการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า.....	16
2.7 มาตรฐานการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า.....	18
บทที่ 3 แนวคิดและผลการออกแบบโปรแกรม.....	20
3.1 โครงสร้างของโปรแกรมและการทำงาน.....	20
3.2 การออกแบบโมดูล User interface.....	23
3.2.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	23
3.2.2 ผลการออกแบบ.....	25
3.3 การออกแบบโมดูล Conversion.....	32

	หน้า
3.3.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	32
3.3.2 ผลการออกแบบ.....	33
3.4 การออกแบบโมดูล Analysis .....	35
3.4.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	35
3.4.2 ผลการออกแบบ.....	35
3.5 การออกแบบโมดูล Sampling & Save.....	38
3.5.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	38
3.5.2 ผลการออกแบบ.....	38
3.6 การออกแบบโมดูล Test type .....	45
3.6.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	45
3.6.2 ผลการออกแบบ.....	46
3.7 การออกแบบโมดูล Load compensation.....	47
3.7.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	47
3.7.2 ผลการออกแบบ.....	47
3.8 การออกแบบโมดูล Waveform generation.....	49
3.8.1 ภาพรวมของการออกแบบ.....	49
3.8.2 ผลการออกแบบ.....	50
บทที่ 4 อุปกรณ์และการเตรียมการทดสอบ.....	51
4.1 ระบบทดสอบ.....	51
4.1.1 หลักการทำงาน.....	51
4.1.2 รายละเอียดของอุปกรณ์.....	51
4.2 การเตรียมการทดสอบ.....	56
4.2.1 การสอบเทียบคลิปเกจ.....	56
4.2.1.1 การสอบเทียบสถิติ.....	56
4.2.1.2 การสอบเทียบพลวัต.....	57
4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรม.....	59
4.2.2.1 การตรวจสอบเฟสของสัญญาณ.....	59
4.2.2.2 การตรวจสอบสัญญาณ ความถี่ต่าง ๆ .....	60
4.2.2.3 การตรวจสอบภา ะเยยร้าวต่าง ๆ.....	62
4.2.2.4 การตรวจสอบรูปร่างของคลื่นภาระ.....	63
4.2.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของความถี่ภาระ.....	66



	หน้า
บทที่ 5 สภาวะทดสอบและผลการทดสอบ .....	67
5.1 สภาวะทดสอบ.....	67
5.2 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแบบควบคุมภาระ.....	68
5.3 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแบบลด $\Delta K$ .....	75
5.4 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแบบควบคุม $\Delta K$ .....	81
5.5 ผลการทดสอบไซ้.....	82
บทที่ 6 อภิปรายผลการทดสอบ.....	84
6.1 ความถูกต้องของการควบคุมภาระ.....	84
6.1.1 การทดสอบแบบควบคุมภาระ.....	85
6.1.2 การทดสอบแบบลด $\Delta K$ .....	88
6.1.3 การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ .....	92
6.2 การเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ.....	93
6.2.1 การทดสอบแบบควบคุมภาระ และแบบลด $\Delta K$ .....	93
6.2.2 การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ .....	95
6.3 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวลำ.....	97
6.4 การประเมินผลการประยุกต์ใช้โปรแกรมกับงานทดสอบไซ้.....	105
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....	106
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	106
7.1.1 การออกแบบโปรแกรม และการตรวจสอบโปรแกรม.....	106
7.1.2 การประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับการทดสอบ อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ.....	107
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
7.3 งานวิจัยต่อเนื่อง.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก ก ภาพรวมของโปรแกรม.....	112
ภาคผนวก ข ซอร์สโค้ดของโปรแกรมน้อย.....	114
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ.....	168
ภาคผนวก ง การคำนวณจำนวนจุดการสุ่มสัญญาณ <i>CMOD</i> ของคลื่นรูปไซ้.....	191

	หน้า
ภาคผนวก จ ผลการสอบเทียบคลิปเกจ.....	193
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุตัวแปร (multiple linear regression)....	194
ภาคผนวก ช การคำนวณคอมพลายแอนซ์ด้วยวิธีถดถอยกำลังสองน้อยสุด.....	195
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการทดสอบโซ่.....	196
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	197



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าคงตัวแปลงหน่วยสำหรับสัญญาณ <i>Stroke</i> .....	33
3.2 ค่าคงตัวแปลงหน่วยสำหรับสัญญาณภาระ.....	34
5.1 สภาวะทดสอบแบบควบคุมภาระ.....	67
5.2 สภาวะทดสอบของการทดสอบแบบลด $\Delta K$ .....	67
6.1 $\Delta K$ เฉลี่ยและอัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ .....	95
ค.1 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่ $R$ เท่ากับ 0.1.....	168
ค.2 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่ $R$ เท่ากับ 0.3.....	170
ค.3 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่ $R$ เท่ากับ 0.5.....	173
ค.4 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่ $R$ เท่ากับ 0.7.....	174
ค.5 ผลการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R$ เท่ากับ 0.1 .....	176
ค.6 ผลการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R$ เท่ากับ 0.3.....	177
ค.7 ผลการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R$ เท่ากับ 0.5.....	179
ค.8 ผลการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R$ เท่ากับ 0.7.....	181
ค.9 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ กรณี $\Delta K$ เท่ากับ $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	182
ค.10 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ กรณี $\Delta K$ เท่ากับ $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	183
ค.11 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ กรณี $\Delta K$ เท่ากับ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	184
ค.12 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระด้วยโปรแกรม GLUON ที่ $R$ เท่ากับ 0.1.....	185
ค.13 ผลการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ด้วยโปรแกรม GLUON ที่ $R$ เท่ากับ 0.1.....	187
ค.14 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ด้วยโปรแกรม GLUON ที่ $R$ เท่ากับ 0.1 และ $\Delta K$ เท่ากับ $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	188
ค.15 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ด้วยโปรแกรม GLUON ที่ $R$ เท่ากับ 0.1 และ $\Delta K$ เท่ากับ $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	189
ค.16 ผลการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ด้วยโปรแกรม GLUON ที่ $R$ เท่ากับ 0.1 และ $\Delta K$ เท่ากับ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	190
จ.1 ผลการสอบเทียบคลิปเกจ.....	193
ซ.1 ข้อมูลการทดสอบโซ่.....	196

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบทดสอบของ L.R.Kaisand.....	3
1.2 โปรแกรมควบคุมการทดสอบของ L.R.Kaisand.....	3
1.3 ระบบทดสอบของ Saxena.....	4
1.4 ระบบทดสอบของ Patrick.....	5
1.5 โปรแกรมควบคุมการทดสอบของ Patrick.....	6
2.1 ความเค้นที่บริเวณใกล้กับปลายรอยร้าว.....	9
2.2 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว.....	10
2.3 ชั้นงานทดสอบแบบ CT.....	12
2.4 ความหมายของพารามิเตอร์ $\Delta K$ .....	12
2.5 การเชื่อมโยงความรุนแรงที่ปลายรอยร้าวจากชั้นงานทดสอบไปยังโครงสร้าง.....	12
2.6 ข้อมูลช่วงปลดภาระของภาระและ $CMOD$ .....	13
2.7 วิธีคำนวณคอมพลายแอนซ์.....	13
2.8 การเติบโตของรอยร้าว.....	14
2.9 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ.....	15
2.10 ภาระที่ใช้ในการทดสอบควบคุมภาระ.....	17
2.11 การทดสอบแบบลด $\Delta K$ ชนิดต่างๆ.....	17
2.12 การปรับลดภาระของการทดสอบแบบลด $\Delta K$ .....	17
2.13 รายละเอียดของรอยบากกล และรอยร้าวลำเริ่มต้น.....	18
2.14 รอยร้าวเบนออกจากแนวสมมาตร.....	19
3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรมทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ .....	21
3.2 โครงสร้างหลักของโปรแกรม.....	23
3.3 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	24
3.4 กลุ่มช่องสัญญาณ .....	26
3.5 พิสัยการวัดสัญญาณ.....	26
3.6 กลุ่มเริ่มการทดสอบ.....	26
3.7 สัญญาณภาระเริ่มต้น.....	26
3.8 กลุ่มรูปคลื่น.....	27
3.9 รูปคลื่น.....	27

รูปที่	หน้า
3.10 กลุ่มหยุดการทดสอบ.....	28
3.11 กลุ่มชดเชยค่าสัญญาณ.....	28
3.12 กลุ่มชิ้นงานทดสอบ.....	29
3.13 ช่องกรอกมิติของชิ้นงานทดสอบ.....	29
3.14 กลุ่มชนิดการทดสอบ.....	30
3.15 กลุ่มบันทึกข้อมูล.....	30
3.16 กลุ่มแสดงผลเป็นตัวเลข.....	31
3.17 กลุ่มแสดงผลในรูปภาพ.....	31
3.18 ผลการออกแบบโมดูล Conversion.....	32
3.19 โครงสร้างกรณีของซั้ววีไอ.....	36
3.20 ผลการออกแบบโมดูล Analysis.....	36
3.21 ผลการออกแบบโมดูล Sampling & Save .....	39
3.22 การจัดเรียงสัญญาณ.....	40
3.23 ขั้นตอนการทำงานของซั้ววีไอ File_detect_crack length.vi .....	42
3.24 ขั้นตอนการทำงานของซั้ววีไอ File_detect_No. cycle.vi .....	44
3.25 ผลการออกแบบโมดูล Test type .....	46
3.26 ผลการออกแบบโมดูล Load compensation.....	47
3.27 ผลต่างของสัญญาณภาระ.....	48
3.28 สัญญาณควบคุมปรับแก้.....	48
3.29 ผลการออกแบบโมดูล Waveform generation .....	49
3.30 การปรับลดภาระในระหว่างหยุดการทดสอบ.....	50
4.1 ระบบทดสอบ.....	52
4.2 ชุดดึงชิ้นงาน.....	52
4.3 คลิปเกจ.....	53
4.4 ชิ้นงานแบบ Compact tension (CT) .....	55
4.5 การประยุกต์ใช้ไดอัลเกจกับกล้องไมโครสโคปเพื่อวัดความยาวรอยร้าว.....	55
4.6 หลักการและลักษณะของผลการสอบเทียบคลิปเกจ.....	56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างคอมพลายแอนซ์กับความถี่ ของชิ้นงานที่มีความยาวรอยร้าวต่าง ๆ กัน.....	58
4.8 ฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจ.....	58

รูปที่	หน้า
4.9 เฟสของสัญญาณภาระ และ <i>CMOD</i> .....	59
4.10 เฟสของสัญญาณภาระ และ <i>CMOD</i> ที่ถูกจัดเรียงแล้ว.....	60
4.11 รูปคลื่นภาระความถี่ต่าง ๆ ก่อนชดเชยด้วยโมดูล Load compensation.....	61
4.12 รูปคลื่นภาระความถี่ 30 Hz ที่ชดเชยด้วยโมดูล Load compensation .....	61
4.13 ภาระสูงสุดและต่ำสุดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ก่อนชดเชยด้วยโมดูล Load compensation.....	62
4.14 ภาระสูงสุดและต่ำสุดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ หลังชดเชยด้วยโมดูล Load compensation.....	63
4.15 รูปร่างคลื่นไซน์จากการทดสอบชิ้นงานที่ความถี่ภาระ 1, 5 และ 10 เฮิรท์ซ.....	64
4.16 รูปร่างคลื่นสามเหลี่ยมจากการทดสอบชิ้นงานที่ความถี่ภาระ 1, 5 และ 10 เฮิรท์ซ..	64
4.17 รูปร่างคลื่นฟันเลื่อยจากการทดสอบชิ้นงานที่ความถี่ภาระ 1, 5 และ 10 เฮิรท์ซ....	65
4.18 รูปร่างคลื่นสี่เหลี่ยมจากการทดสอบชิ้นงานที่ความถี่ภาระ 1 และ 5 เฮิรท์ซ.....	65
4.19 ข้อมูลจำนวนรอบและเวลาของเครื่องที่ความถี่ต่าง ๆ.....	66
5.1 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.1$ .....	68
5.2 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.3$ .....	69
5.3 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.5$ .....	69
5.4 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.7$ .....	70
5.5 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.1$ .....	71
5.6 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.3$ .....	72
5.7 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.5$ .....	73
5.8 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่ $R = 0.7$ .....	74
5.9 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.1$ .....	75
5.10 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.3$ .....	75
5.11 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.5$ .....	76
5.12 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.7$ .....	76
5.13 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.1$ .....	77
5.14 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.3$ .....	78
5.15 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.5$ .....	79
5.16 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่ $R = 0.7$ .....	80
5.17 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K = 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	81

รูปที่	หน้า
5.18 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	81
5.19 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	82
5.20 การทดสอบความล้าของโซ่.....	82
5.21 การควบคุมภาวะของการทดสอบโซ่.....	83
6.1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.1.....	85
6.2 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.3.....	85
6.3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.5.....	86
6.4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.7.....	86
6.5 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาวะของการทดสอบแบบควบคุมภาวะที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาวะ.....	87
6.6 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ยของการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาวะ.....	88
6.7 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาวะของการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาวะ .....	89
6.8 ลักษณะของสัญญาณ $CMOD$ ที่ไม่สามารถจำแนก\ ความแตกต่างของระดับสัญญาณ.....	90
6.9 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะที่ $\Delta CMOD$ ต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.5.....	91
6.10 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะที่ $\Delta K$ ต่าง ๆ ที่ $R$ เท่ากับ 0.5 .....	91
6.11 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ยของการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาวะ.....	92
6.12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาวะของการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาวะ.....	93
6.13 การเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป และงานวิจัยอื่น ที่ $R$ เท่ากับ 0.1.....	94
6.14 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K$ เท่ากับ $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	96
6.15 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K$ เท่ากับ $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	96
6.16 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาวะต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ที่ $\Delta K$ เท่ากับ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .....	97
6.17 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนภาวะเท่ากับ 0.1.....	99

รูปที่	หน้า
6.18 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3.....	100
6.19 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5.....	101
6.20 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7.....	102
6.21 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	103
6.22 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ ในงานวิจัยของ R.G. Forman.....	104
6.23 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของภาระในการทดสอบความล้าของโซ่.....	105
ก.1 โครงสร้างโปรแกรมหลักส่วนการกำหนดค่า.....	112
ก.2 โครงสร้างโปรแกรมหลักส่วนการทดสอบ.....	113
ข.1 แผนภาพของซับริวิไอ WG_generation_ramp up.vi.....	114
ข.2 แผนภาพของซับริวิไอ WG_config_waveform_signal_output.vi .....	115
ข.3 แผนภาพของซับริวิไอ WG_compute Waveform.vi .....	117
ข.4 case structure กรณีสร้างสัญญาณภาระรูปไซน์.....	118
ข.5 case structure กรณีสร้างสัญญาณภาระรูปสี่เหลี่ยม.....	118
ข.6 case structure กรณีสร้างสัญญาณภาระรูปฟันเลื่อย.....	118
ข.7 case structure กรณีสร้างสัญญาณภาระรูปสามเหลี่ยม.....	118
ข.8 แผนภาพของซับริวิไอ Ana_Conversion_Stroke range.vi.....	120
ข.9 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย $\pm 2.5$ mm.....	120
ข.10 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย $\pm 5$ mm.....	120
ข.11 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย $\pm 12.5$ mm.....	120
ข.12 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย $\pm 25$ mm.....	120
ข.13 แผนภาพของซับริวิไอ WG_waveform_start.vi.....	121
ข.14 แผนภาพของซับริวิไอ WG_waveform_start.vi.....	121
ข.15 แผนภาพของซับริวิไอ WG_waveform_stop.vi.....	123
ข.16 แผนภาพของซับริวิไอ WG_Calculation_waveform_stop.vi.....	124
ข.17 แผนภาพของซับริวิไอ WG_ramp down.vi.....	125
ข.18 แผนภาพของซับริวิไอ WG_start config input.vi.....	127
ข.19 แผนภาพของซับริวิไอ Ana_calculation_compliance.vi.....	129
ข.20 case structure กรณีคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงาน <i>CT</i> .....	129
ข.21 case structure กรณีคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงาน <i>ESET</i> .....	129



รูปที่	หน้า
ข.22	แผนภาพของซับริโอ Ana_unloading waveform for <i>CMOD</i> .vi ..... 130
ข.23	case structure กรณีสัญญาณของตัวแปร start เป็นจริง..... 132
ข.24	case structure กรณีสัญญาณของตัวแปร start เป็นเท็จ..... 133
ข.25	case structure กรณีเลือกการทดสอบแบบควบคุมภาระ..... 133
ข.26	case structure กรณีเลือกซับริโอการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ..... 134
ข.27	case structure กรณีเลือกซับริโอการทดสอบแบบลด $\Delta K$ ..... 134
ข.28	แผนภาพของซับริโอ FCGRtest_Kdecreasing.vi..... 136
ข.29	case structure กรณีการคำนวณหาพิสัยภาระของชิ้นงาน <i>CT</i> ..... 137
ข.30	case structure กรณีการคำนวณหาพิสัยภาระของชิ้นงาน <i>ESET</i> ..... 137
ข.31	แผนภาพของซับริโอ Ana_conversion output load signal.vi..... 138
ข.32	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย $\pm 3$ ตัน..... 139
ข.33	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย $\pm 6$ ตัน..... 139
ข.34	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย $\pm 15$ ตัน..... 139
ข.35	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย $\pm 30$ ตัน..... 139
ข.36	แผนภาพของซับริโอคำนวณการปรับลดภาระ ของชนิดการทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$ ..... 141
ข.37	case structure ฟังก์ชันคำนวณพิสัยภาระสำหรับชิ้นงาน <i>CT</i> ..... 141
ข.38	case structure ฟังก์ชันคำนวณพิสัยภาระสำหรับชิ้นงาน <i>ESET</i> ..... 141
ข.39	แผนภาพการแปลงหน่วยจากแรงดันไฟฟ้าของโพลดเซลล์เป็นภาระทดสอบ..... 143
ข.40	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย $\pm 3$ ตัน..... 143
ข.41	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย $\pm 6$ ตัน..... 143
ข.42	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย $\pm 15$ ตัน..... 143
ข.43	case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย $\pm 30$ ตัน..... 143
ข.44	แผนภาพของซับริโอ Ana_conversion_CM0D signal input.vi..... 144
ข.45	แผนภาพของซับริโอ Ana_start E effective.vi ..... 145
ข.46	แผนภาพของซับริโอ Ana_calculation_SIF.vi..... 147
ข.47	case structure ของฟังก์ชันการคำนวณ $\Delta K$ สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ <i>CT</i> ..... 147
ข.48	case structure ของฟังก์ชันการคำนวณ $\Delta K$ สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ <i>ESET</i> ... 147
ข.49	แผนภาพของซับริโอ Com_compensateCM0D.vi ..... 148
ข.50	แผนภาพของซับริโอ Ana_Moving average crack length.vi ..... 149
ข.51	แผนภาพของซับริโอ File_detect_crack length.vi ..... 150
ข.52	แผนภาพของซับริโอ File_config file.vi..... 152

รูปที่	หน้า
ข.53 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_manager.vi.....	154
ข.54 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_conversion array to string.vi .....	155
ข.55 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_detect_No. cycle.vi .....	156
ข.56 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_close write file.vi .....	157
ข.57 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_sort signal.vi .....	158
ข.58 แผนภาพของซั๊บวีไอ Ana_cutoff.vi .....	159
ข.59 แผนภาพของซั๊บวีไอ Ana_calculation_Eeffective.vi .....	160
ข.60 แผนภาพของซั๊บวีไอ File_delay.vi .....	161
ข.61 แผนภาพของซั๊บวีไอ Ana_anti not a number.vi.....	162
ข.62 แผนภาพของซั๊บวีไอ Ana_start fatigue calculation.vi .....	163
ข.63 แผนภาพของซั๊บวีไอ Ana_start FCGRt.vi.....	164
ข.64 แผนภาพของซั๊บวีไอ Com_control load.vi .....	165
ข.65 แผนภาพของซั๊บวีไอ Com_adjust amplitude load.vi .....	166
ข.66 แผนภาพของซั๊บวีไอ Com_adjust mean load.vi .....	167
ง.1 ผลต่างระหว่างจุดของสัญญาณที่จุดต่ำสุดของรูปคลื่นไซน์.....	192

รายการสัญลักษณ์

$a$	ความยาวรอยร้าว
$a_0$	ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
$a_i$	ความยาวรอยร้าวของรอบการะปัจจุบัน
$a_{i-1}$	ความยาวรอยร้าวของรอบการะที่ผ่านมา
$a_{avg}$	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย
$k$	ค่าคงที่ของวัสดุ
$f$	ความถี่การะ
$m$	ค่าคงที่ของวัสดุ
$B$	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
$C$	คอมพลายแอนซ์
$C_1$	ค่าคงตัวของวัสดุ
$C'$	ค่าคงที่ควบคุมอัตราการปรับลดการะ
$C_{1Hz}$	คอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ 1 เฮิรท์
$C_{xHz}$	คอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ใด ๆ
$E$	ยังก์มอดูลัส
$E_{eff}$	ยังก์มอดูลัสประสิทธิผล
$F$	ฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจ
$K$	ตัวประกอบความเข้มของความเค้น
$K_{max}$	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสูงสุด
$K_{min}$	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นต่ำสุด
$P$	การะ
$P_{max}$	การะสูงสุด
$P_{min}$	การะต่ำสุด
$P_a$	แอมพลิจูดการะ
$P_m$	การะเฉลี่ย
$P_{meer}$	ผลต่างของการะเฉลี่ย
$P_{aeer}$	ผลต่างของแอมพลิจูดการะ
$P_{mset}$	การะเฉลี่ยที่กำหนด
$P_{aset}$	แอมพลิจูดการะที่กำหนด
$P_{mcon}$	การะเฉลี่ยปรับแก้

$Pacon$	แอมพลิจูดภาระปรับแก้
$R$	อัตราส่วนภาระ
$N$	จำนวนรอบภาระ
$M$	ค่าคงที่ของวัสดุ
$W$	ความกว้างของชิ้นงาน
$\sigma_{ij}$	องค์ประกอบความเค้น
$\theta$	เฟสของสัญญาณ
$\Delta K_0$	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นเริ่มต้น
$\Delta K$	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น
$\Delta K_{th}$	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม
$\Delta P$	พิสัยภาระ
$\Delta Samp$	ระยะห่างระหว่างจุดของการสุ่มสัญญาณ
$\sigma$	ความเค้น
$\alpha$	อัตราส่วนระหว่างความยาวรอยร้าวกับความกว้างของชิ้นงาน
$\sigma_y$	ความเค้นครากของวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ความเสียหายล้าเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโครงสร้างหลายชนิด เช่น เพลลา เฟือง และถังความดัน เป็นต้น [1,2,3] ความเสียหายเหล่านี้ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อชีวิตและทรัพย์สิน เช่น เหตุการณ์เครื่องบินชนสัมภาระตกในช่วงสงครามเวียดนาม [4] ซึ่งมีสาเหตุจากความเสียหายล้าของเพลลาส่งกำลัง ทำให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บเป็นจำนวนมาก เหตุการณ์นี้เป็นหนึ่งในหลายตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่าการศึกษาพฤติกรรมการล้าของวัสดุมีความสำคัญ

การออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายล้าของชิ้นส่วน แบ่งได้ 2 แนวทาง คือ 1) ออกแบบชิ้นส่วนโดยไม่ยอมให้มีรอยร้าวล้า (fatigue crack) เกิดขึ้น และ 2) ออกแบบชิ้นส่วนโดยยอมให้มีรอยร้าวล้าเกิดขึ้นได้แต่ยังมีขนาดไม่ใหญ่พอจนทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเสียหาย สำหรับแนวทางแรกจะถือว่าอายุใช้งาน (service life) ของชิ้นส่วนสิ้นสุดเมื่อตรวจพบรอยร้าว ขณะที่แนวทางที่สองจะถือว่า โครงสร้างยังสามารถใช้งานต่อไปได้หากรอยร้าวยังเติบโตไม่ถึงขนาดวิกฤติ การออกแบบด้วยแนวทางแรกนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต้องมีค่าน้อยกว่า ชีตจำกัดความทนทาน (endurance limit) ของวัสดุ ชิ้นส่วนที่ถูกออกแบบด้วยแนวทางนี้จะมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก แต่การออกแบบด้วยแนวทางที่สอง ยอมให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า ชีตจำกัดความทนทาน ชิ้นส่วนที่ถูกออกแบบด้วยแนวทางนี้จึงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่า ซึ่งเหมาะสำหรับโครงสร้างอากาศยาน แม้ว่าแนวทางที่สองจะมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางแรก แต่ก็ต้องพึงพาการตรวจหาและตรวจติดตามรอยร้าวในระหว่างการใช้งานชิ้นส่วนด้วย

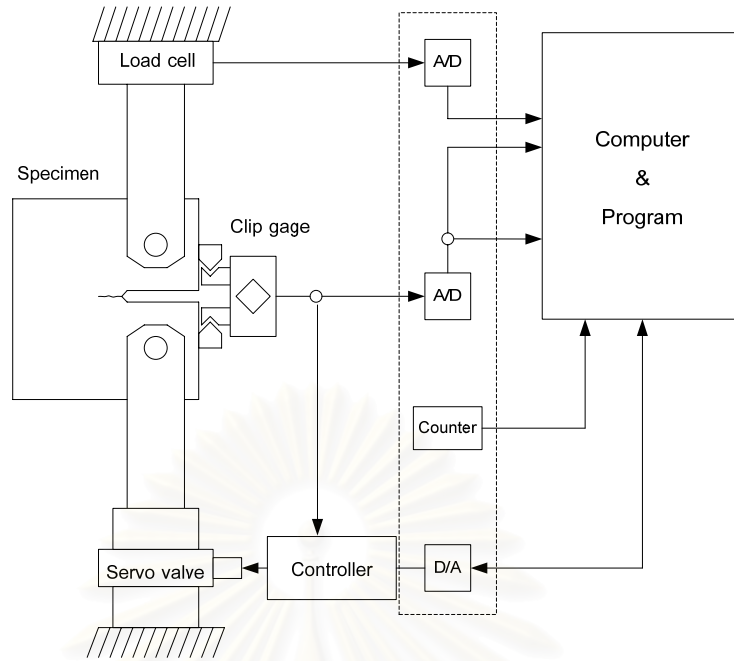
การออกแบบโดยแนวทางที่สองจำเป็นต้องทราบข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (fatigue crack propagation rate) ซึ่งหาได้จากการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (fatigue crack propagation rate test) [5] จากการศึกษางานวิจัยในอดีต [6,7,8] แสดงให้เห็นว่า อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าขึ้นอยู่กับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น หรือ  $\Delta K$  (stress intensity factor range) ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.8 โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล้าได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงใกล้ขีดเริ่ม (near threshold growth) ช่วงเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (stable growth) และช่วงเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (unstable growth) การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในช่วงใกล้ขีดเริ่มนิยมใช้การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ( $\Delta K$  decreasing test) ขณะที่การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในช่วงที่เหลือ นิยมใช้การทดสอบแบบเพิ่ม  $\Delta K$  ( $\Delta K$  increasing test)

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ( $\Delta K$  -controlled test) ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบที่ต้องการควบคุมสภาวะความรุนแรงที่บริเวณปลายรอยร้าว หรือใช้ในงานควบคุมขนาดของบริเวณครากที่ปลายรอยร้าว [9]

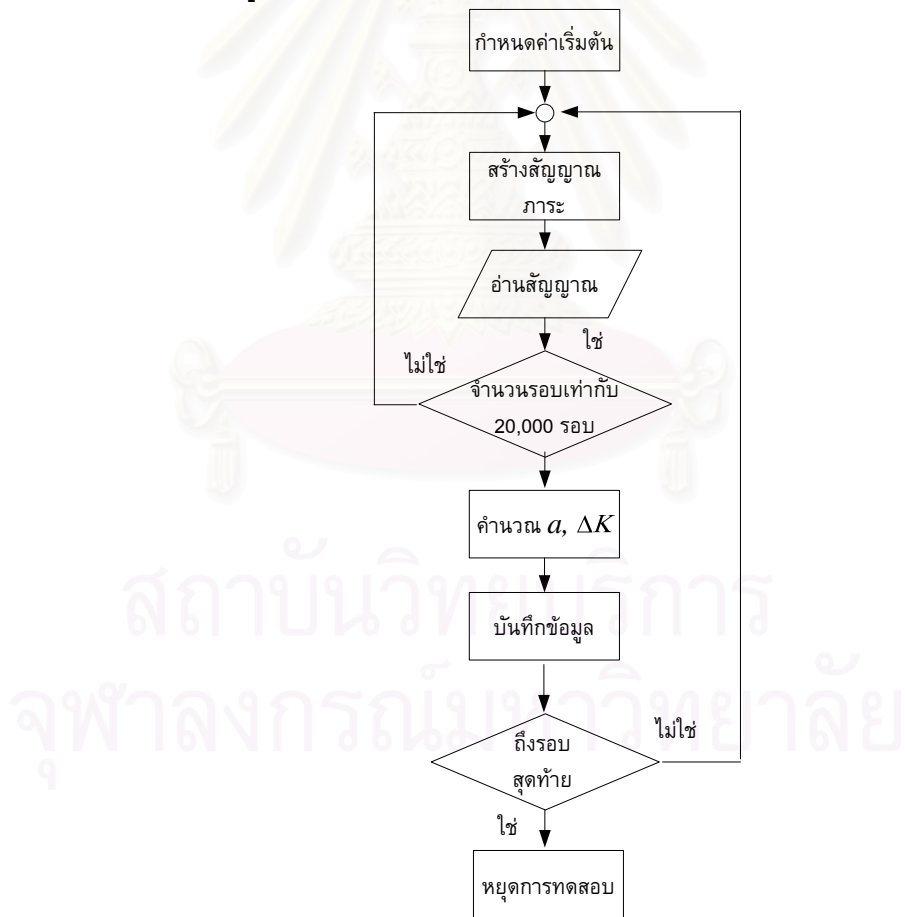
โดยทั่วไป การทดสอบแบบเพิ่ม  $\Delta K$  จะควบคุมพิสัยภาระและภาระเฉลี่ยให้คงที่ตลอดการทดสอบทำให้การทดสอบทำได้สะดวก เพราะผู้ทดสอบจะกำหนดสภาวะทดสอบ (ภาระ) ที่คอนโทรลเลอร์ตอนเริ่มต้นเพียงครั้งเดียว แต่ว่าการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ผู้ทดสอบจำเป็นต้องลดขนาดภาระอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เงื่อนไขนี้ทำให้การทดสอบยุ่งยาก และจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ

จากการสืบค้นของผู้วิจัยพบว่า การพัฒนาระบบทดสอบอัตโนมัติเริ่มขึ้นในราวปี ค.ศ. 1976 โดย L.R.Kaisand [10] ระบบนี้สร้างขึ้นสำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระ กระบวนการทำงานแสดงอยู่ในรูปที่ 1.1 จากรูปโปรแกรมควบคุมสร้างสัญญาณภาระส่งให้ D/A เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนาล็อกก่อนส่งไปยังคอนโทรลเลอร์ จากนั้นคอนโทรลเลอร์ส่งผ่านสัญญาณนี้ไปควบคุมการทำงานของเซอร์โววาล์วของเครื่องทดสอบเพื่อสร้างภาระให้ชิ้นงาน คลิปเกจที่ติดตั้งอยู่ที่ปากรอยร้าวทำหน้าที่วัดระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าว (crack mount opening displacement, *CMOD*) โหลดเซลล์ของเครื่องทดสอบทำหน้าที่ตรวจวัดภาระที่กระทำกับชิ้นงาน จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกส่งไปยัง A/D เพื่อแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วจึงถูกส่งกลับไปโปรแกรมควบคุม

การกระบวนการทำงานของโปรแกรมควบคุมซึ่งพัฒนาจากภาษา BASIC แสดงอยู่ในจากรูปที่ 1.2 ขั้นตอนแรกผู้ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นให้โปรแกรม โปรแกรมสร้างสัญญาณภาระแล้วส่งไปยังเครื่องทดสอบพร้อมกับอ่านสัญญาณภาระ และสัญญาณ *CMOD* ต่อจากนั้น โปรแกรมจะเข้าสู่เงื่อนไขตรวจสอบจำนวนรอบ ถ้าจำนวนรอบถึง 20,000 รอบแล้ว โปรแกรมจะคำนวณความยาวรอยร้าว และบันทึกข้อมูล จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่เงื่อนไขตรวจสอบจำนวนรอบภาระที่ต้องการยุติการทดสอบ ถ้าจำนวนรอบภาระถึงจำนวนรอบภาระที่ต้องการยุติการทดสอบ โปรแกรมสั่งให้เครื่องทดสอบหยุดทำงาน แต่ถ้าจำนวนรอบภาระยังไม่ถึงค่าที่กำหนด โปรแกรมจะคงดำเนินการทดสอบที่สภาวะเดิมต่อไป

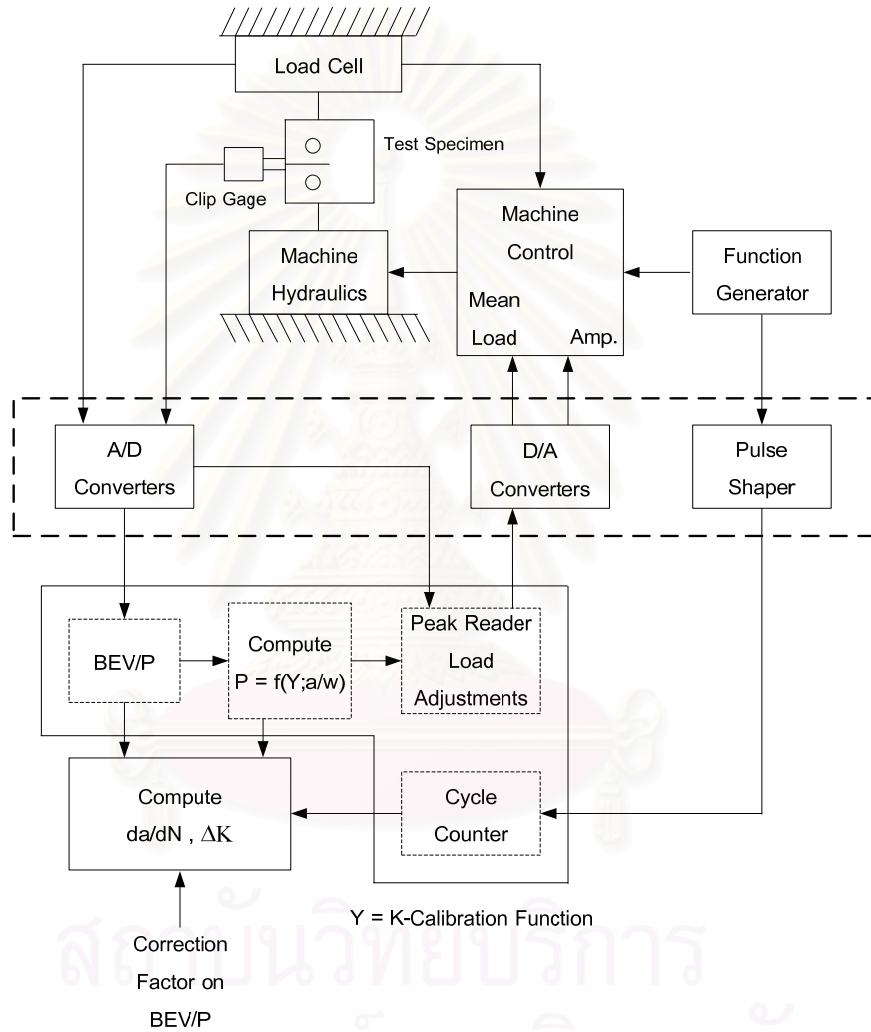


รูปที่ 1.1 ระบบทดสอบของ L.R.Kaisand [10]



รูปที่ 1.2 โปรแกรมควบคุมการทดสอบของ L.R.Kaisand [10]

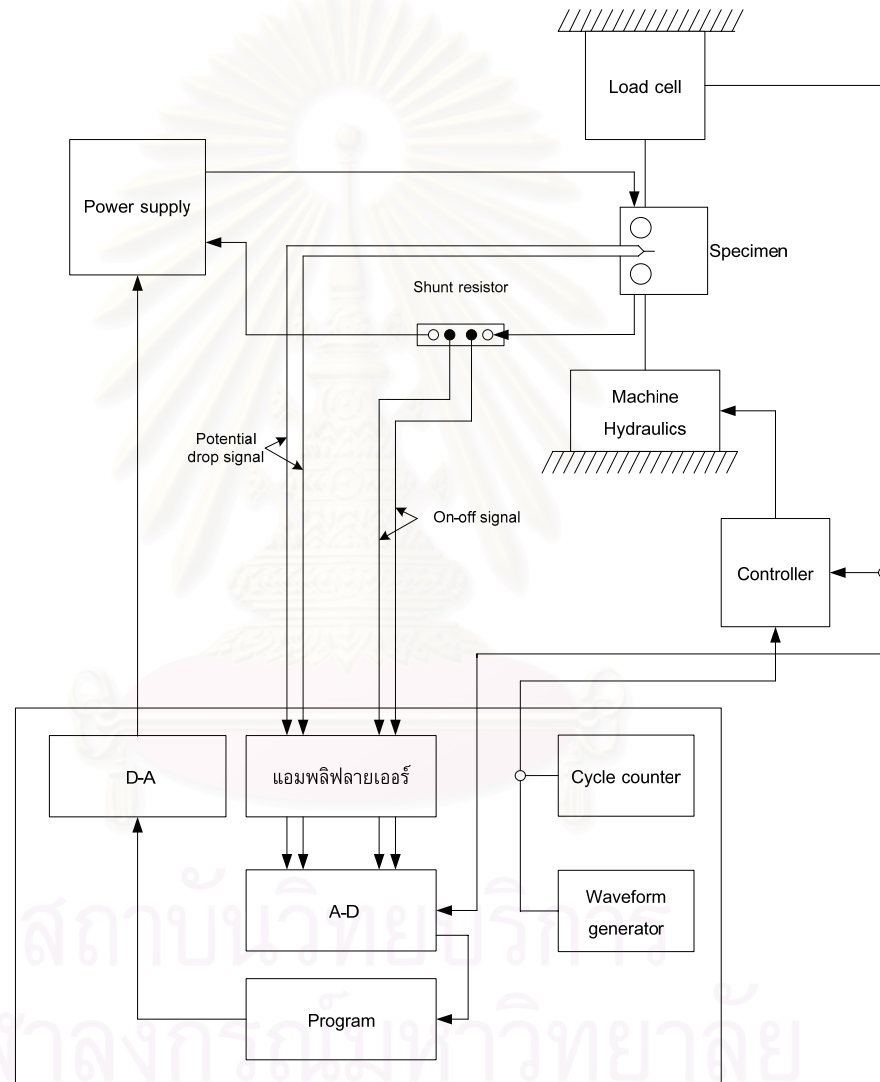
ต่อมาในปี 1978 Saxena [11] เสนอสมการสำหรับปรับลดภาระสำหรับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และนำสมการนี้ไปประยุกต์กับระบบทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในรูปที่ 1.3 จากรูปแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบทดสอบของ Saxena คล้ายคลึงกับระบบทดสอบของ L.R.Kaisand ต่างกันที่ระบบทดสอบของ Saxena เพิ่มอุปกรณ์ เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณภาระ (Function generation) เครื่องควบคุมรูปร่างสัญญาณ (Pulse Shaper) เป็นต้น เพื่อให้สามารถทำการทดสอบภายใต้ภาระรูปร่างต่าง ๆ ได้หลากหลาย



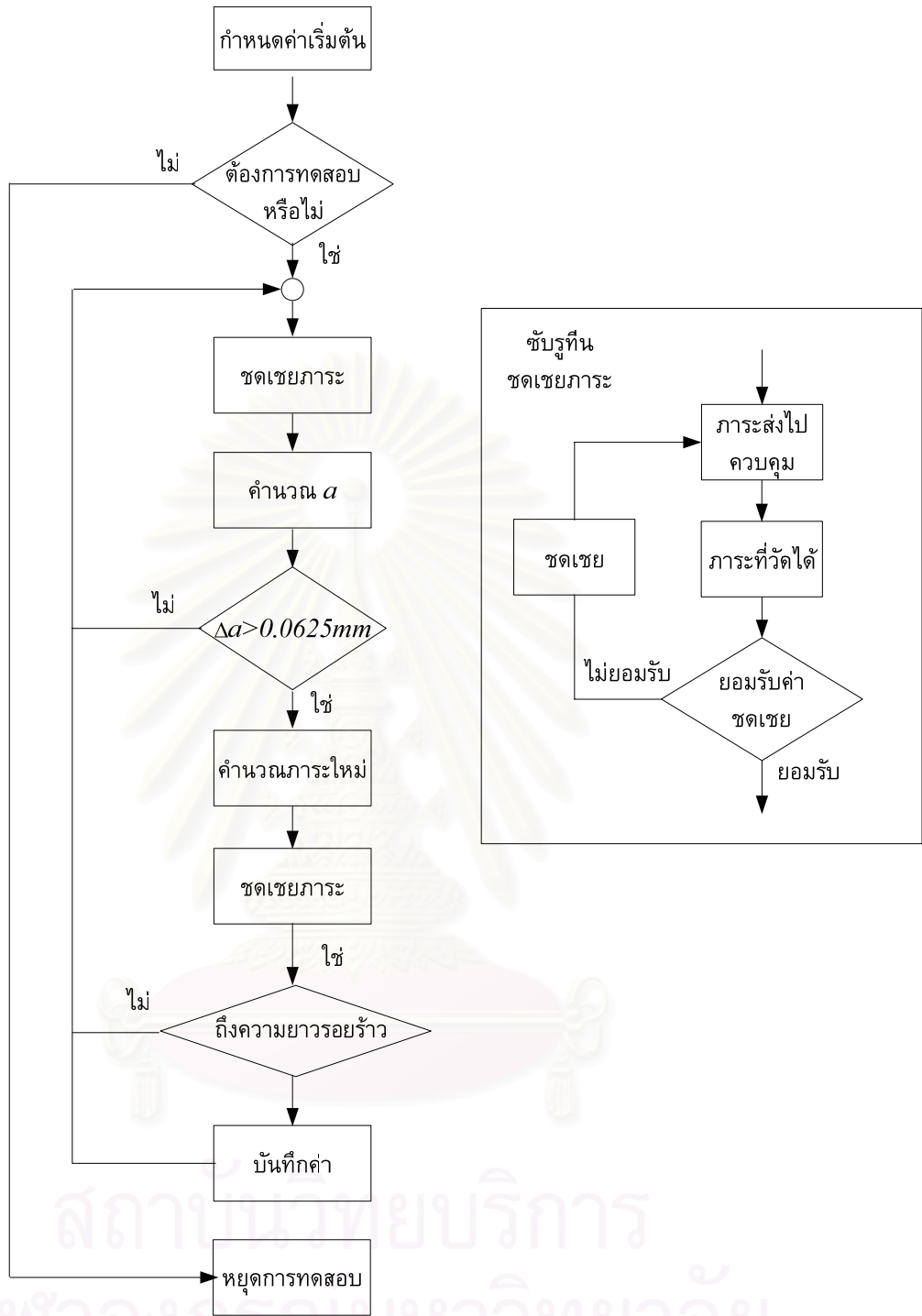
รูปที่ 1.3 ระบบทดสอบของ Saxena [11]



ต่อมาในปี 1985 Patrick [12] พัฒนาระบบทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 จากรูป ระบบทดสอบมีอุปกรณ์และกระบวนการทำงานคล้ายกับระบบของ L.R.Kaisand และ Saxena แต่ใช้วิธีการติดตามรอยร้าวด้วยความต่างศักย์ตกคร่อม (potential drop) ในส่วนของโปรแกรมควบคุม (รูปที่ 1.5) Patrick พัฒนาโปรแกรมทดสอบนี้จากภาษา BASIC การทำงานของโปรแกรมคล้ายกับโปรแกรมทดสอบของ L.R.Kaisand แต่ระบบนี้นำสมการของ Saxena มาคำนวณการปรับลดภาระในกรณีทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และการปรับลดภาระเกิดขึ้นทุก ๆ ครั้งที่รอยร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้น 0.0625 มม.



รูปที่ 1.4 ระบบทดสอบของ Patrick [12]



รูปที่ 1.5 โปรแกรมควบคุมการทดสอบของ Patrick [12]

จากเอกสารที่ผู้วิจัยสืบค้นได้ [10-12] การพัฒนาระบบทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และควบคุม  $\Delta K$  มีมากกว่า 30 ปีแล้ว ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน หลักการทำงานของระบบก็ยังคงเหมือนเดิม กล่าวคือ ระบบทดสอบต้องสามารถ 1) วัดความยาวรอยร้าวได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทดสอบ และ 2) คำนวณขนาดภาระค่าใหม่ที่ต้องการ แล้วส่งไปควบคุมเครื่องทดสอบ แต่สิ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องก็คือ ฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุม และคอมพิวเตอร์สำหรับเขียนโปรแกรม สำหรับวิธีติดตามรอยร้าวโดยการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมมีความยุ่งยากเพราะต้องป้องกันกระแสไฟฟ้าที่ป้อนขึ้น-งานร้าวสู่เครื่องทดสอบ ดังนั้นวิธีวัดคอมพลาเยนซ์จึงสะดวกกว่า นอกจากนี้ห้องปฏิบัติการก็มีเครื่องมือสำหรับวัดค่าดังกล่าวนี้และมีอุปกรณ์สอบเทียบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิธีติดตามรอยร้าวโดยการวัดคอมพลาเยนซ์

ในปัจจุบัน ผู้ทดสอบสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของบริษัทผู้ผลิตเครื่องทดสอบ เช่น Instron [13] MTS [14] เป็นต้นได้ โปรแกรมเหล่านี้มีขีดความสามารถและความเชื่อถือได้สูง แต่ก็มีราคาสูงและถูกออกแบบมาสำหรับเครื่องทดสอบของบริษัท จึงมีโอกาที่จะทำงานเข้ากับฮาร์ดแวร์ในระบบทดสอบที่มีอุปกรณ์ซึ่งสร้างขึ้นเองหรือการทดสอบชนิดพิเศษได้ไม่ติดก ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบขึ้นเองจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ผู้ใช้ต้องการทดสอบนอกเหนือจากสภาวะมาตรฐาน การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองยังช่วยลดค่าใช้จ่าย และสร้างความเข้าใจสำหรับการพัฒนาโปรแกรมอื่นต่อไป

หัวใจสำคัญของระบบทดสอบอัตโนมัติจะขึ้นอยู่กับโปรแกรมทดสอบ ซึ่งโปรแกรมนี้อาจพัฒนาขึ้นจากคอมไพเลอร์ได้หลายชนิด เช่น ภาษาปาสคาล [15] ภาษาวิซวลเบสิก [16] ซอฟต์แวร์แล็บวิว [17] เป็นต้น ในบรรดาคอมไพเลอร์ที่กล่าวไปนั้น ซอฟต์แวร์แล็บวิวเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะเป็นคอมไพเลอร์ขั้นสูงที่ลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษารูปภาพ (Graphic base language) แทนภาษาตัวอักษร (Text based language) ซึ่งคล้ายกับกระบวนการทางลำดับความคิด (Flow Chart) ทำให้เข้าใจง่าย และพัฒนาต่อได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบสำเร็จรูปสำหรับวัดค่าสัญญาณ ส่งค่าสัญญาณ (หรือควบคุม) และประมวลผลสัญญาณที่ครบถ้วน ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้ซอฟต์แวร์แล็บวิวถูกนำไปใช้ในการพัฒนาระบบทดสอบหลายระบบ เช่น การทดสอบหาอัตราความเร็วของก๊าซ [18] การทดสอบหาค่า Ph ในกระบวนการผลิตยารักษาโรค [19] การทดสอบการสั่นสะเทือนในชิ้นส่วนโครงสร้างของยานอวกาศ [20] และการทดสอบความล้าเชิงกลภายใต้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (thermal mechanical fatigue test facility, TMF) [24] เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาโปรแกรมทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิวโดยโปรแกรมสามารถทดสอบอัตราการเติบโตรอยร้าวล้าชนิดต่างๆ ได้แก่ การทดสอบแบบควบคุมภาระ การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ได้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยให้การทดสอบและการศึกษาพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล้าสะดวกขึ้น

และสามารถใช้เป็นพื้นฐานการพัฒนาโปรแกรมอื่น ๆ ด้านการทดสอบวัสดุโดยไม่ต้องใช้โปรแกรมการทดสอบของต่างประเทศ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาโปรแกรมควบคุมเครื่องทดสอบสากล (universal testing machine) เพื่อใช้ทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว
2. ประเมินความสามารถของโปรแกรมในการควบคุมการทดสอบแบบควบคุมภาระ แบบลด  $\Delta K$  และแบบควบคุม  $\Delta K$

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

พัฒนาโปรแกรมและตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนา กับผลการทดสอบบางส่วนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอื่นที่ทำงานภายใต้โปรแกรมสำเร็จรูป การทดสอบทั้งหมดทำที่อุณหภูมิต่ำ ห้อง สภาพแวดล้อมไม่กักกรอง และใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT (compact tension specimen)

### 1.4 วิธีดำเนินงานโดยสรุป

1. ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิว และทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก และวิธีคำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์
2. ศึกษาทฤษฎีในอิตเกี่ยวกับทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว
3. ออกแบบโปรแกรมจากซอฟต์แวร์แล็บวิว และออกแบบหน้าต่างส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (user interface)
4. เขียนโปรแกรมส่วนประยุกต์ใช้งาน (application) ด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิว
5. ทดสอบโปรแกรมกับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวในสภาวะทดสอบต่างๆ และหา  $\Delta K_{th}$

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรมสำเร็จรูปได้
2. ช่วยลดความยุ่งยากในการศึกษาพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวทำได้สะดวก
3. สามารถนำความเข้าใจและองค์ความรู้ที่ได้ไปเขียนโปรแกรมสำหรับการทดสอบชนิดอื่น เช่น การทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก  $K_{Ic}$  หรือ  $J_{Ic}$  เป็นต้น ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

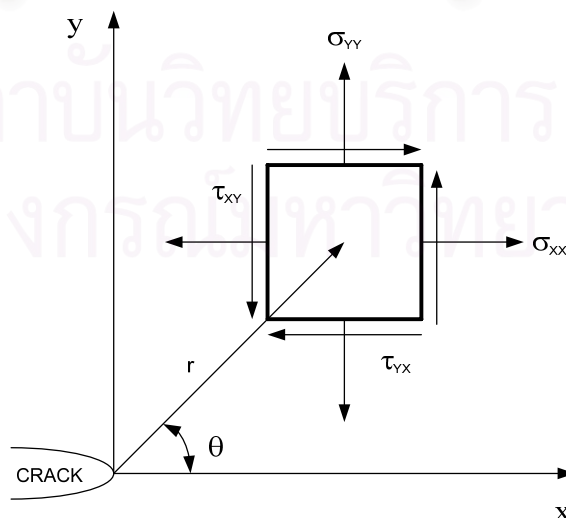
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 2.1 กล่าวถึงที่มาของพารามิเตอร์  $K$  หัวข้อที่ 2.2 กล่าวถึงการประยุกต์พารามิเตอร์  $K$  กับปัญหาความล้า หัวข้อที่ 2.3 กล่าวถึงวิธีคำนวณความยาวรอยร้าว หัวข้อที่ 2.4 กล่าวถึงวิธีคำนวณอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 2.5 กล่าวถึงวิธีสร้างกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 2.6 กล่าวถึงชนิดของการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 2.7 กล่าวถึงมาตรฐานการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ

#### 2.1 พารามิเตอร์ $K$

พารามิเตอร์  $K$  คือ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกระดับความรุนแรงบริเวณปลายรอยร้าวที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในวัตถุ พารามิเตอร์นี้มาจากการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในวัตถุที่มีรอยร้าวดังแสดงในรูปที่ 2.1 ภายใต้เงื่อนไขการเสีรูปของวัตถุที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanic, LEFM) สำหรับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันความเค้นของ Airy สามารถเขียนสมการองค์ประกอบความเค้นในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

โดยที่  $k$  และ  $f_{ij}(\theta)$  จะขึ้นอยู่กับโหมดการเสีรูป โหมดการเสีรูป คือ ทิศการเคลื่อนที่ของผิวรอยร้าว (crack surface) เทียบกับขอบหน้ารอยร้าว (crack front) ด้วยนิยามนี้สามารถจำแนกโหมดการเสีรูปได้ 3 โหมด (รูปที่ 2.2) คือ



รูปที่ 2.1 ความเค้นที่บริเวณใกล้กับปลายรอยร้าว

## 1) โหมดเปิด

โหมดเปิด (opening mode) หรือโหมดที่ I ในโหมดนี้ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว

## 2) โหมดเฉือนบนระนาบ

โหมดเฉือนบนระนาบ (in-plane shear mode) หรือโหมดที่ II ในโหมดนี้ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าว

## 3) โหมดเฉือนนอกระนาบ

โหมดเฉือนนอกระนาบ (out-of-plane shear mode) หรือโหมดที่ III ในโหมดนี้ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศขนานกับขอบหน้ารอยร้าว

สำหรับผลเฉลยของค้ำประกอบความเค้นในวัตถุขนาดไม่จำกัด ของการเสียรูปทั้ง 3 โหมดสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{A}{\sqrt{r}} f_{ij}^I(\theta) \quad (2.2ก)$$

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{B}{\sqrt{r}} f_{ij}^{II}(\theta) \quad (2.2ข)$$

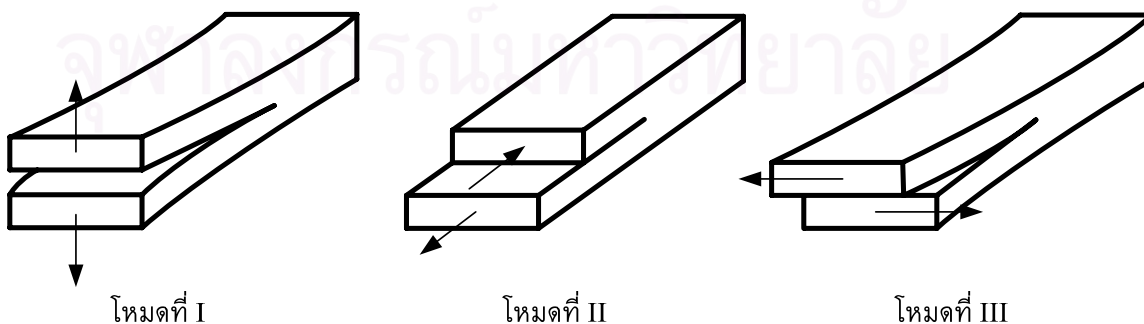
$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{C}{2\sqrt{r}} f_{ij}^{III}(\theta) \quad (2.2ค)$$

จากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาที่มุม  $\theta$  เท่ากับศูนย์องศา สามารถนิยามค่าคงที่ A, B และ C จากสมการที่ 2.2 ให้อยู่ในรูปของ  $K_I, K_{II}, K_{III}$  ได้ดังนี้

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0^\circ)) \quad (2.3ก)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, 0^\circ)) \quad (2.3ข)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{yz}(r, 0^\circ)) \quad (2.3ค)$$



รูปที่ 2.2 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว

สำหรับผลเฉลยพารามิเตอร์  $K$  ในสมการที่ (2.3) เป็นกรณีวัดขนาดไม่จำกัด หรือวัดที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของรอยร้าว สำหรับผลเฉลยพารามิเตอร์  $K$  ในวัดขนาดจำกัด นิยมเขียนให้อยู่ในรูปผลคูณระหว่างผลเฉลยพารามิเตอร์  $K$  ในวัดขนาดไม่จำกัด กับตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor,  $f(\alpha)$ ) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f(\alpha) \quad (2.4)$$

ในเชิงการทดสอบนิยมเขียนผลเฉลยพารามิเตอร์  $K$  ในรูปของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบดังนี้

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(\alpha) \quad (2.5)$$

สำหรับผลเฉลยของพารามิเตอร์  $K$  ในชิ้นงาน  $CT$  (compact tension specimen) รูปที่ 2.3 จะเขียนได้ดังนี้

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \left( \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \right) (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.6)$$

## 2.2 การประยุกต์พารามิเตอร์ $K$ กับปัญหาความล้า

ใน ค.ศ 1960.Paris [5] แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์  $K$  สามารถนำไปประยุกต์กับปัญหาการเติบโตของรอยร้าวล้าได้ เขากล่าวว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวจะขึ้นกับพารามิเตอร์  $\Delta K$  ซึ่งก็คือผลต่างของค่าสูงสุดของ  $K$  กับค่าต่ำสุดของ  $K$  ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.7) นอกจากนี้ อัตราส่วนภาระสามารถเขียนในรูปของพารามิเตอร์  $K$  ดังสมการที่ (2.8)

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.7)$$

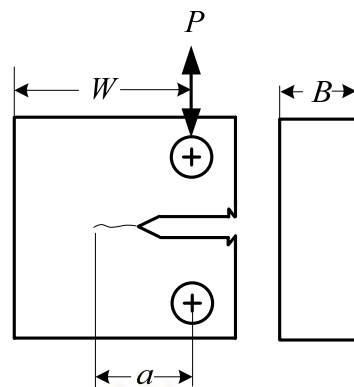
$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.5) มาแทนในสมการที่ (2.7) จะได้สมการที่อยู่รูปของพิสัยภาระได้ ดังนี้

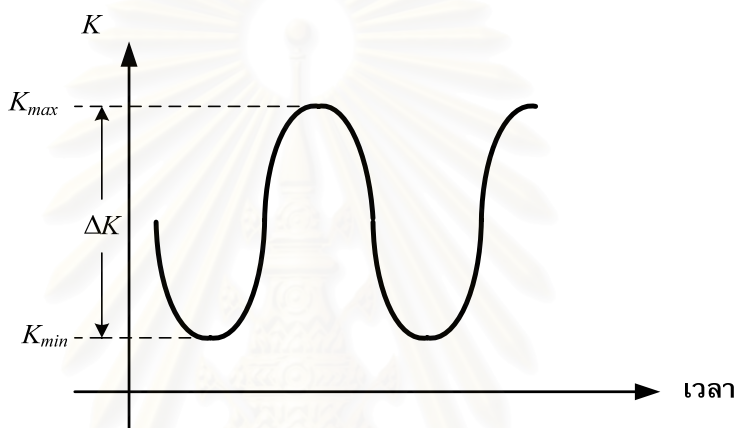
$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.9)$$

มาตรฐาน [21] แนะนำสมการที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์  $\Delta K$  สำหรับชิ้นงาน  $CT$  ดังนี้

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \left( \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \right) (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.3 ชิ้นงานทดสอบแบบ CT



รูปที่ 2.4 ความหมายของพารามิเตอร์  $\Delta K$

เนื่องจากพารามิเตอร์  $\Delta K$  เป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่ ดังนั้นพารามิเตอร์ตัวนี้จะเชื่อมโยงพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่มีขนาด รูปร่าง ชนิดรอยร้าว และรับภาระต่างกัน (รูปที่ 2.5) กล่าวคือ ถ้าพารามิเตอร์  $\Delta K$  ของวัตถุทั้งสองมีค่าเท่ากัน และสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว (ความเค้นระนาบหรือความเค้นเฉือนระนาบ) เหมือนกัน แล้วอัตราการเติบโตของรอยร้าวในวัตถุทั้งสองจะเท่ากัน



รูปที่ 2.5 การเชื่อมโยงความรุนแรงที่ปลายรอยร้าวจากชิ้นงานทดสอบไปยังโครงสร้าง



### 2.3 วิธีคำนวณความยาวรอยร้าว

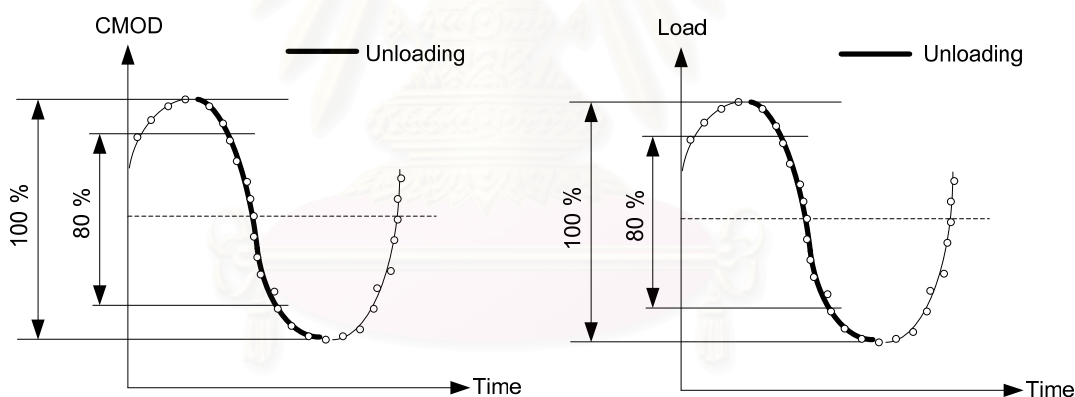
การคำนวณความยาวรอยร้าวจากการวิเคราะห์คอมพลายแอนซ์ (compliance,  $C$ ) นิยมใช้ข้อมูลช่วงปลดภาระของ  $CMOD$  ที่วัดด้วยคลิปเกจ [22] และภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่วัดด้วยโหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แล้วคำนวณคอมพลายแอนซ์จากความสัมพันธ์ของภาระและ  $CMOD$  (รูปที่ 2.7) ด้วยวิธีถดถอยกำลังสองน้อยสุด (รายละเอียดของวิธีการนี้อยู่ในภาคผนวก ข) จากนั้นแทนค่าคอมพลายแอนซ์  $C$  ลงในสมการคำนวณความยาวรอยร้าว  $a$  สำหรับชิ้นงานทดสอบ  $CT$  มาตรฐาน ASTM E647 แนะนำสมการต่อไปนี้

$$\frac{a}{W} = 1.00 - 4.500U + 13.157U^2 - 172.551U^3 + 879.944U^4 - 1514.671U^5 \quad (2.11ก)$$

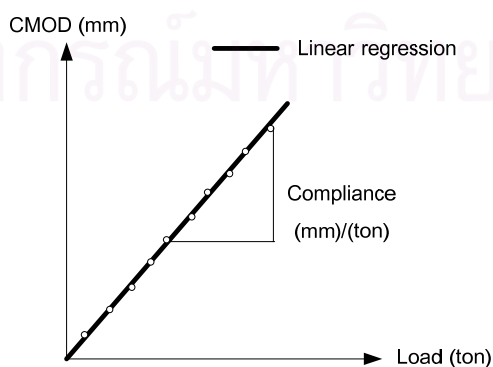
และ

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{E_{eff} BC}} \quad (2.11ข)$$

สำหรับ  $E_{eff}$  จะใช้ข้อมูลภาระ และ  $CMOD$  ช่วงเริ่มตั้งชิ้นงานด้วยอัตราภาระ (loading rate) คงที่ และความยาวรอยร้าวเริ่มต้น  $a_0$  จากนั้นคำนวณคอมพลายแอนซ์ แล้วแทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้ค่า  $E_{eff}$



รูปที่ 2.6 ข้อมูลช่วงปลดภาระของ  $CMOD$  และภาระ



รูปที่ 2.7 วิธีคำนวณคอมพลายแอนซ์

สมการที่ (2.12)

$$E_{eff} = \frac{19.75}{BC \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^2} \left( 0.5 + 0.192 \frac{a_0}{W} + 1.385 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 - 2.919 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 + 1.824 \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right) \quad (2.12)$$

## 2.4 วิธีคำนวณอัตราการเติบโตของรอยร้าว

เนื่องจากข้อมูลความยาวรอยร้าวที่จะนำมาสร้างเส้นโค้งอัตราการเติบโตของรอยร้าว  $da/dN$  (รูปที่ 2.8) เป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) [23] จึงต้องประมาณค่าอนุพันธ์ดังกล่าวด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{da}{dN} \approx \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_{j+1} - a_j}{N_{j+1} - N_j} \quad (2.13)$$

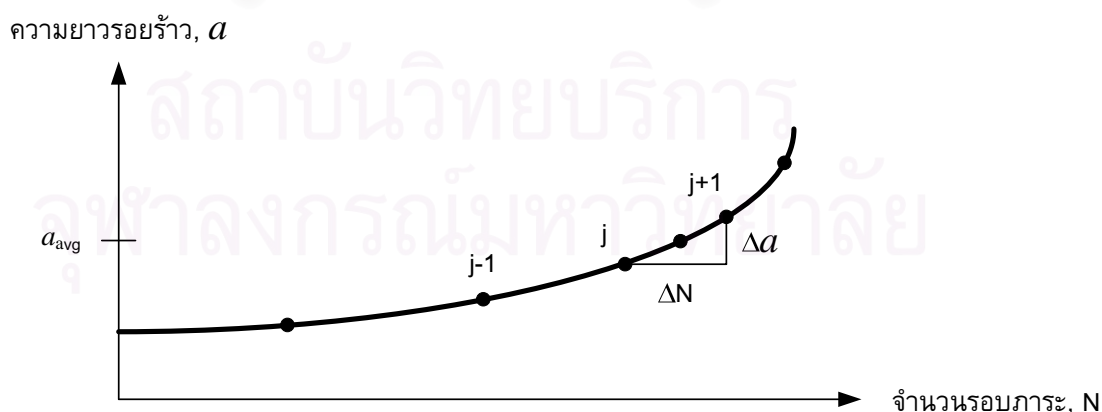
โดยที่ตัวห้อย  $j$  คือ ลำดับของจุดข้อมูล

จากนั้นคำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ยด้วยสมการที่ (2.14) แล้วนำความยาวรอยร้าวนี้แทนค่าลงในสมการที่ (2.10) เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์  $\Delta K$

$$a_{avg} = \frac{a_{j+1} + a_j}{2} \quad (2.14)$$

## 2.5 กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าว

กราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าว คือ การพล็อต  $da/dN$  กับพารามิเตอร์  $\Delta K$  ส่วนใหญ่นิยมพล็อตในสเกลล็อก-ล็อก [24] เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.9 พบว่าเส้นโค้งถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงอย่างชัดเจน โดยแต่ละช่วงมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.8 การเติบโตของรอยร้าว

## 1) ช่วงที่ 1: บริเวณใกล้ขีดเริ่ม

การเติบโตของรอยร้าวในบริเวณนี้มีค่าต่ำกว่า  $10^{-6}$  mm/cycle (รูปที่ 2.9 (ช่วงที่ 1)) ในช่วงนี้จะมีพารามิเตอร์พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม (threshold stress intensity factor range,  $\Delta K_{th}$ ) เป็นพารามิเตอร์สำคัญ โดยนิยามว่า ถ้าพารามิเตอร์  $\Delta K$  มีค่าน้อยกว่า  $\Delta K_{th}$  แล้วรอยร้าวจะไม่เติบโต พารามิเตอร์  $\Delta K_{th}$  จะไม่ขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ แต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับจุลภาค อัตราส่วนภาระ และสภาพแวดล้อม

## 2) ช่วงที่ 2 : บริเวณเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ

บริเวณนี้ Paris เสนอสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว (ในรูปที่ 2.9 (ช่วงที่ 2)) ต่อไปนี้

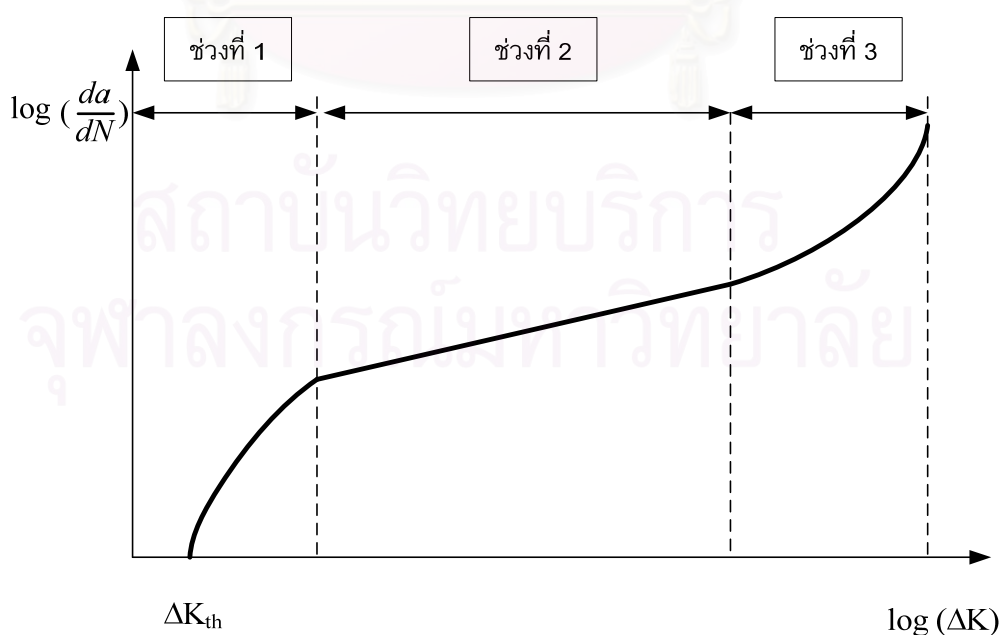
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.15)$$

เนื่องจากสมการของ Paris ไม่ครอบคลุมผลของอัตราส่วนภาระต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าว ทำให้ Walker [26] เสนอสมการต่อไปนี้

$$\frac{da}{dN} = \left[ \frac{C_1}{(1-R)^k} \right] \Delta K^m \quad \text{สำหรับ } R > 0 \quad (2.16)$$

## 3) ช่วงที่ 3: บริเวณเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ

ในบริเวณนี้ รอยร้าวจะเติบโตอย่างรวดเร็วจนชิ้นส่วนได้รับความเสียหายในที่สุด พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวในบริเวณนี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับจุลภาค และอัตราส่วนภาระอย่างมาก



รูปที่ 2.9 อัตราการเติบโตของรอยร้าว

## 2.6 ชนิดของการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่นิยมทดสอบมี 3 ชนิด คือ 1) การทดสอบแบบควบคุมภาระ 2) การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และ 3) การทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$

### 1) การทดสอบแบบควบคุมภาระ

การทดสอบแบบควบคุมภาระนิยมใช้หาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในช่วงที่ 2 และ ช่วงที่ 3 (รูปที่ 2.9) การทดสอบนี้จะควบคุมให้แอมพลิจูดภาระและภาระเฉลี่ยคงที่ (constant force amplitude test) [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.10

### 2) การทดสอบแบบลด $\Delta K$

การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ใช้สำหรับหาข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในช่วงที่ 1 และ ค่า  $\Delta K_{th}$  (รูปที่ 2.9) วิธีทดสอบที่นิยมใช้มี 3 แบบ [21] คือ 1) การลดขนาด  $\Delta K$  โดยให้อัตราส่วนภาระคงที่ 2) การลดขนาด  $\Delta K$  โดยให้ภาระต่ำสุด  $P_{min}$  คงที่ และ 3) การลดขนาด  $\Delta K$  โดยให้ภาระสูงสุด  $P_{max}$  คงที่ วิธีปรับลดภาระทั้ง 3 แบบแสดงอยู่ในรูปที่ 2.11 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ชนิดควบคุมอัตราส่วนภาระให้คงที่ (รูปที่ 2.11(ก)) เริ่มต้นคำนวณพารามิเตอร์  $\Delta K$  โดยการแทนค่าความยาวรอยร้าวขณะนั้น  $a$  ลงในสมการที่ (2.17) จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์  $\Delta K$  ลงในสมการที่ (2.18) เพื่อหาพิสัยภาระ  $\Delta P$  (สมการที่ (2.18) ใช้กับชิ้นงาน  $CT$ ) แล้วคำนวณภาระสูงสุด และภาระต่ำสุด จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ การปรับลดภาระครั้งต่อไปจะเริ่มขึ้นเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นถึงค่าที่กำหนด ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.12

$$\Delta K = \Delta K_0 \exp[C'(a - a_0)] \quad (2.17)$$

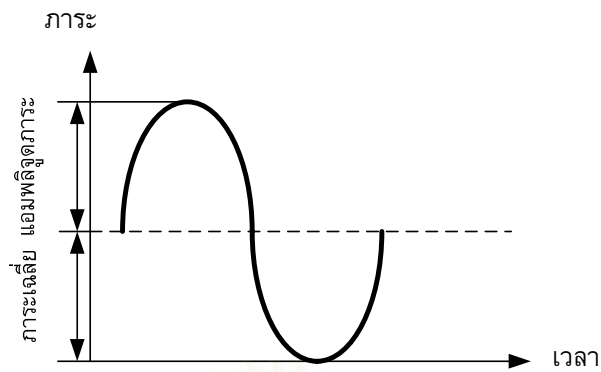
$$\Delta P = \frac{\Delta KB\sqrt{W}}{\left(\frac{2+(\alpha)}{1-(\alpha)^{1.5}}\right)(0.086 + 4.64\alpha - 13.32(\alpha)^2 + 14.72(\alpha)^3 - 5.6(\alpha)^4)} \quad (2.18)$$

$$P_{min} = \frac{R\Delta P}{1-R} \quad (2.19)$$

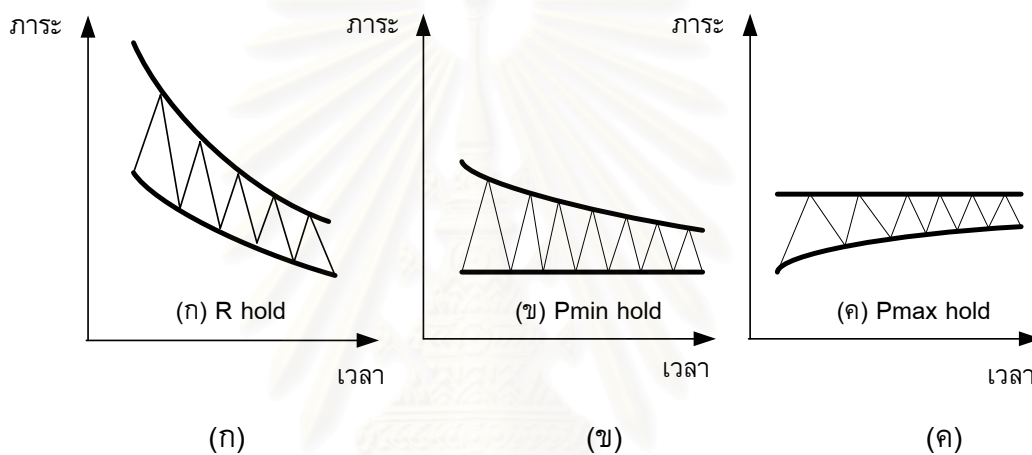
$$P_{max} = \frac{R\Delta P}{R-R^2} \quad (2.20)$$

### 3) การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$

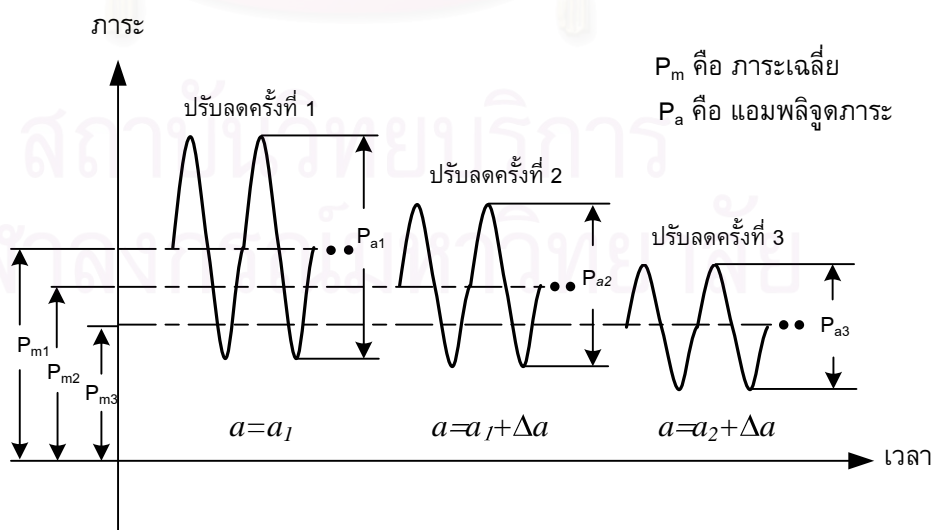
การปรับลดภาระของการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ใช้วิธีการเดียวกันกับการปรับลดภาระของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  แต่กำหนดให้  $C'$  มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.10 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบควบคุมภาวะ



รูปที่ 2.11 การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ชนิดต่างๆ (ก) R คงที่  
(ข) ภาวะต่ำสุดคงที่ (ค) ภาวะสูงสุดคงที่



รูปที่ 2.12 การปรับลดภาวะของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$

## 2.7 มาตรฐานการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้านี้ได้ใช้มาตรฐาน ASTM 647 [21] เป็นแนวทางการทดสอบ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT และทดสอบที่อุณหภูมิห้องในสภาพแวดล้อมไม่กัดกร่อน มาตรฐานการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ การสร้างรอยร้าวล้าเริ่มต้น และข้อกำหนดในการทดสอบ

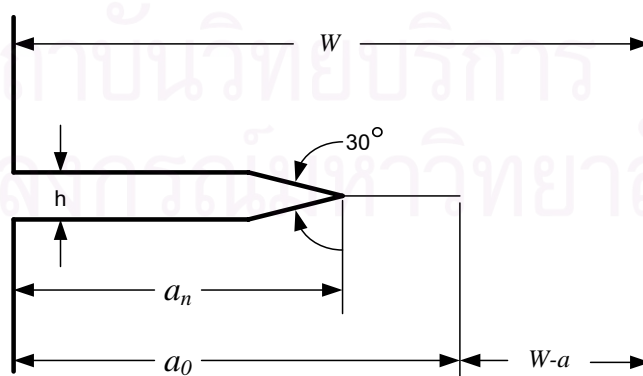
### 1) การเตรียมชิ้นงานทดสอบและการสร้างรอยร้าวล้าเริ่มต้น

สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแบบ CT มีข้อแนะนำดังนี้

- ความหนา  $B$  ควรอยู่ในช่วง  $\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4}$
- ความยาวของรอยบากกล  $a_n$  ต้องมีขนาดไม่ต่ำกว่า  $0.2W$
- ความกว้างของรอยบากกล  $h$  ต้องไม่เกิน  $\frac{W}{6}$
- การสร้างรอยร้าวล้าเริ่มต้น  $a_0$  ต้องมีความยาวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า  $h$  หรือ 1 มม.
- ความยาวของเนื้อวัสดุบริเวณที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าว (uncrack ligament)  $W - a$  (รูปที่ 2.13) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับเงื่อนไขที่กำหนดให้ต่อไปนี้

$$W - a \geq \left( \frac{4}{\pi} \right) \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.21)$$

- เพื่อลดระยะเวลาการสร้างรอยร้าวล้าเริ่มต้น มาตรฐานยอมให้ใช้ขนาดภาระสูง ๆ ตอนเริ่มต้น แต่การลดขนาดของภาระลงก่อนถึงการทดสอบจริงไม่ควรเกินคร่าวละ 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ไม่ให้อรอยร้าวหยุดเติบโต



รูปที่ 2.13 รายละเอียดของรอยบากกล และรอยร้าวล้าเริ่มต้น

## 2) ข้อกำหนดในการทดสอบ

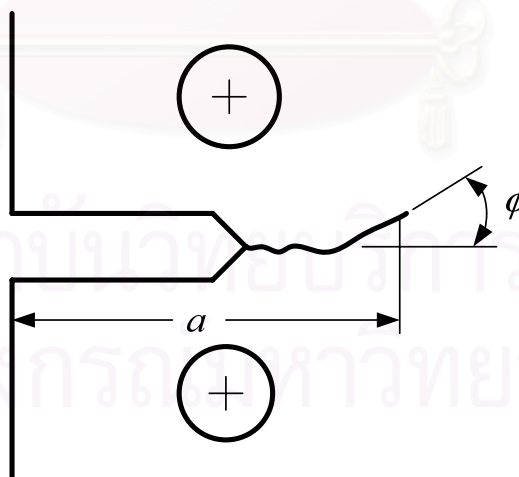
- ค่า  $K_{max}$  สุดท้ายในการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าจะต้องไม่เกินค่า  $K_{max}$  เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าว
- ความยาวรอยร้าวที่ผิวชิ้นงานทั้งสองผิวต้องแตกต่างกันไม่เกิน  $0.25B$  มิฉะนั้นจะถือว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไม่สมเหตุสมผล (invalid)
- ในระหว่างการทดสอบ สามารถหยุดการกระทำกับชิ้นงานทดสอบได้แต่ต้องเริ่มภาระใหม่อีกครั้งในช่วงเวลาไม่เกิน 10 นาที
- ถ้าเส้นทางการเติบโตของรอยร้าวเบี่ยงเบนออกจากแนวสมมาตร  $\phi$  มากกว่า 20 องศา (รูปที่ 2.14) เป็นระยะทางเกิน  $0.1W$  แล้วข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้ถือว่าเป็นข้อมูลที่ไม่สมเหตุสมผล
- ช่วงการวัดความยาวรอยร้าวตามที่มาตรฐานแนะนำไว้มีดังนี้

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

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

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

และมาตรฐานยังกำหนดว่า ความยาวรอยร้าวที่วัดได้จะต้องไม่ต่ำกว่า 0.25 มม. หรือ 10 เท่า ของความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.14 รอยร้าวเบนออกจากแนวสมมาตร

### บทที่ 3

#### แนวคิดและผลการออกแบบโปรแกรม

ในบทนี้กล่าวถึง แนวคิดและผลการออกแบบโปรแกรมสำหรับทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 3.1 อธิบายแนวคิดและผลการออกแบบโปรแกรมหลัก หัวข้อที่ 3.2 ถึง 3.8 อธิบายแนวคิด และผลการออกแบบโปรแกรมย่อยต่าง ๆ

#### 3.1 โครงสร้างของโปรแกรม และการทำงาน

โปรแกรมทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำพัฒนาจากซอฟต์แวร์แล็บวิว (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, LabVIEW) บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ เอ็กซ์พี การทำงานของโปรแกรมเป็นไปตามข้อแนะนำของมาตรฐาน ASTM E647-05 [21]

โครงสร้างของโปรแกรม (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย 7 โมดูล คือ 1) User interface 2) Analysis 3) Conversion 4) Test type 5) Waveform generator และ 6) Load compensation 7) Sampling & Save จากรูปสามารถสรุปการทำงานของแต่ละโมดูล ได้ดังนี้

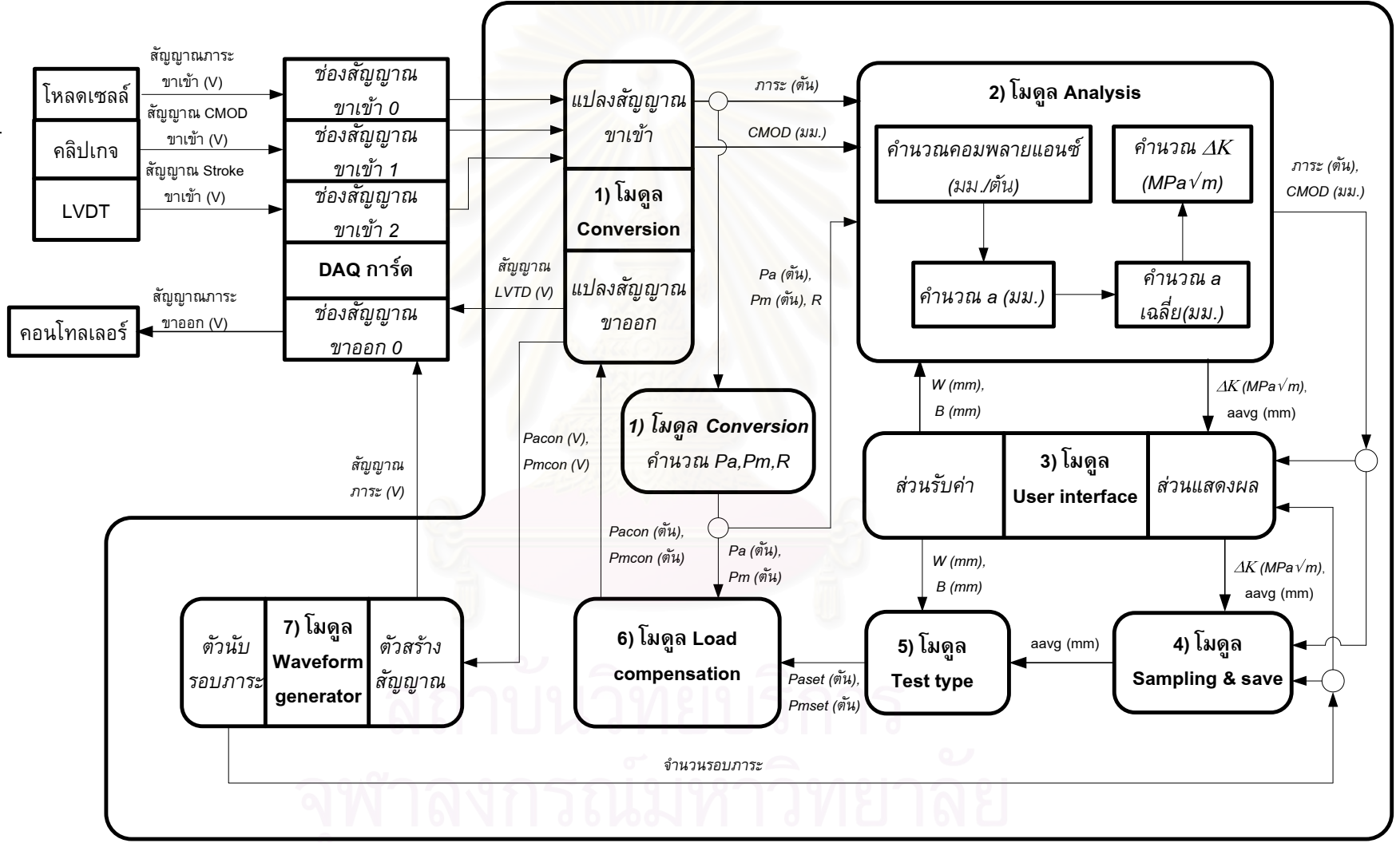
โมดูล Conversion (1) มีหน้าที่แปลงค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จากโพลตเซลไปเป็นสัญญาณกระแสในหน่วยตัน แปลงสัญญาณจากคลิปเกจไปเป็นสัญญาณระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว, *CMOD* ในหน่วยมิลลิเมตร และแปลงสัญญาณจาก *LVDT* (linear voltage differential transformer) ไปเป็นสัญญาณระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก, *stroke* ในหน่วยมิลลิเมตร โมดูลนี้ยังทำหน้าที่แปลงค่าสัญญาณกระแสเฉลี่ยและแอมพลิจูดกระแสในหน่วยตัน ให้กลายเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) เพื่อส่งไปควบคุมเครื่องทดสอบ (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.3)

โมดูล Analysis (2) มีหน้าที่คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น  $da/dN$  พารามิเตอร์  $\Delta K$  ความยาวรอยร้าว และคอมพลายแอนซ์ เป็นต้น ต่อจากนั้นโมดูลนี้จะส่งพารามิเตอร์เหล่านี้ไปแสดงค่าที่โมดูล User interface และบันทึกค่าที่โมดูล Sampling & Save ตามลำดับ (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.4)

โมดูล User interface (3) มีหน้าที่รับข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบจากผู้ใช้ เช่น สภาวะทดสอบ (กระแสเฉลี่ย แอมพลิจูดกระแส รูปคลื่น ความถี่ ชนิดการทดสอบ ฯลฯ) มิติของชิ้นงานทดสอบ (ความหนา ความกว้าง) เงื่อนไขการบันทึกค่า (เมื่อถึงจำนวนรอบที่กำหนด หรือเมื่อถึงความยาวรอยร้าวที่กำหนด ฯลฯ) เป็นต้น ถัดจากนั้นโมดูล User interface จะส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังโมดูล Analysis โมดูล Test type และโมดูล Sampling & Save ต่อไป นอกจากนี้



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรมทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าว



โมดูลนี้ยังมีหน้าที่แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งในรูปของตัวเลข ได้แก่ ความยาวรอยร้าว จำนวนรอบภาระและ  $\Delta K$  และในรูปของกราฟ ได้แก่ กราฟภาระ-เวลา กราฟ *CMOD*-เวลา และกราฟ *stroke*- เวลา (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.2)

โมดูล *Sampling & Save* (4) มีหน้าที่บันทึกข้อมูลต่าง ๆ เช่น สัญญาณภาระ สัญญาณ *CMOD* สัญญาณ *stroke* ความยาวรอยร้าว คอมพลายแอนซ์ และ  $\Delta K$  เป็นต้น ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกลงฮาร์ดดิสก์ตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานระบุ ซึ่งมีทั้งสิ้น 3 แบบ คือ 1) ไม่บันทึกข้อมูล 2) บันทึกทุกครั้งที่จำนวนรอบภาระถึงช่วงรอบภาระ (*cycle interval*) ที่กำหนด และ 3) บันทึกทุกครั้งที่ยาวมีความยาวเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.5)

โมดูล *Test type* (5) มีหน้าที่รับชนิดของการทดสอบ และสภาวะทดสอบจากโมดูล *User interface* และรับค่าความยาวรอยร้าวจากโมดูล *Analysis* จากนั้นโมดูล *Test type* จะคำนวณภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระ จากชนิดของการทดสอบและความยาวรอยร้าวขณะนั้น การทดสอบทำได้ 3 แบบ คือ การทดสอบแบบควบคุมภาระ การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  จากนั้นภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระจะถูกส่งไปยังโมดูล *Load compensation* เพื่อปรับแก้ภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระต่อไป (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.6)

โมดูล *Load compensation* (6) มีหน้าที่ปรับแก้ภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ทำกับชิ้นงานทดสอบให้ใกล้เคียงกับค่าที่ผู้ทดสอบกำหนด การทำงานของโมดูลเริ่มจากการรับค่าภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจากโมดูล *Conversion* (คำนวณสัญญาณภาระให้อยู่ในรูปของ  $P_a, P_m, R$ ) และรับค่าภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ต้องการจากโมดูล *Test type* จากนั้นโมดูลนี้จะคำนวณส่วนต่างของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระระหว่างโมดูลทั้งสอง และปรับลดส่วนต่างนี้จนกระทั่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดยอัตโนมัติ ภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ปรับแก้แล้วจะถูกส่งไปยังโมดูล *Waveform generator* เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทดสอบต่อไป (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.7)

โมดูล *Waveform generator* (7) มีหน้าที่สร้างสัญญาณภาระจากข้อมูล ภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระหลังจากปรับแก้แล้ว รูปคลื่นภาระ ความถี่ภาระ และจำนวนจุดของสัญญาณในหนึ่งคาบ สัญญาณภาระนี้จะถูกส่งไปที่คอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมเครื่องทดสอบต่อไป (รายละเอียดของโมดูลอยู่ในหัวข้อที่ 3.8)

## 3.2 การออกแบบโมดูล User interface

### 3.2.1 ภาพรวมของการออกแบบ

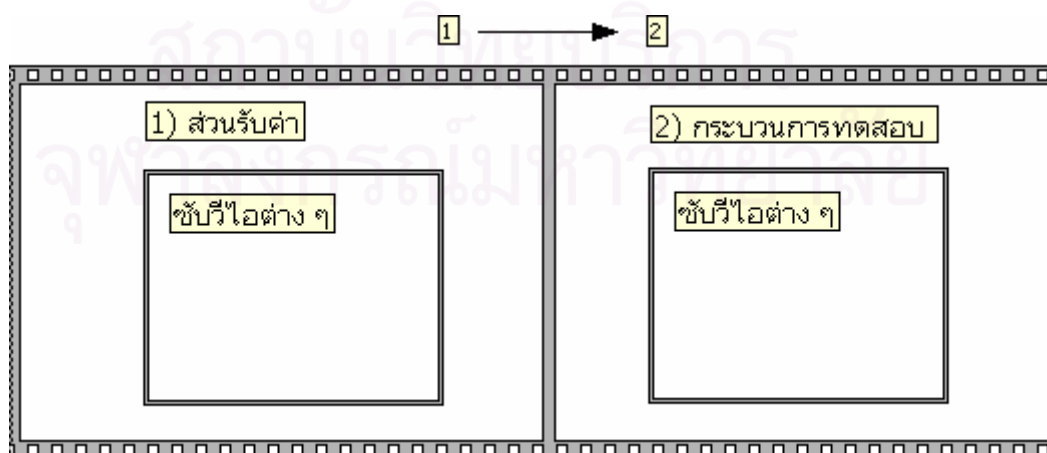
การออกแบบโมดูล User interface มีหลักเกณฑ์ 2 ประการคือ

- อำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ในการป้อนข้อมูล และดูสถานะของการทดสอบ
- ป้องกันการเปลี่ยนแปลงสถานะทดสอบจากผู้ใช้ขณะที่การทดสอบกำลังดำเนินอยู่

เกณฑ์อันแรก ทำโดยการจัดกลุ่มข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องป้อนหรือเรียกว่า “ส่วนรับค่า” ให้เป็นหมวดหมู่ สำหรับโปรแกรมที่ออกแบบ ส่วนรับค่าประกอบด้วยกลุ่มย่อย 8 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มช่องสัญญาณ (channel setup) 2) กลุ่มเริ่มการทดสอบ (start setup) 3) กลุ่มรูปคลื่น (waveform setup) 4) กลุ่มหยุดการทดสอบ (stop setup) 5) กลุ่มชดเชยค่าสัญญาณ (compensation) 6) กลุ่มชิ้นงานทดสอบ 7) กลุ่มชนิดการทดสอบ (test type) และ 8) กลุ่มบันทึกข้อมูล (data sampling) และส่วนแสดงผล ประกอบด้วยกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มแสดงผลเป็นตัวเลข และ 2) กลุ่มแสดงผลเป็นกราฟ รูปที่ 3.3 แสดงส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว นอกจากการจัดข้อมูลป้อนเข้าและการแสดงผลให้เป็นหมวดหมู่แล้ว เพื่อไม่ให้ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลที่ไม่จำเป็น โปรแกรมจะเปลี่ยนสถานะของช่องกรอกข้อมูลที่ผู้ใช้ไม่ต้องกรอกภายใต้ชนิดการทดสอบที่เลือกให้เป็นแบบเข้าถึงไม่ได้ (disable) ซึ่งจะปรากฏเป็นสีเทา ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เกณฑ์อันที่สอง ทำโดยออกแบบให้ส่วนรับค่า และกระบวนการทดสอบให้เป็นอิสระต่อกัน การออกแบบใช้โครงสร้างของโปรแกรมแบบเรียงลำดับการทำงาน (stack sequence) ดังรูปที่ 3.2 กล่าวคือ โปรแกรมจะทำงานในโครงสร้างแรกให้เสร็จก่อน (1.ส่วนรับค่า) จากนั้นโปรแกรมจึงทำงานในส่วนที่สอง (2.กระบวนการทดสอบ) โปรแกรมจะไม่ย้อนกลับไปทำซ้ำในส่วนแรก ดังนั้นเมื่อผู้ใช้แก้ไขข้อมูลใด ๆ บนหน้าจอส่วนติดต่อกับผู้ใช้ขณะทดสอบ ข้อมูลเหล่านี้จะไม่มีผลต่อการทดสอบที่กำลังดำเนินอยู่ รายละเอียดของโปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ก.1



รูปที่ 3.2 โครงสร้างหลักของโปรแกรม

รูปที่ 3.3 ส่วนติดต่อคอมพิวเตอร์ใช้งาน

## Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering - Chulalongkorn University

**Channel setup**

Input	Output
Load	0
CMOD	1
Stroke	2

**Test Condition**

<p>Start setup</p> <p>Time to Mean (sec)</p> <input type="text" value="5"/> <p>No. of Cycle to Steady</p> <input type="text" value="10"/>	<p>Stop setup</p> <p>Non stop</p> <p>N stop(cycle)</p> <input type="text" value="0"/> <p>a stop(mm)</p> <input type="text" value="0"/>	<p>Waveform setup</p> <p>Waveform</p> <p>Sine Wave</p> <p>Resolution</p> <p>Frequency (hz)</p> <input type="text" value="1"/>
---	--	---

**Compensation**

Load

CMOD

ON

<p>Test type</p> <p>Load control</p> <p>Load control test</p> <p>Amplitude (ton)</p> <input type="text" value="0.36"/> <p>Mean (ton)</p> <input type="text" value="0.39"/>	<p>Specimen</p> <p>Type</p> <p>Material</p> <p>Name</p> <input type="text" value="Al 7075-T651"/> <p>E (GPa)</p> <input type="text" value="70.47"/>
<p>Constant <math>\Delta K</math> &amp; Decreasing <math>\Delta K</math> test</p> <p><math>\Delta K</math> (MPa*m<sup>0.5</sup>)</p> <input type="text" value="7"/> <p>R</p> <input type="text" value="0.1"/> <p>C (m<sup>-1</sup>)</p> <input type="text" value="-78.74"/>	<p>Dimension</p> <p>W (mm)</p> <input type="text" value="50.8"/> <p>B (mm)</p> <input type="text" value="25"/> <p>a0 (mm)</p> <input type="text" value="11.2"/>

**Transducer Range**

Load

Stroke

**Data Sampling**

Criteria

Crack length increment

 Cycle
   
 mm.
   

Path file

Load CMOD path

Test data path

**Display**

Amplitude (ton)	Mean (ton)	aavg (mm)	$\Delta K$ (MPa*m <sup>0.5</sup> )
0	0	0.0195	0

Load

Stroke

CMOD

No. of Cycle

f (hz)

START

STOP

24

### 3.2.2 ผลการออกแบบ

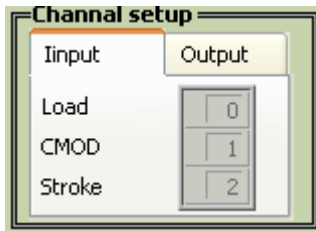
1) กลุ่มช่องสัญญาณ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 กลุ่มนี้มีไว้เพื่อให้ผู้ใช้กำหนดหมายเลขช่องสัญญาณขาเข้า และสัญญาณขาออก ให้สอดคล้องกับการต่อสายสัญญาณเข้ากล่องรับสัญญาณ สำหรับกรณีในรูปที่ 3.4(ก) สัญญาณภาระ สัญญาณ *CMOD* และสัญญาณ *stroke* จะเข้าที่ช่องหมายเลข 0, 1, 2 ตามลำดับ ส่วนขาออก (รูปที่ 3.4(ข)) จะมีเพียงสัญญาณเดียวคือ สัญญาณภาระ จะออกที่ช่องสัญญาณหมายเลข 0

2) กลุ่มพิสัยการวัดสัญญาณ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 (ก) กลุ่มนี้มีไว้เพื่อให้ผู้ใช้กำหนดพิสัยการวัดสัญญาณขาเข้า จากรูป ผู้ใช้สามารถกำหนดพิสัยการวัดสัญญาณของสัญญาณทั้ง 2 ชนิด พิสัยการวัดสัญญาณภาระ รูปที่ 3.5 (ข) ผู้ใช้สามารถเลือกพิสัยการวัดได้ 4 ระดับ คือ  $\pm 3$  ตัน  $\pm 6$  ตัน  $\pm 15$  ตัน และ  $\pm 30$  ตัน และ พิสัยการวัดสัญญาณ Stroke รูปที่ 3.5 (ค) ผู้ใช้สามารถเลือกพิสัยการวัดได้ 4 ระดับ คือ  $\pm 2.5$  มม.  $\pm 5$  มม.  $\pm 12.5$  มม. และ  $\pm 25$  มม. รายละเอียดการเลือกใช้งานจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.3.2

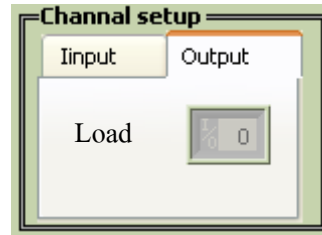
3) กลุ่มเริ่มการทดสอบ แสดงอยู่ในรูป 3.6 ค่าที่ผู้ใช้ต้องป้อนประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการตั้งชิ้นงานจากศูนย์จนถึงภาระเฉลี่ย (เวลา to mean) และจำนวนรอบภาระระหว่างการเพิ่มแอมพลิจูดภาระจากศูนย์จนถึงค่าที่กำหนด (No. of cycle to steady) ความหมายของพารามิเตอร์ทั้งสองแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 จากรูป ชิ้นงานทดสอบถูกดึงด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งภาระมีขนาดเท่ากับภาระเฉลี่ย จากนั้นแอมพลิจูดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด

4) กลุ่มรูปคลื่น ทำหน้าที่กำหนดรูปคลื่นและความถี่ของสัญญาณภาระ (รูปที่ 3.8 (ก)) ผู้ใช้สามารถกำหนดรูปคลื่น (รูปที่ 3.8(ข)) จำนวนจุดในสัญญาณขาเข้าในหนึ่งคาบ (sampling point per cycle) และจำนวนจุดในสัญญาณขาออกในหนึ่งคาบ (generating point per cycle) ดังแสดงในรูปที่ 3.8(ค) ผู้ใช้สามารถเลือกรูปคลื่นได้ 4 ชนิด คือ รูปไซน์ (sine waveform) รูปสามเหลี่ยม (triangle waveform) รูปสี่เหลี่ยม (rectangular waveform) และรูปฟันเลื่อย (saw tooth waveform) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จำนวนจุดในสัญญาณขาเข้าและขาออกจะต้องไม่เกินขีดจำกัดความจำแนกชัด (resolution) ของ DAQ การ์ด รายละเอียดการคำนวณขีดจำกัดของจำนวนจุดแสดงอยู่ในภาคผนวก ง

5) กลุ่มหยุดการทดสอบ ทำหน้าที่ควบคุมการหยุดการทดสอบ ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้ 3 แบบ คือ 1) ไม่หยุดการทดสอบจนกว่าชิ้นงานทดสอบเสียหาย (รูปที่ 3.10(ก)) ในกรณีนี้คอนโทรลเลอร์จะหยุดการทำงานของเครื่องทดสอบให้แทน เมื่อระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบเกินขอบเขตที่กำหนดที่คอนโทรลเลอร์ 2) หยุดการทดสอบเมื่อรอยร้าวมีความยาวถึงค่าที่กำหนด ในกรณีนี้ผู้ใช้ต้องกรอกความยาวรอยร้าวสุดท้าย a stop (มม.) (รูปที่ 3.10(ข)) และ 3) หยุดการทดสอบเมื่อจำนวนรอบภาระที่กระทำกับชิ้นงานมีค่าถึงจำนวนรอบภาระที่กำหนด กรณีนี้ผู้ใช้ต้องกรอกจำนวนรอบภาระที่ต้องการกระทำกับชิ้นงาน *N stop* (รอบภาระ) (รูปที่ 3.10(ค))

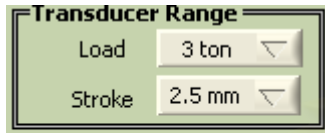


(ก)

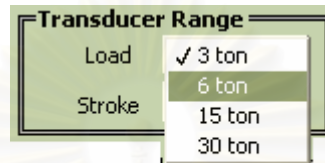


(ข)

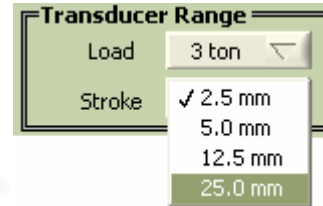
รูปที่ 3.4 กลุ่มช่องสัญญาณ (ก) ขาเข้า (ข) ขาออก



(ก)

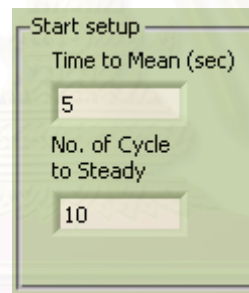


(ข)

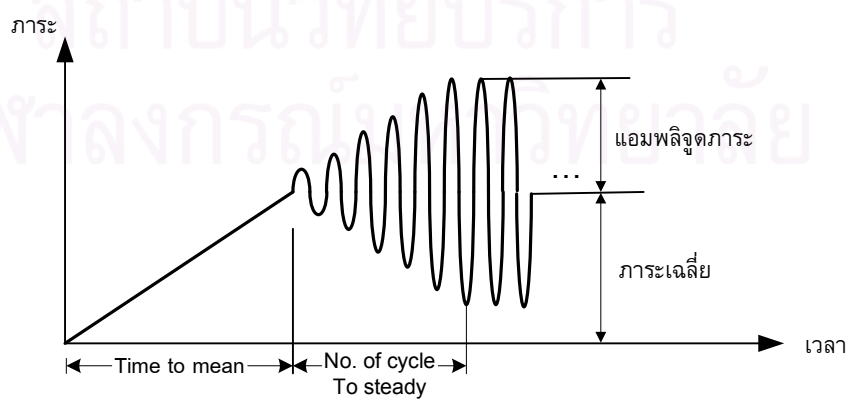


(ค)

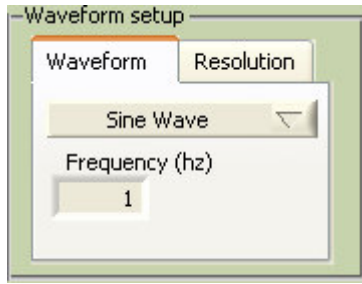
รูปที่ 3.5 พิสัยการวัดสัญญาณ (ก) ชนิดของสัญญาณ (ข) การกำหนดพิสัยการวัดสัญญาณภาระ (ค) การกำหนดพิสัยการวัดสัญญาณ stroke



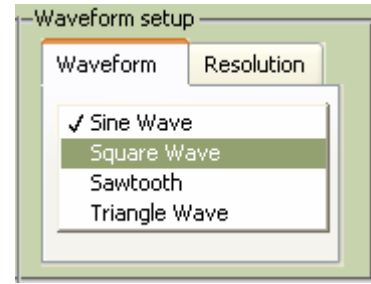
รูปที่ 3.6 กลุ่มเริ่มการทดสอบ



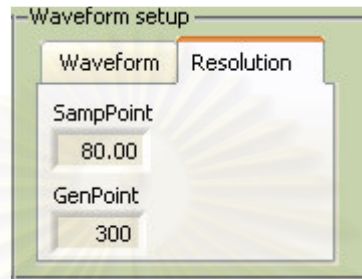
รูปที่ 3.7 สัญญาณภาระเริ่มต้น



(ก)

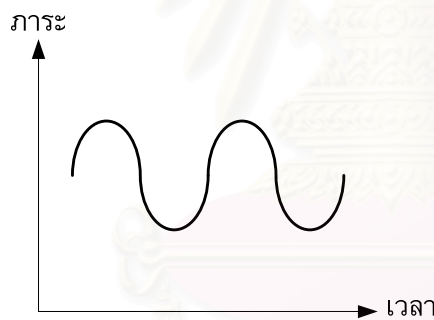


(ข)

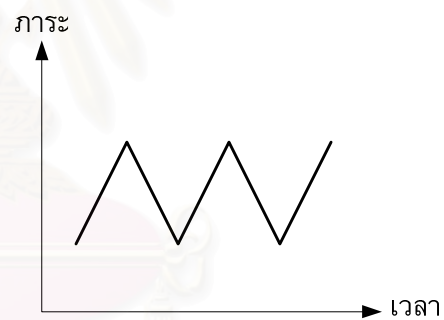


(ค)

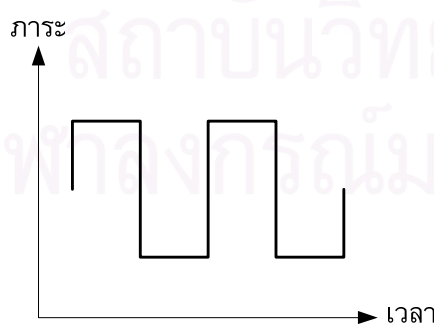
รูปที่ 3.8 กลุ่มรูปคลื่น (ก) รูปคลื่น และความถี่ (ข) ลักษณะการกำหนดรูปคลื่น (ค) จำนวนจุดในสัญญาณขาเข้าและขาออก



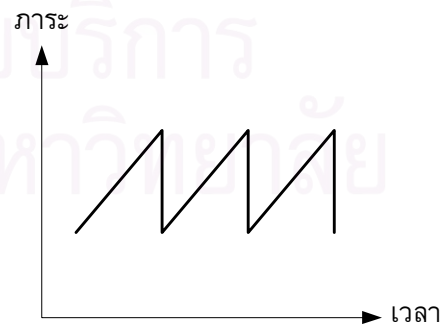
(ก)



(ข)



(ค)



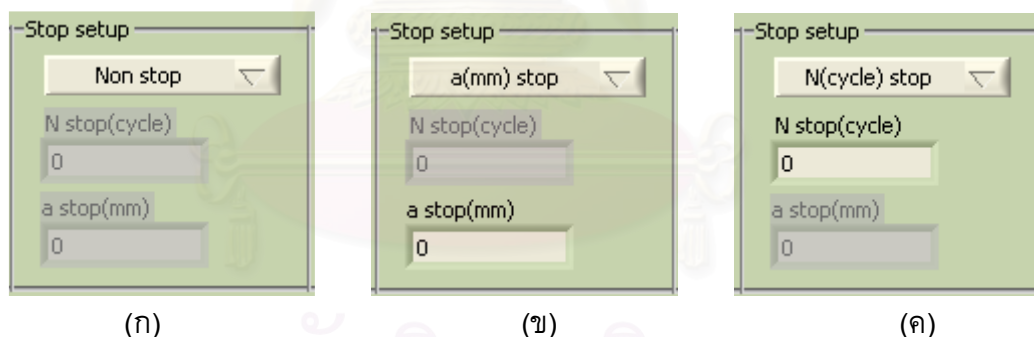
(ง)

รูปที่ 3.9 รูปคลื่น (ก) รูปไซน์ (ข) รูปสามเหลี่ยม (ค) รูปสี่เหลี่ยม (ง) รูปฟันเลื่อย

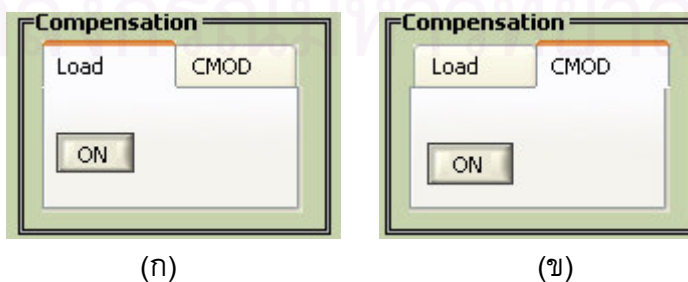
6) กลุ่มชุดเซยค่าสัญญาณ ทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้งาน สำหรับการชุดเซยภาวะ (รูปที่ 3.11(ก)) และชุดเซยผลตอบสนองต่อความถี่ของคลิปเกจ (รูปที่ 3.11(ข)) ถ้าปุ่มปฏิบัติการแสดงสถานะ ON จะมีการชุดเซยค่าสัญญาณ แต่ถ้าปุ่มปฏิบัติการแสดงสถานะ OFF จะไม่มีการชุดเซยค่าสัญญาณ

7) กลุ่มชิ้นงานทดสอบ ทำหน้าที่รับข้อมูลชนิดและมิติของชิ้นงานทดสอบ มิติของรอยร้าว และรายละเอียดของวัสดุ ชนิดของชิ้นงานทดสอบสามารถเลือกได้ 2 แบบ คือ Compact tension specimen (CT) (รูปที่ 3.12(ก)) และ Eccentrically-loaded single edge crack tension specimen (ESET) (รูปที่ 3.12(ข)) มิติของชิ้นงานทดสอบที่ผู้ใช้งานต้องการแสดงในรูปที่ 3.13 กลุ่มข้อมูลนี้ต้องป้อนค่า คือ ความกว้าง  $W$  และความหนา  $B$  และมิติของรอยร้าวที่ต้องป้อนค่า คือ ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (initial crack length,  $a_0$ ) รายละเอียดของวัสดุที่ต้องป้อนค่า คือ ชื่อวัสดุ ยังกัมอดูลัส (Young's modulus) และอัตราส่วนปัวซง (Poisson's ratio)

8) กลุ่มชนิดทดสอบ ทำหน้าที่รับค่าชนิดการทดสอบจากผู้ใช้งาน การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ 1) การทดสอบแบบควบคุมภาวะ (รูปที่ 3.14(ก)) ในกรณีนี้ผู้ใช้งานจะป้อนค่าภาวะเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาวะ 2) การทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  (รูปที่ 3.14(ข)) ในกรณีนี้ผู้ใช้งานจะป้อนค่า  $\Delta K$  และอัตราส่วนภาวะ  $R$  และ 3) การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  (รูปที่ 3.14(ค)) ในกรณีนี้ผู้ใช้งานจะป้อนค่า  $\Delta K$   $R$  และค่าคงตัวที่ควบคุมการปรับลดภาวะ (load shedding coefficient,  $C'$ )

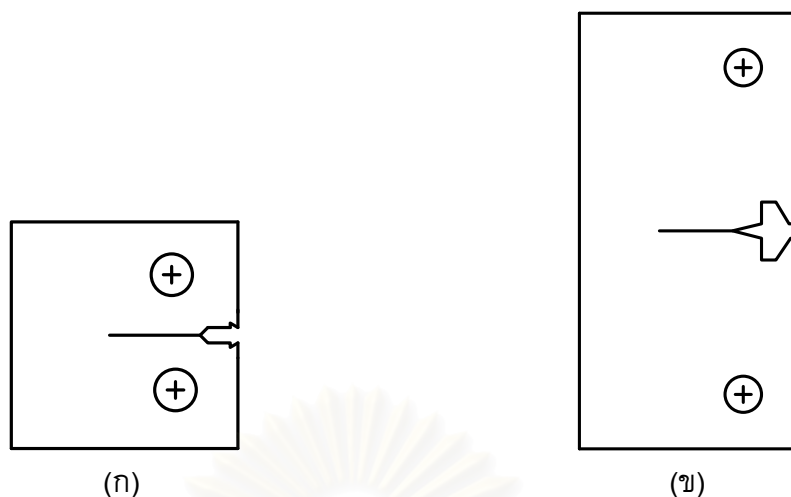


รูปที่ 3.10 กลุ่มหยุดการทดสอบ (ก) ไม่หยุดจนกว่าชิ้นงานจะเสียหาย (ข) หยุดเมื่อความยาวรอยร้าวถึงค่าที่กำหนด (ค) หยุดเมื่อจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนด



รูปที่ 3.11 กลุ่มชุดเซยค่าสัญญาณ (ก) การชุดเซยค่าสัญญาณภาวะ (ข) การชุดเซยค่าสัญญาณผลตอบสนองต่อความถี่ของคลิปเกจ



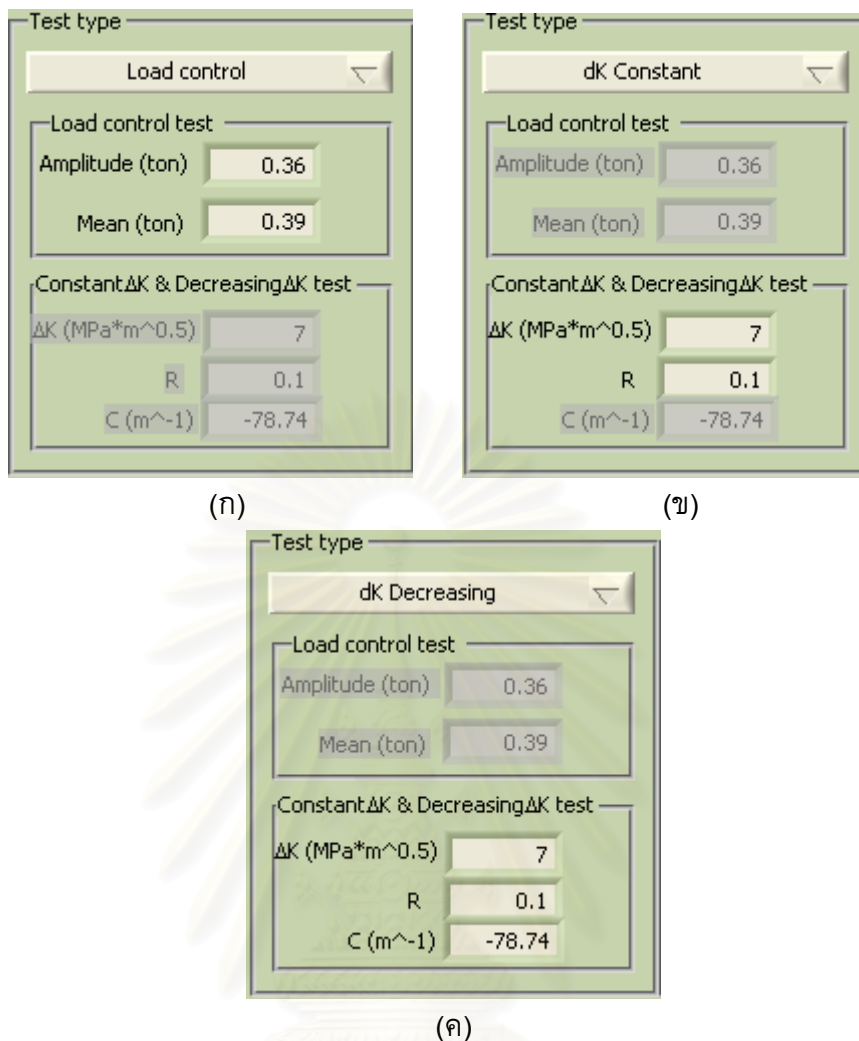


รูปที่ 3.12 กลุ่มชิ้นงานทดสอบ (ก) ชิ้นงานทดสอบแบบ CT (ข) ชิ้นงานทดสอบแบบ ESET

รูปที่ 3.13 ช่องกรอกมิติของชิ้นงานทดสอบ

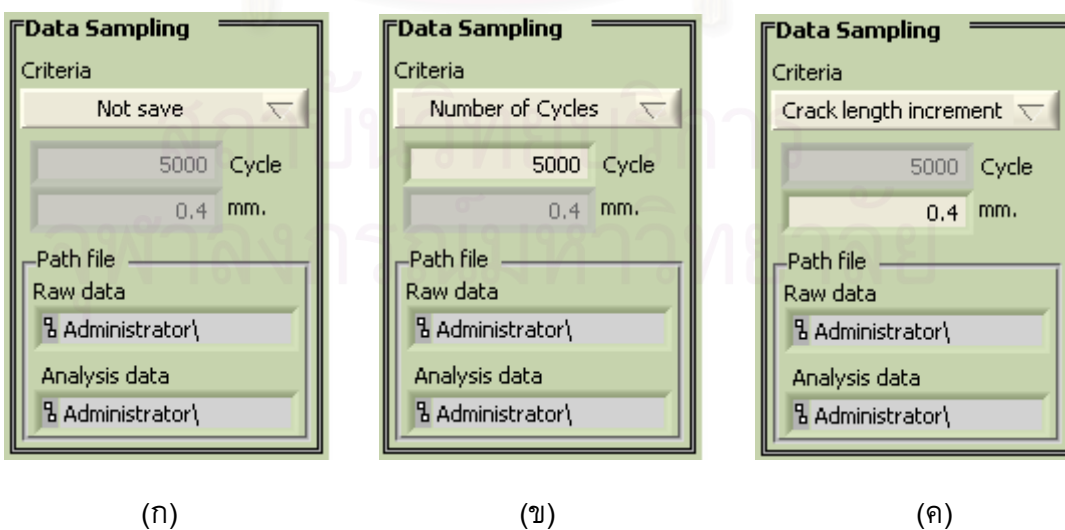
9) กลุ่มบันทึกข้อมูล ทำหน้าที่รับเงื่อนไขการบันทึกข้อมูลจากผู้ใช้ ซึ่งสามารถเลือกได้ 3 กรณี คือ 1) ไม่บันทึกข้อมูลตลอดการทดสอบ (รูปที่ 3.15(ก)) 2) บันทึกข้อมูลทุกครั้งที่ย่อยร้ามีความยาวเพิ่มขึ้นจากเดิมมากกว่าหรือเท่ากับส่วนเพิ่มที่กำหนด (รูปที่ 3.15(ข)) และ 3) บันทึกข้อมูลทุกครั้งที่ยังวนรอบภาระถึงช่วงรอบภาระที่กำหนด (รูปที่ 3.15(ค)) จากรูปจะเห็นว่า ผู้ใช้สามารถป้อนไดเรคทอรีและชื่อไฟล์ที่บันทึกผลการทดสอบได้ สำหรับไฟล์ในช่อง Raw data จะมีข้อมูลภาระ *CMOD* และ *Stroke* สำหรับไฟล์ในช่อง Analyzed data จะมีข้อมูลต่าง ๆ ณ จำนวนรอบภาระที่ทำให้เงื่อนไขบันทึกข้อมูลเป็นจริง ดังนี้ ความยาวรอยร้าว  $da/dN$   $\Delta K$  คอมพลายแอนซ์ ภาระสูงสุด และภาระต่ำสุด

10) กลุ่มแสดงผลเป็นตัวเลข แสดงอยู่ในรูปที่ 3.16 ข้อมูลที่แสดงประกอบด้วย แอมพลิจูดภาระ ภาระเฉลี่ย ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (average crack length,  $a_{avg}$ ) ของทุก ๆ 100 รอบภาระที่ต่อเนื่องกัน และ  $\Delta K$  นอกจากนี้ยังแสดงผล ความถี่และจำนวนรอบภาระ ที่ได้กราฟด้วย ในรูปที่ 3.3



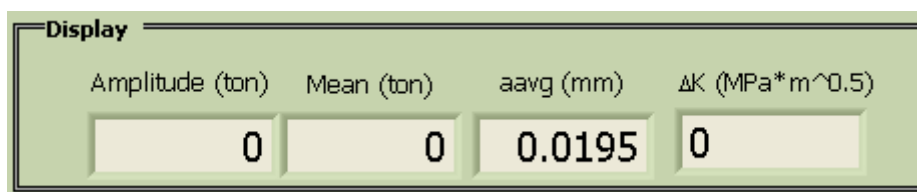
รูปที่ 3.14 กลุ่มชนิดการทดสอบ

(ก) แบบควบคุมภาระ (ข) แบบควบคุม  $\Delta K$  (ค) แบบลด  $\Delta K$



รูปที่ 3.15 กลุ่มบันทึกข้อมูล (ก) ไม่บันทึกข้อมูล (ข) บันทึกข้อมูลเมื่อที่รอยร้าวมีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด (ค) บันทึกข้อมูลเมื่อที่จำนวนรอบถึงช่วงรอบภาระที่กำหนด

11) กลุ่มแสดงผลในรูปกราฟ ข้อมูลที่แสดงในรูปของกราฟประกอบด้วย ภาวะ-เวลา *CMOD*- เวลา และ *stroke*- เวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.17(ก)-(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 กลุ่มแสดงผลเป็นตัวเลข



(ก)

(ข)



(ค)

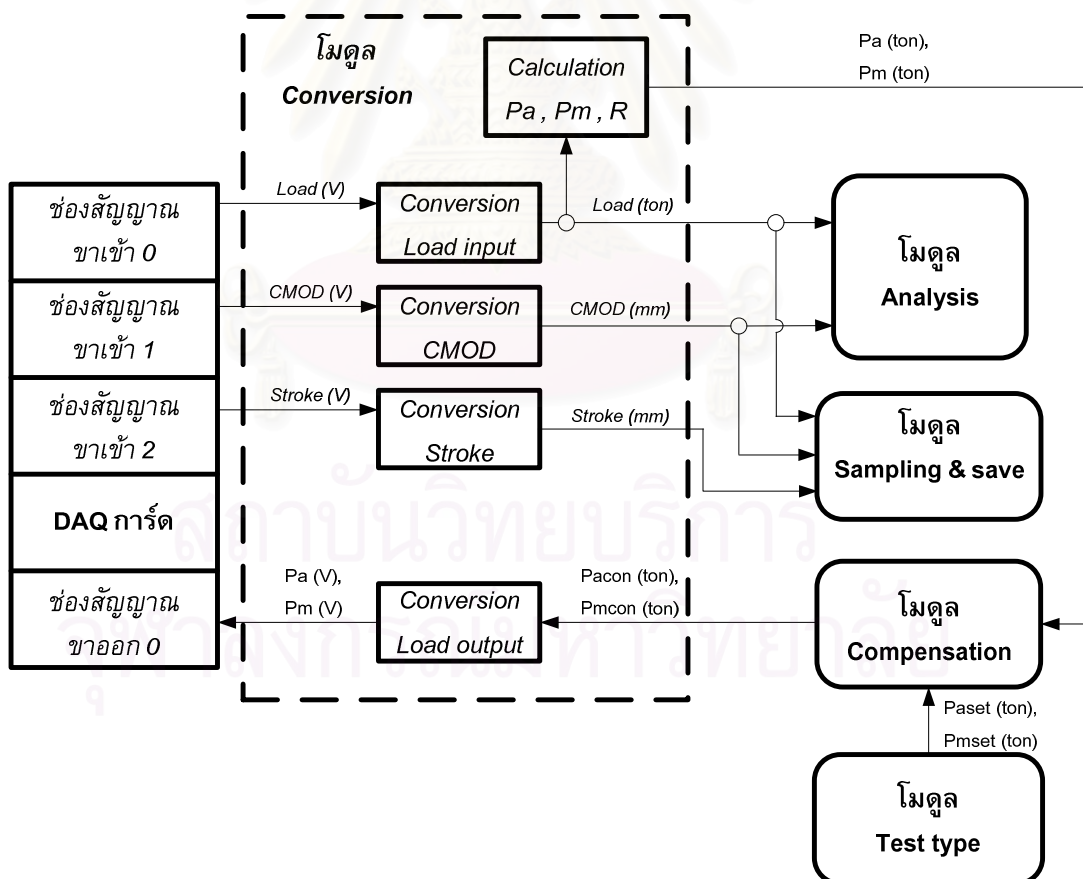
รูปที่ 3.17 กลุ่มแสดงผลในรูปกราฟ (ก) ภาวะ-เวลา (ข) *CMOD*- เวลา และ *stroke*- เวลา

### 3.3 การออกแบบโมดูล Conversion

#### 3.3.1 ภาพรวมของการออกแบบ

เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ของเครื่องทดสอบสามารถกำหนดพิสัยการวัดภาระของโหลดเซล และพิสัยการวัด *stroke* ของ *LVDT* ให้เหมาะสมกับขนาดภาระ ที่ต้องการทำกับชิ้นงานทดสอบได้ ดังนั้นการแปลงสัญญาณภาระและ *stroke* จากหน่วยโวลต์ไปเป็นหน่วยตันและมิลลิเมตรตามลำดับ (หรือในทางกลับกันคือการแปลงหน่วยจากตันหรือมิลลิเมตรไปเป็นหน่วยโวลต์) จะต้องสอดคล้องกับพิสัยการวัดที่ผู้ใช้งานกำหนดที่คอนโทรลเลอร์ด้วย มิฉะนั้นแล้วโปรแกรมจะควบคุมเครื่องทดสอบและการวิเคราะห์ผลผิดพลาด

รูปที่ 3.18 แสดงโมดูล Conversion (เฉพาะส่วนที่ถูกล้อมกรอบด้วยเส้นประ) จากรูปโมดูลประกอบด้วยซับริโวลต์ 3 อัน สำหรับแปลงหน่วยสัญญาณภาระขาเข้า *CMOD* และ *stroke* ตามลำดับ และซับริโวลต์ 1 อัน สำหรับแปลงหน่วยสัญญาณภาระขาออก ถัดจากซับริโวลต์แปลงหน่วยสัญญาณภาระขาเข้าจะมีซับริโวลต์คำนวณค่าภาระเฉลี่ย *Pm* แอมพลิจูดภาระ *Pa* และอัตราส่วนภาระ *R*



รูปที่ 3.18 ผลการออกแบบโมดูล Conversion

<sup>1</sup> ซับริโวลต์คือซับริยูทิลิตี้ในซอฟต์แวร์แล็บวิว

### 3.3.2 ผลการออกแบบ

#### 1) ซับวีไอ Ana\_Conversion\_Stroke range.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.18 ใช้ชื่อว่า Conversion stroke) จะรับสัญญาณ *Stroke* (หน่วยโวลต์) จาก *LVDT* และพิสัยการวัด *Stroke* จากโมดูล *User interface* แล้วแปลงเป็นสัญญาณ *Stroke* ในหน่วยมิลลิเมตร สัญญาณที่แปลงหน่วยแล้วจะถูกส่งไปที่โมดูล *Sampling & Save* เพื่อบันทึกค่า

พิสัยการวัด *Stroke* ของคอนโทรลเลอร์มี 4 ค่า คือ  $\pm 2.5$  มม.  $\pm 5$  มม.  $\pm 12.5$  มม. และ  $\pm 25$  มม. แต่ละพิสัยการวัดจะมีขนาดสัญญาณขาออก (จากคอนโทรลเลอร์)  $\pm 5$  โวลต์ ในที่นี้กำหนดพิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณขาเข้า 2 ไว้เท่ากับ 0.5 โวลต์ ค่าคงตัวแปลงหน่วยคำนวณจากพิสัยการวัดหารด้วย พิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 2 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1 แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.4

ตารางที่ 3.1 ค่าคงตัวแปลงหน่วยสำหรับสัญญาณ *Stroke*

คอนโทรลเลอร์		แล็บวี	
พิสัยการวัด <i>Stroke</i> (มม.)	พิสัยของสัญญาณขาออก (โวลต์)	พิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 2 (โวลต์)	ค่าคงตัวแปลงหน่วย (มม./โวลต์)
$\pm 2.5$	$\pm 5.0$	$\pm 0.5$	5
$\pm 5.0$	$\pm 5.0$	$\pm 0.5$	1
$\pm 12.5$	$\pm 5.0$	$\pm 0.5$	25
$\pm 25.0$	$\pm 5.0$	$\pm 0.5$	50

#### 2) ซับวีไอ Ana\_Conversion\_CM0D range.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.18 ใช้ชื่อว่า Conversion CM0D) รับสัญญาณ *CM0D* (หน่วยโวลต์) จากคลิปเกจ และค่าคงตัวที่ได้จากการสอบเทียบคลิปเกจ (หัวข้อที่ 4.21) แล้วแปลงเป็นสัญญาณ *CM0D* ในหน่วยมิลลิเมตร สัญญาณที่แปลงหน่วยแล้วจะถูกส่งไปที่โมดูล *Sampling & Save* เพื่อบันทึก และส่งไปที่โมดูล *Analysis* เพื่อใช้คำนวณคอมพลายแอนซ์และความยาวรอยร้าว

ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดพิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 1 เท่ากับ  $\pm 0.5$  โวลต์ แล้วสอบเทียบคลิปเกจที่พิสัยนี้ ค่าคงตัวที่ได้จากการสอบเทียบเท่ากับ 6.8785 โวลต์/มม. ดังนั้นถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงพิสัยของสัญญาณขาเข้า หรือ เปลี่ยนแปลงสเตรนมิเตอร์ใหม่ หรือ เปลี่ยนคลิปเกจใหม่ แล้วจะต้องสอบเทียบคลิปเกจเพื่อหาค่าคงตัวสอบเทียบค่าใหม่ ซึ่งวิธีการสอบเทียบอยู่ในหัวข้อที่ 4.21 (แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.18)

## 3) ซับวีไอ Ana\_conversion\_load signal input.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.18 ใช้ชื่อว่า Conversion load input) รับสัญญาณภาวะ (หน่วยโวลต์) จากโหลดเซลล์ และพีสัยการวัดภาวะจากโมดูล User interface แล้วแปลงเป็นสัญญาณภาวะในหน่วยตัน สัญญาณที่แปลงหน่วยแล้วจะถูกส่งไปที่โมดูล Sampling & Save เพื่อบันทึกและส่งไปที่โมดูล Analysis เพื่อคำนวณคอมพลายแอนซ์ ความยาวรอยร้าว และ  $\Delta K$

พีสัยการวัดภาวะของคอนโทรลเลอร์มี 4 ค่า คือ  $\pm 3$  ตัน  $\pm 6$  ตัน  $\pm 15$  ตัน และ  $\pm 30$  ตัน แต่ละพีสัยการวัดจะมีขนาดสัญญาณขาออกจากคอนโทรลเลอร์เท่ากับ  $\pm 5$  โวลต์ ในที่นี้ กำหนดพีสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณขาเข้า 0 เท่ากับ  $\pm 5.0$  โวลต์ ดังนั้นค่าคงตัวแปลงหน่วย จะเท่ากับพีสัยการวัดภาวะหารด้วยพีสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 0 ผลการคำนวณอยู่แสดงในตารางที่ 3.2 แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.17

ตารางที่ 3.2 ค่าคงตัวแปลงหน่วยสำหรับสัญญาณภาวะ

คอนโทรลเลอร์		แล็บวี	
พีสัยการวัดภาวะ (ตัน)	พีสัยของสัญญาณขาออก (โวลต์)	พีสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 0 (โวลต์)	ค่าคงตัวแปลงหน่วย (ตัน/โวลต์)
$\pm 3$	$\pm 5.0$	$\pm 5.0$	0.6
$\pm 6$	$\pm 5.0$	$\pm 5.0$	1.2
$\pm 15$	$\pm 5.0$	$\pm 5.0$	3.0
$\pm 30$	$\pm 5.0$	$\pm 5.0$	6.0

## 4) ซับวีไอ Ana\_conversion\_Calculate mean amp R.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.18 ใช้ชื่อว่า Calculate  $P_a$ ,  $P_m$ ,  $R$ ) รับสัญญาณภาวะที่แปลงหน่วยแล้วจากซับวีไอ Ana\_conversion\_load signal input.vi มาคำนวณภาวะเฉลี่ยจากสมการที่ (3.1) ถึง (3.3) ตามลำดับ

$$P_m = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (3.1)$$

$$P_a = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (3.3)$$

ผลการคำนวณจะถูกส่งไปที่โมดูล Compensation เพื่อใช้ในการชดเชยภาวะ (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.7) แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.24

#### 5) ซับวีไอ Ana\_conversion output load signal.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.18 ใช้ชื่อว่า Conversion load output) รับค่าภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระ ซึ่งมีหน่วยเป็นตัน จากโมดูล Test type เพื่อแปลงหน่วยเป็นโวลต์ แล้วส่งไปยังโมดูล Compensation เพื่อใช้ในการชดเชยภาระ

พิสัยการวัดภาระของคอนโทรลเลอร์มี 4 ค่า คือ  $\pm 3$  ตัน  $\pm 6$  ตัน  $\pm 15$  ตัน และ  $\pm 30$  ตัน แต่ละพิสัยการวัดจะมีขนาดสัญญาณขาออก (จากคอนโทรลเลอร์)  $\pm 5$  โวลต์ ในที่นี้กำหนดพิสัยของสัญญาณขาออกที่ช่องสัญญาณขาออก 0 เท่ากับ  $\pm 5$  โวลต์ (เท่ากับพิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณขาเข้า 0) ดังนั้น จะได้ค่าคงตัวแปลงหน่วยจะเท่ากับส่วนกลับของค่าในตารางที่ 3.2 หรือ พิสัยของสัญญาณขาเข้าที่ช่องสัญญาณ 0 หากด้วยพิสัยการวัดภาระ แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.15

### 3.4 การออกแบบโมดูล Analysis

#### 3.4.1 ภาพรวมของการออกแบบ

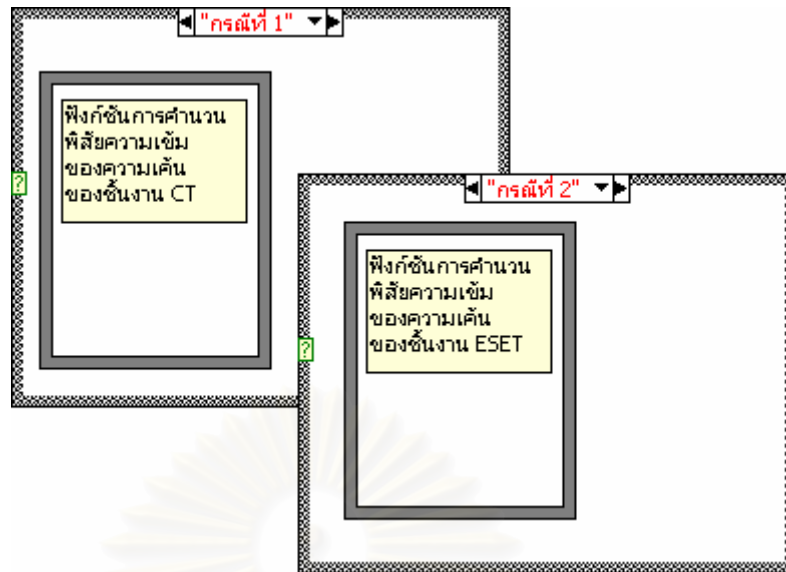
เกณฑ์การออกแบบโมดูล Analysis กำหนดว่า สามารถเพิ่มชนิดของชิ้นงานทดสอบได้โดยมีผลกระทบไม่มากต่อส่วนอื่น ๆ ของโปรแกรม ดังนั้นโครงสร้างของซับวีไอคำนวณหาความยาวรอยร้าว และซับวีไอคำนวณค่า  $\Delta K$  จะใช้โครงสร้างกรณี (case structure) โครงสร้างกรณีเหล่านี้จะบรรจุด้วยฟังก์ชันการคำนวณสำหรับชิ้นงานชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 วิธีการเพิ่มฟังก์ชันทำโดยคลิกที่หัวลูกศรสีดำด้านซ้าย หรือ ด้านขวาแล้ว โครงสร้างนี้จะปรากฏพื้นที่ว่างให้บรรจุฟังก์ชันได้

โครงสร้างของโมดูล Analysis แสดงอยู่ในรูปที่ 3.20 (เฉพาะส่วนที่ล้อมด้วยกรอบเส้นประ) โมดูลประกอบด้วยซับวีไอ 6 อัน แบ่งตามหน้าที่ย่อย คือ เลือกข้อมูลภาระและ *CMOD* เฉพาะช่วงปลดภาระ คำนวณค่ายังก์มอดูลัสประสิทธิภาพ คำนวณคอมพลายแอนซ์ คำนวณความยาวรอยร้าว คำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ย และคำนวณ  $\Delta K$  รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

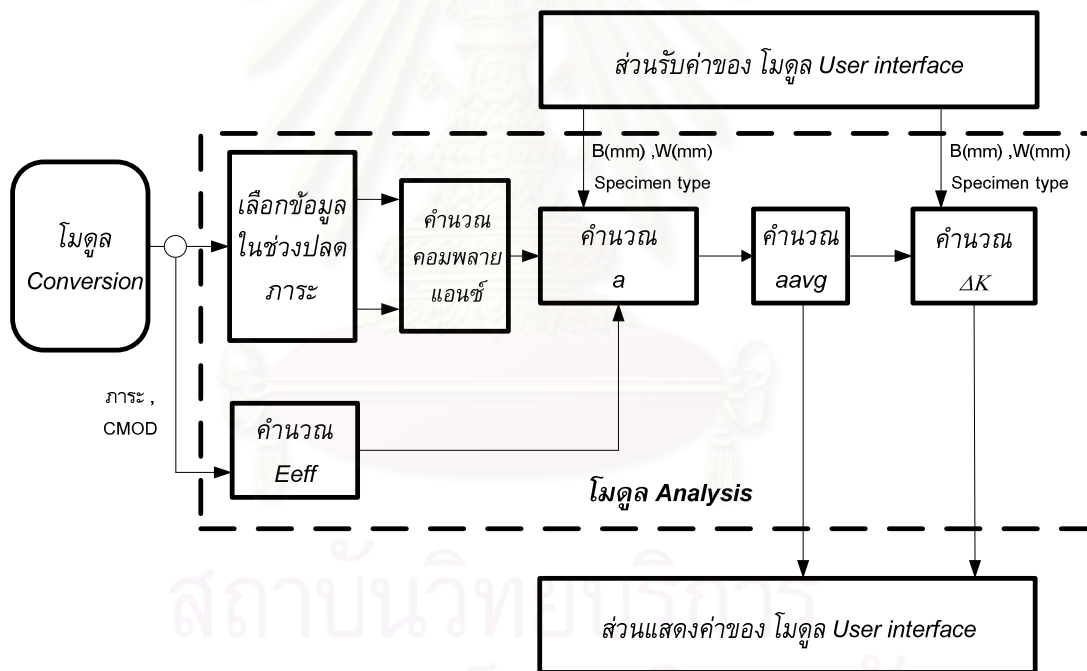
#### 3.4.2 ผลการออกแบบ

##### 1) ซับวีไอ Ana\_unloading waveform.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า เลือกข้อมูลภาระในช่วงปลดภาระ) รับข้อมูลภาระ และข้อมูล *CMOD* จากโมดูล Conversion ต่อจากนั้นซับวีไอนี้จะเลือกเฉพาะข้อมูลในช่วงปลดภาระ ดังรูปที่ 2.6 (ผู้วิจัยกำหนดให้ช่วงการเลือกข้อมูลเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลช่วงปลดภาระทั้งหมด) แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.12



รูปที่ 3.19 โครงสร้างกรณีของซบวีไอ



รูปที่ 3.20 ผลการออกแบบโมดูล Analysis

2) ซบวีไอ Ana\_calculation\_Effective.vi

ซบวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า คำนวณ  $E_{eff}$ ) รับข้อมูลภาระและข้อมูล  $CMOD$  ในช่วงเริ่มตั้งชิ้นงาน จากนั้นคำนวณยังมีมอดูลผลลัพธ์ (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในหัวข้อที่ 2.3) ยังมีมอดูลผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะต้องมีค่าต่างกับค่ายังมีมอดูลไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ [21] ต่อจากนั้นยังมีมอดูลผลลัพธ์จะถูกส่งไปคำนวณหาความยาวรอยร้าวในซบวีไอต่อไป แผนภาพของซบวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.32



## 3) ซับวีไอ Ana\_calculation\_compliance.vi

ซับวีไอนี้(ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า คำนวณคอมพลายแอนซ์) ทำหน้าที่รับข้อมูลภาระ และ  $CMOD$  ในช่วงปลดภาระ จากซับวีไอ Ana\_unloading waveform vi ต่อจากนั้น คำนวณคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (วิธีการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ข) คอมพลายแอนซ์ที่คำนวณได้จะถูกส่งไปยังโมดูลคำนวณความยาวรอยร้าว หรือซับวีไอ Ana\_calculation crack length.vi ต่อไป แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.11

## 4) ซับวีไอ Ana\_calculation crack length.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า คำนวณ a) ทำหน้าที่รับคอมพลายแอนซ์จากซับวีไอ Ana\_calculation\_compliance.vi (คำนวณคอมพลายแอนซ์) และ รับ  $W$ ,  $B$ ,  $E_{eff}$  และ ชนิดของชิ้นงานทดสอบ จากโมดูล User interface ต่อจากนั้นซับวีไอนี้จะคำนวณความยาวรอยร้าวในชิ้นงานทดสอบ  $CT$  โดยใช้สมการที่ (2.11ก) และ (2.11ข) ความยาวรอยร้าวที่คำนวณได้จะถูกส่งไปยัง ซับวีไอคำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ย ซับวีไอ Ana\_calculation crack length.vi ยังสามารถเพิ่มฟังก์ชันคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงานต่างๆ ในโครงสร้างกรณีได้ (ในวิทยานิพนธ์นี้มีฟังก์ชันคำนวณความยาวรอยร้าว ของชิ้นงาน  $CT$  และ  $ESET$ ) แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.22

## 5) ซับวีไอ Ana\_Moving average crack length.vi

เนื่องจากขีดจำกัดความจำแนกชัดของคลิปเกจ , DAQ การ์ด , สเตรอนมิเตอร์ และอัลกอริทึมที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล ทำให้สัญญาณ  $CMOD$  ที่วัดมีการกระจัดกระจาย (scatter) การคำนวณคอมพลายแอนซ์จากสัญญาณเหล่านี้จึงมีความไม่แน่นอน สำหรับระบบทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้ความยาวรอยร้าวมีการผันแปรต่ำสุดประมาณ  $\pm 0.03$  มิลลิเมตร (โดยการสังเกต) ดังนั้น จะต้องกำหนดจำนวนจุดการสุ่มค่าสัญญาณให้เหมาะสมกับสภาวะทดสอบ (รายละเอียดการกำหนดจำนวนจุดแสดงอยู่ในภาคผนวก ง)

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า คำนวณ  $a_{avg}$ ) ทำหน้าที่รับความยาวรอยร้าวจากซับวีไอคำนวณความยาวรอยร้าว ต่อจากนั้นซับวีไอนี้จะคำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ยด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) หรือค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าวตั้งแต่รอบภาระเริ่มต้นจนถึงรอบภาระปัจจุบัน ด้วยสมการที่ (3.4) (ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้  $N$  เท่ากับ 100 รอบ)

$$a_{avg} = \frac{a_i + a_{i-1} + \dots + a_{i-(N-1)}}{N} \quad (3.4)$$

ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยจะถูกส่งไปยังซับวีไอ Ana\_calculation\_SIF.vi เพื่อคำนวณพารามิเตอร์  $\Delta K$  แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.22

#### 6) ซับวีไอ Ana\_calculation\_SIF.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.20 ใช้ชื่อว่า ค่าพจน์  $\Delta K$ ) ทำหน้าที่รับความยาวรอยร้าวเฉลี่ยจากซับวีไอ Ana\_Moving average crack length.vi (ค่าพจน์  $a_{avg}$ ) และ รับ  $W$  และ  $B$  จากโมดูล User interface ซับวีไอนี้จะคำนวณ  $\Delta K$  โดยใช้สมการที่ (2.6) จากนั้นพารามิเตอร์  $\Delta K$  จะถูกส่งไปแสดงค่าที่โมดูล User interface พร้อมบันทึกค่าที่โมดูล Sampling & Save แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.20

### 3.5 การออกแบบโมดูล Sampling & Save

#### 3.5.1 ภาพรวมของการออกแบบ

เกณฑ์แรกของการออกแบบโมดูล Sampling & Save คือ โมดูลสามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณภาระ สัญญาณ  $CMOD$  และสัญญาณ  $stroke$  ความยาวรอยร้าว พารามิเตอร์  $\Delta K$  จำนวนรอบภาระ คอมพลายแอนซ์ ภาระสูงสุด และภาระต่ำสุด

เกณฑ์ที่สองของการออกแบบโมดูล Sampling & Save คือ โมดูลสามารถจัดเรียงข้อมูลภาระ ข้อมูล  $CMOD$  และข้อมูล  $stroke$  ให้เริ่มต้นที่ค่าสูงสุด เพราะว่าสัญญาณภาระและสัญญาณ  $CMOD$  ที่วัดขณะทดสอบจะมีเฟสต่างกัน (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 4.2.2.1) ดังนั้นจึงต้องจัดเรียงข้อมูลก่อนการบันทึก เพื่อให้วิเคราะห์ข้อมูลนี้ได้สะดวก

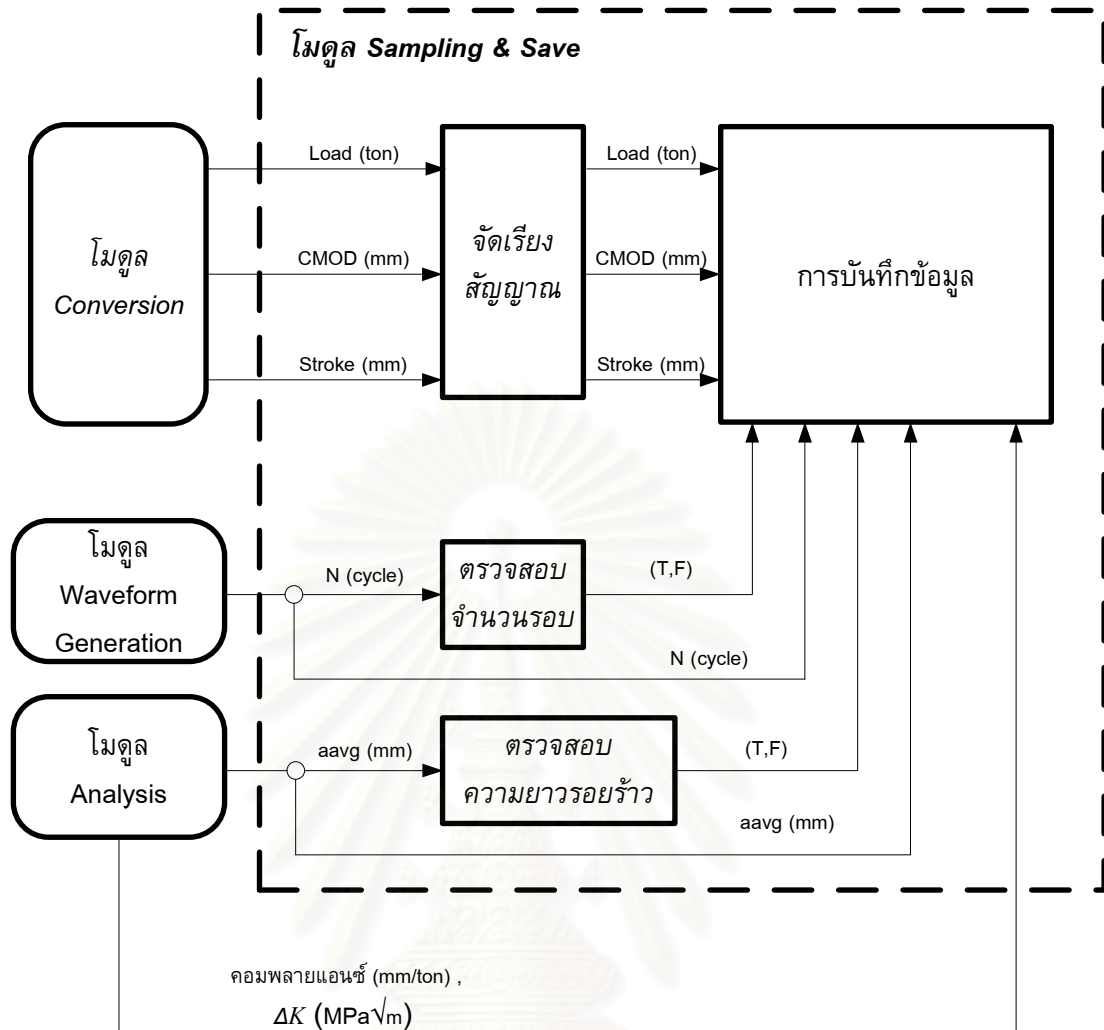
เกณฑ์ที่สามของการออกแบบโมดูล Sampling & Save คือ สามารถเลือกวิธีบันทึกข้อมูลได้หลายแบบ ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดไว้ 3 วิธี คือ 1) ไม่บันทึกข้อมูล 2) บันทึกทุกครั้งที่จำนวนรอบภาระถึงช่วงรอบภาระ (cycle interval) ที่กำหนด และ 3) บันทึกทุกครั้งที่ความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

โครงสร้างโมดูล Sampling & Save แสดงอยู่ในรูปที่ 3.23 (เฉพาะส่วนที่ล้อมกรอบเส้นประ) โมดูลประกอบด้วยซับวีไอ 4 อัน แบ่งตามหน้าที่ย่อย คือ จัดเรียงสัญญาณภาระ สัญญาณ  $CMOD$  และสัญญาณ  $Stroke$  ตรวจสอบจำนวนรอบ ตรวจสอบความยาวรอยร้าว และการบันทึกข้อมูล

#### 3.5.2 ผลการออกแบบ

##### 1) ซับวีไอ File\_sort signal.vi

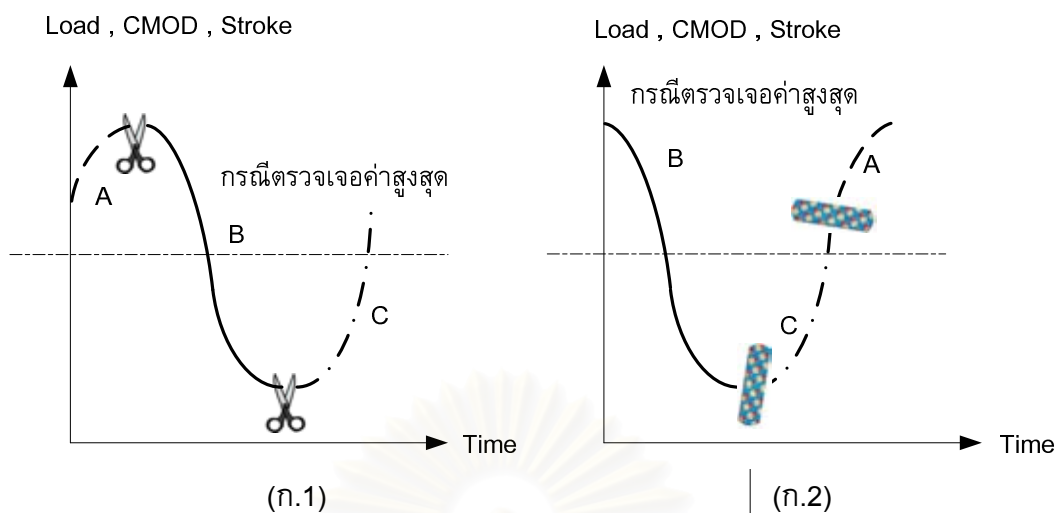
ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.21 ใช้ชื่อว่า จัดเรียงสัญญาณ) ทำหน้าที่รับสัญญาณภาระ สัญญาณ  $CMOD$  และสัญญาณ  $stroke$  ต่อจากนั้น ซับวีไอนี้จะจัดเรียงข้อมูลของสัญญาณเข้าดังกล่าวโดยให้ข้อมูลแรกเริ่มต้นที่ค่าสูงสุด จากรูปการจัดเรียงสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 กรณี



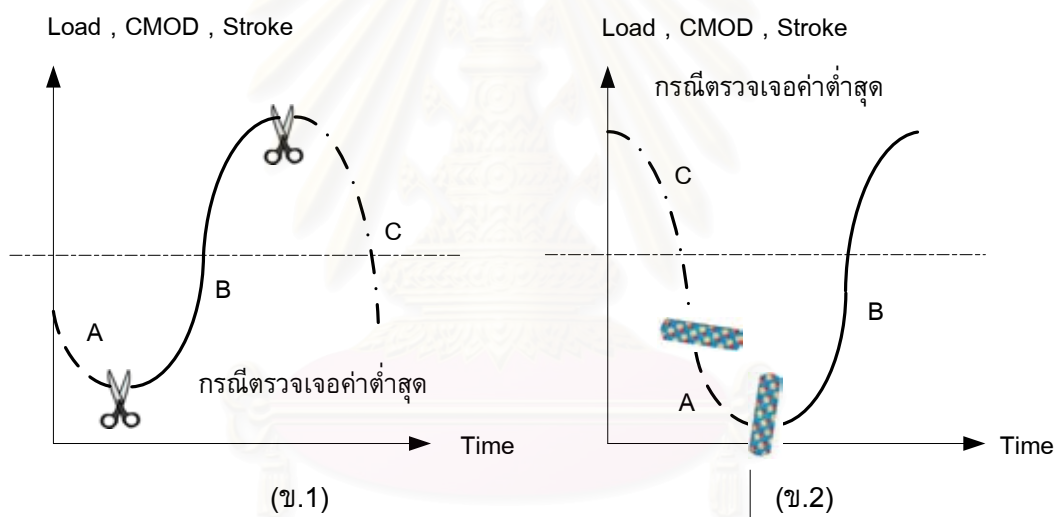
รูปที่ 3.21 ผลการออกแบบโมดูล Sampling & Save

กรณีแรก เมื่อซั้ววีไอเอนี้ตรวจเจอค่าสูงสุดของสัญญาณ ซั้ววีไอเอนี้จะแบ่งสัญญาณออกเป็น 3 ส่วน คือส่วน A , B และ C ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.22 (ก.1) จากนั้นซั้ววีไอเอนี้จะจัดเรียงสัญญาณใหม่ คือส่วน B , C และ A ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.22 (ก.2)

กรณีที่สอง เมื่อซั้ววีไอเอนี้ตรวจเจอค่าต่ำสุดของสัญญาณ ซั้ววีไอเอนี้จะแบ่งสัญญาณออกเป็น 3 ส่วน คือส่วน A , B และ C ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.22 (ข.1) จากนั้นโปรแกรมจะจัดเรียงสัญญาณใหม่ คือส่วน C , A และ B ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.22 (ข.2) แผนภาพของซั้ววีไอเอนี้แสดงอยู่ในภาคผนวก ข.30



รูปที่ 3.22 ก การจัดเรียงสัญญาณกรณีตรวจเจอค่าสูงสุด (ก) การแบ่งสัญญาณ (ก.1)  
(ก.2) การต่อสัญญาณ



รูปที่ 3.22 ข การจัดเรียงสัญญาณกรณีตรวจเจอค่าต่ำสุด (ก) การแบ่งสัญญาณ (ข.1)  
(ข.2) การต่อสัญญาณ

## 2) ซับวีไอ File\_detect\_crack length.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.21 ใช้ชื่อว่า ตรวจสอบความยาวรอยร้าว) ทำหน้าที่รับความยาวรอยร้าวจาก โมดูล Analysis ต่อจากนั้น ซับวีไอนี้จะตรวจสอบว่าความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดหรือยัง ถ้าถึงแล้ว ซับวีไอนี้จะส่งสัญญาณบูลีนเป็นจริง (T) ไปสั่งให้ซับวีไอ File\_manager.vi บันทึกข้อมูลขณะนั้น สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ 6 ขั้นตอน ดังแสดงอยู่ในจากรูปที่ 3.23

ขั้นตอนที่ 1 ชับวีโอนี้จะรับค่าผลต่างของความยาวรอยร้าวจากผู้ใช้ (ในแผนภาพกำหนดผลต่างของความยาวรอยร้าวเท่ากับ 0.4 มม.) ที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นโปรแกรมจะส่งสัญญาณบูลีนเป็นเท็จ (F) ออกไป

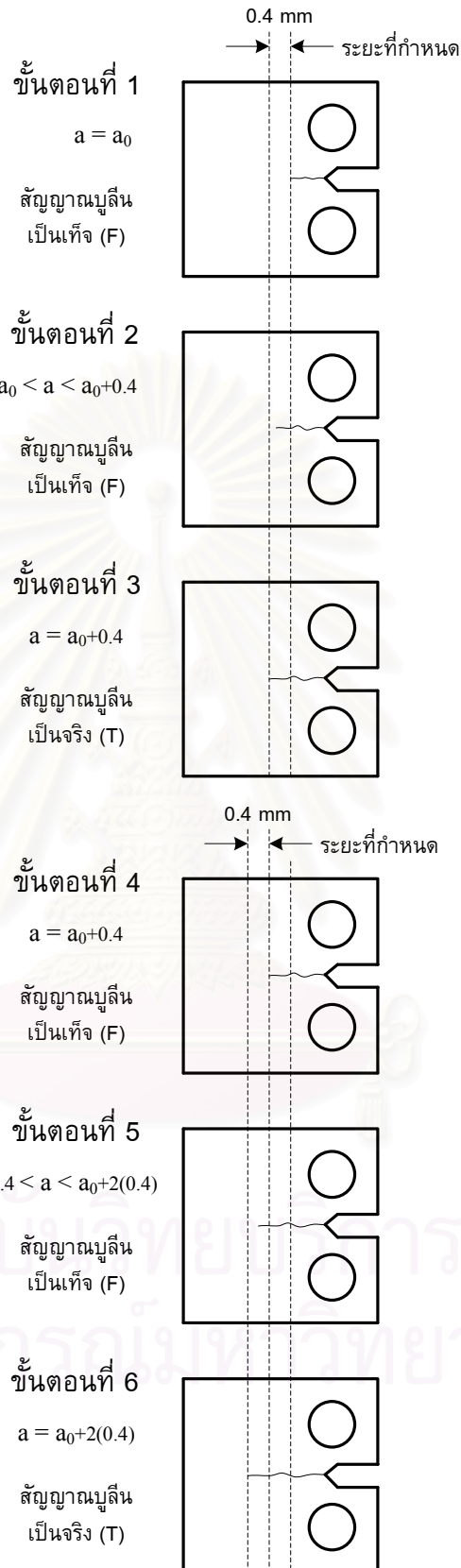
ขั้นตอนที่ 2 เมื่อความยาวรอยร้าวอยู่ในช่วงแรกของค่าที่กำหนด ชับวีโอนี้ยังคงส่งค่าเป็นเท็จออกไปเหมือนขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อความยาวรอยร้าวถึงค่าที่กำหนด ชับวีโอนี้จะส่งค่าเป็นจริงไปยังโมดูล Test Type และ โมดูล Sampling & Save เพื่อปรับลดภาระ และบันทึกค่าตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 ชับวีโอนี้จะกำหนดค่าผลต่างของความยาวรอยร้าวใหม่เป็น 2 เท่าของค่าเดิม (ในแผนภาพกำหนดค่าผลต่างของความยาวรอยร้าวเท่ากับ 0.8 มม.)

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อความยาวรอยร้าวอยู่ระหว่างช่วงที่สองของค่าที่กำหนดดังรูป ชับวีโอนี้จะส่งสัญญาณเป็นเท็จออกไป

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อความยาวรอยร้าวถึงค่าที่กำหนด ชับวีโอจะส่งค่าเป็นจริงไปยังโมดูล Test Type และ โมดูล Sampling & Save เพื่อปรับลดภาระ และบันทึกค่าอีกครั้ง จากนั้นชับวีโอจะกลับไปทำงานซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยเพิ่มผลต่างของความยาวรอยร้าวเป็นสามเท่าจากค่าเดิม แผนภาพของชับวีโอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ File\_detect\_crack length.vi

## 3) ซับวีไอ File\_detect\_No. cycle.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.21 ใช้ชื่อว่า ตรวจสอบจำนวนรอบ) ทำหน้าที่รับจำนวนรอบจากโมดูล Waveform generation ต่อจากนั้น ซับวีไอนี้จะตรวจสอบจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดหรือยัง ถ้าถึงค่าที่กำหนดแล้ว ซับวีไอนี้จะส่งสัญญาณบูลีนเป็นจริง (T) ไปสั่งให้ซับวีไอตัวจัดการไฟล์บันทึกข้อมูล โดยการทำงานของซับวีไอนี้แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนดังนี้ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.24

ขั้นตอนที่ 1 ซับวีไอจะรับค่าผลต่างของจำนวนรอบจากผู้ใช้ (ในแผนภาพกำหนดค่าผลต่างของจำนวนรอบเท่ากับ 10,000 รอบ) และซับวีไอจะส่งสัญญาณบูลีนเป็นเท็จ (F) ออกไป

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อจำนวนรอบยังอยู่ในช่วงที่กำหนด ซับวีไอยังคงส่งค่าเป็นเท็จออกไปเหมือนขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนด ซับวีไอจะส่งสัญญาณบูลีนเป็นจริงไปยัง โมดูล Sampling & Save เพื่อบันทึกค่าตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 ซับวีไอจะกำหนดค่าผลต่างของจำนวนรอบใหม่เป็นสองเท่าของค่าเดิม และส่งสัญญาณบูลีนเป็นเท็จออกไป

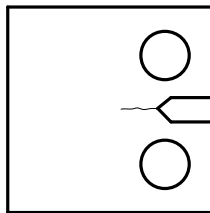
ขั้นตอนที่ 5 เมื่อจำนวนรอบอยู่ระหว่างช่วงที่สองของค่าที่กำหนดดังรูป ซับวีไอจะรอให้จำนวนรอบถึงค่าที่กำหนด โดยส่งสัญญาณเป็นเท็จออกไป

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อจำนวนรอบถึงสองเท่าของค่าที่กำหนดแล้ว ซับวีไอจะส่งสัญญาณบูลีนที่เป็นจริงออกไป เพื่อสั่งให้บันทึกค่าอีกครั้งที่โมดูล Sampling & Save จากนั้น ซับวีไอจะกลับไปทำงานซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยเพิ่มผลต่างของจำนวนรอบเป็น สามเท่าจากค่าเดิม อย่างไรก็ตาม เกณฑ์บันทึกนี้ใช้กับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และแบบควบคุม  $\Delta K$  ไม่ได้ แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.28

ขั้นตอนที่ 1

$$N = 0$$

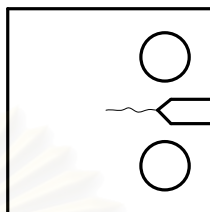
สัญญาณบรูส  
เป็นเท็จ (F)



ขั้นตอนที่ 2

$$0 < N < 10,000$$

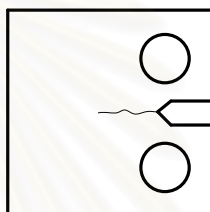
สัญญาณบรูส  
เป็นเท็จ (F)



ขั้นตอนที่ 3

$$N = 10,000$$

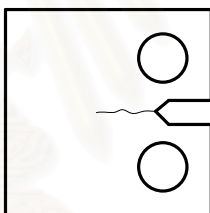
สัญญาณบรูส  
เป็นจริง (T)



ขั้นตอนที่ 4

$$N = 10,000$$

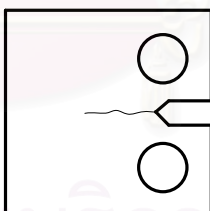
สัญญาณบรูส  
เป็นเท็จ (F)



ขั้นตอนที่ 5

$$10,000 < N < 20,000$$

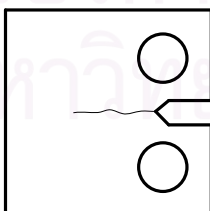
สัญญาณบรูส  
เป็นเท็จ (F)



ขั้นตอนที่ 6

$$N = 20,000$$

สัญญาณบรูส  
เป็นจริง (T)



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการทำงานของซบวีไอ File\_detect\_No. cycle.vi



#### 4) ซับวีไอ File\_manager.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.21 ใช้ชื่อว่า การบันทึกข้อมูล) ทำหน้าที่รับข้อมูลสัญญาณ ภาระ สัญญาณ  $CMOD$  และสัญญาณ  $Stroke$  ความยาวรอยร้าว พารามิเตอร์  $\Delta K$  จำนวนรอบ ภาระ คอมพลายแอนซ์ ภาระสูงสุด และภาระต่ำสุด ต่อจากนั้น ซับวีไอนี้จะรอรับสัญญาณบูลีน จาก ซับวีไอ File\_detect\_crack length.vi หรือ ซับวีไอ File\_detect\_No. cycle.vi ถ้าสัญญาณบูลีนที่รับมาเป็นจริง ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกลงฮาร์ดดิสก์ แต่ถ้าสัญญาณบูลีนเป็นเท็จ (F) ซับวีไอนี้จะรอบันทึกต่อไป แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.26

### 3.6 การออกแบบโมดูล Test type

#### 3.6.1 ภาพรวมของการออกแบบ

เกณฑ์แรกของการออกแบบโมดูล Test type คือ โมดูลสามารถเพิ่มการทดสอบหา อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น ถ้าต้องการเพิ่มวิธีการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ชนิดควบคุม  $P_{max}$  ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.11ค ผู้ใช้จะต้องเขียนฟังก์ชันการทดสอบนี้ขึ้นมา แล้วนำไปวางไว้ในโครงสร้างกรณี เช่นเดียวกับซับวีไอการทดสอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

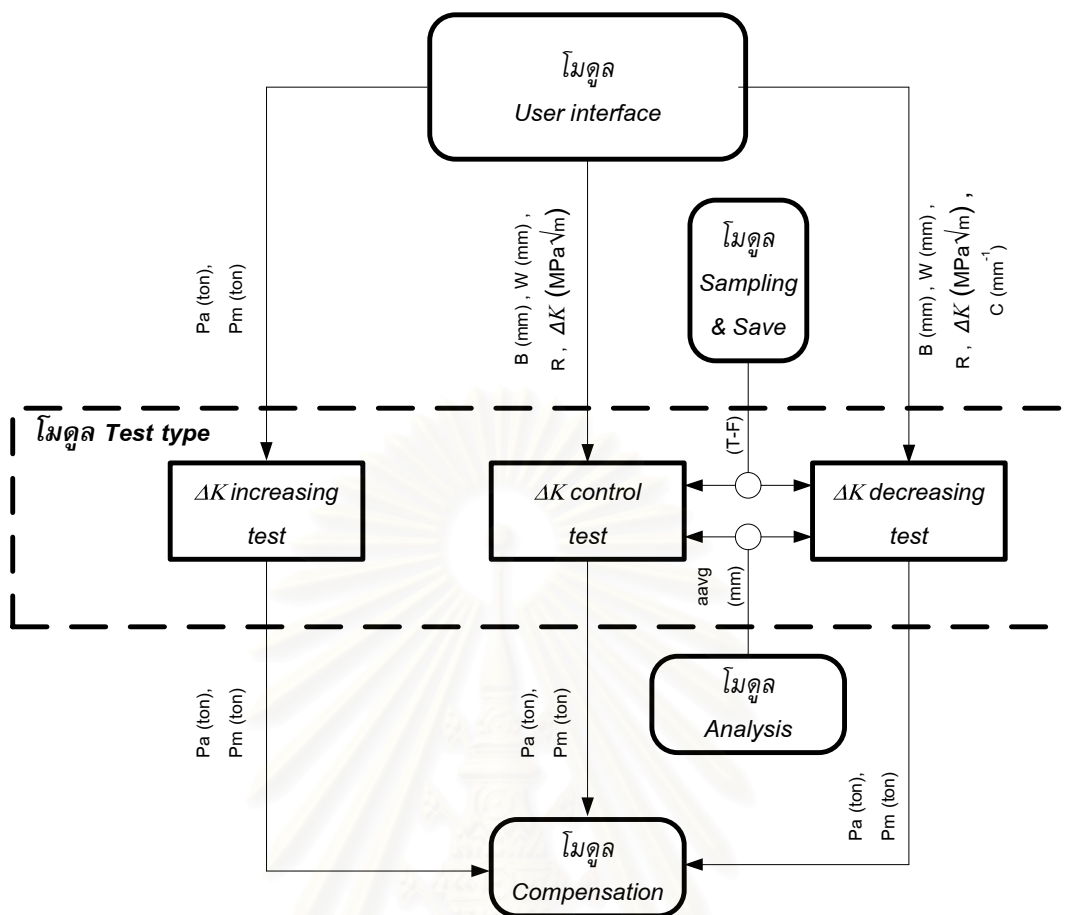
เกณฑ์ที่สองของการออกแบบโมดูลนี้ คือ โมดูลสามารถเพิ่มฟังก์ชันการปรับลดภาระ ของชิ้นงานชนิดอื่น ๆ ได้ โดยมีผลกระทบน้อยต่อส่วนอื่น ๆ ของโปรแกรม เกณฑ์นี้ใช้หลักการ ออกแบบเดียวกับเกณฑ์แรก

โครงสร้างหลักของโมดูลนี้ใช้โครงสร้างกรณี ซับวีไอการทดสอบแต่ละชนิดถูกบรรจุไว้ในแต่ละกรอบของโครงสร้างกรณี ซับวีไอการทดสอบแบ่งออกตามชนิด คือ ซับวีไอการทดสอบแบบควบคุมภาระ ซับวีไอการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และซับวีไอการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ดังแสดงในรูปที่ 3.25

#### 3.6.2 ผลการออกแบบ

##### 1) ซับวีไอ FCGRtest\_K increasing.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.25 ใช้ชื่อว่า  $\Delta K$  Increasing test) รับภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระจาก โมดูล User interface ต่อจากนั้นโมดูล User interface จะนำข้อมูลดังกล่าวส่งผ่านไปยัง โมดูล Compensation เพื่อชดเชยภาระต่อไป



รูปที่ 3.25 ผลการออกแบบโมดูล Test type

2) ซับวีไอ FCGRtest\_Kdecreasing.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.25 ใช้ชื่อว่า  $\Delta K$  decreasing test) ทำหน้าที่รับความยาวรอยร้าวจากโมดูล Analysis รับ  $\Delta K$ ,  $R$ ,  $W$ ,  $B$  และ  $C'$  จากโมดูล User interface และรับสัญญาณบูลีนจากโมดูล Sampling & Save ถ้าสัญญาณบูลีนเป็นจริง (T) ซับวีไอนี้จะคำนวณภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระใหม่ (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 2.6) จากนั้นซับวีไอนี้จะส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังโมดูล Load compensation เพื่อชดเชยภาระต่อไป แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.14

3) ซับวีไอ FCGRtest\_Kconstant.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.25 ใช้ชื่อว่า  $\Delta K$  control test) ทำหน้าที่รับความยาวรอยร้าวจากโมดูล Analysis รับ  $\Delta K$ ,  $R$ ,  $W$  และ  $B$  จากโมดูล User interface และรับสัญญาณบูลีนจากโมดูล Sampling & Save จากนั้นซับวีไอนี้จะรอรับสัญญาณบูลีนเป็นจริง เพื่อคำนวณภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ความยาวรอยร้าวขณะนั้น การคำนวณจะเหมือนกับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  เพียงแต่ใช้ค่าคงที่การปรับลดเท่ากับศูนย์ ต่อจากนั้นโมดูลนี้จะส่งค่าภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่คำนวณได้ไปยังโมดูล Load compensation เพื่อชดเชยภาระต่อไป แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.16

### 3.7 การออกแบบโมดูล Load compensation

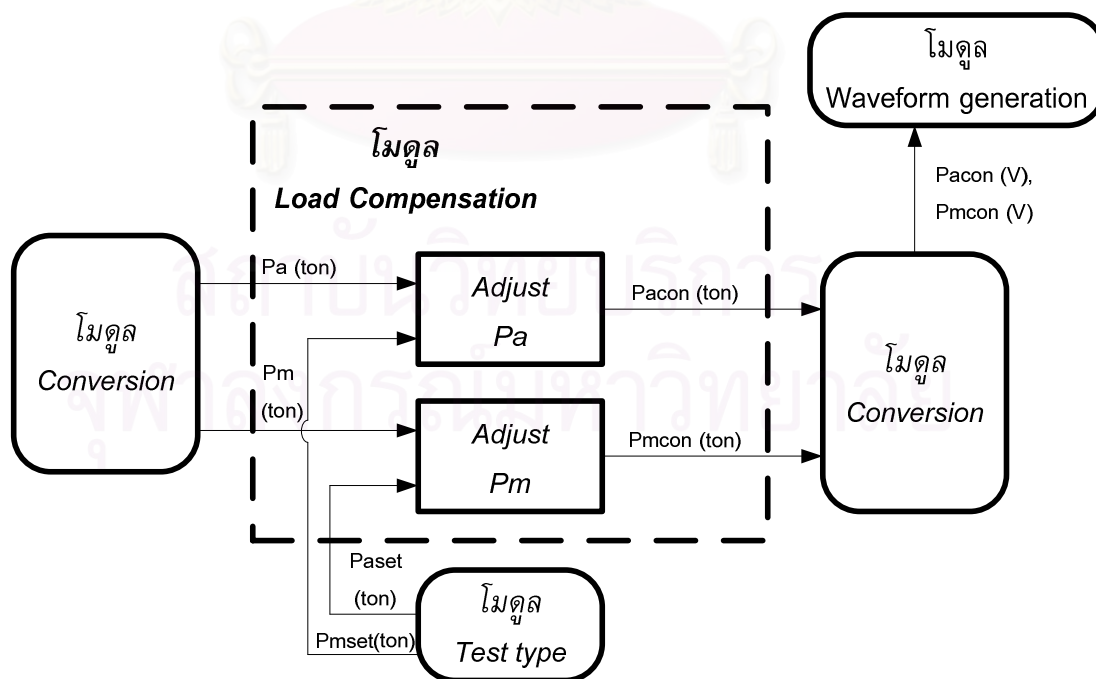
#### 3.7.1 ภาพรวมของการออกแบบ

เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถปรับแก้ gain ได้อัตโนมัติเมื่อรับสัญญาณภายนอกที่สร้างจากโปรแกรมที่พัฒนา ทำให้กระทำกับชิ้นงานทดสอบแตกต่างจากค่าที่กำหนด วิทยานิพนธ์นี้จึงเพิ่มโมดูล Load compensation เพื่อทำหน้าที่ปรับภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระให้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดมากขึ้น การออกแบบโมดูลนี้กำหนดว่าผลต่างของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบกับค่าที่กำหนดมีค่าไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระ และไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์สำหรับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และควบคุม  $\Delta K$  โมดูล Load compensation (เฉพาะส่วนที่ถูกล้อมกรอบด้วยเส้นประ) จากรูปโมดูลประกอบด้วยซัฟวีไอ 2 อัน สำหรับชดเชยภาระเฉลี่ย (Adjust Pm) และชดเชยแอมพลิจูดภาระ (Adjust Pa) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.26

#### 3.7.2 ผลการออกแบบ

เนื่องจากซัฟวีไอ 1) Com\_adjust mean load.vi และ 2) Com\_adjust amplitude load.vi มีหน้าที่คล้ายกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายการทำงานของทั้ง 2 ซัฟวีไอไปพร้อมกัน ซัฟวีไอทั้งสองมีการทำงานดังนี้

1) คำนวณผลต่างของภาระเฉลี่ย (หรือแอมพลิจูดภาระ) ที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบกับภาระเฉลี่ย (หรือแอมพลิจูดภาระ) ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ด้วยสมการที่ 3.5 (หรือ 3.6)



รูปที่ 3.26 ผลการออกแบบโมดูล Load compensation

$$P_{merr} = P_{mset} - P_m \quad (3.5)$$

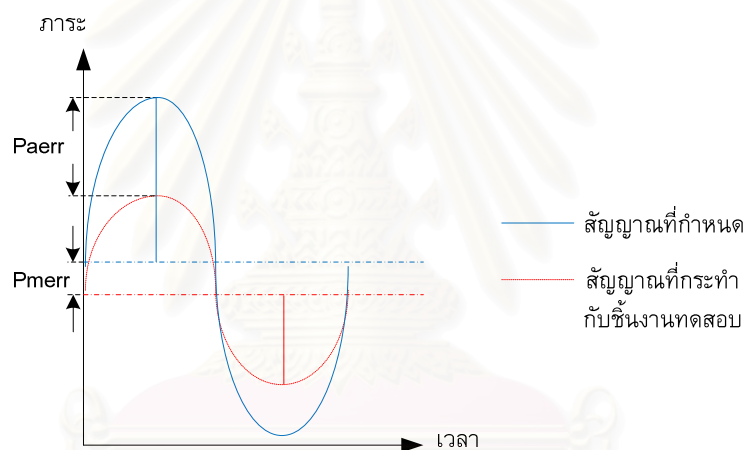
$$P_{aerr} = P_{aset} - P_a \quad (3.6)$$

2) กำหนดภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระปรับแก้ (แสดงอยู่ในรูปที่ 3.28) ด้วยสมการต่อไปนี้

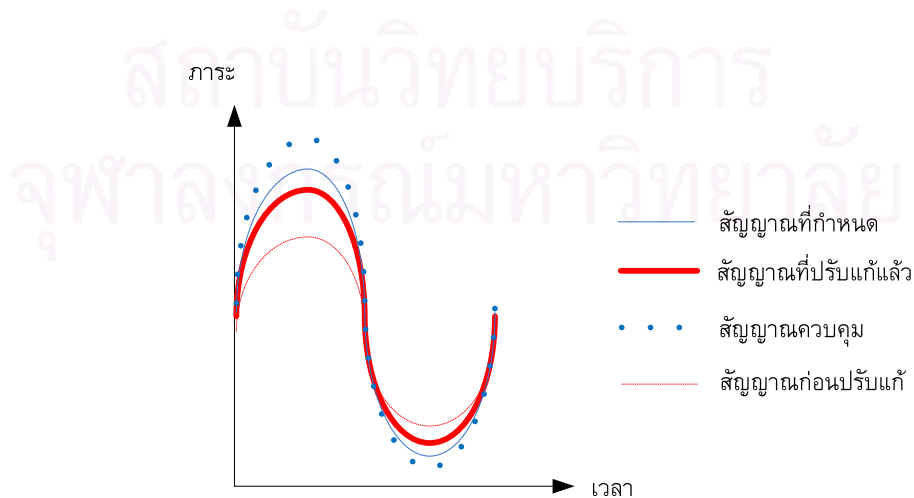
$$P_{mcon} = P_{mset} + \frac{P_{merr}}{5} \quad (3.7)$$

$$P_{acon} = P_{aset} + \frac{P_{aerr}}{5} \quad (3.8)$$

3) ซับวีไอจะส่งภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ปรับแก้แล้วไปยังโมดูล Conversion เพื่อแปลงหน่วย จากนั้นโมดูล Waveform generation จะสร้างสัญญาณภาระจากข้อมูลภาระดังกล่าว แล้วส่งไปยังเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.27 ผลต่างของสัญญาณภาระ



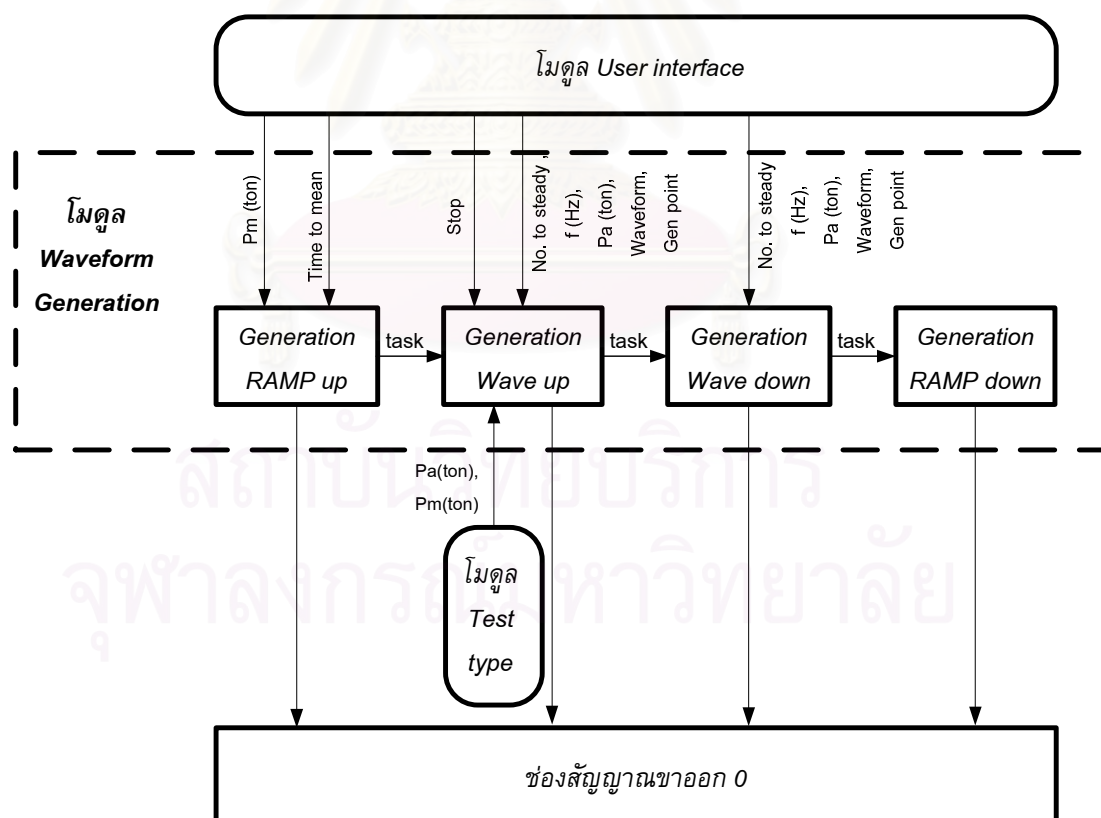
รูปที่ 3.28 สัญญาณควบคุมปรับแก้

4) ชั้ววีไอจะทำขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 3 ซ้ำอีกครั้ง (สำหรับโปรแกรมนี้ผู้วิจัย กำหนดจำนวนรอบถัดไปที่ต้องการทำซ้ำไว้ที่ 10 รอบ) การทำซ้ำจะดำเนินต่อไปจนกระทั่ง ส่วนต่างของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระมีค่าน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ จึงถือว่าสิ้นสุดการปรับแก้ เมื่อไรก็ตามที่ผลต่างของภาระมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โปรแกรมจะเข้าสู่การปรับแก้อีกครั้งโดยอัตโนมัติ แผนภาพของชั้ววีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.38 และ ข.39

### 3.8 การออกแบบโมดูล Waveform generation

#### 3.8.1 ภาพรวมของการออกแบบ

เกณฑ์การออกแบบโมดูลนี้ คือ โมดูลต้องทำงานคล้ายกับเครื่องกำเนิดคลื่นภาระ (Waveform generator) โดยสามารถเปลี่ยนรูปคลื่นภาระชนิดต่าง ๆ และนับจำนวนรอบภาระได้ วิทยานิพนธ์นี้สร้างเงื่อนไขการออกแบบดังนี้ 1) โมดูลสามารถสร้างคลื่นภาระได้ 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 2) สามารถนับรอบภาระได้จากฟังก์ชันนับรอบภาระสำเร็จรูปในชั้ววีไอ AO Write (scaled array).vi ผลการออกแบบโมดูลนี้ประกอบด้วยชั้ววีไอต่างๆ ได้แก่ ชั้ววีไอ Generation Ramp up ชั้ววีไอ Generation Ramp down ชั้ววีไอ Generation wave up และชั้ววีไอ Generation wave down ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ผลการออกแบบโมดูล Waveform generation

### 3.8.2 ผลการออกแบบ

#### 1) ซับวีไอ WG\_generation\_ramp up.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.29 ใช้ชื่อว่า Generation RAMP up) รับข้อมูลภาระเฉลี่ย และเวลาที่ต้องการตั้งขึ้นงานทดสอบจากภาระศูนย์จนถึงภาระเฉลี่ยจากโมดูล User interface แล้วโมดูลนี้จะสร้างสัญญาณ Ramp (ดังแสดงในรูปที่ 3.7) ส่งไปยังเครื่องทดสอบ จากนั้นโมดูลนี้จะสั่งให้ โมดูล WG\_waveform\_start.vi เริ่มการทำงานต่อไป แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.1

#### 2) ซับวีไอ WG\_waveform\_start.vi

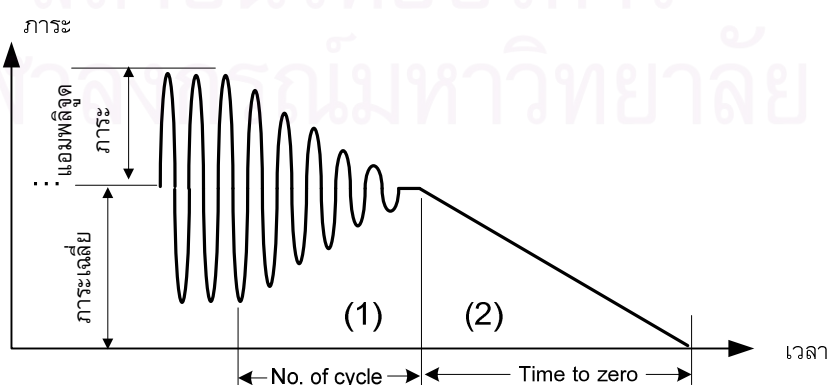
ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.29 ใช้ชื่อว่า Generation Wave up) รับข้อมูลจำนวนรอบของภาระที่ต้องการเพิ่มขนาดแอมพลิจูดภาระให้ถึงแอมพลิจูดภาระที่กำหนด (No. to steady) ความถี่ภาระ (f) แอมพลิจูดภาระ (Pa) รูปร่างของภาระ (Waveform) และจำนวนจุดการสุ่มสัญญาณขาออก (Genpoint) จากนั้นโมดูลนี้จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณภาระ แล้วส่งไปยังเครื่องทดสอบ ระหว่างการทดสอบโมดูลจะรอรับภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระจากโมดูล Test type ในกรณีทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และ ควบคุม  $\Delta K$  นอกจากนี้ซับวีไอนี้ยังทำหน้าที่นับจำนวนรอบภาระแล้วส่งไปแสดงค่าที่โมดูล User interface แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.5

#### 3) ซับวีไอ WG\_waveform\_stop.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.29 ใช้ชื่อว่า Generation Wave down) จะรอรับสัญญาณบวกลบเป็นจริง (T) เพื่อลดแอมพลิจูดภาระลงจนเป็นศูนย์ ดังแสดงรูปที่ 3.30 แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.7

#### 4) ซับวีไอ WG\_ramp down.vi

ซับวีไอนี้ (ในรูปที่ 3.29 ใช้ชื่อว่า Generation RAMP down) ซับวีไอ Generation Ramp down ทำหน้าที่ลดภาระเฉลี่ยจากค่าที่กำหนดจนถึงค่าศูนย์ ดังรูปที่ 3.30 (2) แผนภาพของซับวีไอแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.9



รูปที่ 3.30 การปรับลดภาระในระหว่างหยุดการทดสอบ

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และการเตรียมการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์และการเตรียมการทดสอบ หัวข้อที่ 4.1 อธิบายระบบทดสอบ หัวข้อย่อยที่ 4.1.1 อธิบายหลักการทำงานของระบบทดสอบ หัวข้อที่ 4.1.2 อธิบายรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทดสอบ หัวข้อที่ 4.2 อธิบายการเตรียมการทดสอบ หัวข้อย่อยที่ 4.2.1 อธิบายวิธีสอบเทียบคลิปเกจ หัวข้อที่ 4.2.2 อธิบายวิธีตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรม

#### 4.1 ระบบทดสอบ

##### 4.1.1 หลักการทำงาน

พิจารณาระบบทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ ในรูปที่ 4.1 กระบวนการทำงานเริ่มต้นที่ระบบคอมพิวเตอร์ โปรแกรมทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในคอมพิวเตอร์ จะสั่งให้ DAQ การ์ด สร้างสัญญาณการทดสอบตามสภาวะทดสอบที่ผู้กำหนด จากนั้น DAQ การ์ดจะส่งสัญญาณการผ่านกล่องรวมสัญญาณไปที่ชุดควบคุม เพื่อขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งไปยังอุปกรณ์สร้างภาระ ต่อจากนั้น เซอร์โววาล์วจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันเข้ากระบอกลูกสูบเพื่อให้ได้แรงดึงตามต้องการ

ขณะที่ชิ้นงานทดสอบรับภาระ (ภายในเส้นประด้านซ้ายบน ในรูปที่ 3.1) โหลดเซลล์ และ LVDT จะส่งสัญญาณการและสัญญาณ *stroke* ไปยังชุดควบคุม ขณะเดียวกันคลิปเกจจะส่งสัญญาณ *CMOD* ไปขยายสัญญาณที่ สเตรนมิเตอร์ (strain meter) ก่อนส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์ (ภายในเส้นประด้านขวาล่าง) ชุดควบคุม (controller) จะรับสัญญาณการ *CMOD* และ *stroke* จากนั้นกล่องรวมสัญญาณส่งสัญญาณทั้งหมดไปยัง DAQ การ์ด เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นคอมพิวเตอร์จะรับสัญญาณเหล่านี้ไปประมวลผล และสร้างสัญญาณการใหม่ไปควบคุมเครื่องทดสอบต่อไป

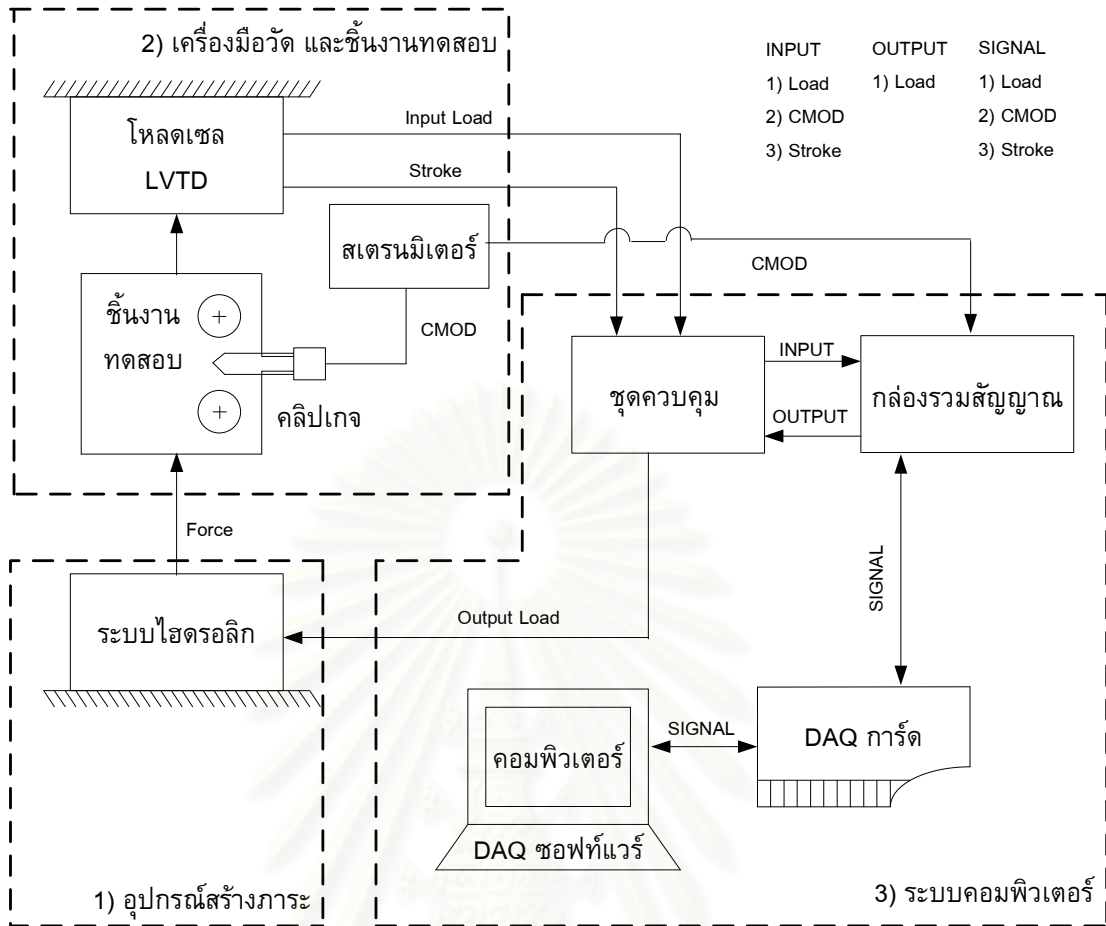
##### 4.1.2 รายละเอียดของอุปกรณ์

###### 1) ชุดดึงชิ้นงาน

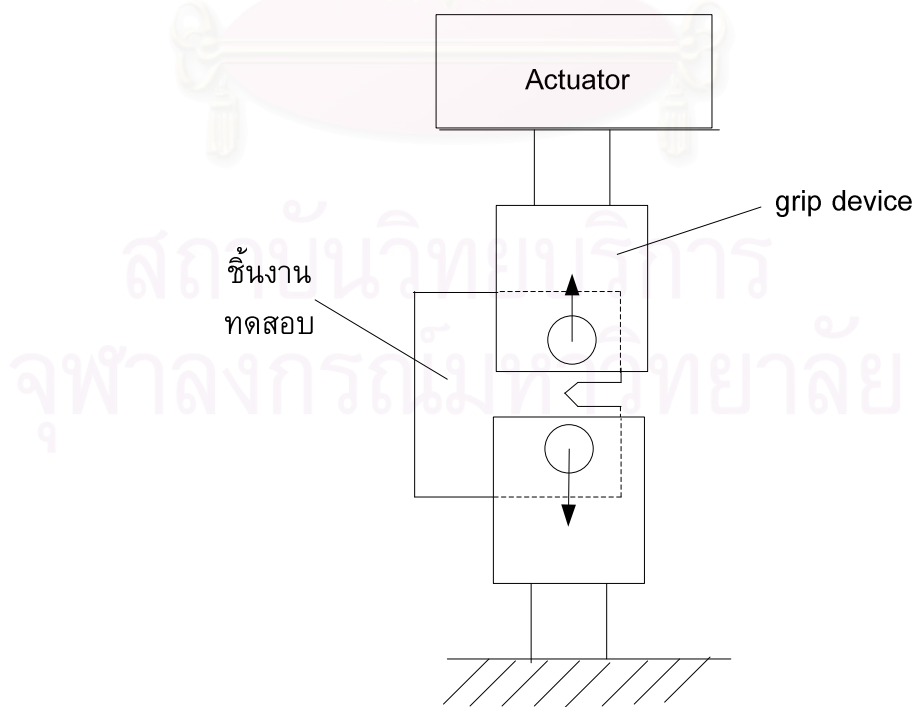
ชุดดึงชิ้นงานประกอบด้วย อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ (grip device) และ ชุดส่งกำลัง (actuator) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ชุดดึงชิ้นงานทำหน้าที่จับยึดชิ้นงานในขณะทดสอบ ชุดส่งกำลัง ทำหน้าที่สร้างภาระให้กับชิ้นงานทดสอบ

###### 2) คลิปเกจ

คลิปเกจ (Clip gage) ทำหน้าที่วัดระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบวิทยานิพนธ์นี้ใช้คลิปเกจที่สร้างขึ้นเอง [22] มีลักษณะคานคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (รูปที่ 4.3) มีความไว เท่ากับ  $7.82 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$  และมีพิสัยในการวัด 4 mm



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบ



รูปที่ 4.2 ชัดตั้งชิ้นงาน





รูปที่ 4.3 คลิปเกจ

### 3) สเตรนมิเตอร์

สเตรนมิเตอร์ทำหน้าที่จ่ายไฟให้วงจรสเตรนเกจในคลิปเกจ รับสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรสเตรนเกจ และขยายสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของวงจรสเตรนเกจ สเตรนมิเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท TecQuipment Ltd รุ่น E10 MKII

### 4) คอนโทรลเลอร์

คอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และส่งไปยังอุปกรณ์สร้างภาระ คอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นของบริษัท Shimadzu รุ่น 4826 ประกอบด้วยช่องสัญญาณขาเข้า 2 ช่องสัญญาณ ดังนี้

ช่องสัญญาณภาระขาเข้าของชุดควบคุม มีพิสัยของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ  $\pm 5$  V และมีพิสัยภาระให้เลือก คือ  $\pm 3$  ตัน  $\pm 6$  ตัน  $\pm 15$  ตัน และ  $\pm 30$  ตัน

ช่องสัญญาณระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบไฮดรอลิกขาเข้าของชุดควบคุม มีพิสัยของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ  $\pm 5$  V และมีพิสัย *stroke* ให้เลือก คือ  $\pm 2.5$  มม.  $\pm 5.0$  มม.  $\pm 12.0$  มม. และ  $\pm 25.0$  มม.

ช่องสัญญาณภาระขาออก มีพิสัยของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เลือกใช้ที่  $\pm 5$  V หรือ  $\pm 10$  V ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เลือกใช้ขีดจำกัดของช่องรับสัญญาณเท่ากับ  $\pm 5$  V เพื่อให้เหมาะสมกับ DAQ การ์ด

### 5) กล่องรวมสัญญาณ

กล่องรวมสัญญาณ (shielded connector block) ทำหน้าที่รับสัญญาณขาเข้าจากเครื่องมือวัดต่าง ๆ แล้วส่งไปยัง DAQ การ์ด และส่งสัญญาณจาก DAQ การ์ดไปควบคุมเครื่องจักร

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ กล่องรวมสัญญาณของบริษัท NI (National instrument) รุ่น BNC 2120 มีช่องรับสัญญาณขาเข้า 8 ช่อง และ ช่องรับสัญญาณขาออก 2 ช่อง

## 6) DAQ การ์ด

DAQ การ์ด ทำหน้าที่แปลงสัญญาณขาเข้าจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และแปลงสัญญาณของออกจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ DAQ การ์ด ของบริษัท NI (Nation instrument) รุ่น PCI 6024E ติดตั้งที่พอร์ต PCI ของเครื่องคอมพิวเตอร์

DAQ การ์ด มีความจำแนกชัด (resolution) เท่ากับ 12 บิต สามารถรับค่าสัญญาณขาเข้าได้สูงสุดเท่ากับ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที และส่งค่าสัญญาณขาออกได้สูงสุดเท่ากับ 200,000 ข้อมูลต่อวินาที นอกจากนี้ DAQ การ์ดนี้สามารถกำหนดพิสัยของช่องสัญญาณได้ 4 ค่า คือ  $\pm 10V$ ,  $\pm 5 V$ ,  $\pm 500 mV$ , และ  $\pm 50 mV$

วิทยานิพนธ์นี้กำหนดพิสัยที่ช่องสัญญาณภาระเท่ากับ  $\pm 5 V$  ที่ช่องสัญญาณ *CMOD* เท่ากับ  $\pm 50 mV$  และที่ช่องสัญญาณ *stroke* เท่ากับ  $\pm 50 mV$  ตามลำดับ

## 7) คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่วิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวผ่านทาง โปรแกรมแล็บวิว และเก็บข้อมูลการทดสอบ คอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นของบริษัท HP (Hewlett packard) รุ่น Pavilion 960891 มีความเร็วในการประมวลผลเท่ากับ 1.73 GHz (CPU) และหน่วยความจำสำรอง (RAM) เท่ากับ 1024 MB.

## 8) ซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ชื่อ LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) เวอร์ชัน 7.2 ของบริษัท NI (National Instruments)

## 9) ชิ้นงานทดสอบ

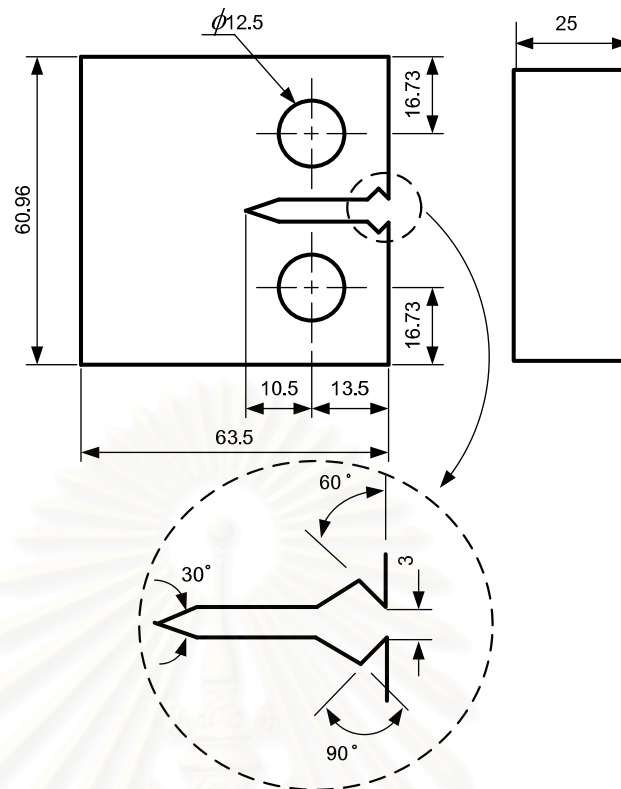
ชิ้นงานทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้คือ Compact tension (CT) กว้างเท่ากับ 50 มม. หนาเท่ากับ 25 มม. (รูปที่ 4.4) ทำจากอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651

## 10) กล้องไมโครสโคป

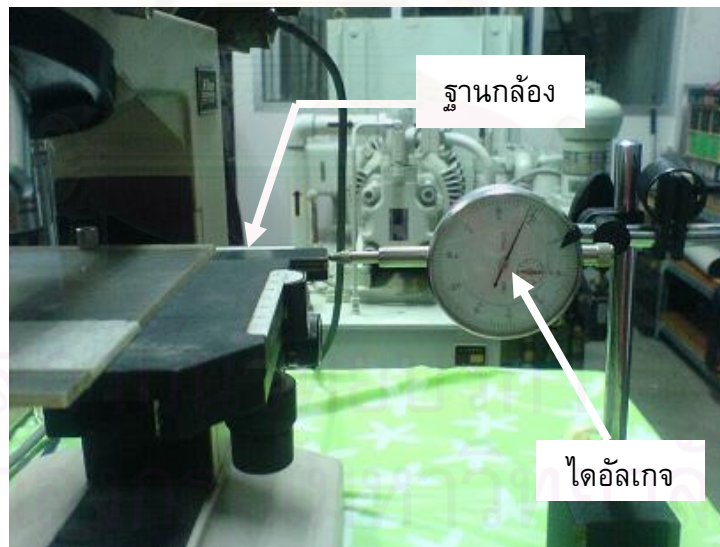
กล้องไมโครสโคป (microscope) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นของบริษัท Nikon รุ่น AFX-II มีอัตราขยายเท่ากับ 100, 200, 400, และ 1,000 เท่า กล้องไมโครสโคปถูกใช้ดัดแปลงเพื่อใช้วัดความยาวรอยร้าว โดยนำไดอัลเกจมาวางไว้ด้านข้างกับฐานวางชิ้นงานดังรูป 4.5 ไดอัลเกจที่ใช้มีพิสัยการวัด 30 มม. ความจำแนกชัด 1 ไมโครเมตร

## 11) เครื่องสอบเทียบคลิปเกจ

เครื่องสอบเทียบคลิปเกจ (Calibrator) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นของบริษัท Shimudzu รุ่น CDE -25 ความจำแนกชัด 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.4 ชิ้นงานแบบ Compact tension (CT) (หน่วย มม.)



รูปที่ 4.5 การประยุกต์ใช้ไดอัลเกจกับกล้องไมโครสโคปเพื่อวัดความยาวรอยร้าว

## 4.2 การเตรียมการทดสอบ

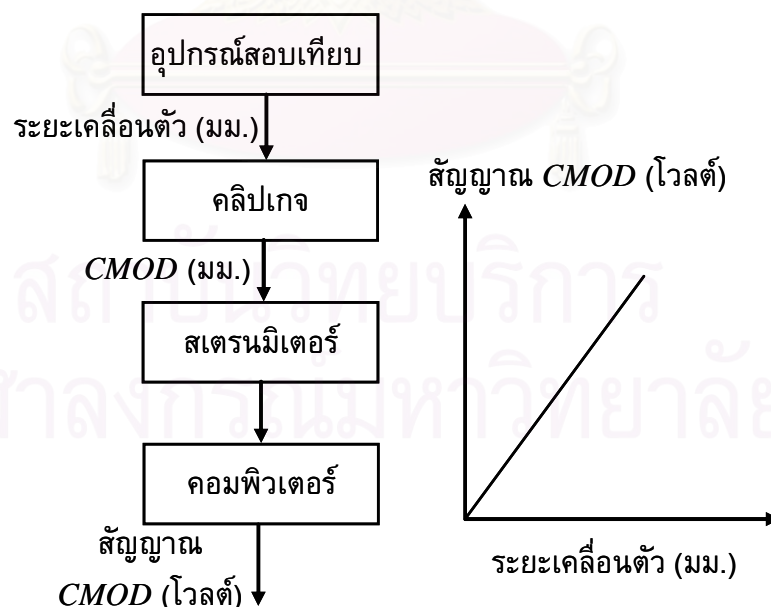
การเตรียมการทดสอบประกอบด้วย การสอบเทียบคลิปเกจ และการตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรม

### 4.2.1 การสอบเทียบคลิปเกจ

เนื่องจากคลิปเกจที่ใช้เป็นคลิปเกจที่สร้างขึ้นเอง เมื่อนำมาใช้กับกับระบบทดสอบปัจจุบันจึงต้องสอบเทียบก่อน การสอบเทียบมี 2 อย่าง คือ 1) การสอบเทียบสถิตย์ (static calibration) และ 2) การสอบเทียบพลวัต (dynamic calibration)

#### 4.2.1.1 การสอบเทียบสถิตย์

หลักการที่ใช้ในการสอบเทียบสถิตย์ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.6 จากรูปอุปกรณ์สอบเทียบ (calibrator) ทำหน้าที่กำหนดระยะเคลื่อนตัวที่ทราบค่าให้คลิปเกจ ระยะเคลื่อนตัวนี้จะเท่ากับระยะเคลื่อนตัวที่คลิปเกจวัดในการทดสอบ (หรือ *CMOD*) จากนั้นสัญญาณ *CMOD* จากคลิปเกจ จะถูกขยายด้วยสเตรนมิเตอร์ และแสดงผลด้วยโปรแกรมแล็บวิว อุปกรณ์สอบเทียบเป็นของบริษัท Shimadzu มีความจำแนกชัด เท่ากับ 1 ไมโครเมตร เมื่อนำสัญญาณ *CMOD* กับระยะเคลื่อนตัวของอุปกรณ์สอบเทียบมาพล็อตกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.145 โวลต์/มม. ข้อมูลสอบเทียบแสดงอยู่ในภาคผนวก จ



รูปที่ 4.6 หลักการและลักษณะของผลการสอบเทียบคลิปเกจ

#### 4.2.1.2 การสอบเทียบพลวัต

การสอบเทียบพลวัตในที่นี้คือ การหาฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจในการวัดค่า  $CMOD$  การทดสอบ เริ่มจากนำชิ้นงานที่ทราบความยาวรอยร้าวมารับภาระล้าความถี่ต่าง ๆ แล้วบันทึกผลการวัด  $CMOD$  และภาระ การทดสอบใช้ชิ้นงาน 4 ชิ้นที่มีความยาวรอยร้าวเท่ากับ 10.5 มม., 14.7 มม., 20.1 มม. และ 25.4 มม. ภาระล้าที่ใช้มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.43 และ 0.8 และมีความถี่ภาระ 1, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เฮิรท์ส ข้อมูลภาระ และข้อมูล  $CMOD$  จะถูกนำมาคำนวณหาคอมพลายแอนซ์ และพล็อตที่ความถี่ภาระต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า คอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานขึ้นกับความยาวรอยร้าวและความถี่ แต่ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ คอมพลายแอนซ์มีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นเนื่องจากคลิปเกจวัด  $CMOD$  ได้น้อยลงเมื่อความถี่ภาระสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กราฟมีแนวโน้มคงที่เมื่อความถี่ภาระต่ำกว่า 1 เฮิรท์ส ดังนั้นคอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ 1 เฮิรท์ส จึงถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการหาฟังก์ชันปรับแก้  $F$  ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$F = \frac{C_{1Hz}}{C_{xHz}} \quad (4.1)$$

ผลการคำนวณฟังก์ชันปรับแก้  $F$  (สมการที่ (4.1)) สำหรับความยาวรอยร้าวแต่ละค่าที่ความถี่ภาระต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 จากรูปจะเห็นว่า ณ ความถี่ภาระที่กำหนดค่าของฟังก์ชันปรับแก้ที่ความยาวรอยร้าวต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถเขียนฟังก์ชันปรับแก้ในเทอมของความถี่ภาระเพียงตัวเดียว ได้ดังสมการต่อไปนี้

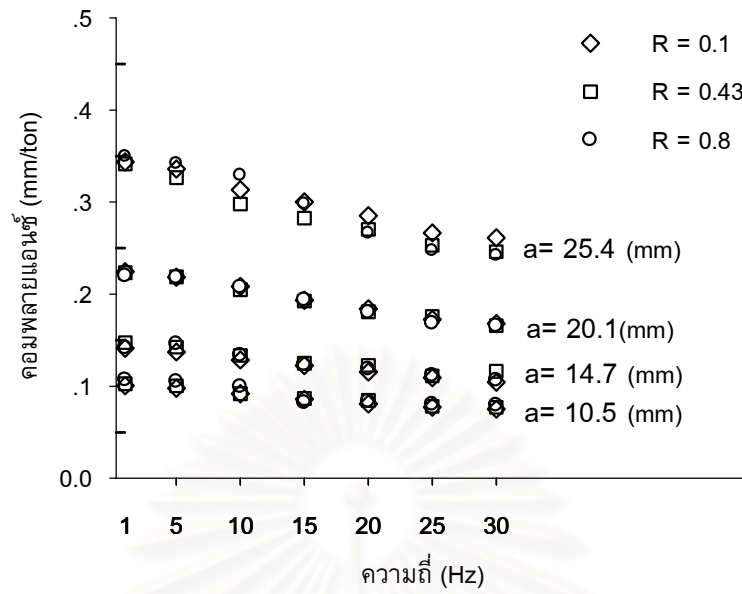
$$F = -1.92 \times 10^{-5} f^3 + 8.67 \times 10^{-4} f^2 + 2.99 \times 10^{-3} f + 0.99 \quad (4.2)$$

โดย  $f$  คือ ความถี่ภาระ (เฮิรท์ส)

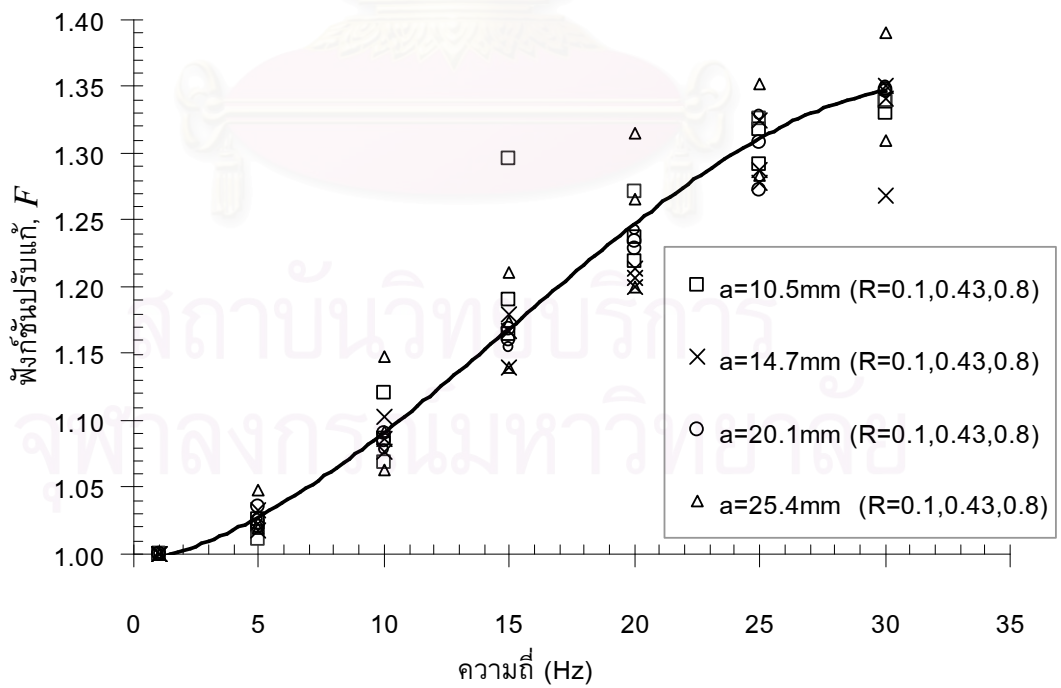
ดังนั้นการวัด  $CMOD$  ในการทดสอบที่ใช้ความถี่ภาระมากกว่า 1 เฮิรท์ส จะต้องปรับแก้  $CMOD$  ที่วัดได้ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$CMOD' = CMOD \times F \quad (4.3)$$

โดย  $CMOD'$  คือ  $CMOD$  ที่ปรับแก้แล้ว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างคอมพลายแอนซ์กับความถี่ของชิ้นงานที่มีความยาวรอยร้าวต่าง ๆ กัน



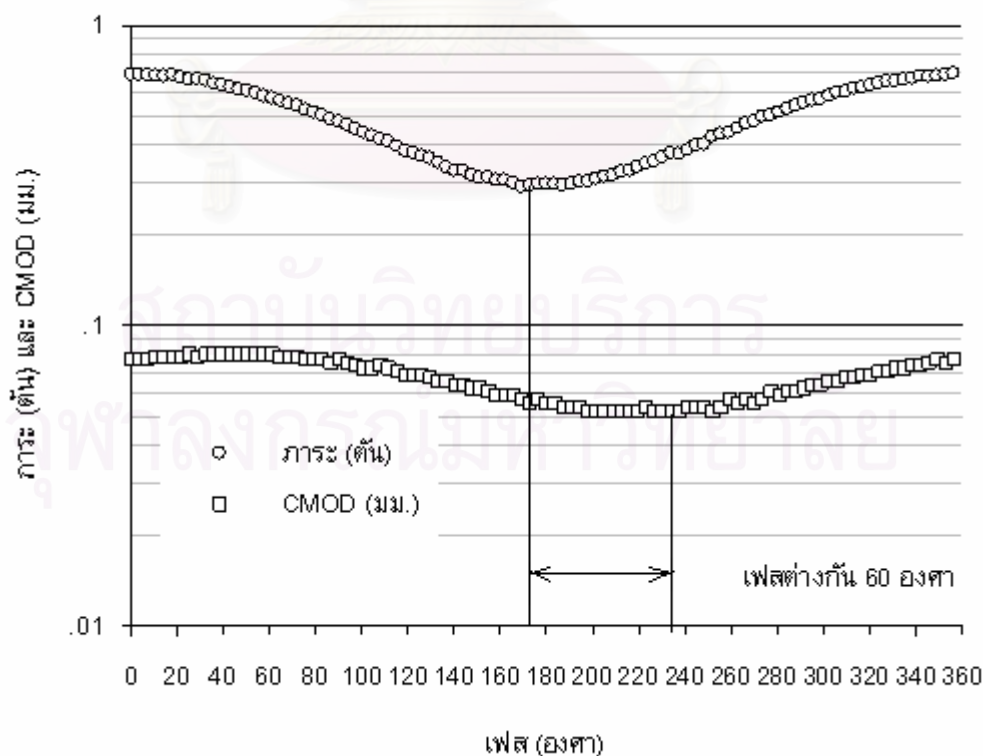
รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจ

## 4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรม

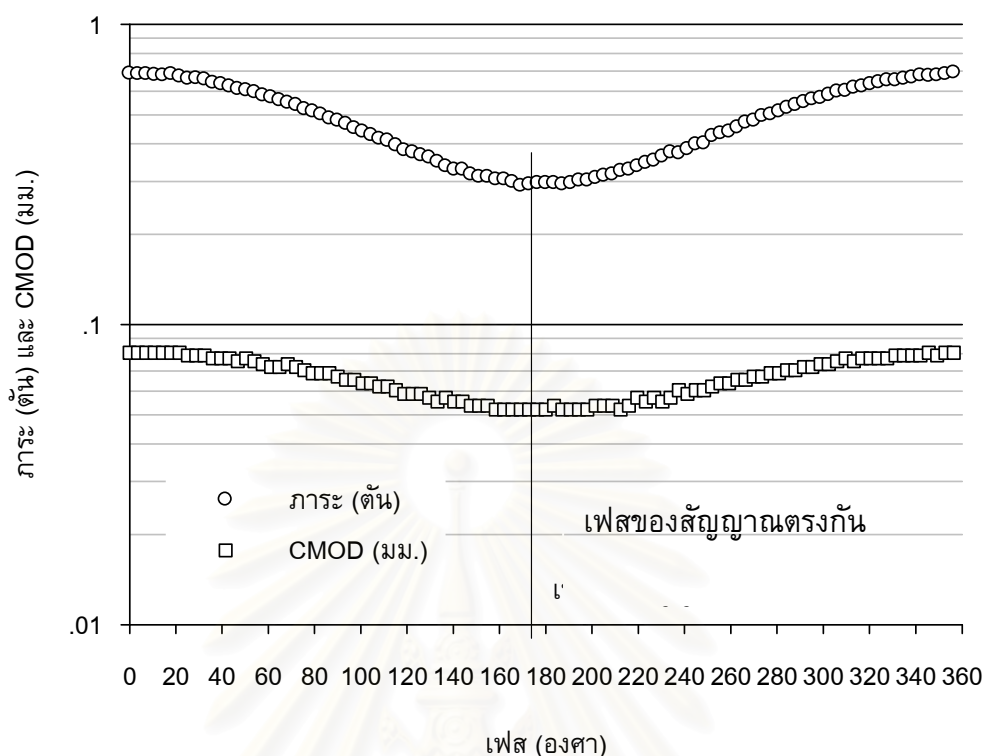
การตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 1) การตรวจสอบเฟสของสัญญาณ 2) การตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณภาระที่ความถี่ต่างๆ 3) การตรวจสอบความถูกต้องของภาระที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ 4) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปร่างคลื่นภาระ และ 5) การตรวจสอบความถูกต้องของความถี่ภาระ

### 4.2.2.1 การตรวจสอบเฟสของสัญญาณ

การตรวจสอบเฟสของสัญญาณ ในที่นี้คือการตรวจสอบว่าสัญญาณภาระและสัญญาณ *CMOD* มีเฟสต่างกันหรือไม่ เพื่อให้ทราบความจำเป็นของซบวีไอจัดเรียงสัญญาณ (หัวข้อที่ 3.5.2.1) การตรวจสอบทำเพียงกรณีเดียวที่ภาระสูงสุดเท่ากับ 0.85 ตัน และภาระต่ำสุดเท่ากับ 0.3 ตัน ใช้ภาระรูปไซน์ มีความถี่ภาระเท่ากับ 10 เฮิรท์ซ์ และชิ้นงานมีความยาวรอยร้าวเท่ากับ 20.1 มม. ข้อมูลภาระและ *CMOD* ที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาพล็อตในแกนเวลาดังรูปที่ 4.9 จากรูปพบว่า สัญญาณ *CMOD* มีเฟสต่างกัน 60 องศา ดังนั้นการจัดเรียงเฟสของสัญญาณทั้งสองให้ตรงกัน ก่อนที่จะนำสัญญาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาคอมพลายแอนซ์และความยาวรอยร้าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณที่ถูกจัดเรียงใหม่โดย ซบวีไอ File\_sort signal.vi (กระบวนการทำงานแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.5.2 (1)) จะเห็นว่าสัญญาณทั้งสองมีเฟสตรงกัน ดังนั้นซบวีไอนี้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ซบวีไอยังสามารถจัดเรียงเฟสของสัญญาณให้ตรงกันได้โดยอัตโนมัติตลอดการทดสอบ



รูปที่ 4.9 เฟสของสัญญาณภาระ และ *CMOD*



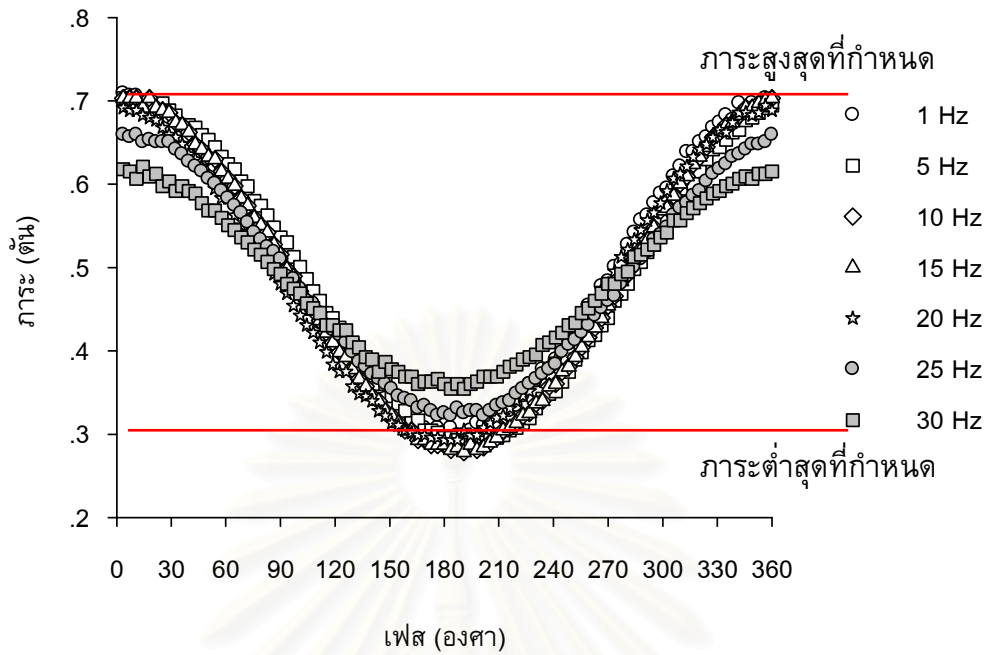
รูปที่ 4.10 เฟสของสัญญาณการะ และ *CMOD* ที่ถูกจัดเรียงแล้ว

#### 4.2.2.2 การตรวจสอบสัญญาณการะที่ความถี่ต่าง ๆ

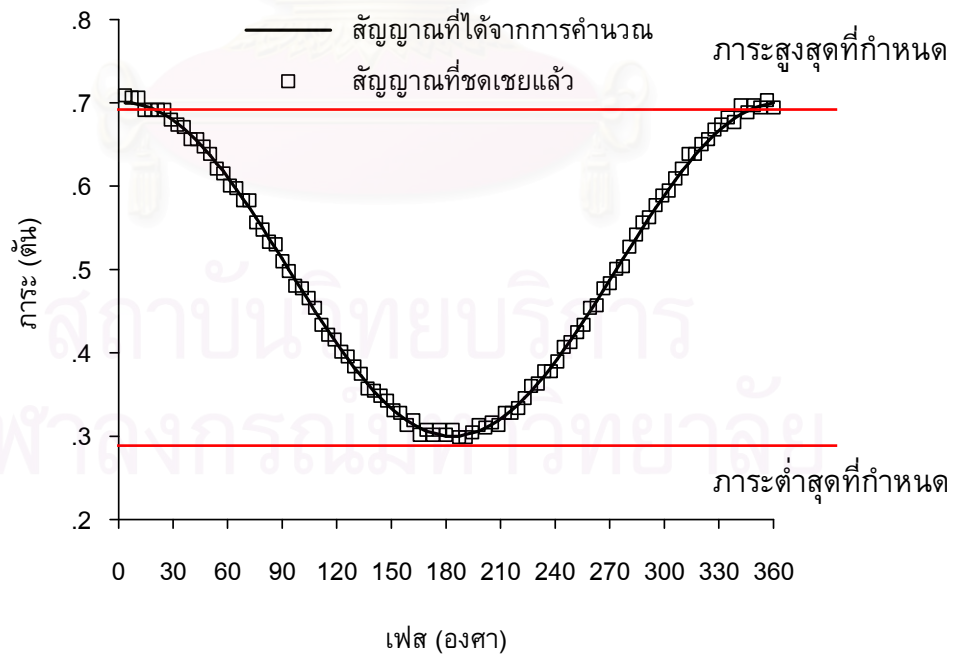
การตรวจสอบสัญญาณการะที่ความถี่ต่าง ๆ หมายถึง การตรวจสอบการควบคุมการะของโปรแกรมที่ความถี่การะต่าง ๆ การตรวจสอบทำโดยนำชิ้นงานที่มีรอยร้าวยาว 14.7 มม. มารับการะล้ารูปไซน์ที่มีการะสูงสุดเท่ากับ 0.7 ตัน และการะต่ำสุดเท่ากับ 0.3 ตัน โดยใช้ความถี่การะเท่ากับ 1, 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 เฮิรท์ซ์ ตามลำดับ ข้อมูลการะที่ความถี่ต่าง ๆ จะถูกนำมาพล็อตรวมกัน ดังรูปที่ 4.11 จากรูปแสดงให้เห็นว่า ลักษณะของสัญญาณการะยังคงเป็นรูปคลื่นไซน์ตามที่กำหนด แต่ขนาดของแอมพลิจูดการะลดลง เมื่อความถี่การะสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องชดเชยการะให้ใกล้เคียงค่าที่กำหนดก่อนเริ่มต้นทดสอบ

การชดเชยการะทำโดยโมดูล Load compensation (รายละเอียดและกระบวนการทำงานอยู่ในหัวข้อที่ 3.7.1) เนื่องจากการทดสอบที่ความถี่การะเท่ากับ 30 เฮิรท์ซ์ มีแอมพลิจูดการะคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกแสดงผลเฉพาะสัญญาณการะที่ถูกชดเชยแล้วในกรณีความถี่เท่ากับ 30 เฮิรท์ซ์ สัญญาณการะที่ได้จากการชดเชยถูกพล็อตเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 4.12 จากรูปที่ 4.12 พบว่าสัญญาณทั้งสองซ้อนทับกัน แสดงให้เห็นว่าโมดูล Load compensation สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ





รูปที่ 4.11 รูปคลื่นภาวะความถี่ต่างๆ ก่อนชดเชยด้วยโมดูล Load compensation

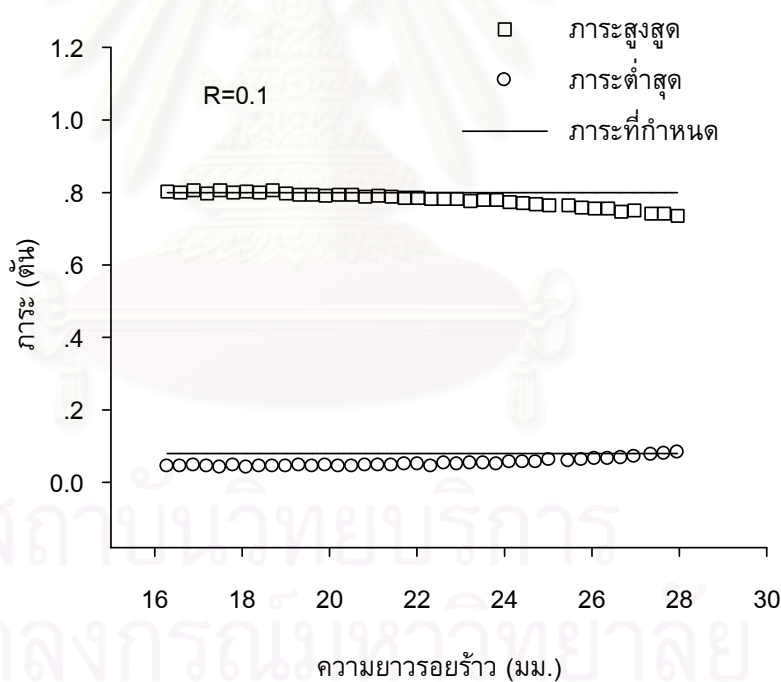


รูปที่ 4.12 รูปคลื่นภาวะความถี่ 30 Hz ที่ชดเชยด้วยโมดูล Load compensation

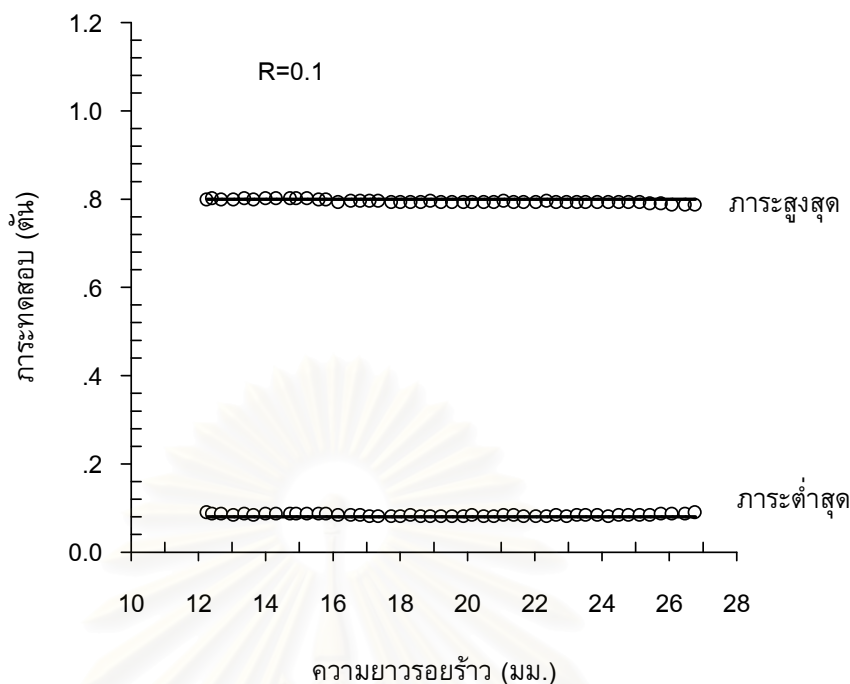
#### 4.2.2.3 การตรวจสอบภาระที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

การตรวจสอบภาระที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ หมายถึง การตรวจสอบการควบคุมภาระของโปรแกรมเมื่อความยาวรอยร้าวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น การตรวจสอบนี้ทำโดยนำชิ้นงานที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 16.7 มม. มารับภาระรูปไซน์ ความถี่ภาระเท่ากับ 10 เฮิรท์ซ์ และกำหนดค่าภาระสูงสุดเท่ากับ 0.8 ตันและภาระต่ำสุดเท่ากับ 0.08 ตัน ตลอดจนการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง ภาระสูงสุดและภาระต่ำสุด กับความยาวรอยร้าว ดังรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าแอมพลิจูดภาระจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการควบคุมภาระจึงขึ้นกับคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานทดสอบ และการชดเชยภาระจึงเป็นสิ่งจำเป็น การชดเชยภาระใช้หลักการอย่างทีกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.7

หลังจากพัฒนาโมดูล Load Compensation จึงได้ทำการทดสอบชิ้นงานชิ้นใหม่ที่สภาวะทดสอบเดิม ผลการควบคุมภาระสูงสุดและต่ำสุดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.14 จากรูปพบว่าภาระสูงสุดและภาระต่ำสุดซ้อนทับกับเส้นภาระที่กำหนด แสดงว่าโมดูลนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.13 ภาระสูงสุดและต่ำสุดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ก่อนชดเชยด้วยโมดูล Load compensation

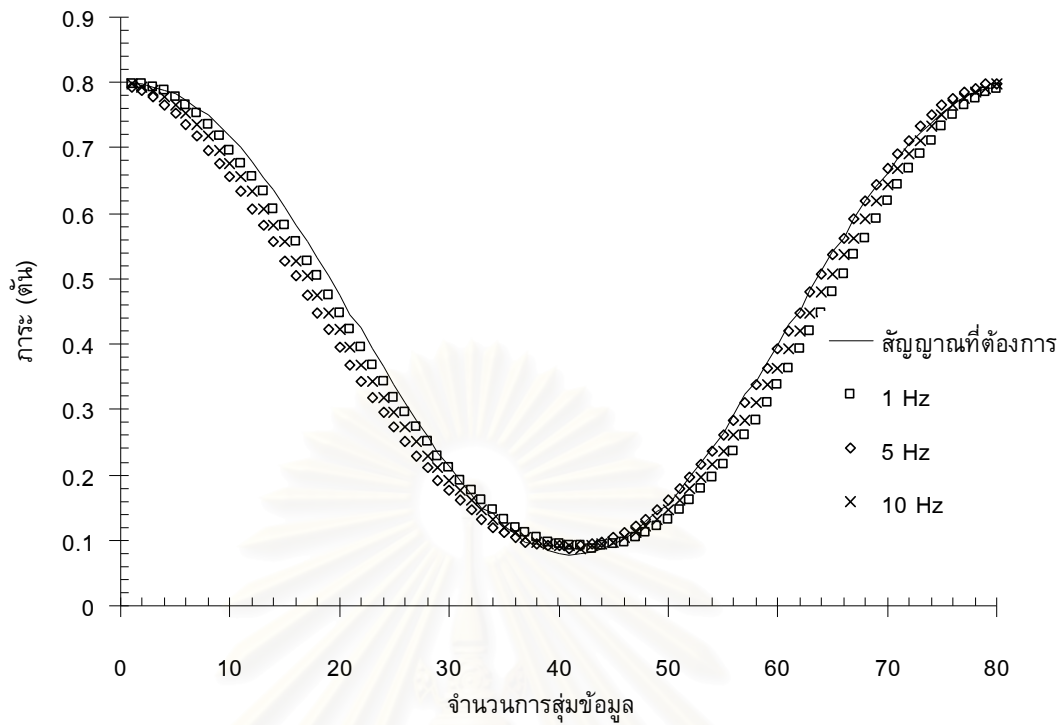


รูปที่ 4.14 ภาระสูงสุดและต่ำสุดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบที่ความยาว รอยร้าวต่าง ๆ หลังชดเชยด้วยโมดูล Load compensation

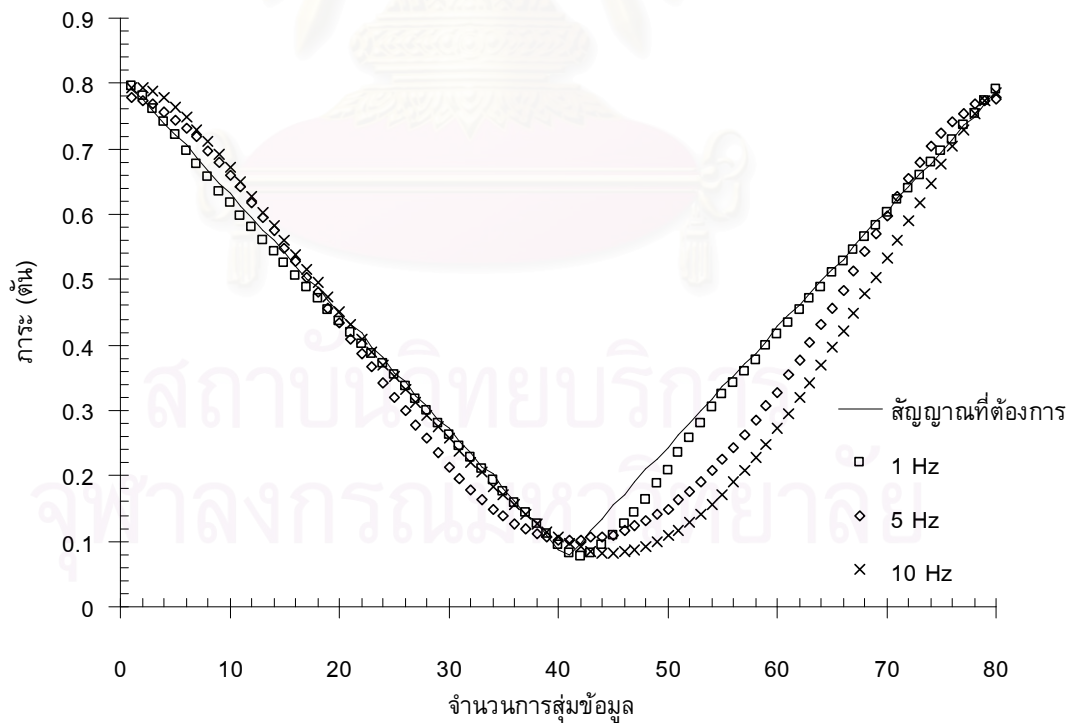
#### 4.2.2.4 การตรวจสอบรูปร่างของคี่นภาระ

การตรวจสอบรูปร่างของคี่นภาระ หมายถึง การตรวจสอบว่าโปรแกรม สามารถสร้างรูปคี่นได้ตามที่กำหนดหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบรูปคี่นภาระที่ได้จากการ ทดสอบ (สัญญาณขาเข้า) เทียบกับรูปคี่นที่ต้องการ การทดสอบใช้ภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูด ภาระ เท่ากับ 0.44 ตัน และ 0.36 ตัน ชิ้นงานมีความยาวรอยร้าวเท่ากับ 10.5 มม. รูปคี่นภาระ ที่ใช้มีดังนี้ คี่นรูปไซน์, สี่เหลี่ยม, สามเหลี่ยม และฟันเลื่อย ที่ความถี่ภาระเท่ากับ 1, 5 และ 10 เฮิรท์ซ์ ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18

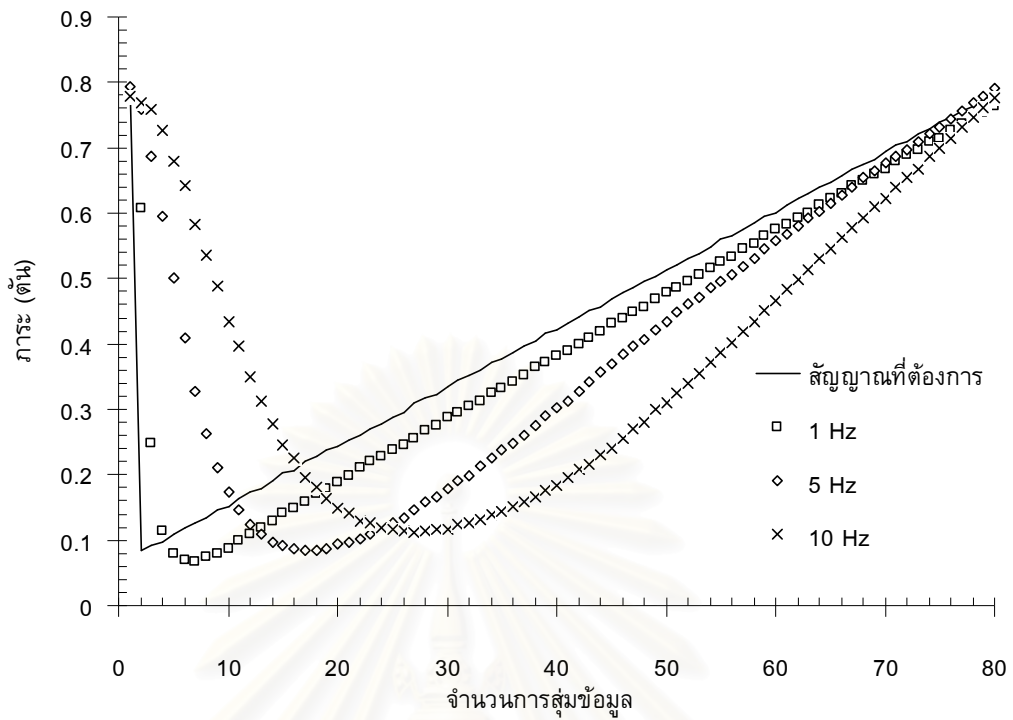
จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 พบว่าโปรแกรมสามารถควบคุมรูปร่างภาระทุกแบบ ที่ความถี่ 1 เฮิรท์ซ์ ได้ใกล้เคียงกับที่ต้องการดีพอสมควร แต่เมื่อทดสอบที่ความถี่สูงขึ้นรูปร่าง ภาระแตกต่างจากที่ต้องการค่อนข้างมาก โดยคี่นรูปไซน์ถือว่ามีความแตกต่างน้อยสุดเมื่อ เทียบกับคี่นรูปร่างอื่น สาเหตุหนึ่งที่โปรแกรมไม่สามารถควบคุมรูปร่างภาระได้ดีเนื่องจาก โมดูล Load compensation สามารถชดเชยได้เพียงขนาดของภาระสูงสุดและภาระต่ำสุด อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องในสภาพแวดล้อมไม่กักความร้อน รูปร่างของภาระ จะไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวลำ นอกจากนี้ถ้าเป็นการทดสอบความล้าที่ อุณหภูมิสูง ความถี่ภาระที่อยู่ในอันดับของ 0.1 เฮิรท์ซ์ ลงไป [25]



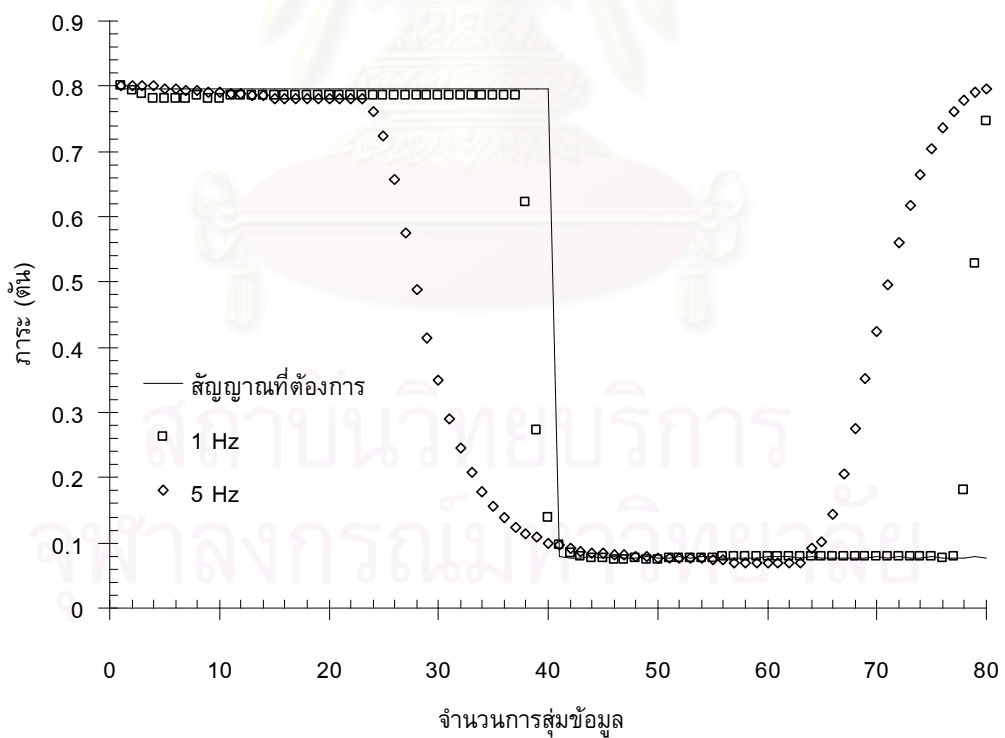
รูปที่ 4.15 รูปร่างคลื่นไซน์จากการทดสอบ ที่ความถี่ภาวะ 1, 5 และ 10 เฮิรท์



รูปที่ 4.16 รูปร่างคลื่นสามเหลี่ยมจากการทดสอบที่ความถี่ภาวะ 1, 5 และ 10 เฮิรท์



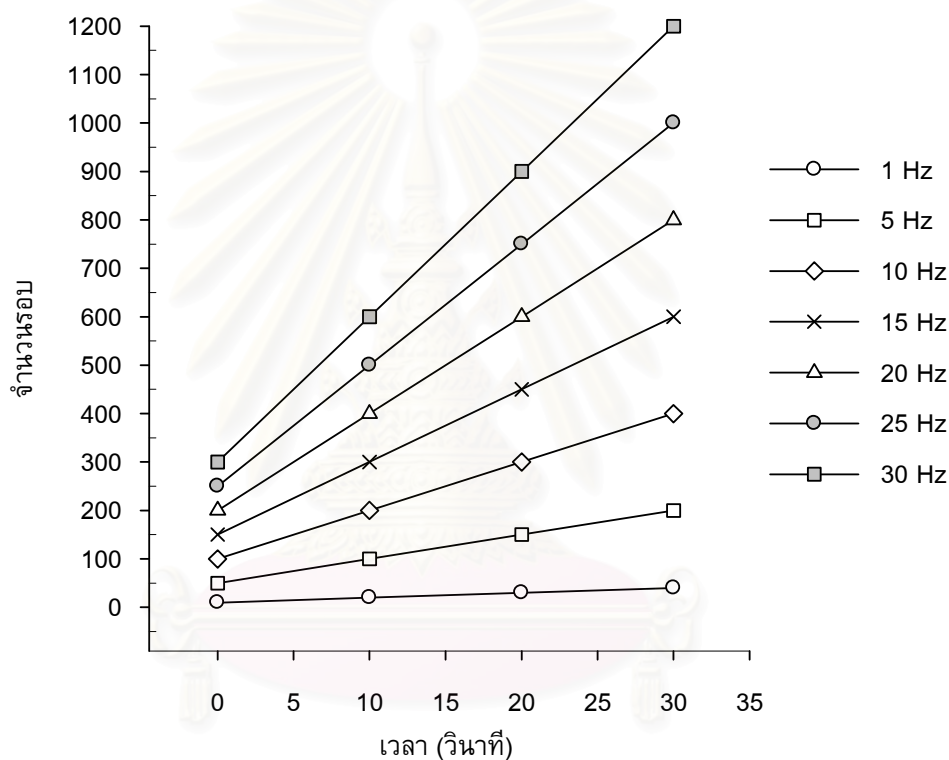
รูปที่ 4.17 รูปร่างคลื่นฟันเลื่อยแบบบวกจากการทดสอบที่ความถี่ภาวะ 1, 5 และ 10 เฮิรท์



รูปที่ 4.18 รูปร่างคลื่นสี่เหลี่ยมจากการทดสอบที่ความถี่ภาวะ 1 และ 5 เฮิรท์

#### 4.2.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของความถี่ภาระ

การตรวจสอบถูกต้องของของความถี่ภาระ คือ การตรวจสอบว่าสัญญาณที่โปรแกรมสร้างมีความถี่ถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบทำโดยการนำชิ้นงานไปรับภาระล้ารูปไซน์ที่มีความถี่ภาระ เท่ากับ 1, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เฮิรท์ซ์ แล้วเก็บข้อมูลจำนวนรอบที่เวลา เท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 วินาที ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบและในช่วงเวลาที่กำหนดจากการทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 จากรูปพบว่าความชันของกราฟซึ่งหมายถึงความถี่ มีค่าเท่ากับความถี่ที่ใช้ทดสอบทุกกรณี ดังนั้นจึงถือว่า โปรแกรมสามารถควบคุมความถี่ภาระได้แม่นยำ และพร้อมสำหรับงานทดสอบหาอัตราการใช้ของรอยร้าวล้า



รูปที่ 4.19 ข้อมูลจำนวนรอบและเวลาของเครื่องที่ความถี่ต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สภาวะทดสอบและผลการทดสอบ

บทนี้นำเสนอสภาวะทดสอบ และผลการทดสอบ หัวข้อที่ 5.1 แสดงสภาวะทดสอบทั้งหมด หัวข้อที่ 5.2 ถึงหัวข้อที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าของการทดสอบแบบควบคุมภาระ, แบบลด  $\Delta K$  และแบบควบคุม  $\Delta K$  ตามลำดับ หัวข้อที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบโซ่

#### 5.1 สภาวะทดสอบ

การทดสอบทั้งหมดใช้ภาระรูปไซน์ทำในสภาพแวดล้อมอากาศที่อุณหภูมิห้อง (ราว  $25^{\circ}C$ ) การทดสอบมี 4 ประเภท ดังนี้

1) การทดสอบแบบควบคุมภาระ

สภาวะทดสอบแสดงในตารางที่ 5.1 ใช้ความถี่ภาระ 10 เฮิรท์

ตารางที่ 5.1 สภาวะทดสอบแบบควบคุมภาระ

อัตราส่วนภาระ	ภาระสูงสุด(ตัน)
0.1	0.800
0.3	0.800
0.5	1.200
0.7	0.625

2) การทดสอบแบบลด  $\Delta K$

สภาวะทดสอบแสดงในตารางที่ 5.2 ใช้ความถี่ภาระ 10 เฮิรท์ และกำหนด  $C'$  เท่ากับ  $-0.079 \text{ มม.}^{-1}$  ทุกอัตราส่วนภาระ

ตารางที่ 5.2 สภาวะทดสอบของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$

อัตราส่วนภาระ	$\Delta K$ เริ่มต้น (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )
0.1	7.0
0.3	8.0
0.5	6.0
0.7	4.5

### 3) การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$

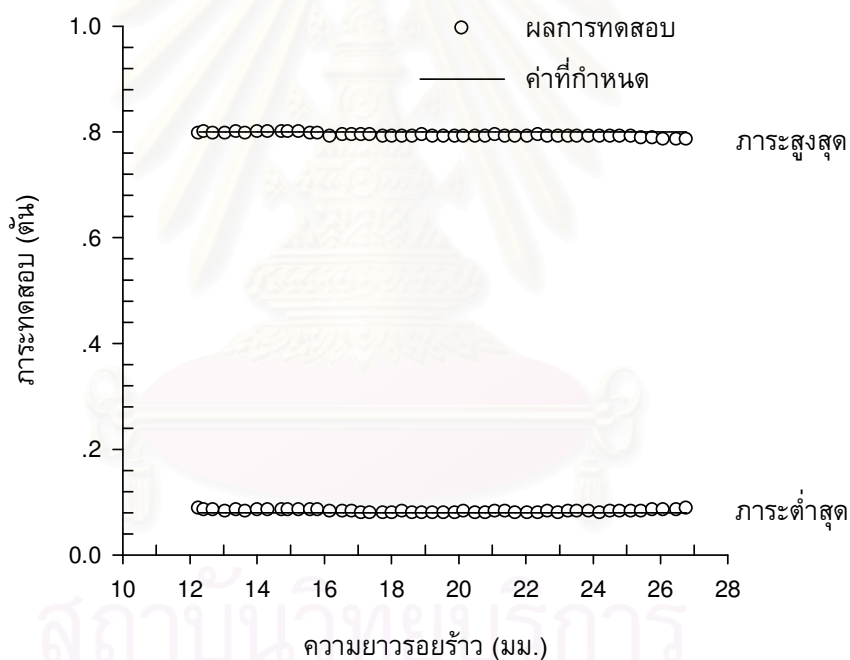
ใช้ความถี่ภาระ 10 เฮิรท์ซ ทดสอบที่  $\Delta K$  เท่ากับ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  ตามลำดับ และทดสอบที่  $R$  เท่ากับ 0.1

### 4) การทดสอบโซ่

ใช้ความถี่ภาระเท่ากับ 5 เฮิรท์ซ ทดสอบเป็นแบบควบคุมภาระโดยมีภาระสูงสุดเท่ากับ 750 กิโลกรัม และอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.04

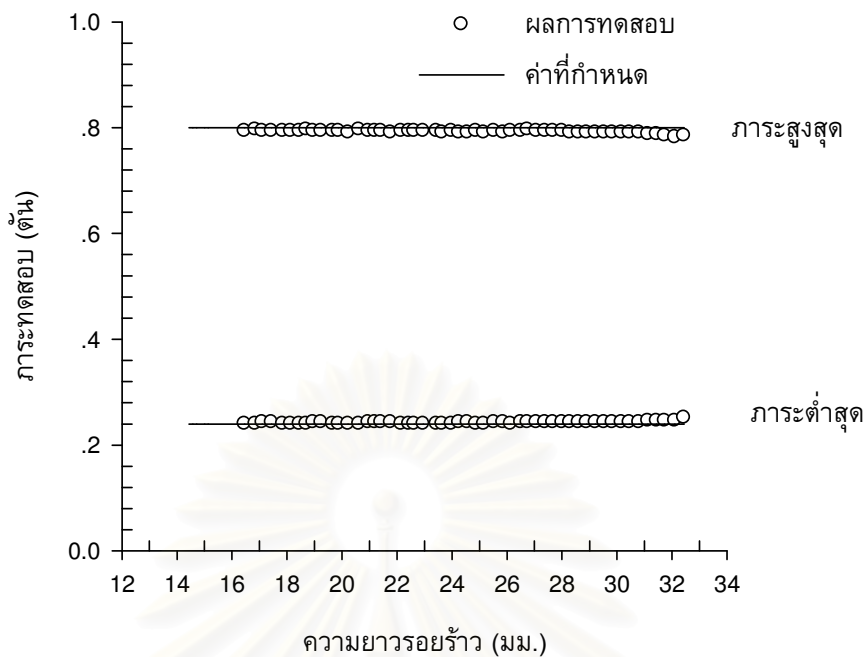
## 5.2 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแบบควบคุมภาระ

ผลการควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่อัตราส่วนภาระ 0.1, 0.3, 0.5, และ 0.7 อยู่ในรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 และกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ อยู่ในรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 ตามลำดับ

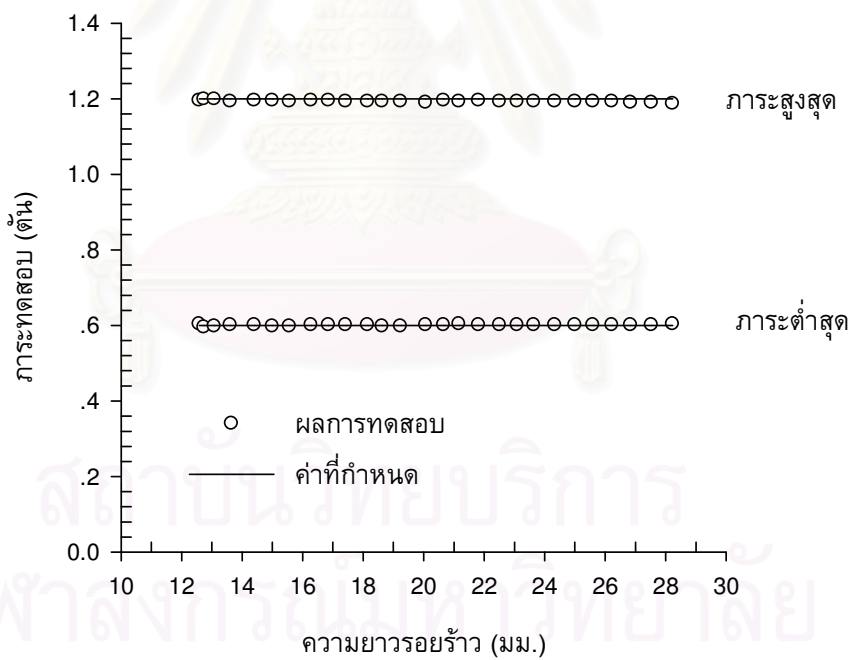


รูปที่ 5.1 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.1$

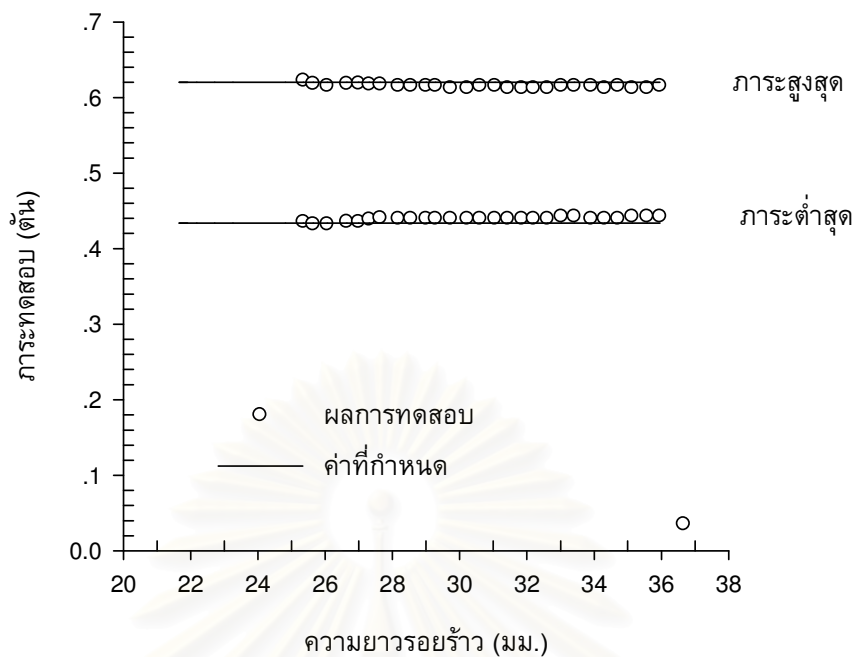




รูปที่ 5.2 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบควบคุมภาวะที่  $R = 0.3$

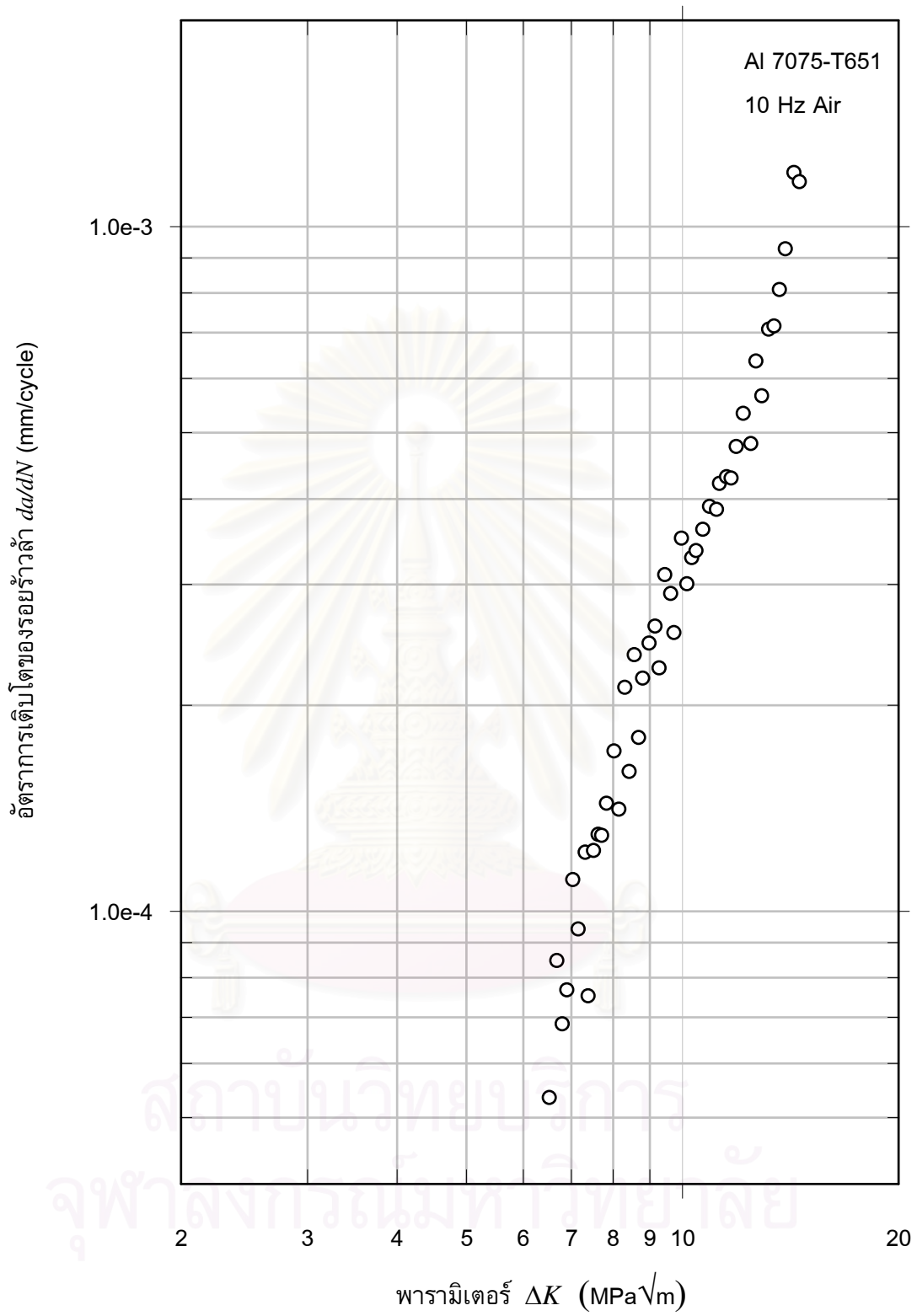


รูปที่ 5.3 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบควบคุมภาวะที่  $R = 0.5$

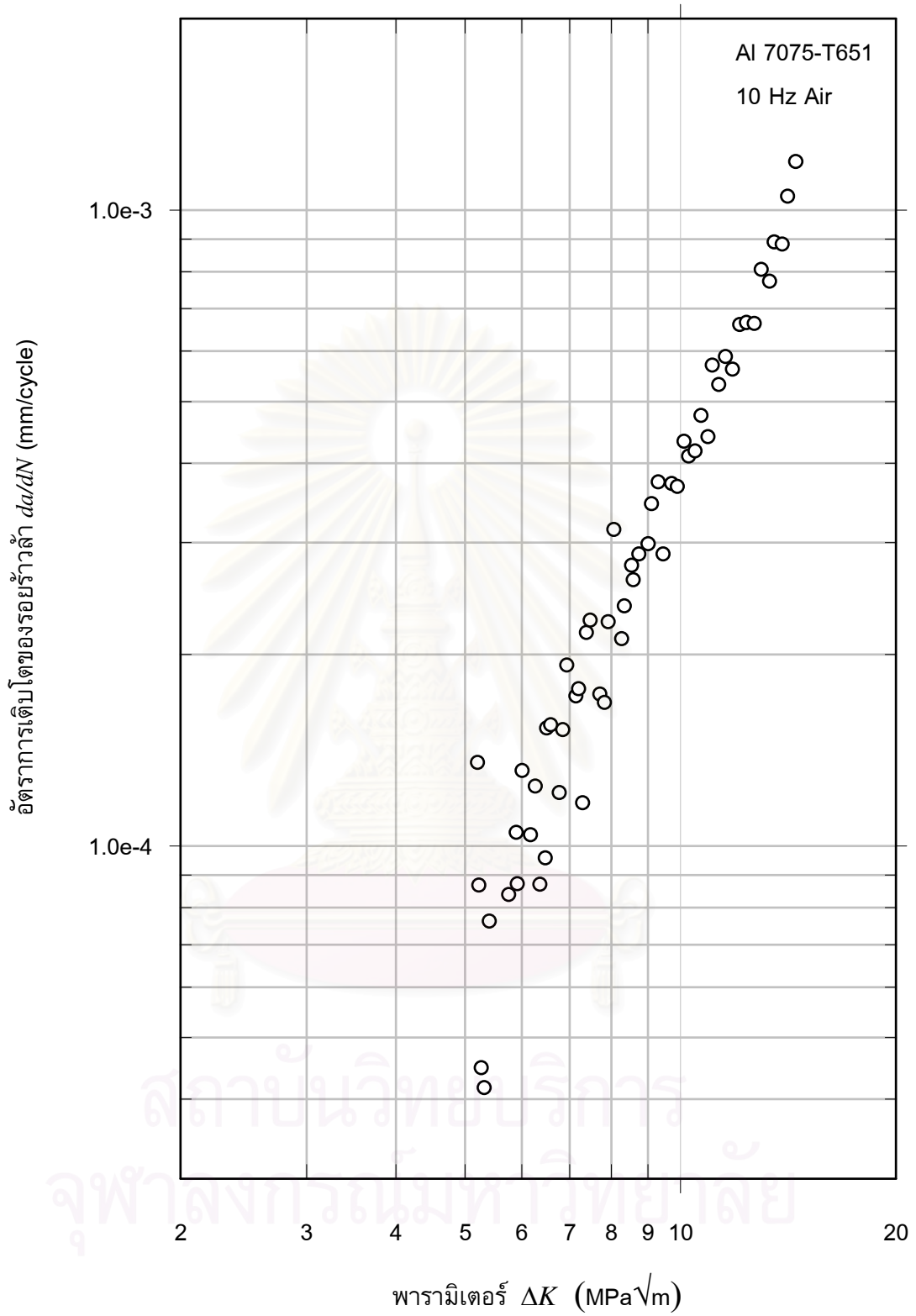


รูปที่ 5.4 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.7$

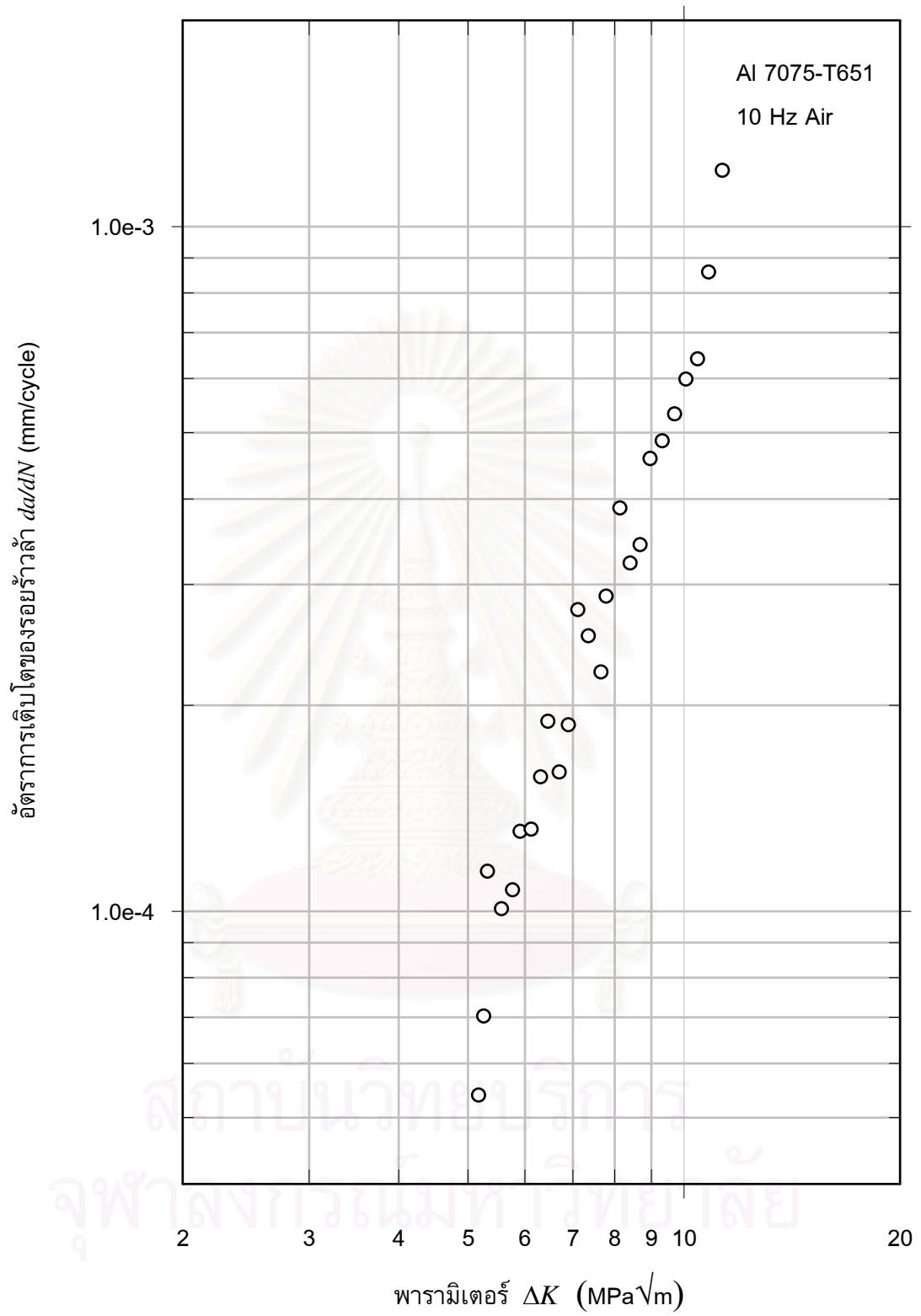
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



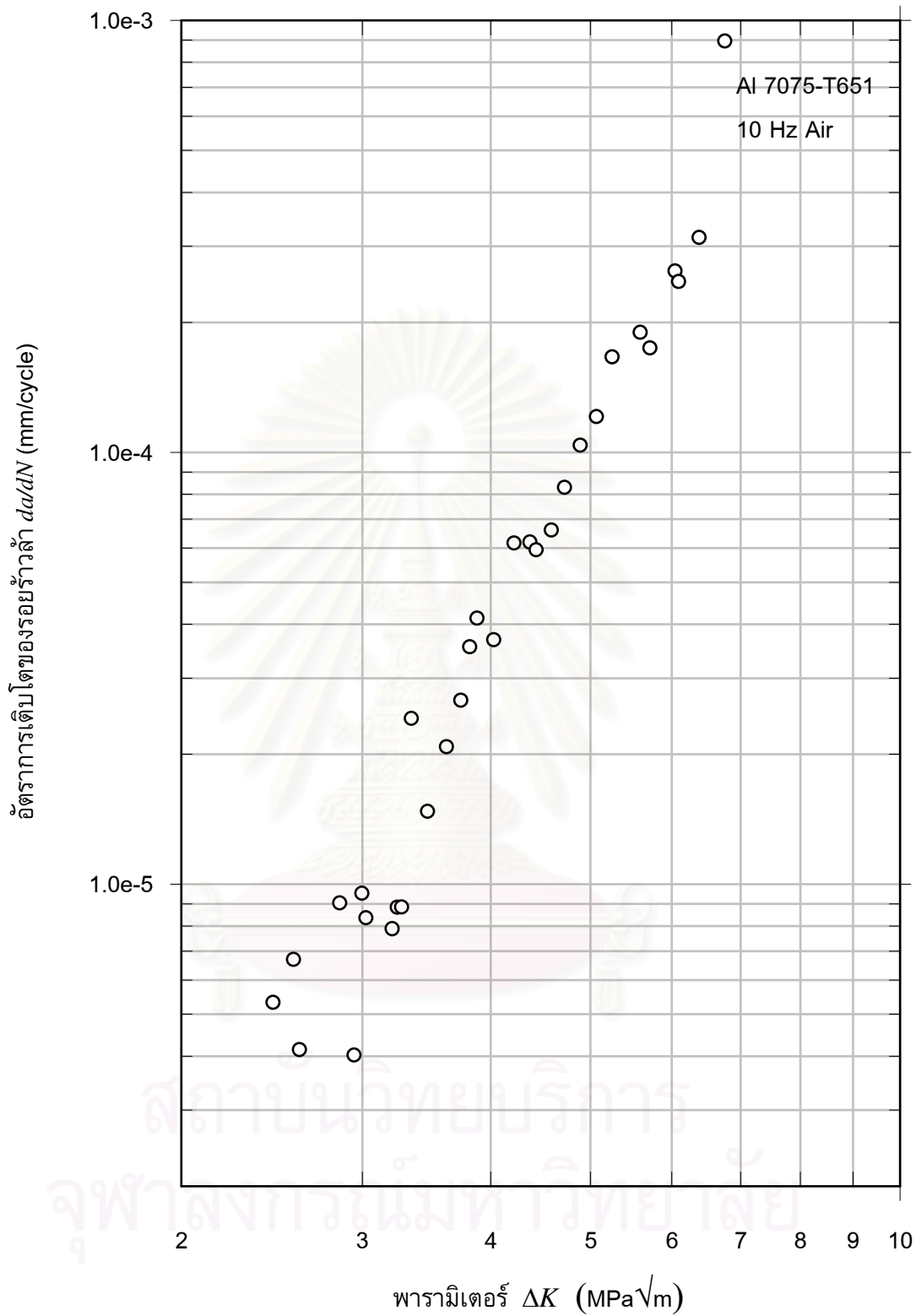
รูปที่ 5.5 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.1$



รูปที่ 5.6 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.3$



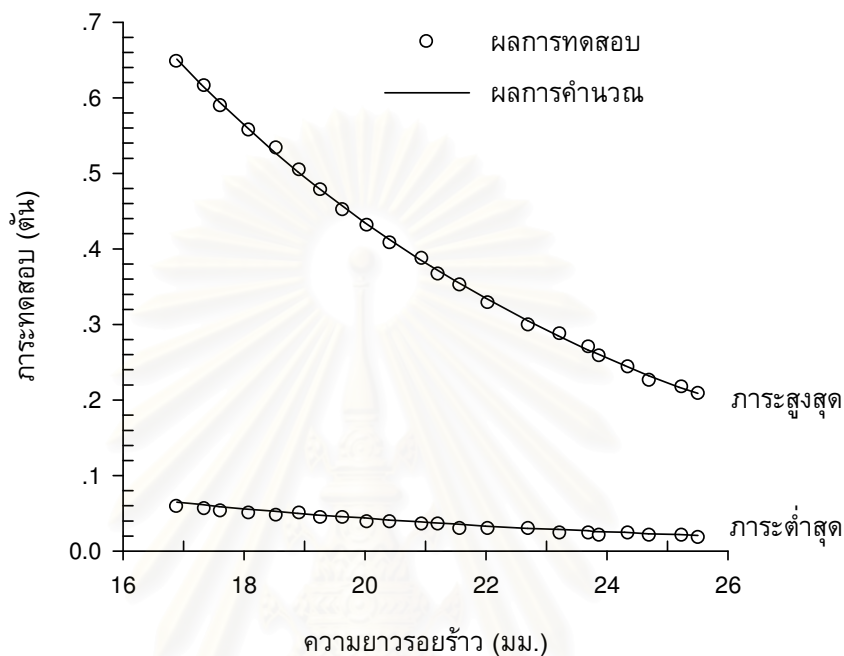
รูปที่ 5.7 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.5$



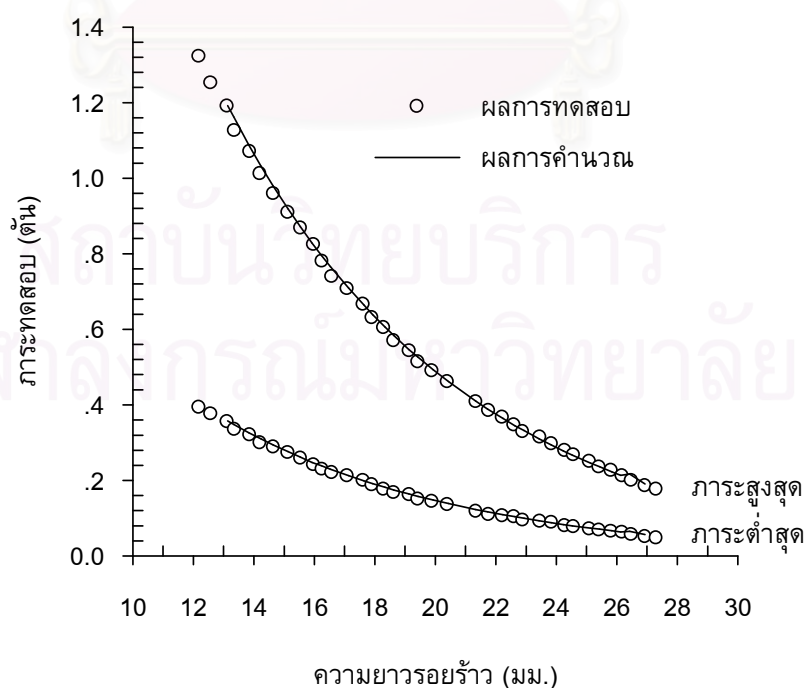
รูปที่ 5.8 อัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุมภาระที่  $R = 0.7$

### 5.3 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวแบบลด $\Delta K$

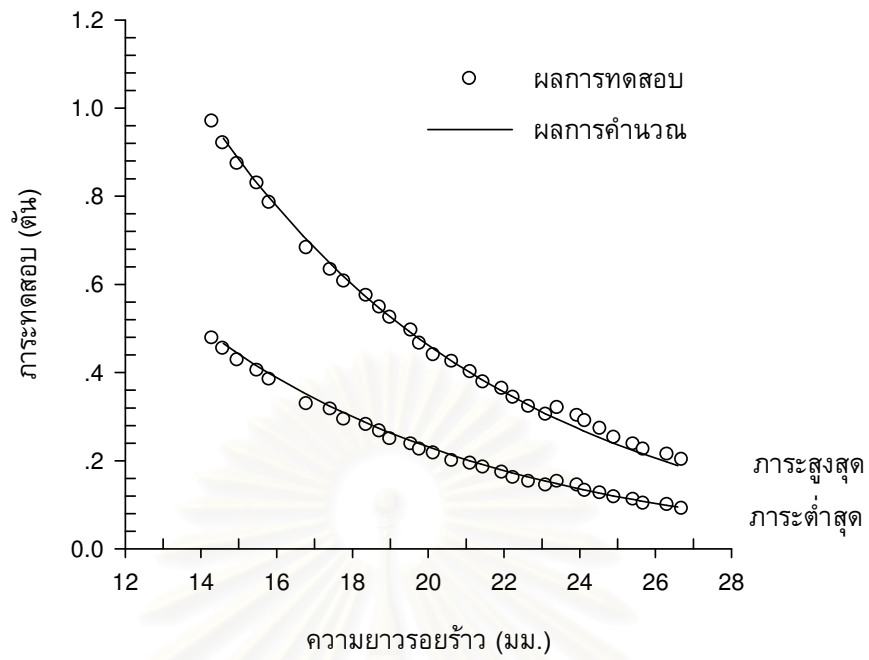
ผลการควบคุมภาวะในการทดสอบแบบแบบลด  $\Delta K$  ที่อัตราส่วนภาวะ 0.1, 0.3, 0.5, และ 0.7 แสดงอยู่ในรูปที่ 5.9 ถึง 5.12 ตามลำดับ ส่วนกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวจะแสดงอยู่ในรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 ตามลำดับ



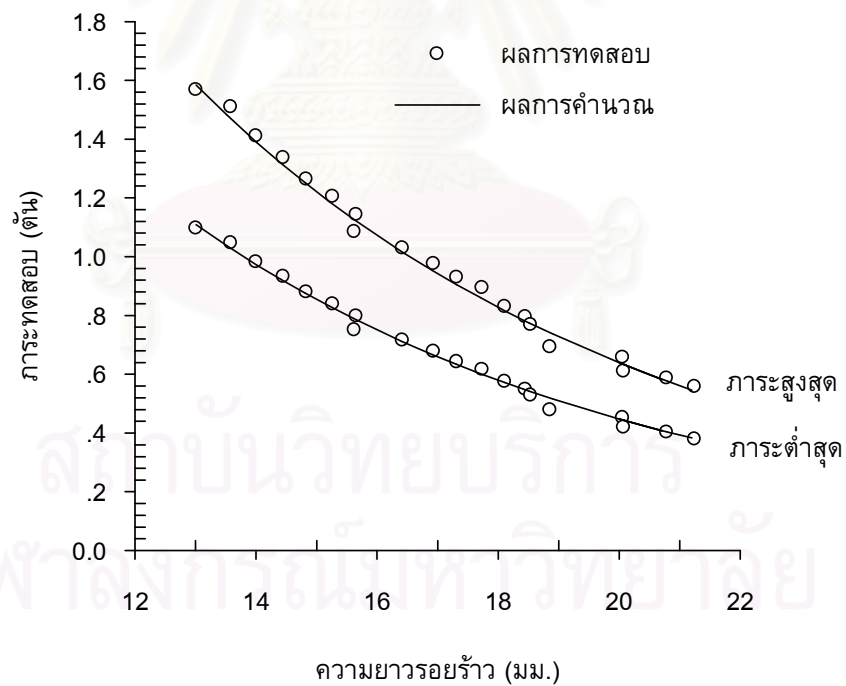
รูปที่ 5.9 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.1$



รูปที่ 5.10 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.3$

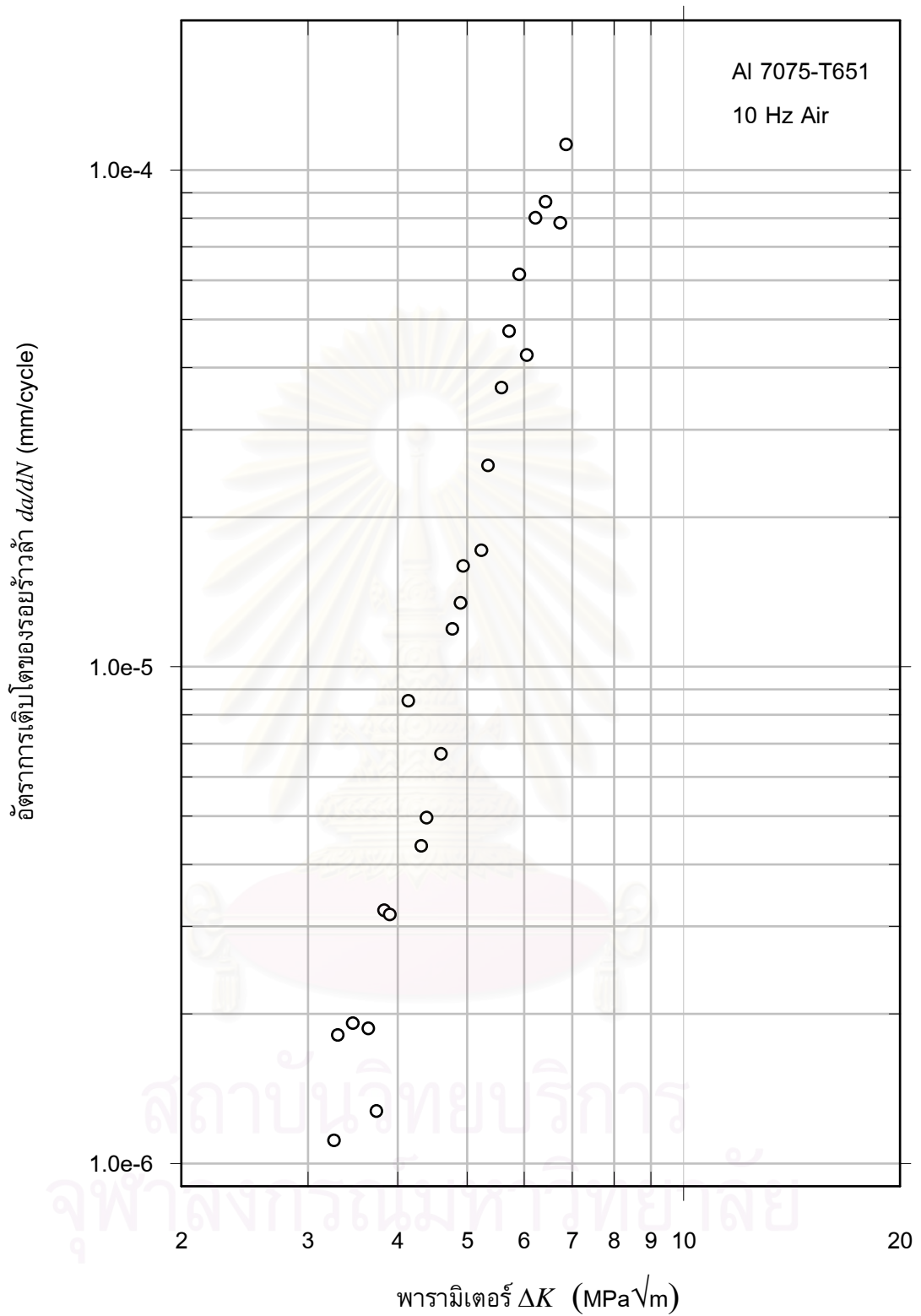


รูปที่ 5.11 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.5$

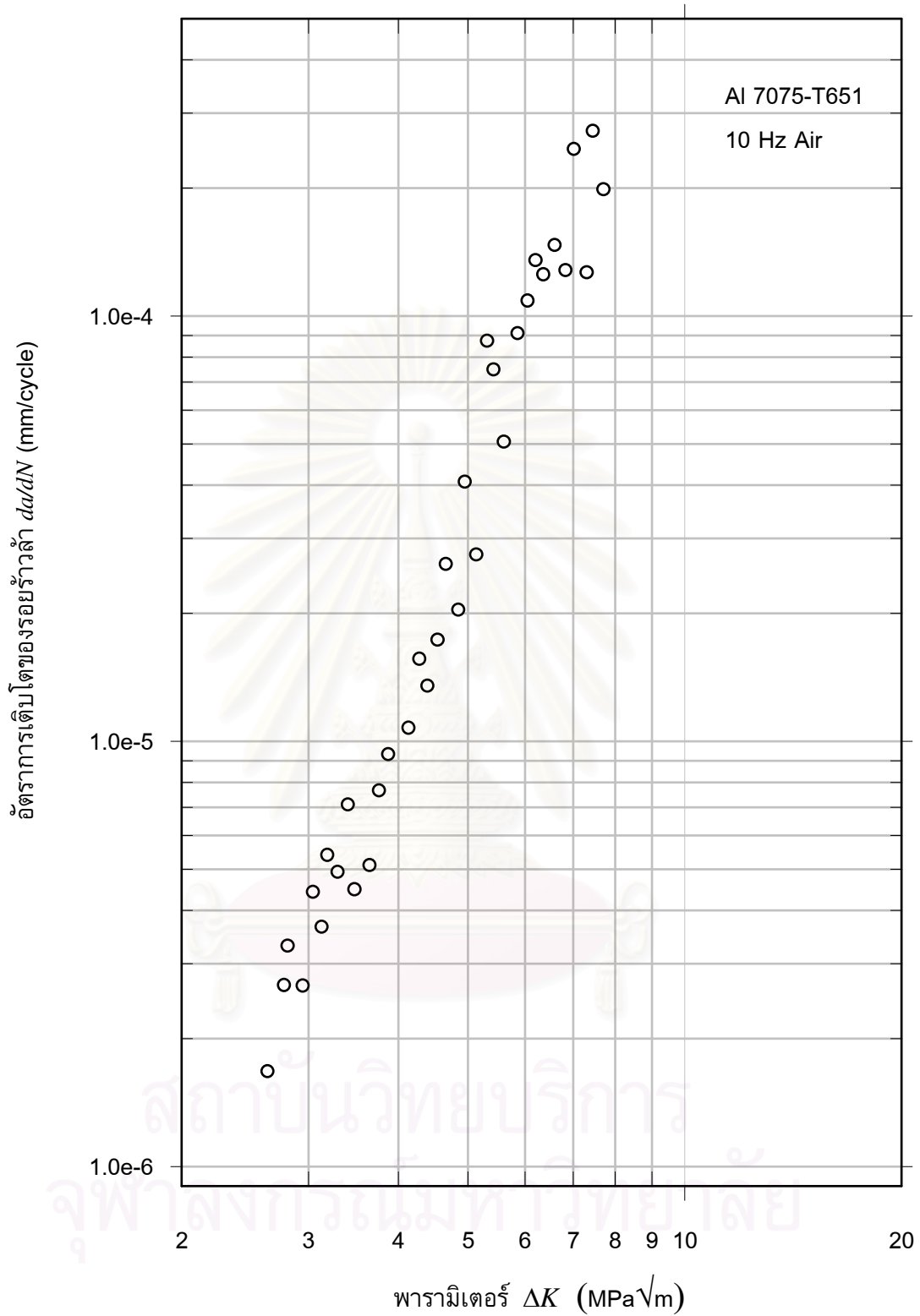


รูปที่ 5.12 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.7$

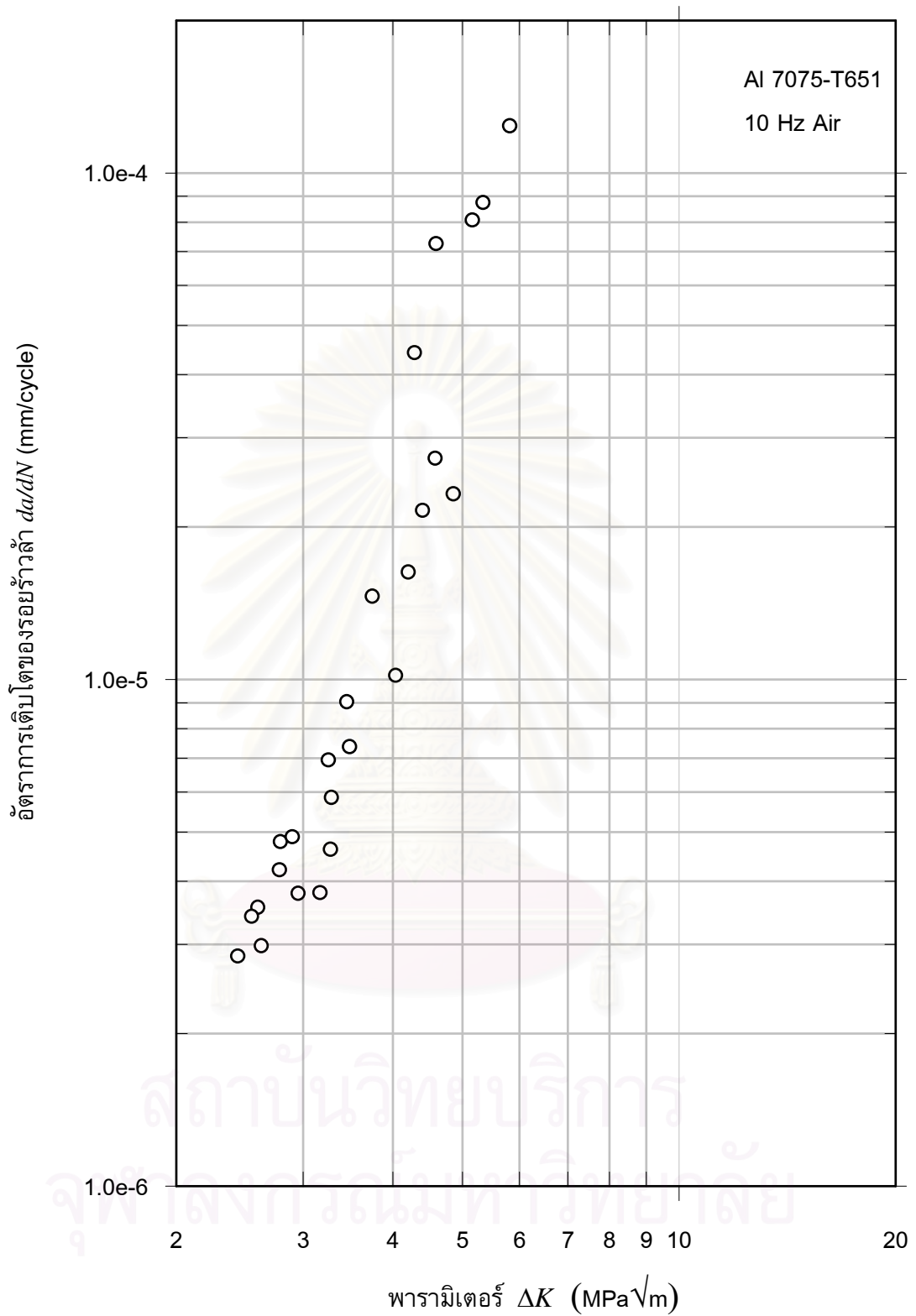




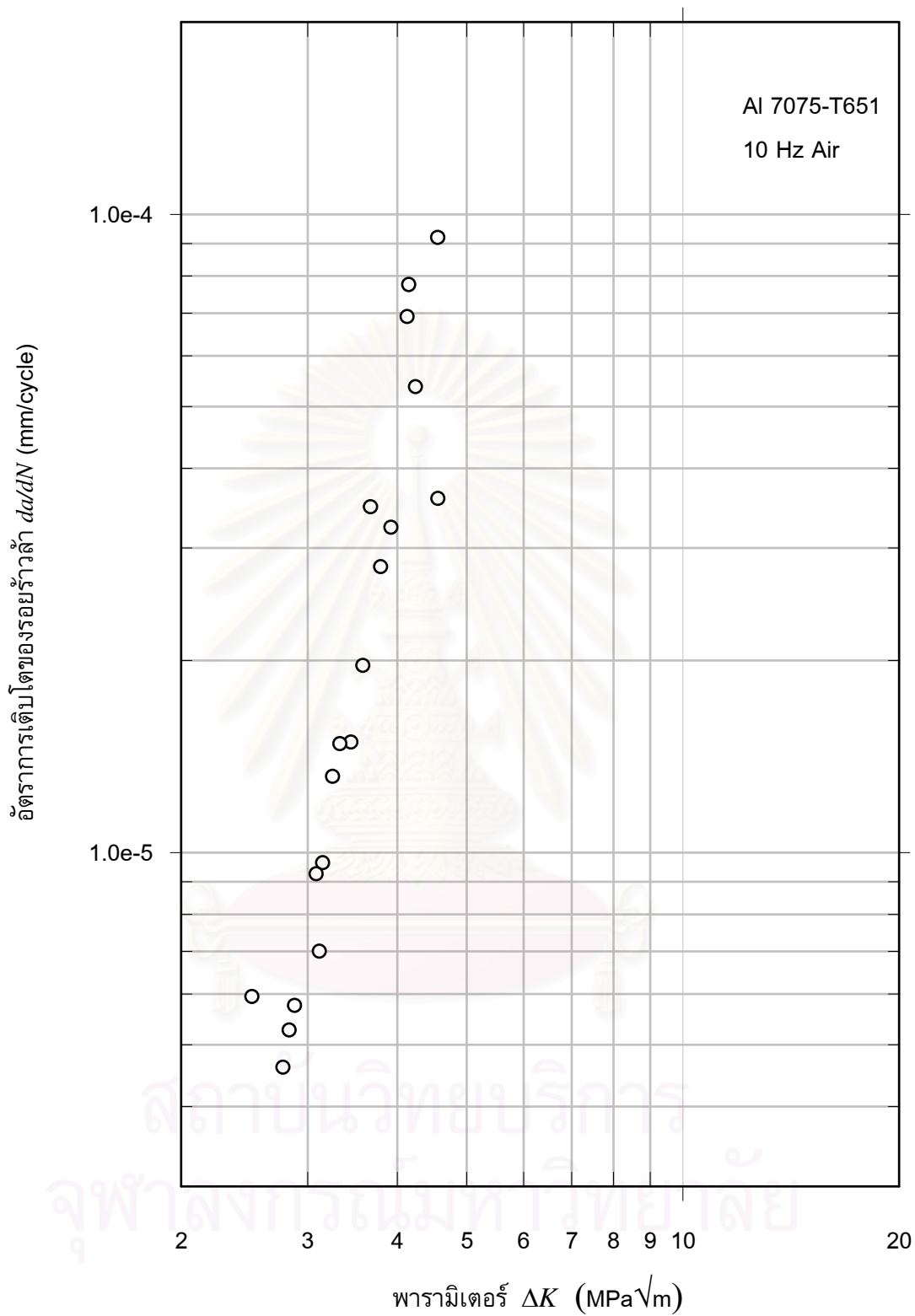
รูปที่ 5.13 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.1$



รูปที่ 5.14 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.3$



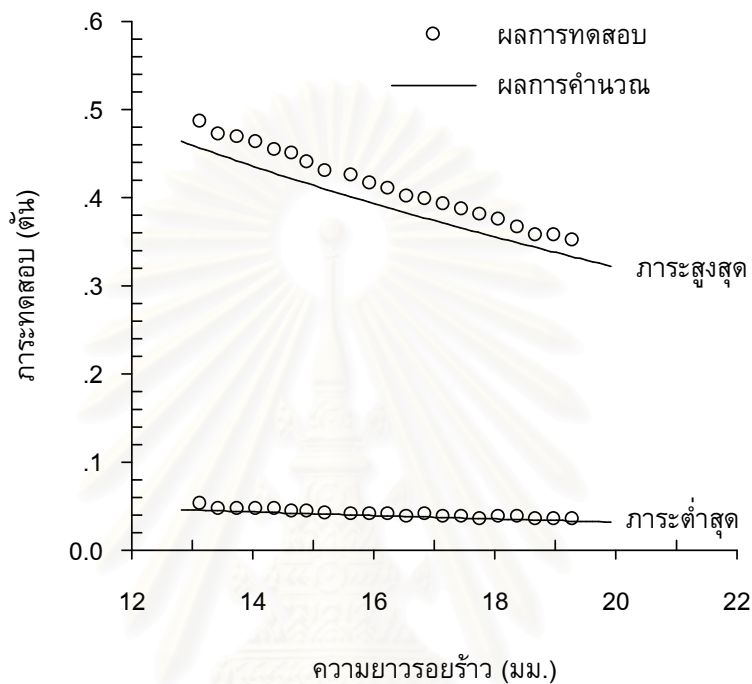
รูปที่ 5.15 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.5$



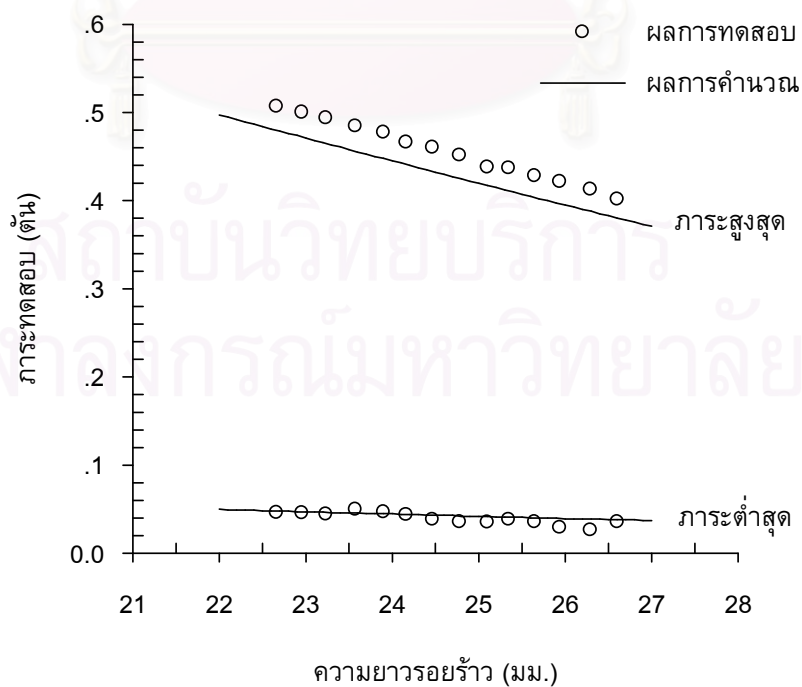
รูปที่ 5.16 อัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R = 0.7$

#### 5.4 ผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวแบบควบคุม $\Delta K$

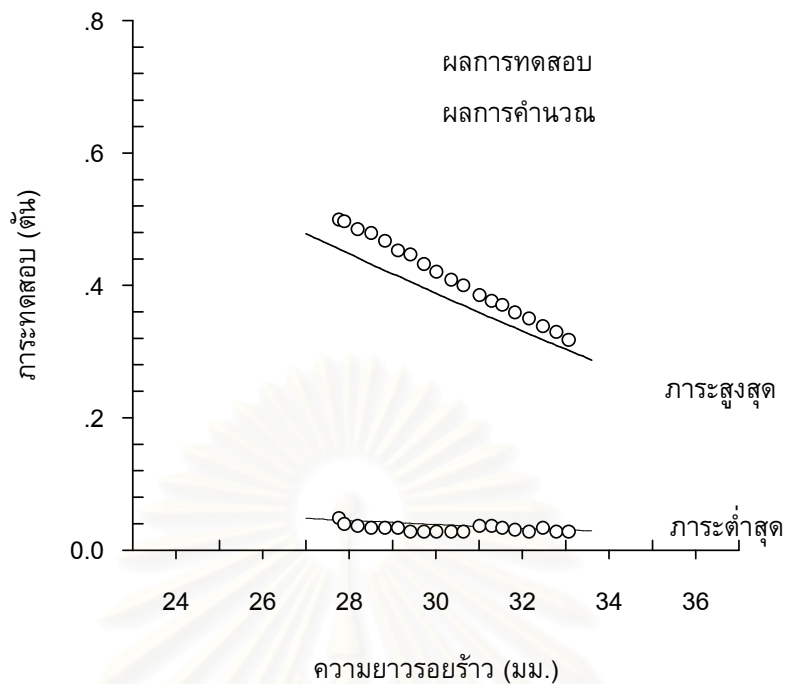
ผลการควบคุมภาระของการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  และกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่  $R$  เท่ากับ 0.1 โดยการทดสอบจะควบคุมให้  $\Delta K$  เท่ากับ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  แสดงอยู่ในรูปที่ 5.17 ถึง 5.19 ตามลำดับ



รูปที่ 5.17 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K = 4$  MPa $\sqrt{m}$



รูปที่ 5.18 การควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K = 7$  MPa $\sqrt{m}$



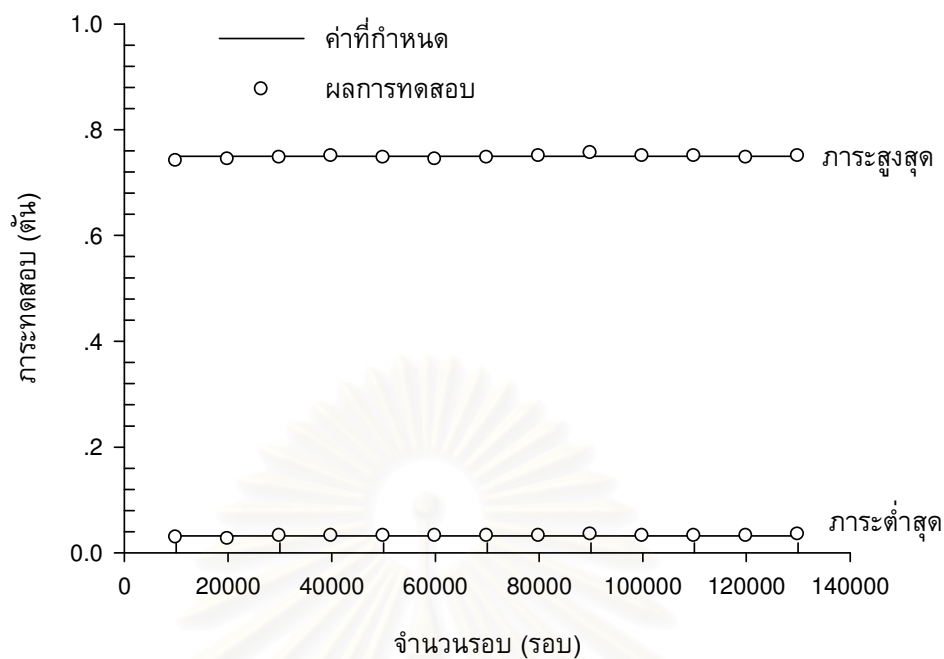
รูปที่ 5.19 การควบคุมภาวะในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

## 5.5 ผลการทดสอบโซ่

รูปที่ 5.20 แสดงการติดตั้งโซ่กับเครื่องทดสอบ ผลของการควบคุมภาวะในการทดสอบโซ่ แสดงอยู่ในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 การทดสอบความล้าของโซ่



รูปที่ 5.21 การควบคุมภาวะของการทดสอบไซ้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### อภิปรายผลการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงการประเมินคุณภาพของโปรแกรมจากผลการทดสอบ การประเมินโปรแกรมประกอบด้วย หัวข้อที่ 6.1 ความถูกต้องของการควบคุมภาวะ หัวข้อที่ 6.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากการใช้โปรแกรมที่พัฒนา กับผลการทดสอบจากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป หัวข้อที่ 6.3 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากการใช้โปรแกรมที่พัฒนา และหัวข้อที่ 6.4 จะกล่าวถึงการประเมินความถูกต้องของการควบคุมภาวะในงานทดสอบโซ่

#### 6.1 ความถูกต้องของการควบคุมภาวะ

เนื่องจากประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาอยู่ที่ความสามารถในการควบคุมภาวะ เพราะว่า การควบคุมภาวะที่แม่นยำจะให้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้ ดังนั้นการประเมินความถูกต้องของภาวะจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การประเมินความถูกต้องของภาวะประกอบด้วย การประเมินความถูกต้องของรูปคลื่น ความถี่ภาวะ ภาวะเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาวะ เนื่องจากการประเมินความถูกต้องของรูปคลื่นและความถี่ภาวะ ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความถูกต้องของภาวะเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาวะ การประเมินความถูกต้องพิจารณาจากกราฟที่พล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาวะ ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาวะ คำนวณได้จากสมการที่ 6.1

$$\%Error = \frac{(P_s - P_t)}{P_s} \times 100 \quad (6.1)$$

โดยที่  $\%Error$  คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ย (หรือแอมพลิจูดภาวะ)

$P_s$  คือ ภาวะเฉลี่ย (หรือแอมพลิจูดภาวะ) ที่กำหนดหรือที่ได้จากการคำนวณ

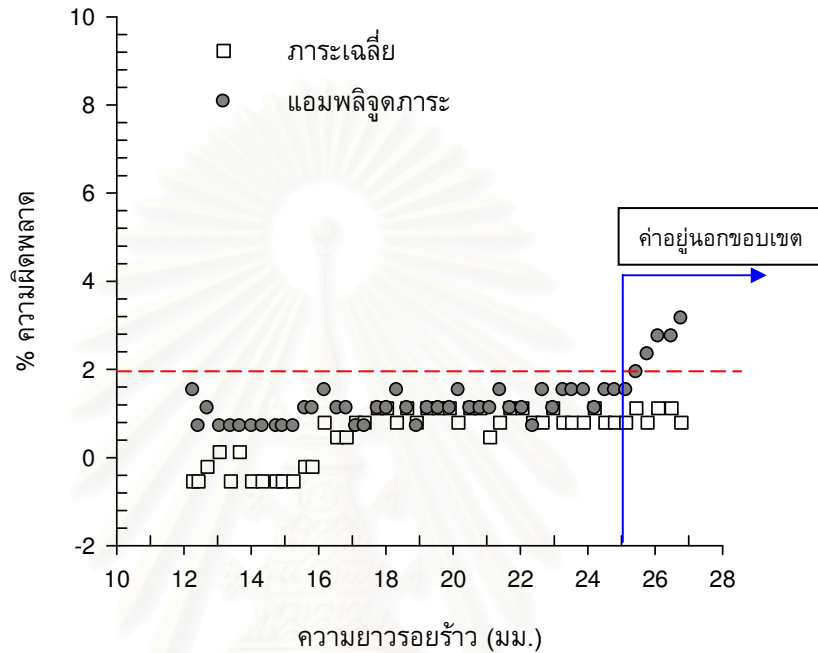
$P_t$  คือ ภาวะเฉลี่ย (หรือแอมพลิจูดภาวะ) ที่ได้จากการทดสอบ

การประเมินความถูกต้องของภาวะในหัวข้อถัดไปจะแบ่งตามชนิดการทดสอบดังนี้ หัวข้อที่ 6.1.1 กล่าวถึงผลการประเมินกรณีทดสอบแบบควบคุมภาวะ หัวข้อที่ 6.1.2 กล่าวถึงผลการประเมินกรณีการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และหัวข้อที่ 6.1.3 กล่าวถึงผลการประเมินกรณีทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$

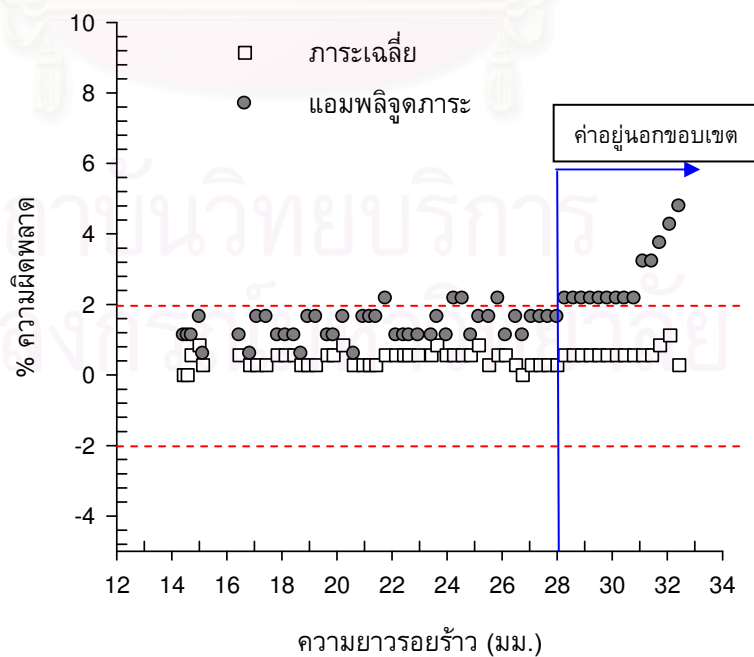


### 6.1.1 การทดสอบแบบควบคุมภาวะ

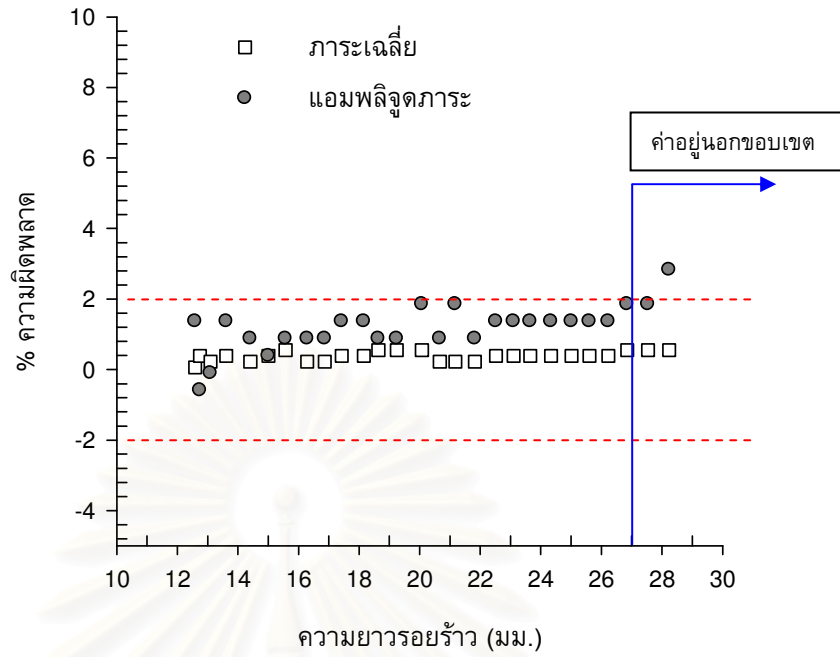
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาวะเฉลี่ยและแอมพลิจูด ภาวะกับความยาวรอยร้าว ในการทดสอบแบบควบคุมภาวะ ที่อัตราส่วนภาวะเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 แสดงอยู่ในรูปที่ 6.1 ถึง 6.4 ตามลำดับ



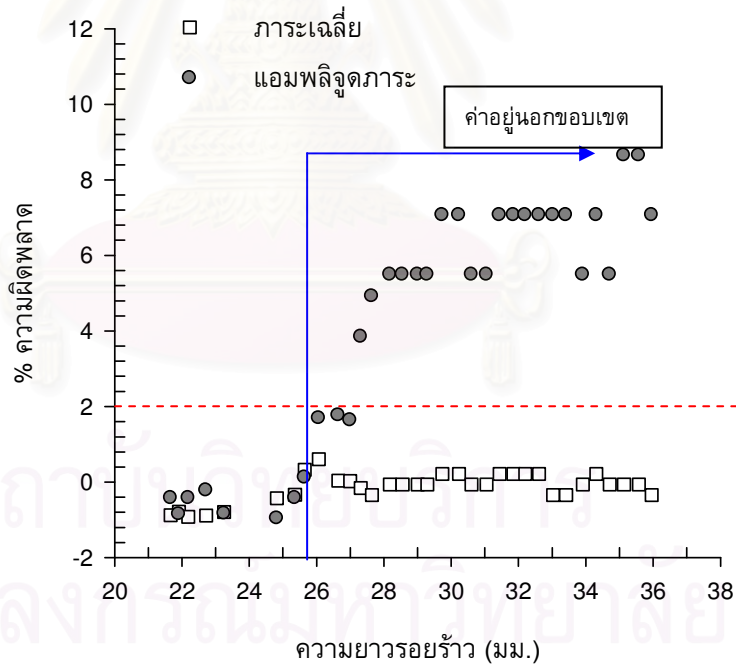
รูปที่ 6.1 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.1



รูปที่ 6.2 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.3

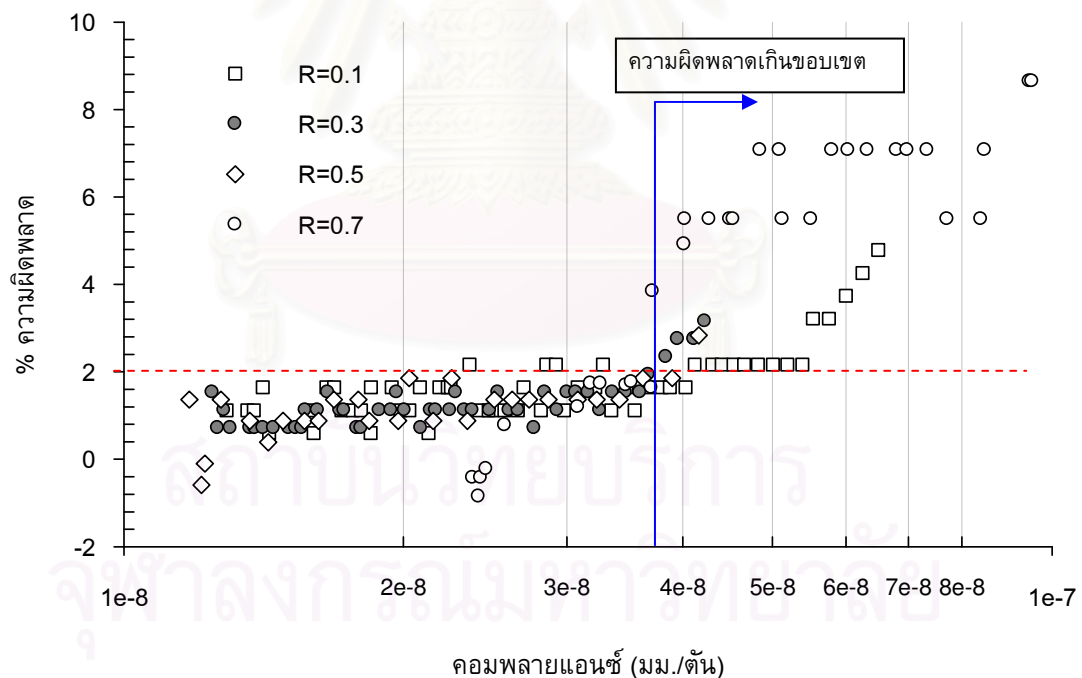


รูปที่ 6.3 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.5



รูปที่ 6.4 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.7

จากรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.4 พบว่า เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยอยู่ในขอบเขต (เส้นประแนวนอน)  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ ทุกอัตราส่วนภาระ แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระมีแนวโน้มสูงขึ้นและเกินขอบเขตเมื่อรอยร้าวยาวเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง (เส้นทึบแนวตั้ง) เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระจะเริ่มเกินขอบเขตที่ความยาวรอยร้าวในช่วง 25 ถึง 30 มม. เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกินขอบเขตนี้เกิดจากคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น จนทำให้อัลกอริทึมชดเชยภาระไม่สามารถควบคุมภาระให้ลู่เข้าขอบเขตที่กำหนดได้ ดังนั้นโมดูล Load Compensation จึงมีขีดจำกัดการทำงานในช่วงดังกล่าว การหาขีดจำกัดนี้ในรูปทั่วไปทำได้โดยการพล็อตเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระเทียบกับคอมพลายแอนซ์ กราฟที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.5 จากรูปจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ทุกอัตราส่วนภาระมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือที่คอมพลายแอนซ์ประมาณ  $3.5 \times 10^{-8}$  มม./ตัน ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระจะเกินขอบเขตที่กำหนด สรุปว่าโมดูล Load Compensation ไม่สามารถชดเชยภาระได้อย่างแม่นยำเมื่อคอมพลายแอนซ์สูงกว่าค่าดังกล่าวได้

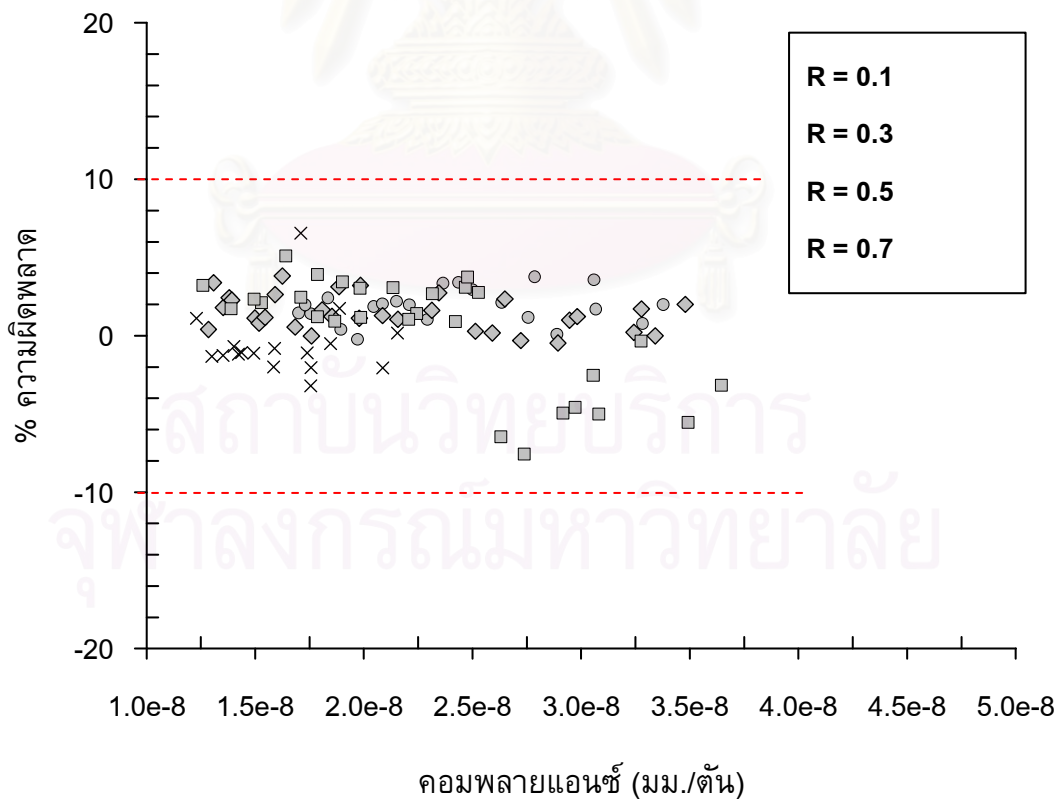


รูปที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระของการทดสอบแบบควบคุมภาระที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาระ

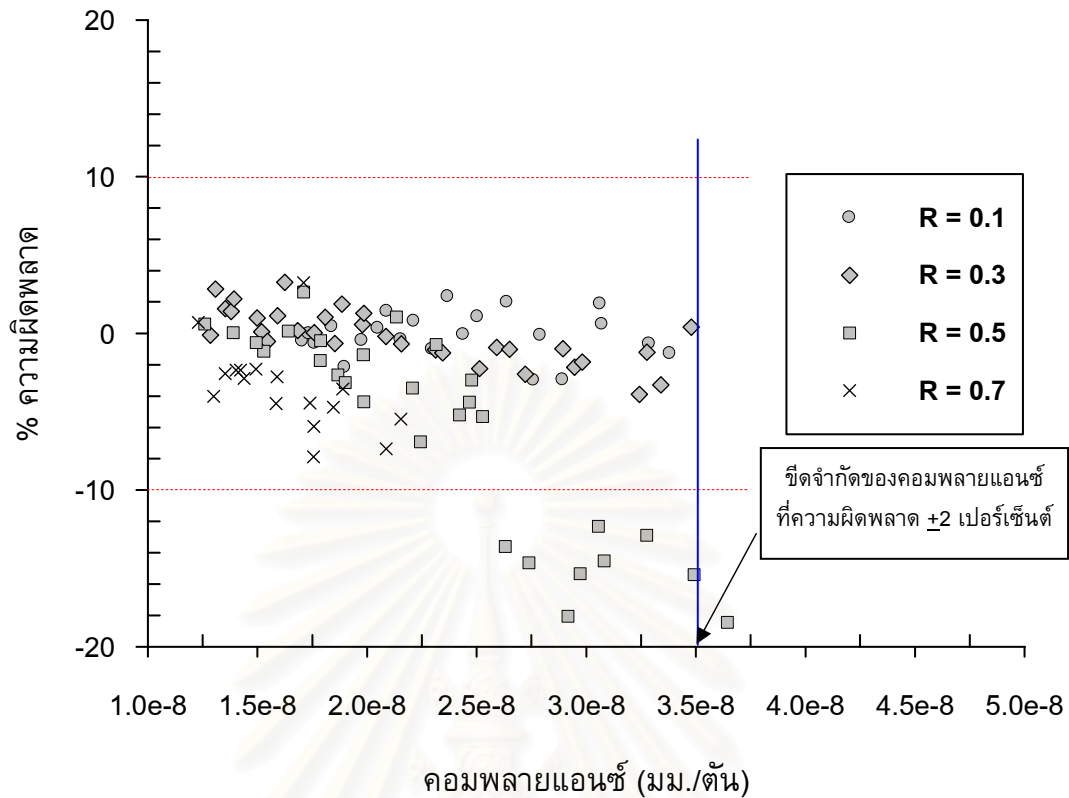
### 6.1.2 การทดสอบแบบลด $\Delta K$

เนื่องจากเครื่องทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเครื่องทดสอบขนาดใหญ่ พิสัยภาระต่ำสุดที่กำหนดได้ที่คอนโทรลเลอร์คือ  $\pm 3$  ตัน เมื่อใช้ควบคุมภาระในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ขณะที่  $\Delta K$  มีค่าน้อย (ซึ่งเทียบกับพิสัยภาระมีค่าน้อย) เครื่องทดสอบอาจควบคุมภาระได้ไม่ดี ซึ่งจะส่งผลให้การชดเชยภาระของโมดูล Load Compensation ทำได้ไม่ดี ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนขอบเขตเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากเดิม  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันสัญญาณภาระ (ที่ส่งไปควบคุมเครื่องทดสอบ) ลู่ออก และทำให้ชิ้นงานทดสอบหรือเครื่องทดสอบเสียหายได้

จากหัวข้อ 6.1.1 แสดงให้เห็นว่า คอมพลายแอนซ์มีผลต่อการควบคุมภาระ ดังนั้นการประเมินความถูกต้องของภาระในการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  จะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาระ การหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จะเทียบกับภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2.17) ถึง (2.20) กราฟที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.6 และ 6.7 ตามลำดับ จากรูปที่ 6.6 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ อยู่ในขอบเขตที่กำหนด แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระ (รูปที่ 6.7) มีค่าเกินขอบเขต  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ ที่คอมพลายแอนซ์ต่ำกว่าขีดจำกัดความผิดพลาด  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ แนวโน้มนี้แสดงว่า



รูปที่ 6.6 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาระ



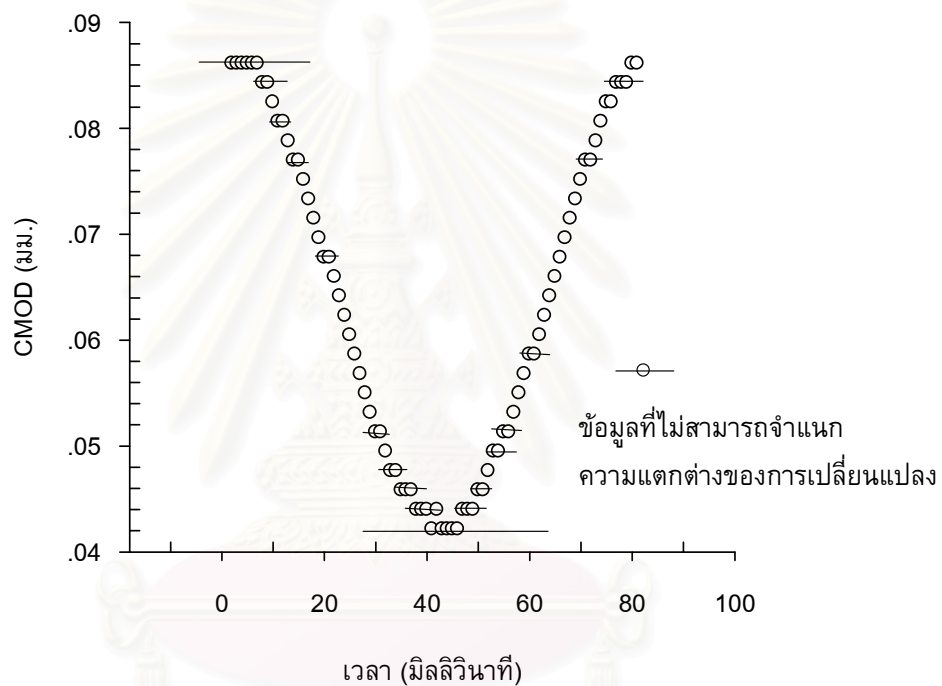
รูปที่ 6.7 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่คอมพลาเยนซ์ต่าง ๆ ของทุกอัตราส่วนภาระ

ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระไม่ได้มีผลมาจากคอมพลาเยนซ์อย่างเดียว ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระอาจเกิดจากการที่คลิปกเกจไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ  $CMOD$  ได้ การตรวจสอบข้อสันนิษฐานดังกล่าวทำได้โดยการสุ่มข้อมูล  $CMOD$  ในช่วงที่เปอร์เซนต์ความผิดพลาดเกินขอบเขตที่กำหนด ในที่นี้เลือกที่  $\Delta K$  เท่ากับ  $2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  และ  $R$  เท่ากับ  $0.5$  และความยาวรอยร้าว  $22 \text{ มม.}$  ข้อมูลที่สภาวะดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปที่ 6.8 จากรูปพบว่าบริเวณยอดคลื่นของสัญญาณ  $CMOD$  จะมีค่า  $CMOD$  ที่เวลาต่างกันเท่ากัน ข้อมูลนี้แสดงปัญหาของคลิปกเกจเกี่ยวกับการจำแนกความแตกต่างของสัญญาณ การนำสัญญาณ  $CMOD$  ที่มีลักษณะเช่นนี้ไปวิเคราะห์จะทำให้ การคำนวณความยาวรอยร้าว การปรับลดภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระ และการชดเชยภาระทำงานไม่แม่นยำ

การหาขีดจำกัดการวัดของคลิปกเกจ พิจารณาได้จากกราฟเปอร์เซนต์ความผิดพลาดเทียบกับ  $\Delta CMOD$  รูปที่ 6.9 แสดงเปอร์เซนต์ความผิดพลาดเทียบกับ  $\Delta CMOD$  ของการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ  $0.5$  (ซึ่งมีความผิดพลาดมากที่สุดถ้าพิจารณาจากรูปที่ 6.7) จากรูปพบว่า เปอร์เซนต์ความผิดพลาดเกินขอบเขตที่กำหนดเมื่อ  $\Delta CMOD$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $0.047 \text{ มม.}$  ดังนั้นจึงไม่ควรใช้งานคลิปกเกจที่  $\Delta CMOD$  น้อยกว่าค่าดังกล่าว เพราะจะทำให้ผลการทดสอบไม่แม่นยำ

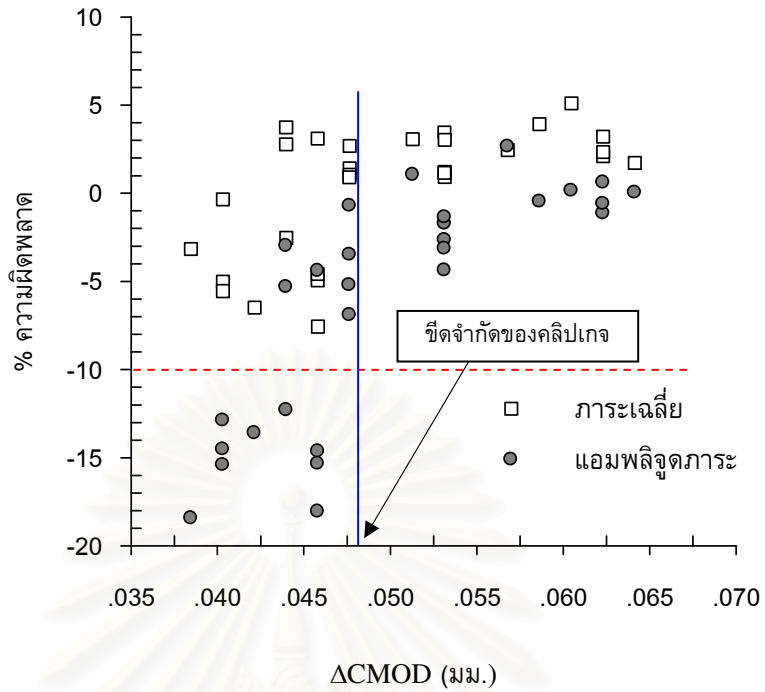
เนื่องจาก  $\Delta CMOD$  มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ  $\Delta K$  [5] ดังนั้นจึงสามารถคำนวณขีดจำกัดของคลิบเกจในเทอมของ  $\Delta K$  ได้ ผลการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 6.10 จากรูปพบว่าระบบทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ไม่สามารถทดสอบหาพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวลำที่  $\Delta K$  น้อยกว่า  $2.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ได้

ด้วยข้อจำกัดของคลิบเกจที่กล่าวไป ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถทดสอบหา  $\Delta K_{th}$  ของวัสดุอะลูมิเนียมผสม 7075-T6 ที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ได้ เพราะวัสดุนี้มีค่าเฉลี่ยของ  $\Delta K_{th}$  ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 เท่ากับ  $2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  โดยประมาณ<sup>1</sup> [26] อย่างไรก็ตาม ระบบทดสอบนี้ก็สามารถใช้ในการทดสอบหา  $\Delta K_{th}$  ของวัสดุที่มีค่า  $\Delta K_{th}$  มากกว่า  $2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ได้

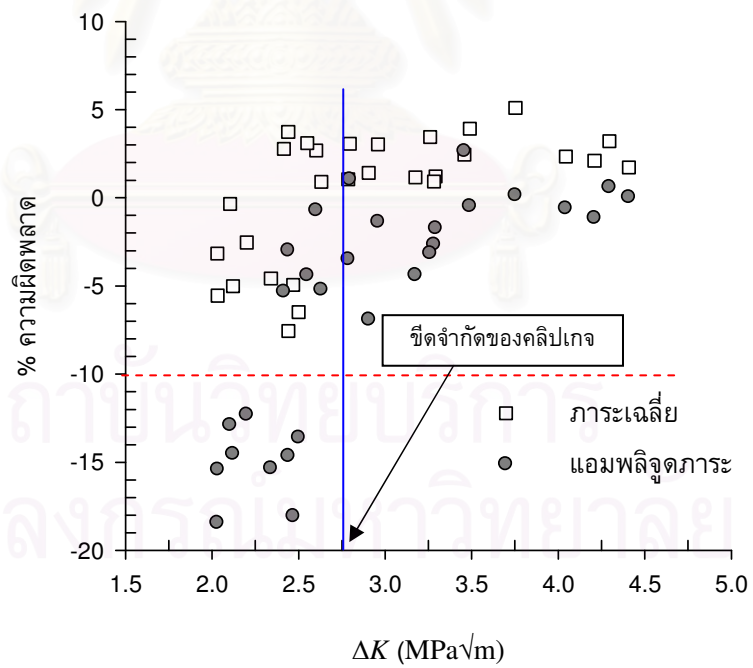


รูปที่ 6.8 ลักษณะของสัญญาณ  $CMOD$  ที่ไม่สามารถจำแนก  
ความแตกต่างของระดับสัญญาณ

<sup>1</sup> ถ้าอัตราส่วนภาระเพิ่มขึ้น  $\Delta K_{th}$  จะลดลง



รูปที่ 6.9 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของภาระที่  $\Delta CMOD$  ต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.5

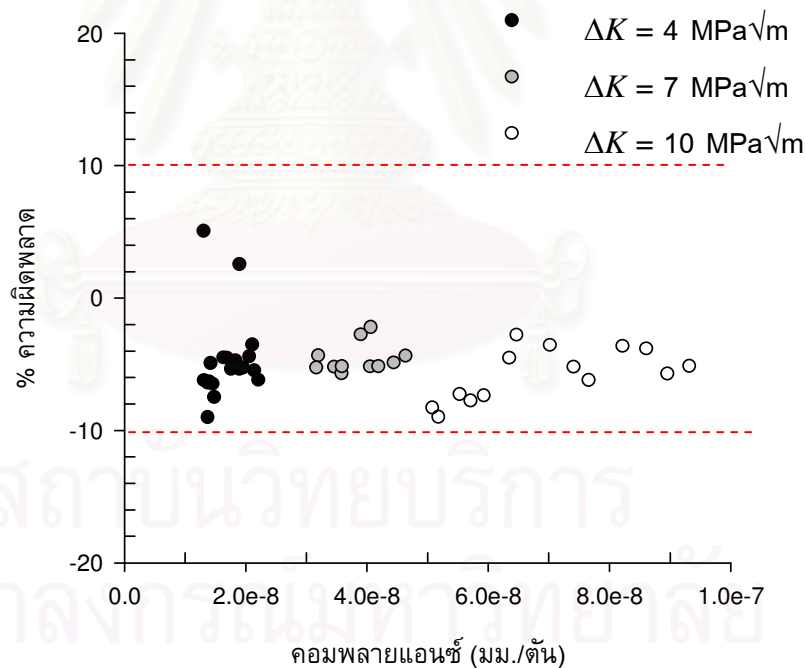


รูปที่ 6.10 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของภาระที่  $\Delta K$  ต่าง ๆ ที่  $R$  เท่ากับ 0.5

### 6.1.3 การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$

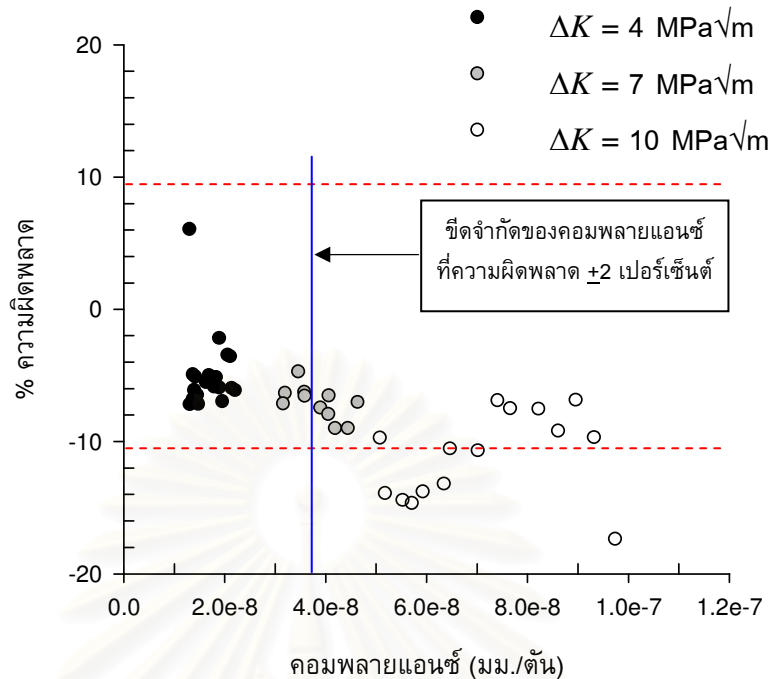
การประเมินความถูกต้องของการควบคุมภาระในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้า การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระ จะเทียบกับภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2.17) ถึง (2.20) ขอบเขตความผิดพลาดในการควบคุมภาระกำหนดไว้ที่  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ กราฟเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 และ  $\Delta K$  เท่ากับ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  แสดงอยู่ในรูปที่ 6.11 ถึง 6.12 ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยที่  $\Delta K$  เท่ากับ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  อยู่ในขอบเขตที่กำหนด แต่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระที่  $\Delta K$  เท่ากับ 10 MPa $\sqrt{m}$ อยู่นอกขอบเขตที่กำหนด เพราะคอมพลายแอนซ์มีค่าถึงขีดจำกัด แสดงให้เห็นว่า ขีดจำกัดของคอมพลายแอนซ์ไม่ขึ้นกับชนิดการทดสอบ กล่าวคือ เมื่อคอมพลายแอนซ์มีค่าถึงขีดจำกัดนี้แล้ว โมดูล Load compensation ไม่สามารถปรับแก้ภาระได้ตามที่กำหนด



รูปที่ 6.11 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่คอมพลายแอนซ์ต่าง ๆ ของทุุกอัตราส่วนภาระ





รูปที่ 6.12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแอมพลิจูดภาระในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่ค่อมพลาเยนซ์ต่าง ๆ ของทุุกอัตราส่วนภาระ

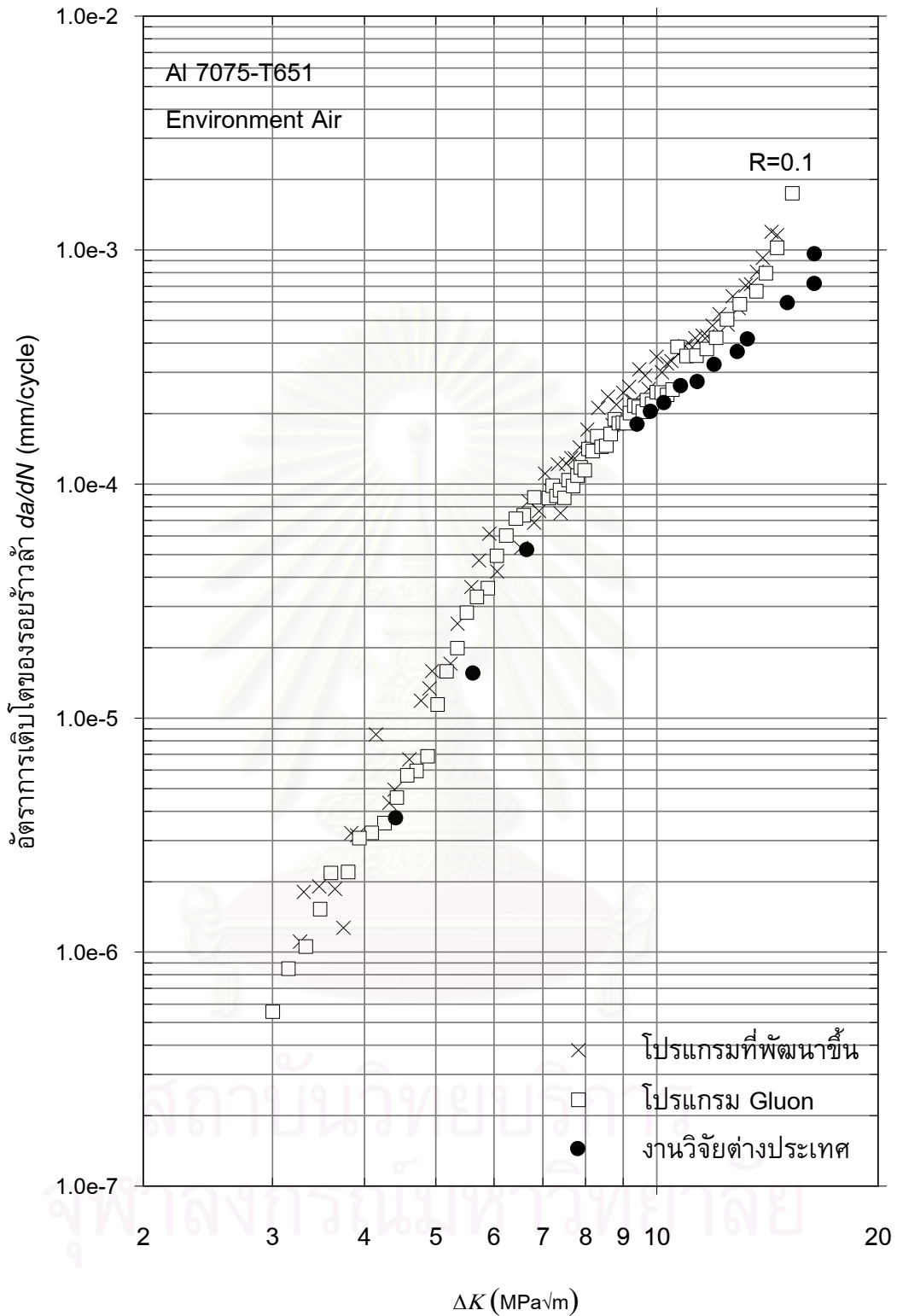
## 6.2 การเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

หัวข้อนี้แบ่งการอภิปรายผลออกเป็นสองส่วนตามชนิดการทดสอบ ส่วนแรกอภิปรายการเปรียบเทียบผลการทดสอบในการทดสอบแบบควบคุมภาระและแบบลด  $\Delta K$  ที่ได้จากการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น กับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอื่นซึ่งใช้โปรแกรมทดสอบสำเร็จรูป (ชื่อ Gluon) ของบริษัท Shimudzu นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยอื่น [26] ส่วนที่สองอภิปรายการเปรียบเทียบผลการทดสอบในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่ได้จากการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น กับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอื่นซึ่งทำงานภายใต้โปรแกรม Gluon

### 6.2.1 การทดสอบแบบควบคุมภาระ และแบบลด $\Delta K$

สภาวะทดสอบกรณีที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น คือ ภาระรูปไซน์ ความถี่ภาระ 10 เฮิรท์ซ์ ในสภาพแวดล้อมอากาศ

การประเมินความถูกต้องพิจารณาโดยการเปรียบเทียบกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 กราฟเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปที่ 6.13 จากรูปจะเห็นว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าจากโปรแกรมและเครื่องทดสอบทั้งสองซ้อนทับกัน จึงสรุปว่าการทำงานของโมดูล Compensation โมดูล Analysis โมดูล Waveform generation โมดูล Conversion และโมดูล Sampling & Save มีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนา โปรแกรมสำเร็จรูป และงานวิจัยอื่น<sup>2</sup> ที่ R เท่ากับ 0.1

<sup>2</sup> ใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT หน้า 5 มม. กว้าง 76.2 มม. และทดสอบที่ความถี่ภาระ 30 เฮิรท์ส ในสภาพแวดล้อมอากาศ

## 6.2.2 การทดสอบแบบควบคุม $\Delta K$

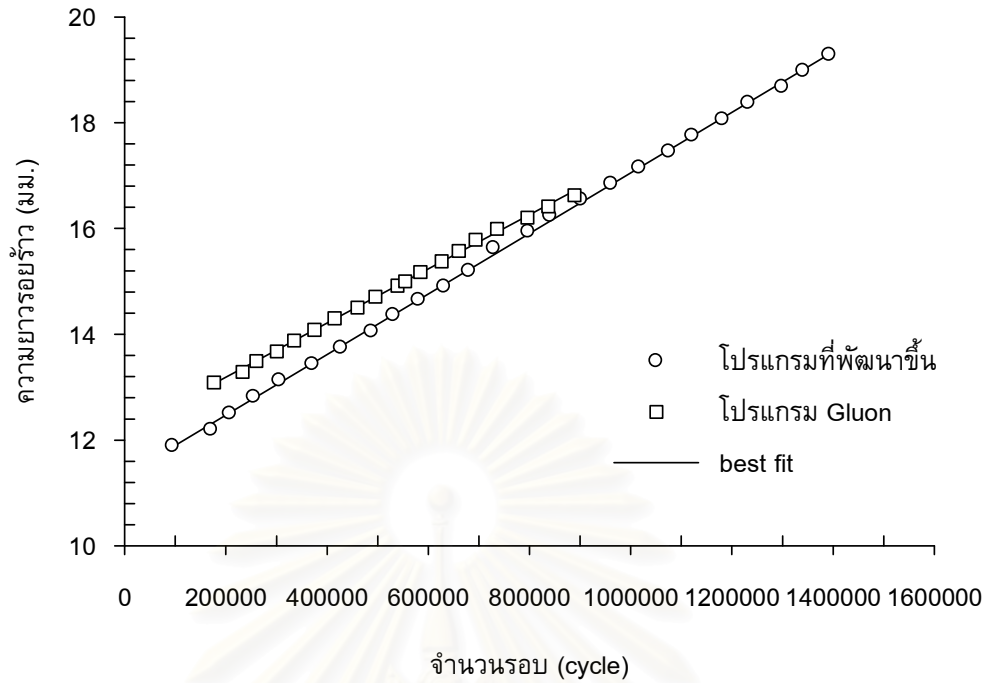
การประเมินความถูกต้องของผลอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  พิจารณาจากกราฟความยาวรอยร้าวกับจำนวนรอบภาระ โดยกราฟจะต้องเป็นเส้นตรง (ความชันคงที่) เพราะอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำที่อัตราส่วนภาระที่กำหนดจะขึ้นกับค่า  $\Delta K$  ดังนั้นถ้าควบคุม  $\Delta K$  แล้วอัตราการเติบโตของรอยร้าวต้องคงที่

ผลการทดสอบจากโปรแกรมที่พัฒนาและจากโปรแกรม Gluon ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 และ  $\Delta K$  เท่ากับ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  แสดงอยู่ในรูปที่ 6.14 ถึง 6.16 ตามลำดับ จากรูปที่ 6.14 ถึง รูปที่ 6.16 กราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (ความชันคงที่) ความชันของกราฟที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนามีค่ามากกว่าความชันของกราฟที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปเล็กน้อย เพราะค่า  $\Delta K$  ที่ควบคุมได้ในระหว่างการทดสอบมีค่าสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 6.1

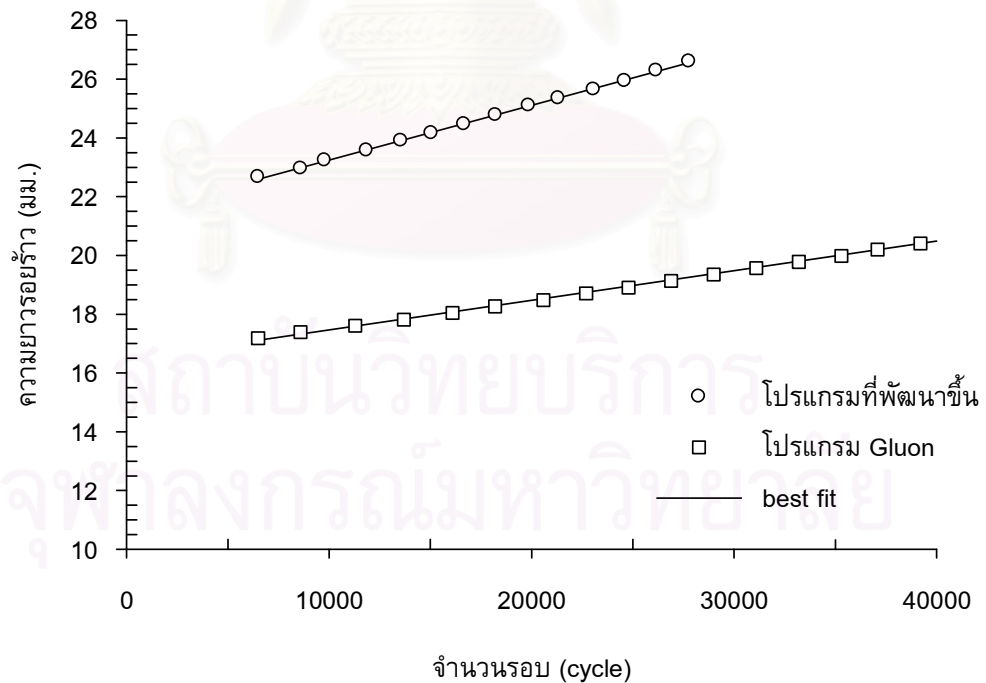
ตารางที่ 6.1  $\Delta K$  เฉลี่ยและอัตราการเติบโตของรอยร้าวในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$

$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ ) (ค่าระบุ)	$\Delta K$ เฉลี่ย (MPa $\sqrt{m}$ )		$da/dN$ (mm/cycle)	
	LabVIEW <sup>3</sup>	Gluon	LabVIEW	Gluon
4	4.12 $\pm$ 0.02	4.00 $\pm$ 0.004	5.72 $\times 10^{-6}$	4.72 $\times 10^{-6}$
7	7.27 $\pm$ 0.02	7.01 $\pm$ 0.003	1.86 $\times 10^{-4}$	1.00 $\times 10^{-4}$
10	10.55 $\pm$ 0.04	10.04 $\pm$ 0.001	4.15 $\times 10^{-4}$	2.51 $\times 10^{-4}$

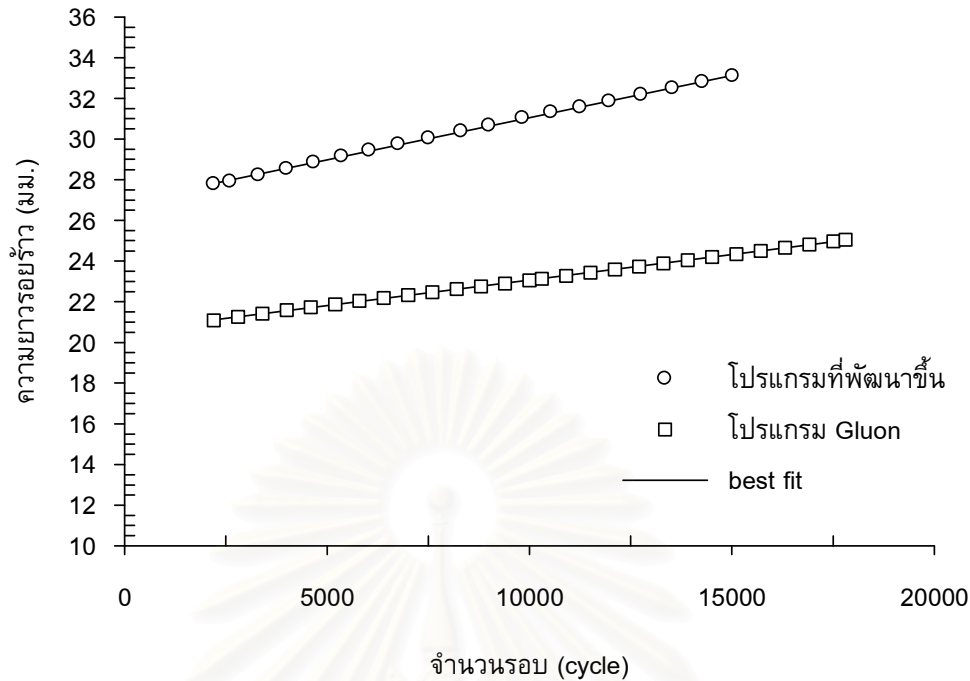
<sup>3</sup> ตัวเลขหลังเครื่องหมาย  $\pm$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of mean)



รูปที่ 6.14 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาระต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K$  เท่ากับ  $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



รูปที่ 6.15 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาระต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K$  เท่ากับ  $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



รูปที่ 6.16 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาระต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ที่  $\Delta K$  เท่ากับ  $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

### 6.3 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล่า

การประเมินพฤติกรรมอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า พิจารณาจาก 1) การซ้อนทับของผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแบบควบคุมภาระและแบบลด  $\Delta K$  และ 2) แนวโน้มของพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล่าเมื่ออัตราส่วนภาระเปลี่ยนแปลงไป การประเมินทั้งสองกรณีช่วยตรวจสอบว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่

รูปที่ 6.17 ถึง 6.20 แสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าในการทดสอบทั้งสองแบบ ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 จากรูปที่ 6.17 ถึง 6.20 พบว่าข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าที่ได้จากการทดสอบแบบควบคุมภาระและแบบลด  $\Delta K$  มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน (มีพฤติกรรมการเติบโตอยู่ในช่วงที่ 2 เหมือนกัน) กล่าวคือ พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล่าไม่ขึ้นอยู่กับชนิดการทดสอบ ดังนั้นผู้ทดสอบสามารถเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับช่วงของข้อมูลอัตราการเติบโตที่ต้องการได้อย่างอิสระ

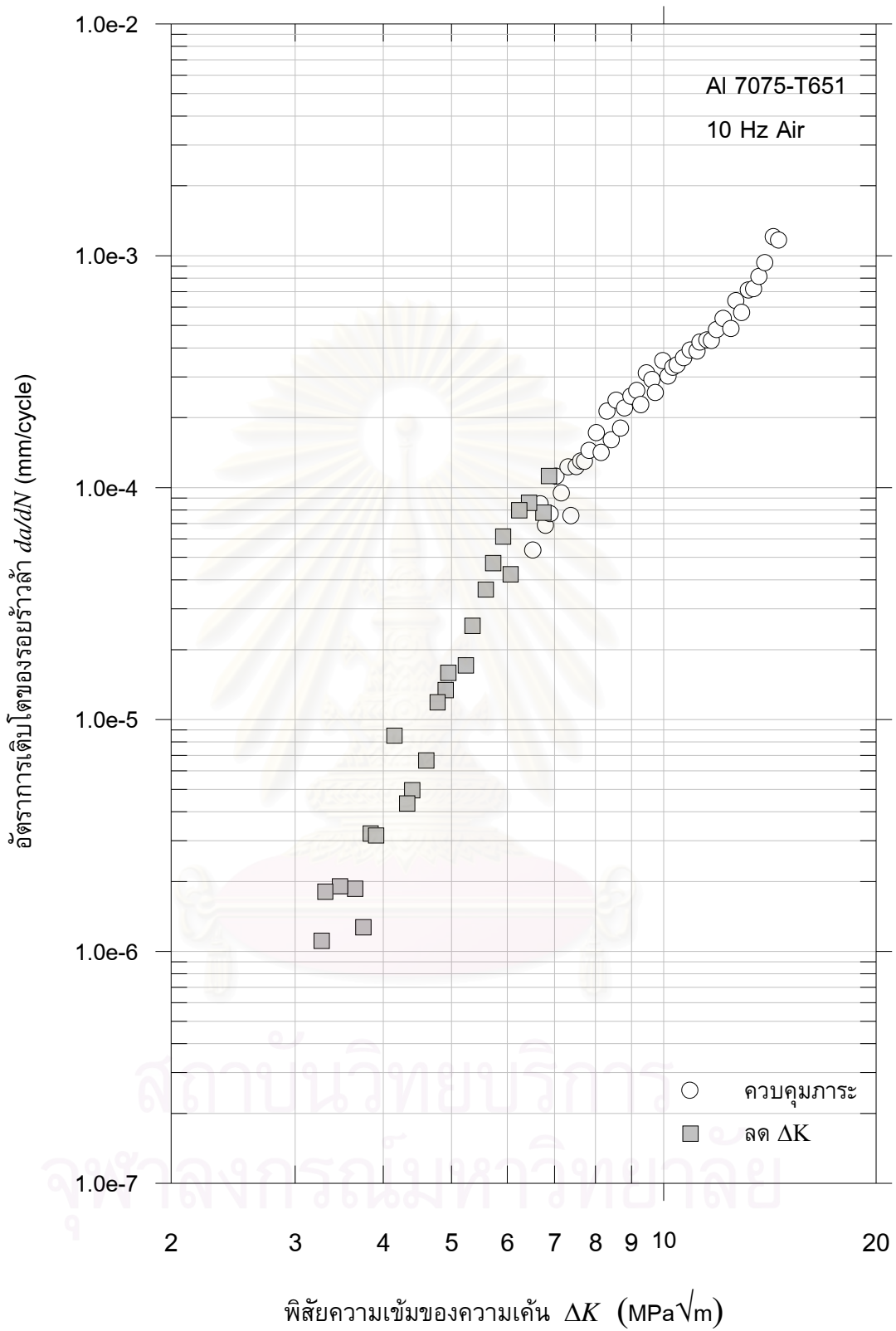
รูปที่ 6.21 และรูปที่ 6.22 แสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น และอัตราการเติบโตที่ได้จากงานวิจัยของ R.G. Forman [26] จากรูปพบว่า เส้นกราฟที่อัตราส่วนภาระต่ำ ๆ จะอยู่ทางด้านขวามือสุด เมื่ออัตราส่วนภาระเพิ่มขึ้น แนวโน้มของเส้นกราฟจะเลื่อนไปทางซ้าย แนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นที่ศึกษาวัสดุนี้ [26]

เนื่องจากข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวในรูปที่ 6.21 อยู่ในช่วงการเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (ช่วงที่ 2) ดังนั้นจึงเลือกสมการของ Walker [2] เพื่อแทนข้อมูลการทดสอบ โดยการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (ภาคผนวก ฉ) จะได้

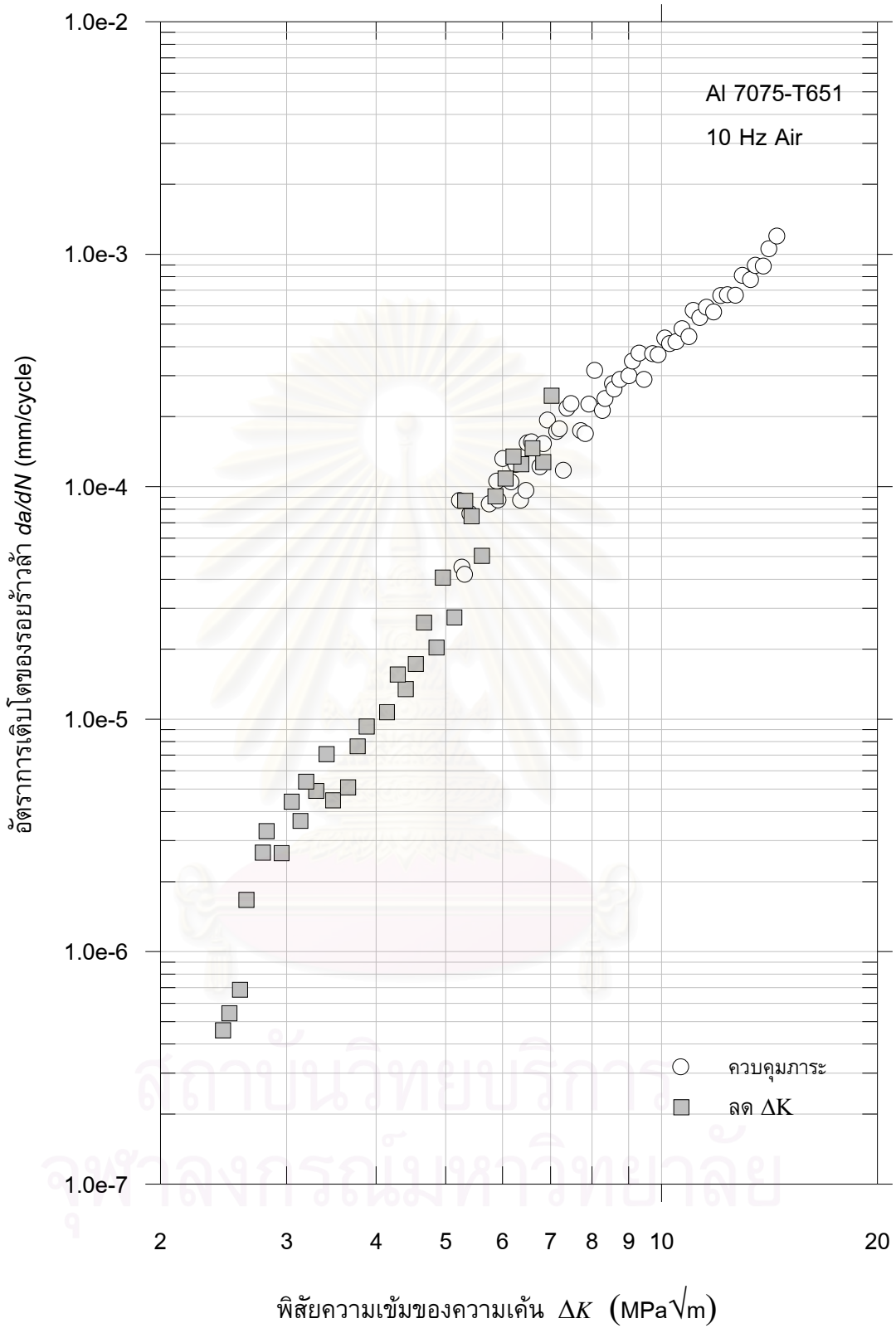
$$\frac{da}{dN} = \left[ \frac{2.31 \times 10^{-8}}{(1-R)^{1.422}} \right] \Delta K^{4.072} \quad (6.2)$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

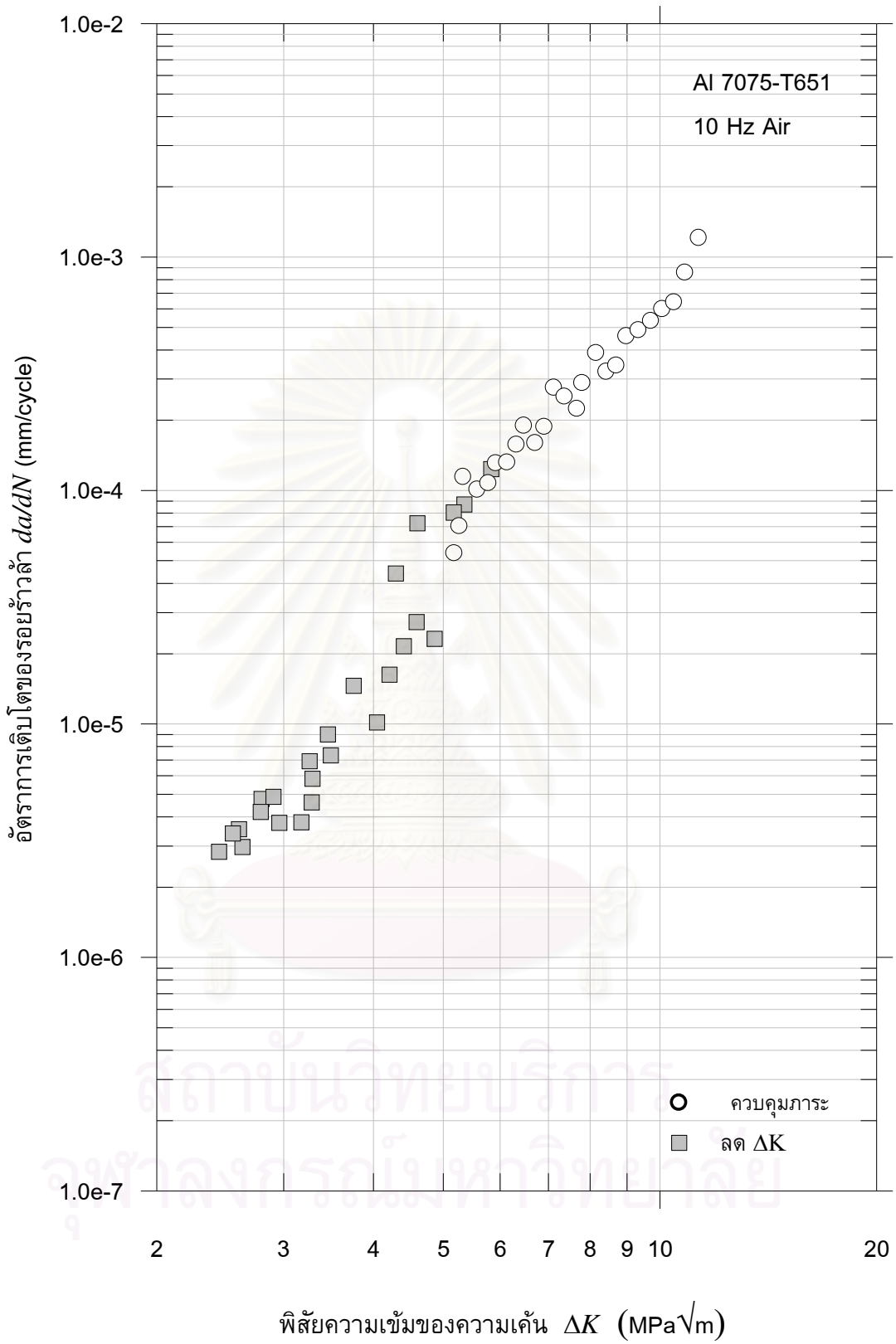


รูปที่ 6.17 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1

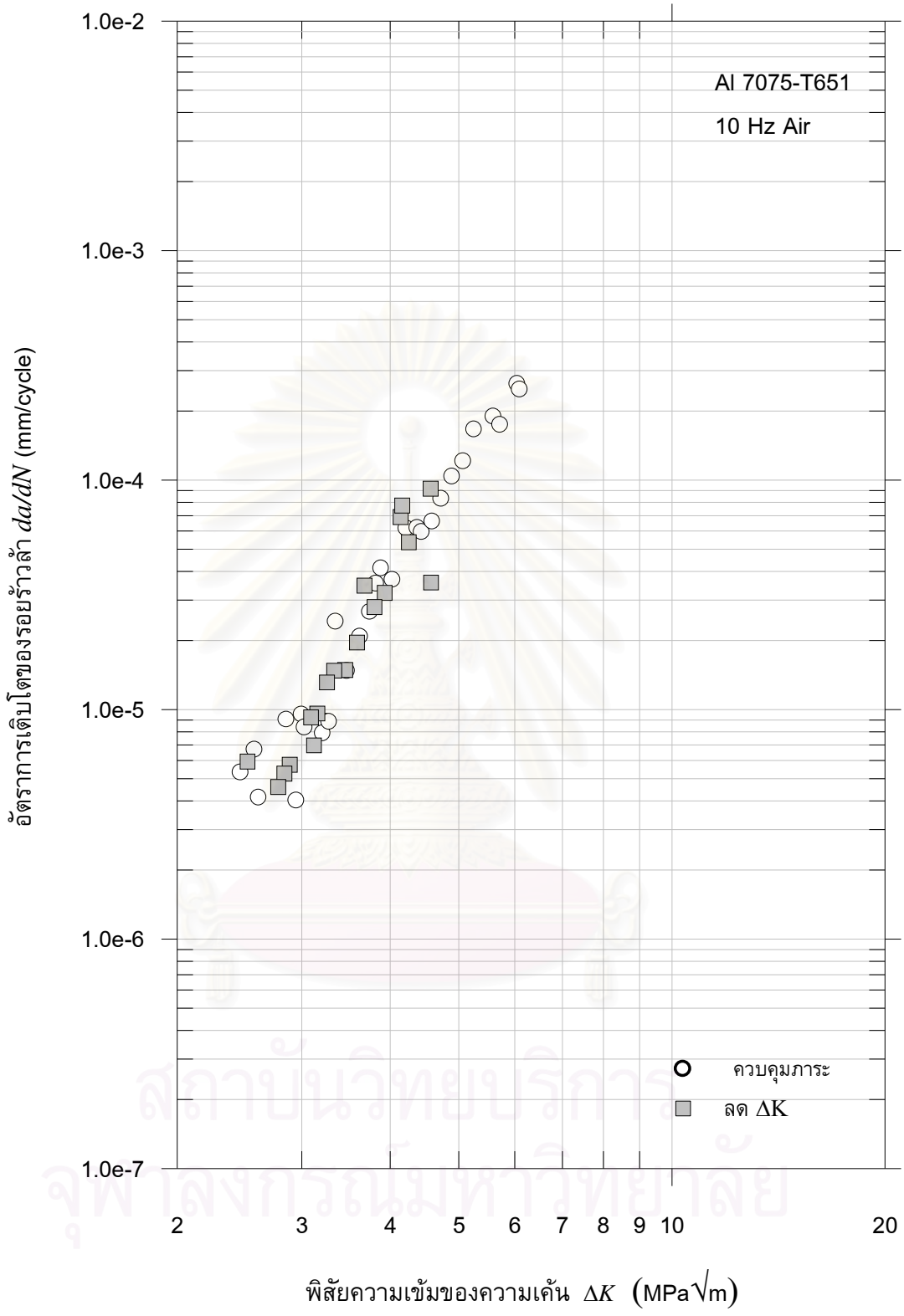


รูปที่ 6.18 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3

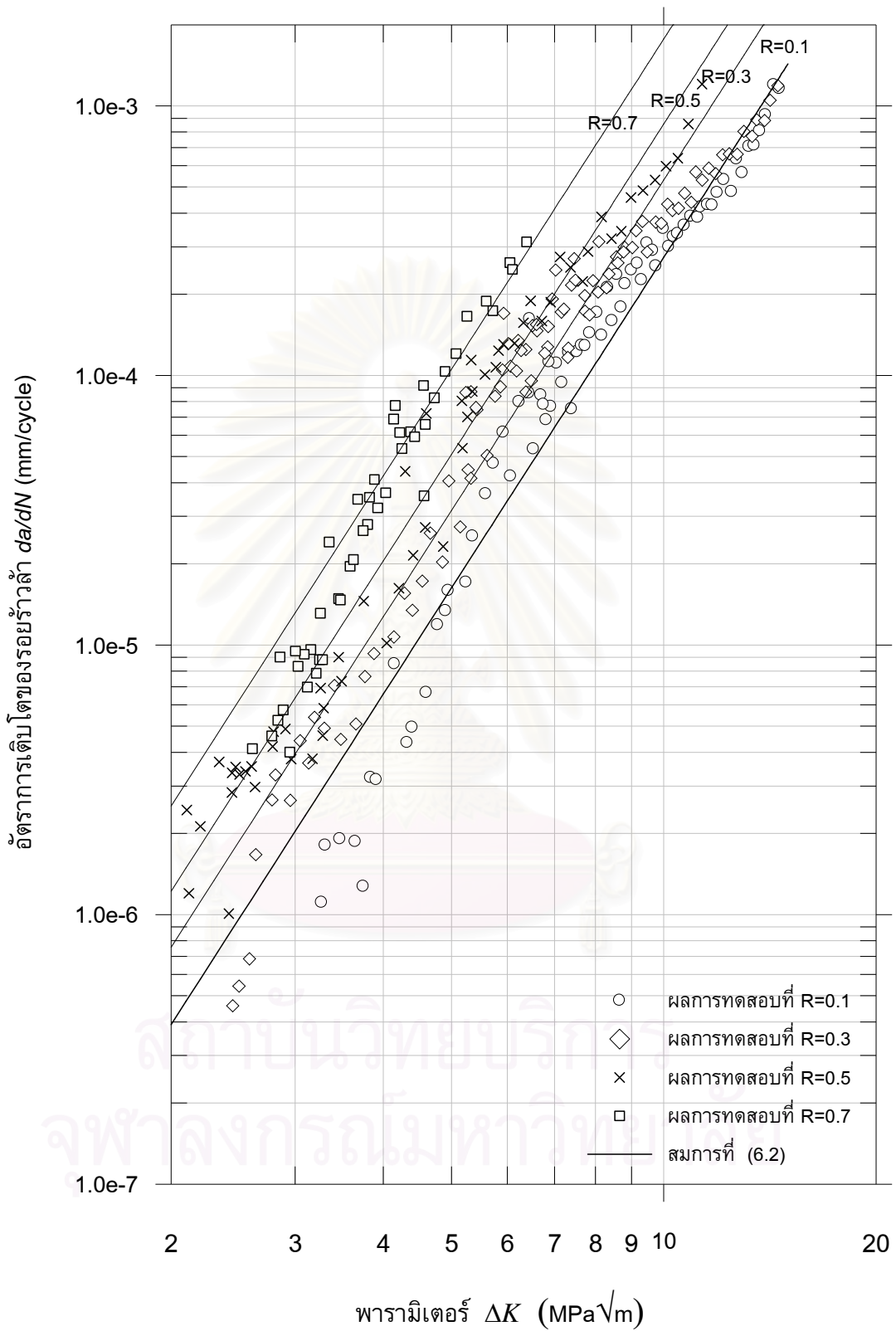




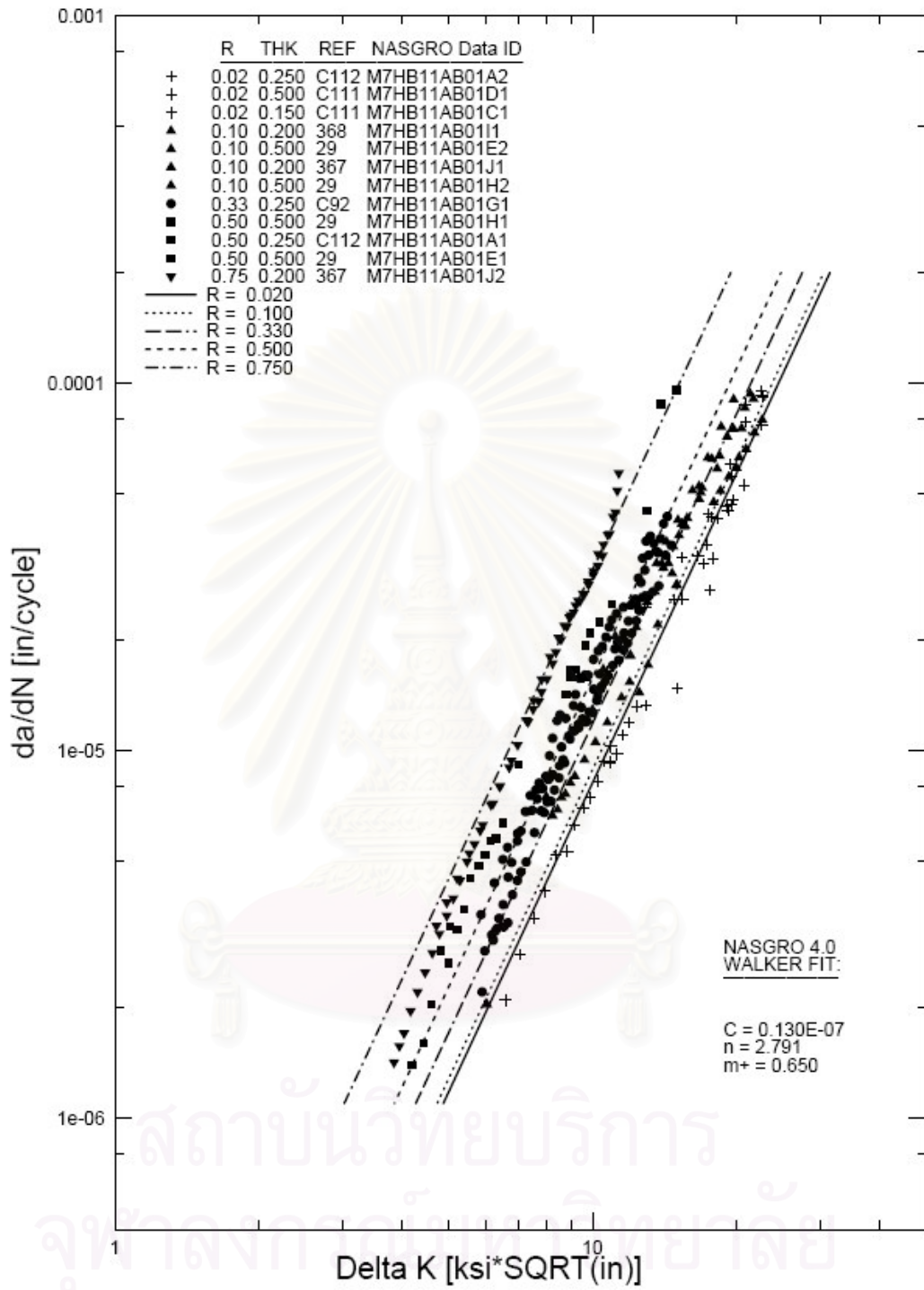
รูปที่ 6.19 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5



รูปที่ 6.20 อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7



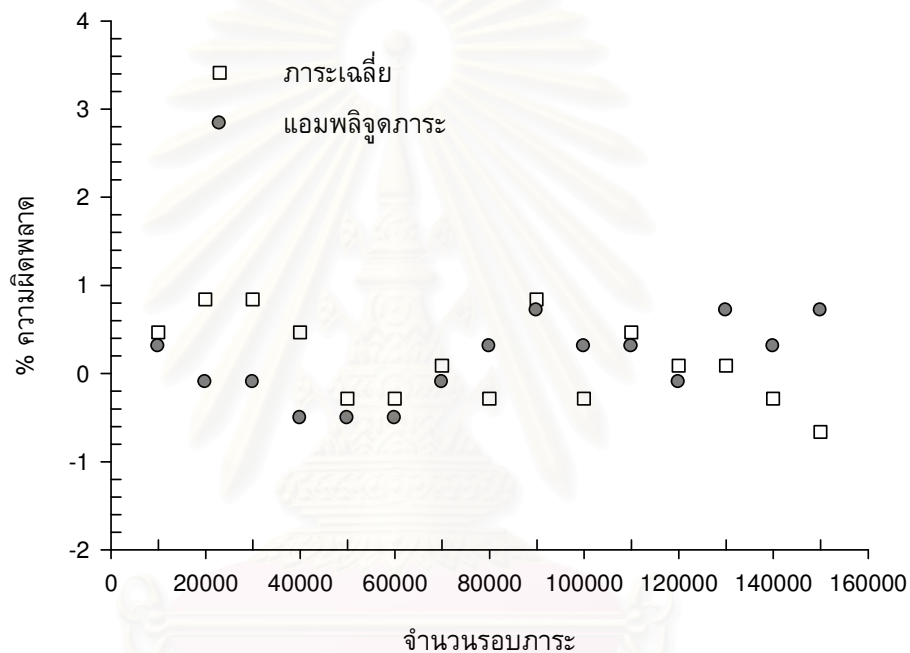
รูปที่ 6.21 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ  
 ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 6.22 พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ  
 ในงานวิจัยของ R.G. Forman

#### 6.4 การประเมินผลการประยุกต์ใช้โปรแกรมกับงานทดสอบโซ่<sup>4</sup>

นอกจากการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำในชิ้นงาน CT แล้วโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังถูกนำไปใช้ในการทดสอบความล้าของโซ่ รูปที่ 6.26 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ จากรูปจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในขอบเขตที่กำหนดคือ 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโปรแกรมมีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการทดสอบชิ้นงานประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 6.23 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของภาระในการทดสอบความล้าของโซ่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>4</sup> การทดสอบนี้ไม่ได้อยู่ในวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยในหัวข้อที่ 7.1 หัวข้อที่ 7.1.1 จะสรุปเกี่ยวกับการออกแบบและการตรวจสอบโปรแกรม หัวข้อที่ 7.1.2 จะสรุปเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ หัวข้อที่ 7.2 แนะนำเกี่ยวกับข้อเสนอนี้ต่าง ๆ และหัวข้อที่ 7.3 แนะนำงานวิจัยต่อเนื่อง

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

##### 7.1.1 การออกแบบโปรแกรม และการตรวจสอบโปรแกรม

วิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ซอฟต์แวร์แล็บVIEW ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำแบบต่าง ๆ ดังนี้ 1) แบบควบคุมภาระ 2) แบบลด  $\Delta K$  และ 3) แบบควบคุม  $\Delta K$  การทำงานของโปรแกรมใช้ข้อแนะนำในมาตรฐาน ASTM E647 โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วยโปรแกรมย่อย 7 โมดูล คือ 1) User interface 2) Analysis 3) Conversion 4) Test type 5) Waveform generator และ 6) Load compensation 7) Sampling & Save

จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานโดย 1) การตรวจสอบเฟสของสัญญาณ 2) การตรวจสอบความถูกต้องของภาระที่ความถี่ต่าง ๆ 3) การตรวจสอบความถูกต้องของภาระที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ 4) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปร่างคลื่นภาระ และ 5) การตรวจสอบความถูกต้องของความถี่ภาระ จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1) โปรแกรมสามารถจัดเรียงเฟสที่ต่างกันของสัญญาณรูปไซน์ให้ตรงกันได้ โดยใช้การทำงานของซบวีไอ File\_sort signal.vi

2) โปรแกรมสามารถควบคุมภาระได้ในขอบเขตที่กำหนด การควบคุมภาระจะอยู่ในขอบเขต  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานมีค่าน้อยกว่า  $3.5 \times 10^{-8}$  มม./ตัน และ  $\Delta K$  มีค่ามากกว่า  $2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  เพราะการทำงานของโมดูล Load compensation

3) โปรแกรมสามารถควบคุมความถี่ภาระได้แม่นยำตามที่กำหนด เพราะการสร้างสัญญาณของซบวีไอ WG\_config\_waveform\_signal\_output.vi

4) โปรแกรมควบคุมรูปร่างของภาระรูปสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม ฟันเลื่อย ที่มีความถี่ภาระสูงกว่า 1 เฮิรตซ์ ได้ไม่ตึง เพราะโมดูล Load compensation มีข้อจำกัดตรงปรับชดเชยภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระได้เท่านั้น นอกจากนี้ฟังก์ชันปรับค่าเกนอัตโนมัติได้ (Automatic Gain Control, AGC) ของคอนโทรลเลอร์จะไม่ทำงานในกรณีที่คอนโทรลเลอร์รับสัญญาณที่ส่งไปควบคุมเครื่องทดสอบ ซึ่งไม่ได้สร้างจากคอนโทรลเลอร์

5) โปรแกรมไม่สามารถคำนวณความยาวรอยร้าวในกรณีภาระรูปสี่เหลี่ยมได้ เพราะ อัลกอริทึมการคำนวณความยาวรอยร้าวในซิปวีไอ Ana\_unloading waveform.vi ไม่สามารถใช้กับรูปคลื่นที่มีจุดสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด

### 7.1.2 การประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปประยุกต์กับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำของอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ CT ขนาดกว้าง 2 นิ้ว หนา 1 นิ้ว ในสภาพแวดล้อมอากาศ การทดสอบทั้งหมดใช้ภาระรูปไซน์ ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ส่วนการทดสอบแบบควบคุมภาระ และแบบลด  $\Delta K$  ทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้น ส่วนการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 และควบคุม  $\Delta K$  ที่ 4, 7 และ 10 MPa $\sqrt{m}$  ใช้ชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้น การประเมินความสามารถของโปรแกรมพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำจากการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่ใช้เครื่องทดสอบเครื่องอื่นและโปรแกรมสำเร็จรูป และยังเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยอื่น จากการประเมินการทดสอบทั้งหมดสรุปได้ดังนี้

1) โปรแกรมสามารถควบคุมภาระเฉลี่ยและแอมพลิจูดภาระได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด สำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระความผิดพลาดอยู่ในขอบเขต 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  และแบบควบคุม  $\Delta K$  ความผิดพลาดอยู่ในขอบเขต 10 เปอร์เซ็นต์ โมดูลชุดเซยภาระจะควบคุมภาระได้ดี ก็ต่อเมื่อคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานมีค่าน้อยกว่า  $3.5 \times 10^{-8}$  มม./ตัน และพารามิเตอร์  $\Delta K$  มีค่าสูงกว่า 2.5 MPa $\sqrt{m}$

2) จากผลการเปรียบเทียบกราฟอัตราการเติบโตที่ได้จากการทดสอบของ โปรแกรมที่พัฒนา โปรแกรมสำเร็จรูป Gluon และงานวิจัยอื่น พบว่ากราฟอัตราการเติบโตซ้อนทับกัน จึงสรุปได้ว่า การทำงานของโมดูลต่าง ๆ ในโปรแกรมมีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3) ผลการทดสอบที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมพบว่า ข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำที่ได้จากการทดสอบแบบควบคุมภาระ และแบบลด  $\Delta K$  ซ้อนทับกันในช่วงที่  $\Delta K$  เท่ากัน และพฤติกรรมของการเติบโตของรอยร้าวลำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนภาระ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากประสบการณ์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรมและทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการสร้างงานวิจัยต่อเนื่องดังต่อไปนี้

- 1) ไม่ควรทำการทดสอบในช่วงที่มีโอกาสเกิดไฟฟ้าดับ เช่น การเกิดพายุฝน เนื่องจากเมื่อเกิดไฟฟ้าดับในช่วงที่กำลังทดสอบ จะทำให้เกิดการกระชากของตัวจับชิ้นงานทดสอบเป็นผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย
- 2) การสร้างความยาวรอยร้าวเริ่มต้นสำหรับชิ้นงาน *CT* ที่ทำจากวัสดุอัลลูมิเนียม 7075 – T651 ที่ภาระสูงสุดเท่ากับ 0.8 ภาระต่ำสุดเท่ากับ 0.08 จะต้องรอบประมาณ 800,000 รอบ
- 3) ควรหลีกเลี่ยงการทดสอบในขณะที่มีการเชื่อมต่อไฟฟ้าอยู่ในบริเวณห้องทดสอบ เพราะอาจมีสัญญาณการรบกวนสัญญาณของคลิปเกจ
- 4) ควรเพิ่มประสิทธิภาพของสเตรนมิเตอร์ในการขยายสัญญาณ *CMOD* ของคลิปเกจ เพื่อให้สามารถทดสอบหา  $\Delta K_{th}$  ของวัสดุที่มีค่าต่ำค่าขีดจำกัดได้

## 7.3 งานวิจัยต่อเนื่อง

- 1) เพิ่มฟังก์ชันการคำนวณ ชนิดของชิ้นงานทดสอบ รูปคลื่นภาระ และชนิดของการทดสอบอื่นๆ
- 2) พัฒนาโมดูลคำนวณความยาวรอยร้าวในกรณีใช้รูปคลื่นภาระสี่เหลี่ยม
- 3) พัฒนาโมดูลสำหรับการควบคุมและการปรับแก้ภาระให้มีรูปร่างถูกต้องขึ้น
- 4) พัฒนาโมดูล Load compensation ให้สามารถชดเชยภาระ ในกรณีที่คอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงกว่าที่งานวิจัยนี้ทำได้



## รายการอ้างอิง

1. Belsak,A., Flaker, J. Detecting cracks in the tooth root of gears. Engineering Failure Analysis. 14 (2007): 1466-1475.
2. Asi, O. Fatigue failure of a rear axle shaft of an automobile. Engineering Failure Analysis. 13 (2006): 1293-1302.
3. Alegre, J.M., Bravo, P., Preciado, M. Fatigue behaviour of an autofrettaged high-pressure vessel. Engineering Failure Analysis. 14 (2007): 396-407.
4. Pizzo, P.P. Aircraft Accident Investigation. available from : <http://www.engr.sjsu.edu/WofMatE/AAI.html> [2007 , October 3]
5. Anderson, T.L. Fracture mechanics fundamentals and application. CRC Press, 1991.
6. S.Suresh. Micromechanisms of variable amplitude load effects during fatigue crack growth in metal and ceramics. In Petit et al. (ed.), Fatigue crack growth under variable amplitude loading, pp. 146-161. New York : Elsevier Science, 1988.
7. H. Nowadh,K .schulte .Microscopical and mechanical contributions to the cycle by cycle crack growth under variable amplitude loading. In Petit et al. (ed.), Fatigue crack growth under variable amplitude loading, New York: Elsevier Science, 1988.
- 8 .Forth,S.C. ,Jame, M.A. Fatigue crack growth thresholds in D6AC steel . available from <http://www.half.kth.se/forskning/ecf15/ECF-proceedings/Forth%20%20S%20et%20al.pdf> [2007, October 3]
9. ZHENG, Z., and POWELL, B.E. The characterization of fatigue crack growth behaviour by constant dK testing .Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 22 (1999): pp. 383-392.
10. Kaisand, L.R. Digital computer controlled treshold stress intensity factor fatigue testing. In H.Mindlin, H. and R.W. Landgraf (eds.), Use of computers in the fatigue laboratory, ASTM STP 613, pp.142-159. 1976.
11. Saxena, A. and Hudak, S.J..Computer-Controlled Decreasing Stress Intensity Technical for Low Rate Fatigue Fatigue Crack Growth Testing.Journal of Testing and Evaluation. 6 (1978): pp.167-174.
12. Patrick M. Sooley, and David W.Hoepfner.A Low-Cost Microprocessor-Based Data Acquisition and Control System forFatigue Crack Growth Testing, W.H. Cullen et

- al. (eds.), Automated Test Methods for fracture and fatigue crack growth, ASTM STP 877, pp.101-117. 1985.
13. instron corporation, fasttrack software. available from : <http://www.instron.co.uk/wa/product/software/fasttrack/dadnaspx> [2007, JUNE 3]
  14. MTS System Corporation, Material Testing Software, Fatigue Crack Growth. Available from : [http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev\\_002072.pdf](http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_002072.pdf) [2007, JUNE 3]
  15. Kalluri, S., and Bonacuse, P. J. A Data Acquisition and Control Program for Axial-Torsional Fatigue Testing. NASA TM-102041, 1989.
  16. TestResources Inc – 680 Industrial Circle South Available from : <http://www.testresources.com/docs/systems/Dynamic/800L.pdf> [2007, October 3]
  17. National instrument. LabVIEW quickstart guide. 1998.
  18. National Instrument. Making pH Measurements with NI Tool. national instrument, 2005.
  19. Peterson, L. Aerospace Structural Dynamics Test System, Center for Aerospace Structures, 2005.
  20. Yandt, S.A. Development of a thermal-mechanical fatigue testing facility, Carleton University, 1998.
  21. ASTM E647 -95a. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rate. American Society for Test Material, Philadelphia, 1995.
  22. ยอดยิ่ง หมวกงาม. การพัฒนาและการประยุกต์ศิลป์เกจทดสอบการแตกหัก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
  23. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ 4140, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
  24. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. เอกสารประกอบคำสอนวิชาการศาสตร์การแตกหัก. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2006.
  25. Maiya, P.S., and Majumdar, S.. Effects of waveshape on crack initiation in low-cycle fatigue. Scripta. Metall. 13 (1979), pp. 485-490.
  26. R.G. Forman, V. Shivakumar, J.W. Cardinal, L.C. Williams, and P.C. McKeighan, Fatigue crack growth database for damage tolerance analysis. DOT/FAA/AR-05/15, 2005.



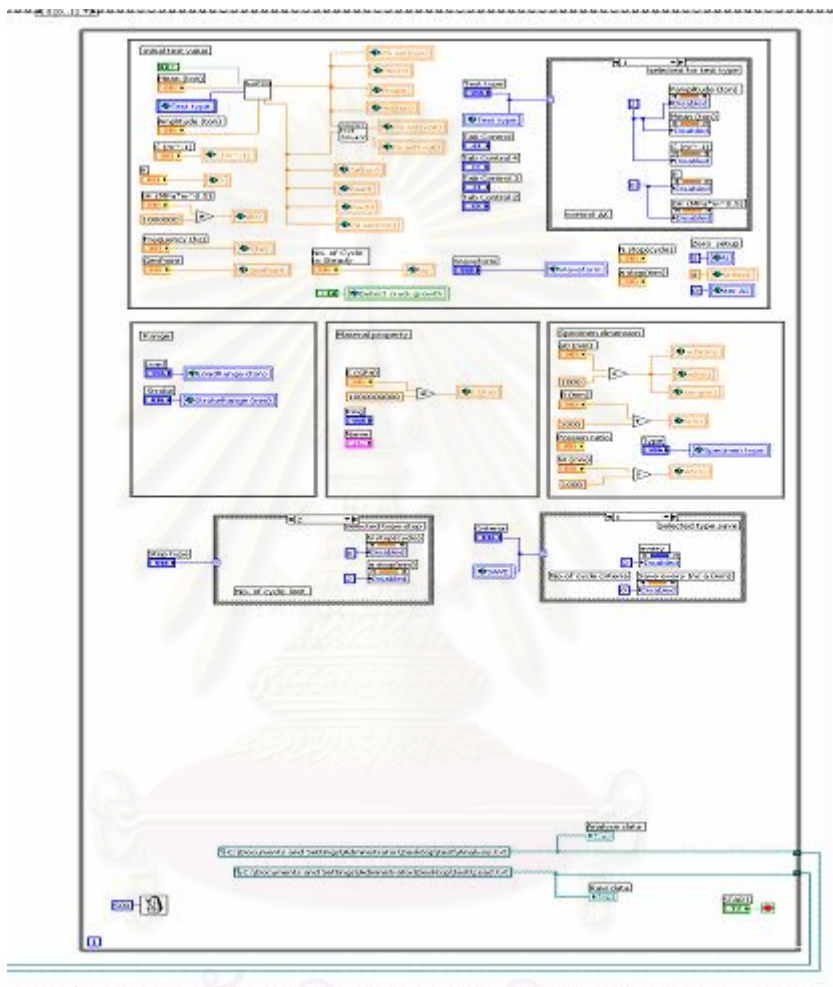
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาพรวมของโปรแกรม

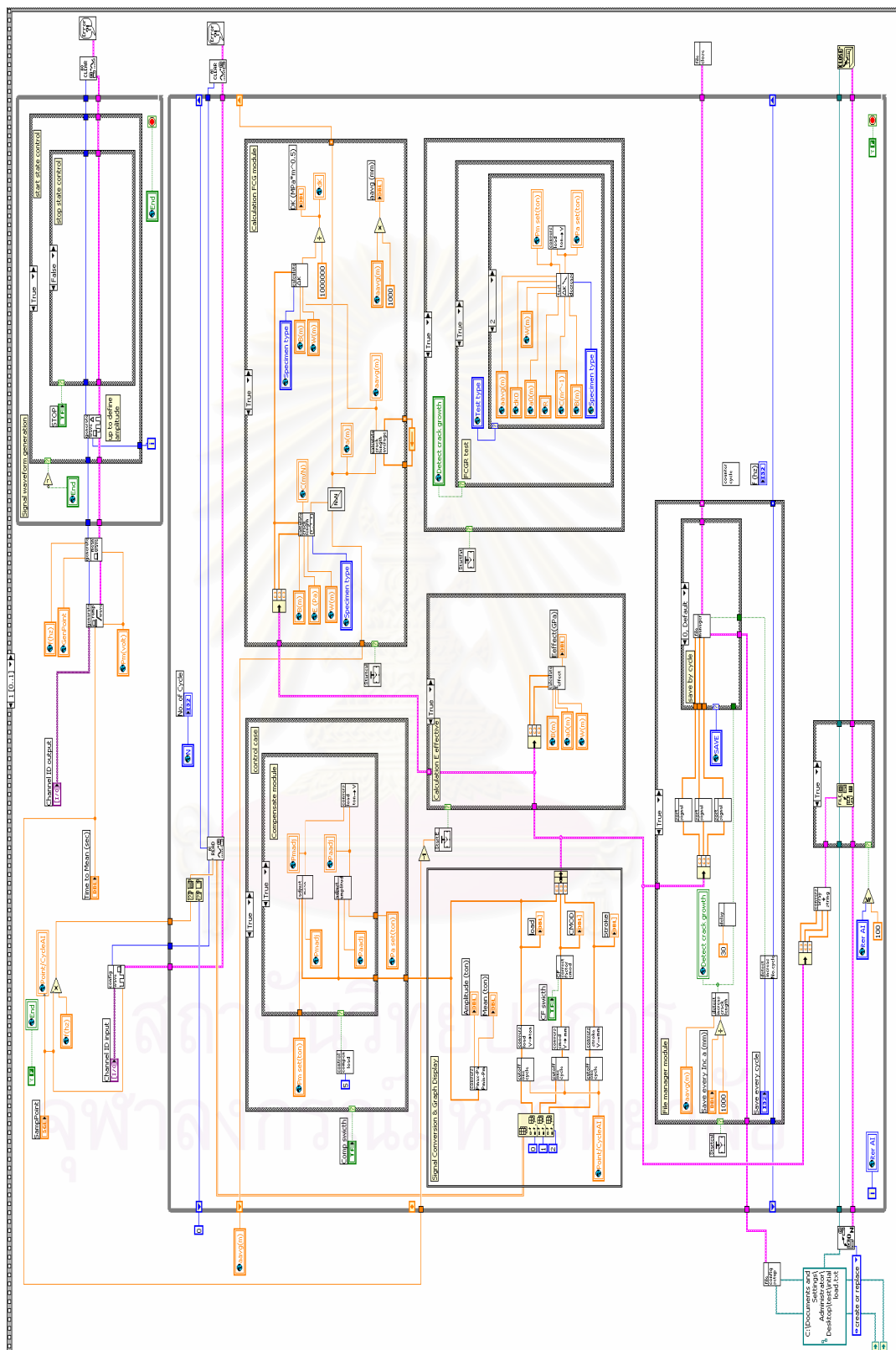
ก.1 โปรแกรมหลักส่วนกำหนดค่า



รูปที่ ก.1 โครงสร้างโปรแกรมหลักส่วนการกำหนดค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 โปรแกรมหลักส่วนการทดสอบ



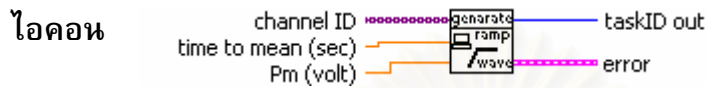
รูปที่ ก.2 โครงสร้างโปรแกรมหลักส่วนการทดสอบ

ภาคผนวก ข

ซอร์สโค้ดของโปรแกรมย่อย

**ข. 1 ซับวีไอ WG\_generation\_ramp up.vi**

หน้าที่ สร้างสัญญาณขาออก เพื่อตั้งชิ้นงานด้วยอัตราเร็วคงที่จากภาระเริ่มต้น (เท่ากับศูนย์) ถึงภาระเฉลี่ยที่กำหนด



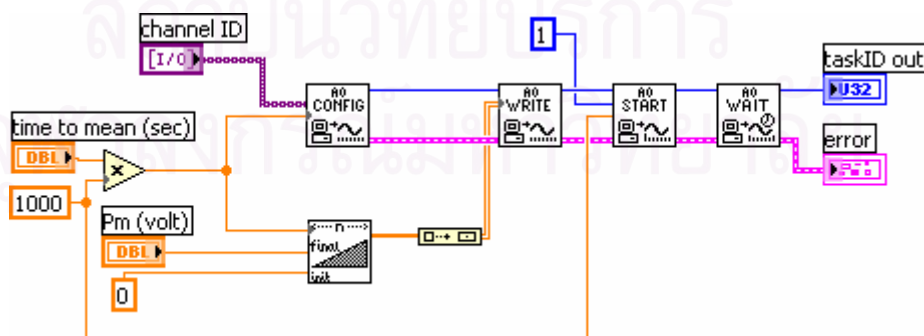
ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Channel ID	I/O	หมายเลขช่องสัญญาณขาออก
time to mean (sec)	DBL	เวลาที่ใช้ตั้งชิ้นงานจากภาระศูนย์จนถึงภาระเฉลี่ยที่กำหนด
Pm (volt)	DBL	ภาระเฉลี่ยในหน่วยโวลต์

ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error	ERR	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
taskID out	U32	หมายเลขงาน

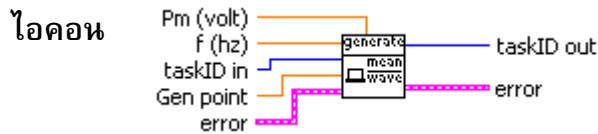
แผนภาพของซับวีไอ



รูปที่ ข.1 แผนภาพของซับวีไอ WG\_generation\_ramp up.vi

**ข. 2 ซับวีไอ WG\_config\_waveform\_signal\_output.vi**

หน้าที่ กำหนดสภาวะทดสอบสำหรับสัญญาณขาออก ซึ่งประกอบด้วย รูปร่างของภาระ ความถี่ภาระ และภาระเฉลี่ย



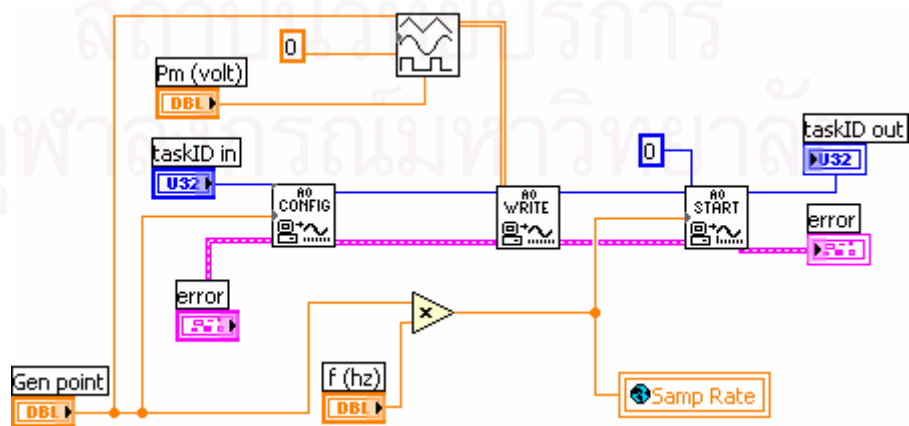
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
taskID in		หมายเลขงาน
Gen point		จำนวนข้อมูลที่ใช้สร้างสัญญาณภาระต่อหนึ่งคาบ (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าไว้ที่ 300)
f (hz)		ความถี่ภาระ
Pm (volt)		ภาระเฉลี่ยในหน่วยโวลต์

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
taskID out		หมายเลขงาน

**แผนภาพของซับวีไอ**

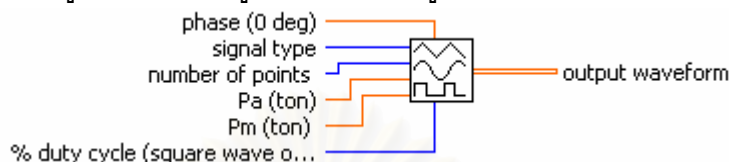


รูปที่ ข.2 แผนภาพของซับวีไอ WG\_config\_waveform\_signal\_output.vi

### ข. 3 ซับวีไอ WG\_compute Waveform.vi

หน้าที่ สร้างสัญญาณภาระขาออกให้มีลักษณะตามที่กำหนด ซึ่งประกอบด้วย ภาระเฉลี่ย แอมพลิจูดภาระ ความถี่ภาระ จำนวนการสุ่มค่าสัญญาณในหนึ่งคาบ และรูปร่างภาระ โปรแกรมนี้สามารถเลือกรูปร่างของสัญญาณภาระ (ขาออก) ได้ 4 แบบ คือ รูปไซน์ รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม และรูปฟันเลื่อย

ไอคอน



ข้อมูลป้อนเข้า

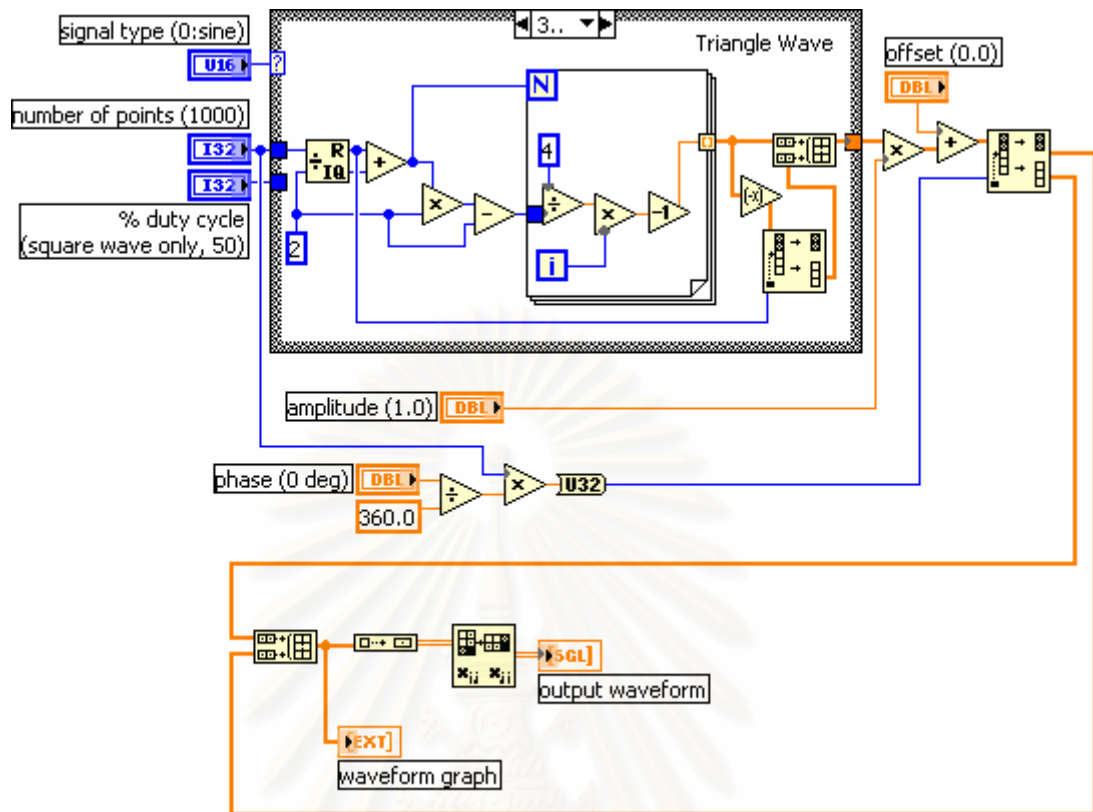
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
signal type		รูปร่างของสัญญาณภาระ
number of points		จำนวนของข้อมูลจากการสุ่มค่าของสัญญาณขาออกในหนึ่งคาบ
% duty cycle		Duty cycle is the proportion of time during which a component
Pa (volt)		แอมพลิจูดภาระในหน่วยโวลต์
Pm (volt)		ภาระเฉลี่ยในหน่วยโวลต์
Phase (deg.)		เฟสของสัญญาณภาระขาออก

ข้อมูลขาออก

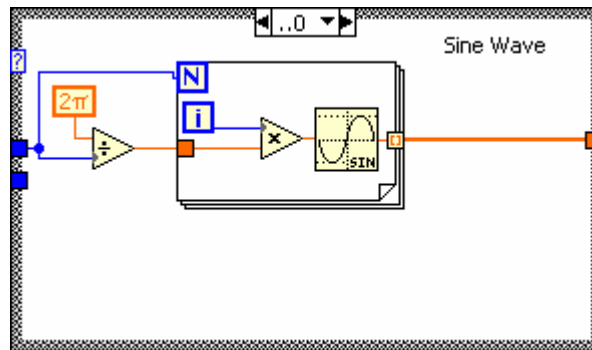
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
output waveform		สัญญาณภาระขาออก



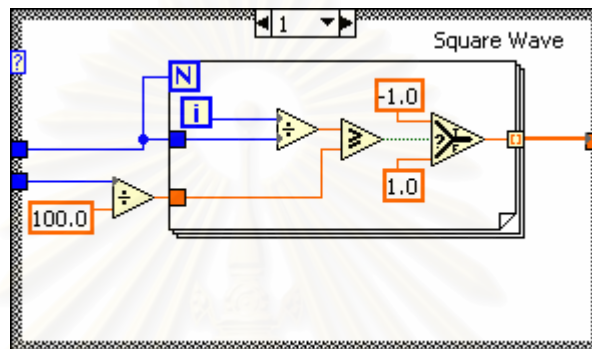
## แผนภาพของซั้ววีไอ



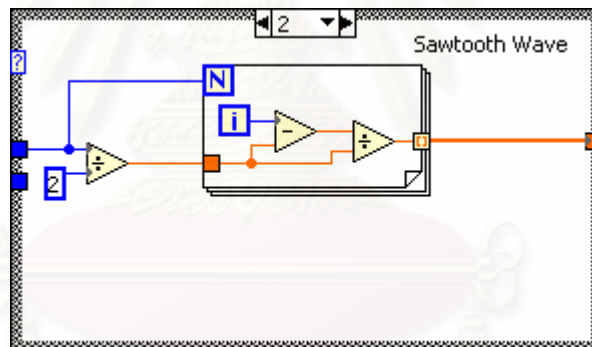
รูปที่ ข.3 แผนภาพของซั้ววีไอ WG\_compute Waveform.vi



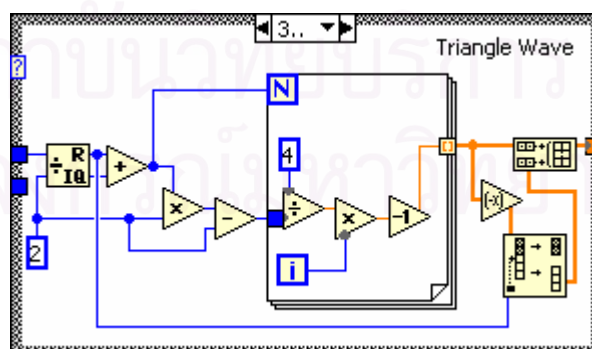
รูปที่ ข.4 case structure กรณีสร้างสัญญาณการระรูปไซน์



รูปที่ ข.5 case structure กรณีสร้างสัญญาณการระรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ ข.6 case structure กรณีสร้างสัญญาณการระรูปฟันเลื่อย




รูปที่ ข.7 case structure กรณีสร้างสัญญาณการระรูปสามเหลี่ยม

#### ข. 4 ซับวีไอ Ana\_Conversion\_Stroke\_range.vi


หน้าที่ แปลงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของ LVDT เป็นระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบ



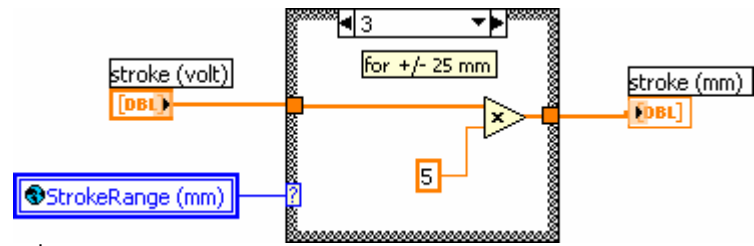
#### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
stroke (volt)		ระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิกในหน่วย โวลต์

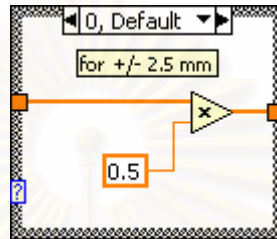
#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
stroke (mm)		ระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก

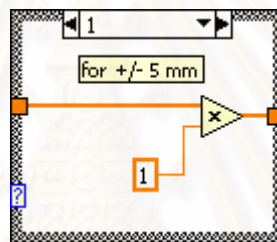
แผนภาพของซบวีไอ



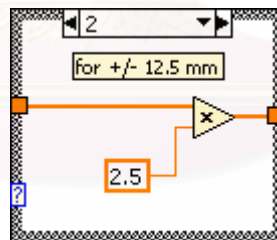
รูปที่ ข.8 แผนภาพของซบวีไอ Ana\_Conversion\_Stroke range.vi



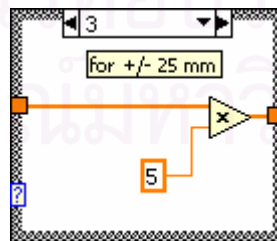
รูปที่ ข.9 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย ±2.5 mm



รูปที่ ข.10 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย ±5 mm



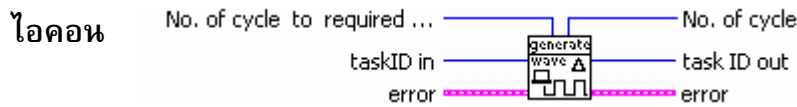
รูปที่ ข.11 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย ±12.5 mm



รูปที่ ข.12 case structure บรรจุฟังก์ชันแปลงสัญญาณ สำหรับพิสัย ± 25 mm

**ข. 5 ซับวีไอ WG\_waveform\_start.vi**

หน้าที่ ควบคุมการเพิ่มแอมพลิจูดภาระจากศูนย์จนถึงแอมพลิจูดภาระที่กำหนด ภายในจำนวนรอบภาระที่กำหนด



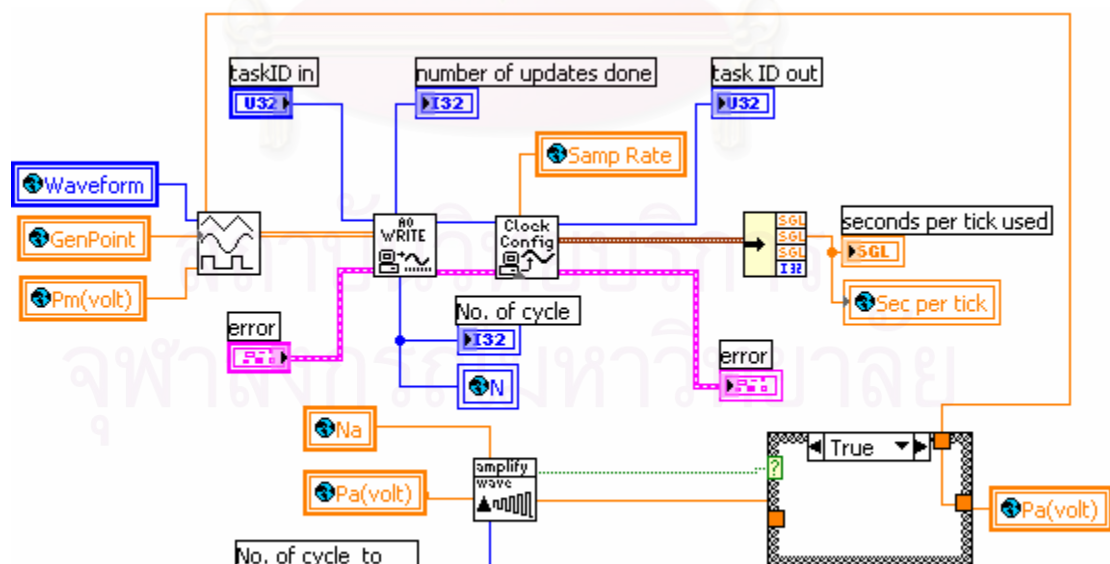
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
taskID in	U32	หมายเลขงาน
Error	E32	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
No. of cycle to required amplitude	I32	จำนวนรอบภาระระหว่างที่เพิ่มแอมพลิจูดภาระจากศูนย์จนถึงแอมพลิจูดภาระที่กำหนด

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
No.of cycle	I32	จำนวนรอบภาระขาออก
error	E32	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
task ID out	U32	หมายเลขงาน

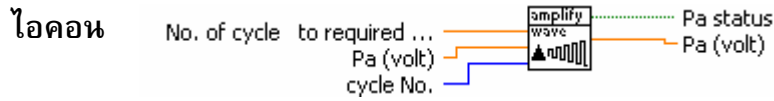
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.13 แผนภาพของซับวีไอ WG\_waveform\_start.vi

**ข. 6 ซับวีไอ WG\_Calculation\_waveform\_start.vi**

หน้าที่    คำนวณแอมพลิจูดภาระ ที่ต้องปรับเพิ่มจากศูนย์จนถึงแอมพลิจูดภาระที่กำหนด ตามจำนวนรอบภาระที่ระบุ



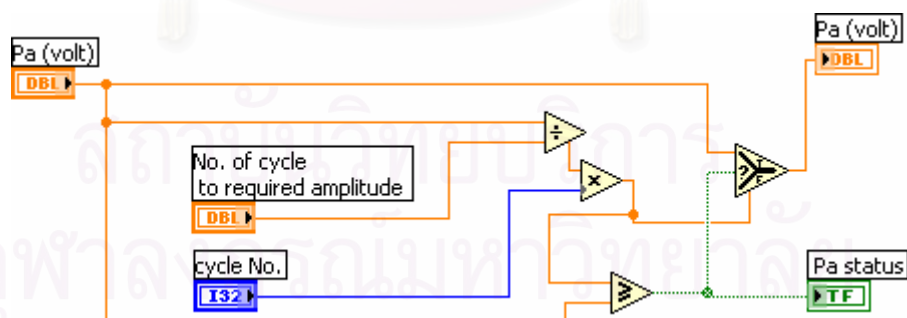
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
cycle No.	I32	จำนวนรอบภาระตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงขณะนั้น
No. of cycle to required amplitude	DBL	จำนวนรอบภาระระหว่างที่เพิ่มแอมพลิจูดภาระจากศูนย์จนถึงแอมพลิจูดภาระที่กำหนด
Pa (volt)	DBL	แอมพลิจูดภาระในหน่วยโวลต์

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pa (volt)	DBL	แอมพลิจูดภาระในหน่วยโวลต์
Pa status	TF	สถานะของการเพิ่มแอมพลิจูดภาระ ถ้าไฟติดหรือสัญญาณเป็นจริงแสดงว่าแอมพลิจูดภาระมีขนาดถึงค่าที่กำหนดแล้ว

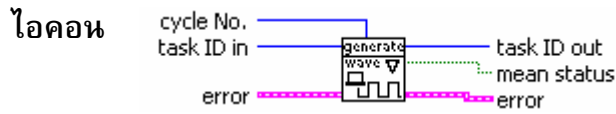
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.14 แผนภาพของซับวีไอ WG\_waveform\_start.vi

**ข. 7 ซับวีไอ WG\_waveform\_stop.vi**

**หน้าที่** ควบคุมการลดแอมพลิจูดภาระจากแอมพลิจูดภาระที่กำหนดจนถึงค่าศูนย์ ตามจำนวนรอบภาระที่ระบุ



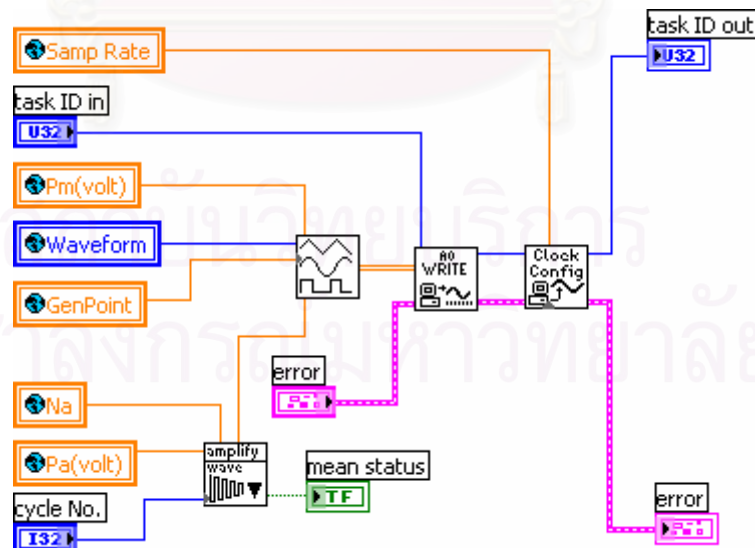
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
cycle No.	I32	จำนวนรอบภาระตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงขณะนี้
Error	E32	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
task ID out	U32	หมายเลขงาน

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
mean status	TF	ไฟแสดงสถานะของการลดแอมพลิจูดภาระ ถ้าไฟติดหรือสัญญาณเป็นจริงแสดงว่าแอมพลิจูดภาระมีค่าเท่ากับศูนย์
task ID out	U32	หมายเลขงาน
error	E32	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

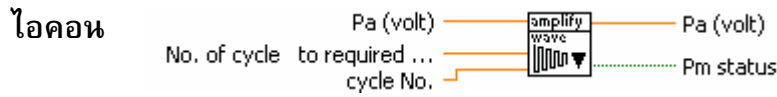
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.15 แผนภาพของซับวีไอ WG\_waveform\_stop.vi

**ข. 8 ซับวีไอ WG\_Calculation\_waveform\_stop.vi**

หน้าที่    คำนวณแอมพลิจูดการะที่จะปรับลดจากแอมพลิจูดการะที่กำหนดจนถึงค่าศูนย์ตามจำนวนรอบการะที่ระบุ



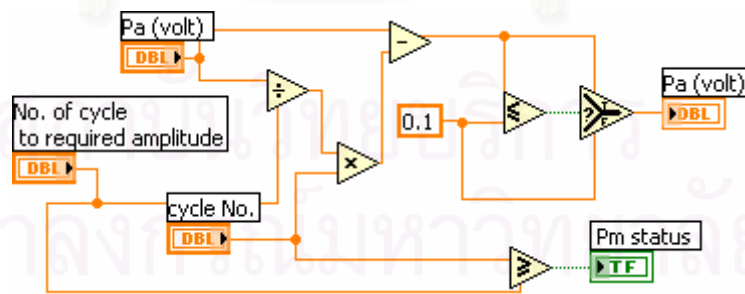
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pa (volt)	DBL	แอมพลิจูดการะในหน่วยโวลต์
No. of cycle to required amplitude	DBL	จำนวนรอบการะที่ใช้สร้างแอมพลิจูดการะจากค่าศูนย์ไปยังแอมพลิจูดการะใช้งาน
cycle No.	I32	จำนวนรอบการะตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงขณะนั้น

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pa (volt)	DBL	แอมพลิจูดการะในหน่วยโวลต์
Pm status	TF	ไฟแสดงสถานะจะสว่างหรือสัญญาณเมื่อขนาดแอมพลิจูดการะเท่ากับศูนย์

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.16 แผนภาพของซับวีไอ WG\_Calculation\_waveform\_stop.vi



**ข. 9** ซับวีไอ **WG\_ramp down.vi**

หน้าที่ สร้างสัญญาณขาออก เพื่อลดภาระที่กระทำกับชิ้นงานด้วยอัตราเร็วคงที่จากภาระเฉลี่ยที่กำหนด จนภาระมีค่าเท่ากับศูนย์



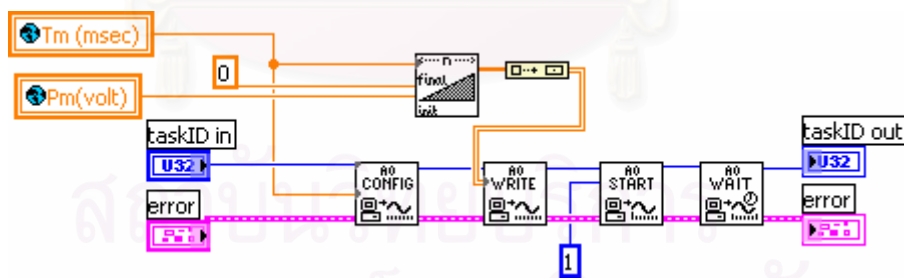
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
taskID in	U32	หมายเลขงาน
error	Err	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
taskID out	U32	หมายเลขงาน
error	Err	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

**แผนภาพของซับวีไอ**

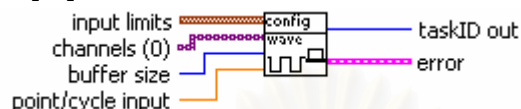


รูปที่ ข.17 แผนภาพของซับวีไอ WG\_ramp down.vi





## ข. 10 ชั้นวีไอ WG\_start config input.vi

**หน้าที่** กำหนดค่าเริ่มต้นที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของส่วนรับสัญญาณแอนาล็อก ประกอบด้วย จำนวนที่ปักข้อมูล หมายเลขช่องสัญญาณ และขีดจำกัดของสัญญาณป้อนเข้า (ในวิทยานิพนธ์นี้มีสัญญาณป้อนเข้า 3 ช่องสัญญาณ คือ สัญญาณภาระ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยร้าว และสัญญาณระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก)

**ไอคอน**



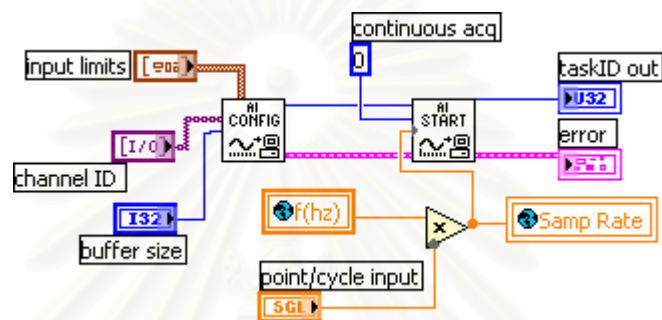
### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
point/cycle input		จำนวนข้อมูลของสัญญาณป้อนเข้าที่ส่งค่าต่อหนึ่งคาบ (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดจำนวนข้อมูลของสัญญาณป้อนเข้าของสัญญาณภาระ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของปากชิ้นงาน และสัญญาณเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก เท่ากับ 80 จุด ต่อคาบ)
buffer size		จำนวนที่ปักข้อมูล (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดขนาดที่ปักข้อมูลไว้ 20,000 ข้อมูล)
input limits		ขีดจำกัดของสัญญาณป้อนเข้า (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดขีดจำกัดของ <ul style="list-style-type: none"> <li>- สัญญาณภาระ เท่ากับ <math>\pm 5</math> V</li> <li>- สัญญาณระยะเคลื่อนตัวที่ปากชิ้นงาน เท่ากับ <math>\pm 0.5</math> V</li> <li>- สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก เท่ากับ <math>\pm 0.5</math> V)</li> </ul>
channel		หมายเลขช่องสัญญาณเข้าเข้า (ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่องหมายเลข 0 สำหรับรับสัญญาณภาระ</li> <li>- ช่องหมายเลข 1 สำหรับรับสัญญาณระยะเคลื่อนตัวของปากชิ้นงาน</li> <li>- ช่องหมายเลข 2 สำหรับรับสัญญาณระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก</li> </ul>

## ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
task ID out	U32	หมายเลขงาน
error	S32	รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

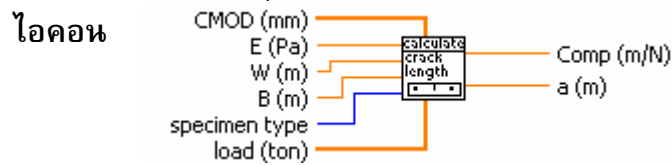
## แผนภาพของซบวีไอ



รูปที่ ข.18 แผนภาพของซบวีไอ WG\_start config input.vi

### ข. 11 ซับวีไอ Ana\_calculation\_compliance.vi

หน้าที่ คำนวณคอมพลายแอนซ์และความยาวรอยร้าว จากภาระและระยะเคลื่อนตัวที่ปาก รอยร้าว (ทุกรอบภาระ)



#### ข้อมูลป้อนเข้า

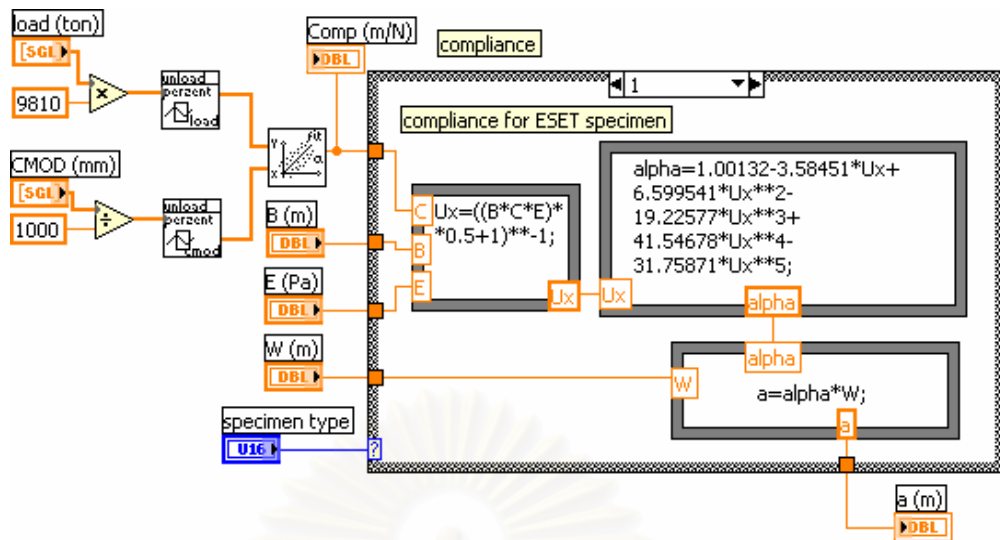
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	[SGL]	ภาระ
CMOD (mm)	[SGL]	ระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว
specimen type	[U16]	ชนิดของชิ้นงานทดสอบ
B (m)	[DBL]	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
E (Pa)	[DBL]	ยังก์โมดูลัสประสิทธิภาพ
W (m)	[DBL]	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

#### ข้อมูลขาออก

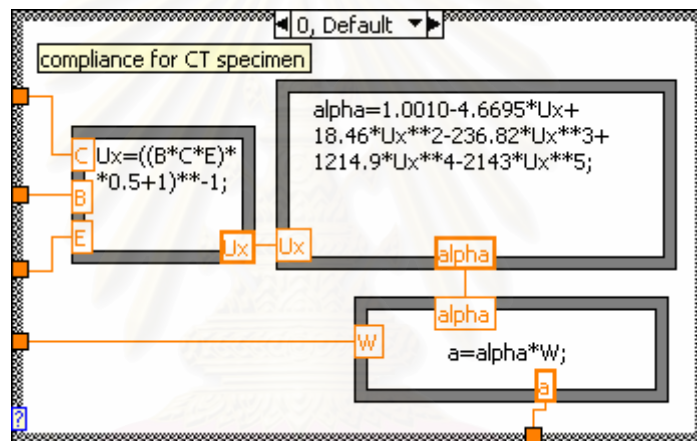
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
a (m)	[DBL]	ความยาวรอยร้าว
Comp (m/N)	[DBL]	คอมพลายแอนซ์

#### แผนภาพของซับวีไอ

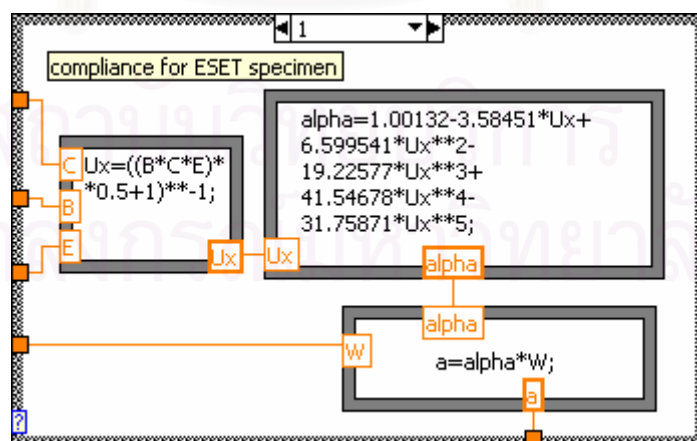
ก) ซับวีไอคำนวณความยาวรอยร้าว ภายในกรอบสี่เหลี่ยมที่มีขอบหนาแสดง case structure ดังรูปที่ ข.19 ภายใน case structureบรรจุฟังก์ชันสำหรับการคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงานชนิดต่างๆ



รูปที่ ข.19 แผนภาพของซบวีไอ Ana\_calculation\_compliance.vi



รูปที่ ข.20 case structure กรณีคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงาน CT



รูปที่ ข.21 case structure กรณีคำนวณความยาวรอยร้าวของชิ้นงาน ESET

**ข. 12 ซับวีไอ Ana\_unloading waveform for CMOD.vi**

หน้าที่ เลือกข้อมูลระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว เฉพาะช่วงปลดภาระ (unloading)



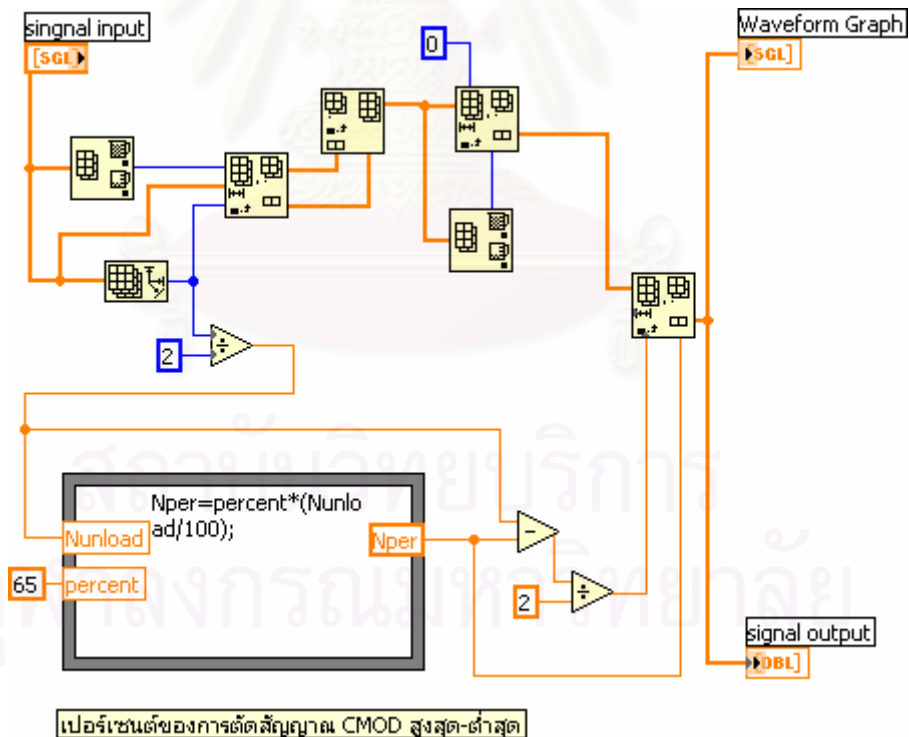
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
signal input	[SGL]	ข้อมูลระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว (หนึ่งรอบภาระ)

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
signal output	[DBL]	ข้อมูลระยะเคลื่อนตัวที่ถูกเลือกแล้ว (เฉพาะช่วงปลดภาระ)

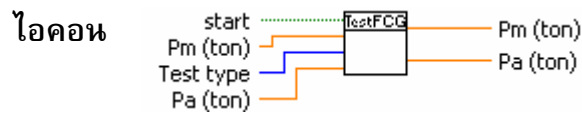
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.22 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_unloading waveform for CMOD.vi

### ข. 13 ซับวีไอ FCGRtest\_fatigue\_test.vi

หน้าที่ คำนวณภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระ เมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น  
(สำหรับการทดสอบแบบควบคุมภาระ , แบบลด  $\Delta K$  , แบบควบคุม  $\Delta K$ )



#### ข้อมูลป้อนเข้า

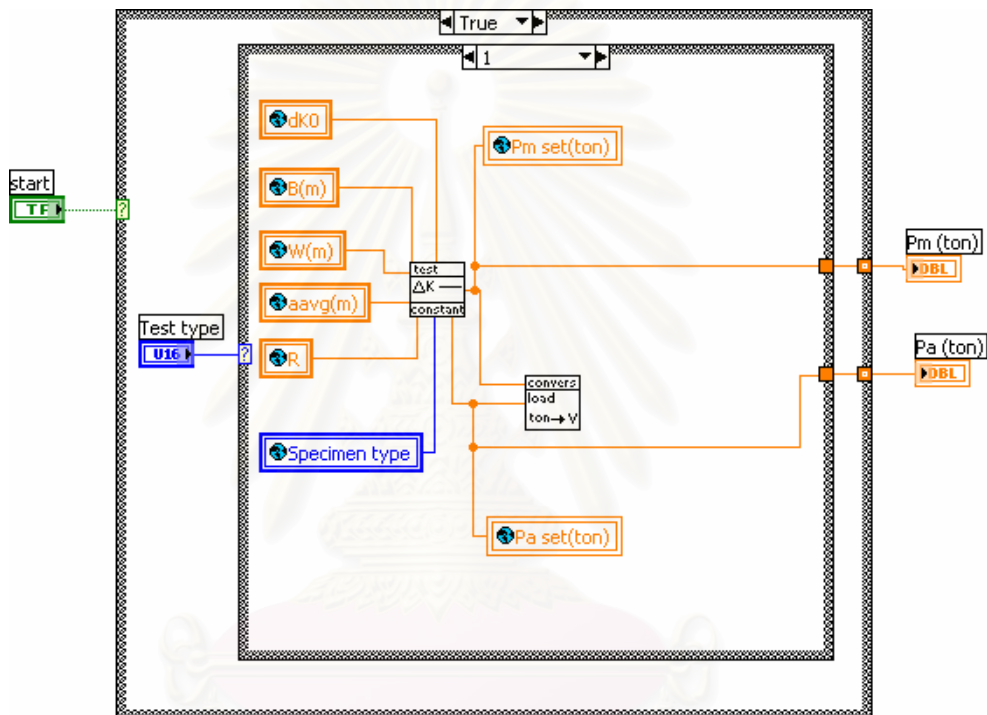
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start		ปุ่ม เปิด-ปิดการใช้งานซับวีไอนี้
Test type		ชนิดของการทดสอบ
Pm (ton)		ภาระเฉลี่ย
Pa (ton)		แอมพลิจูดภาระ

#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pm (ton)		ภาระเฉลี่ยที่ปรับลดแล้ว
Pa (ton)		แอมพลิจูดภาระที่ปรับลดแล้ว

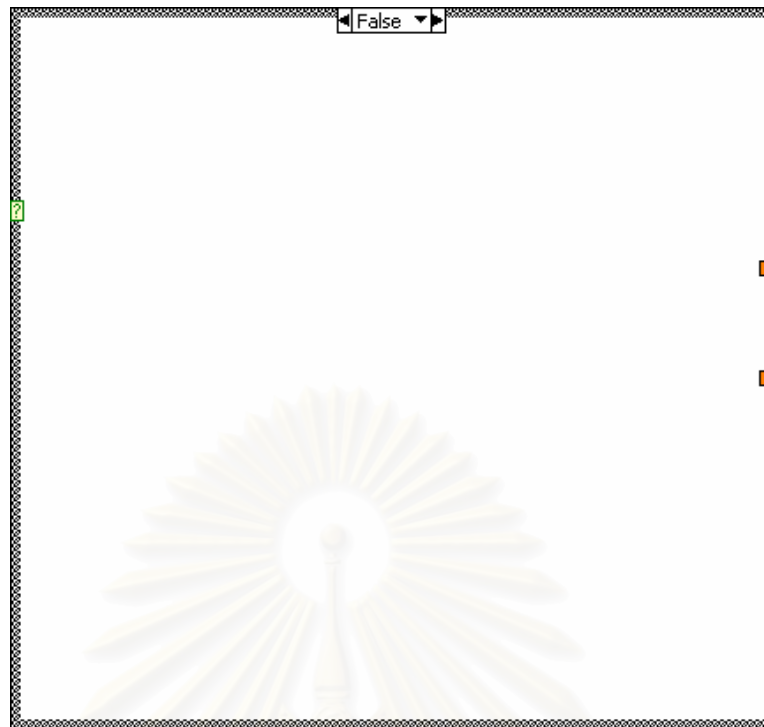
## แผนภาพของซั้ววีไอ

กรอบสี่เหลี่ยมขอบหนาแสดง case structure ซึ่งภายในบรรจุฟังก์ชันสำหรับการคำนวณแอมพลิจูดการกระ และภาระเฉลี่ยของการทดสอบแต่ละชนิด ซั้ววีไอนี้จะทำงาน เมื่อสัญญาณของตัวแปร start เป็นจริง (รูปที่ ข.23) และจะรอคำสั่งหากสัญญาณของตัวแปร start เป็นเท็จ (รูปที่ ข.24) เมื่อซั้ววีไอนี้ทำงานแล้ว ภายในจะมี case structure อีก 3 กรณี สำหรับการทดสอบแต่ละชนิด คือ การทดสอบแบบควบคุมภาระ (รูปที่ ข.25) การทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$ . การทดสอบแบบลด  $\Delta K$  (รูปที่ ข.26)

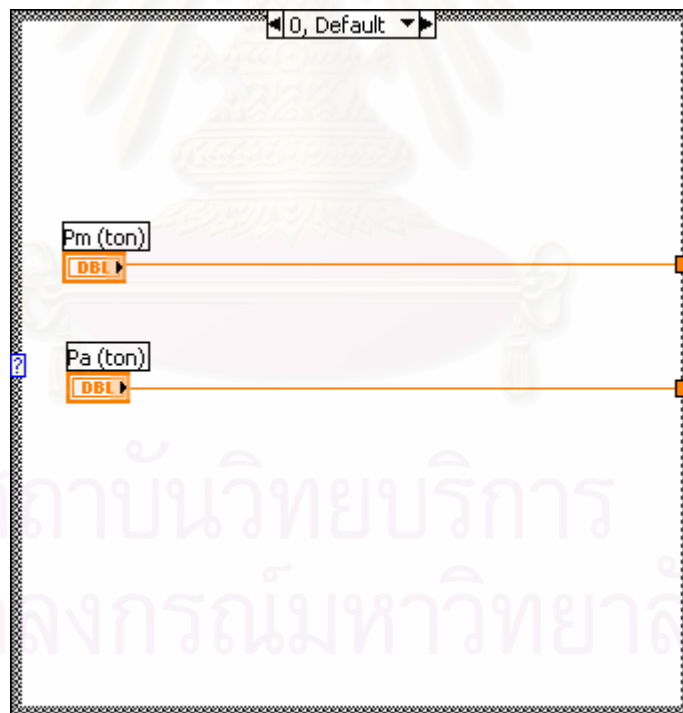


รูปที่ ข.23 case structure กรณีสัญญาณของตัวแปร start เป็นจริง

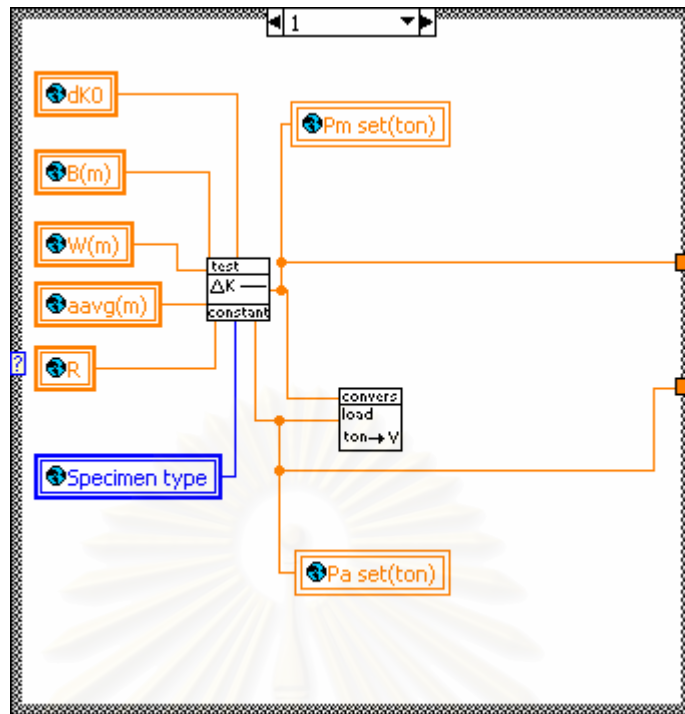




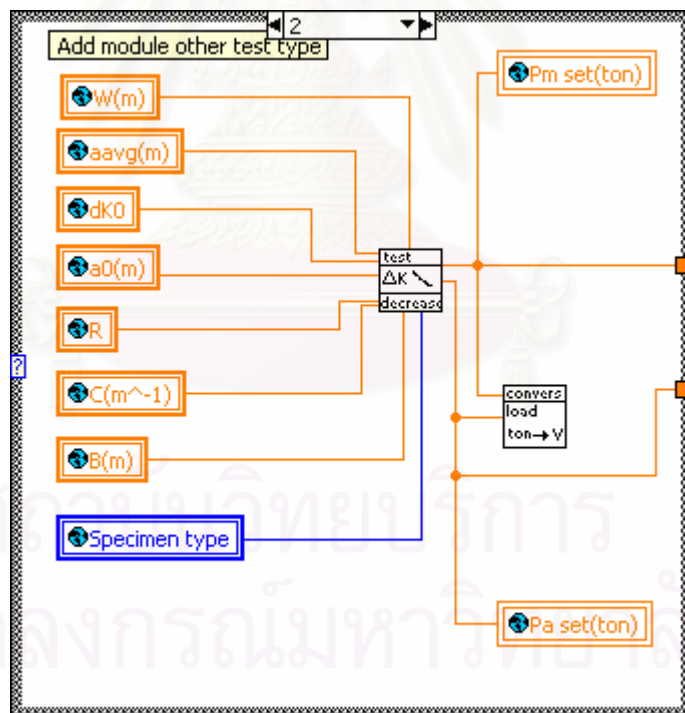
รูปที่ ข.24 case structure กรณีสัญญาณของตัวแปร start เป็นเท็จ



รูปที่ ข.25 case structure กรณีเลือกการทดสอบแบบควบคุมภาวะ  
(กรณีนี้ไม่มีการปรับลดภาวะจึงใช้ค่าภาวะเดิมตลอดการทดสอบ)



รูปที่ ข.26 case structure กรณีเลือกชนิดวิโการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$

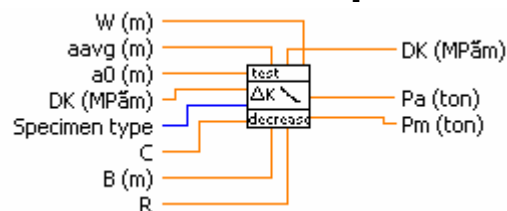


รูปที่ ข.27 case structure กรณีเลือกชนิดวิโการทดสอบแบบลด  $\Delta K$

### ข. 14 ซับวีไอ FCGRtest\_Kdecreasing.vi

หน้าที่ คำนวณภาวะเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาวะ สำหรับการทดสอบแบบลด  $\Delta K$

ไอคอน



### ข้อมูลป้อนเข้า

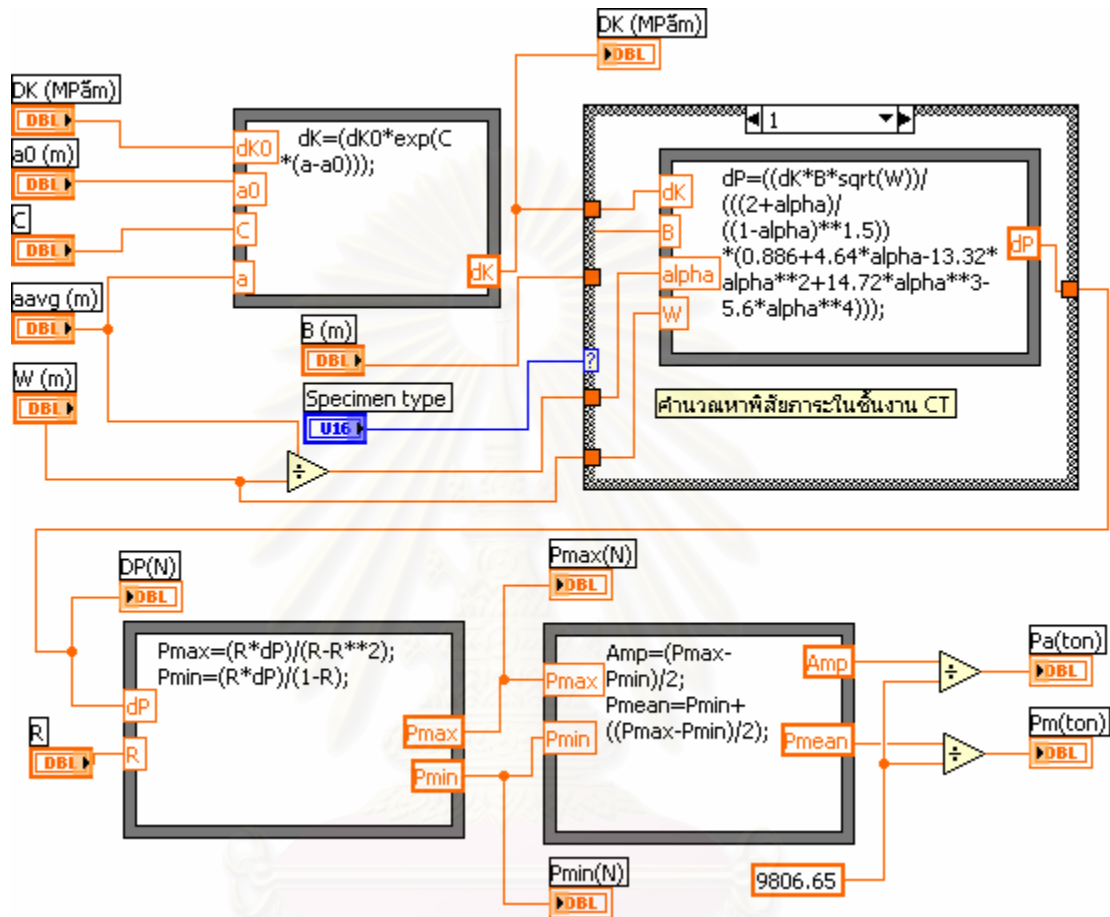
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
C	DBL	ค่าคงตัวสำหรับควบคุมอัตราการปรับลด $\Delta K$
R	DBL	อัตราส่วนภาวะ
DK (MPa√m)	DBL	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น
a0 (m)	DBL	ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
aavg (m)	DBL	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอบภาวะที่ต่อเนื่องกันตามจำนวนที่กำหนด (วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้จำนวนรอบที่ต่อเนื่องกันเท่ากับ 100 รอบ กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ เป็นความยาวรอยร้าวเฉลี่ยทุก ๆ 100 รอบ)
B (m)	DBL	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
W (m)	DBL	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
Specimen type	U16	ชนิดของชิ้นงานทดสอบ

### ข้อมูลขาออก

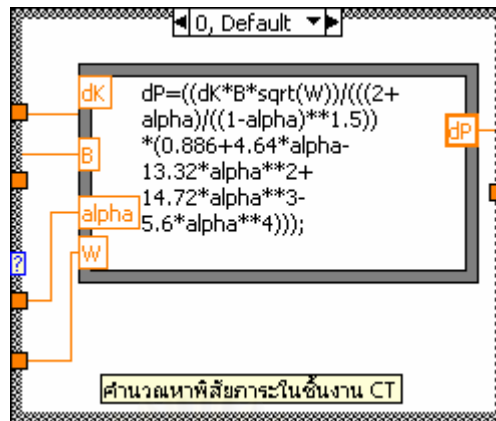
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pa (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาวะ
Pm (ton)	DBL	ภาวะเฉลี่ย
DK (MPa√m)	DBL	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

แผนภาพของซบวีไอ

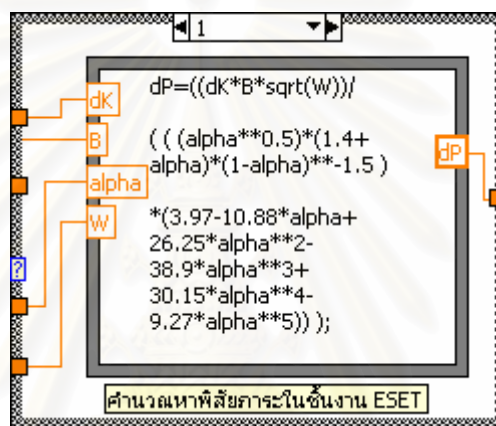
แสดงฟังก์ชันการคำนวณปรับลดภาระของการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ทั้งหมดดังรูปที่ ข.28 โดยแต่ละ case structure จะบรรจุด้วยฟังก์ชันการปรับลดภาระของชิ้นงาน CT ดังรูปที่ ข.29 และ ชิ้นงาน ESET ดังรูปที่ ข.30



รูปที่ ข.28 แผนภาพของซบวีไอ FCGRtest\_Kdecreasing.vi



รูปที่ ข.29 case structure กรณีการคำนวณหาพิสัยภาระของชั้นงาน CT



รูปที่ ข.30 case structure กรณีการคำนวณหาพิสัยภาระของชั้นงาน ESET

**ข. 15 ซับวีไอ Ana\_conversion output load signal.vi**

Ana\_conversion output load signal.vi

หน้าที่ แปลงภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระ จากหน่วยแรง (ตัน) ให้เป็นหน่วยแรงดันไฟฟ้า(โวลต์)



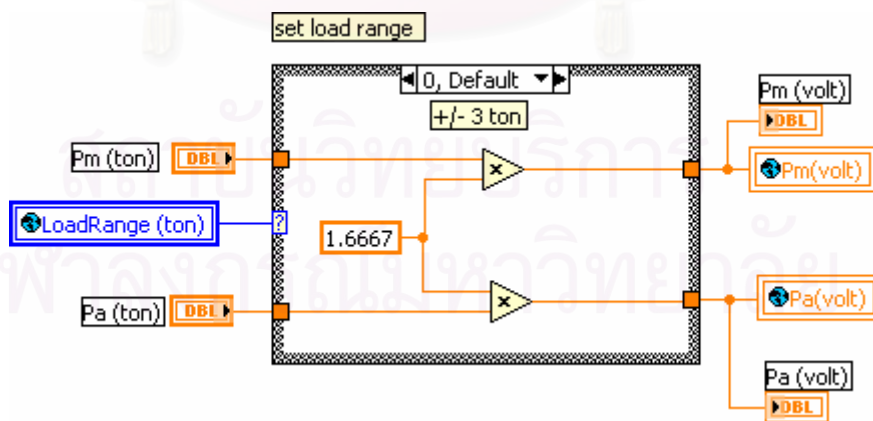
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pm (ton)	DBL	ภาระเฉลี่ย
Pa (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาระ

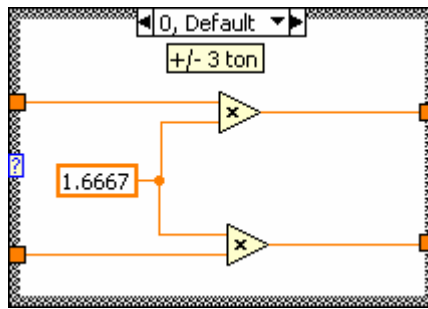
**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pm (volt)	DBL	ภาระเฉลี่ยในหน่วยโวลต์
Pa (volt)	DBL	แอมพลิจูดภาระในหน่วยโวลต์

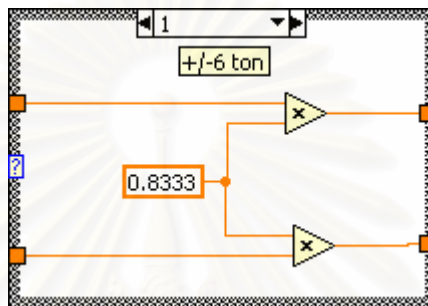
**แผนภาพของซับวีไอ**



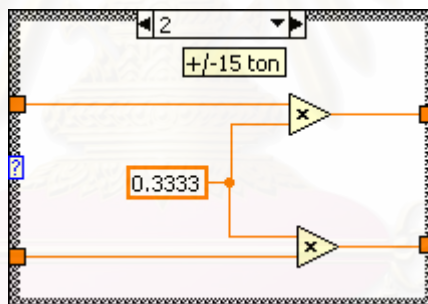
รูปที่ ข.31 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_conversion output load signal.vi



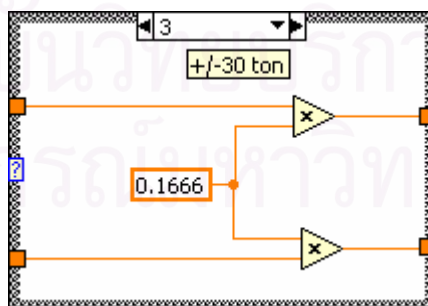
รูปที่ ข.32 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย  $\pm 3$  ตัน



รูปที่ ข.33 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย  $\pm 6$  ตัน



รูปที่ ข.34 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย  $\pm 15$  ตัน

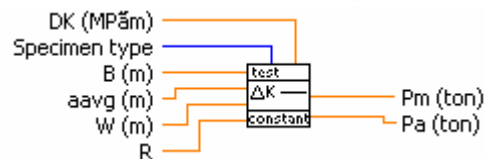


รูปที่ ข.35 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วยสำหรับพิสัย  $\pm 30$  ตัน

### ข. 16 ซับวีไอ FCGRtest\_Kconstant.vi

หน้าที่ คำนวณภาวะเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาวะ สำหรับการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$

ไอคอน



#### ข้อมูลป้อนเข้า

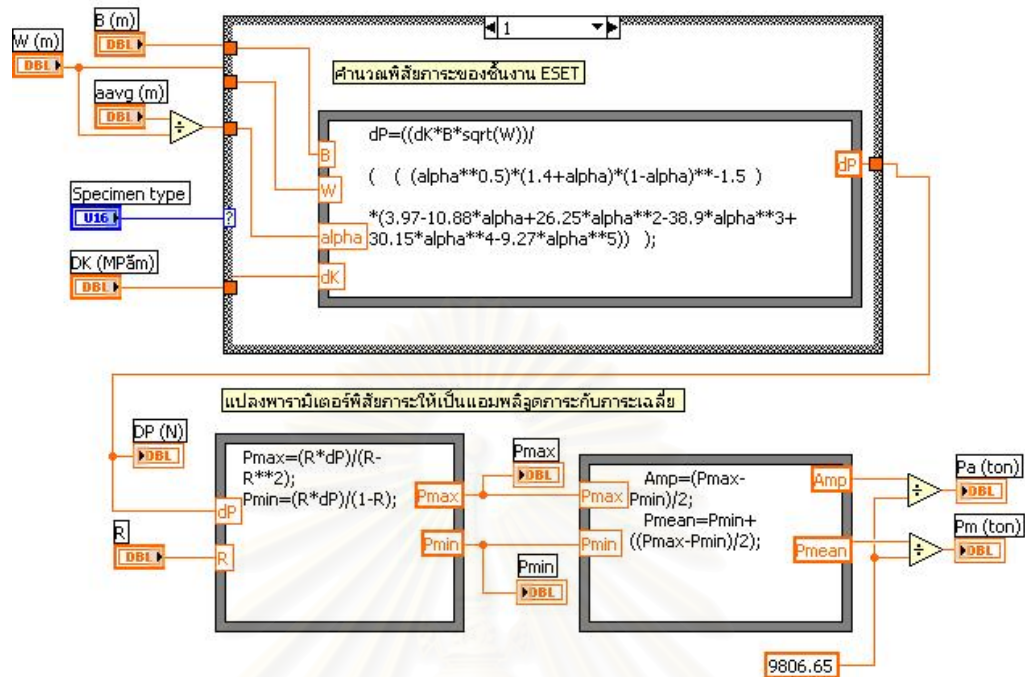
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิด ข้อมูล	คำอธิบาย
R	DBL	อัตราส่วนภาวะ
B (m)	DBL	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
W (m)	DBL	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
aavg (m)	DBL	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอบภาวะที่ต่อเนื่องกัน (ในที่นี้กำหนดไว้ 100 รอบ)
DK (MPa√m)	DBL	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น
Specimen type	U16	ชนิดของชิ้นงานทดสอบ

#### ข้อมูลขาออก

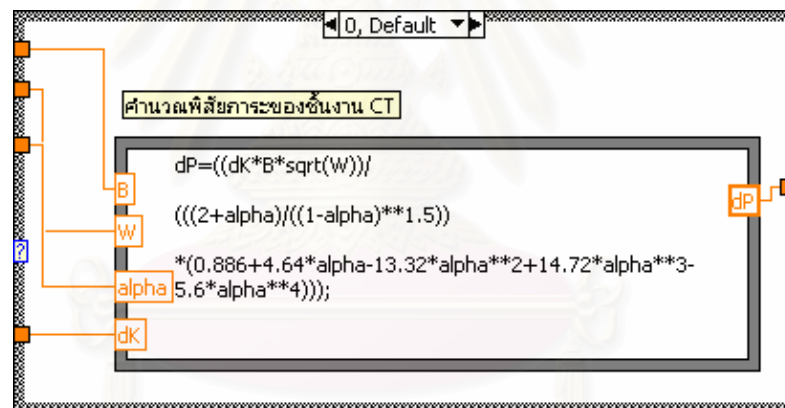
ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pa (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาวะ
Pm (ton)	DBL	ภาวะเฉลี่ย



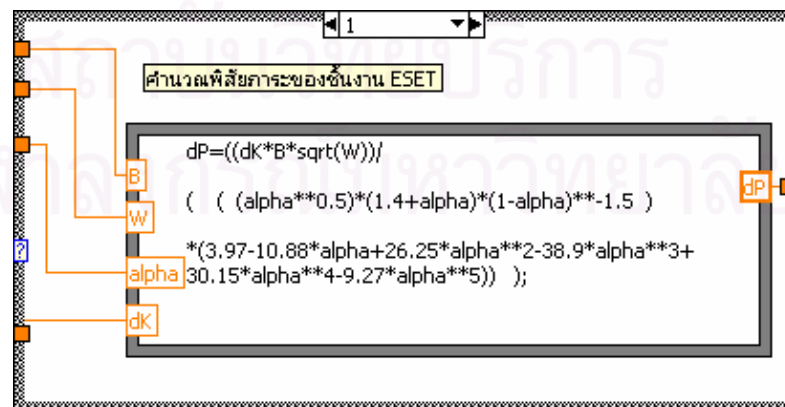
แผนภาพของซบวีไอ



รูปที่ ข.36 แผนภาพของซบวีไอคำนวณการปรับลดภาระ ของชนิดการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$



รูปที่ ข.37 case structure ฟังก์ชันคำนวณพิสัยภาระสำหรับชิ้นงาน CT



รูปที่ ข.38 case structure ฟังก์ชันคำนวณพิสัยภาระสำหรับชิ้นงาน ESET

### ข. 17 ซับวีไอ Ana\_conversion\_load signal input.vi

หน้าที่ แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหลดเซลล์จากหน่วยแรงดันไฟฟ้า(โวลต์)ให้เป็นหน่วยแรง (ตัน)



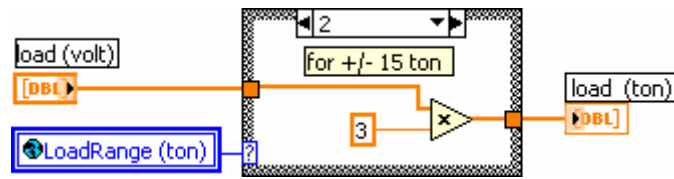
#### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (volt)		สัญญาณภาระในหน่วยโวลต์

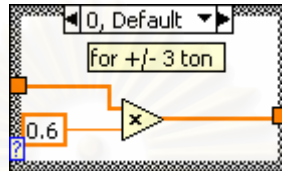
#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)		สัญญาณภาระ

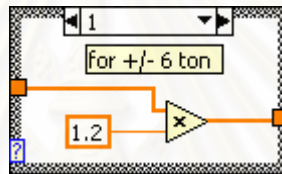
แผนภาพของซบวีไอ



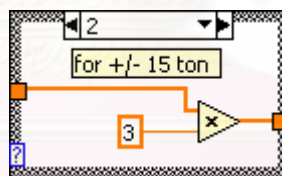
รูปที่ ข.39 แผนภาพการแปลงหน่วยจากแรงดันไฟฟ้าของโหลดเซลล์เป็นภาระทดสอบ



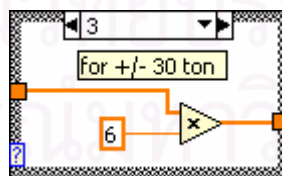
รูปที่ ข.40 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย ±3 ตัน



รูปที่ ข.41 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย ±6 ตัน



รูปที่ ข.42 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย ±15 ตัน



รูปที่ ข.43 case structure ของฟังก์ชันการแปลงหน่วย สำหรับพิสัย ±30 ตัน

### ข. 18 ซับวีไอ Ana\_conversion\_CMOD signal input.vi

หน้าที่ แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลิปเกจจากหน่วยแรงดันไฟฟ้า(โวลต์) ให้เป็นหน่วยระยะทาง (มม.)



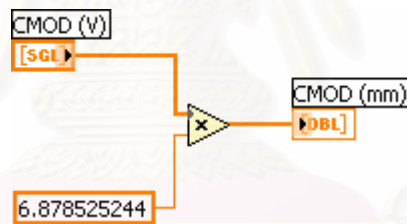
#### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
CMOD (volt)	[SGL]	ระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยราวในหน่วยโวลต์

#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
CMOD (mm)	[DBL]	ระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยราว

#### แผนภาพของซับวีไอ



รูปที่ ข.44 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_conversion\_CMOD signal input.vi

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ข. 19** **ซั้ววีไอ Ana\_start E effective.vi**

**หน้าที่** ควบคุมการ เริ่ม-หยุด การทำงานของโมดูลคำนวณค่ายังก็โมดูลสประสิทธิภาพ (ซั้ววีไอนี้ให้ค่าเป็นจริงเมื่อเครื่องทดสอบเริ่มตั้งชิ้นงานด้วยอัตราเร็วคงที่)



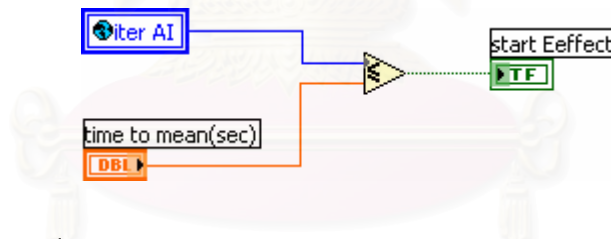
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
time to mean (sec)		เวลาที่ใช้ในการตั้งชิ้นงานด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งถึงภาวะเฉลี่ยที่กำหนด

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start Eeffect		ไฟแสดงสถานะการทำงานของซั้ววีไอ

**แผนภาพของซั้ววีไอ**

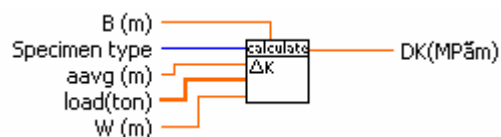


รูปที่ ข.45 แผนภาพของซั้ววีไอ Ana\_start E effective.vi

## ข. 20 ซับวีไอ Ana\_calculation\_SIF.vi

หน้าที่ คำนวณค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

ไอคอน



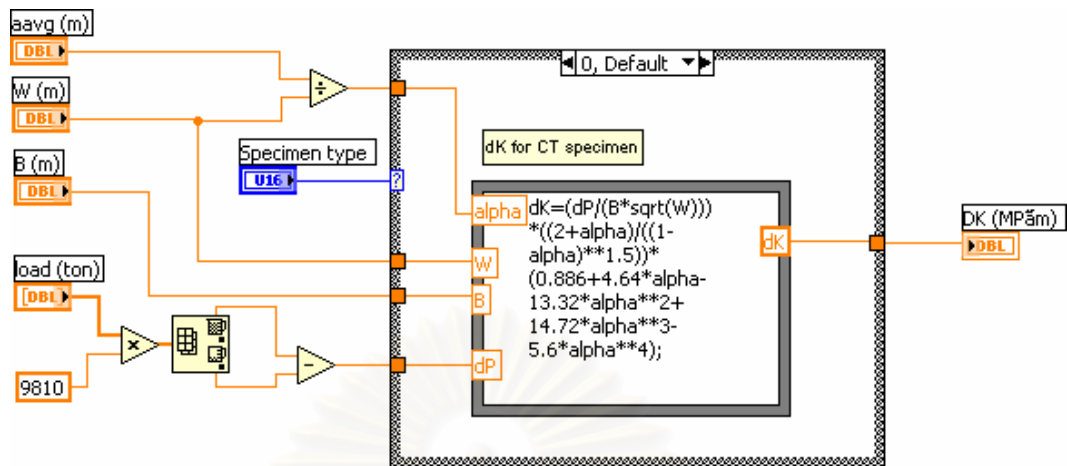
### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Specimen type		ชนิดของชิ้นงานทดสอบ
load (ton)		ภาระขาเข้า
aavg (m)		ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอบภาระที่ต่อเนื่องกันตามจำนวนที่กำหนด
W (m)		ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
B (m)		ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

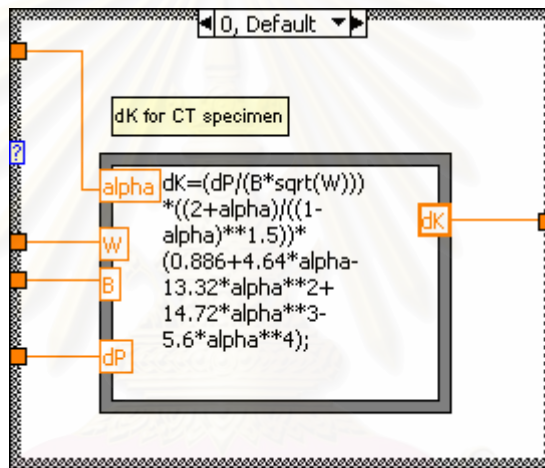
### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
DK (MPa√m)		พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

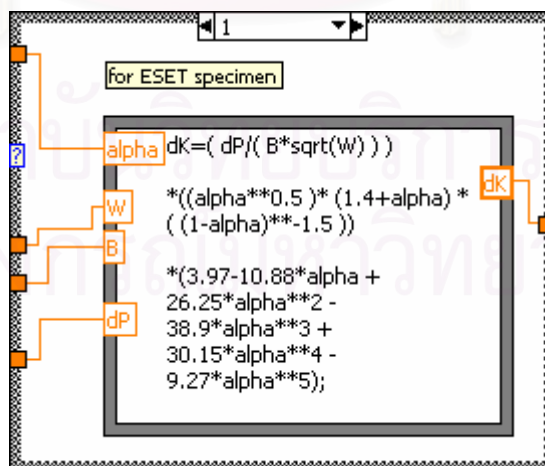
แผนภาพของซั้ววีไอ



รูปที่ ข.46 แผนภาพของซั้ววีไอ Ana\_calculation\_SIF.vi



รูปที่ ข.47 case structure ของฟังก์ชันการคำนวณ  $\Delta K$  สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ CT



รูปที่ ข.48 case structure ของฟังก์ชันการคำนวณ  $\Delta K$  สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบ

ESET

**ข. 21 ซับวีไอ Com\_compensateCMOD.vi**

หน้าที่ ปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปปเก



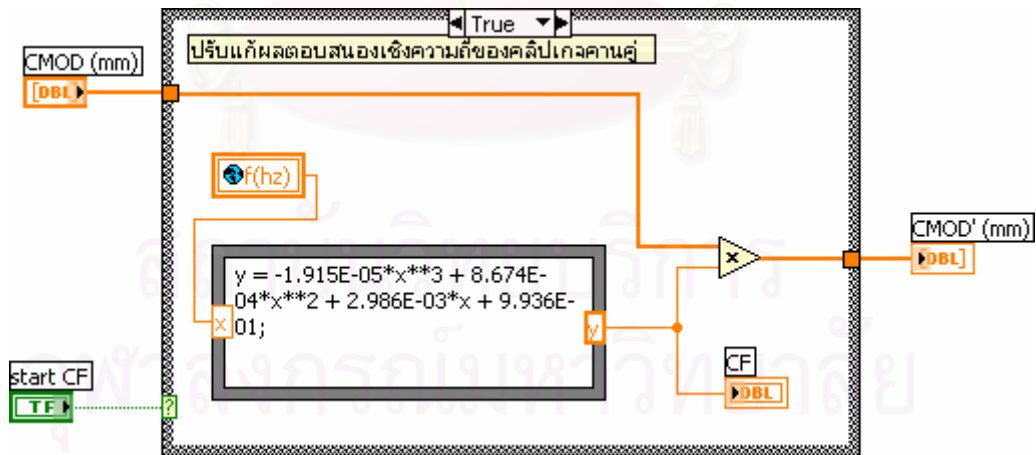
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start CF		ปุ่มเลือกใช้การปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปปเก (เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้คลิปปเกที่สร้างขึ้นเอง ดังนั้นจึงต้องเลือกการปรับแก้)
CMOD (mm)		ระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยร้าว

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
CF		ฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่
CMOD' (mm)		ข้อมูลระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยร้าวที่ปรับแก้แล้ว

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.49 แผนภาพของซับวีไอ Com\_compensateCMOD.vi



**ข. 22 ซับวีไอ Ana\_Moving average crack length.vi**

หน้าที่ คำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเคลื่อนที่ของรอบภาระที่ต่อเนื่องกันตามจำนวนรอบที่กำหนด



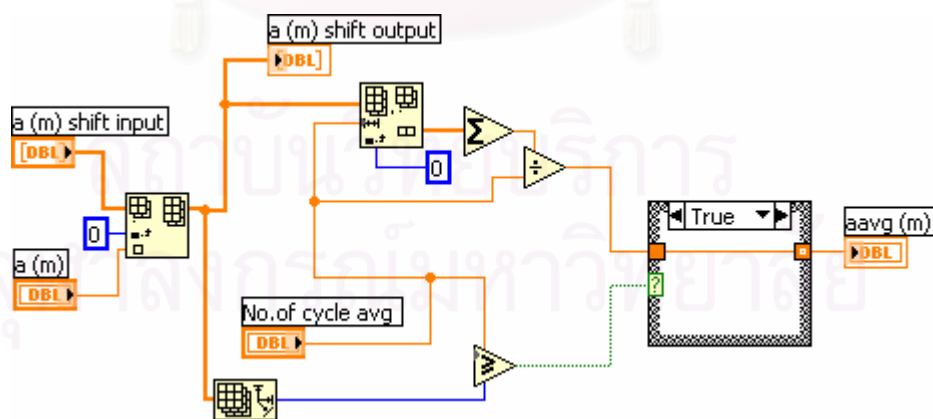
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
No.of cycle avg	[DBL]	จำนวนรอบภาระที่ใช้ในการคำนวณความยาวรอยร้าวเฉลี่ย (วิทยานิพนธ์นี้กำหนดไว้ที่ 100 รอบ)
a (m) shift input	[DBL]	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเคลื่อนที่
a (m)	[DBL]	ความยาวรอยร้าว ณ รอบภาระปัจจุบัน

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
aavg (m)	[DBL]	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอบภาระที่ต่อเนื่องกันตามจำนวนที่กำหนด
a (m) shift output	[DBL]	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเคลื่อนที่

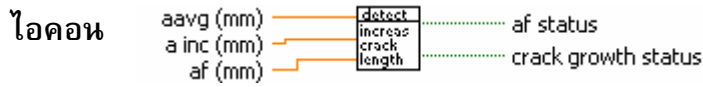
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.50 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_Moving average crack length.vi

**ข. 23 ซับวีไอ File\_detect\_crack length.vi**

**หน้าที่** ตรวจสอบผลต่างระหว่างความยาวรอยร้าวปัจจุบันกับรอยร้าวที่บันทึกไว้ล่าสุด มีผลต่างเกินค่าที่กำหนดหรือไม่ ถ้าผลต่างเกินค่าที่กำหนดโปรแกรมจะสั่งให้บันทึกข้อมูลการทดสอบ



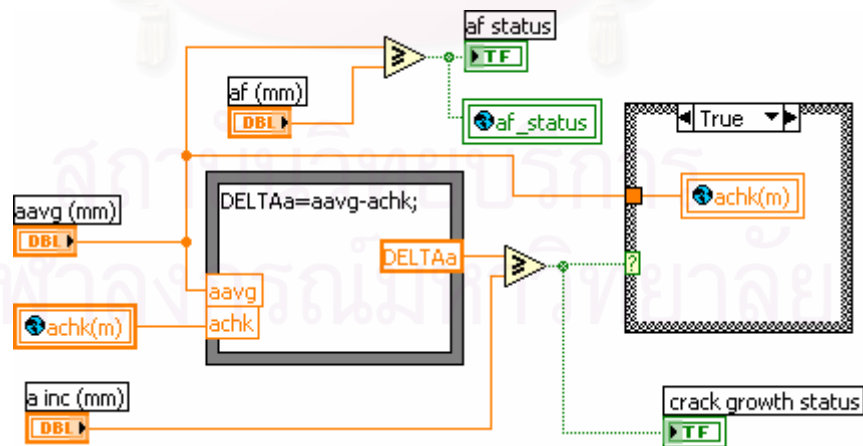
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
a inc (mm)	[DBL]	ผลต่างของความยาวรอยร้าวปัจจุบันกับรอยร้าวครั้งล่าสุดที่ต้องการบันทึก
af (mm)	[DBL]	ความยาวรอยร้าวที่ต้องการหยุดการทดสอบ
aavg (mm)	[DBL]	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอบภาระที่ต่อเนื่องกัน

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
R	[DBL]	อัตราส่วนภาระ
Pa(ton)	[DBL]	แอมพลิจูดภาระ

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.51 แผนภาพของซับวีไอ File\_detect\_crack length.vi

**ข. 24** ซับวีไอ Ana\_conversion mean amp R.vi

หน้าที่ คำนวณภาระเฉลี่ย แอมพลิจูดภาระ และอัตราส่วนภาระ



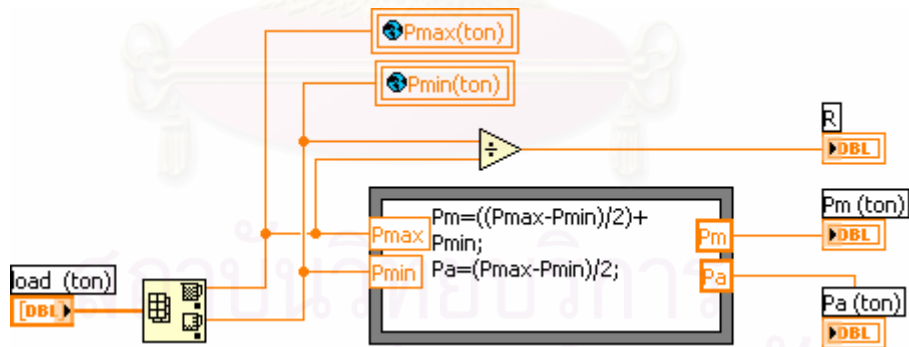
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	DBL	สัญญาณภาระในหนึ่งรอบภาระ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
R	DBL	อัตราส่วนภาระ
Pa (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาระ
Pm (ton)	DBL	ภาระเฉลี่ย

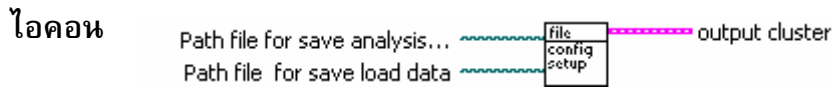
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.51 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_conversion mean amp R.vi

**ข. 25 ซับวีไอ File\_config file.vi**

หน้าที่ กำหนดค่าเริ่มต้นที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบบันทึกสัญญาณ



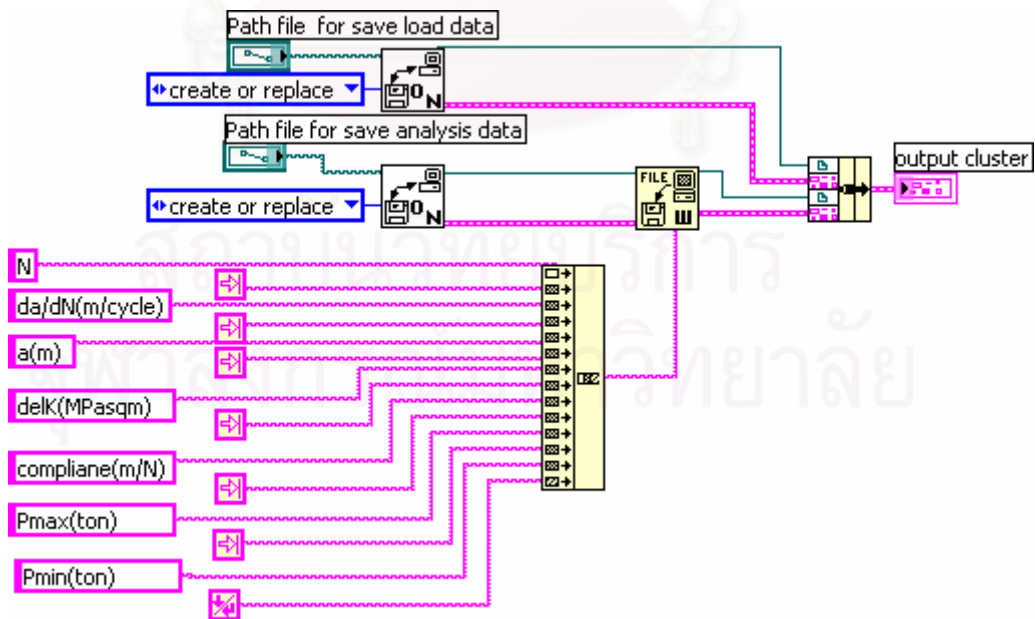
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Path file for save load data		ตำแหน่งไฟล์ข้อมูลที่บันทึก ภาระ และระยะเคลื่อนตัวที่ปาก รอยร้าว
Path file for save analysis data		ตำแหน่งไฟล์ข้อมูลที่บันทึก ความยาวรอยร้าว ,จำนวนรอบ วน ความยาวรอยร้าว นั้น $\Delta K$ อัตราการเติบโตของรอยร้าวถ้า ภาระสูงสุด และภาระต่ำสุด

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ ทดสอบ

**แผนภาพของซับวีไอ**

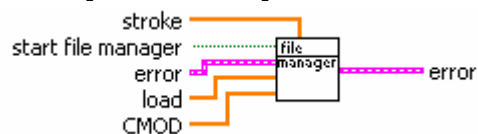


รูปที่ ข.52 แผนภาพของซับวีไอ File\_config file.vi

## ข. 26 ซับวีไอ File\_manager.vi

หน้าที่ จัดการไฟล์ข้อมูล เช่น การสร้างตำแหน่งที่จะบันทึกบนฮาร์ดดิสก์ การตั้งชื่อข้อมูล การสร้างรูปแบบของข้อมูลที่ต้องการจัดเก็บ

ไอคอน



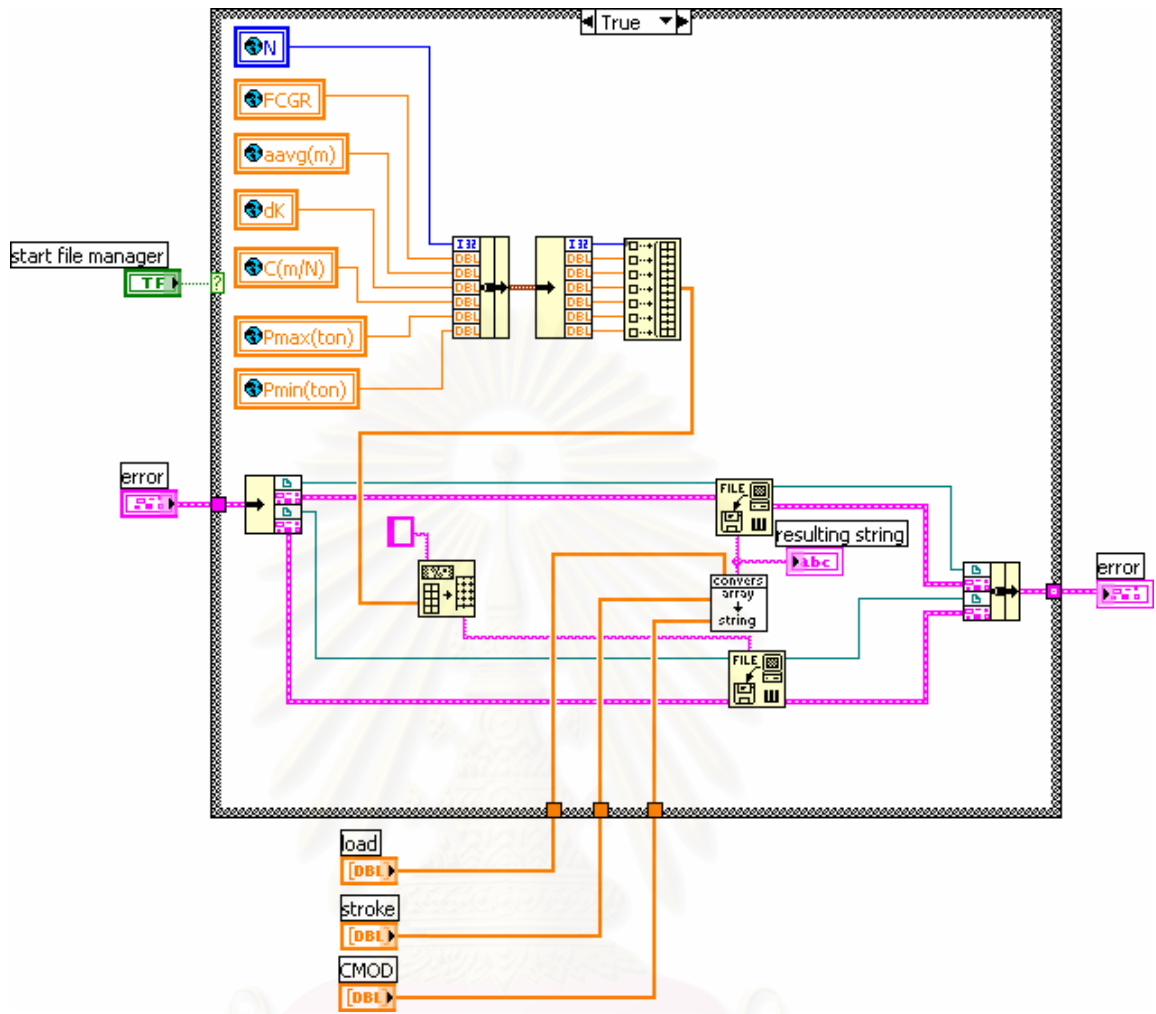
### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)		สัญญาณภาระ
CMOD (mm)		ระยะเคลื่อนตัวที่ปากกรวยร้าว
start file manager		ปุ่มเริ่มการทำงานซับวีไอ ถ้าค่าที่กำหนดเป็นจริงซับวีไอจะทำหน้าที่บันทึกข้อมูล
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ
stroke (mm)		ระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก

### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

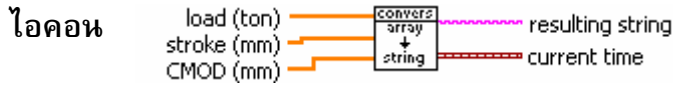
แผนภาพของซบวีไอ



รูปที่ ข.53 แผนภาพของซบวีไอ File\_manager.vi

**ข. 27 ซับวีไอ File\_conversion array to string.vi**

หน้าที่ แปลงข้อมูลสัญญาณภาระ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของปากชิ้นงานทดสอบ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของกระบอกลูกสูบ ซึ่งเป็นข้อมูลหลัก ให้เป็นข้อมูลสายอักขระ แทนข้อมูลตัวเลข เพื่อประหยัดหน่วยความจำ



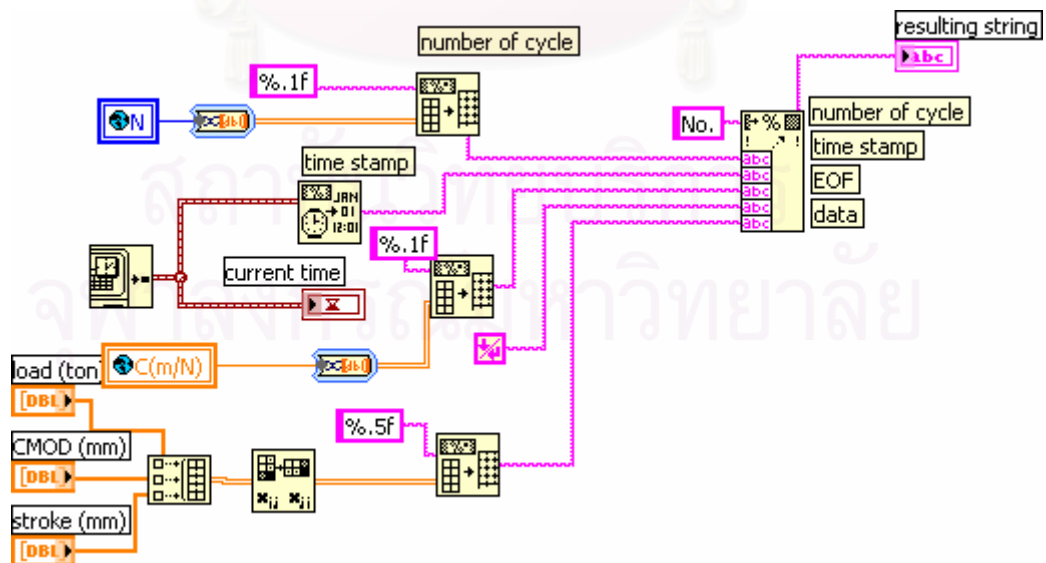
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	[DBL]	สัญญาณภาระ
CMOD (mm)	[DBL]	ระยะเคลื่อนตัวของปากกรวยร้าว
stroke (mm)	[DBL]	ระยะเคลื่อนตัวของลูกสูบในกระบอกลไฮดรอลิก

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
current time	[T]	เวลาที่ปัจจุบันของเครื่องคอมพิวเตอร์
resulting string	[ABC]	ข้อมูลตัวอักษร

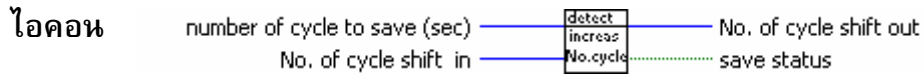
**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.54 แผนภาพของซับวีไอ File\_conversion array to string.vi

**ข. 28** **ซั้ววีไอ File\_detect\_No. cycle.vi**

**หน้าที่** สร้างสัญญาณบูลีน เพื่อสั่งให้โปรแกรมบันทึกข้อมูลการทดสอบ เมื่อจำนวนรอบการถึงจำนวนรอบที่กำหนด หลังจากนั้นจำนวนรอบจะปรับค่าให้เป็นศูนย์ (เช่น กำหนดจำนวนรอบการบันทึกไว้ที่ 10000 รอบ โปรแกรมจะทำการบันทึกเมื่อจำนวนรอบถึง 10001 , 20001 ...รอบ)



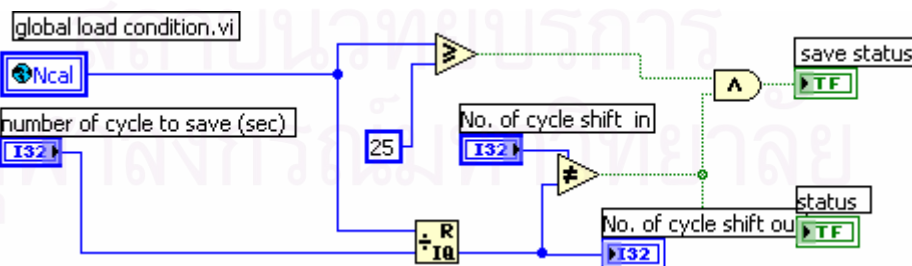
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
number of cycle to save	I32	จำนวนรอบระหว่างการบันทึกข้อมูลแต่ละครั้ง
No. of cycle shift in	I32	จำนวนรอบที่ถูกนับรอบใหม่ ถูกส่งเข้ามาจาก Shift register

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Save status	TF	ปุ่มเริ่มการทำงานของวีไอนี้ (ถ้ากำหนดค่าจริง ข้อมูลการทดสอบจะถูกบันทึก)
No. of cycle shift out	I32	จำนวนรอบที่ถูกนับรอบใหม่ ถูกส่งออกไปยัง Shift register

**แผนภาพของซั้ววีไอ**



รูปที่ ข.55 แผนภาพของซั้ววีไอ File\_detect\_No. cycle.vi




### ข. 29 ซับวีไอ File\_close write file.vi

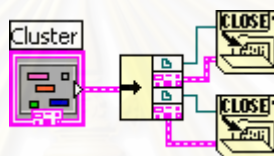
หน้าที่ ปิดไฟล์ข้อมูล เมื่อการทดสอบสิ้นสุด



#### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
error		รหัสหรือข้อความแสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบทดสอบ

#### แผนภาพของซับวีไอ




รูปที่ ข.56 แผนภาพของซับวีไอ File\_close write file.vi

**ข. 30 ซับวีไอ File\_sort signal.vi**


หน้าที่ จัดเรียงลำดับของข้อมูลใหม่ โดยเริ่มต้นที่ข้อมูลซึ่งมีเฟสเท่ากับ 90 องศา



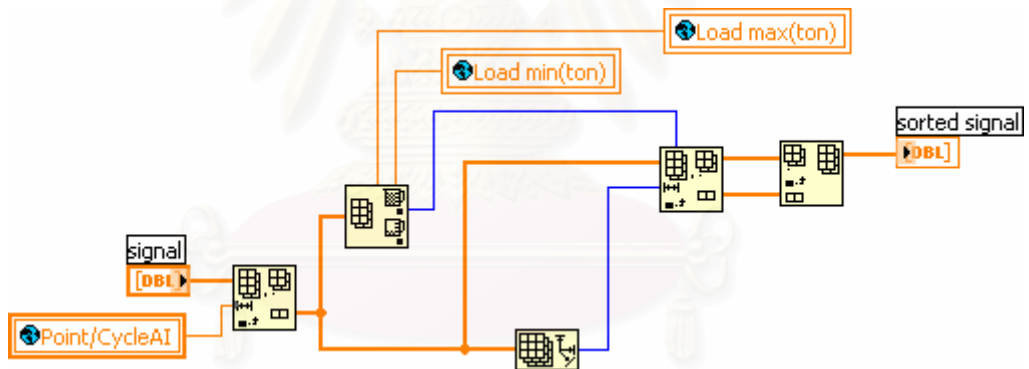
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
signal		ข้อมูลป้อนเข้า

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
sorted signal		ข้อมูลที่จัดเรียงแล้ว

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.57 แผนภาพของซับวีไอ File\_sort signal.vi

### ข. 31 ซับวีไอ Ana\_cutoff.vi

หน้าที่ เลือกข้อมูลของสัญญาณป้อนเข้าตามจำนวนที่กำหนด ซับวีไอนี้ถูกเขียนขึ้นให้ใช้กับสัญญาณป้อนเข้าได้ทุกชนิด ( ในวิชยานิพนธ์นี้เลือกข้อมูลสัญญาณป้อนเข้า 3 ชนิดคือ สัญญาณการะ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวที่ปากชิ้นงาน และ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของกระบอกลไฮดรอลิก)



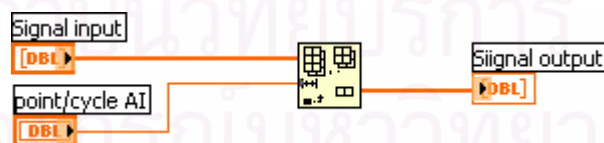
#### ข้อมูลป้อนเข้า

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Signal input	[DBL]	สัญญาณป้อนเข้า (สัญญาณการะ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวที่ปากชิ้นงานและ สัญญาณระยะเคลื่อนตัวของกระบอกลไฮดรอลิก)
point/cycle AI	[DBL]	จำนวนข้อมูลที่ต้องการเลือก (ในวิชยานิพนธ์นี้กำหนดค่าการเลือกข้อมูลไว้เท่ากับจำนวนข้อมูลของสัญญาณในหนึ่งคาบ)

#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Signal output	[DBL]	สัญญาณป้อนเข้าที่ถูกเลือกแล้ว

#### แผนภาพของซับวีไอ

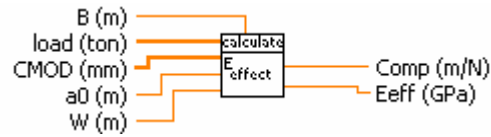


รูปที่ ข.58 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_cutoff.vi

**ข. 32 ซับวีไอ Ana\_calculation\_Eeffective.vi**

หน้าที่ คำนวณค่ายังก์โมดูลัสประสิทธิภาพ

ไอคอน



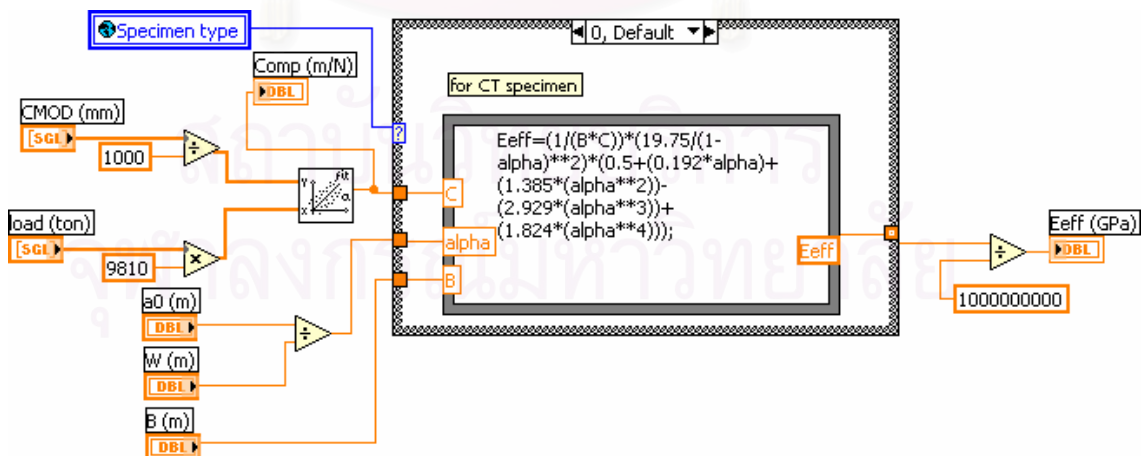
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	[SGL]	สัญญาณภาระ
CMOD (mm)	[SGL]	ระยะเคลื่อนตัวของปากชิ้นงานทดสอบ หรือ CMOD
a0 (m)	[DBL]	ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
W (m)	[DBL]	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ
B (m)	[DBL]	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Comp (m/N)	[DBL]	คอมพลายแอนซ์ หรืออัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวที่ปาก รอยร้าวกับขนาดภาระ
Eeff (GPa)	[DBL]	ค่ายังก์โมดูลัสประสิทธิภาพ

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.59 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_calculation\_Eeffective.vi

**ข. 33** ชั้ววีไอ File\_delay.vi

**หน้าที่** หน่วงเวลาด้วยจำนวนรอบภาระ เพื่อปรับเข้าสู่สภาวะที่กำหนดก่อนเริ่มการบันทึก (เมื่อชั้ววีไอนี้ได้รับสัญญาณปรับลดภาระจาก ชั้ววีไอ File\_detect\_No. cycle.vi ชั้ววีไอนี้จะรอรอบภาระตามจำนวนที่กำหนด แล้วจึงส่งสัญญาณไปยังโมดูลบันทึกค่า)



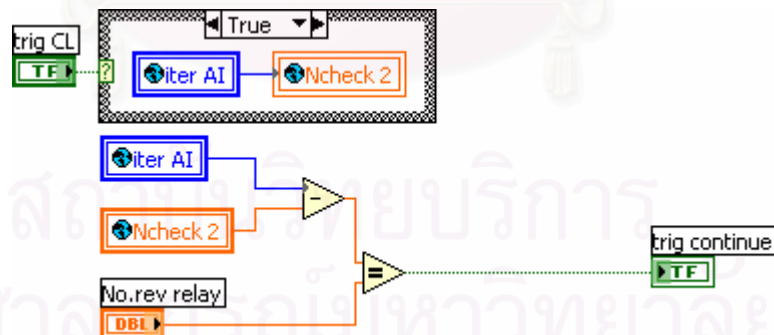
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start delay		ปุ่มเริ่มการทำงานของชั้ววีไอหน่วงเวลา
No. of cycle for delay		จำนวนรอบภาระที่ต้องการหน่วงเวลาการทำงานของโมดูลบันทึกข้อมูลทดสอบ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
delay status		สัญญาณที่ถูกหน่วงเวลาด้วยจำนวนรอบภาระแล้ว

**แผนภาพของชั้ววีไอ**



รูปที่ ข.60 แผนภาพของชั้ววีไอ File\_delay.vi

**ข. 34 ซับวีไอ Ana\_anti not a number.vi**

หน้าที่ ตรวจสอบความผิดพลาดของซับวีไอคำนวณความยาวรอยร้าว ถ้าค่าความยาวรอยร้าวที่คำนวณได้มีค่าเป็นจำนวนอนันต์ ไฟแสดงผลความผิดพลาดจะแสดงขึ้น



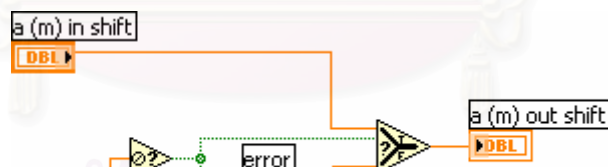
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
a (m)	DBL	ความยาวรอยร้าว ณ ขณะนั้น
a (m) in shift	DBL	ความยาวรอยร้าวของจำนวนรอบที่ผ่านมา

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
a (m) out shift	DBL	ความยาวรอยร้าวปัจจุบัน
error	TF	ไฟแสดงสถานะความผิดพลาดของการคำนวณความยาวรอยร้าว


**แผนภาพของซับวีไอ**




รูปที่ ข.61 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_anti not a number.vi

### ข. 35 ซับวีไอ Ana\_start fatigue calculation.vi

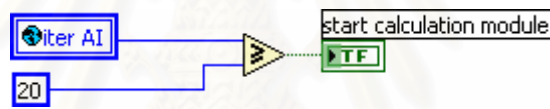
**หน้าที่** ควบคุมการเริ่มการทำงานของโมดูลคำนวณค่า การทำงานของวีไอนี้เริ่มเมื่อขนาดภาระมีสภาวะตามที่กำหนด โมดูลนี้จะส่งสัญญาณสั่งให้ ซับวีไอการคำนวณความยาวรอยร้าว ซับวีไอคำนวณ  $\Delta K$  ซับวีไอคำนวณอัตราการเติบโตของรอยร้าวแล้ว เริ่มการคำนวณ

**ไอคอน**  ..... start calculation module

#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start calculation module		สัญญาณบูลีนที่สั่งให้ซับวีไอการคำนวณเริ่มการทำงาน


#### แผนภาพของซับวีไอ




รูปที่ ข.62 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_start fatigue calculation.vi

### ข. 36 ซับวีไอ Ana\_start FCGRt.vi

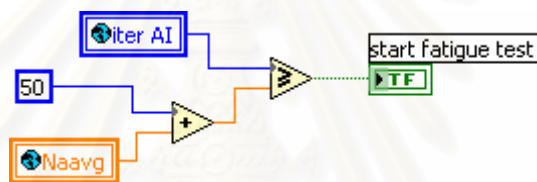
**หน้าที่** ควบคุมการเริ่มการทำงานของโมดูล Fatigue test การทำงานของวีไอนี้เริ่มเมื่อขนาดภาระมีสถานะตามที่กำหนด โมดูลนี้จะส่งสัญญาณสั่งโมดูล Fatigue test เริ่มการทำงาน

**ไอคอน**  start fatigue test

#### ข้อมูลขาออก

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
start fatigue test		สัญญาณบูลีนที่สั่งเริ่มการทำงานของโมดูล Fatigue test

#### แผนภาพของซับวีไอ

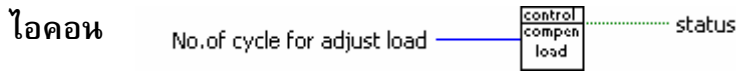


รูปที่ ข.63 แผนภาพของซับวีไอ Ana\_start FCGRt.vi



**ข. 37** ซับวีไอ **Com\_control load.vi**

**หน้าที่** ควบคุมการทำงานของโมดูลชดเชยภาระ การควบคุมถูกกำหนดโดยจำนวนรอบภาระ เช่น กำหนดจำนวนรอบภาระไว้ที่ 10 รอบภาระ ซับวีไอนี้จะสั่งให้โมดูลชดเชยภาระทำงานที่รอบภาระที่ 11 จากนั้นซับวีไอนี้จะเริ่มนับรอบใหม่ จนกระทั่งรอบที่ 21 ซับวีไอนี้จะสั่งให้โมดูลชดเชยภาระทำงานอีกครั้ง



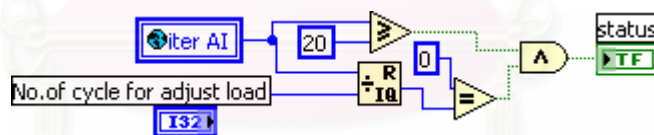
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
No. of cycle for adjust load		ช่วงของจำนวนรอบภาระที่ต้องการให้โมดูลชดเชยภาระทำงาน

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
status		สัญญาณที่สั่งให้โมดูลชดเชยภาระทำงาน

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.64 แผนภาพของซับวีไอ Com\_control load.vi

**ข. 38 ซับวีไอ Com\_adjust amplitude load.vi**

หน้าที่ ชดเชยแอมพลิจูดภาระให้ถูกต้องตามที่กำหนด โดยการลดส่วนต่างระหว่างแอมพลิจูดภาระที่ต้องการกับแอมพลิจูดภาระที่วัดได้จริง



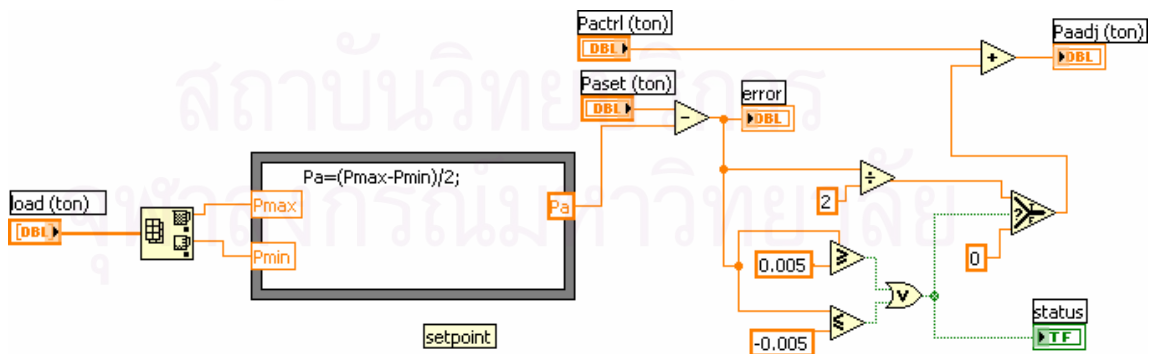
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	DBL	ภาระ
Pactrl (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาระที่ปรับลดส่วนต่างแล้ว
Paset (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาระที่ต้องการ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Paadj (ton)	DBL	แอมพลิจูดภาระที่ปรับลดส่วนต่างแล้ว
error	DBL	ผลต่างระหว่างแอมพลิจูดภาระที่ต้องการ กับแอมพลิจูดภาระที่วัดได้จริง
status	TF	ไฟแสดงสถานะการปรับลดส่วนต่างของแอมพลิจูดภาระ

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.65 แผนภาพของซับวีไอ Com\_adjust amplitude load.vi

**ข. 39 ซับวีไอ Com\_adjust mean load.vi**

หน้าที่ ชดเชยภาระเฉลี่ยให้ถูกต้องตามที่กำหนด โดยการลดส่วนต่างระหว่างภาระเฉลี่ยที่ต้องการกับภาระเฉลี่ยที่วัดได้จริง



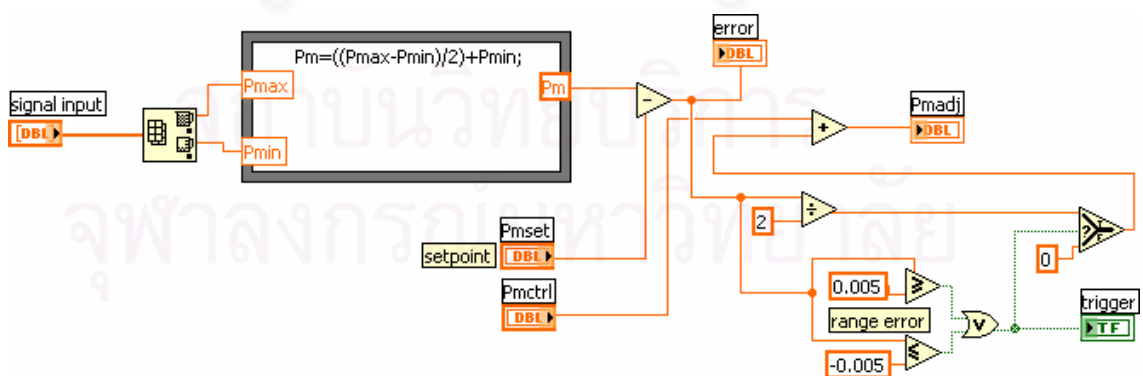
**ข้อมูลป้อนเข้า**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
load (ton)	DBL	สัญญาณภาระ
Pmctrl (ton)	DBL	ภาระเฉลี่ยที่ปรับลดส่วนต่างแล้ว
Pmset (ton)	DBL	ภาระเฉลี่ยที่ต้องการ

**ข้อมูลขาออก**

ตัวแปร (หน่วย)	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
Pmadj (ton)	DBL	ภาระเฉลี่ยที่ปรับลดส่วนต่างแล้ว
error	DBL	ผลต่างระหว่างภาระเฉลี่ยที่ต้องการกับภาระเฉลี่ยที่วัดได้
status	TF	ไฟแสดงสถานะ ไฟจะแสดงขึ้นเมื่อมีการปรับลดผลต่างของเฉลี่ยภาระ

**แผนภาพของซับวีไอ**



รูปที่ ข.66 แผนภาพของซับวีไอ Com\_adjust mean load.vi

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

## ค.1 ผลการทดสอบจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.1

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
750	21.90	-	-
1,100	21.66	1.81E-05	2.39
29,959	22.19	5.31E-06	2.46
129,804	22.72	6.67E-06	2.57
210,120	23.25	4.13E-06	2.61
589,601	24.82	9.02E-06	2.85
649,228	25.36	4.01E-06	2.95
721,604	25.65	9.50E-06	3.00
765,832	26.07	1.33E-05	3.03
809,300	26.65	8.82E-06	3.25
848,988	27.00	7.86E-06	3.21
889,196	27.31	8.82E-06	3.28
926,374	27.64	2.41E-05	3.35
948,763	28.18	1.47E-05	3.48
974,002	28.55	2.07E-05	3.63
995,841	29.00	2.66E-05	3.75
1,006,410	29.29	3.53E-05	3.82
1,019,210	29.74	4.11E-05	3.88
1,031,119	30.23	3.67E-05	4.03

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,041,418	30.61	6.15E-05	4.22
1,048,708	31.05	6.18E-05	4.37
1,054,908	31.44	5.93E-05	4.43
1,061,927	31.85	6.58E-05	4.59
1,067,227	32.20	8.27E-05	4.72
1,072,187	32.61	1.04E-04	4.89
1,076,177	33.02	1.20E-04	5.07
1,079,397	33.41	1.66E-04	5.26
1,082,396	33.91	1.89E-04	5.60
1,084,536	34.31	1.74E-04	5.72
1,086,836	34.71	2.62E-04	6.05
1,088,436	35.13	2.47E-04	6.10
1,090,226	35.58	3.13E-04	6.39
1,091,446	35.96	8.92E-04	6.77
1,092,236	36.66	-	-

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.3

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,200	14.44	-	-
2,200	14.57	8.65E-05	5.24
3,910	14.72	4.47E-05	5.28
10,330	15.01	4.16E-05	5.33
13,360	15.13	7.60E-05	5.41
30,749	16.46	8.37E-05	5.76
35,349	16.84	1.05E-04	5.91
37,859	17.10	8.70E-05	5.93
41,698	17.44	1.31E-04	6.02
44,818	17.85	1.04E-04	6.18
47,608	18.14	1.24E-04	6.28
50,118	18.45	8.69E-05	6.37
53,008	18.70	9.55E-05	6.49
55,688	18.96	1.53E-04	6.51
57,578	19.24	1.55E-04	6.60
60,287	19.66	1.21E-04	6.78
62,047	19.88	1.52E-04	6.86
64,357	20.23	1.92E-04	6.95
66,377	20.62	1.72E-04	7.16
68,357	20.96	1.76E-04	7.22
69,747	21.20	1.17E-04	7.31
71,607	21.42	2.16E-04	7.40
73,227	21.77	2.26E-04	7.49
74,927	22.15	1.73E-04	7.73
76,557	22.43	1.68E-04	7.84
77,707	22.63	2.25E-04	7.94
79,167	22.95	3.14E-04	8.09

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.3 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
80,696	23.43	2.11E-04	8.29
81,676	23.64	2.38E-04	8.36
83,126	23.99	2.76E-04	8.56
84,106	24.26	2.62E-04	8.61
85,276	24.56	2.87E-04	8.77
86,356	24.87	2.98E-04	9.03
87,316	25.16	3.44E-04	9.13
88,396	25.53	3.73E-04	9.33
89,276	25.86	2.87E-04	9.47
90,216	26.13	3.71E-04	9.74
91,236	26.51	3.67E-04	9.91
91,896	26.75	4.32E-04	10.13
92,646	27.07	4.09E-04	10.29
93,406	27.38	4.17E-04	10.50
94,106	27.68	4.74E-04	10.70
94,806	28.01	4.39E-04	10.94
95,446	28.29	5.69E-04	11.10
95,996	28.60	5.30E-04	11.33
96,556	28.90	5.87E-04	11.58
97,096	29.22	5.61E-04	11.85
97,656	29.53	6.59E-04	12.12
98,116	29.83	6.64E-04	12.39
98,616	30.16	6.61E-04	12.71
99,056	30.46	8.05E-04	12.99
99,486	30.80	7.71E-04	13.34
99,905	31.12	8.89E-04	13.55
100,265	31.44	8.82E-04	13.90

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.3 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
100,595	31.74	1.05E-03	14.15
100,945	32.10	1.19E-03	14.51
101,225	32.44	-	-



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.5

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,200	12.58	-	-
2,200	12.74	5.38E-05	5.18
8,690	13.09	7.02E-05	5.27
16,170	13.62	1.14E-04	5.33
23,099	14.41	1.01E-04	5.58
29,079	15.01	1.07E-04	5.78
34,309	15.57	1.31E-04	5.92
39,808	16.29	1.32E-04	6.14
44,188	16.86	1.57E-04	6.32
47,778	17.43	1.89E-04	6.47
51,628	18.16	1.59E-04	6.71
54,628	18.63	1.87E-04	6.91
57,898	19.24	2.75E-04	7.13
60,907	20.07	2.52E-04	7.37
63,257	20.66	2.23E-04	7.67
65,547	21.18	2.88E-04	7.80
67,797	21.82	3.87E-04	8.16
69,587	22.52	3.22E-04	8.43
71,387	23.10	3.42E-04	8.70
73,017	23.65	4.57E-04	8.98
74,517	24.34	4.86E-04	9.34
75,897	25.01	5.31E-04	9.72
77,017	25.60	5.97E-04	10.08
78,067	26.23	6.39E-04	10.47
79,037	26.85	8.56E-04	10.84
79,836	27.54	1.21E-03	11.33
80,416	28.23	-	-

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.7

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
750	21.90	-	-
1,100	21.66	1.81E-05	2.39
29,959	22.19	5.31E-06	2.46
129,804	22.72	6.67E-06	2.57
210,120	23.25	4.13E-06	2.61
589,601	24.82	9.02E-06	2.85
649,228	25.36	4.01E-06	2.95
721,604	25.65	9.50E-06	3.00
765,832	26.07	1.33E-05	3.03
809,300	26.65	8.82E-06	3.25
848,988	27.00	7.86E-06	3.21
889,196	27.31	8.82E-06	3.28
926,374	27.64	2.41E-05	3.35
948,763	28.18	1.47E-05	3.48
974,002	28.55	2.07E-05	3.63
995,841	29.00	2.66E-05	3.75
1,006,410	29.29	3.53E-05	3.82
1,019,210	29.74	4.11E-05	3.88
1,031,119	30.23	3.67E-05	4.03
1,041,418	30.61	6.15E-05	4.22
1,048,708	31.05	6.18E-05	4.37
1,054,908	31.44	5.93E-05	4.43
1,061,927	31.85	6.58E-05	4.59
1,067,227	32.20	8.27E-05	4.72
1,072,187	32.61	1.04E-04	4.89

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ ที่  $R$  เท่ากับ 0.7 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,076,177	33.02	1.20E-04	5.07
1,079,397	33.41	1.66E-04	5.26
1,082,396	33.91	1.89E-04	5.60
1,084,536	34.31	1.74E-04	5.72
1,086,836	34.71	2.62E-04	6.05
1,088,436	35.13	2.47E-04	6.10
1,090,226	35.58	3.13E-04	6.39
1,091,446	35.96	8.92E-04	6.77
1,092,236	36.37	-	-

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.1

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
4,080	15.72	-	-
7,710	16.13	7.80E-05	6.75
11,980	16.46	8.60E-05	6.44
16,970	16.89	7.98E-05	6.23
22,719	17.35	4.23E-05	6.06
28,989	17.62	6.14E-05	5.92
36,659	18.09	4.72E-05	5.73
46,238	18.54	3.63E-05	5.59
56,778	18.92	2.53E-05	5.35
70,557	19.27	1.71E-05	5.24
92,026	19.64	1.59E-05	4.95
117,445	20.04	1.34E-05	4.90
145,513	20.42	1.19E-05	4.78
190,001	20.95	6.66E-06	4.60
230,569	21.22	4.95E-06	4.40
303,525	21.58	4.34E-06	4.32
410,400	22.04	8.51E-06	4.15
488,777	22.71	3.22E-06	3.84
650,528	23.23	3.16E-06	3.91
800,241	23.70	1.27E-06	3.75
940,344	23.88	1.86E-06	3.65
1,194,641	24.35	1.91E-06	3.47
1,380,082	24.71	1.81E-06	3.31
1,676,617	25.24	1.11E-06	3.27
1,920,075	25.51	-	-

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.3

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
590	11.53	-	-
1900	11.92	2.04E-04	8.07
3260	12.20	1.98E-04	7.72
5230	12.59	2.71E-04	7.46
7220	13.13	1.26E-04	7.32
9130	13.37	2.46E-04	7.03
11190	13.87	1.28E-04	6.84
13860	14.22	1.46E-04	6.61
16880	14.66	1.25E-04	6.37
20709	15.14	1.35E-04	6.22
23839	15.56	1.08E-04	6.06
27809	15.99	9.08E-05	5.87
30859	16.26	5.05E-05	5.62
37339	16.59	7.46E-05	5.43
44158	17.10	8.71E-05	5.32
50188	17.63	2.74E-05	5.14
60847	17.92	4.06E-05	4.96
70347	18.30	2.03E-05	4.85
86836	18.64	2.60E-05	4.67
106555	19.15	1.73E-05	4.54
122884	19.43	1.35E-05	4.40
157653	19.90	1.56E-05	4.29
190341	20.41	1.07E-05	4.14
278257	21.35	9.29E-06	3.88
323355	21.77	7.64E-06	3.77
382922	22.23	5.10E-06	3.66
458878	22.61	4.47E-06	3.48

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.3 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
523295	22.90	7.07E-06	3.41
602891	23.46	4.91E-06	3.30
682467	23.86	5.39E-06	3.19
762453	24.29	3.65E-06	3.14
842989	24.58	4.41E-06	3.05
962453	25.11	2.65E-06	2.95
1082627	25.43	3.30E-06	2.81
1202501	25.82	2.66E-06	2.78
1338514	26.18	1.67E-06	2.64
1522445	26.49	6.85E-07	2.58
2182282	26.94	5.43E-07	2.50
2862348	27.31	4.58E-07	2.45
3822170	27.75	-	-

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.5

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
690	12.39	-	-
3,240	12.70	8.72E-05	5.35
7,290	13.05	8.05E-05	5.17
11,030	13.35	2.32E-05	4.86
20,429	13.57	7.23E-05	4.60
30,439	14.30	2.73E-05	4.59
41,108	14.59	2.15E-05	4.41
58,538	14.96	4.41E-05	4.30
70,427	15.49	1.63E-05	4.21
90,426	15.81	1.02E-05	4.04
187,181	16.79	1.46E-05	3.75
230,469	17.42	9.01E-06	3.46
270,297	17.78	7.35E-06	3.49
350,063	18.37	5.83E-06	3.29
410,050	18.72	4.61E-06	3.28
470,367	19.00	6.92E-06	3.26
549,703	19.55	3.79E-06	3.17
610,190	19.78	3.77E-06	2.96
707,445	20.14	4.77E-06	2.80
809,550	20.63	4.88E-06	2.91
909,995	21.12	4.20E-06	2.79
990,031	21.46	3.54E-06	2.60
1,129,574	21.95	2.97E-06	2.63
1,229,489	22.25	3.40E-06	2.55

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.5 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,349,893	22.66	2.84E-06	2.44
1,509,575	23.11	1.01E-05	2.42
1,539,514	23.41	3.31E-06	2.50
1,698,996	23.94	3.36E-06	2.44
1,759,453	24.14	1.53E-06	2.47
2,019,540	24.54	3.68E-06	2.34
2,119,175	24.91	2.12E-06	2.20
2,359,273	25.42	1.20E-06	2.12
2,579,452	25.68	2.44E-06	2.10
2,838,869	26.31	3.83E-06	2.03
2,938,894	26.70	-	-

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ที่  $R$  เท่ากับ 0.7

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,070	12.06	-	-
5,690	12.48	3.58E-05	4.57
9,240	12.61	5.35E-05	4.25
16,730	13.01	6.89E-05	4.14
25,099	13.59	7.74E-05	4.16
30,459	14.00	3.23E-05	3.93
44,468	14.45	2.80E-05	3.80
57,978	14.83	3.47E-05	3.68
70,567	15.27	1.96E-05	3.59
90,416	15.66	1.79E-05	3.46
97,326	15.63	1.48E-05	3.33
151,003	16.42	1.31E-05	3.26
190,311	16.94	9.61E-06	3.16
230,259	17.32	6.99E-06	3.12
290,076	17.74	9.24E-06	3.09
330,564	18.11	5.75E-06	2.88
390,241	18.46	1.26E-06	2.83
457,768	18.54	4.60E-06	2.78
527,544	18.86	5.94E-06	2.51
729,654	20.06	1.74E-07	2.56
821,419	20.08	5.52E-06	2.38
950,253	20.79	3.85E-06	2.40
1,070,147	21.25	-	-

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  กรณี  $\Delta K$  เท่ากับ  $4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )
94,836	11.89	-	-
170,842	12.20	8.26E-06	4.02
207,789	12.50	6.74E-06	4.07
255,115	12.82	6.15E-06	4.00
305,545	13.13	4.70E-06	4.07
370,692	13.44	5.48E-06	4.05
427,309	13.75	5.07E-06	4.10
487,696	14.05	7.24E-06	4.11
530,784	14.36	5.75E-06	4.09
580,560	14.65	4.95E-06	4.10
631,050	14.90	6.13E-06	4.10
680,007	15.20	8.79E-06	4.13
729,035	15.63	4.50E-06	4.35
797,491	15.94	6.95E-06	4.10
840,829	16.24	5.05E-06	4.10
901,606	16.55	5.06E-06	4.10
961,333	16.85	5.45E-06	4.10
1,016,720	17.15	5.21E-06	4.13
1,075,267	17.46	6.55E-06	4.13
1,121,255	17.76	5.13E-06	4.17
1,181,052	18.06	6.13E-06	4.13
1,232,089	18.38	4.50E-06	4.08
1,298,956	18.68	7.27E-06	4.08
1,340,794	18.98	5.90E-06	4.15
1,392,291	19.29	-	-

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  กรณี  $\Delta K$  เท่ากับ 7 MPa $\sqrt{m}$

N (cycle)	<i>a</i> (mm)	<i>da/dN</i> (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
6,490	22.67	-	-
8,600	22.96	2.35E-04	7.26
9,780	23.24	1.65E-04	7.24
11,850	23.58	1.92E-04	7.30
13,550	23.90	1.74E-04	7.22
15,050	24.16	1.90E-04	7.38
16,660	24.47	2.01E-04	7.22
18,220	24.78	1.96E-04	7.27
19,849	25.10	1.70E-04	7.21
21,309	25.35	1.70E-04	7.24
23,059	25.65	1.91E-04	7.28
24,589	25.94	2.28E-04	7.20
26,149	26.30	1.91E-04	7.36
27,769	26.61	-	-

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  กรณี  $\Delta K$  เท่ากับ  $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )
2,200	27.78	-	-
2,600	27.91	4.35E-04	10.41
3,310	28.22	4.52E-04	10.45
4,000	28.53	4.75E-04	10.65
4,670	28.85	4.36E-04	10.64
5,360	29.15	4.21E-04	10.53
6,040	29.43	4.32E-04	10.78
6,760	29.74	3.87E-04	10.70
7,510	30.03	4.27E-04	10.66
8,310	30.38	4.06E-04	10.65
9,000	30.66	4.52E-04	10.69
9,830	31.03	4.00E-04	10.35
10,530	31.31	3.42E-04	10.37
11,250	31.56	4.06E-04	10.52
11,970	31.85	4.10E-04	10.54
12,760	32.17	4.17E-04	10.69
13,530	32.49	4.15E-04	10.45
14,270	32.80	3.85E-04	10.68
15,020	33.09	-	-

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 ผลการทดสอบจากโปรแกรม GLUON

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาวะด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
310	13.71	8.72E-05	7.13
1,813	13.84	6.47E-05	7.18
3,312	13.94	9.84E-05	7.22
4,511	14.06	8.78E-05	7.25
5,707	14.16	8.89E-05	7.30
6,910	14.27	8.82E-05	7.35
8,112	14.38	9.43E-05	7.39
9,310	14.49	9.77E-05	7.43
10,507	14.61	8.73E-05	7.48
11,710	14.71	1.14E-04	7.51
12,909	14.85	1.04E-04	7.58
14,112	14.97	1.21E-04	7.63
15,309	15.12	9.82E-05	7.69
16,511	15.24	1.19E-04	7.74
17,708	15.38	1.09E-04	7.80
18,609	15.48	1.22E-04	7.85
19,511	15.59	1.18E-04	7.88
20,411	15.69	1.29E-04	7.93
21,312	15.81	1.15E-04	7.98
22,211	15.91	1.36E-04	8.02
23,110	16.04	1.41E-04	8.07
24,009	16.16	1.31E-04	8.13
24,911	16.28	1.38E-04	8.18
25,807	16.40	1.40E-04	8.24
26,713	16.53	1.60E-04	8.30
27,612	16.68	1.43E-04	8.36
28,513	16.80	1.44E-04	8.41

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 (ต่อ)

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
29,413	16.93	1.66E-04	8.46
30,310	17.08	1.46E-04	8.53
31,208	17.21	1.66E-04	8.60
31,811	17.31	1.64E-04	8.65
32,710	17.46	1.53E-04	8.71
33,306	17.55	1.89E-04	8.76
33,908	17.67	1.59E-04	8.82
34,809	17.81	1.82E-04	8.88
35,408	17.92	1.89E-04	8.93
36,010	18.03	1.83E-04	8.99
36,610	18.14	2.08E-04	9.04
37,211	18.27	1.82E-04	9.09
37,809	18.38	1.65E-04	9.15
38,410	18.48	2.01E-04	9.19
39,007	18.60	1.91E-04	9.26
39,610	18.71	2.16E-04	9.32
40,211	18.84	1.81E-04	9.37
40,812	18.95	2.13E-04	9.44
41,407	19.08	2.09E-04	9.49
42,009	19.20	2.04E-04	9.57
42,608	19.32	2.07E-04	9.63
43,208	19.45	2.28E-04	9.69
43,808	19.59	2.04E-04	9.77
44,412	19.71	2.21E-04	9.85
45,010	19.84	2.42E-04	9.91

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบแบบลด  $\Delta K$  ด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,099,587	29.60	1.38E-04	6.98
1,100,781	29.74	8.78E-05	6.81
1,102,583	29.86	7.36E-05	6.59
1,104,082	29.98	7.12E-05	6.43
1,106,181	30.11	6.02E-05	6.24
1,108,284	30.24	4.94E-05	6.06
1,111,282	30.37	3.59E-05	5.89
1,114,885	30.47	3.30E-05	5.69
1,117,586	30.57	2.82E-05	5.51
1,122,683	30.69	1.99E-05	5.35
1,128,682	30.80	1.58E-05	5.18
1,135,883	30.90	1.14E-05	5.03
1,146,986	31.00	6.87E-06	4.88
1,165,582	31.11	5.94E-06	4.71
1,181,484	31.21	5.70E-06	4.58
1,202,783	31.32	4.58E-06	4.43
1,229,781	31.43	3.56E-06	4.26
1,263,688	31.53	3.23E-06	4.09
1,297,884	31.65	3.07E-06	3.94
1,335,086	31.75	2.20E-06	3.80
1,390,585	31.85	2.18E-06	3.60
1,429,583	31.96	1.53E-06	3.48
1,528,888	32.07	1.06E-06	3.33
1,629,386	32.17	8.50E-07	3.15
1,779,384	32.28	5.56E-07	3.00

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 และ  $\Delta K$  เท่ากับ 4 MPa $\sqrt{m}$

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
310	12.88	-	4.02
176,409	13.09	1.75E-06	4.00
232,810	13.29	4.86E-06	4.00
260,409	13.50	5.76E-06	4.00
300,308	13.68	5.17E-06	4.00
334,810	13.88	5.44E-06	4.00
375,008	14.09	5.27E-06	4.00
414,912	14.30	4.96E-06	4.00
460,208	14.51	5.11E-06	4.00
495,308	14.71	5.22E-06	4.00
538,812	14.92	4.95E-06	4.00
554,113	15.00	5.70E-06	4.00
584,423	15.18	5.21E-06	4.00
626,124	15.38	5.28E-06	4.00
660,326	15.58	6.13E-06	4.00
693,323	15.79	5.46E-06	4.00
735,925	15.99	4.10E-06	4.00
795,621	16.21	4.22E-06	4.01
837,026	16.42	4.48E-06	4.00
888,924	16.63	3.54E-06	4.00
952,825	16.83	3.60E-06	4.00
994,523	17.01	8.31E-06	4.00



ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 และ  $\Delta K$  เท่ากับ 7 MPa $\sqrt{m}$

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
994,831	17.18	1.61E-04	7.07
996,934	17.40	8.93E-05	7.02
999,633	17.61	8.30E-05	7.01
1,002,033	17.82	9.13E-05	7.01
1,004,432	18.05	1.00E-04	7.01
1,006,532	18.27	9.60E-05	7.02
1,008,930	18.48	9.66E-05	7.00
1,011,035	18.71	1.02E-04	7.02
1,013,135	18.91	1.02E-04	7.01
1,015,230	19.13	1.07E-04	7.01
1,017,331	19.36	1.04E-04	7.01
1,019,432	19.57	1.01E-04	7.02
1,021,534	19.78	9.83E-05	7.01
1,023,633	19.99	1.06E-04	7.01
1,025,431	20.20	1.09E-04	7.01
1,027,535	20.41	1.03E-04	7.02
1,029,635	20.63	1.10E-04	7.00
1,031,434	20.84	1.14E-04	7.01
1,032,932	21.01	1.34E-04	7.02

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบแบบควบคุม  $\Delta K$  ด้วยโปรแกรม GLUON ที่  $R$  เท่ากับ 0.1 และ  $\Delta K$  เท่ากับ 10 MPa $\sqrt{m}$

N (cycle)	$a$ (mm)	$da/dN$ (mm/cycle)	$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,033,242	21.08	2.82E-04	10.04
1,033,843	21.26	2.87E-04	10.05
1,034,442	21.42	2.68E-04	10.04
1,035,042	21.58	2.58E-04	10.04
1,035,640	21.73	2.48E-04	10.03
1,036,243	21.88	2.61E-04	10.04
1,036,843	22.05	2.59E-04	10.05
1,037,440	22.19	2.32E-04	10.05
1,038,044	22.33	2.33E-04	10.05
1,038,644	22.47	2.49E-04	10.04
1,039,242	22.62	2.40E-04	10.05
1,039,841	22.76	2.31E-04	10.04
1,040,439	22.90	2.48E-04	10.04
1,041,042	23.06	2.47E-04	10.04
1,041,349	23.13	2.40E-04	10.03
1,041,950	23.27	2.52E-04	10.04
1,042,550	23.43	2.54E-04	10.03
1,043,153	23.58	2.55E-04	10.05
1,043,751	23.73	2.59E-04	10.04
1,044,352	23.89	2.58E-04	10.06
1,044,951	24.04	2.62E-04	10.05
1,045,551	24.20	2.52E-04	10.06
1,046,151	24.35	2.54E-04	10.04
1,046,751	24.51	2.66E-04	10.06
1,047,352	24.67	2.57E-04	10.04

## ภาคผนวก ง

การคำนวณจำนวนจุดการสุ่มสัญญาณ *CMOD* ของคลื่นรูปไซน์

เนื่องจากคลิปเกจและ การขยายสัญญาณของสเตรนมิเตอร์มีขีดจำกัดในการจำแนกสัญญาณ *CMOD* ดังนั้นการกำหนดจำนวนจุดการสุ่มสัญญาณที่มาก หรือ น้อยเกินไปจะทำให้สัญญาณดังกล่าวไม่มีคุณภาพเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์หาความยาวรอยร้าวได้

อย่างไรก็ดีภาคผนวกนี้แสดงการคำนวณหาจำนวนจุดการสุ่มข้อมูลสูงสุดของสัญญาณ *CMOD* วิธีการคำนวณแสดงได้ดังนี้

- 1) คำนวณหาขีดจำกัดความจำแนกชัดของสัญญาณ *CMOD* จากสมการ

$$\Delta_{samp} = \frac{range}{(resolution)^{12} - 1} \quad (ง.1)$$

โดยที่	$\Delta_{samp}$	คือ	ขีดจำกัดความจำแนกชัดของการวัด
	$range$	คือ	พิสัยการวัดสัญญาณ <i>CMOD</i> $\pm 0.5$ mV
	$resolution$	คือ	ความจำแนกชัดของ DAQ การ์ด 12 bit

$$\Delta_{samp} = 0.024 \text{ mV}$$

- 2) คำนวณผลต่างระหว่างจุดของสัญญาณ *CMOD* ที่จุดต่ำสุดของรูปคลื่น ดังรูปที่ ง.1 จากสมการ

$$y = A \sin(2\pi f \Delta t) \quad (ง.2)$$

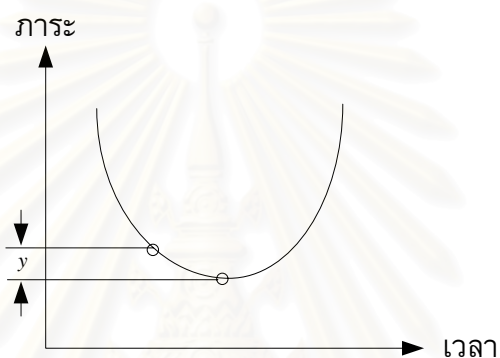
โดยที่	$y$	คือ	ผลต่างระหว่างจุดของสัญญาณที่จุดต่ำสุดของรูปคลื่น
	$A$	คือ	แอมพลิจูดภาวะ 1 mV
	$f$	คือ	ความถี่ภาวะ 10 เฮิรท์
	$\Delta t$	คือ	เวลา (มิลลิวินาที)

- 3) เนื่องจากผลต่างระหว่างจุดข้อมูลต้องมากกว่าหรือเท่ากับขีดจำกัดความจำแนกชัดของการวัด ดังนั้นจึงแทนค่า  $\Delta_{samp}$  ลงใน  $y$  ในสมการที่ (ง.2) จะได้ค่า  $\Delta t$  เท่ากับ  $2.18 \times 10^{-4}$

4) คำนวณจำนวนจุดของการสุ่มข้อมูลจากแทนค่า  $\Delta t$  ลงในสมการที่ (ง.3) จะได้ค่าจำนวนจุดเท่ากับ 77 จุดในหนึ่งคาบภาวะ

$$N = \frac{T}{\Delta t} \quad (\text{ง.3})$$

โดยที่	$T$	คือ	คาบ (มิลลิวินาที)
	$N$	คือ	จำนวนจุด
	$\Delta t$	คือ	เวลา (มิลลิวินาที)



รูปที่ ง.1 ผลต่างระหว่างจุดของสัญญาณที่จุดต่ำสุดของรูปคลื่นไซน์

## ภาคผนวก จ

## ผลการสอบเทียบคลิปเกจ

ตาราง จ.1 ผลการสอบเทียบคลิปเกจ (การสอบเทียบสถิติ)

ระยะเคลื่อนตัว (มม.)	ความต่างศักย์ที่อ่านได้จากโปรแกรม LabVIEW (โวลต์)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
0.5	-0.0698	-0.0669	-0.0664	-0.0664	-0.0662
1.0	-0.1431	-0.1414	-0.1411	-0.1406	-0.1411
1.5	-0.2170	-0.2158	-0.2156	-0.2156	-0.2156
2.0	-0.2908	-0.2905	-0.2900	-0.2900	-0.2903
2.5	-0.3655	-0.3652	-0.3650	-0.3647	-0.3647
3.0	-0.4399	-0.4399	-0.4399	-0.4395	-0.4397
3.0	-0.4399	-0.4399	-0.4399	-0.4397	-0.4397
2.5	-0.3643	-0.3643	-0.3638	-0.3638	-0.3638
2.0	-0.2891	-0.2891	-0.2893	-0.2891	-0.2891
1.5	-0.2146	-0.2146	-0.2146	-0.2144	-0.2146
1.0	-0.1409	-0.1404	-0.1401	-0.1404	-0.1406
0.5	-0.0669	-0.0667	-0.0664	-0.0664	-0.0664

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฉ

## การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุตัวแปร (multiple linear regression)

การสร้างสมการอัตราดอกเบี้ยโตของรอยรั่วให้อยู่ในรูปของสมการ Walker ทำได้จากการแทนค่า  $\log$  ทั้งสองด้านของสมการ Walker ในสมการที่ (ฉ.1) จะได้เป็นสมการที่ (ฉ.12)

$$\frac{da}{dN} = \left[ \frac{C_1}{(1-R)^k} \right] \Delta K^m \quad (\text{ฉ.1})$$

$$\log \frac{da}{dN} = m \log \Delta K - k \log(1-R) + m \log \Delta K \quad (\text{ฉ.2})$$

จากนั้นแทนค่าตัวแปรเหล่านี้เพื่อความสะดวกต่อการคำนวณ

$$y = \log \frac{da}{dN} \quad (\text{ฉ.3})$$

$$m_1 = m \quad (\text{ฉ.4})$$

$$x_1 = \log \Delta K \quad (\text{ฉ.5})$$

$$m_2 = k \quad (\text{ฉ.6})$$

$$x_2 = \log(1-R) \quad (\text{ฉ.7})$$

$$C = \log C_1 \quad (\text{ฉ.8})$$

ต่อมาแทนค่า  $\frac{da}{dN}$  และ  $\Delta K$  ที่ได้จากการทดสอบทุกอัตราส่วนภาระลงในสมการที่ (ฉ.3) ถึง

(ฉ.8) ทุกข้อมูล แล้วหาผลบวกของตัวแปรดังกล่าวแล้วแทนค่าในสมการเมตริกซ์ที่ (ฉ.9)

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1 x_2 \\ \sum x_2 & \sum x_1 x_2 & \sum x_2^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum x_1 y \\ \sum x_2 y \end{bmatrix} \quad (\text{ฉ.9})$$

จากนั้นแก้สมการหาค่าคงที่  $C$ ,  $m_1$  และ  $m_2$  แล้วแทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (ฉ.4) (ฉ.6) (ฉ.8) เพื่อคำนวณค่า  $C$ ,  $m$  และ  $k$  แล้วแทนค่ากลับลงไปในสมการ (ฉ.1)

## ภาคผนวก ข

## การคำนวณคอมพลายแอนซ์ด้วยวิธีถดถอยกำลังสองน้อยสุด

เริ่มจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของภาระ และ  $CMOD$  จากนั้นแทนข้อมูลดังกล่าวลงในสมการ (ข.1) เพื่อหาค่า  $\beta_1$  จากนั้นหาค่า  $\beta_0$  จากสมการ (ข.2) แล้วนำค่าคงที่ทั้งสองค่าแทนลงในสมการ ข.3 จะได้สมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.7 ความชันของสมการเส้นตรงนี้ก็คือค่าคอมพลายแอนซ์

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \quad (\text{ข.1})$$

$$\beta_0 = \bar{y}_n - \beta_1 \bar{x}_n \quad (\text{ข.2})$$

$$CMOD = \beta_0 + \beta_1 Load \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_1$	คือ	ค่าคงที่
$x_i$	คือ	ข้อมูลภาระ
$\bar{x}_n$	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลภาระ $n$ ตัว
$y_i$	คือ	ข้อมูล $CMOD$
$\bar{y}_n$	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูล $CMOD$ $n$ ตัว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช

## ข้อมูลการทดสอบโซ่

ตารางที่ ช 1 ผลการทดสอบโซ่ ผลการทดสอบแบบควบคุมภาระ  
(อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.04 และความถี่ภาระเท่ากับ 5 เฮิรท์ซ์)

DATA NO.	Cycle No.	Load (ton)		Stroke (mm)	
		Max.	Min.	Max.	Min.
1	9951	0.741	0.035	1.343	0.283
2	19951	0.741	0.032	1.343	0.284
3	29951	0.741	0.032	1.344	0.284
4	39951	0.741	0.032	1.338	0.281
5	49952	0.741	0.032	1.338	0.280
6	59952	0.741	0.035	1.339	0.277
7	69952	0.741	0.035	1.344	0.284
8	79952	0.741	0.035	1.343	0.283
9	89953	0.741	0.032	1.340	0.283
10	99953	0.741	0.035	1.349	0.289
11	109953	0.741	0.035	1.348	0.288
12	119953	0.741	0.035	1.349	0.291
13	129954	0.741	0.035	1.349	0.291
14	139954	0.738	0.035	1.349	0.293
15	149954	0.738	0.035	1.356	0.299
16	159954	0.741	0.035	1.359	0.300
17	169955	0.741	0.035	1.359	0.302
18	179955	0.741	0.035	1.367	0.308
19	189955	0.738	0.035	1.376	0.314
20	199955	0.738	0.035	1.384	0.320
21*	210110	-	-	-	-

\* การทดสอบยุติเนื่องจากโซ่ขาด



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ทรงพล เพิ่มทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 20 กันยายน 2525 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย