

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการติดตามความยาวรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์



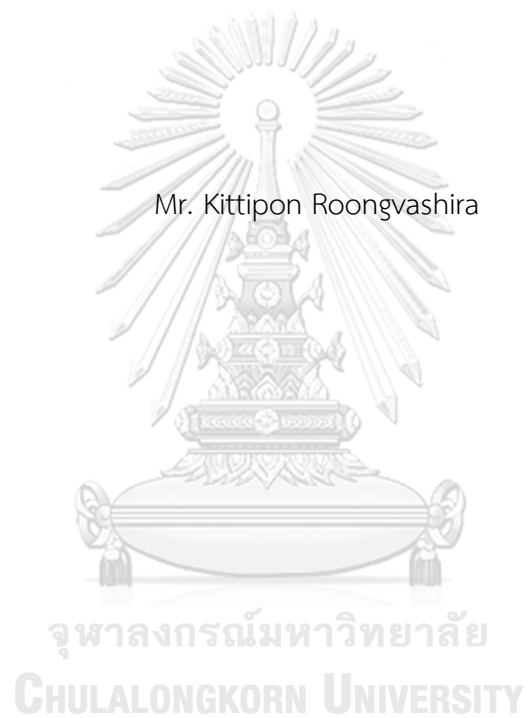
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Uncertainty Analysis of Crack Length Monitoring by Compliance Method

Mr. Kittipon Roongvashira



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

กิตติภณ รุ่งวชิรา : การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการติดตามความยาวรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์ (Uncertainty Analysis of Crack Length Monitoring by Compliance Method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 198 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนการคำนวณความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากคอมพลายแอนซ์ (U_o) (การคำนวณคอมพลายแอนซ์ (C) ใช้วิธีที่มาตรฐาน ASTM E647 แนะนำ) และศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ จากสภาวะทดสอบ 1) รูปร่างคลื่น (Wave shape) 2) ภาระสูงสุด 3) อัตราส่วนภาระ (R ratio) 4) ความยาวรอยร้าว 5) ความถี่ภาระ (Load frequency) 6) Sampling rate 7) จำนวนข้อมูลต่อรอบ (Number of data per cycle) 8) เปอร์เซนต์ของจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระนับจากตำแหน่งภาระสูงสุด (%Unload) 9) จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง 10) นิยามของความยาวรอยร้าวที่วัดจากขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น (a_{s0}) ต่อ U_o นอกจากนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวที่วัดจากขอบหน้ารอยร้าว (a_s) นิยามต่าง ๆ กับความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากคอมพลายแอนซ์ (a)

การนำเสนอขั้นตอนการคำนวณ U_o จะศึกษาขั้นตอนการคำนวณความไม่แน่นอนของปริมาณทั่วไป จากนั้นนำมาประยุกต์กับ a โดยพบว่าการคำนวณ U_o จะต้องมีข้อมูล 3 อย่างคือ ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของปริมาณที่ใช้คำนวณ a (ความกว้างชั้นทดสอบ, a_{s0} และ C) และสมการลดข้อมูล (Data reduction equation) ที่ใช้คำนวณ a จากนั้นนำข้อมูลทั้งสามไปคำนวณ U_o ด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์

การศึกษาคอมพลายแอนซ์ของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_o จะให้ภาระล้าแก่ชั้นทดสอบที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในข้างต้น แล้วเก็บข้อมูล ความเครียดที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชั้นทดสอบ (Back-face strain, BFS), ระยะอ้าปากรอยร้าว (Crack mouth opening displacement, CMOD) และภาระ เพื่อคำนวณ C จากนั้นหาความไม่แน่นอน Type A ของ C จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยข้อมูล และหาความไม่แน่นอน Type B ของ C จากความแม่นยำและความละเอียดของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้วัด BFS, CMOD และภาระ รวมถึงการบิดเบือนความเครียด และคลิบเกจคลาดเคลื่อน สุดท้ายคำนวณ U_o ด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ จากผลการทดสอบพบว่าความไม่แน่นอนหลักซึ่งทำให้เกิด U_o คือ ความไม่แน่นอนจาก a_{s0} และ C การลด %Unload ทำให้ U_o เพิ่มขึ้นมากที่สุด สภาวะทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อมากที่สุดคือ อัตราส่วนภาระ, ความถี่ภาระ เป็นต้น U_o สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้สภาวะทดสอบที่เหมาะสม เช่น ทดสอบที่ %Unload สูง, ความถี่ภาระ ต่ำ หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้วัด a_{s0} ให้มีความแม่นยำและความละเอียดมากขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อนำ U_o ไปคำนวณหาความไม่แน่นอนของอายุการใช้งานที่เหลือ (Remaining life) พบว่าที่ U_o ประมาณ 55 ไมโครเมตร ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของอายุการใช้งานที่เหลือประมาณ 7 % ของค่าที่ทำนายได้

การศึกษาคอมพลายแอนซ์ระหว่าง a_s และ a พบว่า a_s และ a จะสอดคล้องกันมากที่สุดเมื่อ a_{s0} ที่ใช้คำนวณ a กับ a_s ได้จากนิยามเดียวกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770120121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: UNCERTAINTY / CRACK LENGTH / COMPLIANCE METHOD / PHYSICAL CRACK LENGTH

KITTIPON ROONGVASHIRA: Uncertainty Analysis of Crack Length Monitoring by Compliance Method. ADVISOR: ASST. PROF. JIRAPONG KASIVITAMNUAY, Ph.D., 198 pp.

This thesis proposes the procedure for calculating the uncertainty of crack length calculated from the compliance (U_a). (Calculated compliance (C) using the recommended method from ASTM E647), and studying the effect of various factors on test conditions 1)Wave shape 2)Maximum Load 3)Load Ratio 4)Crack Length 5)Load Frequency 6)Sampling Rate 7)Number of Data Per Cycle 8)Percentage data from unloading period from the maximum load position (%*Unload*) 9)Number of continuous cycles 10)Definition of crack length measured from the initial crack front (a_{s0}) to Ua Also, compare the consistency between the crack lengths from crack front (a_s) and crack length calculated from the compliance (a).

The proposed procedure for calculating the U_a is to investigate the process of calculating the uncertainty of the general quantity. The calculation of U_a must be known three factors: average and uncertainty of the quantity used to calculate a (specimen width, a_{s0} , and C) and crack length calculated data reduction equation, then the three data were used to calculate U_a .

Study the effect of various factors on U_a will apply fatigue load to the test specimen at various test conditions mentioned above. Back-face strain (BFS), Crack-mouth opening displacement (CMOD), and load to calculate C were then collected. Then, determine Type A Uncertainty of C from the standard deviation of mean and determine the Type B uncertainty of C from the accuracy and resolution of all equipment used to measure *BFS*, *CMOD* and load including strain gauge and clip gages mispositioning. Finally, calculate the U_a by Taylor series method. From the test data, found the main uncertainties that caused U_a was the uncertainty of the a_{s0} and C . By reducing %*Unload*, the U_a significantly increased. The secondary factor that effects on U_a are *R* ratio, load frequency, etc. U_a can be reduced by using appropriate test conditions, such as high %*Unload*, low loading frequency or change a_{s0} measuring tools, which have more accuracy and resolution, etc. In addition, when taken U_a to calculate the uncertainty of the remaining life. It was found that the U_a was about 55 micrometer, resulting in the uncertainty of the remaining life of about 7% of the predicted value.

A consistency study between a_s and a show that a_s and a are most consistent when a_{s0} that use for calculating a and a_s has the same definition.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ทั้งทุนทรัพย์, ความรู้ด้านวิศวกรรม, สอนวิธีการคิดวิเคราะห์, การเขียนและสื่อสารอย่างเป็นระบบ, อุปนิสัยและทัศนคติที่ดีในการทำงาน รวมถึงบอกเล่าประสบการณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในประกอบอาชีพวิศวกรของผู้วิจัยในอนาคต

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. ขาวสวน กาญจโนมัย ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยอบรมสั่งสอน, ดูแล และให้กำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบคุณนางสาวพงษ์ทิพย์ ช่างพานิช ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ไปได้



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฐ
สารบัญตาราง.....	ต
รายการสัญลักษณ์.....	ฝ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขต	6
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยย่อ	6
บทที่ 2 ทบทวนผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 วิธีติดตามรอยร้าวด้วยคอมเพลกซ์.....	8
2.2 วิธีวัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก.....	11
2.2.1 วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง	11
2.2.2 วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง	12
2.2.3 วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง	12
2.2.4 วิธีพื้นที่สมมูล	13
2.3 ความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณกายภาพ	13
2.3.1 ความหมาย.....	13
2.3.2 ความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้โดยตรง	14

2.3.3 ความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์	16
2.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน	20
2.4.1 แรงเสียดทานที่ตำแหน่งจับยึดขึ้นทดสอบ	20
2.4.2 สัญญาณรบกวน	20
2.4.3 ความต่างเฟสของสัญญาณและตำแหน่งเก็บข้อมูลบนสัญญาณ	22
2.4.4 จำนวนข้อมูลต่อรอบ	24
2.4.5 ตำแหน่งติดคลิปเกจ	25
2.4.6 ตำแหน่งและแนววางตัวของเกจความเครียด	25
2.4.7 ความแม่นยำของ ADC	27
บทที่ 3 การดำเนินงาน	29
3.1 แนวทางการดำเนินงาน	29
3.2 การเตรียมขึ้นทดสอบ	30
3.2.1 อุปกรณ์วัดขนาด	31
3.2.2 การขึ้นรูป	32
3.2.3 การวัดขนาด	33
3.2.4 การติดตั้งและวัดตำแหน่งเกจความเครียด	34
3.3 การทดสอบ	36
3.3.1 ระบบทดสอบ	36
3.3.2 ปัจจัยที่ศึกษา	42
3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ	44
3.3.4 รายละเอียดการเก็บข้อมูล	45
3.3.5 เหตุผลประกอบการกำหนดสภาวะทดสอบ	47
3.4 การวัดความยาวรอยร้าวกายภาพ	54

3.5 การคำนวณคอมพลายแอนซ์.....	55
3.6 การคำนวณความยาวรอยร้าว.....	56
3.7 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน.....	57
3.7.1 ความไม่แน่นอนของความกว้างชั้นทดสอบ.....	58
3.7.1.1 Type A.....	58
3.7.1.2 Type B.....	59
3.7.2 ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น.....	60
3.7.2.1 Type A.....	61
3.7.2.2 Type B.....	62
3.7.3 ความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์.....	63
3.7.3.1 Type A.....	63
3.7.3.2 Type B.....	64
3.7.4 วิธีคำนวณความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์.....	72
บทที่ 4 ความยาวรอยร้าวกายภาพ.....	74
4.1 ผลการวัดความยาวรอยร้าวกายภาพ.....	74
4.2 วิเคราะห์ความสอดคล้อง.....	81
บทที่ 5 ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว.....	90
5.1 แนวทางการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน.....	90
5.2 ผลของปัจจัยในหมวดสภาวะทดสอบ.....	92
5.2.1 ผลของความยาวรอยร้าวต่อ U_a	92
5.2.2 ผลของความถี่การระต่อ U_a	93
5.2.3 ผลของภาระสูงสุดต่อ U_a	93
5.2.4 ผลของอัตราส่วนการระต่อ U_a	93

5.2.5 ผลของ Sampling rate ต่อ U_a	94
5.2.6 ผลของรูปร่างคลื่นต่อ U_a	94
5.3 ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล.....	95
5.3.1 ผลของ %Unload ต่อ U_a	95
5.3.2 ผลของจำนวนข้อมูลต่อรอบต่อ U_a	96
5.3.3 ผลของจำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องต่อ U_a	97
5.4 ผลของนิยามความยาวรอยร้าวเริ่มต้น.....	98
5.5 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่ทำให้เกิด U_a	99
5.5.1 กรณี U_a มีค่าใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$	99
5.5.2 กรณี U_a มีค่ามากกว่า U_a by $a_{s0,3p}$	100
5.6 ผลของ U_a ต่อการทำนายอายุการใช้งานที่เหลือ.....	102
บทที่ 6 สรุปผล.....	107
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก การสอบเทียบเครื่องมือวัด.....	113
ก.1 สอบเทียบกล้องขยายดิจิทัล.....	113
ก.2 สอบเทียบไดอัลเกจ.....	114
ก.3 สอบเทียบคลิปเกจ.....	116
ก.4 สอบเทียบโพลดเซลล์.....	117
ก.5 สอบเทียบ ADC.....	118
ภาคผนวก ข การใช้ค่าคงที่ k ในการคำนวณความยาวรอยร้าว.....	120
ภาคผนวก ค ความไม่แน่นอนเนื่องจากอุปกรณ์วัดการเสีย.....	121
ค.1 เกจความเครียด.....	121

ค.2 คลิปเกจ	124
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบ	126
ง.1 ความยาวรอยร้าวกายภาพนิยามต่าง ๆ	126
ง.2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของความกว้างชั้นทดสอบ	134
ง.3 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น	134
ง.4 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์	136
ง.4.1 หมวดการทดสอบ	136
ง.4.2 หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล	147
ง.5 ข้อมูลความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว	156
ง.5.1 หมวดสภาวะทดสอบ.....	156
ง.5.1.1 ชั้นทดสอบ A1.....	156
ง.5.1.2 ชั้นทดสอบ A2.....	159
ง.5.1.3 ชั้นทดสอบ A3.....	161
ง.5.1.4 ชั้นทดสอบ A4.....	164
ง.5.1.5 ชั้นทดสอบ A5.....	166
ง.5.1.6 ชั้นทดสอบ A6.....	168
ง.5.1.7 ชั้นทดสอบ A7.....	170
ง.5.1.8 ชั้นทดสอบ A8.....	172
ง.5.1.9 ชั้นทดสอบ A9.....	174
ง.5.1.10 ชั้นทดสอบ A10	177
ง.5.2 หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล	179
ง.5.2.1 ชั้นทดสอบ A1.....	179
ง.5.2.2 ชั้นทดสอบ A2.....	184

ง.5.2.3 ชั้นทดสอบ A9.....	190
ง.5.3 ผลของนิยามความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น	195
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	198



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 รูปทรงของชั้นทดสอบแบบ C(T) และตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียดและคลิปเกจ	2
รูปที่ 1.2 การพล็อตข้อมูลภาระและ <i>BFS</i> เพื่อคำนวณ <i>C</i>	2
รูปที่ 1.3 การติดตั้งเกจความเครียดคลาดเคลื่อนและลักษณะการกระจายของความเครียดบนผิว ด้านหลังชั้นทดสอบ.....	5
รูปที่ 1.4 ลักษณะของขอบหน้ารอยร้าว.....	6
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งเก็บข้อมูลการเสียรูป	9
รูปที่ 2.2 การหาคอมพลายแอนซ์	9
รูปที่ 2.3 การวัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก	11
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง	12
รูปที่ 2.5 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง	12
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง	12
รูปที่ 2.7 พื้นที่รอยร้าวสำหรับคำนวณความยาวรอยร้าวกายภาพด้วยวิธีพื้นที่สมมูล	13
รูปที่ 2.8 ความหมายของความไม่แน่นอนในเชิงกราฟิก.....	14
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน	17
รูปที่ 2.10 แผนผังวิธีคำนวณความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล	19
รูปที่ 2.11 แบบจำลองข้อมูลภาระและ <i>CMOD</i>	21
รูปที่ 2.12 ผลของสัญญาณรบกวน และจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ ต่อ ความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว	22
รูปที่ 2.13 ผลของความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวต่อ U_a	22
รูปที่ 2.14 ผลของความต่างเฟสของสัญญาณต่อความคลาดเคลื่อนของ <i>C</i>	23
รูปที่ 2.15 การปรับตำแหน่งสัญญาณเพื่อลดความต่างเฟส.....	23
รูปที่ 2.16 ช่วงที่สามารถเก็บข้อมูลสูงสุดได้.....	24
รูปที่ 2.17 กรณีที่เกิดความต่างเฟสมากที่สุด	24

รูปที่ 2.18 ผลของจำนวนข้อมูลที่ใช้คำนวณ C และจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วง ปลดภาระต่อความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว.....	25
รูปที่ 2.19 ผลของตำแหน่งติดตั้งคลิปเกจต่อความคลาดเคลื่อนของ a	25
รูปที่ 2.20 ตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียดและลักษณะของความเครียดบนผิวด้านหลังชิ้น ทดสอบ.....	26
รูปที่ 2.21 แนววางตัวของเกจความเครียด	26
รูปที่ 2.22 ความผิดพลาดออฟเซตและความผิดพลาดของการขยาย	27
รูปที่ 2.23 ผลของความผิดพลาดออฟเซตต่อการคำนวณคอมพลายแอนซ์	27
รูปที่ 2.24 ผลของความผิดพลาดของการขยายต่อการคำนวณ C	28
รูปที่ 3.1 ปริมาณที่ต้องวัดและลำดับการคำนวณเพื่อหาความยาวรอยร้าว	30
รูปที่ 3.2 ทดสอบแบบ C(T)	30
รูปที่ 3.3 กล้องขยายดิจิทัล	31
รูปที่ 3.4 การวางตัวของชิ้นทดสอบเทียบกับแนวการรีดของแผ่นเหล็ก.....	32
รูปที่ 3.5 ขนาดของชิ้นทดสอบ (หน่วยเป็น mm).....	32
รูปที่ 3.6 สติกเกอร์สำหรับระบุความยาวรอยร้าวที่ผิวด้านข้างชิ้นทดสอบ	33
รูปที่ 3.7 การวัด y และ d ด้วยกล้องขยายดิจิทัล	33
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเกจความเครียด.....	34
รูปที่ 3.9 ระยะที่ใช้วัดเพื่อหาระยะที่ติดตั้งเกจความเครียดคลาดเคลื่อน	35
รูปที่ 3.10 การวัดระยะ f_1 และ f_2	35
รูปที่ 3.11 การวัดมุมที่ติดตั้งเกจความเครียดคลาดเคลื่อนไปจากแนวที่ต้องการวัด	36
รูปที่ 3.12 ระบบทดสอบอัตรากาเรเดียมโตของรอยร้าวล้ำ.....	37
รูปที่ 3.13 แผนภาพการทำงานของระบบทดสอบ.....	38
รูปที่ 3.14 วิธีจับยึดชิ้นทดสอบและให้ภาระ	40
รูปที่ 3.15 การจัด Alignment การให้ภาระ.....	40

รูปที่ 3.16 อินเทอร์เฟซของซอฟต์แวร์ LabView.....	41
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการทดสอบ และความเกี่ยวข้องกับตำแหน่งขอบหน้ารอยร้าวที่จะสร้างขึ้น..	44
รูปที่ 3.18 การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวอื่น ๆ.....	45
รูปที่ 3.19 ส่วนประกอบของการเก็บข้อมูล	46
รูปที่ 3.20 การนับจำนวนรอบที่ความยาวรอยร้าวเปลี่ยนแปลง.....	46
รูปที่ 3.21 การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น.....	47
รูปที่ 3.22 การตัดทอนจำนวนข้อต่อรอบ	49
รูปที่ 3.23 การตัดข้อมูลช่วงปลดภาระ	50
รูปที่ 3.24 การวัดระยะ s	54
รูปที่ 3.25 การแบ่งข้อมูลดิบ	55
รูปที่ 3.26 การเลือกข้อมูลช่วงปลดภาระในแต่ละรอบ	56
รูปที่ 3.27 การหาค่า C ในแต่ละรอบ.....	56
รูปที่ 3.28 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{w,A}$	59
รูปที่ 3.29 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{as0,A}$	62
รูปที่ 3.30 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{C,A}$	64
รูปที่ 3.31 การหาค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบช่วงปลดภาระ	65
รูปที่ 3.32 ผลของการนับเวลาไม่เท่ากันของอุปกรณ์ให้ภาระและเก็บข้อมูล	66
รูปที่ 3.33 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความละเอียด	67
รูปที่ 3.34 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความแม่นยำ	68
รูปที่ 3.35 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนของการติด อุปกรณ์	69
รูปที่ 3.36 แผนผังวิธีคำนวณ $U_{C/CO,B}$ กรณี C_{BFS} ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล.....	71
รูปที่ 3.37 การสุ่มค่า $CMOD_0$ และ $CMOD$ เพื่อคำนวณ $U_{C/CO,B}$ กรณี C_{CMOD} ด้วยวิธีมอนติ คาร์ โล	72

รูปที่ 4.1 ตำแหน่งวัตรระยะ s วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง	74
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งวัตรระยะ s วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง	75
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งวัตรระยะ s วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง	75
รูปที่ 4.4 ผลต่างของ a_s ภาพนิยามต่าง ๆ เทียบกับ $a_{s,9p}$ ของขึ้นทดสอบ A1	81
รูปที่ 4.5 เงื่อนไขการเปรียบเทียบ a_s กับ a	82
รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบ a_s และ a จากวิธี C_{BFS}	88
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบ a_s และ a จากวิธี C_{CMOD}	89
รูปที่ 5.1 ผลของความยาวรอยร้าว และ f ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1, 5, 10, 20$ Hz, $R = 0.1$ และ $SR = 10$ kS/s	92
รูปที่ 5.2 ผลของภาระสูงสุดต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A3, A7 ที่สภาวะทดสอบภาระสูงสุด = 9 และ 13 kN, $R = 0.7$, $f = 20$ Hz	93
รูปที่ 5.3 ผลของอัตราส่วนภาระต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A5, A8 ที่สภาวะทดสอบ $R = 0.1, 0.3, 0.5$ และ 0.7 , $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s	94
รูปที่ 5.4 ผลของ Sampling rate ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A3 ที่สภาวะทดสอบ $SR = 1, 5$ และ 10 kS/s, $f = 1$ Hz, $R = 0.7$	94
รูปที่ 5.5 ผลของรูปร่างคลื่นต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A1 และ A9 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 10$ kS/s, $R = 0.1$	95
รูปที่ 5.6 ผลของ %Unload ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A2 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น ไชน์, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 250$ ข้อมูล, Con. = 10 รอบ	96
รูปที่ 5.7 ผลของ %Unload ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A9 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตร, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 10000$ ข้อมูล, Con. = 10 รอบ	96
รูปที่ 5.8 ผลของ DC ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A9 สภาวะทดสอบ $DC = 10000, 1000, 250, 100$ ข้อมูล, %Unload 60 %, Con. 10 รอบ	97
รูปที่ 5.9 ผลของ Con. ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขึ้นทดสอบ A1 สภาวะทดสอบ Con. = 10, 50, 100 รอบ, %Unload = 60 %, $DC = 250$ ข้อมูล	97

รูปที่ 5.10 ผลของ <i>Con.</i> ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A9 สภาวะทดสอบ <i>Con.</i> = 10, 50, 100 รอบ, % <i>Unload</i> = 100 %, <i>DC</i> = 10000 ข้อมูล	98
รูปที่ 5.11 ผลของนิยาม a_{s0} ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A1	98
รูปที่ 5.12 แผนผัง วิธีมอนติ คาร์โล สำหรับหา U_m และ U_{Cp}	103
รูปที่ 5.13 แผนผัง วิธีมอนติ คาร์โล สำหรับหา ต่อ U_{RL}	106
รูปที่ ก.1 การสอบเทียบกล้องขยายดิจิทัล	113
รูปที่ ก.2 การสอบเทียบไดอัลเกจ	115
รูปที่ ก.3 อุปกรณ์สอบเทียบคลิปเกจและการตั้งระยะเริ่มต้นของคลิปเกจ	116
รูปที่ ก.4 การปรับระยะของคลิปเกจและกรอกข้อมูลให้ชุดควบคุมเพื่อสอบเทียบคลิปเกจ	116
รูปที่ ก.5 เอกสารยืนยันการสอบเทียบโหลดเซลล์.....	117
รูปที่ ก.6 เอกสารยืนยันการสอบเทียบ NI 9215	118
รูปที่ ก.7 เอกสารยืนยันการสอบเทียบ NI 9235	119
รูปที่ ค.1 แบบจำลอง 3 มิติของชั้นทดสอบแบบ C(T)	122
รูปที่ ค.2 กราฟอัตราส่วน <i>BFS</i> ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแกน <i>x</i> กับ <i>BFS</i> อุณหภูมิ ที่ <i>x</i> และ a/W ค่าต่าง ๆ	122
รูปที่ ค.3 ผลของความยาวเกจความเครียดต่อ <i>BFS</i> ที่วัดได้.....	123
รูปที่ ค.4 ตำแหน่งติดคลิปเกจ.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	สรุปเนื้อหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ทำให้เกิด U_a	3
ตารางที่ 2.1	ความไม่แน่นอนมาตรฐานของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน	15
ตารางที่ 3.1	จำเพาะของอุปกรณ์วัดขนาด	31
ตารางที่ 3.2	อุปกรณ์ในระบบทดสอบ	39
ตารางที่ 3.3	ปัจจัยที่ศึกษา.....	42
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขทดสอบ	42
ตารางที่ 3.5	ข้อมูลความยาวรอยร้าวสูงสุดและระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ	48
ตารางที่ 3.6	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A1, A2 (ภาวะรูปไซน์, ภาวะสูงสุด 9 kN).....	51
ตารางที่ 3.7	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A3, A4 (ภาวะรูปไซน์, ภาวะสูงสุด 9 kN).....	51
ตารางที่ 3.8	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A5, A6 (ภาวะรูปไซน์, ภาวะสูงสุด 13 kN)	52
ตารางที่ 3.9	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A7, A8 (ภาวะรูปไซน์, ภาวะสูงสุด 13 kN).....	52
ตารางที่ 3.10	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A9 (ภาวะรูปสามเหลี่ยมสมมาตร, ภาวะสูงสุด 9 kN).....	53
ตารางที่ 3.11	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของชั้นทดสอบ A10 (ภาวะรูปสามเหลี่ยมสมมาตร, ภาวะสูงสุด 13 kN)	53
ตารางที่ 3.12	ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของอุปกรณ์วัด L และ y	60
ตารางที่ 3.13	ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของอุปกรณ์วัด a_{s0}	63
ตารางที่ 3.14	ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B.....	66
ตารางที่ 3.15	ความหมายของความไม่แน่นอนของแต่ละตัวแปรในรูป 3.36	70
ตารางที่ 4.1	ความยาวรอยร้าวกายภาพของชั้นทดสอบ A1	76

ตารางที่ 4.2 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A2	76
ตารางที่ 4.3 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A3	77
ตารางที่ 4.4 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A4	77
ตารางที่ 4.5 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A5	78
ตารางที่ 4.6 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A6	78
ตารางที่ 4.7 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A7	79
ตารางที่ 4.8 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A8	79
ตารางที่ 4.9 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A9	80
ตารางที่ 4.10 ความยาวรอยร้าวกายภาพของขึ้นทดสอบ A10.....	80
ตารางที่ 4.11 ขึ้นทดสอบ A1 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	82
ตารางที่ 4.12 ขึ้นทดสอบ A2 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	83
ตารางที่ 4.13 ขึ้นทดสอบ A3 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	83
ตารางที่ 4.14 ขึ้นทดสอบ A4 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	84
ตารางที่ 4.15 ขึ้นทดสอบ A5 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด	84
ตารางที่ 4.16 ขึ้นทดสอบ A6 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่าง คลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด	85

ตารางที่ 4.17	ขึ้นทดสอบ A7 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด	85
ตารางที่ 4.18	ขึ้นทดสอบ A8 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด	86
ตารางที่ 4.19	ขึ้นทดสอบ A9 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสามมาตร, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	86
ตารางที่ 4.20	ขึ้นทดสอบ A10 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสามมาตร, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด.....	87
ตารางที่ 5.1	ปัจจัยและขอบเขตที่ศึกษา.....	90
ตารางที่ 5.2	เงื่อนไขที่ใช้ศึกษาผลของปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบ, การวิเคราะห์ข้อมูล และนิยามของ a_{s0}	91
ตารางที่ 5.3	สรุปผลของปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบต่อ U_a	95
ตารางที่ 5.4	สรุปผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูลต่อ U_a	98
ตารางที่ 5.5	$U_{a,BFS}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของขึ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz , $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$	100
ตารางที่ 5.6	$U_{a,CMOD}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของขึ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz , $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$	100
ตารางที่ 5.7	$U_{a,BFS}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของขึ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 20$ Hz , $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$	101
ตารางที่ 5.8	$U_{a,CMOD}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของขึ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 20$ Hz , $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$	101
ตารางที่ 5.9	ข้อมูล a , ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C สำหรับหา U_m และ U_{C_p} ด้วยวิธีมอนติคาร์โล	104

ตารางที่ 5.10 ข้อมูล W, B, a_{s0} และ ΔP สำหรับหา U_m และ U_{c_p} ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล.....	104
ตารางที่ 5.11 RL และ U_{RL} ซึ่งทำนายจากสมการ (5.7) และ (5.8).....	105
ตารางที่ ก.1 ผลการวัดเกจบล็อกที่กำลังขยาย 20 และ 30 เท่า (ค่าในตารางมีหน่วยเป็น mm).....	114
ตารางที่ ก.2 ผลการวัดเกจบล็อกขนาด 18 และ 20 mm ด้วยไดอัลเกจ (ค่าในตารางมีหน่วยเป็น mm).....	115
ตารางที่ ข.1 W, a_{s0}, C_0 และ C จากชั้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $R = 0.1, f = 1 \text{ Hz}, SR = 10 \text{ kS/s}, DC = 10000$ ข้อมูล, %Unload = 100 %, Con. = 10 รอบ, a_{s0} นิยามเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง.....	120
ตารางที่ ข.2 a_{BFS} และ a_{CMOD} จากวิธีปรับค่า E_{eff} และ k	120
ตารางที่ ค.1 x_0/W ที่ a/W ต่าง ๆ.....	125
ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนของ $CMOD$ ที่ตำแหน่ง y ต่าง ๆ เทียบกับ $CMOD$ ที่ตำแหน่งอุดมคติ.....	125
ตารางที่ ง.1 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $a_{s,2p}$...	126
ตารางที่ ง.2 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $a_{s,3p}$...	127
ตารางที่ ง.3 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $a_{s,9p}$...	128
ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $a_{s,area}$...	130
ตารางที่ ง.5 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ W จากแต่ละชั้นทดสอบ.....	134
ตารางที่ ง.6 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,2p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ.....	135
ตารางที่ ง.7 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,3p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ.....	135
ตารางที่ ง.8 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,9p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ.....	135
ตารางที่ ง.9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,area}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ.....	136
ตารางที่ ง.10 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ.....	136
ตารางที่ ง.11 ชั้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ.....	138

ตารางที่ ง.25	ชั้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล	154
ตารางที่ ง.26	ชั้นทดสอบ A1 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	156
ตารางที่ ง.27	ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	157
ตารางที่ ง.28	ชั้นทดสอบ A2 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	159
ตารางที่ ง.29	ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	159
ตารางที่ ง.30	ชั้นทดสอบ A3 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	161
ตารางที่ ง.31	ชั้นทดสอบ A3 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	162
ตารางที่ ง.32	ชั้นทดสอบ A4 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	164
ตารางที่ ง.33	ชั้นทดสอบ A4 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	164
ตารางที่ ง.34	ชั้นทดสอบ A5 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	166
ตารางที่ ง.35	ชั้นทดสอบ A5 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	167
ตารางที่ ง.36	ชั้นทดสอบ A6 U_a by W และ U_a by $as_{0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ	168
ตารางที่ ง.37	ชั้นทดสอบ A6 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{70,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3	169

ตารางที่ ง.38	ชั้นทดสอบ A7 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	170
ตารางที่ ง.39	ชั้นทดสอบ A7 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสถานะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3.....	171
ตารางที่ ง.40	ชั้นทดสอบ A8 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	172
ตารางที่ ง.41	ชั้นทดสอบ A8 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสถานะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3.....	173
ตารางที่ ง.42	ชั้นทดสอบ A9 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	174
ตารางที่ ง.43	ชั้นทดสอบ A9 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสถานะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3.....	175
ตารางที่ ง.44	ชั้นทดสอบ A10 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	177
ตารางที่ ง.45	ชั้นทดสอบ A10 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสถานะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ).....	177
ตารางที่ ง.46	ชั้นทดสอบ A1 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	179
ตารางที่ ง.47	ชั้นทดสอบ A1 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่ เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4....	179
ตารางที่ ง.48	ชั้นทดสอบ A1 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{MOD} ที่ เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4....	182
ตารางที่ ง.49	ชั้นทดสอบ A2 $U_{a by W}$ และ $U_{a by as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย ร้าวต่าง ๆ.....	184
ตารางที่ ง.50	ชั้นทดสอบ A2 $U_{a by C0,A}$, $U_{a by C70,A}$, $U_{a by C/C0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่ เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4....	185

ตารางที่ ง.51 ชั้นทดสอบ A2 $U_{a\ by\ c0,A}$, $U_{a\ by\ c70,A}$, $U_{a\ by\ c/c0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{MOD} ที่
เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4.... 187

ตารางที่ ง.52 ชั้นทดสอบ A9 $U_{a\ by\ W}$ และ $U_{a\ by\ as0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอย
ร้าวต่าง ๆ..... 190

ตารางที่ ง.53 ชั้นทดสอบ A9 $U_{a\ by\ c0,A}$, $U_{a\ by\ c70,A}$, $U_{a\ by\ c/c0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่
เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4.... 190

ตารางที่ ง.54 ชั้นทดสอบ A9 $U_{a\ by\ c0,A}$, $U_{a\ by\ c70,A}$, $U_{a\ by\ c/c0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{MOD} ที่
เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4.... 193

ตารางที่ ง.55 ชั้นทดสอบ A1 U_a ที่เกิดจาก U_w , U_{as0} , U_{c0} , U_c และ U รวม ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษานิยาม a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5 195



รายการสัญลักษณ์

a	ความยาวรอยร้าวจากคอมปลายแอนซ์
a_s	ความยาวรอยร้าวกายภาพ
$a_{s,2p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพวิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง
$a_{s,3p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง
$a_{s,9p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพวิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง
$a_{s,area}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพวิธีพื้นที่สมมูล
a_{s0}	ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น
$a_{s0,2p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้นวิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง
$a_{s0,3p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้นวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง
$a_{s0,9p}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้นวิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง
$a_{s0,area}$	ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้นวิธีพื้นที่สมมูล
B	ความหนาขึ้นทดสอบ
BFS	ความเครียดตามแนวความสูงของขึ้นทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางผิวด้านหลัง
C	คอมปลายแอนซ์ที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ
C_0	คอมปลายแอนซ์ที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
C_{BFS}	คอมปลายแอนซ์ความเครียด
C_{CMOD}	คอมปลายแอนซ์ปากรอยร้าว
$CMOD$	ระยะอ้าปากรอยร้าว
$Con.$	จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง
DC	จำนวนข้อมูลต่อรอบ
da/dN	อัตราการเติบโตรอยร้าว
E	ยังโมดูลัส
E_{eff}	ยังโมดูลัสประสิทธิผล
f	ความถี่ภาระ
GL	ความยาวเกจของเกจความเครียด
K	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น
P	ภาระ
R	อัตราส่วนภาระ

RL	อายุการใช้งานที่เหลือ
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SD_t	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ถูกปรับแก้ด้วยค่า Student-t
SR	Sampling rate
U	ความไม่แน่นอนขยาย
U_a	ความไม่แน่นอนขยายรวมทั้ง Type A และ B ของความยาวรอยร้าวจากคอมพลาเยนซ์
$U_a \text{ by } a_{s0,A}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type A ของความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
$U_a \text{ by } a_{s0,B}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type B ของคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยเริ่มต้น
$U_a \text{ by } C_{,A}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type A ของคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ
$U_a \text{ by } C_{0,A}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type B ของคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยเริ่มต้น
$U_a \text{ by } C/C_{0,B}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type B ของคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ
$U_a \text{ by } W_{,A}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type A ของความกว้างชั้นทดสอบ
$U_a \text{ by } W_{,B}$	U_a ที่เกิดจากความไม่แน่นอน Type B ของความกว้างชั้นทดสอบ
$U_{a_{s0,A}}$	ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
$U_{a_{s0,B}}$	ความไม่แน่นอน Type B ของความยาวรอยร้าวเริ่มต้น
U_C	ความไม่แน่นอนขยายรวมทั้ง Type A และ B ของคอมพลาเยนซ์
$U_{C,A}$	ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ
$U_{C_{0,A}}$	ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยคอมพลาเยนซ์ที่ความยาวรอยเริ่มต้น
$U_{C/C_{0,B}}$	ความไม่แน่นอน Type B ของ C/C_0
$U_{da/dN}$	ความไม่แน่นอนขยายรวมทั้ง Type A และ B ของอัตราการเติบโตรอยร้าว
U_{RL}	ความไม่แน่นอนขยายรวมทั้ง Type A และ B ของอายุใช้งานที่เหลือ
$U_{W,A}$	ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยความกว้างชั้นทดสอบ
$U_{W,B}$	ความไม่แน่นอน Type B ของความกว้างชั้นทดสอบ
u	ความไม่แน่นอนมาตรฐาน
W	ความกว้างชั้นทดสอบ
x	ระยะที่ติดเกจความเครียดห่างจากแนวกึ่งกลางด้านหลังชั้นทดสอบดังรูปที่ 2.21
y	ระยะจากแนวภาระถึงตำแหน่งติดคลิปเกจดังรูปที่ 1.1 (ข)
β	มุมที่ติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อนดังรูปที่ 2.22
$\%Unload$	เปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระนับจากตำแหน่งภาระสูงสุด

บทที่ 1

บทนำ

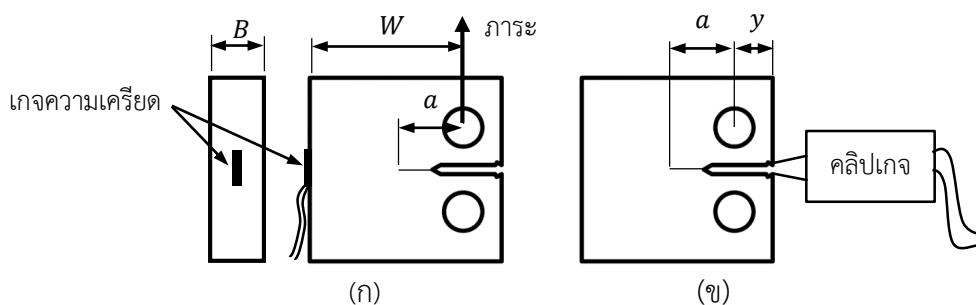
1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัสดุซึ่งรับภาระที่มีขนาดเปลี่ยนแปลง หรือภาระล้าเป็นระยะเวลาานาน แม้ว่าแอมพลิจูดของภาระล้าจะต่ำกว่าความเค้นคราก (Yield stress) หรือความต้านแรงดึงสูงสุด (Tensile stress) ก็มีโอกาที่วัสดุจะเกิดรอยร้าวและรอยร้าวเติบโตได้ รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่ารอยร้าวล้า เมื่อรอยร้าวมีความยาวที่ทำให้ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) มากกว่าความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) หรือทำให้ความเค้นทั้งหน้าตัดมากกว่าความเค้นคราก แล้ววัสดุจะเกิดความเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้อีก การสำรวจโครงสร้างหรือชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่เสียหายพบว่า 50-90% มีสาเหตุจากความล้าหรือมีความล้าร่วมอยู่ด้วย [1] ตัวอย่าง ในปี 1988 ผิด้านนอกเครื่องบิน Aloha flight 243 เกิดรอยร้าวขึ้นเนื่องจากการตอกหมุดย้ำเพื่อประกอบผิวกับโครงของเครื่องบินเข้าด้วยกัน หลังจากที่มีผู้ตั้งกล่าวรับภาระเป็นระยะเวลาานานทำให้รอยร้าวเติบโตจนผิวเครื่องบินฉีกขาดระหว่างการบินส่งผลให้ผู้โดยสารและนักบินได้รับบาดเจ็บ [2] ในปีต่อมา หางเสือของเครื่องบิน Concord G-BOAF เกิดรอยร้าวขึ้นและเติบโตจนหางเสือเสียหาย [2] อุบัติเหตุดังกล่าวทำให้เกิดความสูญเสียไม่ใช่แค่ในเรื่องของทรัพย์สินแต่อาจรวมถึงชีวิตของผู้ที่ทำงานกับอุปกรณ์นั้น ๆ ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุ การตรวจสอบสภาพและการทำนายอายุใช้งานที่เหลือ (Remaining Life, RL) ของอุปกรณ์ที่มีรอยร้าวเพื่อประเมินว่าอุปกรณ์ควรซ่อมแซมหรือใช้งานต่อ จึงถือว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น [3, 4][1-38]

การทำนาย RL ของอุปกรณ์ต้องการข้อมูลอัตราการเติบโตรอยร้าว (Crack growth rate, da/dN) ของวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์ ซึ่งหาได้จากการทดสอบอัตราการเติบโตรอยร้าว การทดสอบจะให้ภาระล้ากับชิ้นทดสอบเพื่อให้รอยร้าวเติบโต ในระหว่างนั้นจะเก็บข้อมูลความยาวรอยร้าว (Crack length) เป็นระยะ ๆ แล้วนำไปคำนวณ da/dN ของวัสดุ วิธีการเก็บข้อมูลความยาวรอยร้าวระหว่างการทดสอบมีหลายวิธี [5] เช่น ใช้กล้องจุลทรรศน์, วัดความต่างศักย์ (Electric potential) และวัดคอมพลายแอนซ์ (Compliance, C) [6-15] วิธีคอมพลายแอนซ์ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความแม่นยำ, ใช้งานง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อยสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิปกติ [14-15] ตำแหน่งที่นิยมวัดคอมพลายแอนซ์มี 2 ตำแหน่งคือ กึ่งกลางด้านหลังชิ้นทดสอบ (Back-face) และปากรอยร้าว (Crack mouth)

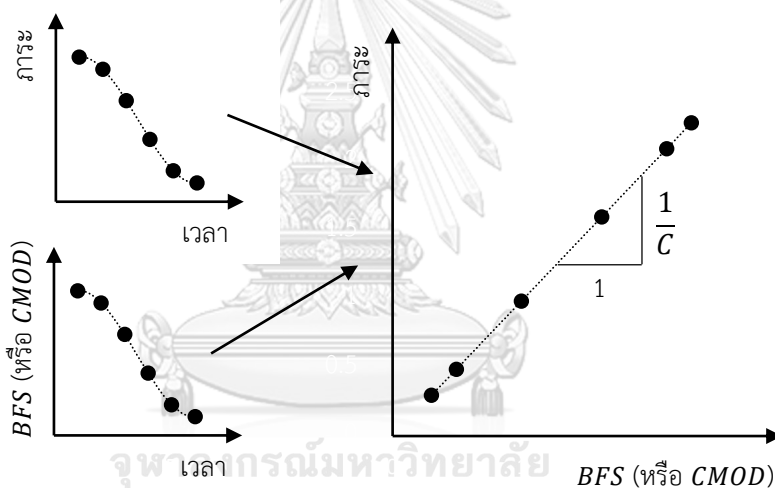
การวัด C ที่ด้านหลังชิ้นทดสอบเรียกอีกอย่างว่า วิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียด (Back-face strain compliance, C_{BFS}) วิธีนี้จะติดเกจความเครียด (Strain gage) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชิ้นทดสอบดังรูปที่ 1.1 (ก) จากนั้นเก็บข้อมูลความเครียดที่ตำแหน่งนี้ (Back face strain, BFS) และภาระที่กระทำ แล้วนำมาพล็อตกราฟโดยให้ภาระเป็นแกนตั้ง และ BFS เป็นแกนนอน ดังรูปที่ 1.2 ส่วนกลับของความชันของกราฟจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) คือ C_{BFS} สูตรท้าย แทน C_{BFS} ในสมการคำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์ (a) ก็จะทราบ a สมการดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของ C , โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E), ความหนา (B) และความกว้าง (W) ของชิ้นทดสอบ

การวัด C ที่ปากรอยร้าวเรียกอีกอย่างว่า วิธีคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว (C_{CMOD}) มีหลักการเหมือนกับวิธีที่แล้ว เพียงแต่วัดระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าว (Crack-mouth opening displacement, $CMOD$) ด้วยคลิปเกจดังรูปที่ 1.1 (ข) โดย y คือ ระยะจากตำแหน่งที่ติดคลิปเกจถึงแนวภาระ สำหรับ $CMOD$ ระยะ y คือ $0.25W$



รูปที่ 1.1 รูปทรงของชิ้นทดสอบแบบ C(T) และตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียดและคลิปเกจ

เนื่องจากการวัดย่อมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) เสมอ ความไม่แน่นอนของปริมาณ W , B , E และ C จึงแผ่ (Propagate) ไปเป็นความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว (U_a) นอกจากนี้ U_a ยังแผ่ไปยัง da/dN [16] และ RL ตามลำดับ โดย RL เป็นข้อมูลหนึ่งในการวางแผนซ่อมบำรุง ซึ่งถ้าทำได้อย่างเหมาะสมก็จะช่วยลดอุบัติเหตุและความสูญเสียลงได้



รูปที่ 1.2 การพล็อตข้อมูลภาระและ BFS เพื่อคำนวณ C

งานวิจัยที่ศึกษา U_a รวบรวมไว้ในตารางที่ 1.1 ตารางนี้สรุปปัจจัยที่ศึกษาพร้อมทั้งรายละเอียดและผลลัพธ์การศึกษา ปัจจัยที่งานวิจัยทั้งหมดศึกษาประกอบด้วย แรงเสียดทาน, สัญญาณรบกวน, ความละเอียดของตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital convertor, ADC), จำนวนข้อมูลที่ใช้คำนวณคอมพลายแอนซ์, ความไม่แน่นอนของตัวปริมาณ B , E และ C , ความไม่แน่นอนของตำแหน่งติดคลิปเกจ และความยาวเกจความเครียด (Gauge length, GL)

ตารางที่ 1.1 สรุปเนื้อหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ทำให้เกิด U_a

ผู้วิจัย	ปัจจัยที่ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	ผลลัพธ์โดยย่อ
Roy Hewitt (1983) [17]	แรงเสียดทานจาก สลักยึดขึ้นทดสอบ	1) ขึ้นทดสอบแบบ C(T) ทำจากอลูมิเนียม ผสม เบอร์ 2024 T351 2) หา a จาก C_{MOD} 3) ยึดขึ้นทดสอบ 2 แบบ คือ สลักปกติ (มี แรงเสียดทาน) และสลักร้อยในตลับ ลูกปืน (แรงเสียดทานน้อย) 4) เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของความ ยาวรอยร้าวของทั้ง 2 เงื่อนไข	แรงเสียดทานมีผลต่อ U_a โดยมี สัดส่วนประมาณ 30 % จากความ ไม่แน่นอนทั้งหมด
	สัญญาณไฟฟ้า รบกวน	1) หาขนาดสัญญาณไฟฟ้ารบกวนของระบบ ทดสอบขณะที่ขึ้นทดสอบไม่ได้รับภาระ 2) ใช้วิธีมอนติ คาร์โล ⁽¹⁾ หา U_c และ U_a	สัญญาณไฟฟ้ารบกวนทำให้เกิด U_a คิดเป็น 78 % ของความไม่ แน่นอนทั้งหมดที่ไม่รวมผลของแรง เสียดทาน
Gordon (1986) [18]	สัญญาณรบกวน	1) ขึ้นทดสอบแบบ C(T) 2) สร้างข้อมูลภาระและ C_{MOD} อุดมคติที่ C เท่ากับ 1	U_c แปรผันตามขนาดสัญญาณ รบกวน ณ ความละเอียดของ ADC ค่าหนึ่ง
	ความละเอียดของ ADC	3) แปรค่าความละเอียดของ ADC จำนวน ข้อมูลและขนาดสัญญาณรบกวน	U_c แปรผกผันกับความละเอียด ของ AD ณ ขนาดสัญญาณรบกวน ค่าหนึ่ง
	จำนวนข้อมูลที่ใช้ คำนวณ C	4) ใช้วิธีมอนติ คาร์โล หา U_c	U_c แปรผกผันกับจำนวนข้อมูลที่ใช้ ในการคำนวณ C
	ความไม่แน่นอน ของ E , B และ C	1) ขึ้นทดสอบแบบ C(T) 2) วัด C_{MOD}	1) U_a แปรผันตามความไม่ แน่นอนของ E , B และ C 2) U_a ลดลงเมื่อ a/W เพิ่มขึ้น
Maxwell, Gillagher และ Ashbaugh (1984) [13]	ความไม่แน่นอน ของ E , B และ C	1) ขึ้นทดสอบแบบ C(T) จากอลูมิเนียม เบอร์ x7091 2) วัด C_{MOD}	1) U_a แปรผันตามความไม่ แน่นอนของ EBC 2) U_a ลดลงเมื่อ a/W เพิ่มขึ้น ณ ความไม่แน่นอนของ EBC ค่า หนึ่ง
	ความไม่แน่นอน ของตำแหน่งติดตั้ง คลิปเกจ (y)		U_a แปรผันกับความไม่แน่นอน ของตำแหน่งติดตั้งคลิปเกจ (y) ในรูป ที่ 1.1 (ข)

⁽¹⁾วิธีมอนติ คาร์โล จะอธิบายที่หัวข้อ 2.3.4

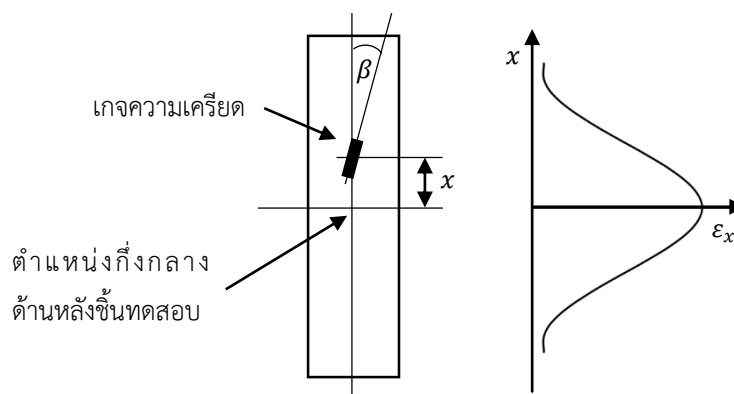
ข้อสังเกตจากงานวิจัยในตารางที่ 1.1 มีดังนี้ งานวิจัยของ Roy Hewitt (1983) [17] ศึกษาขนาดของแรงเสียดทาน, สัญญาณไฟฟ้ารบกวน และความยาวรอยร้าวเพียงค่าเดียว อีกทั้งเป็นงานวิจัยเชิงเปรียบเทียบจึงไม่ได้บอกสถานะทดสอบ (แรงเสียดทาน, ภาระ และขนาดสัญญาณรบกวน) และรายละเอียดวิธีมอนติ คาร์โล นอกจากนี้ยังใช้ขนาดสัญญาณรบกวนขณะที่ภาระเท่ากับศูนย์ ซึ่งอาจไม่เท่ากับสัญญาณรบกวนขณะขึ้นทดสอบรับภาระค่าอื่น

งานวิจัยของ Gordon (1986) [18] ศึกษาเงื่อนไขของสมมติที่ C เท่ากับ 1 หรือหมายความว่าไม่ได้ศึกษาผลของความยาวรอยร้าวต่อความไม่แน่นอนของ C และยังไม่ได้ศึกษาผลของความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ (U_c) ต่อ U_d) นอกจากนี้ข้อสรุปที่ว่าสัญญาณรบกวนไม่มีนัยสำคัญต่อความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวนั้นอาจไม่เป็นจริง เพราะสัญญาณรบกวนของระบบทดสอบจริงอาจมีขนาดมากกว่าที่งานวิจัยนี้กำหนดขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Roy Hewitt (1983) พบว่าสัญญาณรบกวนทำให้เกิดความไม่แน่นอน 78 % จากความไม่แน่นอนทั้งหมดที่ไม่รวมผลของแรงเสียดทาน อีกทั้งมาตรฐาน ASTM E1942 [19] ยังแนะนำให้พิจารณาผลของสัญญาณรบกวนเพราะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเติบโตรอยร้าว

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยซึ่งสามารถนำความรู้มาประยุกต์เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนดังนี้ Deans, Jolly, Poynton และ Watson (1977) [14], Deans and Richards (1979) [15] และ Maxwell (1987) [9] ศึกษาขนาดของความเครียดบนผิวด้านหลังขึ้นทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ พบว่าขนาดของความเครียดบนผิวด้านหลังขึ้นทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 1.3 เอกสารของบริษัท MICRO-MEASUREMENTS [20] ศึกษาผลของการบิดเบือนความเครียดเนื่องจากแนวอุดมคติต่อการวัดความเครียดพบว่าความผิดพลาดในการวัดความเครียดแปรผันตามขนาดของมุมที่เอียงจากแนวอุดมคติ งานวิจัยเหล่านี้ทำให้ทราบว่าความไม่แน่นอนของตำแหน่งและแนวติดตั้งเกจความเครียดทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดความเครียด นอกจากนี้คำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E1942 [19] บอกถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทดสอบอัตราการเติบโตรอยร้าว ปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วยแบนวิดท์ (Bandwidth) ของ ADC, จำนวนข้อมูลต่อรอบ, สัญญาณรบกวน, ความต่างเฟสของสัญญาณ และดริฟท์ (Drift)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยที่ทำให้เกิด U_d หลายปัจจัย งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การจำลองข้อมูลขึ้นมาเพื่อศึกษา U_d มีเพียงงานวิจัยของ Roy Hewitt เท่านั้นที่มีการทดสอบและเก็บข้อมูลจริง อีกทั้งงานวิจัยมักไม่อธิบายวิธีการคำนวณ U_d นอกจากนี้ยังไม่มียานวิจัยใดที่ศึกษา U_d กรณีที่คำนวณ a จาก C_{BFS} ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาจะทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลของปัจจัยและปริมาณต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณ a ซึ่งได้กล่าวในข้างต้น โดยจะศึกษาทั้ง a จาก C_{BFS} และ C_{MOD} รวมถึงนำเสนอขั้นตอนการคำนวณความไม่แน่นอนเพื่อเป็นแนวทางสำหรับระบบทดสอบอื่น โดยจะศึกษาผลของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนจากสถานะทดสอบต่อไปนี้

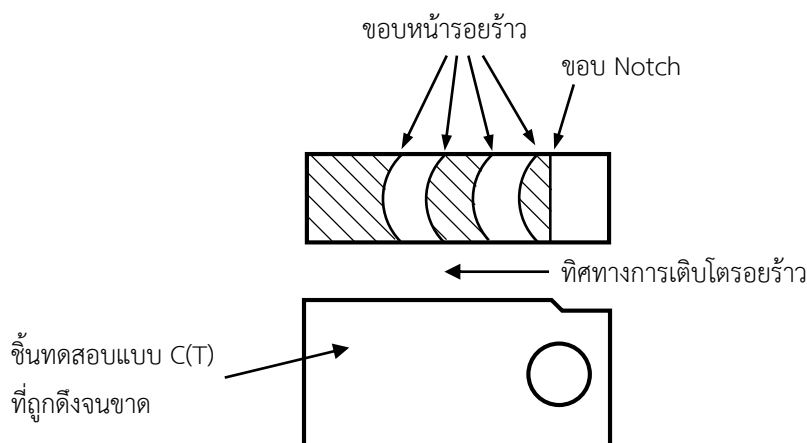
- 1) รูปร่างคลื่น (Wave shape)
- 2) ภาระสูงสุด
- 3) อัตราส่วนภาระ (load ratio, R)
- 4) ความยาวรอยร้าว
- 5) ความถี่ภาระ (Load frequency, f)
- 6) Sampling rate (SR)
- 7) จำนวนข้อมูลต่อรอบ (Number of data per cycle, DC)
- 8) เปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระนับจากตำแหน่งภาระสูงสุด (%Unload)
- 9) จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง ($Con.$)
- 10) การใช้ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้นนิยามต่าง ๆ (รายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 2)



รูปที่ 1.3 การติดตั้งแกนความเค้นเครียดคลาดเคลื่อนและลักษณะการกระจายของความเค้นบนผิวด้านหลังชั้นทดสอบ

อีกประเด็นหนึ่ง สมการที่ใช้คำนวณ a จาก C ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ [7, 21] ที่สมมติให้ขอบหน้ารอยร้าว (Crack-front edge) เป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามขอบหน้ารอยร้าวที่เกิดขึ้นจริงนั้นเป็นเส้นโค้ง [22, 23] ดังรูปที่ 1.4 จึงเกิดนิยามความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก (Physical crack length, a_s) หลายแบบ เช่น วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง [13], วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง [8], วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง [22, 23] และวิธีพื้นที่สมมูล [22, 24] แต่ยังไม่มีการสรุปว่านิยามใดสอดคล้องกับ a ที่คำนวณจากสมการมากที่สุด

Roy Hewitt (1983) [17] สร้างขอบหน้ารอยร้าวล้ากับชั้นทดสอบแบบ Compact tension (C(T)) ความหนา 12.6 mm ที่ความยาวรอยร้าวตั้งแต่ 10.5 - 27.5 mm เขาพบว่านิยาม วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง เหมาะสมกับสมการทำนายความยาวรอยร้าวที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับที่มาตรฐาน ASTM E647 [8] แนะนำ แต่งานวิจัยของ Newman [24] วัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหักขณะการทดสอบหาเส้นโค้งความต้านทานการแตกหักกับชั้นทดสอบแบบ C(T) ความหนา 6.35mm ทำจากวัสดุผสมอลูมิเนียม เบอร์ 2024-T351 พบว่าวิธีพื้นที่สมมูลใกล้เคียงกับ a มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีคำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E1820 [23] ว่าจะให้ประมาณความยาวรอยร้าวจากขอบหน้ารอยร้าวด้วยวิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง งานวิจัยของ Roy Hewitt และ มาตรฐาน ASTM E647 ที่แนะนำให้ใช้วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ส่วนงานวิจัยของ Newman และ มาตรฐาน ASTM E1820 แนะนำให้ใช้วิธีพื้นที่สมมูล และเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ทำให้นิยามที่เหมาะสมกับการทดสอบแต่ละอย่างไม่เหมือนกัน งานวิจัยนี้จะศึกษาว่า a_s นิยามใดสอดคล้องกับ a มากที่สุด



รูปที่ 1.4 ลักษณะของขอบหน้ารอยร้าว

1.2 วัตถุประสงค์

- นำเสนอขั้นตอนการคำนวณ U_a
- ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a
- เปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่าง a_s นิยามต่าง ๆ กับ a

1.3 ขอบเขต

- การคำนวณ C ใช้วิธีที่มาตรฐาน ASTM E647 แนะนำ โดยใช้ข้อมูลช่วงปลดภาระตั้งแต่ตำแหน่งที่ BFS , $CMOD$ และภาระมีค่าสูงสุด และข้อมูลตำแหน่งถัดมาอีกเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนข้อมูลต่อรอบ
- ปัจจัยที่ศึกษาผลต่อความไม่แน่นอน คือ รูปรางคลื่น, ภาระสูงสุด, R , ความยาวรอยร้าว, SR , DC , $\%Unload$, Con . และนิยามของความยาวรอยร้าวกาย
- ใช้ชิ้นทดสอบแบบ C(T) ทำจากวัสดุ A516 Gr70 ขนาดระบุ $B=12.5$ mm และ $W=50$ mm
- ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยย่อ

- หาความรู้ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย วิธีการติดตาม a , วิธีวัด a_s , ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการเก็บข้อมูล a , การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน และวิธีมอนติ คาร์โล
- ทดสอบชิ้นทดสอบโดยให้ภาระล้าที่มี R สลับกันเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณ a จาก C และสร้างขอบหน้ารอยร้าวเพื่อวัด a_s
- วิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่าง a_s นิยามต่าง ๆ กับ a
- วิเคราะห์ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a
- นำข้อมูล a พร้อมทั้ง U_a ไปคำนวณความไม่แน่นอนของอัตราการเติบโตรอยร้าวและอายุการใช้งานที่เหลือ ($U_{\frac{da}{dN}}$ และ U_{RL})

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ U_a ของงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสำหรับวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบทดสอบอื่น
- ทราบอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a และวิธีลดผลเหล่านั้น
- สามารถประยุกต์กับการคำนวณ U_{da} และ U_{RL} ของโครงสร้างได้
- ยืนยันว่า a_s นิยามได้ที่สอดคล้องกับ a ที่คำนวณจาก C มากที่สุด



บทที่ 2

ทบทวนผลงานที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอความรู้พื้นฐานในงานวิจัย และบทความที่ศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการติดตามรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์ เนื้อหาแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ 1) วิธีติดตามรอยร้าวด้วยคอมพลายแอนซ์ 2) วิธีวัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก 3) ความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณกายภาพ 4) ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการติดตามรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์

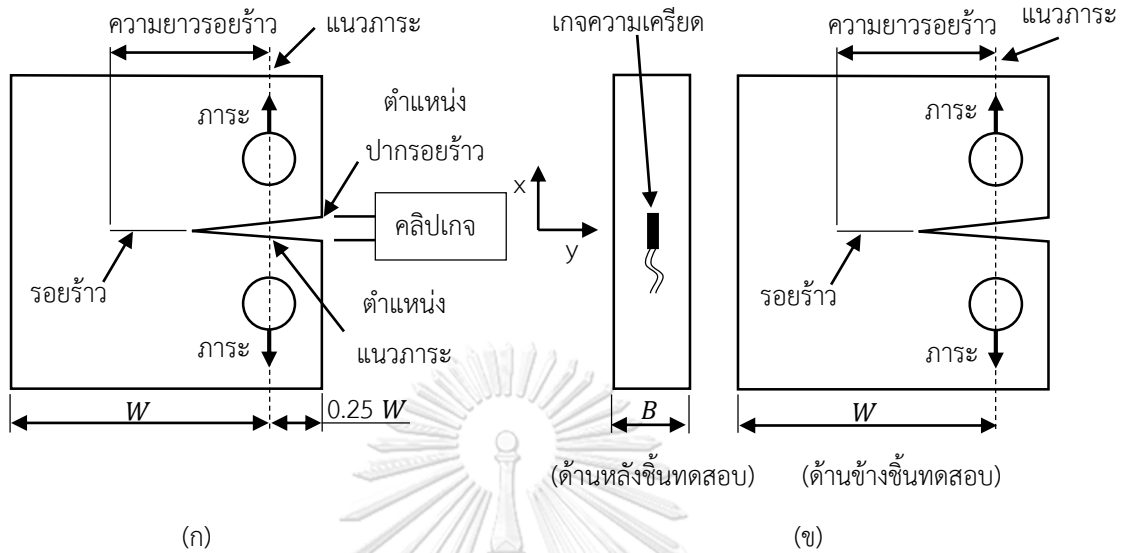
2.1 วิธีติดตามรอยร้าวด้วยคอมพลายแอนซ์

คอมพลายแอนซ์ (C) ถูกนิยามว่าเป็นส่วนกลับของความชันของความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะเสียหายรูปของวัตถุโดยภาระเป็นแกนตั้งและระยะเสียหายรูปเป็นแกนนอน ขนาด C ของวัตถุที่มีรอยร้าวจะขึ้นกับความยาวรอยร้าว กล่าวอีกอย่างคือ ความยาวรอยร้าวมีความสัมพันธ์กับ C การติดตามรอยร้าวด้วยวิธีนี้จึงหา C แล้วคำนวณความยาวรอยร้าวขณะนั้นด้วยความสัมพันธ์ดังกล่าว ความสัมพันธ์นี้สามารถหาได้จากการทดลอง หรือการคำนวณเชิงตัวเลข วิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก [25-27] และอัตราการเติบโตของรอยร้าว [28, 29] ในช่วงแรกของการพัฒนาวิธีการติดตามรอยร้าวนี้นิยมใช้คอมพลายแอนซ์ตามแนวภาระ ณ ตำแหน่งที่ภาระกระทำดังรูป 2.1(ก) ต่อมามีการเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวกับ C ที่ตำแหน่งอื่นตามแนวรอยร้าว เช่น ตำแหน่งปากรอยร้าวในรูป 2.1(ก) เป็นต้น [21] โดยความสัมพันธ์เหล่านี้ถูกใช้ในมาตรฐานการทดสอบ [8, 23] ตำแหน่งหนึ่งที่ยอมรับใช้ติดตามรอยร้าวก็คือ ตำแหน่งปากรอยร้าว [30] เนื่องจากเตรียมชิ้นทดสอบง่าย และติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเสียหายรูปได้สะดวก ระยะเสียหายรูปของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งปากรอยร้าวนี้อยู่ห่างจากแนวภาระ $0.25W$ ดังรูป 2.1(ก) เรียกว่า ระยะอ้าปากรอยร้าว ($CMOD$) คอมพลายแอนซ์ที่ตำแหน่งนี้จึงเรียกว่า คอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว (C_{CMOD})

นอกจากวิธีข้างต้น ยังมีวิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียด (C_{BFS}) [6,7] ซึ่งได้รับความนิยมเช่นกัน วิธีนี้ใช้ C ที่ได้จากส่วนกลับของความชันของความสัมพันธ์ระหว่างภาระและความเครียดตามแนวแรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางผิวด้านหลังของชิ้นทดสอบ (BFS) โดยภาระเป็นแกนตั้งและความเครียดเป็นแกนนอน การวัด BFS ใช้เกจความเครียดติดบนชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งดังรูป 2.1(ข) วิธีนี้ถูกพัฒนาในปี 1977 [14, 15] เพื่อลดค่าใช้จ่ายในกรณีที่ต้องทดสอบชิ้นทดสอบหลายชิ้นพร้อมกันเพราะเกจความเครียดมีถูกกว่าคาลิปเปอร์อย่างมาก วิธีนี้ได้ถูกปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [9, 14, 15] จนล่าสุดในปี 2011 Newman [7] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวและ C_{BFS} ซึ่งมีความแม่นยำที่สุด

อย่างที่ได้อธิบายในข้างต้นว่า C คือส่วนกลับของความชันระหว่างภาระและระยะเสียหายรูปของวัตถุ ในขณะที่วัตถุรับภาระเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ แต่ที่ส่วนใหญ่นิยมใช้ C ช่วงที่ภาระลดลง หรือปลดภาระ (Unloading) การหา C_{BFS} และ C_{CMOD} มีหลักการเหมือนกัน ดังนั้นจะอธิบายวิธีหา C ทั้งสองแบบไปพร้อมกัน ยกตัวอย่างการหา C จากวัตถุที่รับภาระแบบคลื่นรูปไซน์ ดังรูป 2.2 เริ่มจากพล็อตข้อมูลภาระ และ BFS (หรือ $CMOD$) ในช่วงปลดภาระ โดยให้ข้อมูล BFS (หรือ $CMOD$) เป็นแกนนอน ส่วนข้อมูลภาระเป็นแกนตั้ง เมื่อภาระลดลงอาจจะพบช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและ BFS (หรือ $CMOD$) ไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากปรากฏการณ์ Crack closure ใน

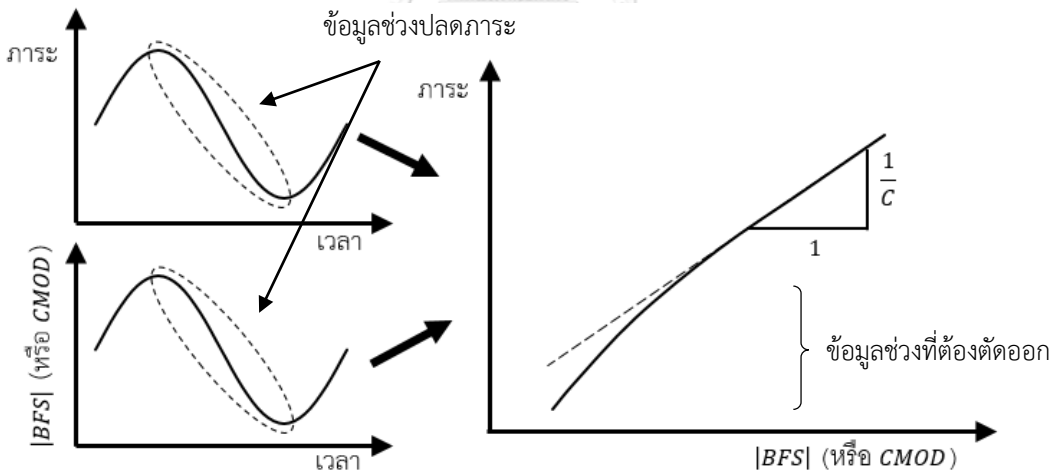
กรณีนี้ต้องไม่นำข้อมูลในช่วงที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นมาวิเคราะห์ จากนั้นหา C จากส่วนกลับของความชันของเส้นตรงที่ได้



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งเก็บข้อมูลการเสียรูป

ก) ตำแหน่งแนวการร้าว และปากรอยร้าว

ข) ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชั้นทดสอบ



รูปที่ 2.2 การหาคอมพลายแอนซ์

สมการที่ใช้ติดตามรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียด และคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวมีรูปแบบเหมือนกันดังสมการ (2.1) [7, 8, 21] แต่ตัวแปร x จะขึ้นอยู่กับชนิดของ C หากเป็น C_{BFS} x จะอยู่ในรูปสมการ (2.1ก) หรือถ้าเป็น C_{CMOD} x จะอยู่ในรูปสมการ (2.1ค) ค่าคงที่ c_0 ถึง c_5 ในสมการ (2.1) จะขึ้นกับชนิดของ C และชั้นทดสอบ ค่าคงที่ c_0 ถึง c_5 ของชั้นทดสอบแบบ C(T) สำหรับวิธี C_{BFS} และ C_{CMOD} มีค่าดังสมการ (2.1ข) และ (2.1ง) ตามลำดับ

$$\frac{a}{W} = c_0 + \frac{c_1}{v} + \frac{c_2}{v^2} + \frac{c_3}{v^3} + \frac{c_4}{v^4} + \frac{c_5}{v^5} \quad (2.1)$$

สำหรับวิธีคอมพลาเยนซ์ความเครียด

$$v = 1 + \sqrt{WBEC_{BFS}}, \quad (2.1ก)$$

สำหรับขึ้นทดสอบแบบ C(T)

$$c_0 = 1.0033, c_1 = -2.35, c_2 = 1.3694, c_3 = -15.294, c_4 = 63.182, c_5 = -74.42 \quad (2.1ข)$$

สำหรับวิธีคอมพลาเยนซ์ปากรอยร้าว

$$v = 1 + \sqrt{BEC_{CMOD}}, \quad (2.1ค)$$

สำหรับขึ้นทดสอบแบบ C(T)

$$c_0 = 1.001, c_1 = -4.6695, c_2 = 18.46, c_3 = -236.82, c_4 = 1214.9, c_5 = -2143.6 \quad (2.1ง)$$

โดย a คือ ความยาวรอยร้าวจากคอมพลาเยนซ์

W คือ ความกว้างขึ้นทดสอบดังรูปที่ 2.1

B คือ ความหนาขึ้นทดสอบดังรูปที่ 2.1

C_{BFS} คือ คอมพลาเยนซ์ความเครียด

C_{CMOD} คือ คอมพลาเยนซ์ปากรอยร้าว

E คือ ค่ายังโมดูลัส

P คือ ภาระที่กระทำกับขึ้นทดสอบ

BFS คือ ความเครียดตามแนวแกน x ในรูป 2.1 (ข) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางผิวด้านหลังขึ้นทดสอบ

$CMOD$ คือ ระยะอ้าปากรอยร้าว

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยร้าวและ C ทั้งสองชนิดได้มาจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติและสมมติให้ขอบหน้ารอยร้าวเป็นเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงสถานะความเค้นเป็น 3 มิติ ขอบหน้ารอยร้าวจึงเป็นเส้นโค้ง ความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากคอมพลาเยนซ์ (a) จึงอาจไม่เท่ากับความยาวรอยร้าวที่วัดจากพื้นผิวแตกหักหรือเรียกว่าความยาวรอยร้าวกายภาพ (a_s) (รายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป) มาตรฐาน [8,23] จึงเสนอให้ปรับ E ในสมการ (2.1) เป็นยังโมดูลัสประสิทธิผล (E_{eff}) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $E \leq E_{eff} \leq \frac{E}{1-\mu^2}$ โดยให้เหตุผลว่าการทำเช่นนี้จะทำให้สมการเหมาะกับการคำนวณ a ที่สถานะความเค้นแบบ 3 มิติมากกว่าการใช้ E ค่า E_{eff} ที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้ a และ a_s ณ ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล C มีค่าเท่ากัน การหาค่า E_{eff} สามารถใช้วิธีสุ่มค่าจนกว่า a และ a_s ณ ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล C จะเท่ากัน งานวิจัยนี้ใช้ความยาวรอยร้าวกายภาพที่ตำแหน่งเริ่มต้น (a_{s0}) คอมพลาเยนซ์ที่ได้จากตำแหน่งนี้ คือ คอมพลาเยนซ์เริ่มต้น (C_0) หรือใช้การจัดรูปสมการ (2.1) เป็น $E = f(W, B, C, a)$ ดังสมการ (2.2) [7] และ (2.3) [21] สำหรับวิธีคอมพลาเยนซ์ความเครียด และคอมพลาเยนซ์ปากรอยร้าวตามลำดับ

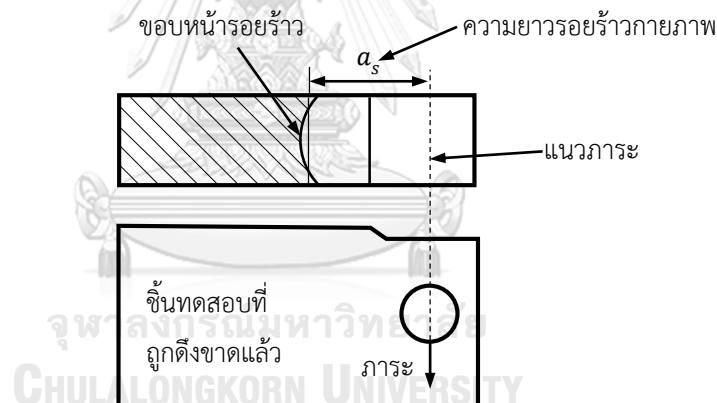
$$E = \frac{1.41 - 1.462\left(\frac{a}{W}\right) + 20.45\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 26.83\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 11.45\left(\frac{a}{W}\right)^4}{WBC_{BFS}\left(1 - \frac{a}{W}\right)^2} \quad (2.2)$$

$$E = \frac{\left(1 + \frac{0.25}{a/W}\right)\left(1 + \frac{a}{W}\right)^2}{BC_{MOD}} \left(\begin{array}{l} 1.61369 + 12.6778\left(\frac{a}{W}\right) - 14.2311\left(\frac{a}{W}\right)^2 \\ -16.6102\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 35.0499\left(\frac{a}{W}\right)^4 - 14.4943\left(\frac{a}{W}\right)^5 \end{array} \right) \quad (2.3)$$

จากนั้นแทน a ด้วย a_{s0} แทนค่า W, B และ C_0 จะได้ E ซึ่งหมายถึง E_{eff} เมื่อใช้ E_{eff} แทน E รูปฟังก์ชันของสมการ (2.1) จะเปลี่ยนจาก $a = f(W, B, C, E)$ เป็น $a = f(W, a_{s0}, C_0, C)$

2.2 วิธีวัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก

การระบุความยาวรอยร้าวด้วยวิธีนี้ จะวัดระยะตั้งแต่แนวภาระถึงขอบหน้ารอยร้าว (Crack front) บนพื้นผิวแตกหัก ดังรูปที่ 2.3 การวัดระยะอาจใช้กล้องขยายดิจิทัลที่สามารถระบุตำแหน่งหรือวัดระยะบนภาพได้ เนื่องจากขอบหน้ารอยร้าวมีลักษณะเป็นขอบโค้ง ดังรูป 2.3 ระยะจากแนวภาระถึงขอบหน้ารอยร้าวจึงมีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งตามแนวความหนา ในที่นี้จะเรียกตัวแทนความยาวรอยร้าวว่า ความยาวรอยร้าวกายภาพซึ่งมีหลายนิยามโดยจะอธิบายในหัวข้อถัดจากนี้

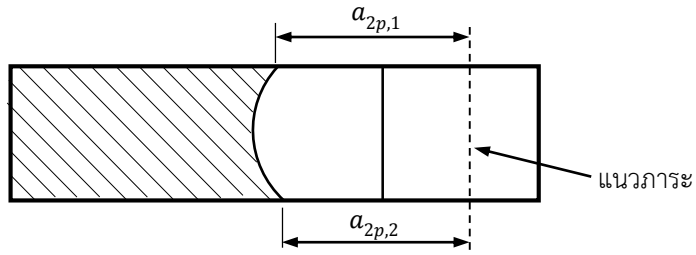


รูปที่ 2.3 การวัดความยาวรอยร้าวจากพื้นผิวแตกหัก

2.2.1 วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง

วิธีนี้จะวัดความยาวรอยร้าวที่ผิวทั้ง 2 ข้าง $a_{2p,1}$ และ $a_{2p,2}$ ดังรูปที่ 2.4 แล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยด้วยสมการที่ (2.4) [13] ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่จำเป็นต้องดึงชิ้นงานขาด แต่มีข้อเสียคือ ไม่ได้คำนึงถึงความโค้งของขอบหน้ารอยร้าว

$$a_{s,2p} = \frac{a_{2p,1} + a_{2p,2}}{2} \quad (2.4)$$

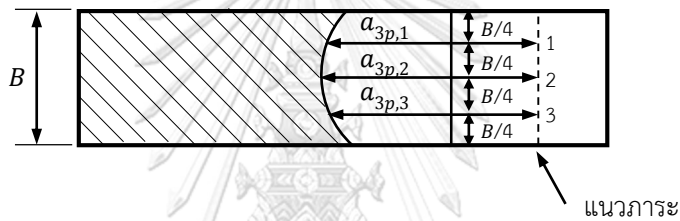


รูปที่ 2.4 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง

2.2.2 วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง

วิธีนี้จะวัดความยาวรอยร้าวที่ตำแหน่ง 1, 2 และ 3 หรือ $a_{3p,1}$, $a_{3p,2}$ และ $a_{3p,3}$ ดังรูปที่ 2.5 โดยแต่ละตำแหน่งจะมีระยะห่างเท่ากัน แล้วนำมาเฉลี่ยด้วยสมการที่ (2.5) [8]

$$a_{s,3p} = \frac{a_{3p,1} + a_{3p,2} + a_{3p,3}}{3} \tag{2.5}$$

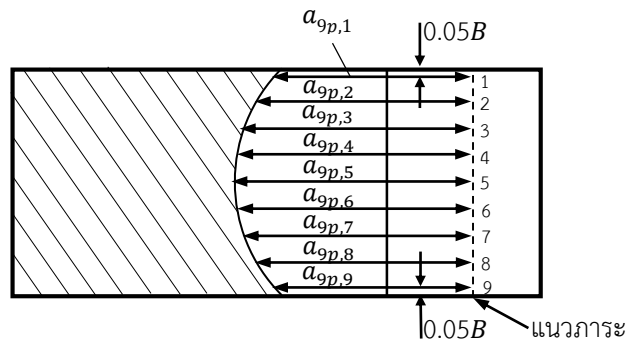


รูปที่ 2.5 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง

2.2.3 วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง

วิธีนี้จะวัดความยาวรอยร้าวที่ตำแหน่ง 1 ถึง 9 หรือ $a_{9p,1}$ ถึง $a_{9p,9}$ ดังรูปที่ 2.6 โดยตำแหน่ง 1 และ 9 จะอยู่ห่างจากขอบขึ้นทดสอบ $0.05 \cdot B$ ส่วนตำแหน่งที่เหลือจะมีระยะห่างเท่ากัน แล้วแทนลงในสมการ (2.6) [22,23]

$$a_{s,9p} = \frac{1}{8} \left(\frac{a_{9p,1} + a_{9p,9}}{2} + \sum_{i=2}^8 a_{9p,i} \right) \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งวัดความยาวรอยร้าวของวิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง

2.2.4 วิธีพื้นที่สมมูล

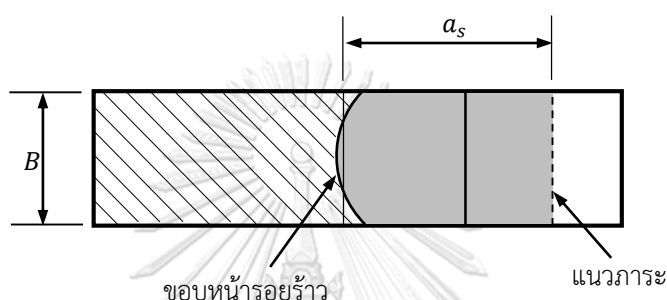
วิธีนี้กำหนดให้ความยาวรอยร้าวกายภาพ คือความยาวที่ทำให้พื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด $a_s \times B$ เท่ากับพื้นที่รอยร้าวที่มีขอบหน้าโค้ง (พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูป 2.7) ดังนั้นความยาวรอยร้าวกายภาพจะคำนวณได้จากสมการ (2.7) [22, 24]

$$a_{s,area} = \frac{A}{B} \quad (2.7)$$

โดย a_s คือ ความยาวรอยร้าวกายภาพ

A คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูป 2.7

B คือ ความหนาของชั้นทดสอบ



รูปที่ 2.7 พื้นที่รอยร้าวสำหรับคำนวณความยาวรอยร้าวกายภาพด้วยวิธีพื้นที่สมมูล

พื้นที่ A สามารถคำนวณได้จากวัดความยาวรอยร้าวในรูป 2.6 และความยาวรอยร้าวที่ผิวทั้ง 2 ด้าน จากนั้นหาพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) [24] สมการสำหรับหาพื้นที่สี่เหลี่ยมในกรณีก็คือ สมการ (2.8)

$$A = \frac{1}{2}(a_{2p,1} + a_{9p,1}) \cdot 0.05B + \sum_{i=1}^8 \frac{1}{2}(a_{9p,i} + a_{9p,i+1}) \cdot 0.1125B + \frac{1}{2}(a_{9p,9} + a_{2p,2}) \cdot 0.05B \quad (2.8)$$

และเมื่อแทน A จากสมการนี้ลงในสมการ (2.7) แล้วรูปจะได้สมการสำหรับคำนวณความยาวรอยร้าวดังสมการ (2.9)

$$a_{s,area} = 0.025(a_{2p,1} + a_{2p,2}) + 0.08125(a_{9p,1} + a_{9p,9}) + 0.1125 \sum_{i=2}^8 a_{9p,i} \quad (2.9)$$

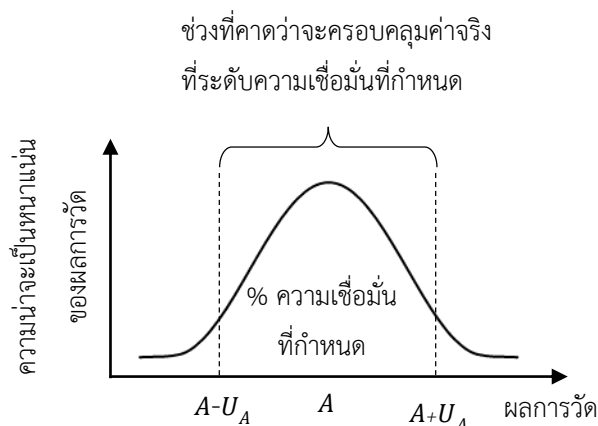
2.3 ความไม่แน่นอนของการวัดปริมาณกายภาพ

หัวข้อนี้จะอธิบายความหมายและขั้นตอนการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้โดยตรงและปริมาณอนุพันธ์

2.3.1 ความหมาย

การวัดปริมาณใดก็ตาม เราไม่สามารถรู้ค่าจริง (True value) ของปริมาณนั้นได้ เพราะว่าจะมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) ติดมาด้วยเสมอ สิ่งที่เราทำได้ที่ดีที่สุดคือ กำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมค่าจริงด้วยความเชื่อมั่นค่าหนึ่ง การรายงานผลการวัดจึงนำเสนอในรูป $A \pm U_A$ โดย A คือ ค่าประมาณที่ดีที่สุด (Best estimate) ของค่าจริง ซึ่งนิยมใช้คือค่าเฉลี่ย และ U_A คือ ความไม่แน่นอนของ A โดยทั่วไปผลการวัดจะมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) เพราะว่าการวัดปริมาณกายภาพมักจะได้รับผลจากปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนหลาย

ปัจจัย ทำให้ผลการวัดปริมาณกายภาพนั้นมีการแจกแจงแบบปกติตามทฤษฎีแวนโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central limit theorem) [31] เมื่อกำหนดระดับความเชื่อมั่นก็จะคำนวณความไม่แน่นอน U_A ได้ ดังนั้นการรายงานผลการวัดในรูป $A \pm U_A$ จึงมีความหมายเชิงกราฟดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ความหมายของความไม่แน่นอนในเชิงกราฟิก

2.3.2 ความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้โดยตรง

เนื่องจากมีปัจจัยหลากหลายที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน เช่น การวัดความยาวของแผ่นกระดาษ ได้รับผลจากปัจจัย ได้แก่ ความไม่คงเส้นคงวาของการทาบไม้บรรทัดกับขอบกระดาษ, การผันแปรของอุณหภูมิ, ความละเอียดของไม้บรรทัด, ความแม่นยำของไม้บรรทัด ฯลฯ การหาผลรวมของความไม่แน่นอนจากทุกปัจจัย เริ่มจากการหาความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty, u) ของแต่ละปัจจัย จากนั้นนำมารวมกันแบบรากที่สองกำลังสอง (Root Sum Square, RSS) ยกตัวอย่าง การวัดปริมาณ D ที่มีปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน n ปัจจัย ถ้าความไม่แน่นอนจากแต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน และมีความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) แล้วความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณ D ซึ่งแทนด้วย u_D ที่คำนวณด้วยวิธี RSS จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.10) [32]

$$u_D^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2 \quad (2.10)$$

ขนาดและลักษณะการแจกแจง u ของแต่ละปัจจัยสามารถหาได้จากข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์วัดร่วมกับสูตรในตารางที่ 2.1 [32]

คอลัมน์แรกของตาราง คือ หมวดของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน โดยปัจจัยความละเอียดของอุปกรณ์ทั่วไป และ ความละเอียดของตัวการแปลงสัญญาณ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ ปิดเศษของค่าที่วัดได้แบบ Rounding และ Truncation

คอลัมน์ที่สอง คือ ลักษณะการแจกแจงความไม่แน่นอนที่เกิดจากปัจจัยแต่ละหมวด ลักษณะการแจกแจงของปัจจัยแบบสุ่ม แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แจกแจงแบบปกติ สำหรับกรณีที่เก็บข้อมูลจากการวัดซ้ำตั้งแต่ 30 ข้อมูลขึ้นไป และแจกแจงแบบ Student-t สำหรับกรณีที่เก็บข้อมูลจากการวัดซ้ำน้อยกว่า 30 ข้อมูล

คอลัมน์ที่สาม คือ สมการที่ใช้คำนวณขนาดของ u สำหรับปัจจัยแบบสุ่มกรณีการแจกแจงแบบปกติ สมการที่ใช้หา u แบ่งเป็น 2 แบบคือ u ของปริมาณที่ได้จากการวัด และ u ของค่าเฉลี่ยของปริมาณที่ได้จากการวัด

หาได้จาก SD และ $\frac{SD}{\sqrt{n}}$ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันกับปัจจัยแบบสุ่มกรณีการแจกแจงแบบ Student-t u ของปริมาณที่ได้จากการวัด และ u ของค่าเฉลี่ยของปริมาณที่ได้จากการวัด หาได้จาก SD_t และ $\frac{SD_t}{\sqrt{n}}$ ตามลำดับ เมื่อ SD_t คือ $SD \cdot \frac{t_{95\%}}{2}$ โดย $t_{95\%}$ คือ ค่า Student-t ที่ความเชื่อมั่น 95 % นอกจากนี้ในหมวดความละเอียดของ ADC ΔV คือ พิสัยของศักย์ไฟฟ้าที่ ADC วัด และ bit คือจำนวน bit ของ ADC ดังนั้น $\frac{\Delta V}{2^{bit}}$ ก็คือ ความละเอียดของ ADC คอลัมน์ที่สี่ คือ ตัวอย่างปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน

u นั้นถูกกำหนดไว้ที่ระดับความเชื่อมั่น 68% หรือประมาณหนึ่งเท่าของ SD สำหรับการแจกแจงปกติ แต่ปกติความไม่แน่นอนนิยมนำเสนอที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเราสามารถเปลี่ยนระดับความเชื่อมั่นเป็น 95% ได้ด้วยการเพิ่มความไม่แน่นอนมาตรฐานขึ้น 2 เท่า [32] เรียกว่าความไม่แน่นอนนี้ว่าความไม่แน่นอนขยาย (Expand uncertainty) โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ U

ความไม่แน่นอนแบ่งเป็น 2 ประเภท [32] คือ Type A และ B Type A คือความไม่แน่นอนที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ความไม่แน่นอนประเภทนี้มักเกิดจากความแปรปรวนในการวัด สำหรับ Type B คือความไม่แน่นอนที่ไม่ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ความไม่แน่นอนประเภทนี้มักเกิดจากคุณสมบัติของอุปกรณ์วัด จากตัวอย่างก่อนหน้านี้ ความไม่คงเส้นคงวาของการหาบไม้มบรทัดกับขอบกระดาษ และการผันแปรของอุณหภูมิจัดเป็นความไม่แน่นอน Type A ส่วนความแม่นยำและความละเอียดของไม้มบรทัดจัดเป็นความไม่แน่นอน Type B เราสามารถหาความไม่แน่นอนแต่ละประเภทได้โดยแทนค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากปัจจัยประเภทที่เราต้องหาลงในสมการ (2.10) การแบ่งประเภทของความไม่แน่นอนช่วยให้ทราบว่าปัจจัยใดส่งผลมากที่สุดต่อความไม่แน่นอนรวม ซึ่งให้แนวทางปรับปรุงการวัดปริมาณที่สนใจ

ตารางที่ 2.1 ความไม่แน่นอนมาตรฐานของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน

หมวด	การแจกแจง	ขนาด u	ตัวอย่าง	
ความแม่นยำ	ปกติ	$Accuracy/2$	- ความแม่นยำของโวลต์เซลล์	
ปัจจัยแบบสุ่ม	ปกติ	ค่าที่วัด : SD	- สัญญาณรบกวน - ความไม่คงเส้นคงวาของผู้วัด	
		ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด : $\frac{SD}{\sqrt{n}}$		
	Student-t	ค่าที่วัด : SD_t ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด : $\frac{SD_t}{\sqrt{n}}$	- อุณหภูมิที่ผันแปร	
ความละเอียดของอุปกรณ์ทั่วไป	ปัดเศษ (Rounding)	สม่ำเสมอ (Uniform)	$\frac{Resolution}{\sqrt{12}}$	- ความละเอียดของอุปกรณ์วัดที่แสดงผลแบบสเกล
	ปัดเศษลง (Truncation)	สม่ำเสมอ (Uniform)	$\frac{Resolution}{\sqrt{3}}$	- ความละเอียดอุปกรณ์วัดที่แสดงผลแบบดิจิทัล
ความละเอียดของตัวการแปลงสัญญาณ (ADC)	ปัดเศษ (Rounding)	สม่ำเสมอ (Uniform)	$\frac{\Delta V}{2^{bit}\sqrt{12}}$	-
	ปัดเศษลง (Truncation)	สม่ำเสมอ (Uniform)	$\frac{\Delta V}{2^{bit}\sqrt{3}}$	- ความละเอียดของ ADC

2.3.3 ความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์

เมื่อปริมาณที่วัดได้โดยตรงมีความไม่แน่นอน ปริมาณที่คำนวณจากปริมาณเหล่านี้หรือเรียกว่า ปริมาณอนุพันธ์ (Derived quantity) จะได้รับผลของความไม่แน่นอนเหล่านั้นด้วย เหตุการณ์นี้เรียกว่า การแผ่ของความไม่แน่นอน (Uncertainty propagation) การหาความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์นิยมใช้ อนุกรมเทย์เลอร์ [31-33] หาผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของตัวแปรต้น ในบริบทของความไม่แน่นอน การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของตัวแปรต้นคือความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้โดยตรง ส่วนการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามคือความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์ เนื่องจากความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้โดยตรงมักจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัด การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์จึงใช้เพียงเทอมอนุพันธ์อันดับหนึ่งก็แม่นยำเพียงพอ กรณีที่ปริมาณอนุพันธ์เป็นฟังก์ชัน 1 ตัวแปรของปริมาณที่วัดได้โดยตรง ความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์หาได้จากสมการ (2.11)

$$U_D = \frac{\partial D}{\partial x} U_x \quad (2.11)$$

โดย x คือ ปริมาณที่วัดได้โดยตรง, D คือ ปริมาณอนุพันธ์, U_x คือ ความไม่แน่นอนขยายของ x และ U_D คือ ความไม่แน่นอนขยายของปริมาณอนุพันธ์

ในกรณีที่ปริมาณอนุพันธ์เป็นฟังก์ชันหลายตัวแปร เช่น D เป็นฟังก์ชันของปริมาณ x_1 ถึง x_n และที่ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของปริมาณ x_1 ถึง x_n เป็นอิสระต่อกัน การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนมีขั้นตอนตามรูปที่ 2.10 คือ 1) แจกแจงตัวแปรที่ต้องวัด 2) แจกแจงปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของแต่ละตัวแปร แล้วหาความไม่แน่นอนมาตรฐาน 3) ในแต่ละปริมาณให้รวมความไม่แน่นอนมาตรฐานจากทุกปัจจัยด้วยวิธี RSS และ 4) คำนวณความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์ด้วยสมการ (2.12) [31-33]

$$U_D^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial D}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2 \quad (2.12)$$

โดยสมการของ D จะต้องถูกจัดรูปให้เป็นฟังก์ชันของ x_1 ถึง x_n แล้วเท่านั้นจึงจะใช้ในสมการ (2.12) ได้ สมการดังกล่าวเรียกว่าสมการลดข้อมูล (Data reduction equation) $\frac{\partial D}{\partial x_i} U_{x_i}$ แต่ละพจน์ในสมการหมายถึงความไม่แน่นอนของ D ที่แผ่มาจาก (หรือเกิดจาก) ความไม่แน่นอนของ x_i การคำนวณความไม่แน่นอนของ D จะต้องต้องมีข้อมูล 3 อย่าง คือ 1) ค่าเฉลี่ยของ x_1 ถึง x_n 2) ความไม่แน่นอนของ x_1 ถึง x_n และ 3) สมการลดข้อมูล การคำนวณปริมาณอนุพันธ์มักใช้ค่าเฉลี่ยของปริมาณที่วัดได้โดยตรงจากการวัด n ครั้ง จากทฤษฎีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางไม่ว่าการวัดจะมีลักษณะการแจกแจงแบบใดความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการ (2.13) [31-33]

$$u = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (2.13)$$

สมการเดียวกับในตาราง 2.1 โดยมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ เช่นเดียวกับปัจจัยของความไม่แน่นอนแบบสุ่มทั่วไป หากจำนวนข้อมูลที่ได้จากการวัดน้อยกว่า 30 ข้อมูล จะใช้ SD_t แทน SD

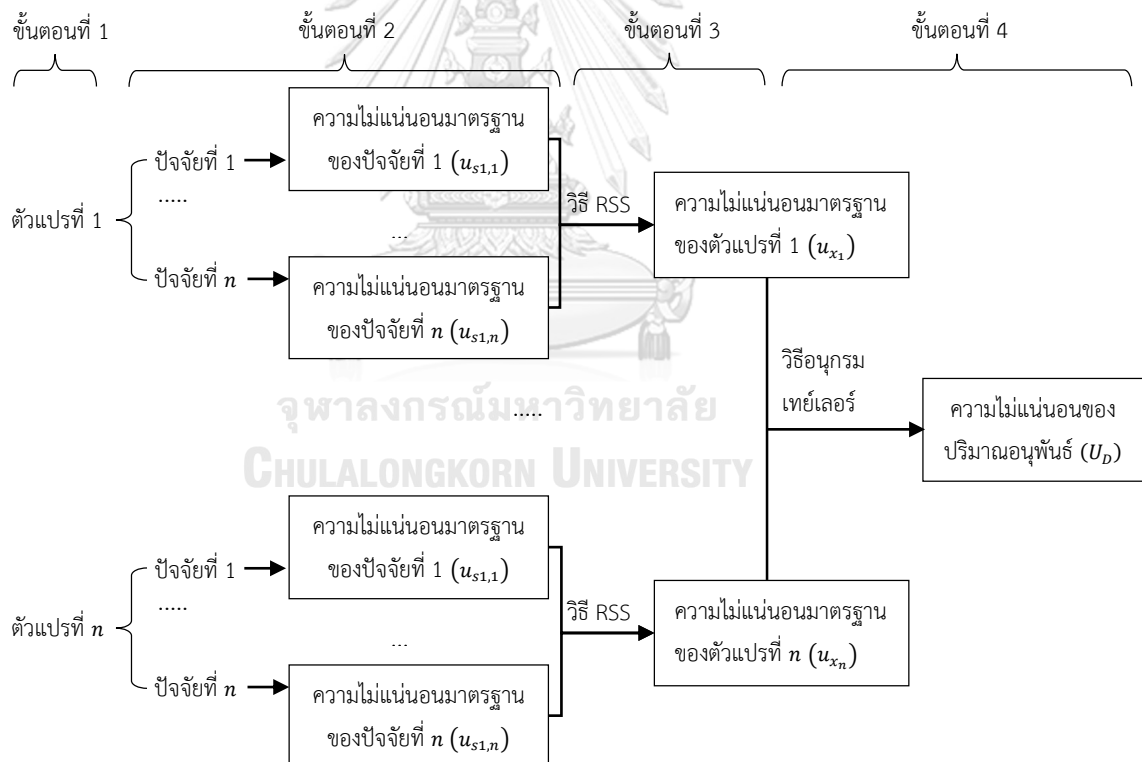
ในกรณีปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของแต่ละตัวแปรไม่เป็นอิสระต่อกัน การคำนวณความไม่แน่นอนจะใช้สมการ (2.14) และ (2.15) [32]

$$U_D^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial D}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial D}{\partial x_i} \frac{\partial D}{\partial x_j} U_{x_{ij}} \right) \quad (2.14)$$

$$U_{x_{ij}} = 2 \times \sum_{k=1}^L (u_{i,k})(u_{j,k}) \quad (2.15)$$

เทอมขวาสุดของสมการ (2.14) ใช้คำนวณผลความไม่เป็นอิสระต่อกันของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน $u_{i,k}$ และ $u_{j,k}$ ในสมการ (2.15) คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของปัจจัยที่ไม่เป็นอิสระระหว่างตัวแปร x_i และ x_j โดย L ในสมการ (2.15) คือ หมายเลขของปัจจัยที่ไม่เป็นอิสระกันของ x_i และ x_j การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในกรณีนี้มีขั้นตอนคล้ายกับในรูป 2.9 เพียงแต่ในขั้นตอนที่ 3 จะต้องหา U_{x_i} และ $U_{x_{ij}}$ เพื่อแทนในสมการ (2.14) ความไม่แน่นอนของปริมาณอนุพันธ์สามารถแยกพิจารณาเป็น Type A หรือ Type B ด้วยวิธีเดียวกับหัวข้อ 2.3.2

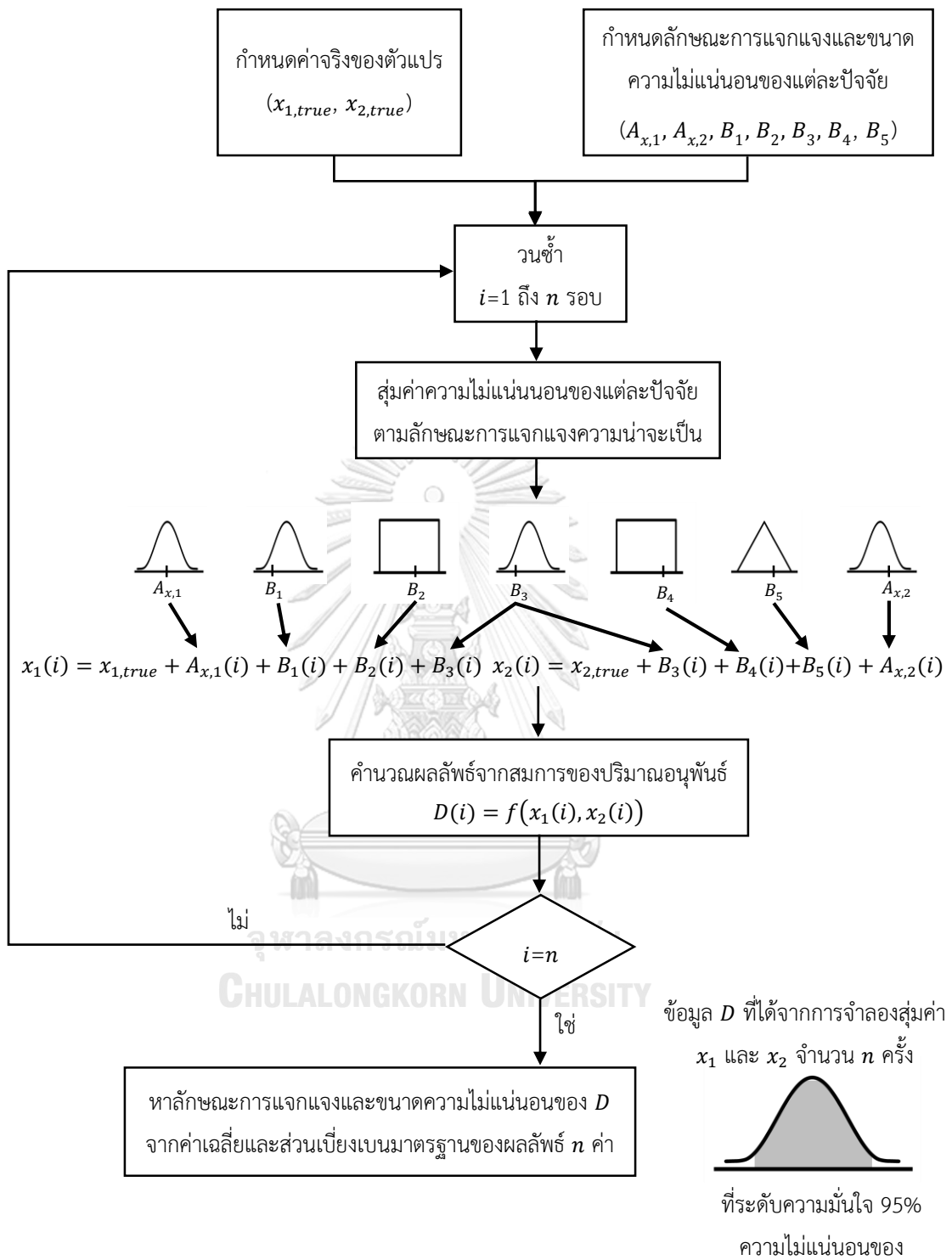
การหาความไม่แน่นอน Type A ของปริมาณอนุพันธ์ยังสามารถหาได้จากค่า SD หรือ SD_t ของปริมาณอนุพันธ์ได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น การหาขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมมุมฉาก A โดยการวัดขนาดด้าน b และด้าน c จำนวน n ครั้ง ความไม่แน่นอน Type A สามารถหาได้จากค่า SD ของ A ซึ่งได้จาก $b \times c$ จำนวน n ครั้ง หากจำนวนครั้งที่วัดมากพอวิธีนี้และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์จะให้ผลลัพธ์ความไม่แน่นอนเท่ากัน



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

2.3.4 วิธีมอนติ คาร์โล

เมื่อปัจจัยที่ทำให้ความไม่แน่นอนที่ไม่เป็นอิสระต่อกันมีจำนวนมาก หรือการหาฟังก์ชันอนุพันธ์ของปริมาณอนุพันธ์มีความซับซ้อน วิธีอนุกรมเทย์เลอร์จะใช้งานได้ไม่ดีนัก วิธีอื่นที่มาตรฐานแนะนำคือ วิธีมอนติ คาร์โล (Monte Carlo method) [32,33] วิธีนี้จะหาความไม่แน่นอนโดยสุ่มค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณปริมาณอนุพันธ์ โดยใช้วิธีสุ่มค่าความไม่แน่นอนจากปัจจัยต่าง ๆ ตามลักษณะการแจกแจงความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัย แล้วนำค่าที่สุ่มได้มารวมกับค่าจริงของตัวแปร จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาณอนุพันธ์ เมื่อเสร็จแล้วจะทำกระบวนการนี้ซ้ำหลาย ๆ ครั้งก็จะทราบการแจกแจงของปริมาณอนุพันธ์และประมาณความไม่แน่นอนได้ รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการหาความไม่แน่นอนของ D ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ x_1 และ x_2 ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล ขั้นตอนการคำนวณความไม่แน่นอนเริ่มจากกำหนดค่าจริง (ซึ่งในทางปฏิบัติหมายถึง ค่าประมาณที่ดีที่สุดหรือค่าเฉลี่ย) ของตัวแปร x_1 และ x_2 ซึ่งแทนด้วย $x_{1,true}$ และ $x_{2,true}$ ตามลำดับ ถัดมากำหนดลักษณะการแจกแจง (ปกติ สมมาตร ฯลฯ) และขนาดความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัย ในรูปสมมติว่า x_1 และ x_2 มีปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน 7 ปัจจัยคือ $A_{x,1}$, $A_{x,2}$, B_1 , B_2 , B_3 , B_4 และ B_5 โดย A และ B หมายถึงความไม่แน่นอน Type A และ Type B ตามลำดับ $A_{x,1}$, B_1 , B_2 และ B_3 คือปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของ x_1 ส่วน $A_{x,2}$, B_3 , B_4 และ B_5 คือปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของ x_2 จากนั้นสุ่มค่าความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยตามลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแล้วนำไปรวมกับค่า $x_{1,true}$ และ $x_{2,true}$ ถัดมานำค่า x_1 และ x_2 ที่ได้จากการสุ่มไปคำนวณ D และบันทึกผลลัพธ์ไว้ เมื่อทำซ้ำมากพอจะหาความไม่แน่นอนจากการแจกแจงของผลลัพธ์ได้ จำนวนครั้งที่ทำซ้ำจะต้องมากพอที่จะไม่ทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ D เปลี่ยนแปลงเกิน 1-5% เมื่อทำการสุ่มครั้งต่อ ๆ ไป [32]



รูปที่ 2.10 แผนผังวิธีคำนวณความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

2.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน

หัวข้อนี้จะสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการติดตามรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 6 หัวข้อตามปัจจัยที่ศึกษาคือ

- 1) แรงเสียดทานที่ตำแหน่งจับยึดขึ้นทดสอบ
- 2) สัญญาณรบกวน
- 3) ความต่างเฟสของสัญญาณและตำแหน่งเก็บข้อมูลบนสัญญาณ
- 4) จำนวนข้อมูลต่อรอบ
- 5) ตำแหน่งติดคลิปเกจ
- 6) ตำแหน่งและแนววางตัวของเกจความเครียด

2.4.1 แรงเสียดทานที่ตำแหน่งจับยึดขึ้นทดสอบ

Roy Hewitt [17] ศึกษาผลของแรงเสียดทานที่ตำแหน่งจับยึดขึ้นทดสอบต่อความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวที่ได้จากวิธีคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว การทดสอบให้ภาระล้าแบบภาระสูงสุดคงที่แก่ชิ้นทดสอบด้วยวิธีการตามมาตรฐาน ASTM E647 ใช้ชิ้นทดสอบแบบ C(T) ทำจากวัสดุอลูมิเนียม 2024 T351 ขนาด $W=51$ mm, $B=12.6$ mm และ $E=73$ GPa จับยึดขึ้นทดสอบ 2 แบบ คือ ใช้สลักปกติ และใช้สลักร้อยผ่านตลับลูกปืนเพื่อลดผลของแรงเสียดทาน ทดสอบที่ความยาวรอยร้าวประมาณ 10.3 mm ทำซ้ำ 4 ครั้ง แต่ละครั้งเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 1000 รอบ ข้อมูลของแต่ละรอบในช่วงเพิ่มภาระจำนวน 20 จุดจะนำไปใช้คำนวณความยาวรอยร้าว ตามวิธีในหัวข้อ 2.1 การทดลองจะถอด - ใส่ชิ้นทดสอบใหม่ทุกครั้งที่ทำซ้ำ เพื่อจำลองผลของการติดตั้งชิ้นทดสอบต่อความไม่แน่นอนของผลการวัด

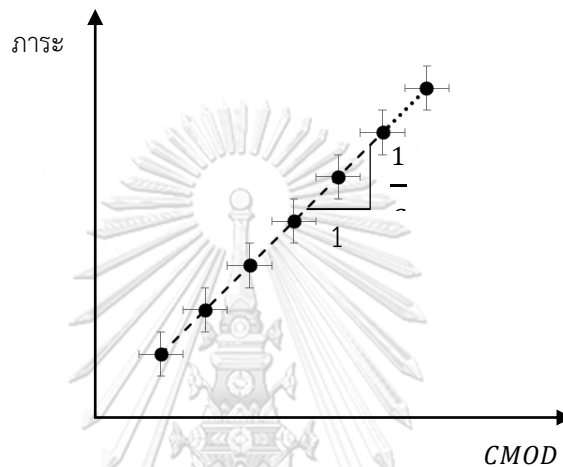
กรณียึดจับขึ้นทดสอบด้วยสลักปกติ พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.029 - 0.061 mm โดยช่วง 200 รอบแรก มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าวมากกว่าช่วงอื่น ๆ เนื่องจากชิ้นทดสอบกำลังปรับตำแหน่งที่เหมาะสม (Self-adjust) ในกรณียึดจับขึ้นทดสอบด้วยสลักร้อยผ่านตลับลูกปืน พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าวที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.027 - 0.040 mm ซึ่งกระจายน้อยกว่า และค่าเฉลี่ยน้อยกว่ากรณียึดจับขึ้นทดสอบด้วยสลักปกติ ดังนั้น ถ้าจุดยึดขึ้นงานมีแรงเสียดทานน้อยลง ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวก็จะลดลง ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า แรงเสียดทานที่ตำแหน่งจับยึดมีผลเป็นสัดส่วนประมาณ 25% ของความไม่แน่นอนรวมทั้งหมด นอกจากนี้เขายังได้แนะนำว่าควรเก็บข้อมูลหลายรอบต่อเนื่องเพื่อให้ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวเฉลี่ยลดลง

2.4.2 สัญญาณรบกวน

นิยามของสัญญาณรบกวน (Noise) [19] คือ สัญญาณแปลกปลอมที่แทรกสอดในสัญญาณจริง สัญญาณรบกวนอาจเกิดจากความร้อน, ความไม่สม่ำเสมอของแหล่งจ่ายไฟฟ้า, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงสั่นสะเทือนจากพื้น เป็นต้น ความไม่แน่นอนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนสามารถหาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่เก็บต่อเนื่องจำนวน 200-300 ข้อมูลขึ้นไป

Roy Hewitt [17] ศึกษาผลของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าต่อความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวที่ได้จากวิธีคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวด้วยวิธีมอนติ คาร์โล เริ่มแรกเขาหาขนาดของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าโดยการเก็บข้อมูลภาระและ $CMOD$ ขณะขึ้นทดสอบไม่ได้รับการภาระจำนวน 1,000 ข้อมูล แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย และส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้ยังกำหนดให้ ขนาดของสัญญาณรบกวนมีการแจกแจงปกติ จากนั้นกำหนดจุดข้อมูล ภาวะและ $CMOD$ ที่สัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยให้มีขนาดเท่ากับตอนที่รอยร้าวยาว 10.3 mm ต่อมาสุ่มค่าของ ขนาดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าแล้วนำไปรวมกับข้อมูล ดังรูปที่ 2.11 จากนั้นหา C_{CMOD} จากสมการเส้นตรงที่ดีที่สุด สุดท้ายนำ C_{CMOD} ไปคำนวณ α หลังจากทำกระบวนการนี้ซ้ำ 1,000 ครั้ง จะทราบการแจกแจงของ α และ ระบุ U_α ได้ ในกรณีที่ไม่มีผลของแรงเสียดทานที่จุดจับยึดขึ้นทดสอบ เขาพบว่า สัญญาณรบกวนทำให้เกิดความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวเท่ากับ 0.025 mm ที่ความเชื่อมั่น 66% เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็น 74% ของความไม่แน่นอนรวมทุกปัจจัย



รูปที่ 2.11 แบบจำลองข้อมูลภาวะและ $CMOD$

Gordon [18] ศึกษาผลของสัญญาณรบกวน และจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ (N_P และ N_{CMOD}) ต่อความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว และ U_α การศึกษาเริ่มจากกำหนดจุด ข้อมูลภาวะและ $CMOD$ ที่สัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น และมีความชันเท่ากับ 1 ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17) จากนั้น กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ (2.16) และ (2.17) แล้วใช้วิธีมอนติ คาร์โลหา C_{CMOD} ซ้ำ 1,000 รอบ ถัดมาหาค่าสูงสุดในผลการคำนวณซ้ำ ผลการศึกษามีแนวโน้มดังรูปที่ 2.12 ความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว แปรผันตามขนาดของสัญญาณรบกวน แต่แปรผกผันกับ N_P และ N_{CMOD}

$$P_i = R_P \cdot \text{Integer} \left[N_P \frac{i}{n} + 0.5 + \text{Noise} \right] \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad (2.16)$$

$$CMOD_i = R_{CMOD} \cdot \text{Integer} \left[N_{CMOD} \frac{i}{n} + 0.5 + \text{Noise} \right] \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad (2.17)$$

โดย P_i คือ ข้อมูลภาวะลำดับที่ i

$CMOD_i$ คือ ข้อมูลระยะร้าวลำดับที่ i

R_P คือ ความละเอียดของอุปกรณ์วัดภาวะ

R_{CMOD} คือ ความละเอียดของอุปกรณ์วัดระยะร้าว

N_P คือ จำนวนข้อมูลภาวะสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ, $\delta P/R_P$

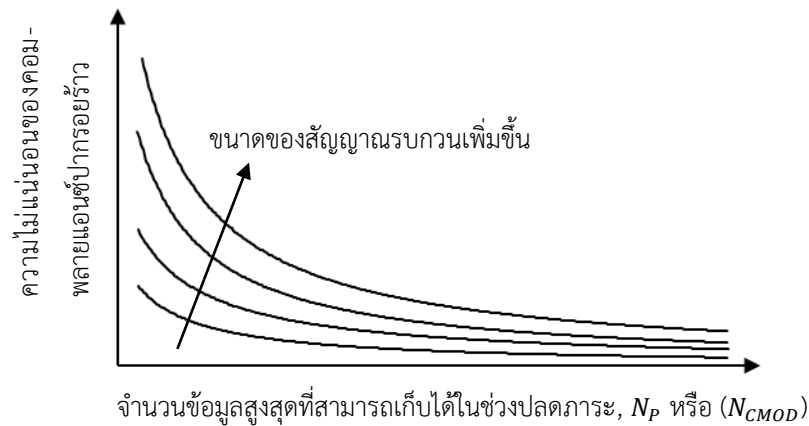
N_{CMOD} คือ จำนวนข้อมูลระยะร้าวสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ, $\delta CMOD/R_{CMOD}$

Noise คือ ขนาดสัญญาณรบกวน

n คือ จำนวนข้อมูลของภาระและระยะอัปกรอยร้าวที่ใช้คำนวณคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว

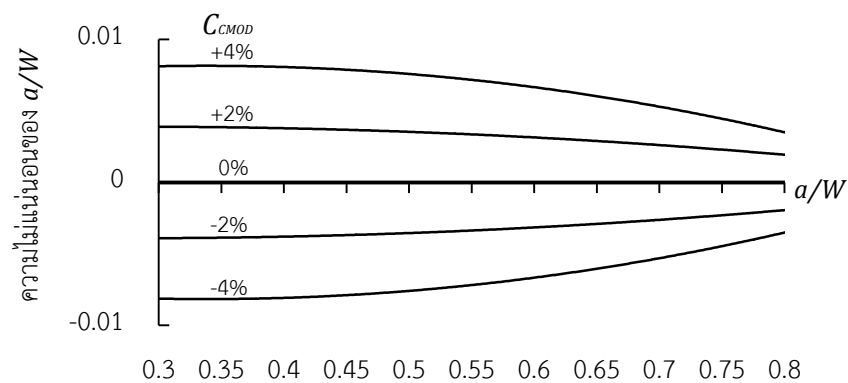
δP คือ พิสัยของภาระในช่วงปลดภาระ

δC_{MOD} คือ พิสัยของระยะอัปกรอยร้าวในช่วงปลดภาระ



รูปที่ 2.12 ผลของสัญญาณรบกวน และจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ ต่อความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว

สำหรับผลความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวพบว่า U_a แปรผันกับความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวและจะส่งผลน้อยลงเมื่อ a/W มากขึ้น ดังรูปที่ 2.13 เขายังเสนอว่า ถ้าความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวไม่เกิน 3% แล้วอาจถือว่าไม่มีผลต่อ a

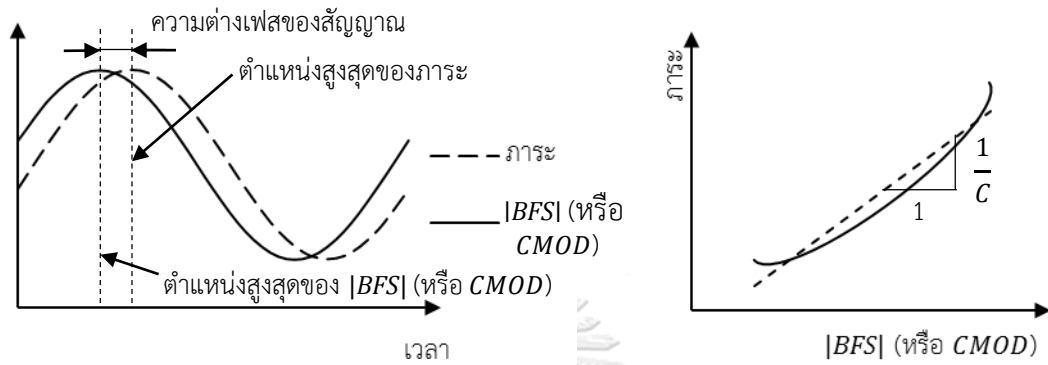


รูปที่ 2.13 ผลของความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวต่อ U_a

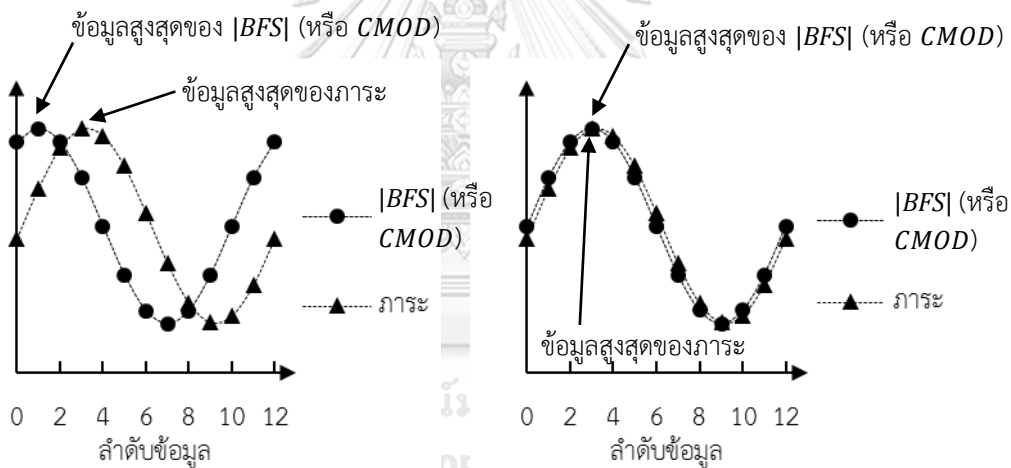
2.4.3 ความต่างเฟสของสัญญาณและตำแหน่งเก็บข้อมูลบนสัญญาณ

นิยามของความต่างเฟสของสัญญาณ [19] คือ ความแตกต่างของเวลาหรือมุมของสัญญาณ 2 ชุด ที่มีความถี่เดียวกัน รูปที่ 2.15 ซ้ายมือแสดงตัวอย่างสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่งสูงสุด (Peak) ของสัญญาณทั้งสองเกิดที่เวลาต่างกัน ความต่างเฟสเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ADC รับสัญญาณเข้าไม่พร้อมกันทุกช่องสัญญาณ, อุปกรณ์เก็บสัญญาณแต่ละชนิดทำงานโดยอ้างอิงกับสัญญาณนาฬิกาต่างกัน, สัญญาณแต่ละชุดผ่านตัวกรอง (Filter) ที่มีแบนด์วิดท์ต่างกัน ฯลฯ ความต่างเฟสทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและ *BFS* (หรือ

CMOD) ช่วงปลดภาระมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงรี ดังรูปที่ 2.14 ด้านขวา แทนที่จะเป็นเส้นตรง ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของ *C* การลดความไม่แน่นอนจากความต่างเฟสทำได้โดยนำสัญญาณก่อนจะหา *C* เช่น สัญญาณในรูปที่ 2.15 ด้านซ้าย มาปรับให้ตำแหน่ง เช่นภาระสูงสุด ตรงกับตำแหน่ง *BFS* (หรือ *CMOD*) สูงสุด ดังรูปที่ 2.16 ด้านขวา

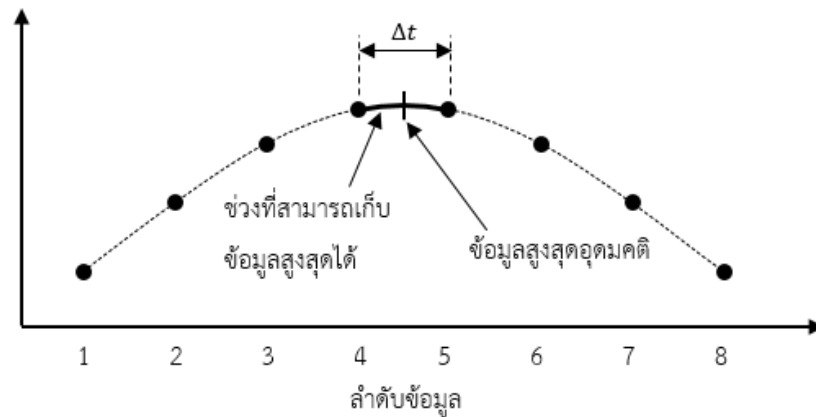


รูปที่ 2.14 ผลของความต่างเฟสของสัญญาณต่อความคลาดเคลื่อนของ *C*

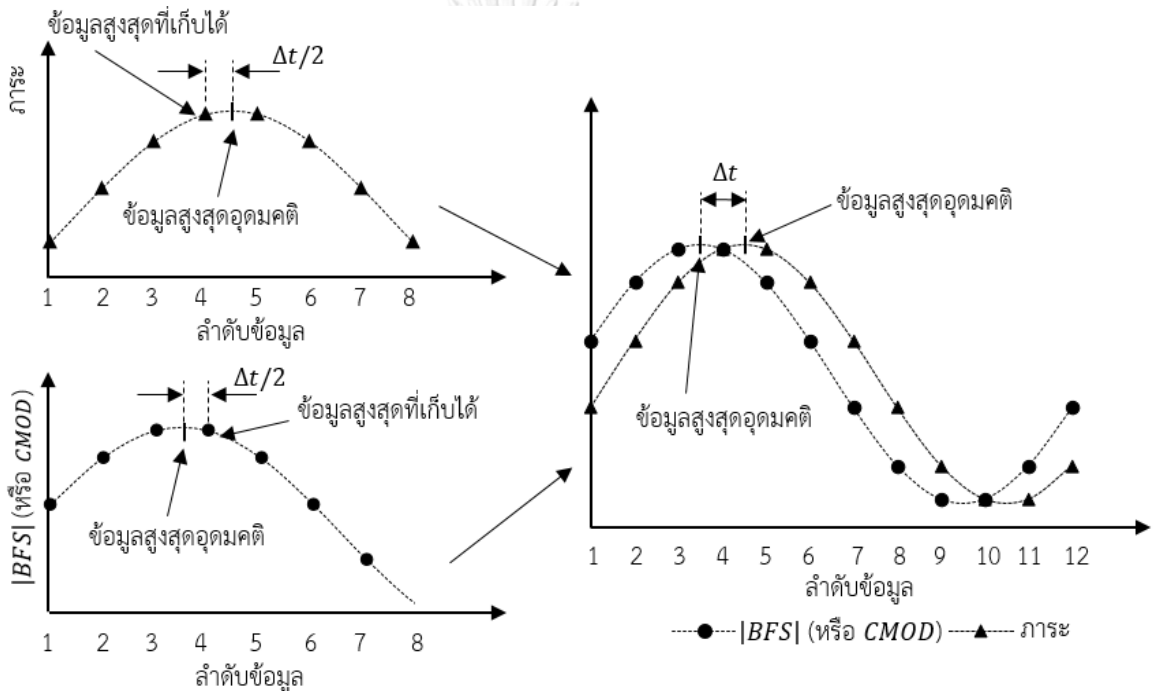


รูปที่ 2.15 การปรับตำแหน่งสัญญาณเพื่อลดความต่างเฟส

เนื่องจากตำแหน่งของจุดข้อมูลแต่ละจุดบนสัญญาณไม่ได้อยู่ที่เดิมตลอด ข้อมูลสูงสุดที่เก็บได้จึงมีโอกาสคลาดเคลื่อนจากค่าสูงสุดอุดมคติภายในช่วงเวลา $\pm \Delta t/2$ ดังรูปที่ 2.16 โดย Δt คือระยะเวลาระหว่างการเก็บข้อมูลแต่ละค่า ดังนั้นแม้จะปรับตำแหน่งสัญญาณแล้วก็ยังมีความต่างเฟส รูปที่ 2.17 แสดงสถานการณ์ที่ความต่างเฟสของเหลือมีค่าสูงสุด จากรูป 2.17 ข้อมูลสูงสุดของภาระที่เก็บได้อยู่ด้านซ้ายของค่าสูงสุดอุดมคติ ในขณะที่ข้อมูลสูงสุดของ *BFS* (หรือ *CMOD*) ที่เก็บได้อยู่ด้านขวาของข้อมูลสูงสุดอุดมคติตามลำดับ จะทำให้หลังจากจัดเฟสเสร็จแล้วจะเหลือความต่างของสัญญาณ Δt



รูปที่ 2.16 ช่วงที่สามารถเก็บข้อมูลสูงสุดได้

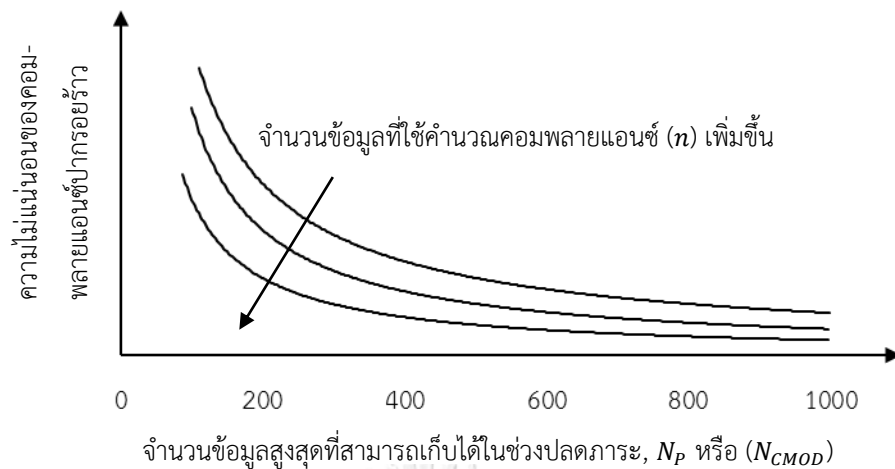


รูปที่ 2.17 กรณีที่เกิดความต่างเฟสมากที่สุด

2.4.4 จำนวนข้อมูลต่อรอบ

จำนวนข้อมูลต่อรอบ (Number of sample per cycle) เกี่ยวข้องกับระยะเวลาระหว่างการเก็บข้อมูลแต่ละค่า Δt ดังนั้นจึงมีผลต่อความต่างเฟสของสัญญาณที่เหลือหลังปรับตำแหน่ง ดังนั้น ถ้าจำนวนข้อมูลต่อรอบเพิ่มขึ้นความต่างเฟสก็จะลดลง ซึ่งจะทำให้ U_c ลดลง

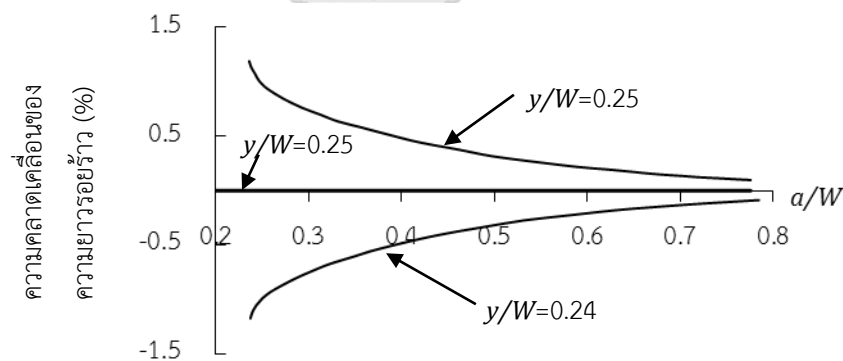
Gordon (1986) [18] ศึกษาผลของจำนวนข้อมูลที่ใช้จำนวน C ด้วยวิธีเหมือนกับที่อธิบายในหัวข้อ 2.4.2 เขาพบว่าความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวแปรผกผันกับจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาระ และจำนวนข้อมูลที่ใช้จำนวน C ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลของจำนวนข้อมูลที่ใช้คำนวณ C และจำนวนข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บได้ในช่วงปลดภาวะต่อความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าว

2.4.5 ตำแหน่งติดคลิบเกจ

Maxwell และผู้ร่วมวิจัย [13] พบว่าตำแหน่งติดคลิบเกจ ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณ a ดังรูปที่ 2.19 โดย y คือระยะจากแนวภาวะถึงตำแหน่งติดคลิบเกจดังรูปที่ 1.1 (ข) จากรูปจะเห็นว่าหากระยะ y คลาดเคลื่อนจากระยะ $0.25W$ แล้วจะส่งผลให้วัดระยะเปิดปากรอยร้าวต่างไปจากที่สมการ (2.1) กำหนด ซึ่งเป็นผลให้คำนวณ a คลาดเคลื่อนไปด้วย อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของ a จะลดลงเมื่อ a เพิ่มขึ้น

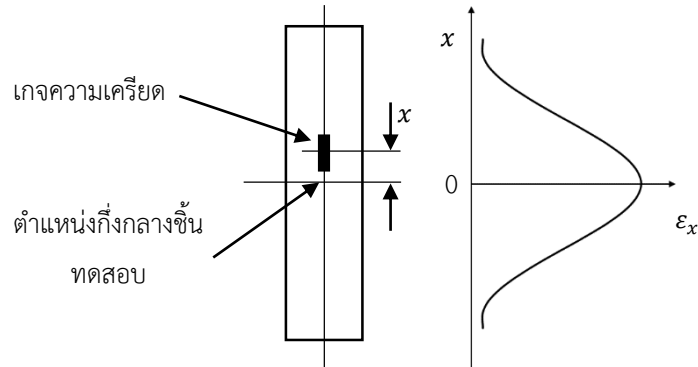


รูปที่ 2.19 ผลของตำแหน่งติดตั้งคลิบเกจต่อความคลาดเคลื่อนของ a

2.4.6 ตำแหน่งและแนววางตัวของเกจความเครียด

Deans และผู้ร่วมวิจัย [14,15] สร้างแบบจำลอง 2 มิติ เพื่อศึกษาขนาดของความเครียดบนผิวด้านหลังขึ้นทดสอบ งานวิจัยพบว่า ความเครียดขึ้นกับระยะตามแนวตั้งฉากกับระนาบรอยร้าวดังรูปที่ 2.20 ด้านขวา โดย x คือระยะห่างจากแนวกึ่งกลางขึ้นทดสอบ ดังนั้นถ้าติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งกึ่งกลาง (หรือระยะนาบรอยร้าว) ดังรูปที่ 2.20 ด้านซ้าย ความเครียดที่วัดก็จะมีค่าแตกต่างจากที่สมการ (2.1) กำหนด (ซึ่งหมายถึงความเครียดสูงสุด) กล่าวอีกอย่างคือ ตำแหน่งของเกจความเครียดตามแนวตั้งฉากกับระนาบรอยร้าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของ BFS สำหรับความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความหนา พบว่ามีขนาด

สมำเสมอ กล่าวคือ ตำแหน่งของเกจความเครียดตามแนวความหนาขึ้นทดสอบไม่ใช่ปัจจัยที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนของ *BFS*



(ด้านหลังขึ้นทดสอบ)

รูปที่ 2.20 ตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียดและลักษณะของความเครียดบนผิวด้านหลังขึ้นทดสอบ

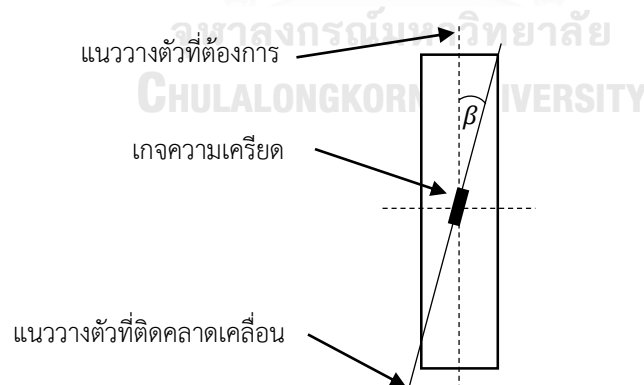
แนววางตัวของเกจความเครียดเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของ *BFS* เช่นกัน เพราะเมื่อแนววางตัวต่างจากแนวที่ต้องการวัด (ดูรูป 2.21 ประกอบ) แล้วความเครียดที่วัดได้ก็จะต่างจากค่าที่ควรจะเป็น เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18) [20]

$$err_{ang} = \frac{\cos 2\beta - 1}{1 - \nu} \times 100 \quad (2.18)$$

โดย err_{ang} คือ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเครียดเมื่อเทียบกับความเครียดตามนิยามในสมการ (2.1)

β คือ มุมระหว่างแนววางตัวของเกจความเครียด กับแนวที่ต้องการวัดความเครียด

ν คือ อัตราส่วนปัวร์ซอง

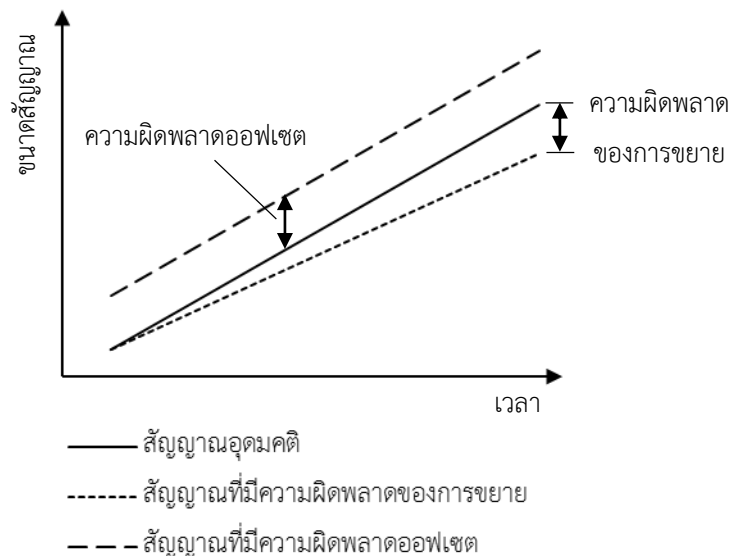


(ด้านหลังขึ้นทดสอบ)

รูปที่ 2.21 แนววางตัวของเกจความเครียด

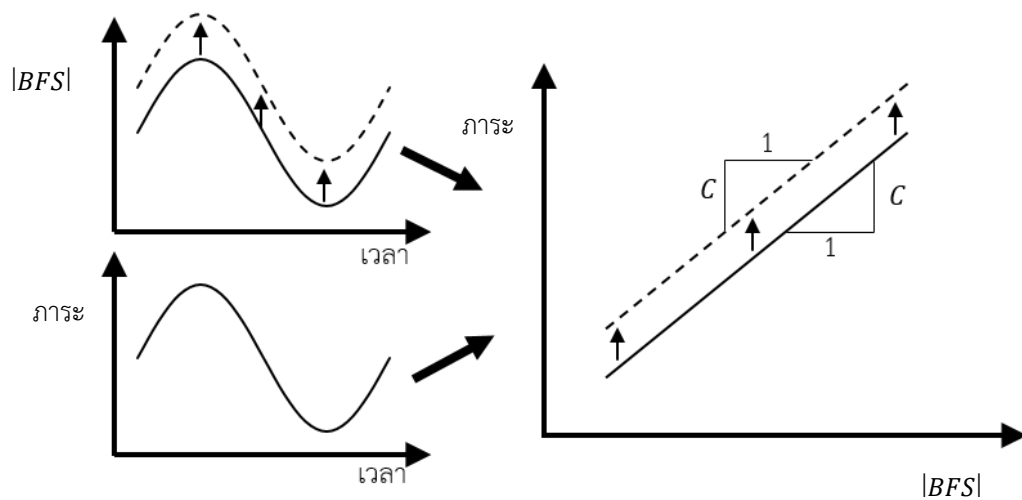
2.4.7 ความแม่นยำของ ADC

ความแม่นยำของ ADC คือขอบเขตความผิดพลาดในการวัดค่าของ ADC ซึ่งประกอบด้วย ความผิดพลาดจากการขยาย (Gain error) และความผิดพลาดออฟเซต (Offset error) ความผิดพลาดทั้ง 2 ส่งผลให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาดไปจากความจริงโดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.22



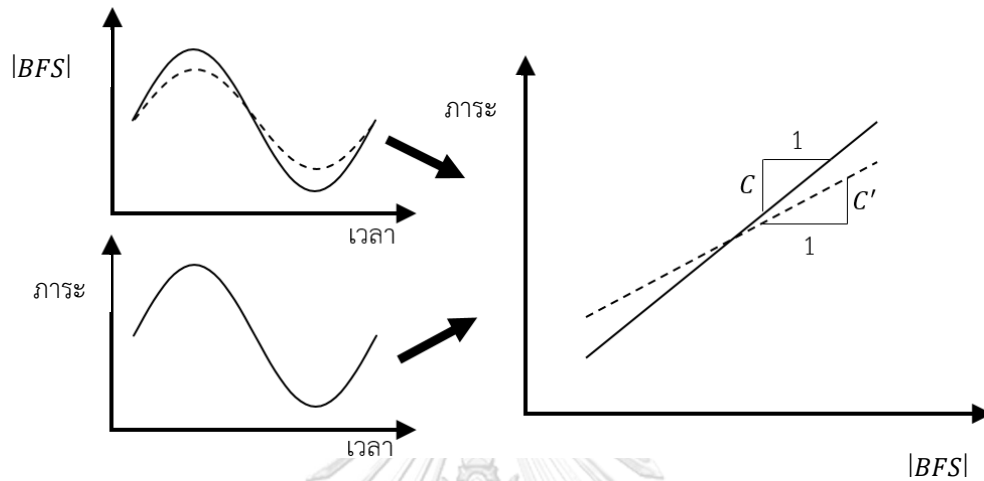
รูปที่ 2.22 ความผิดพลาดออฟเซตและความผิดพลาดของการขยาย

ความผิดพลาดจากการขยายจะทำให้ค่าที่วัดผิดพลาดโดยขึ้นกับขนาดของค่าที่วัด ส่วนความผิดพลาดออฟเซตทำให้ค่าที่วัดผิดพลาดขึ้นกับพิสัยการวัดของอุปกรณ์วัด จากความผิดพลาดทั้ง 2 มีเพียงความผิดพลาดจากการขยายที่ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในการคำนวณคอมพลายแอนซ์ เนื่องจากการคำนวณ C เป็นการหาความชันระหว่าง BFS (หรือ $CMOD$) และภาวะ ในช่วงปลดภาระ ความผิดพลาดออฟเซตจะทำให้ข้อมูลมีขนาดมากหรือน้อยกว่าความจริงเท่า ๆ กันทุกข้อมูลซึ่งไม่ส่งผลกับการคำนวณความชัน ยกตัวอย่าง BFS มีผลความผิดพลาดจากการขยายดังรูป 2.23 โดยเส้นเต็มในรูปหมายถึงข้อมูลอุดมคติ ส่วนเส้นประหมายถึงข้อมูลที่มีผลของความผิดพลาดออฟเซต



รูปที่ 2.23 ผลของความผิดพลาดออฟเซตต่อการคำนวณคอมพลายแอนซ์

ในขณะที่ความผิดพลาดของการขยายนั้นขึ้นกับขนาดของค่าที่วัดได้ ทำให้แอมพลิจูดของ BFS เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณ C ดังรูป 2.24 โดยเส้นเต็มในรูปหมายถึงข้อมูลอุดมคติ ส่วนเส้นประหมายถึงข้อมูลที่มีผลของความผิดพลาดของการขยาย ดังนั้นขนาดความแม่นยำของ ADC ซึ่งจะนำมาใช้หาความไม่แน่นอนจะใช้เพียงความไม่แน่นอนที่เกิดจากความผิดพลาดจากการขยายเท่านั้น



รูปที่ 2.24 ผลของความผิดพลาดของการขยายต่อการคำนวณ C

บทที่ 3

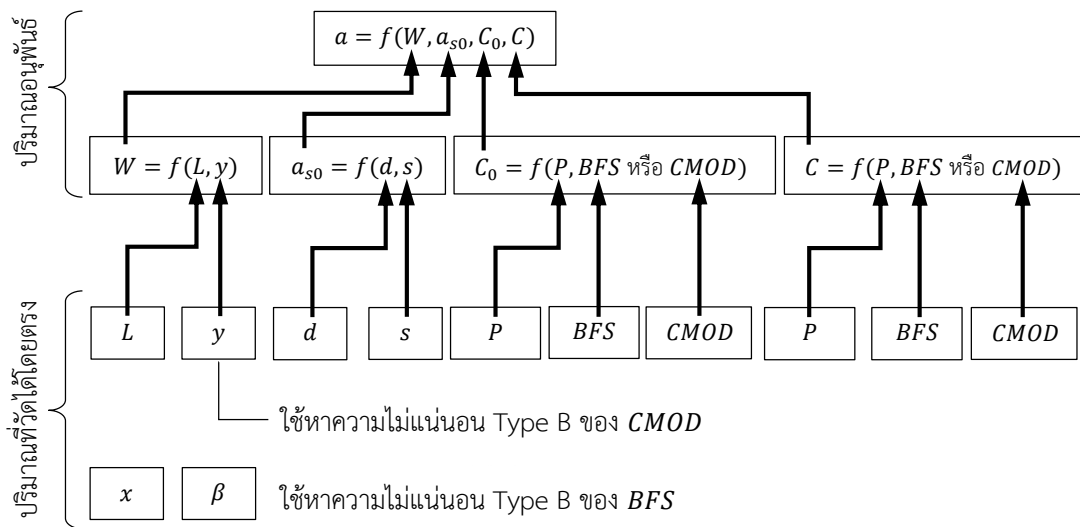
การดำเนินงาน

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการดำเนินงาน เริ่มจากหัวข้อ 3.1 อธิบายแนวทางการดำเนินงาน หัวข้อ 3.2 อธิบายขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ หัวข้อ 3.3 อธิบายรายละเอียดการทดสอบ หัวข้อ 3.4 อธิบายการวัดความยาวรอยร้าวกายภาพจากขอบหน้ารอยร้าวที่สร้าง หัวข้อ 3.5 อธิบายการการคำนวณคอมพลายแอนซ์ หัวข้อ 3.6 อธิบายวิธีการคำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์ สุดท้ายหัวข้อ 3.7 อธิบายวิธีการคำนวณความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์

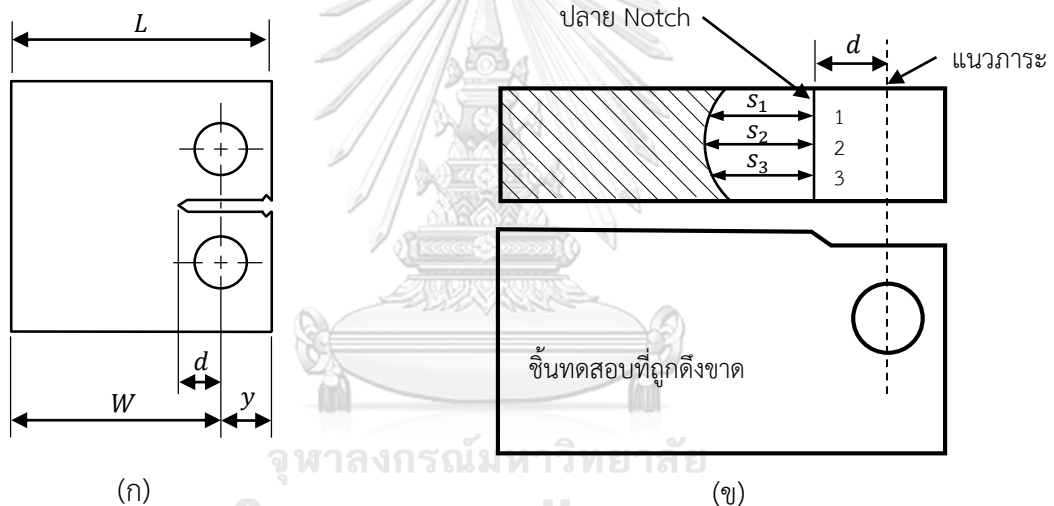
3.1 แนวทางการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ หาขนาดและศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวที่ได้จากวิธีคอมพลายแอนซ์ (U_a) วิธีบรรลุวัตถุประสงค์นี้จะต้องหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของปริมาณที่ใช้คำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์ (a) ซึ่งมี 4 อย่าง คือ 1) ความกว้างของชิ้นทดสอบ (W) 2) ความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น (a_{s0}) 3) คอมพลายแอนซ์ที่รอยร้าวเริ่มต้น (C_0) 4) คอมพลายแอนซ์ที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ (C) การหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ใช้การทดสอบภายใต้ภาระล้าที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ซึ่งจะครอบคลุมทุกปัจจัยที่ต้องการศึกษา การทดสอบจะเก็บข้อมูล *BFS*, *CMOD* และภาระ แล้วนำไปคำนวณคอมพลายแอนซ์ รายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อ 3.3 ส่วนค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ W และ a_{s0} หาได้จากการวัดขนาดของชิ้นทดสอบ และระยะจากแนวภาระถึงขอบหน้ารอยร้าว ตามลำดับ นอกจากนี้ยังต้องวัดระยะและแนวที่ติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อนจากที่ต้องการ (x และ β) รวมถึงตำแหน่งที่ติดคลิปเกจ (y) เพื่อใช้หาความไม่แน่นอน Type B ของ *BFS* และ *CMOD* อีกด้วย หลังจากได้ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของปริมาณทั้งสี่ และความแม่นยำของสมการ (2.1) แล้วจึงนำไปหาความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ แผนผังในรูป 3.1 แสดงปริมาณที่ต้องวัดเพื่อหาความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว และลำดับการแผ่ของความไม่แน่นอนจากปริมาณที่วัดไปสู่ความยาวรอยร้าว โดย L , y และ d คือขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบดังรูป 3.2 (ก) ส่วน s คือ ระยะจากปลาย Notch ถึงขอบหน้ารอยร้าว ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งที่วัดของแต่ละนิยาม รูป 3.2 (ข) แสดงตัวอย่างระยะ s ของวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง

วัตถุประสงค์อีกอย่างของงานวิจัยนี้ คือ เปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างความยาวรอยร้าวกายภาพกับความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากคอมพลายแอนซ์ วิธีบรรลุวัตถุประสงค์นี้จะต้องสร้างขอบหน้ารอยร้าวที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ บนชิ้นทดสอบเพื่อวัดความยาวรอยร้าวกายภาพ ในขณะที่เดียวกันก็เก็บข้อมูล *BFS*, *CMOD* และภาระ ณ ตำแหน่งขอบหน้าที่สร้าง เพื่อนำไปคำนวณความยาวรอยร้าวด้วยวิธีคอมพลายแอนซ์ จากนั้นเปรียบเทียบความยาวรอยร้าวทั้ง 2 วิธี



รูปที่ 3.1 ปริมาณที่ต้องวัดและลำดับการคำนวณเพื่อหาความยาวรอยร้าว



รูปที่ 3.2 ทดสอบแบบ C(T)

- ก) ขนาดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ
- ข) ระยะที่วัดเพื่อหาความยาวรอยร้าวกายภาพ

3.2 การเตรียมชั้นทดสอบ

หัวข้อนี้จะนำเสนอการเตรียมชั้นทดสอบสำหรับการทดสอบ และวิธีวัดขนาดส่วนต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ รวมถึงตำแหน่งและแนวที่ติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนซึ่งใช้ในการคำนวณความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว เนื้อหาแบ่งเป็น 4 ส่วน 1) อุปกรณ์วัดขนาด 2) การขึ้นรูปชั้นทดสอบ 3) การวัดขนาดชั้นทดสอบ 4) การติดตั้งและวัดตำแหน่งเกจความเครียด

3.2.1 อุปกรณ์วัดขนาด

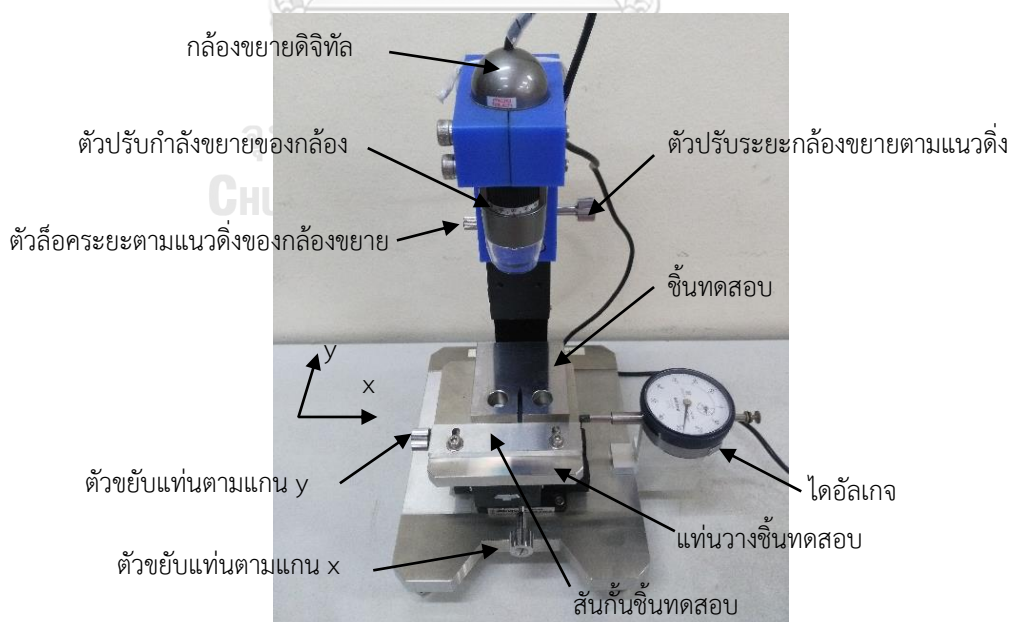
งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดขนาด 3 อย่าง คือ เวอร์เนียร์ดิจิทัลดิจิทัล, กล้องขยายดิจิทัลดิจิทัล และไดอัลเกจ ข้อมูลจำเพาะของแต่ละอุปกรณ์สรุปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำเพาะของอุปกรณ์วัดขนาด

อุปกรณ์	ข้อมูลจำเพาะที่สำคัญ
เวอร์เนียร์ดิจิทัลดิจิทัล	พิสัย 0 - 150 mm, ความละเอียด 10 μm , ความแม่นยำ 25.4 μm
กล้องขยายดิจิทัลดิจิทัล	กำลังขยาย 20 - 90 เท่า ที่กำลังขยาย 20 เท่า : ความละเอียด 33.5 μm , ความแม่นยำ 27.8 μm ⁽¹⁾ ที่กำลังขยาย 30 เท่า : ความละเอียด 21.5 μm , ความแม่นยำ 7.78 μm ⁽¹⁾
ไดอัลเกจ	พิสัย 0 - 20 mm, ความละเอียด 10 μm , ความแม่นยำ 20 μm

⁽¹⁾ ความแม่นยำของกล้องขยายดิจิทัลดิจิทัลได้จากการสอบเทียบกับเกจบล็อก ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก.1

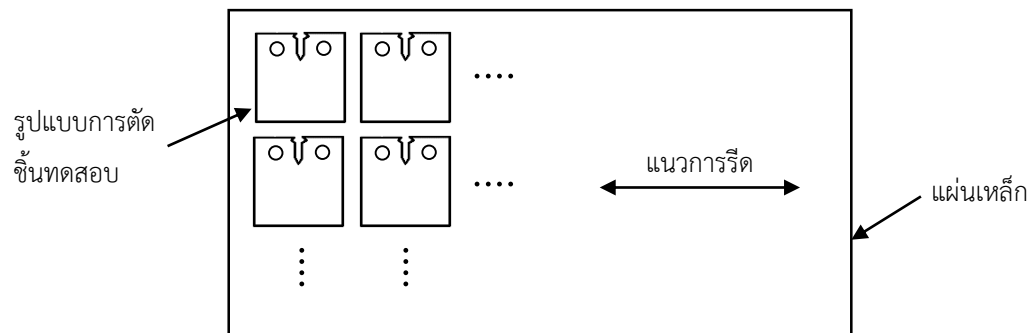
กล้องขยายดิจิทัลดิจิทัลมีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.3 การทำงานของกล้องขยาย คือ ถ่ายภาพของวัตถุบนแท่นวางขึ้นทดสอบแล้วแสดงบนจอภาพผ่านซอฟต์แวร์ของกล้อง ขอบเขตของภาพถ่ายขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ซอฟต์แวร์สามารถวาดรูปทรงเรขาคณิตบนภาพถ่าย จึงสามารถใช้วัดขนาดของวัตถุ หรือระบุตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมได้ นอกจากนี้ แท่นวางขึ้นทดสอบสามารถปรับให้เคลื่อนที่ในแกน x และ y ได้ โดยแกนทั้งสองจะขนานกับเส้นตั้งและเส้นนอนที่ซอฟต์แวร์วาด ตามลำดับ บนแท่นวางจะมีแท่งเหล็กยึดติดกับแท่น เรียกว่า สันกันขึ้นทดสอบ สำหรับกำหนดตำแหน่งขึ้นทดสอบ แนวของสันกันนี้จะขนานกับแกน x ของแท่นวาง ที่ฐานของกล้องขยายจะติดตั้งไดอัลเกจซึ่งใช้วัดระยะเคลื่อนที่แกน x ของแท่นวางขึ้นทดสอบ



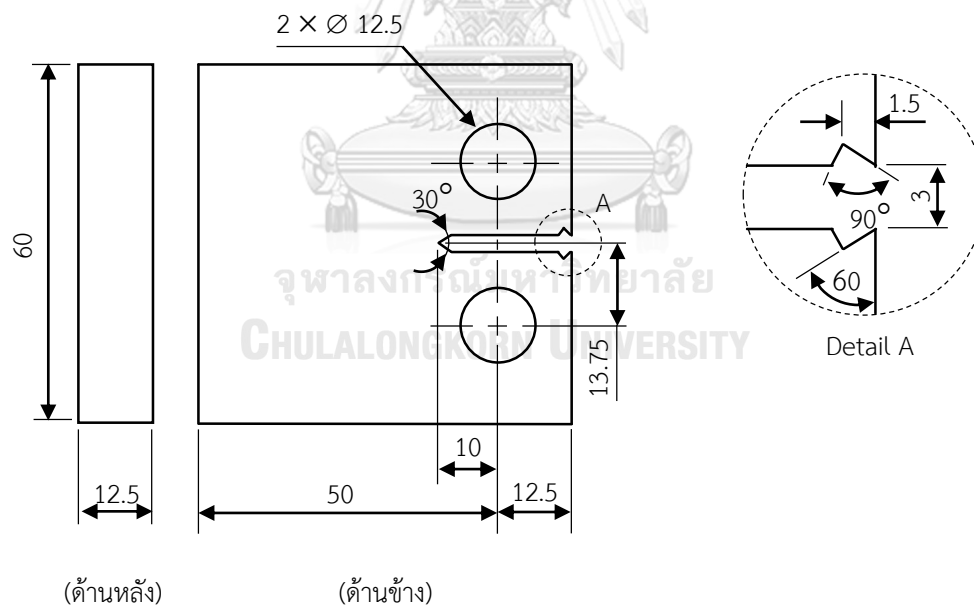
รูปที่ 3.3 กล้องขยายดิจิทัลดิจิทัล

3.2.2 การขึ้นรูป

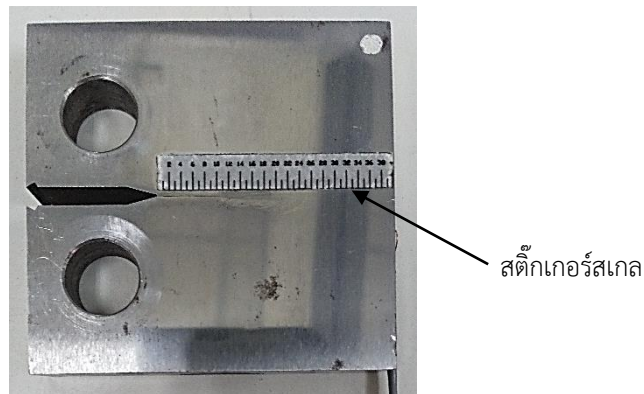
ชิ้นทดสอบตัดมาจากแผ่นเหล็กกล้าเบอร์ A516 Gr70 ให้เป็นชิ้นทดสอบแบบ C(T) โดยมีทิศการวางตัวของชิ้นทดสอบเทียบกับแนวการรีดของแผ่นเหล็กเป็นแบบ L-T ดังรูป 3.4 ชิ้นทดสอบมีขนาดดังรูป 3.5 สัดส่วนของชิ้นทดสอบทำตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E647 หลังจากขึ้นรูปเสร็จจะขัดผิวด้านข้างทั้ง 2 ด้านของชิ้นทดสอบให้เรียบเงาด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 เพื่อให้เห็นรอยร้าวบนผิวด้านข้างได้ชัดเจนเวลาวัดความยาวรอยร้าวระหว่างการทดสอบด้วยวิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง โดยจะอ่านขนาดความยาวรอยร้าวจากสเกลสติกเกอร์สเกลที่ติดบนชิ้นทดสอบดังรูป 3.6



รูปที่ 3.4 การวางตัวของชิ้นทดสอบเทียบกับแนวการรีดของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 3.5 ขนาดของชิ้นทดสอบ (หน่วยเป็น mm)

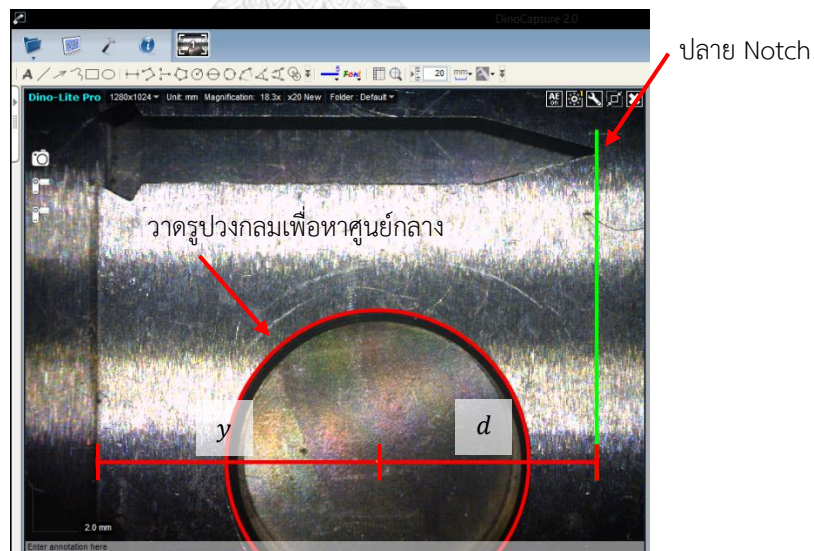


รูปที่ 3.6 สติกเกอร์สำหรับระบุความยาวรอยร้าวที่ผิวด้านข้างชิ้นทดสอบ

3.2.3 การวัดขนาด

หลังจากขัดชิ้นทดสอบเสร็จแล้วจะนำมาวัดขนาดส่วนต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย ตำแหน่งติดคลิปเกจ (y), ระยะจากแนวหาระถึงปลาย Notch (d), ความหนาชิ้นทดสอบ (B) และความกว้างชิ้นทดสอบ (W) ดังรูป 3.2(ก) การวัดจะวัดซ้ำหลายครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอน

การวัด y และ d ใช้กล้องขยายดิจิทัลที่กำลังขยาย 20 เท่า ถ่ายภาพด้านข้างชิ้นทดสอบ การวัดจะใช้ฟังก์ชันในซอฟต์แวร์ของกล้องขยายวาดรูปวงกลมเพื่อหาศูนย์กลางของรูสอด Pin จับยึด (ซึ่งก็คือตำแหน่งที่แนวหาระผ่าน) แล้ววัดขนาด y และ d ดังรูป 3.7 โดยจะเลือกวัดที่รูใดรูหนึ่งก่อน 3 ครั้ง จากนั้นเปลี่ยนไปวัดรูที่เหลืออีก 2 ครั้ง รวมทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อให้ผลการวัดครอบคลุมความไม่คงเส้นคงวาจากผู้วัด และความคลาดเคลื่อนของชิ้นทดสอบ



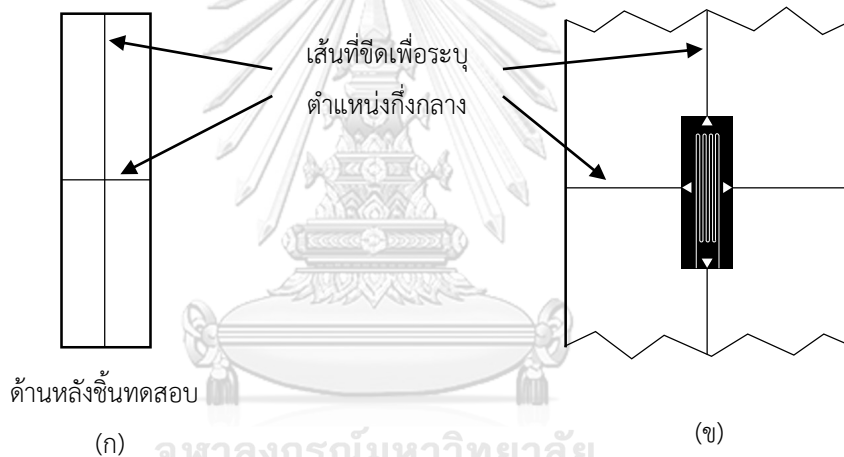
รูปที่ 3.7 การวัด y และ d ด้วยกล้องขยายดิจิทัล

ต่อมาวัด W โดยการวัดขนาด L ด้วยเวอร์เนียร์ดิจิทัลดังรูป 3.2 (ก) แล้วลบด้วยขนาด y ที่วัดไปก่อนหน้านี้ การวัดขนาด L จะวัดซ้ำ 5 ครั้งเช่นเดียวกับ y แต่ทุกครั้งจะเปลี่ยนตำแหน่งวัดให้ครอบคลุมตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวสูงของชิ้นทดสอบเพื่อรวมผลของความไม่คงเส้นคงวาของขนาดวัด และความไม่สม่ำเสมอของชิ้นทดสอบ

ปริมาณที่วัดทั้งหมดมีจุดประสงค์การเอาไปใช้งานต่างกัน (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) โดย y จะถูกนำไปใช้หาความไม่แน่นอนของ $CMOD$ จากผลของตำแหน่งติดคลิปเกจ d จะนำไปใช้หาขนาดและความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวกายภาพ ส่วน W จะนำไปใช้หาขนาดและความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวจากวิธีคอมพิวเตอร์

3.2.4 การติดตั้งและวัดตำแหน่งเกจความเครียด

หลังจากวัดขนาดชิ้นทดสอบแล้ว จะนำชิ้นทดสอบมาติดเกจความเครียดที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชิ้นทดสอบ ขั้นตอนเริ่มจากรับตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชิ้นทดสอบด้วยการใช้ไม้บรรทัดทาบบนชิ้นทดสอบแล้วหาตำแหน่งกึ่งกลาง จากนั้นใช้ปากกาเคมีขีดเส้นระบุตำแหน่งกึ่งกลางทั้งตามแนวความหนาและแนวความสูงของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.8 (ก) โดยตำแหน่งที่เส้นตัดกันคือตำแหน่งกึ่งกลาง ถัดมาติดเทปใสที่เกจความเครียดแล้วนำมาติดที่ตำแหน่งที่ขีดเส้นไว้ โดยให้เครื่องหมายลูกศรบนเกจความเครียดตรงกับแนวเส้นที่ขีดไว้ดังรูป 3.8 (ข) จากนั้นลบเส้นที่ขีดไว้ให้สะอาดด้วยอะซิโตน แล้วติดเกจความเครียดกับชิ้นทดสอบด้วยกาวไซยาโนอะคริเลต สุดท้ายปล่อยให้กาวแห้งอย่างน้อย 10 ชั่วโมง

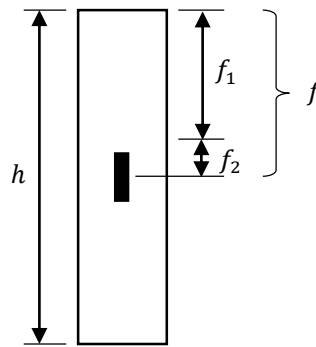


รูปที่ 3.8 การติดเกจความเครียด

ก) การระบุตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นทดสอบ

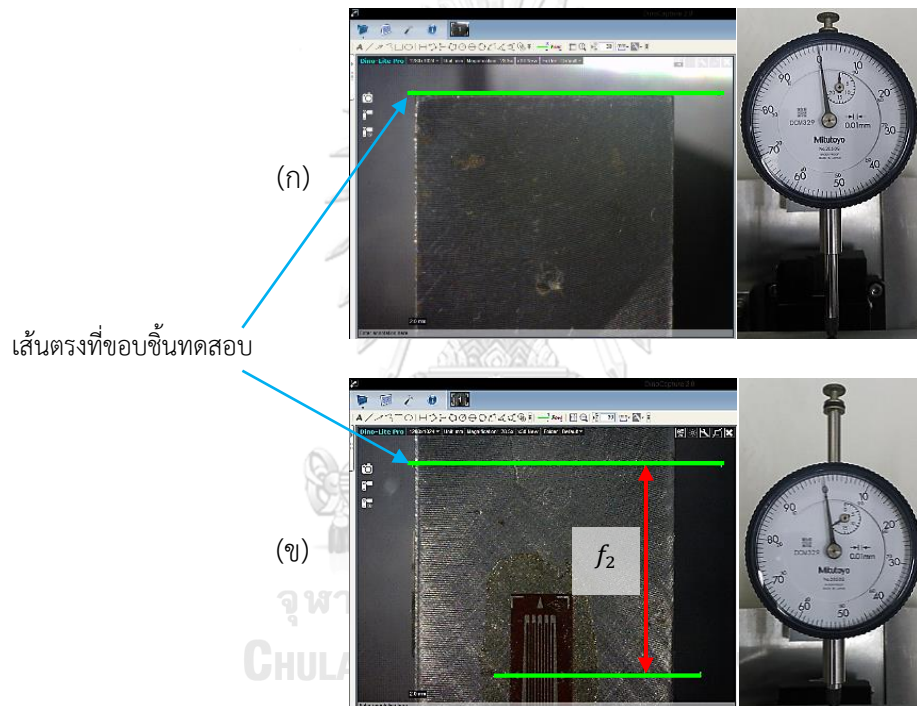
ข) การติดเกจความเครียดที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นทดสอบ

หลังจากกาวแห้งจะวัดตำแหน่งและแนววางตัวที่ติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อน (x) การวัดเริ่มจากใช้เวอร์เนียร์ดิจิทัลดัดความสูงของชิ้นทดสอบ (h) ดังรูป 3.9 จากนั้นวัดระยะ f การวัดระยะนี้จะใช้กล้องขยายดิจิทัลดัดภาพด้านหลังชิ้นทดสอบบริเวณขอบด้านหนึ่งที่กำลังขยาย 30 เท่า โดยวางชิ้นทดสอบให้แนวสูงขนานกับแกน x ของแท่นวาง แล้ววาดเส้นตรงที่ขอบชิ้นทดสอบดังรูป 3.10 จากนั้นจะขยับแท่นวางชิ้นทดสอบให้เส้นตรงที่วาดขยับในทิศทางเข้าใกล้เกจความเครียดตามแกน x เป็นระยะ 20 mm (ระยะนี้คือ f_1) จะพบว่าเกจความเครียดอยู่ในระยะที่ถ่ายภาพได้ โดยที่เส้นตรงที่เคยวาดไว้ยังอยู่ตำแหน่งเดิมบนภาพ ถัดมาวาดเส้นตรงผ่านตำแหน่งกึ่งกลางเกจความเครียดแล้ววัดระยะห่างจากเส้นตรงที่วาดในตอนแรกกับเส้นตรงนี้ (f_2) สุดท้ายคำนวณระยะที่ติดเกจความเครียดคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งกึ่งกลางด้วยสมการ $x = \left| \frac{h}{2} - (f_1 + f_2) \right|$ การวัดค่า h , f_1 และ f_2 จะวัดซ้ำอย่างละ 5 ครั้ง

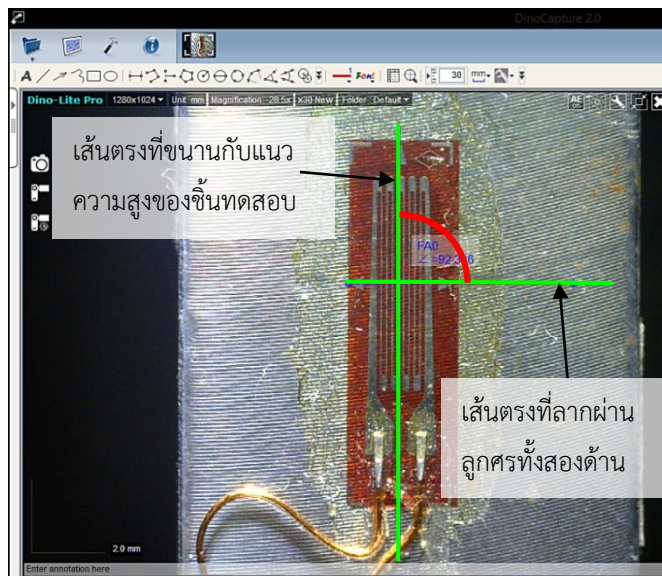


ด้านหลังชิ้นทดสอบ

รูปที่ 3.9 ระยะที่ใช้วัดเพื่อหาระยะที่ติดגעความเครียดคลาดเคลื่อน

รูปที่ 3.10 การวัดระยะ f_1 และ f_2

การวัดแนววางตัวที่ติดגעความเครียดคลาดเคลื่อน (β) จะใช้กล้องขยายดิจิทัลถ่ายภาพגעความเครียด จากนั้นวาดเส้นตรงแนวตั้งขึ้นมาหนึ่งเส้น โดยให้ขนานกับแนวความสูงของชิ้นทดสอบ (แนวที่ต้องการวัดความเครียด) ถัดมาวาดเส้นตรงอีกเส้นโดยเส้นตรงนี้จะตัดผ่านปลายหัวลูกศรด้านข้างทั้งสองอันของגעความเครียด ดังรูป 3.11 สุดท้ายวัดมุมระหว่างเส้นตรงทั้งสองแล้วนำมาลบด้วย 90° ผลต่างที่ได้คือมุมที่ติดגעความเครียดคลาดเคลื่อนไปจากแนวที่ต้องการวัด การวัดแนววางตัวจะวัดซ้ำ 5 ครั้ง



รูปที่ 3.11 การวัดมุมที่ติดเคจความเครียดคลาดเคลื่อนไปจากแนวที่ต้องการวัด

3.3 การทดสอบ

หัวข้อนี้จะพูดถึงรายละเอียดการทดสอบซึ่งประกอบด้วย ระบบทดสอบที่ใช้, ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนที่ศึกษา และอธิบายขั้นตอนการทดสอบ

3.3.1 ระบบทดสอบ

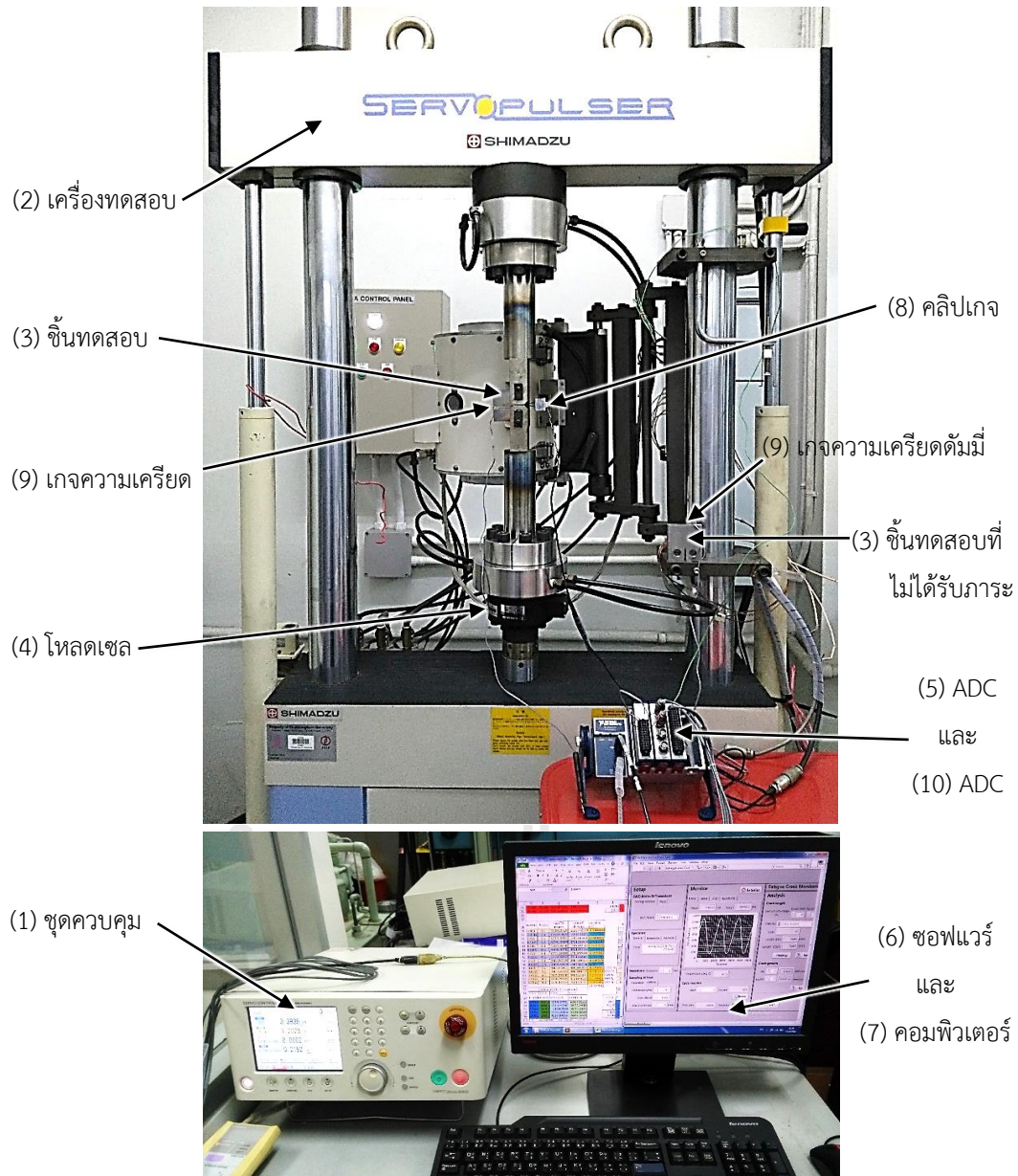
ระบบทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย คือ ระบบทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวลำ รุปและแผนผังของระบบทดสอบแสดงดังรูป 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์สรุปดังตารางที่ 3.2 โดยหมายเลขของอุปกรณ์ในรูป 3.12 , 3.13 และตาราง 3.2 หมายถึงอุปกรณ์ตัวเดียวกัน

ระบบทดสอบความล้ามีขั้นตอนการทำงานดังนี้ (ดูแผนภาพในรูปที่ 3.13 ประกอบ)

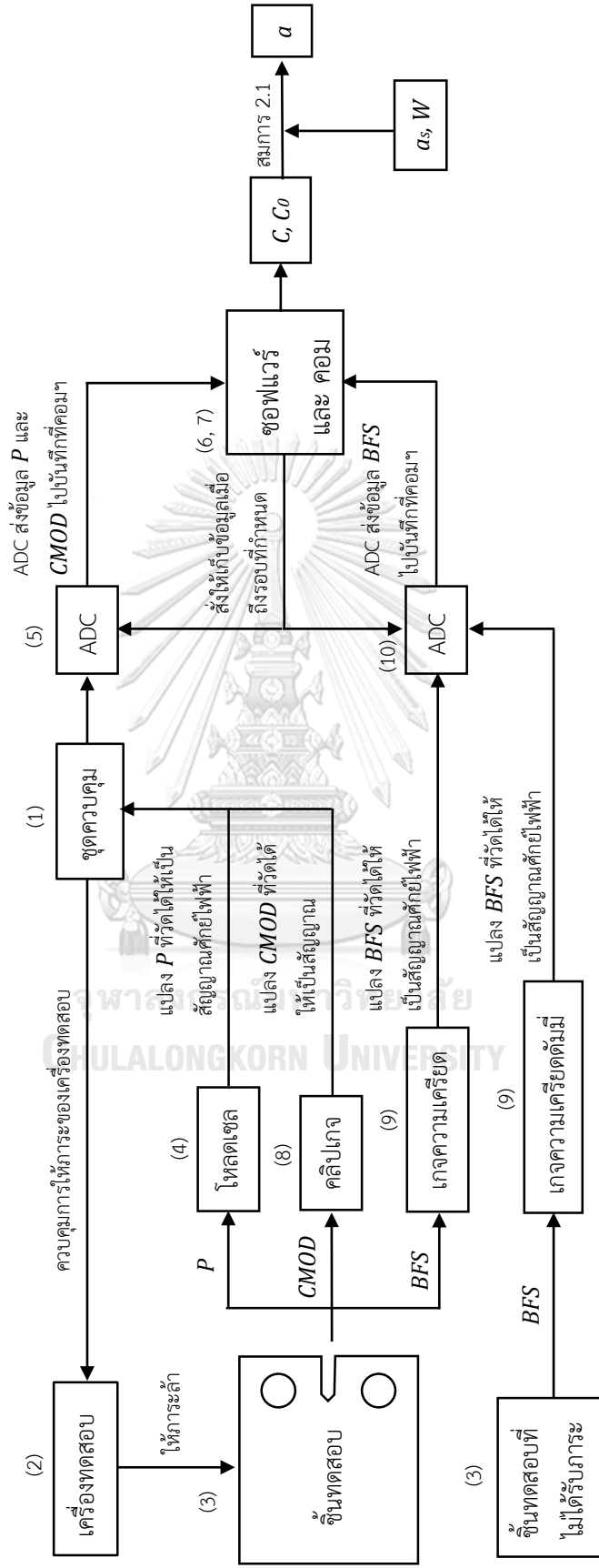
- 1) ชูดคววม (1) สั่งให้เครื่องทดสอบ (2) ให้ภาระล้ากับชิ้นทดสอบ (3) ซึ่งยึดกับเครื่องทดสอบด้วย Pin ดังรูป 3.14 ตามสภาวะทดสอบที่กำหนด (ขนาดภาระ, รูปร่างคลื่นภาระ และความถี่ภาระ)
- 2) โหลดเซล (4) วัดภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบแล้วส่งกลับไปชูดคววม (1) เพื่อปรับแก้ภาระให้ได้ขนาดในเกณฑ์ที่ยอมรับ นอกจากนี้ชูดคววมจะกรองสัญญาณภาระแล้วส่งไปยัง ADC (5) ซึ่งจะกรองสัญญาณและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นซอฟต์แวร์ (6) จะบันทึกข้อมูลจาก ADC ลงฮาร์ดดิสก์ (7) เมื่อถึงรอบที่กำหนด
- 3) คลิปเกจ (8) วัด *CMOD* แล้วส่งสัญญาณไปยังชูดคววม (1) จากนั้นชูดคววมจะกรองสัญญาณ *CMOD* แล้วส่งไปยัง ADC (5) ซึ่งจะกรองสัญญาณและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นซอฟต์แวร์ (6) จะบันทึกข้อมูล ลงฮาร์ดดิสก์ (7) เมื่อถึงรอบที่กำหนด
- 4) เกจความเครียดบนชิ้นงาน (9) วัด *BFS* แล้วส่งสัญญาณไปยัง ADC (10) แต่เพื่อกำจัดผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องทดสอบและลดผลของสัญญาณรบกวน จึงวัดความเครียดของชิ้นทดสอบซึ่งไม่ได้รับภาระด้วยเกจความเครียดดัมมี่ (9) แล้วนำไปลบกับ *BFS* สัญญาณจะถูกส่งไปที่ ADC (10)

เพื่อกรองและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นซอฟต์แวร์ (6) บันทึกข้อมูลลงฮาร์ดดิสก์ (7) เมื่อถึงรอบที่กำหนด

- 5) คอมพิวเตอร์จะนำข้อมูล BFS และ P ไปคำนวณหา C_{BFS} อีกทั้งนำข้อมูล $CMOD$ และ P ไปคำนวณหา C_{CMOD} จากนั้นนำ C_{BFS} หรือ C_{CMOD} ที่ได้พร้อมทั้งข้อมูล W , a_s , $C_{0,BFS}$ หรือ $C_{0,CMOD}$ ไปคำนวณหาความยาวรอยร้าวตามขั้นตอนในหัวข้อ 2.1



รูปที่ 3.12 ระบบทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าว

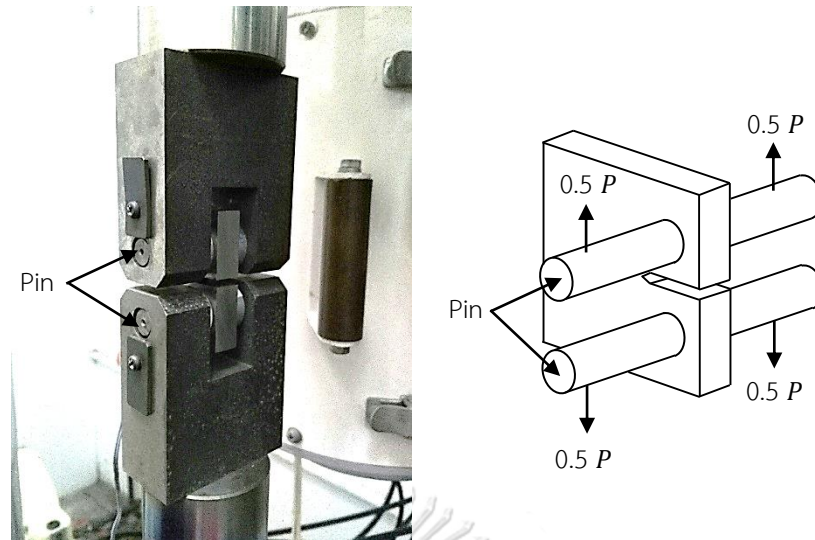


รูปที่ 3.13 แผนภาพการทำงานของระบบทดสอบ

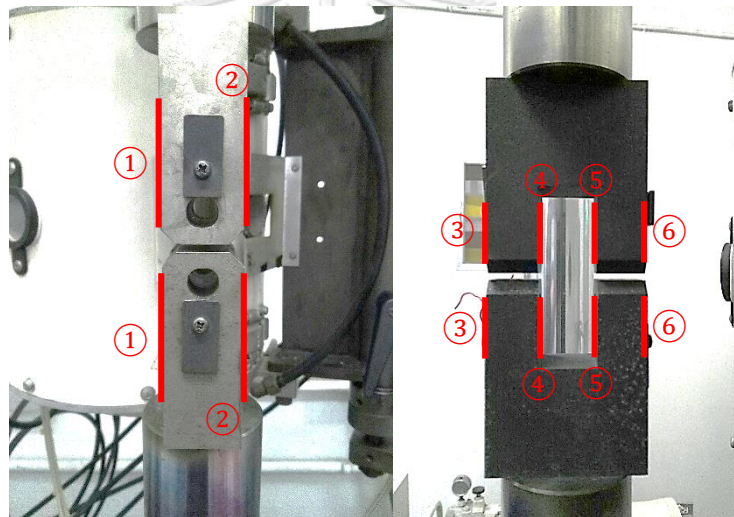
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ในระบบทดสอบ

No.	ชื่ออุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น	ข้อมูลจำเพาะที่สำคัญ
1	ชุดควบคุม	Shimadzu/4830	สามารถกำหนดสภาวะทดสอบ เช่น รูปร่างคลื่น ความถี่ ขนาด ภาระ
2	เครื่องทดสอบ	Shimadzu/E100kN	Maximum dynamic load ± 100 kN
3	ชิ้นทดสอบ	-	ชิ้นทดสอบรูปทรง C(T) ดังรูปที่ 1.xx ทำจากวัสดุ A516 Gr 70 มีแนววางตัวเทียบกับการรีดแบบ L-T ดังรูปที่ 3.4, ความหนา (B) = 12.5 mm และความกว้าง (W) = 50 mm
4	โพลดเซลล์	Shimadzu/SFL-20kN	Capacity ± 20 kN, Output voltage ± 10 V
5	ADC	National Instrument/NI9215	ความละเอียด 16-Bit, เก็บข้อมูลแบบ Simultaneous, Input Voltage ± 10 V, Sampling Rate 1 - 10^5 S/s
6	ซอฟต์แวร์ LabVIEW	LabVIEW/2014, Student Edition	ซอฟต์แวร์สำหรับเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลจาก ADC No. 4 และ 9
7	คอมพิวเตอร์	Lenovo	CPU: intel i7-2600, RAM: 4 GB, System type 32 bit
8	คลิปเกจ	Showa Sokki/TCL-851-11	Range ± 1 mm, Output voltage ± 10 V
9	เกจความเครียด	TML/FLA-5-11	Gauge length 5 mm, Gauge factor $2.13 \pm 1\%$, Gage resistance 120 Ω
10	ADC	National Instrument/NI9235	ความละเอียด 24 Bit, Quarter-Bridge, เก็บข้อมูลแบบ Simultaneous, Full-scale range ± 29.4 mV/V ($+62,500 \mu\epsilon$ / $-55,500 \mu\epsilon$), Sampling Rate $794 - 10^4$ S/s

การตั้ง Alignment ของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ใช้วิธีของผู้วิจัยก่อนหน้า [34] ที่พบว่า Alignment จะดีที่สุดเมื่อผิวด้านนอกและด้านในของอุปกรณ์จับยึดชิ้นบนและล่างที่มีหมายเลขเดียวกัน ขนานและอยู่บนระนาบเดียวกันดังรูป 3.15 นอกจากนี้ จะสอบเทียบ (Calibrated) คลิปเกจทุก ๆ การทดสอบชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น รายละเอียดการสอบเทียบอยู่ในภาคผนวก ก.3



รูปที่ 3.14 วิธีจับยึดชิ้นทดสอบและให้ภาระ



รูปที่ 3.15 การจัด Alignment การให้ภาระ

ซอฟต์แวร์ LabView สำหรับเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลจาก NI9215 และ NI9235 มีอินเตอร์เฟซดังรูป 3.16 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) Set up 2) Monitor 3) Analysis

ส่วน Set up ประกอบด้วย

- 1) หัวข้อ DAQ device & Transducer ใช้ระบุเครื่องทดสอบและ ADC ที่ใช้
- 2) หัวข้อ Specimen ใช้กำหนดชื่อไฟล์ที่บันทึกข้อมูล, ขนาดชิ้นทดสอบ และค่ายังกั้มอดุลัสของวัสดุ
- 3) หัวข้อ Waveform ใช้ระบุความถี่ของภาระทดสอบ
- 4) หัวข้อ Sampling & Save ใช้ระบุ Sampling rate, จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง และจำนวนรอบระหว่างการเก็บข้อมูลครั้งที่แล้วกับครั้งถัดไป

ส่วน Monitor ประกอบด้วย

- 1) กราฟแสดงผลระหว่าง *BFS*, *CMOD* และภาวะ กับเวลา
- 2) ปุ่ม Initialize สำหรับปรับค่า *BFS*, *CMOD* และภาวะให้เป็นศูนย์ก่อนเริ่มทดสอบ
- 3) ช่องแสดงอุณหภูมิของห้องทดสอบ
- 4) หัวข้อ Cycle number มีช่อง Start ใช้กำหนดหมายเลขของรอบเริ่มต้นเมื่อเริ่มใช้งานซอฟต์แวร์, ช่อง Current แสดงหมายเลขของรอบปัจจุบัน และช่อง Next save แสดงหมายเลขของรอบถัดไปที่จะเก็บข้อมูล นอกจากนี้ยังมีปุ่ม Reset ที่ใช้เปลี่ยนหมายเลขในช่อง Current ให้เป็นหมายเลขของรอบเริ่มต้นที่กำหนดในช่อง Start

ส่วน Analysis ไม่เกี่ยวข้องกับการเก็บข้อมูล แต่สามารถนำข้อมูลขนาดขึ้นทดสอบ, ค่ายังมีมอดูลัสของชั้นทดสอบ (ที่ระบุในส่วน Set up) และข้อมูลคอมพลายแอนซ์ ไปคำนวณความยาวรอยร้าวได้

The screenshot shows the LabView software interface for fatigue crack monitoring, divided into three main panels:

- Setup (1):**
 - DAQ device & Transducer:** Testing machine: DAQ, M/C Name: Shimadzu.
 - Specimen:** General, Dimension, Material. Code: File Name.
 - Waveform:** Frequency: 1 (Hz).
 - Sampling & Save:** Resolution: Criteria (highlighted), Sample per cycle: 10000.
- Monitor (2):**
 - Buttons: Force, Strain, COD, da/dN-DK.
 - Mean: 7160.0 (N), Range: 11705.3 (N).
 - Graph: Force (Newtons) vs. Time (ms) showing a sinusoidal wave.
 - Temperature (deg. C): 31.5.
 - Cycle number:** Start: 0, Current: 116, Next save: 30000, Save status: Green.
 - Buttons: Initialize, Reset.
- Fatigue Crack Monitoring (3):**
 - Analysis:**
 - Crack length: Unload data range (%): 0 to 100, Data file: C:\Users\User\, Cycle: 0, Length (BFS): NaN (mm), Length (COD): NaN (mm). Buttons: Display, Save.
 - Crack growth:** DK: 1, 34.633 (MPa*m^{0.5}), da/dN: 2, 2.037E-4 (mm/cycle). Button: Save.
 - STOP button.

A detailed view of the **Sampling & Save** section is shown below:

- Resolution: Criteria
- Continuous cycles: 100
- Save interval: 30000
- Crack increment: 0 (mm)

รูปที่ 3.16 อินเทอร์เฟซของซอฟต์แวร์ LabView

3.3.2 ปัจจัยที่ศึกษา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อความไม่แน่นอนของคอมพลาเยนซ์ ปัจจัยที่ศึกษาแบ่งเป็น 2 หมวด 1) หมวดสภาวะทดสอบ 2) หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตารางที่ 3.3 นอกจากนี้ยังมีอีกวัตถุประสงค์ คือ เปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างความยาวรอยร้าวกายภาพกับความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากคอมพลาเยนซ์

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยที่ศึกษา

หมวด	ปัจจัย
สภาวะทดสอบ	1) รูปร่างคลื่น (Waveform) 2) ภาระสูงสุด 3) ความยาวรอยร้าว 4) อัตราส่วนภาระ (R ratio, R) 5) ความถี่ภาระ (f) 6) Sampling rate (SR)
การวิเคราะห์ข้อมูล	1) จำนวนข้อมูลต่อรอบ (Number of data per cycle, DC) 2) จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง ($Con.$) 3) เปอร์เซ็นต์ของจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระนับจากตำแหน่งภาระสูงสุด ($\%Unload$)

วิธีบรรลุดังประสงค์ทั้งสองโดยใช้ขั้นตอนที่น้อยที่สุด คือ ต้องทดสอบที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ พร้อมกับสร้างขอบหน้ารอยร้าวไปด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลความไม่แน่นอนและสามารถเปรียบเทียบความสอดคล้องของความยาวรอยร้าวในคราวเดียวกัน ผู้วิจัยกำหนดให้ขั้นตอนทดสอบรับภาระล้าที่มีภาระสูงสุดคงที่ (Constant maximum load) ภายใต้เงื่อนไขทดสอบดังตาราง 3.4 แล้วเก็บข้อมูลจากแต่ละเงื่อนไข โดยระหว่างการทดสอบจะเปลี่ยนอัตราส่วนภาระเพื่อสร้างขอบหน้ารอยร้าวที่ตำแหน่งต่าง ๆ (คอลัมน์ที่ 5) เหตุผลประกอบการกำหนดเงื่อนไขทดสอบในตาราง 3.4 อธิบายในหัวข้อ 3.3.5 เนื่องจากต้องเข้าใจขั้นตอนการทดสอบในหัวข้อ 3.3.3 และ 3.3.4 ก่อน

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขทดสอบ

ขั้น ทดสอบ	หมวดสภาวะทดสอบ						หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล		
	รูปร่าง คลื่น	ภาระสูงสุด (kN)	ความยาวรอยร้าว (mm)	R	f (Hz)	SR (kS/s) ⁽¹⁾	DC (ข้อมูล/รอบ) ⁽²⁾	$Con.$ (รอบ)	$\%Unload$ (%)
A1, A2	ไซน์	9	13 ถึง 31	0.1 สลับ 0.5	20	10	500 (250)	ตาราง 3.6	100, 80, 60
					10	10	1,000 (500, 250)		
					5	10	2,000 (1,000, 500, 250)		
					10	10,000 (1,000, 500, 250)			
					5	5,000 (1,000, 500, 250)			
					1	1,000 (500, 250)			

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขทดสอบ (ต่อ)

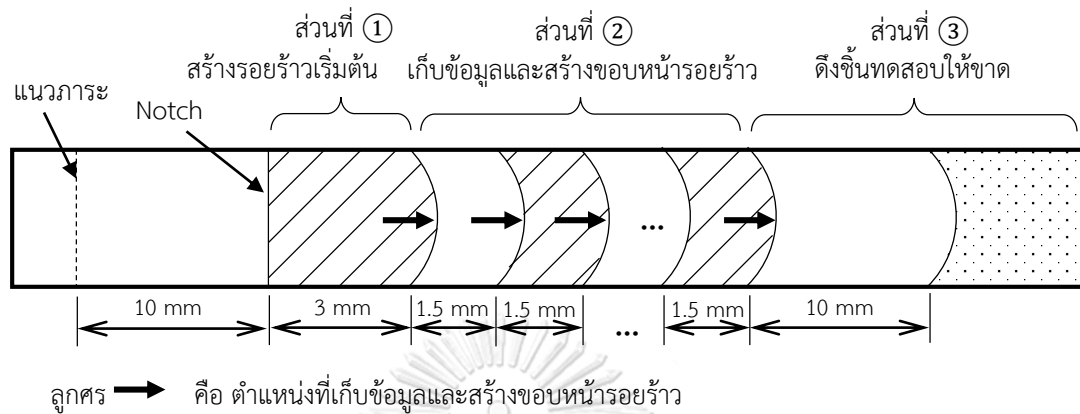
ชั้นทดสอบ	หมวดสภาวะทดสอบ					หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล			
	รูปร่างคลื่น	ภาระสูงสุด (kN)	ความยาวรอยร้าว (mm)	R	f (Hz)	SR (kS/s) ⁽¹⁾	DC (ข้อมูล/รอบ) ⁽²⁾	Con. (รอบ)	%Unload (%)
A3, A4	ไซน์	9	13 ถึง 31	0.3 สลับ 0.7	20	10	500 (250)	ตาราง 3.7	100, 80, 60
					10	10	1,000 (500, 250)		
					5	10	2,000 (1,000, 500, 250)		
					1	10	10,000 (1,000, 500, 250)		
						5	5,000 (1,000, 500, 250)		
						1	1,000 (500, 250)		
A5, A6	ไซน์	13	13 ถึง 26.5	0.1 สลับ 0.5	20	10	500 (250)	ตาราง 3.8	
					10	10	1,000 (500, 250)		
					5	10	2,000 (1,000, 500, 250)		
					1	10	10,000 (1,000, 500, 250)		
						5	5,000 (1,000, 500, 250)		
						1	1,000 (500, 250)		
A7, A8	ไซน์	13	13 ถึง 26.5	0.3 สลับ 0.7	20	10	500 (250)	ตาราง 3.9	
					10	10	1,000 (500, 250)		
					5	10	2,000 (1,000, 500, 250)		
					1	10	10,000 (1,000, 500, 250)		
						5	5,000 (1,000, 500, 250)		
						1	1,000 (500, 250)		
A9	สามเหลี่ยม สมมาตร	9	13 ถึง 31	0.1 สลับ 0.5	5	10	2,000 (1,000, 500, 250)	ตาราง 3.10	
					2	10	5,000 (1,000, 500, 250)		
					1	10	10,000 (1,000, 500, 250)		
						5	5,000 (1,000, 500, 250)		
						1	1,000 (500, 250)		
A10	สามเหลี่ยม สมมาตร	13	13 ถึง 26.5	0.1 สลับ 0.5	5	10	2,000 (1,000, 500, 250)	ตาราง 3.11	
					2	10	5,000 (1,000, 500, 250)		
					1	10	10,000 (1,000, 500, 250)		
						5	5,000 (1,000, 500, 250)		
						1	1,000 (500, 250)		

⁽¹⁾ หน่วย kS/s คือ kilo Sample / second

⁽²⁾ ตัวเลขนอกวงเล็บ คือจำนวนข้อมูลต่อรอบที่เก็บได้เมื่อใช้ Sampling rate ที่กำหนด ตัวเลขในวงเล็บ คือจำนวนข้อมูลที่คงเหลือในหนึ่งรอบภาระ หลังจากตัดข้อมูลออกอย่างเป็นระบบ เช่น ตัด 1 เว้น 1 จุด หรือตัด 3 เว้น 1 จุด เป็นต้น (รายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อ 3.4)

3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย 3 ส่วน ซึ่งสามารถอธิบายควบคู่ไปกับลักษณะของพื้นผิวแตกหักในรูป 3.17 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการทดสอบ และความสัมพันธ์กับตำแหน่งขอบหน้ารอยร้าวที่จะสร้างขึ้น

ส่วนที่ 1 คือ การสร้างรอยร้าวเริ่มต้น (Pre-crack) ขึ้นทดสอบจะรับภาระล้าที่มีรูปร่างคลื่นที่กำหนด มีภาระสูงสุด และอัตราส่วนภาระค่าหนึ่ง จนรอยร้าวเติบโตถึงความยาวขั้นต่ำที่มาตรฐานกำหนด เพื่อให้พฤติกรรมบริเวณปลายรอยร้าวเปลี่ยนจาก Notch เป็นรอยร้าว สำหรับขึ้นทดสอบในงานวิจัยนี้ กำหนดความยาวรอยร้าวเริ่มต้นคือ 3 mm การวัดความยาวรอยร้าวขณะทดสอบจะใช้วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง (หัวข้อ 2.2.1)

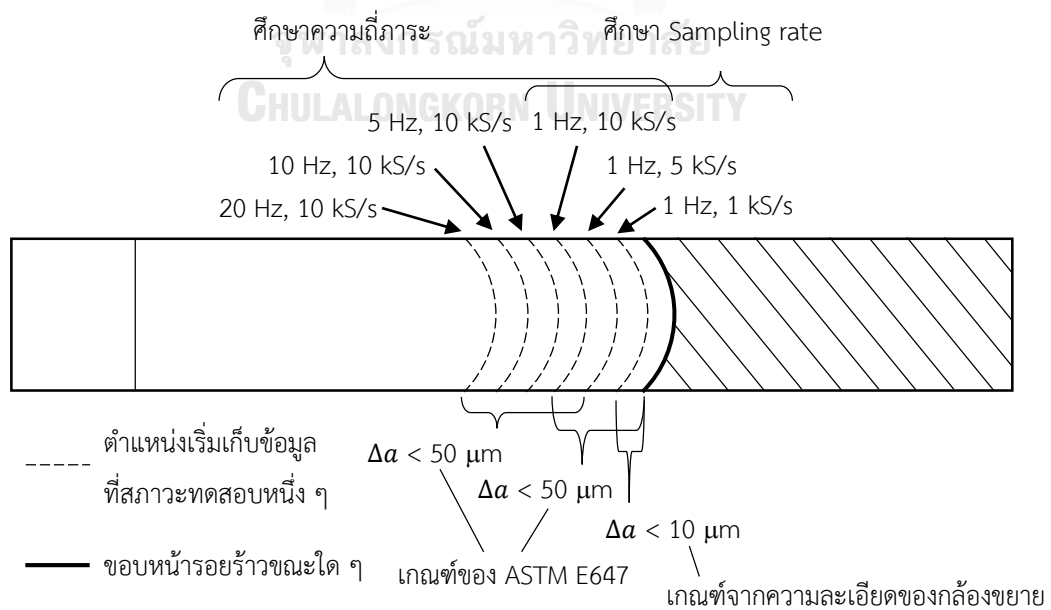
ส่วนที่ 2 คือ เก็บข้อมูล *BFS*, *CMOD* และภาระที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความไม่แน่นอน พร้อมทั้งสร้างขอบหน้ารอยร้าว ณ ตำแหน่งเดียวกับข้อมูลที่เก็บ สำหรับใช้เปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างความยาวรอยร้าวกายภาพและความยาวรอยร้าวจากคอมพิวเตอร์ ค่าตำแหน่งที่เก็บข้อมูลและสร้างขอบหน้ารอยร้าว คือตำแหน่งที่ลูกศรเส้นหนาชี้ ในรูป 3.17 ขั้นตอนในส่วนนี้ เริ่มจากการสร้างขอบหน้ารอยร้าวอันแรกด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนภาระของภาระล้า ขึ้นทดสอบแต่ละขั้นจะรับอัตราส่วนภาระ 2 ค่าสลับกัน โดยจะเปลี่ยนเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น 1.5 mm เพื่อให้ขอบหน้ารอยร้าวอยู่ห่างกันชัดเจนทำให้วัดความยาวรอยร้าวกายภาพได้สะดวก ก่อนที่จะเปลี่ยนอัตราส่วนภาระจะต้องเก็บข้อมูลตามสภาวะทดสอบที่กำหนด (รายละเอียดการเก็บข้อมูลจะอธิบายในหัวข้อ 3.3.4) กระบวนการนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งความยาวรอยร้าวเกือบถึงความยาววิกฤติ (ตัวประกอบความเข้มของความเค้นเท่ากับความต้านทานการแตกหัก)

ส่วนที่ 3 หลังจากจบการทดสอบส่วนที่ 2 จะสร้างขอบหน้ารอยร้าวสุดท้ายโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนภาระอีกครั้ง และให้ภาระล้าจนกระทั่งความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น 10 mm ในระหว่างนั้นจะต้องลดภาระสูงสุดลงเป็นระยะ ๆ เมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นเพื่อไม่ให้ขึ้นทดสอบแตกหัก สุดท้าย ดึงขึ้นทดสอบให้ขาดแล้วนำขึ้นทดสอบมาวัดความยาวรอยร้าวกายภาพด้วยวิธีต่าง ๆ ในหัวข้อ 2.2 หลังจากวัดความยาวรอยร้าวเสร็จแล้วขึ้นทดสอบจะถูกห่อด้วยพลาสติกแรปเพื่อป้องกันไม่ให้พื้นผิวแตกหักขึ้นสนิม ซึ่งจะให้เห็นขอบหน้ารอยร้าวไม่ชัดเจน

3.3.4 รายละเอียดการเก็บข้อมูล

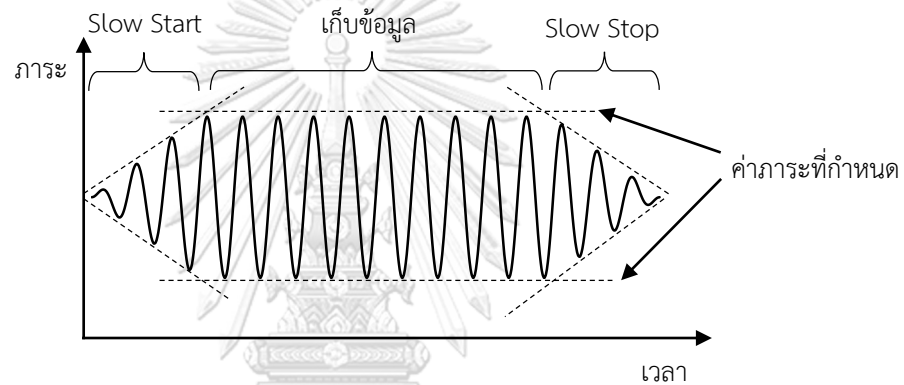
หัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดของการเก็บข้อมูลคอมพลายแอนซ์ในส่วนของ 2 ของขั้นตอนการทดสอบ การเก็บข้อมูลส่วนนี้จะเปลี่ยนความถี่ภาระและ Sampling rate ตามคอลัมน์ที่ 5 และ 6 ของตาราง 3.4 นอกจากนี้ผู้วิจัยกำหนดเบื้องต้นว่าจะเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 100 รอบ สำหรับทุกสภาวะทดสอบ อย่างไรก็ตาม ความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากข้อมูลที่เก็บต่อเนื่อง ณ ขอบหน้ารอยร้าวหนึ่งจะต้องเป็นความยาวรอยร้าวเดียวกัน ซึ่งจะประมาณว่าเป็นความยาวรอยร้าวเดียวกันได้ ก็ต่อเมื่อความยาวรอยร้าวขณะเก็บข้อมูลรอบสุดท้ายเพิ่มขึ้นจากความยาวรอยร้าวขณะเก็บข้อมูลรอบแรก ยังไม่เกินเกณฑ์ที่ยอมรับ ซึ่งในที่นี้อ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM E647 ที่เสนอว่า หากความยาวรอยร้าวระหว่างการเก็บข้อมูลเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $0.001W$ (เท่ากับ $50 \mu\text{m}$ สำหรับขั้นทดสอบของงานวิจัยนี้) จะถือว่าความยาวรอยร้าวที่คำนวณจากข้อมูลรอบแรกและรอบสุดท้ายเป็นความยาวรอยร้าวเดียวกัน หมายเหตุว่า ถ้าอัตราการเติบโตของรอยร้าวสูงขึ้นอาจจะเก็บข้อมูลต่อเนื่องได้ไม่ถึง 100 รอบ การเก็บข้อมูลในส่วนนี้แบ่งได้ 2 แบบ คือ 1) การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวอื่น ๆ และ 2) การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น

การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวอื่น ๆ ก่อนเปลี่ยนอัตราส่วนภาระ (ตำแหน่งที่ถูกคร痕ในรูป 3.17 ซี) ในกรณีทดสอบด้วยรูปทรงภาระไซเน สามารถแสดงลำดับได้ดังรูปที่ 3.18 ช่วงแรก ศึกษาผลของความถี่ภาระ เก็บข้อมูลที่ความถี่ภาระ 20, 10, 5 และ 1 Hz ที่ Sampling rate 10 kS/s ช่วงที่สอง ศึกษาผลของ Sampling rate จะใช้ความถี่ภาระ 1 Hz แต่เปลี่ยน Sampling rate เป็น 5 และ 1 kS/s ร่วมกับข้อมูลที่ความถี่ภาระ 1 Hz ที่ Sampling rate 10 kS/s ซึ่งเก็บไปก่อนหน้านี้แล้ว ความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นในระหว่างเก็บข้อมูลแต่ละปัจจัยต้องไม่เกิน $50 \mu\text{m}$ ข้อมูลที่ความถี่ภาระ 1 Hz และ Sampling rate 1 kS/s จะถูกนำมาคำนวณความยาวรอยร้าวและเปรียบเทียบกับความยาวรอยร้าวกายภาพ เพราะว่าอยู่ใกล้กับขอบหน้ารอยร้าว (ที่จะสร้างขึ้น) มากที่สุด ดังนั้นความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทดสอบนี้จะต้องไม่เกินความละเอียดของกล้องขยายที่ใช้วัดความยาวรอยร้าวกายภาพ เพื่อให้ความยาวรอยร้าวจากการคำนวณและการวัดถือว่าเป็นความยาวรอยร้าวตำแหน่งเดียวกัน เพราะว่ากล้องขยายจำแนกความแตกต่างไม่ได้ ความละเอียดของกล้องขยายที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ $10 \mu\text{m}$

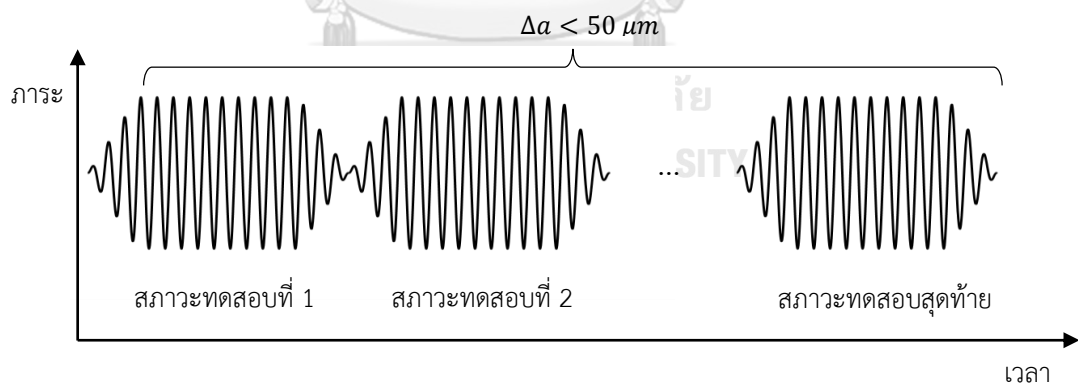


รูปที่ 3.18 การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวอื่น ๆ

การเปลี่ยนสภาวะทดสอบ (ความถี่ภาระ และ Sampling rate) เพื่อเก็บข้อมูลในแต่ละครั้ง (ดังรูป 3.18) ผู้วิจัยจะหยุดการให้ภาระกับชิ้นทดสอบ ก่อนจะเปลี่ยนความถี่ภาระ และ Sampling rate เป็นค่าใหม่ที่ต้องการ จากนั้นจึงสั่งให้เครื่องทดสอบทำงานอีกครั้ง เครื่องทดสอบจะเพิ่มภาระเฉลี่ยให้ถึงค่าที่กำหนด จากนั้นจึงเพิ่มแอมพลิจูดภาระอย่างช้า ๆ จนถึงค่าที่กำหนด (Slow start) หลังจากทีภาระถึงค่าที่กำหนดจะสั่งให้โปรแกรมเก็บข้อมูล หลังจากเก็บข้อมูลเสร็จแล้วจะสั่งให้เครื่องทดสอบหยุด เครื่องทดสอบจะค่อย ๆ ลดแอมพลิจูดของภาระจนหยุดที่ภาระเฉลี่ย (Slow stop) สรุปว่าจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ทดสอบที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) Slow start 2) เก็บข้อมูล 3) Slow stop ดังรูปที่ 3.19 การนับจำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบรับภาระ ตามเกณฑ์ที่ไม่ให้ความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นเกิน $50 \mu\text{m}$ จะเริ่มจากรอบแรกของการเก็บข้อมูลที่สภาวะทดสอบแรก จนถึงรอบสุดท้ายของการ Slow stop ที่สภาวะทดสอบสุดท้ายดังรูปที่ 3.20 เนื่องจากความถี่ภาระ 20 Hz จะต้องใช้รอบในส่วน Slow start มากกว่าความถี่ภาระอื่น ดังนั้นจึงเลือกเก็บข้อมูลที่ความถี่ภาระ 20 Hz ก่อนความถี่ภาระอื่น



รูปที่ 3.19 ส่วนประกอบของการเก็บข้อมูล

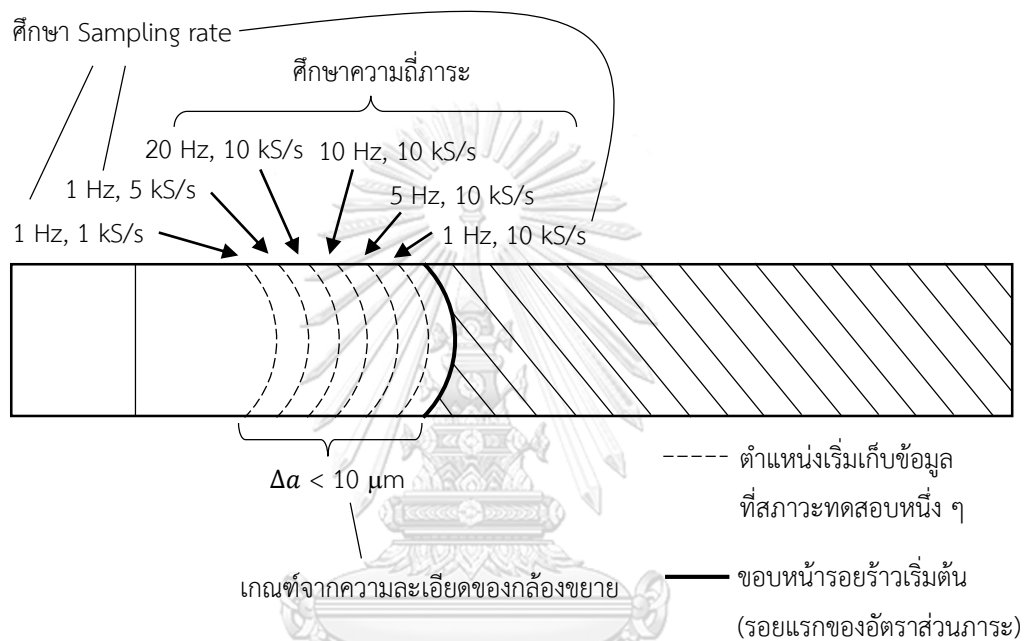


รูปที่ 3.20 การนับจำนวนรอบที่ความยาวรอยร้าวเปลี่ยนแปลง

การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้นมีหลักการเก็บข้อมูลนี้มีหลักการคล้ายกับการเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวอื่น ๆ แต่ต่างกันที่ลำดับของสภาวะทดสอบ และความยาวรอยร้าวที่ยอมให้เปลี่ยนแปลงขณะเก็บข้อมูลดังรูปที่ 3.21 สาเหตุที่ต่างกันเพราะว่าต้องเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าคอมพลายแอนซ์เริ่มต้นที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ เพื่อใช้คำนวณความยาวรอยร้าว โดยจะต้องเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกับความยาวรอยร้าวกายภาพ ณ ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น ดังนั้นความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บข้อมูลจนครบทุกสภาวะทดสอบจะต้องไม่เกินความละเอียดของกล้องขยาย ($10 \mu\text{m}$) เพื่อให้ถือว่าเป็นรอยร้าวตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้ความถี่ภาระยังส่งผลต่อ

ขนาดของคอมพลายแอนซ์ (รายละเอียดจะอธิบายที่หัวข้อ 4.2) ซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณความยาวรอยร้าวที่รอยร้าวอื่น เพื่อความแม่นยำในการนำคำนวณความยาวรอยร้าวจึงเก็บข้อมูลที่ Sampling rate ต่าง ๆ ก่อน แล้วจึงเก็บข้อมูลที่ความถี่ภาระต่าง ๆ เพื่อให้ใกล้กับขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้นมากที่สุด ในแต่ละขั้นทดสอบจะเก็บข้อมูลแบบนี้ 2 ครั้ง คือ ที่ขอบหน้ารอยร้าวอันแรก และขอบหน้ารอยร้าวที่สอง เพื่อให้ได้ข้อมูลคอมพลายแอนซ์เริ่มต้นที่ทุกอัตราส่วนภาระ

สำหรับกรณีทดสอบด้วยรูปทรงภาระสามเหลี่ยมสมมาตรจะมีหลักการเก็บข้อมูลเหมือนกับรูปทรงภาระไซน์ เพียงแต่เปลี่ยนสภาวะทดสอบที่เก็บข้อมูลเป็นสภาวะทดสอบที่ใช้กับรูปทรงภาระสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.21 การเก็บข้อมูลที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น

3.3.5 เหตุผลประกอบการกำหนดสภาวะทดสอบ

หัวข้อนี้จะอธิบายเหตุผลประกอบการกำหนดสภาวะทดสอบในตาราง 3.4

1) รูปทรงภาระ

งานวิจัยนี้ใช้ภาระรูปไซน์และสามเหลี่ยมสมมาตร เพราะเป็นรูปร่างคลื่นที่นิยมใช้ในการทดสอบความล้า [35,36] โดยภาระรูปไซน์นิยมใช้กับการทดสอบหาความแข็งแรงล้า และอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ภาระรูปสามเหลี่ยมนิยมใช้กับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง หรือในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน [35,36]

2) อัตราส่วนภาระ

งานวิจัยนี้กำหนดอัตราส่วนภาระ (ภาระต่ำสุด/ภาระสูงสุด) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 เพื่อให้ครอบคลุมอัตราส่วนภาระที่นิยมใช้ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว ส่วนการจับคู่อัตราส่วนภาระ 0.1 กับ 0.5 และ 0.3 กับ 0.7 ก็เพื่อให้เห็นขอบหน้ารอยร้าวชัดเจน

3) ภาระสูงสุด

งานวิจัยนี้กำหนดภาระสูงสุด 2 ค่า ค่าแรกต่ำกว่า 50 % ของขีดจำกัดโพลดเซล และค่าที่สองสูงกว่า เพื่อศึกษาผลของความแม่นยำของโพลดเซล ภาระสูงสุด 2 ค่านี้จะต้องต่างกันพอสมควร นอกจากนี้ ผู้วิจัยต้องการเก็บข้อมูลที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ให้ครอบคลุมมากที่สุดก่อนที่ขั้นทดสอบจะเสียหาย แต่ไม่ใช้เวลาทดสอบนานเกินไป จากเงื่อนไขทั้ง 3 ผู้วิจัยจึงคำนวณความยาวรอยร้าวสุดท้ายที่จะเก็บข้อมูลโดยใช้เกณฑ์ว่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) ในสมการ (3.1) เท่ากับ 90% ของความต้านทานการแตกหัก

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\frac{a}{W})}{(1-\frac{a}{W})^{1.5}} \left(0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right) \quad (3.1)$$

จากนั้นคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบสำหรับอัตราส่วนภาระ 0.1 สลับ 0.5 และ 0.3 สลับ 0.7 รวมกัน โดยใช้ข้อมูลอัตราการเติบโตรอยร้าวของวัสดุที่ได้จากงานวิจัยของนายชาญเดช [34] ข้อมูลภาระสูงสุดที่ใช้เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับขีดจำกัดโพลดเซล, ความยาวรอยร้าวสุดท้ายที่เก็บข้อมูลได้ และระยะเวลาที่ใช้ทดสอบที่ภาระสูงสุดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตาราง 3.5 เนื่องจากในการทดสอบกำหนดว่าจะเก็บข้อมูลที่ความยาวรอยร้าว 13, 14.5, 16, ... mm ทำให้ความยาวรอยร้าวสุดท้ายที่เก็บข้อมูลได้จะเป็นตัวเลข $13 + 1.5(n - 1)$ เมื่อ n เป็นจำนวนนับจากข้อมูลในตาราง 3.5 ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกภาระสูงสุดที่ใช้เป็น 9 และ 13 kN เนื่องจากค่าทั้งสองแตกต่างกันในระดับหนึ่ง, ใช้เวลาทดสอบไม่นานเกินไป และความยาวรอยร้าวสุดท้ายที่เก็บข้อมูลได้มีค่ามากพอ (31 mm และ 26.5 mm สำหรับภาระสูงสุด 9 kN 13 kN ตามลำดับ)

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลความยาวรอยร้าวสูงสุดและระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ

ภาระสูงสุด (kN)	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
เปอร์เซ็นต์เทียบกับขีดจำกัดโพลดเซล	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
ความยาวรอยร้าวสูงสุดที่เก็บข้อมูลได้ (mm)	34	32.5	31	29.5	29.5	28	26.5	25	25	23.5	22
ระยะเวลาทดสอบ (วัน)	15.3	10.1	6.9	5.0	3.7	2.8	2.3	1.8	1.4	0.9	0.7

4) ความถี่ภาระ

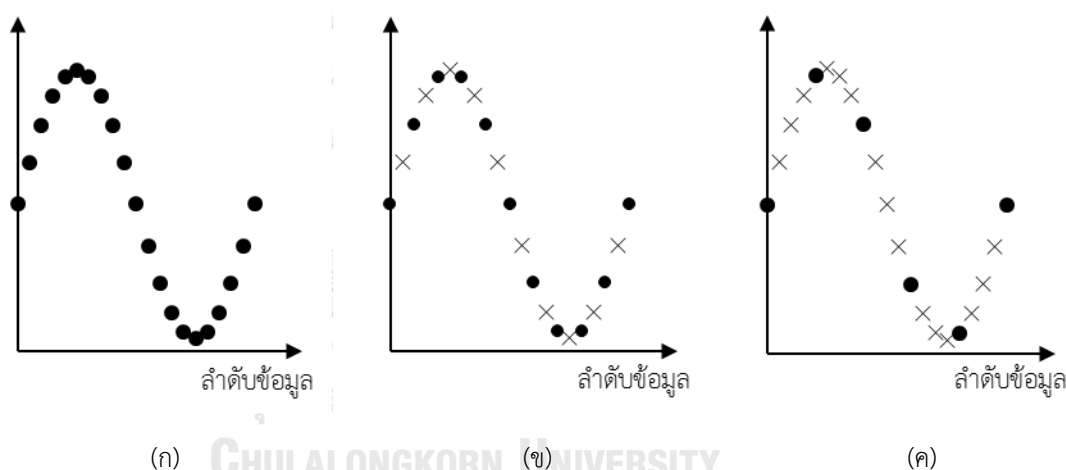
งานวิจัยนี้กำหนดความถี่ภาระสูงสุด จากความถี่ภาระที่เครื่องทดสอบทำได้ขณะที่ขั้นทดสอบมีความยาวรอยร้าวมากที่สุด ดังนั้นความถี่ภาระนี้จึงใช้ได้กับความยาวรอยร้าวที่สั้นกว่า จากการทดลองพบว่า สำหรับภาระรูปไซน์สามารถใช้ความถี่ภาระได้สูงสุดเท่ากับ 20 Hz เพราะเครื่องทดสอบจะเริ่มสั่นและมีเสียงดัง ความถี่ภาระอื่น ๆ ที่ศึกษานั้นพยายามเลือกให้ครอบคลุมมากที่สุด ซึ่งสุดท้ายกำหนดเป็น 1, 5 และ 10 Hz สำหรับภาระรูปสามเหลี่ยม สามารถใช้ความถี่ภาระสูงสุดได้สูงสุดเท่ากับ 5 Hz เนื่องจากที่ความถี่ภาระมากกว่านี้ เครื่องทดสอบไม่สามารถสร้างรูปทรงให้เป็นสามเหลี่ยมได้ ความถี่ภาระอื่น ๆ ที่เลือกคือ 1 และ 2 Hz สำหรับความถี่ภาระทุกค่า จะเก็บข้อมูลที่ Sampling rate เดียวกันคือ 10 kS/s เพื่อไม่ให้มีผลจากการเปลี่ยน Sampling rate ต่อความไม่แน่นอน

5) Sampling rate

ค่า Sampling rate กำหนดจากความสามารถของ ADC ที่มีช่วงความสามารถแคบที่สุด จากข้อมูลจำเพาะของ ADC ที่ใช้คือ NI9215 และ NI 9235 ซึ่งมีช่วง Sampling rate เท่ากับ $1 - 10^5$ และ $794 - 10^4$ S/s ตามลำดับ จะได้ช่วงการใช้งานแคบที่สุดคือ $794 - 10^4$ S/s แต่เพื่อความสะดวกจึงปรับเป็น 1, 5 และ 10 kS/s การศึกษาผลของ Sampling rate ต่อความไม่แน่นอนจะศึกษาที่ความถี่ภาวะเดียวกันคือ ที่ 1 Hz เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการเปลี่ยนความถี่ภาวะต่อความไม่แน่นอน

6) จำนวนข้อมูลต่อรอบ

เงื่อนไขนี้จะศึกษาผลของการตัดทอนจำนวนข้อมูลต่อความไม่แน่นอน เช่น ที่ความถี่ภาวะ 10 Hz Sampling rate 10 kS/s จะสามารถเก็บข้อมูลได้ 1000 ข้อมูลต่อรอบ จากนั้นใช้วิธีตัดข้อมูลแบบตัด 1 เว้น 1 หรือตัด 3 เว้น 1 ข้อมูล ก็จะได้จำนวนข้อมูลต่อรอบภาวะเหลือ 500 และ 250 ข้อมูลตามลำดับ ตัวอย่างในรูป 3.22 แสดงวิธีตัดทอนข้อมูลดังกล่าว ในรูป 3.22 (ก) รูปคลื่นมีจำนวนข้อมูล 20 จุด/รอบ เมื่อตัดข้อมูลแบบเว้น 1 ข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกต้องแสดงด้วยสัญลักษณ์กากบาท จะได้รูปคลื่นที่มีจำนวนข้อมูล 10 จุด/รอบ ดังรูป 3.22 (ข) ในทำนองเดียวกัน ถ้าตัดแบบเว้น 3 ข้อมูล จะได้รูปคลื่นที่มีจำนวนข้อมูล 5 จุด/รอบ ดังรูป 3.22 (ค)



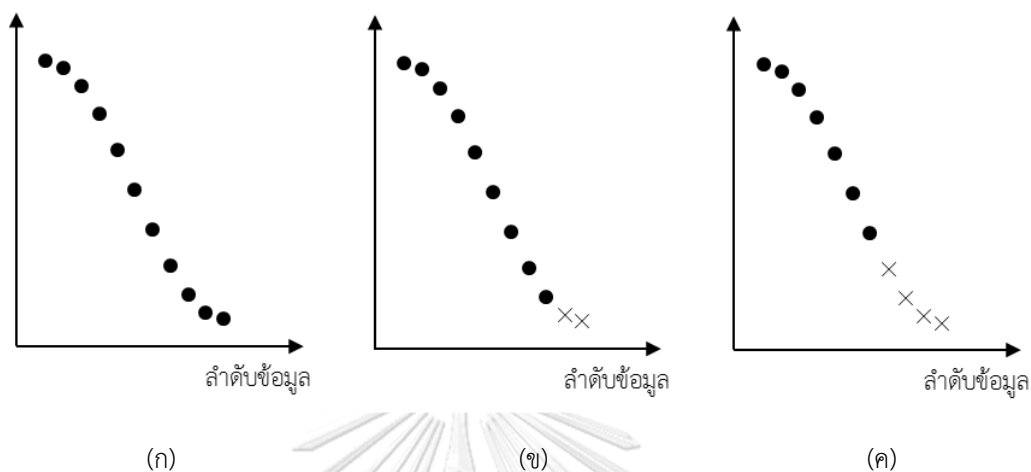
รูปที่ 3.22 การตัดทอนจำนวนข้อมูลต่อรอบ

- ก) ข้อมูลที่ยังไม่ถูกตัด
- ข) ข้อมูลที่ถูกตัดแบบ 1 เว้น 1
- ค) ข้อมูลที่ถูกตัดแบบ 3 เว้น 1

7) จำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระ

เนื่องจากวัสดุส่วนมากแสดงพฤติกรรมที่เรียกว่า Crack closure (แต่วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่แสดงพฤติกรรมนี้) ข้อมูลช่วงปลดภาระที่ใช้หาคอมพลายแอนซ์จึงเป็นข้อมูลตั้งแต่ตำแหน่งภาระสูงสุดถึงภาระที่รอยร้าวเริ่มปิดเข้าหากัน เพื่อจำลองปรากฏการณ์ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนแปลงจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระของ *BFS*, *CMOD* และภาระ โดยกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมดในช่วงปลดภาระและเริ่มนับจากตำแหน่งที่ภาระมีค่าสูงสุด ซึ่งผู้วิจัยเลือกที่ 100, 80 และ 60 % ของจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระดังตัวอย่างใน รูป 3.23 ใน

รูป 3.23 (ก) ยกตัวอย่างกรณีจำนวนข้อมูลในช่วงปลดภาระมี 10 ข้อมูลจากนั้นตัดข้อมูลให้เหลือ 8 ข้อมูล (80 % ของทั้งหมด) และ 6 ข้อมูล (60 % ของทั้งหมด) ดังรูป 3.23 (ข.) และ 3.23 (ค.) ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ถูกลบออก แสดงเป็นสัญลักษณ์กากบาท



รูปที่ 3.23 การตัดข้อมูลช่วงปลดภาระ

ก) ข้อมูลช่วงปลดภาระ 100 %

ข) ข้อมูลช่วงปลดภาระ 80 %

ค) ข้อมูลช่วงปลดภาระ 60 %

8) จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง

ความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยจะลดลงเมื่อจำนวนการทำซ้ำเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในสมการ (2.11) เจื่อนไซนี้ต้องการศึกษาว่าจำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่อง (เทียบเท่ากับการทำซ้ำ) มีผลต่อความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยเพียงใด ในงานวิจัยนี้ เริ่มแรกผู้วิจัยกำหนดว่าจะเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 100 รอบ สำหรับทุกสภาวะทดสอบ จากนั้นจึงลดจำนวนข้อมูลต่อเนื่องลงทีละ 10 รอบจนเหลือ 10 รอบ แต่ด้วยเงื่อนไขที่ว่าต้องทดสอบหลายสภาวะทดสอบ และข้อจำกัดที่ว่าความยาวรอยร้าวต้องเพิ่มขึ้นไม่เกินค่าที่เกณฑ์กำหนด (หัวข้อ 3.3.4) จึงไม่สามารถเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 100 รอบ ได้ในบางสภาวะทดสอบ กรณีดังกล่าว ได้แก่ การเก็บข้อมูลทุกความถี่ภาระที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้นโดยความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นไม่เกิน 10 μm หรือกรณีที่อัตราการเติบโตของรอยร้าวสูง รายละเอียดของจำนวนรอบสูงสุดที่สามารถเก็บข้อมูลต่อเนื่องได้ในแต่ละสภาวะทดสอบสรุปได้ดังตาราง 3.6 – 3.11 ช่องสี่เทในตาราง คือ สภาวะทดสอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องได้ไม่ถึง 100 รอบ

ตารางที่ 3.6 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขั้นตอนทดสอบ A1, A2 (ภาระรูปไซน์, ภาระสูงสุด 9 kN)

รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		20	10	5	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ						
ไซน์	9	13.0	0.1	100	100	100	100	100	100
		14.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		16.0	0.1	100	100	100	100	100	100
		17.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		19.0	0.1	100	100	100	100	100	100
		20.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		22.0	0.1	100	100	100	100	100	100
		23.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		25.0	0.1	70	70	70	70	70	70
		26.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		28.0	0.1	-	50	50	50	50	50
		29.5	0.5	-	100	100	100	100	100
31.0	0.1	-	20	20	20	20	20		

ตารางที่ 3.7 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขั้นตอนทดสอบ A3, A4 (ภาระรูปไซน์, ภาระสูงสุด 9 kN)

รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		20	10	5	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ						
ไซน์	9	13.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		14.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		16.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		17.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		19.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		20.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		22.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		23.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		25.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		26.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		28.0	0.3	-	100	100	100	100	100
		29.5	0.7	-	100	100	100	100	100
31.0	0.3	-	40	40	40	40	40		

ตารางที่ 3.8 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขึ้นทดสอบ A5, A6 (ภาระรูปไซน์, ภาระสูงสุด 13 kN)

รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		20	10	5	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ						
ไซน์	13	13.0	0.1	40	40	40	40	40	40
		14.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		16.0	0.1	100	100	100	100	100	100
		17.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		19.0	0.1	70	70	70	70	70	70
		20.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		22.0	0.1	30	30	30	40	40	40
		23.5	0.5	100	100	100	100	100	100
		25.0	0.1	-	30	30	30	30	30
		26.5	0.5	-	100	100	100	100	100

ตารางที่ 3.9 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขึ้นทดสอบ A7, A8 (ภาระรูปไซน์, ภาระสูงสุด 13 kN)

รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		20	10	5	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ						
ไซน์	13	13.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		14.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		16.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		17.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		19.0	0.3	100	100	100	100	100	100
		20.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		22.0	0.3	80	80	80	100	100	100
		23.5	0.7	100	100	100	100	100	100
		25.0	0.3	-	60	60	50	50	50
		26.5	0.7	-	100	100	100	100	100

ตารางที่ 3.10 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขั้นตอนทดสอบ A9 (ภาระรูปสามเหลี่ยมสมมาตร, ภาระสูงสุด 9 kN)

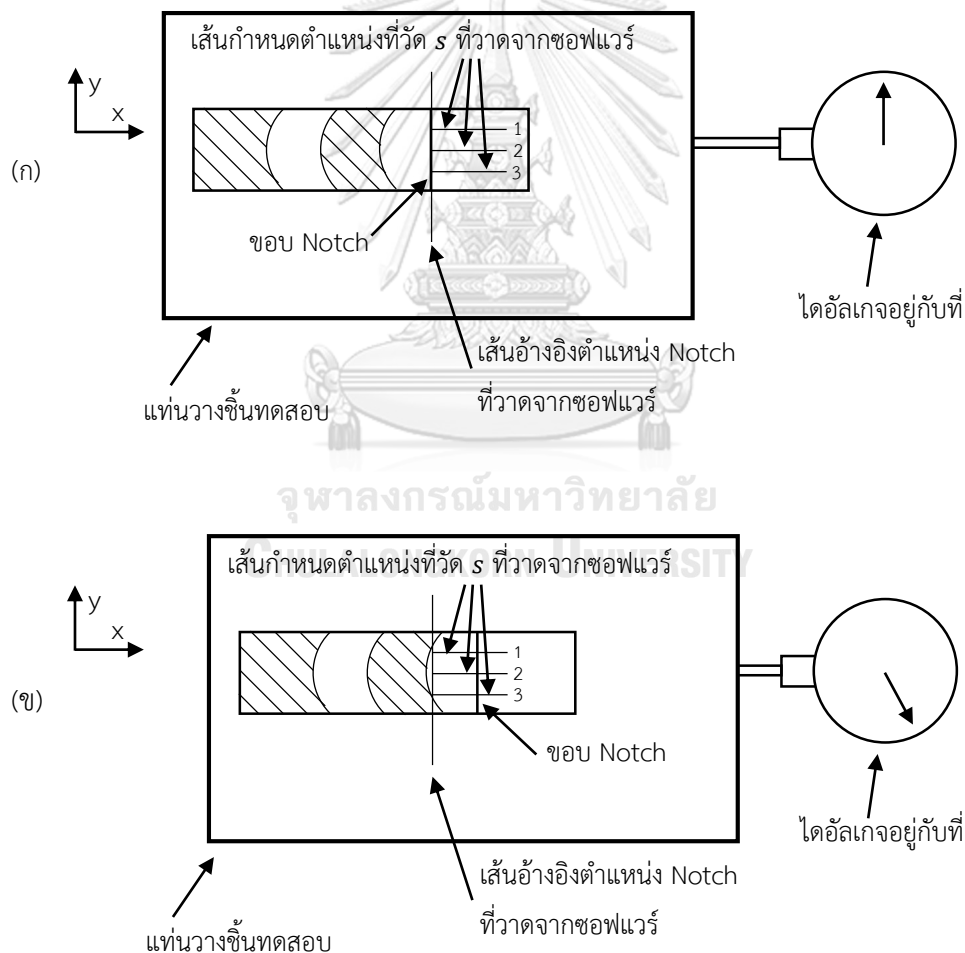
รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		5	2	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ					
สามเหลี่ยม สมมาตร	9	13.0	0.1	100	100	100	100	100
		14.5	0.5	100	100	100	100	100
		16.0	0.1	100	100	100	100	100
		17.5	0.5	100	100	100	100	100
		19.0	0.1	100	100	100	100	100
		20.5	0.5	100	100	100	100	100
		22.0	0.1	100	100	100	100	100
		23.5	0.5	100	100	100	100	100
		25.0	0.1	70	70	70	70	70
		26.5	0.5	100	100	100	100	100
		28.0	0.1	50	50	50	50	50
		29.5	0.5	100	100	100	100	100
		31.0	0.1	20	20	20	20	20

ตารางที่ 3.11 จำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องของขั้นตอนทดสอบ A10 (ภาระรูปสามเหลี่ยมสมมาตร, ภาระสูงสุด 13 kN)

รูปทรง ภาระ	ภาระสูงสุด (kN)	ความถี่ภาระ (Hz)		5	2	1		
		Sampling rate (kS/s)		10	10	10	5	1
		ความยาวรอยร้าว (mm)	อัตราส่วนภาระ					
สามเหลี่ยม สมมาตร	13	13.0	0.1	60	60	60	60	60
		14.5	0.5	100	100	100	100	100
		16.0	0.1	100	100	100	100	100
		17.5	0.5	100	100	100	100	100
		19.0	0.1	70	70	70	70	70
		20.5	0.5	100	100	100	100	100
		22.0	0.1	40	40	40	40	40
		23.5	0.5	100	100	100	100	100
		25.0	0.1	30	30	30	30	30
		26.5	0.5	100	100	100	100	100

3.4 การวัดความยาวรอยร้าวกายภาพ

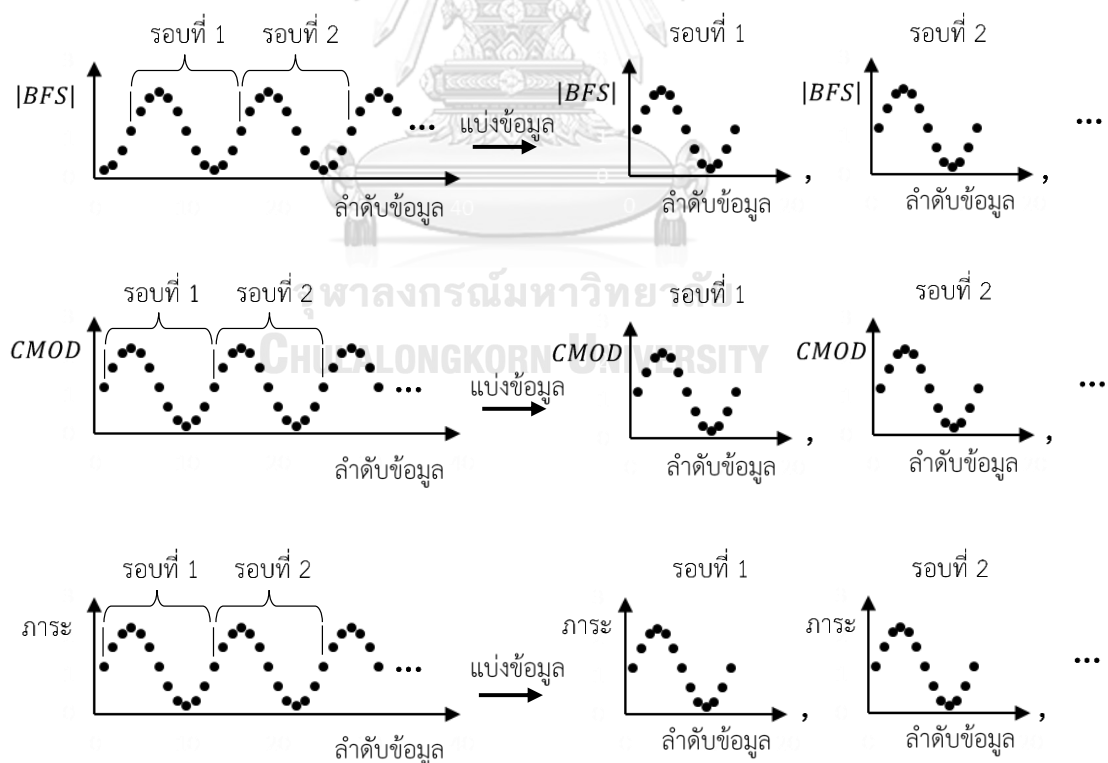
การวัดความยาวรอยร้าวนี้จะต้องวัดระยะจากแนวภาระถึงขอบ Notch (d) และระยะจากปลาย Notch ถึงขอบหน้ารอยร้าวของแต่ละนิยาม (s) ตามนิยามต่าง ๆ ในหัวข้อ 2.2 วิธีวัดระยะ d อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 3.2.3 หัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการวัดระยะ s การวัดระยะนี้จะใช้ไดอัลเกจร่วมกับการกล้องขยายดิจิทัล เริ่มจากใช้ซอฟต์แวร์กล้องขยายวาดเส้นตรงทับกับขอบ Notch จากนั้นลากเส้นที่ตั้งฉากและตัดกับเส้นนี้ โดยแต่ละเส้นจะผ่านตำแหน่งตามแนวความหนาที่ที่ต้องการวัดระยะ s เมื่อเลื่อนแท่นวางขึ้นงานจนจุดตัดของเส้นทับกับขอบหน้ารอยร้าวก็จะได้ระยะ s สำหรับตำแหน่งจุดตัดนั้น เมื่อทำซ้ำเช่นนี้กับจุดตัดที่เหลือก็จะได้ระยะ s ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนขอบหน้ารอยร้าว รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างการวัดระยะ s สำหรับวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง ภาพจากกล้องขยายจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.24 (ก) จุดตัดของเส้นอ้างอิงขอบ Notch กับเส้นตั้งฉากเบอร์ 1, 2, 3 คือ ตำแหน่งที่ต้องการวัดระยะ s ที่ตำแหน่งนี้จะปรับค่าไดอัลเกจให้เป็นศูนย์ เมื่อเลื่อนแท่นวางขึ้นทดสอบจนจุดตัดของเส้นที่ 1 ทับกับขอบหน้ารอยร้าวดังรูป 3.24 (ข) ก็จะอ่านระยะ s_1 ได้จากไดอัลเกจ การวัดระยะ s ในแต่ละตำแหน่งจะวัดซ้ำ 5 ครั้ง



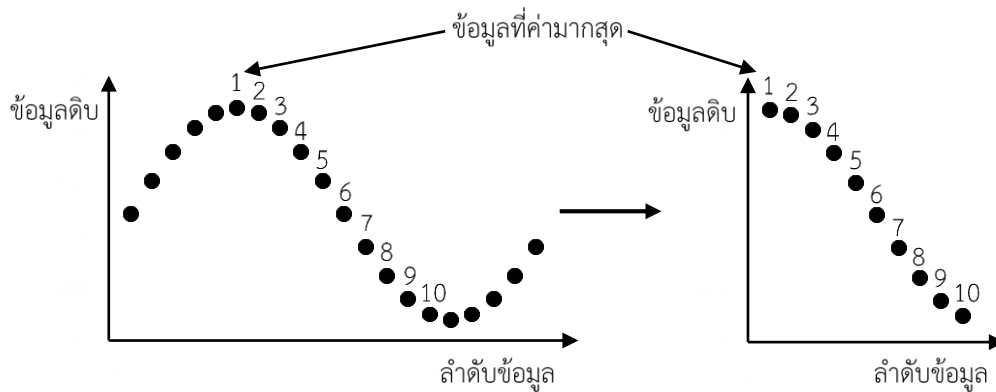
รูปที่ 3.24 การวัดระยะ s

3.5 การคำนวณคอมพลายแอนซ์

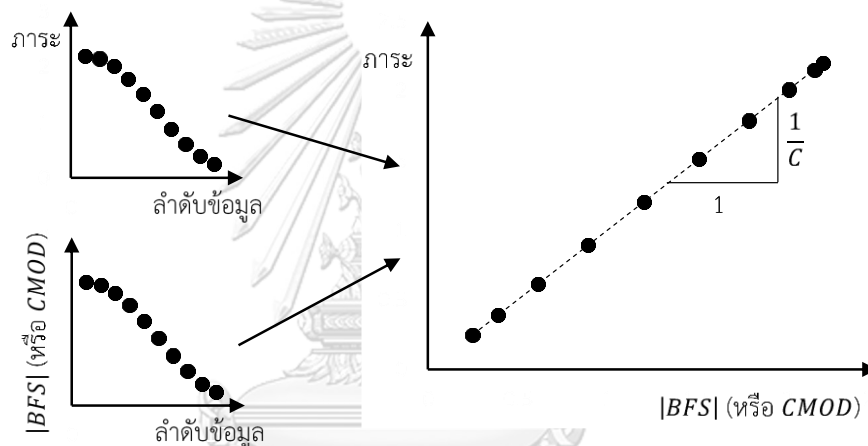
การคำนวณ C ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ 1) แบ่งข้อมูล 2) เลือกข้อมูลช่วงปลดภาระ 3) คำนวณ C ข้อมูลดิบจากการทดสอบที่เงื่อนไขหนึ่ง ๆ จะเป็นคลื่นต่อเนื่องดังรูป 3.25 ฝั่งซ้าย สังเกตว่าข้อมูล BFS จะมีเฟสไม่ตรงกับ $CMOD$ และภาระ เนื่องจากแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์กรองสัญญาณไม่เหมือนกัน ขั้นตอนแรกจะแยกข้อมูลต่อเนื่องออกเป็นรอบ โดยเริ่มแบ่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงเพิ่มภาระแล้วนับไปจนได้จำนวนข้อมูลเท่ากับจำนวนข้อมูลต่อรอบ ดังรูป 3.25 ฝั่งขวา จากนั้นเลือกข้อมูลช่วงปลดภาระของแต่ละรอบ เริ่มจากค่าสูงสุด แล้วนับถัดจากนั้นจนได้จำนวนข้อมูลเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนข้อมูลต่อรอบ ยกตัวอย่างรูป 3.26 ที่ข้อมูลดิบมีจำนวนข้อมูลต่อรอบ 20 ข้อมูล จะเลือกข้อมูล 10 ข้อมูล นับจากข้อมูลที่มีค่ามากที่สุด สุดท้ายคำนวณ C ในแต่ละรอบโดยนำข้อมูลดิบที่เลือกไปพล็อตโดยให้ภาระเป็นแกนตั้ง และ BFS (หรือ $CMOD$) เป็นแกนนอน แล้วคำนวณ C จากส่วนกลับของความชันที่ได้จากวิธีกำลังสองต่ำสุดดังรูป 3.27 การแบ่งข้อมูล และเลือกข้อมูลโดยใช้ตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละรอบจะช่วยลดความต่างเฟสระหว่าง BFS และภาระ นอกจากนี้ ในกรณีที่ต้องการศึกษาผลของจำนวนข้อมูลต่อรอบ หรือจำนวนข้อมูลช่วงปลดภาระ ก็จะนำข้อมูลช่วงปลดภาระนี้มาตัดทอนอย่างที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.5 แล้วคำนวณ C ความไม่แน่นอน Type A ของคอมพลายแอนซ์ ($U_{C,A}$) ที่ได้จากเงื่อนไขต่าง ๆ หาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของ C



รูปที่ 3.25 การแบ่งข้อมูลดิบ



รูปที่ 3.26 การเลือกข้อมูลช่วงปลดภาระในแต่ละรอบ

รูปที่ 3.27 การหาค่า C ในแต่ละรอบ

3.6 การคำนวณความยาวรอยร้าว

หัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดการคำนวณ a จากที่อธิบายไว้ที่หัวข้อ 2.1 a คำนวณได้จากสมการ (2.1) $a = f(W, B, C, E_{eff})$ โดย E_{eff} สามารถหาได้จาก 2 วิธี คือ

- 1) ปรับค่า E_{eff} จนกว่า a ที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้นจะเท่ากับ a_{s0} ซึ่งเป็นวิธีที่มาตรฐานแนะนำ
- 2) แทนค่า E_{eff} ด้วยสมการ (2.2) และ (2.3) สำหรับวิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียดและปากรอยร้าวตามลำดับ

ผู้วิจัยเลือกวิธีที่ 2 เนื่องจากพบว่าความไม่แน่นอน Type B ของ C_0 และ C ไม่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งการใช้วิธีที่ 2 ทำให้สามารถวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของ C_0 และ C แบบไม่เป็นอิสระต่อกันได้ แต่ a ที่คำนวณจากวิธีนี้จะไม่เท่ากับวิธีที่ 1 สาเหตุคือ สมการ (2.1) ได้มาจากการแก้สมการ (2.2) และ (2.3) จาก $E = f(W, B, C, a)$ ให้เป็น $a = f(W, B, C, E)$ โดยใช้วิธีการประมาณค่า ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของ a ที่คำนวณได้จากการแปลงสมการ (Conversion error) ผู้วิจัยจึงปรับแก้ความคลาดเคลื่อนนี้โดยแก้ไขสมการ (2.2) และ (2.3) ด้วยการคูณค่าคงที่เข้า

ไปในสมการทั้งสอง จะได้สมการ (3.2) และ (3.3) โดย k_{BFS} และ k_{CMOD} คือ ค่าคงที่สำหรับปรับแก้กรณีใช้วิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียด และวิธีคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวตามลำดับ

$$E_{eff} = k_{BFS} \cdot \frac{1.41 - 1.462\left(\frac{a_{s0}}{W}\right) + 20.45\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^2 - 26.83\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^3 + 11.45\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^4}{WBC_{BFS}\left(1 - \frac{a_{s0}}{W}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$E_{eff} = k_{CMOD} \cdot \frac{\left(1 + \frac{0.25}{a_{s0}/W}\right)\left(\frac{1 + a_{s0}/W}{1 - a_{s0}/W}\right)^2}{BC_{CMOD}} \left(\begin{array}{l} 1.61369 + 12.6778\left(\frac{a_{s0}}{W}\right) - 14.2311\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^2 \\ -16.6102\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^3 + 35.0499\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^4 - 14.4943\left(\frac{a_{s0}}{W}\right)^5 \end{array} \right) \quad (3.3)$$

และเมื่อแทนสมการ (3.2) และ (3.3) ลงในสมการ (2.1) จะได้สมการคำนวณ a วิธีคอมพลายแอนซ์ความเครียด คือ สมการ (3.4) และ (3.5)

$$a = W \left(1.0033 - \frac{2.3500}{v_{BFS}} + \frac{1.3694}{v_{BFS}^2} - \frac{15.294}{v_{BFS}^3} + \frac{63.182}{v_{BFS}^4} - \frac{74.420}{v_{BFS}^5} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$v_{BFS} = 1 + \sqrt{k_{BFS} \frac{C_{BFS}}{C_{0,BFS}} \frac{\left(1.410 - 1.462\frac{a_{s0}}{W} + 20.45\frac{a_{s0}^2}{W^2} - 26.83\frac{a_{s0}^3}{W^3} + 11.45\frac{a_{s0}^4}{W^4}\right)}{\left(1 - \frac{a_{s0}}{W}\right)^2}} \quad (3.5)$$

สำหรับวิธีคอมพลายแอนซ์ปากรอยร้าวดังสมการ คือ สมการ (3.6) และ (3.7)

$$a = W \left(1.0010 - \frac{4.6695}{v_{CMOD}} + \frac{18.460}{v_{CMOD}^2} - \frac{236.82}{v_{CMOD}^3} + \frac{1214.9}{v_{CMOD}^4} - \frac{2143.6}{v_{CMOD}^5} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$v_{CMOD} = 1 + \sqrt{k_{CMOD} \frac{C_{CMOD}}{C_{0,CMOD}} \frac{\left(1.614 + 12.68\frac{a_{s0}}{W} - 14.23\frac{a_{s0}^2}{W^2} - 16.61\frac{a_{s0}^3}{W^3} + 35.05\frac{a_{s0}^4}{W^4} - 14.49\frac{a_{s0}^5}{W^5}\right)}{\left(\frac{W - a_{s0}}{W + a_{s0}}\right)^2 \left(1 + \frac{0.25}{a_{s0}/W}\right)^{-1}}} \quad (3.7)$$

การหาค่า k ของวิธี C_{BFS} และ C_{CMOD} ใช้หลักการเดียวกับการหา E_{eff} นั่นก็คือปรับค่า k จนกว่า a ที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้นจะคำนวณได้เท่ากับ a_{s0} การเพิ่มค่า k นี้เข้าไปในสมการทำให้สมการ (3.4) – (3.7) สามารถใช้คำนวณ a เหมือนกับสมการ (2.1) ของวิธีที่ 1 ทุกประการ (รายละเอียดการพิสูจน์อยู่ในภาคผนวก ข.) ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้สมการ (3.4) – (3.7) ในการคำนวณ a แต่ในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจะไม่พิจารณาผลของ k เพื่อลดความซับซ้อน และผู้วิจัยมีความเห็นว่าการพิจารณาแค่ความไม่แน่นอนของ W, a_{s0}, C_0 และ C เพียงพอแล้วสำหรับวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

3.7 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

a เป็นปริมาณอนุพันธ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ W, a_{s0}, C_0 และ C การหา U_a จะต้องหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของปริมาณทั้งสิ้น จากนั้นนำไปคำนวณ U_a ด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (ในหัวข้อ 2.3.3) หัวข้อนี้อธิบายวิธีการหาความไม่แน่นอนของปริมาณทั้งสิ้น โดยแบ่งความไม่แน่นอนเป็น 2 ประเภท คือ Type A และ Type B จากนั้นอธิบายวิธีการคำนวณ U_a จากความไม่แน่นอนของปริมาณทั้งสิ้น

3.7.1 ความไม่แน่นอนของความกว้างขึ้นทดสอบ

W คำนวณจาก $L - y$ ดังรูป 3.28 (ก) ดังนั้นความไม่แน่นอนของ W จึงเกิดจากความไม่แน่นอนของ L และ y ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type A ของ W ประกอบด้วยความไม่สม่ำเสมอของขนาด L และ y ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนขึ้นทดสอบ รวมถึงความไม่คงเส้นคงวาของผู้วัด ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ของ W เกิดจากความแม่นยำ และความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัด L และ y ซึ่งก็คือ เวอร์เนียร์ดิจิทัลดิจิทัลตามลำดับ ต่อไปจะอธิบายวิธีการหาความไม่แน่นอน Type A และ B ของ W

3.7.1.1 Type A

การคำนวณ a ใช้ค่าเฉลี่ยความกว้างขึ้นทดสอบ (\bar{W}) ดังนั้นความไม่แน่นอน Type A ที่จะเอาไปใช้คำนวณ U_a คือ ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยความกว้างขึ้นทดสอบ ($U_{W,A}$) การหาค่า \bar{W} ใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของ L และ y จากการวัดหลายครั้งแล้วนำมาลบกัน ดังนั้นการหา $U_{W,A}$ จึงใช้วิธีอนุกรมเทย์เลอร์ดังสมการ (3.8)

$$U_{W,A} = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial L} U_{L,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} U_{y,A}\right)^2} \quad (3.8)$$

แต่ละพจน์ในสมการด้านขวาที่ไม่ได้ยกกำลังสอง คือ $U_{W,A}$ ที่แผ่มาจากความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ย L และ y ตามลำดับ แล้วนำมาบวกกันด้วยวิธี RSS เมื่อหาอนุพันธ์ของ $\frac{\partial W}{\partial L}$ และ $\frac{\partial W}{\partial y}$ จะได้สมการ (3.9)

$$U_{W,A} = \sqrt{U_{L,A}^2 + U_{y,A}^2} \quad (3.9)$$

$U_{L,A}$ และ $U_{y,A}$ มีค่าเท่ากับ $2 \times u_{L,A}$ และ $2 \times u_{y,A}$ ดังสมการ (3.10)

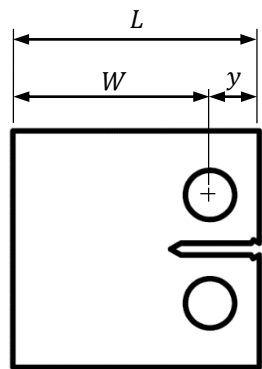
$$U_{W,A} = \sqrt{(2 \times u_{L,A})^2 + (2 \times u_{y,A})^2} \quad (3.10)$$

$u_{L,A}$ และ $u_{y,A}$ คือความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ที่รวมผลของความไม่สม่ำเสมอของขนาด L และ y รวมถึงความไม่สม่ำเสมอของผู้วัดไว้แล้ว ซึ่งหาจากค่า SD_t ของค่าเฉลี่ย L และ y ตามลำดับ

โดย $U_{L,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ย L

$U_{y,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ย y

ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{W,A}$ แสดงดังตารางในรูป 3.28 (ข) เริ่มจากเก็บข้อมูล L และ y ซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย และ SD_t ของค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสอง ถัดมาหา \bar{W} จากการนำค่าเฉลี่ยของ L และ y มาลบกัน ส่วน $U_{W,A}$ หาจากการนำ SD_t ของค่าเฉลี่ย L และ y แทน $u_{L,A}$ และ $u_{y,A}$ ในสมการ (3.10) ตามลำดับ



	ครั้งที่วัด	L	y
ข้อมูลดิบ (mm)	1	62.50	12.536
	2	62.49	12.536
	3	62.48	12.536
	4	62.48	12.570
	5	62.49	12.536
การวิเคราะห์ (mm)	ค่าเฉลี่ย	62.49	12.572
	SD _t ค่าเฉลี่ย	0.0054	0.00976
	\bar{W}	49.92	
	$U_{W,A}$	0.022	

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.28 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{W,A}$ ก) การหาขนาด W

ข) ข้อมูลดิบและการวิเคราะห์

3.7.1.2 Type B

การหาความไม่แน่นอน Type B ของความกว้างขึ้นทดสอบ ($U_{W,B}$) เริ่มจากกำหนดสมการที่ใช้คำนวณ $U_{W,B}$ ดังสมการ (3.11)

$$U_{W,B} = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial L} U_{L,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} U_{y,B}\right)^2} \quad (3.11)$$

โดยแต่ละพจน์ในสมการด้านขวาที่ไม่ได้ยกกำลังสอง คือ $U_{W,B}$ ที่แผ่มาจากความไม่แน่นอน Type B ของ L และ y ตามลำดับ แล้วนำมารวมกันด้วยวิธี RSS เมื่อหาอนุพันธ์ของ $\frac{\partial W}{\partial L}$ และ $\frac{\partial W}{\partial y}$ จะได้สมการ (3.12)

$$U_{W,B} = \sqrt{U_{L,B}^2 + U_{y,B}^2} \quad (3.12)$$

$U_{L,B}$ และ $U_{y,B}$ มีค่าเท่ากับ $2 \times u_{L,B}$ และ $2 \times u_{y,B}$ ตามลำดับ ดังสมการ (3.13)

$$U_{W,B} = \sqrt{(2 \times u_{L,B})^2 + (2 \times u_{y,B})^2} \quad (3.13)$$

โดย $u_{L,B}$ และ $u_{y,B}$ หาได้จากปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ของ L และ y ซึ่งก็คือความแม่นยำและความละเอียดของ เวอร์เนียร์ดิจิตอล และกล้องขยายดิจิตอล ตามลำดับ จากนั้นหา Type B จากความแม่นยำและความละเอียดของอุปกรณ์ทั้งสองโดยใช้สูตรคำนวณ u ในตารางที่ 2.1 ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 3.12 ถัดมานำ u Type B ของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันด้วยวิธี RSS จะได้ $u_{L,B}$ และ $u_{y,B}$ ดังสมการ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$u_{L,B} = \sqrt{(Acc_{vernier}/2)^2 + (Res_{vernier}/\sqrt{3})^2} \quad (3.14)$$

$$u_{y,B} = \sqrt{(Acc_{microscope}/2)^2 + (Res_{microscope}/\sqrt{3})^2} \quad (3.15)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดในสมการ (3.14) และ (3.15) ด้วยข้อมูลความแม่นยำ และความละเอียดของเวอร์เนียร์ ดิจิทัล และกล้องขยายดิจิทัล จากตาราง 3.12 เพื่อหาค่า $u_{L,B}$ และ $u_{y,B}$ $U_{W,B}$ จะมีค่า 0.00552 mm

โดย $U_{L,B}$	คือ ความไม่แน่นอน Type B ของ L
$U_{y,B}$	คือ ความไม่แน่นอน Type B ของ y
$u_{L,B}$	คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของ L
$u_{y,B}$	คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของ y
$Acc_{vernier}$	คือ ความแม่นยำของเวอร์เนียร์ดิจิทัล
$Res_{vernier}$	คือ ความละเอียดของเวอร์เนียร์ดิจิทัล
$Acc_{microscope}$	คือ ความแม่นยำของกล้องขยายดิจิทัล
$Res_{microscope}$	คือ ความละเอียดของกล้องขยายดิจิทัล

ตารางที่ 3.12 ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของอุปกรณ์วัด L และ y

ปริมาณ	เครื่องมือวัด	ปัจจัย (mm)	u (mm)
L	เวอร์เนียร์ดิจิทัล	ความแม่นยำ = 0.0254	ความแม่นยำ/2 = 0.0127
		ความละเอียด = 0.01	ความละเอียด/ $\sqrt{3}$ = 0.00577
y	กล้องขยายดิจิทัล	ความแม่นยำ = 0.0278	ความแม่นยำ/2 = 0.0139
		ความละเอียด = 0.033	ความละเอียด/ $\sqrt{3}$ = 0.0193

3.7.2 ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น

a_{s0} หาได้จากการวัดระยะจากแนวภาระถึง Notch (d) ด้วยกล้องขยายดิจิทัล แล้วนำไปบวกกับระยะที่วัดจาก Notch ถึงขอบหน้ารอยร้าว (s) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ตามวิธีในหัวข้อ 2.2) ด้วยไดอัลเกจ เช่น วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่งจะวัด d , s_1 , s_2 และ s_3 ดังรูป 3.29 (ก) ดังนั้นความไม่แน่นอนของ a_{s0} จึงเกิดจากความไม่แน่นอนของ d และ s ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type A ของ a_{s0} ประกอบด้วยความไม่คงเส้นคงวาของผู้วัด และความไม่แน่นอนในการกำหนดตำแหน่งที่ใช้วัดระยะ s แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงความไม่คงเส้นคงวาของผู้วัดเท่านั้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ของ a_{s0} เกิดจากความแม่นยำ และความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัด d และ s ซึ่งก็คือ กล้องขยายดิจิทัล และไดอัลเกจ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยกำลังขยายของกล้องขยายดิจิทัลที่ใช้อีกด้วย แต่ในงานวิจัยนี้จะไม่ได้พิจารณาผลดังกล่าว a_{s0} มีหลายนิยาม แต่ละนิยามมีหลักการหาความไม่แน่นอนทั้ง Type A และ B เหมือนกัน ในที่นี้จะแสดงวิธีการความไม่แน่นอนของวิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่งเพียงอย่างเดียว

3.7.2.1 Type A

การคำนวณ a ใช้ค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น ($\overline{a_{s0}}$) ดังนั้นความไม่แน่นอน Type A ที่ จะเอาไปใช้คำนวณ U_a คือ ความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ยความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น ($U_{a_{s0},A}$) การ หาค่า $\overline{a_{s0}}$ ใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของ d, s_1, s_2 และ s_3 นำไปคำนวณด้วยสมการ (3.16)

$$a_s = \frac{(d+s_1)+(d+s_2)+(d+s_3)}{3} \quad (3.16)$$

$$= d + \frac{s_1+s_2+s_3}{3}$$

การหา $U_{a_{s0},A}$ มีหลักการเหมือนกับการหา $U_{W,A}$ ในหัวข้อ 3.7.1.1 คือ กำหนดสมการที่ใช้คำนวณ $U_{a_{s0},A}$ ด้วยวิธี อนุกรมเทย์เลอร์ดังสมการ (3.17)

$$U_{a_{s0},A} = \sqrt{\left(\frac{\partial a_{s0}}{\partial d} U_{d,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_{s0}}{\partial s_1} U_{s_1,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_{s0}}{\partial s_2} U_{s_2,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_{s0}}{\partial s_3} U_{s_3,A}\right)^2} \quad (3.17)$$

จากนั้นหาอนุพันธ์ของทุกพจน์ในสมการจะได้สมการ (3.18)

$$U_{a_{s0},A} = \sqrt{U_{d,A}^2 + \frac{U_{s_1,A}^2}{9} + \frac{U_{s_2,A}^2}{9} + \frac{U_{s_3,A}^2}{9}} \quad (3.18)$$

$U_{d,A}, U_{s_1,A}, U_{s_2,A}$ และ $U_{s_3,A}$ มีค่าเป็น 2 เท่าของ $u_{d,A}, u_{s_1,A}, u_{s_2,A}$ และ $u_{s_3,A}$ ตามลำดับ ดังสมการ (3.19)

$$U_{a_{s0},A} = \sqrt{(2 \times u_{d,A})^2 + \frac{(2 \times u_{s_1,A})^2}{9} + \frac{(2 \times u_{s_2,A})^2}{9} + \frac{(2 \times u_{s_3,A})^2}{9}} \quad (3.19)$$

$u_{d,A}, u_{s_1,A}, u_{s_2,A}$ และ $u_{s_3,A}$ หาจากค่า SD_t ของค่าเฉลี่ย d, s_1, s_2 และ s_3 ตามลำดับ

โดย $U_{d,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของ d

$U_{s_1,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของ s_1

$U_{s_2,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของ s_2

$U_{s_3,A}$ คือ ความไม่แน่นอน Type A ของ s_3

$u_{d,A}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ของ d

$u_{s_1,A}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ของ s_1

$u_{s_2,A}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ของ s_2

$u_{s_3,A}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ของ s_3

ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{a_{s0},A}$ แสดงดังตารางในรูป 3.29 (ข) เริ่มจากเก็บข้อมูล d, s_1, s_2 และ s_3 ดังรูป 3.29 (ก) ซ้ำ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย และ SD_t ของค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสิ้น จากนั้นหา $\overline{a_{s0}}$ จากสมการ (3.17) ส่วน $U_{a_{s0},A}$ หาจากการนำ SD_t ของค่าเฉลี่ย d, s_1, s_2 และ s_3 แทน $u_{d,A}, u_{s_1,A}, u_{s_2,A}$ และ $u_{s_3,A}$ ในสมการ (3.19) ตามลำดับ

(ก)

	ครั้งที่วัด	d	s_1	s_2	s_3
ข้อมูลดิบ (mm)	1	9.521	3.87	4.24	4.34
	2	9.487	3.90	4.24	4.30
	3	9.487	3.88	4.26	4.31
	4	9.521	3.88	4.24	4.32
	5	9.487	3.88	4.26	4.32
การวิเคราะห์ (mm)	ค่าเฉลี่ย	9.537	3.88	4.25	4.32
	SD_t ค่าเฉลี่ย	0.0119	0.00703	0.00703	0.00952
	\bar{a}_{s0}	13.69			
	$U_{a_{s0},A}$	0.0256			

(ข)

รูปที่ 3.29 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{a_{s0},A}$ ก) การหาขนาด $a_{s0,3p}$

ข) ข้อมูลดิบและการวิเคราะห์

3.7.2.2 Type B

การหาความไม่แน่นอน Type B ของความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น ($U_{a_{s0},B}$) มีหลักการเหมือนกับการหา $U_{W,B}$ ในหัวข้อ 3.7.1.2 คือ กำหนดสมการที่ใช้คำนวณ $U_{a_{s0},B}$ ด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ดั่งสมการ (3.20)

$$U_{a_{s0},B} = \sqrt{\left(\frac{\partial a_s}{\partial d} U_{d,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_s}{\partial s_1} U_{s_1,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_s}{\partial s_2} U_{s_2,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_s}{\partial s_3} U_{s_3,B}\right)^2 + 2 \frac{\partial a_s}{\partial s_1} \frac{\partial a_s}{\partial s_2} U_{s_1,B} U_{s_2,B} + 2 \frac{\partial a_s}{\partial s_2} \frac{\partial a_s}{\partial s_3} U_{s_2,B} U_{s_3,B} + 2 \frac{\partial a_s}{\partial s_3} \frac{\partial a_s}{\partial s_1} U_{s_3,B} U_{s_1,B}} \quad (3.20)$$

เนื่องจากการวัด s_1 , s_2 และ s_3 ใช้ไดอัลเกจตัวเดียวกันทำให้ความไม่แน่นอน Type B ของปริมาณทั้งสามไม่เป็นอิสระต่อกัน สมการคำนวณความไม่แน่นอนจึงมีพจน์ที่คำนวณผลความไม่แน่นอนของ s_1 , s_2 และ s_3 คือ สามพจน์สุดท้าย หลังจากหาอนุพันธ์และจัดรูปสมการ (3.20) จะได้สมการ (3.21)

$$U_{a_{s0},B} = \sqrt{U_{d,B}^2 + U_{s,B}^2} \quad (3.21)$$

โดย $U_{a_{s0},B}$ ของ a_{s0} ทุกนิยามหากหาอนุพันธ์และจัดรูปสมการที่ใช้คำนวณความไม่แน่นอนด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์แล้วจะได้สมการสำหรับคำนวณ $U_{a_{s0},B}$ ดั่งสมการ (3.21) เหมือนกันทุกนิยาม $U_{d,B}$ และ $U_{s,B}$ มีค่าเท่ากับ $2 \times u_{d,B}$ และ $2 \times u_{s,B}$ ตามลำดับ ดั่งสมการ (3.22)

$$U_{a_{s0},B} = \sqrt{(2 \times u_{d,B})^2 + (2 \times u_{s,B})^2} \quad (3.22)$$

โดย $u_{d,B}$ และ $u_{s,B}$ หาได้จากการนำความแม่นยำและความละเอียดของ กล้องขยายดิจิทัล และไดอัลเกจ ไปคำนวณกับสูตรคำนวณ u ในตารางที่ 2.1 ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 3.13 ถัดมานำ u Type B ของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันด้วยวิธี RSS จะได้ $u_{d,B}$ และ $u_{s,B}$ ดั่งสมการ (3.23) และ (3.24) ตามลำดับ

$$u_{d,B} = \sqrt{(Acc_{microscope}/2)^2 + (Res_{microscope}/\sqrt{3})^2} \quad (3.23)$$

$$u_{s,B} = \sqrt{(Acc_{dial\ gauge}/2)^2 + (Res_{dial\ gauge}/\sqrt{3})^2} \quad (3.24)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดในสมการ (3.23) และ (3.24) ด้วยข้อมูลความแม่นยำ และความละเอียดของกล้องขยาย ดิจิทัล และไดอัลเกจ จากตาราง 3.12 เพื่อหาค่า $u_{d,B}$ และ $u_{s,B}$ $U_{a_{s0},B}$ จะมีค่า 0.0520 mm

โดย $U_{d,B}$	คือ ความไม่แน่นอน Type B ของ d
$U_{s,B}$	คือ ความไม่แน่นอน Type B ของ s
$u_{d,B}$	คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของ d
$u_{s,B}$	คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของ s
$Acc_{microscope}$	คือ ความแม่นยำของกล้องขยายดิจิทัล
$Res_{microscope}$	คือ ความละเอียดของกล้องขยายดิจิทัล
$Acc_{dial\ gauge}$	คือ ความแม่นยำของไดอัลเกจ
$Res_{dial\ gauge}$	คือ ความละเอียดของไดอัลเกจ

ตารางที่ 3.13 ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ของอุปกรณ์วัด a_{s0}

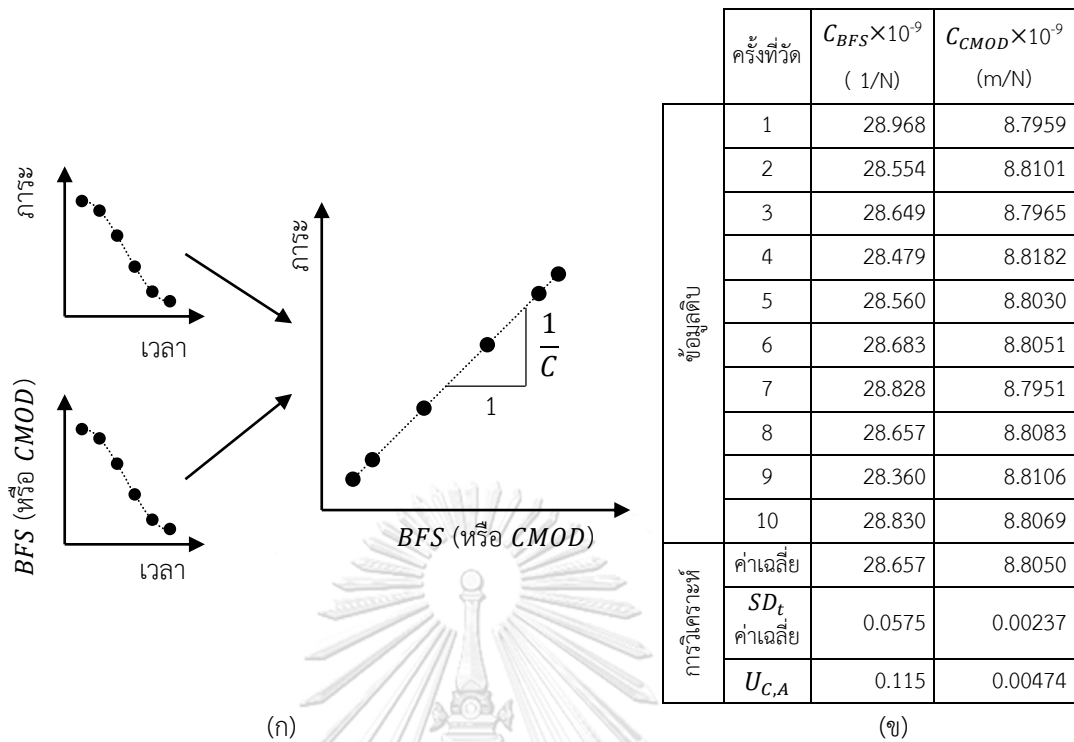
ปริมาณ	เครื่องมือวัด	ปัจจัย (mm)	u (mm)
d	กล้องขยายดิจิทัล	ความแม่นยำ = 0.0278	ความแม่นยำ / 2 = 0.0139
		ความละเอียด = 0.033	ความละเอียด / $\sqrt{3}$ = 0.0193
s	ไดอัลเกจ	ความแม่นยำ = 0.02	ความแม่นยำ / 2 = 0.01
		ความละเอียด = 0.01	ความละเอียด / $\sqrt{12}$ = 0.00289

3.7.3 ความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์

C หาได้จากความชันระหว่าง ภาระ และ BFS (หรือ $CMOD$) ดังรูป 3.30 (ก) ดังนั้นความไม่แน่นอนของ C จึงเกิดจากความไม่แน่นอนของปริมาณทั้งสาม ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type A ของ C มีหลายปัจจัย เช่น สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า [17,19], แรงเสียดทาน [17], ความต่างเฟสของสัญญาณ ฯลฯ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ของ C เกิดจากความแม่นยำ, ความละเอียด และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าของปริมาณทั้งสาม

3.7.3.1 Type A

การคำนวณ a ใช้ค่าเฉลี่ย C_0 และ C ดังนั้นจึงต้องหาความไม่แน่นอน Type A ของค่าเฉลี่ย C_0 และ C ($U_{C_0,A}$ และ $U_{C,A}$) การหาความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์ทั้ง 2 มีขั้นตอนเหมือนกัน ดังนั้นจะอธิบายแค่กรณี C อย่างเดียว เริ่มจากหาผลรวม u Type A ของปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนทุกปัจจัยจากค่า SD_t ของค่าเฉลี่ยคอมพลายแอนซ์ เช่น เก็บข้อมูล C_{BFS} และ C_{CMOD} 10 ค่า ดังตารางในรูป 3.30 (ข) จากนั้นหาผลรวม u Type A ของ C_{BFS} และ C_{CMOD} จาก SD_t ของค่าเฉลี่ยของคอมพลายแอนซ์ทั้งสอง $U_{C,A}$ จะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของผลรวม u Type A $U_{C,A}$ สำหรับ C_{BFS} และ C_{CMOD} คือ 0.115×10^{-9} 1/N และ 0.00474×10^{-9} m/N ตามลำดับ

รูปที่ 3.30 ตัวอย่างข้อมูลดิบและผลการคำนวณ $U_{C,A}$ ก) การหาขนาด C

ข) ข้อมูลดิบและการวิเคราะห์

3.7.3.2 Type B

การคำนวณ a ใช้ค่า C_0 และ C โดยปริมาณทั้งสองใช้อุปกรณ์ในการวัดตัวเดียวกัน ทำให้ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ของปริมาณทั้งสองไม่เป็นอิสระต่อกัน การคำนวณความไม่แน่นอนจึงต้องคำนวณทั้งสองปริมาณพร้อมกัน โดยจะกำหนดตัวแปรที่ใช้คำนวณเป็น $\frac{C}{C_0}$ ตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองในสมการ (3.5) และ (3.7) การคำนวณความไม่แน่นอนนี้จะใช้วิธีมอนติ คาร์โล เนื่องจากสมการที่ใช้คำนวณ C มีความซับซ้อน, ขนาดความไม่แน่นอนบางปัจจัยขึ้นกับขนาดของข้อมูลดิบ (BFS , $CMOD$ และ ภาวะ) และปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนไม่เป็นอิสระต่อกันหลายตัว ทำให้การหาความไม่แน่นอนด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ทำได้ยาก การหาความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล มีขั้นตอนดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.3.4 และจะต้องมีข้อมูล 3 อย่างคือ

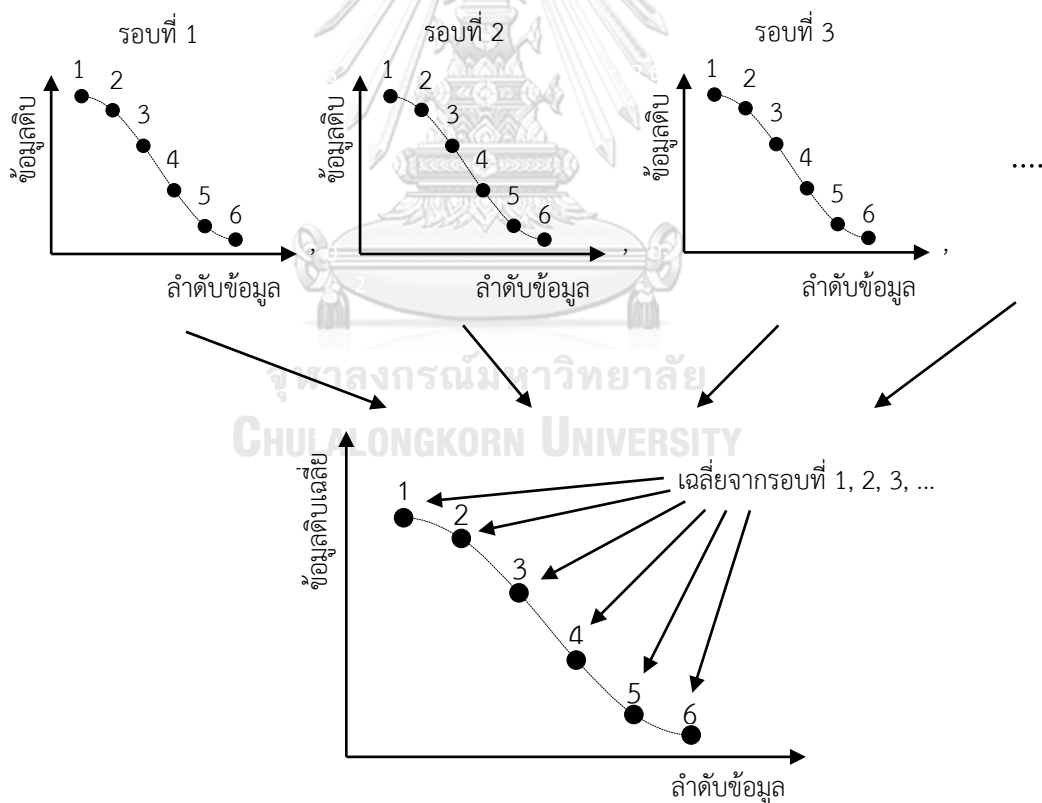
- 1) ค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบในช่วงปลดภาระที่ใช้คำนวณ C_0 และ C
- 2) ขนาดและชนิดการแจกแจงความไม่แน่นอนจากแต่ละปัจจัย
- 3) สมการคำนวณปริมาณอนุพันธ์

การหาข้อมูลทั้ง 3 จะอธิบายในหัวข้อต่อจากนี้

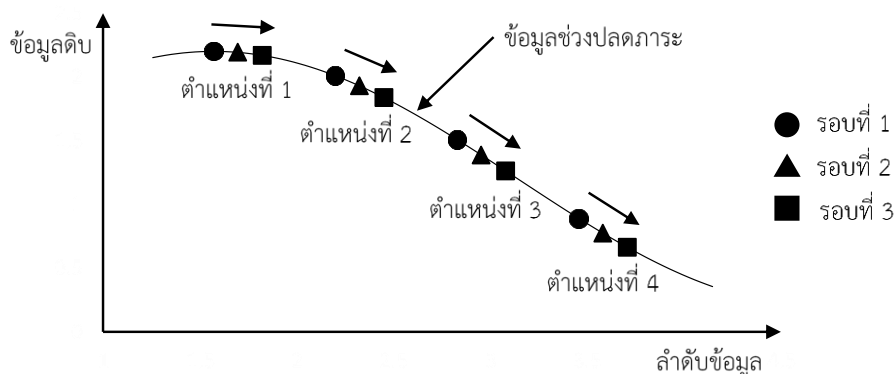
1) ค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบช่วงปลดภาระ

ค่าประมาณที่ดีที่สุดเ็นทางปฏิบัติคือค่าเฉลี่ย คำนี้นหาได้จากการนำข้อมูลดิบของแต่ละตำแหน่งในช่วงปลดภาระจากแต่ละรอบมาเฉลี่ยกันดังรูป 3.31 ตัวเลขที่แสดงบนจุดข้อมูลในกราฟแสดงถึงลำดับข้อมูล การเฉลี่ยข้อมูลจะนำข้อมูลดิบลำดับเดียวกันในแต่ละรอบมาเฉลี่ย เช่น นำข้อมูลดิบตำแหน่งที่ 1 จากรอบที่ 1, 2, 3, ... มาเฉลี่ยก็จะได้ข้อมูลดิบเฉลี่ยตำแหน่งที่ 1 ของกราฟอันล่าง ทำแบบเดียวกันกับตำแหน่งที่เหลือในช่วงปลดภาระก็จะได้ค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบช่วงปลดภาระ

เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมการให้ภาระล่า (ชุดควบคุม) และอุปกรณ์เก็บข้อมูล (NI 9235 และ NI 9215) ในงานวิจัยนี้ทำงานเป็นอิสระต่อกัน โดยที่สัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์ทั้งสองต่างกันเล็กน้อยตามข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ ดังนั้นเมื่อเก็บข้อมูลต่อเนื่องหลายรอบข้อมูลลำดับเดียวกันของแต่ละรอบจะไม่ได้ยู่ตำแหน่งเดียวกันบนคลื่น แต่จะขยับไปทางซ้ายหรือขวาบนคลื่นที่เล็กน้อย ยกตัวอย่างดังการเก็บข้อมูลดิบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแต่ละรอบดังรูป 3.32 โดยสัญลักษณ์วงกลม, สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม คือข้อมูลที่เก็บรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังนั้นค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลดิบหลายรอบจะไม่ใช้ข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่หากไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องหลายรอบภาระ เช่น 100 รอบ ผลดังกล่าวจะไม่เด่นชัด จึงพออนุมานได้ว่าข้อมูลจากแต่ละรอบที่นำมาเฉลี่ยเป็นข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 3.31 การหาค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบช่วงปลดภาระ



รูปที่ 3.32 ผลของการนับเวลาไม่เท่ากันของอุปกรณ์ให้ภาระและเก็บข้อมูล

2) ขนาดและชนิดการแจกแจงความไม่แน่นอนจากแต่ละปัจจัย

การคำนวณความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล จะต้องสุ่มค่าความไม่แน่นอนจากแต่ละปัจจัยของข้อมูลดิบแล้วนำไปรวมกับค่าประมาณที่ดีที่สุด เนื่องจากข้อมูลดิบที่ใช้คำนวณคอมพลายแอนซ์มีลักษณะเป็นชุดข้อมูล (ข้อมูลในช่วงปลดภาระ) ทำให้ต้องสุ่มความไม่แน่นอนจากแต่ละปัจจัยให้กับทุกข้อมูลในช่วงปลดภาระแล้วจึงนำไปรวมกับค่าประมาณที่ดีที่สุด ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B ทั้งหมดของข้อมูลดิบสรุปดังตาราง 3.14 คอลัมน์แรกของตาราง คือ ปริมาณที่ได้รับผลความไม่แน่นอน คอลัมน์ที่สอง คือ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน คอลัมน์ที่สาม คือ ประเภทของปัจจัย โดยแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ความละเอียด, ความแม่นยำ และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งมีลักษณะการส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนต่างกันรายละเอียดจะอธิบายต่อจากนี้ คอลัมน์ที่สี่ คือ ลักษณะการแจกแจงความไม่แน่นอน ปัจจัยประเภทความละเอียดจะมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ ส่วนปัจจัยประเภทความแม่นยำ และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์มีการแจกแจงแบบปกติ คอลัมน์ที่ห้า คือ ขนาด u ซึ่งหาได้จากสูตรในตาราง 2.1 ยกเว้น ปัจจัยประเภทตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งต้องพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิบที่วัดได้กับตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ โดยความไม่แน่นอนประเภทนี้เป็นฟังก์ชันของ a , W และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ (เช่น x , β , y) รายละเอียดจะอธิบายหลังจากนี้

ตารางที่ 3.14 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B

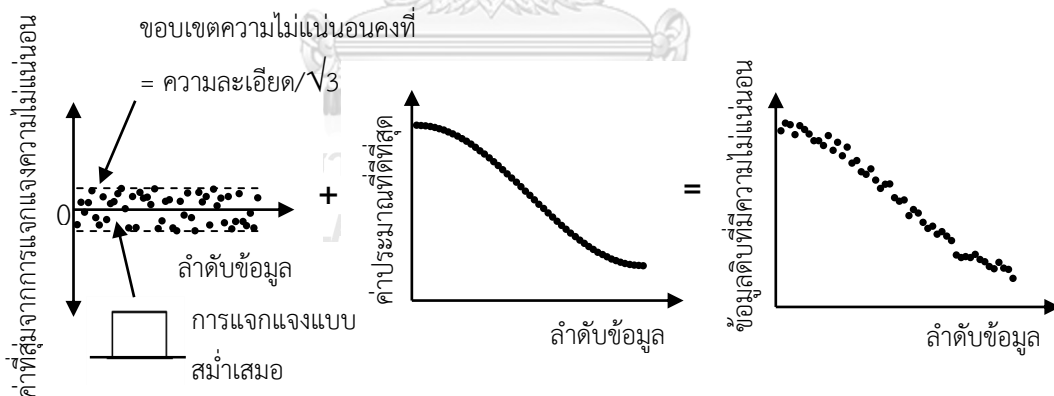
ปริมาณที่ได้รับผล	ปัจจัย	ประเภทของปัจจัย	การแจกแจง	u
BFS	ADC (NI 9235)	ความละเอียด	สม่ำเสมอ	0.00658 $\mu\epsilon$
		ความแม่นยำ	ปกติ	0.02 % ของค่าที่วัด
	ตำแหน่งและแนวที่ติดตั้ง ความเครียด	ตำแหน่งติดตั้ง อุปกรณ์	ปกติ	$f(a, W, x, \beta, GL)$
ภาระ	ADC (NI 9215)	ความละเอียด	สม่ำเสมอ	0.352 N
		ความแม่นยำ	ปกติ	0.02 % ของค่าที่วัด
	โพลตเซล	ความแม่นยำ	ปกติ	1 % ของค่าที่วัด

ตาราง 3.14 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน Type B (ต่อ)

ปริมาณที่ได้รับผล	ปัจจัย	ประเภทของปัจจัย	การแจกแจง	u
<i>CMOD</i>	ADC (NI 9215)	ความละเอียด	สม่ำเสมอ	0.0176 μm
		ความแม่นยำ	ปกติ	0.02 % ของค่าที่วัด
	อุปกรณ์สอบเทียบคลิปเกจ	ความละเอียด	สม่ำเสมอ	0.577 μm
		ความแม่นยำ	ปกติ	0.6 % ของค่าที่วัด
	คลิปเกจ	ความแม่นยำ	ปกติ	1 % ของค่าที่วัด
	ตำแหน่งที่ติดคลิปเกจ	ตำแหน่งติดอุปกรณ์	ปกติ	$f(a, W, y)$

2.1) ความละเอียด

ความไม่แน่นอนชนิดนี้ไม่ขึ้นกับขนาดของข้อมูลดิบ และมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ ขนาดความไม่แน่นอนของปัจจัยชนิดนี้หาได้จากข้อมูลความละเอียดของอุปกรณ์ตั้งคอลัมน์ที่ทำในตาราง 3.14 ในการทำซ้ำแต่ละครั้งด้วยวิธีมอนติ คาร์โล ความไม่แน่นอนของข้อมูลดิบแต่ละตำแหน่งในช่วงปลดภาระจะถูกสุ่มค่าจากการแจกแจงของความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียด (รูปที่ 3.33 รูปซ้าย) แล้วนำไปรวมกับค่าประมาณที่ดีที่สุด (รูปกลาง) จะได้ข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน (รูปขวา) ลักษณะการส่งผลของปัจจัยนี้ คือ ทำให้ขนาดของข้อมูลดิบทุกข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนจากค่าประมาณที่ดีที่สุดแบบสุ่ม

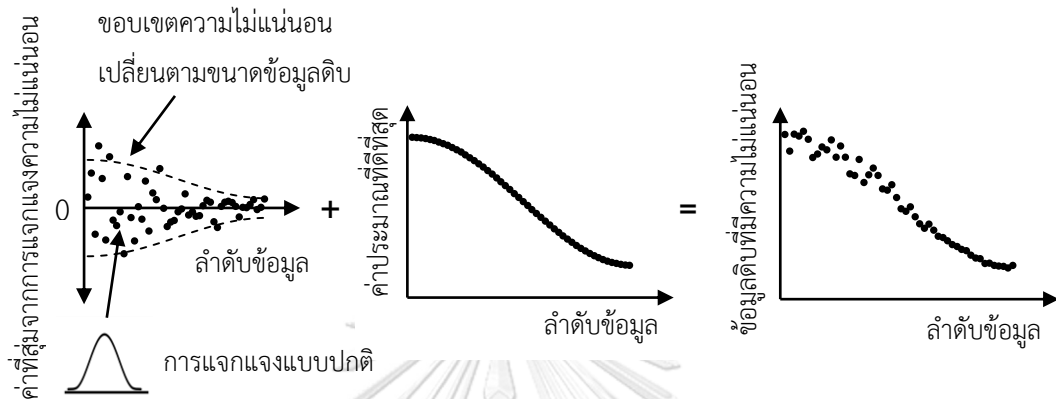


รูปที่ 3.33 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความละเอียด

2.2) ความแม่นยำ

ความไม่แน่นอนจากความแม่นยำของ ADC ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ความผิดพลาดจากการขยาย และความผิดพลาดออฟเซต ซึ่งมีแค่ความผิดพลาดจากการขยายเท่านั้นที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนของ C ดังที่อธิบายในหัวข้อ 2.4.7 ความผิดพลาดจากการขยายสามารถหาได้จากคู่มือใช้งานของอุปกรณ์ แต่คู่มือของคลิปเกจ และโพลดเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ระบุเพียงความแม่นยำ ซึ่งเป็นผลรวมของความผิดพลาดทั้งสอง ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ความผิดพลาดจากการขยายมีค่าเท่ากับความแม่นยำของอุปกรณ์ ความไม่แน่นอนประเภทนี้ขึ้นกับขนาดที่วัด และมีการแจกแจงแบบปกติ

ในการทำซ้ำแต่ละครั้งด้วยวิธีมอนติ คาร์โล ความไม่แน่นอนของข้อมูลดิบแต่ละข้อมูลในช่วงปลดภาระจะถูกสุ่มค่าจากการแจกแจงของความไม่แน่นอนเนื่องจากความแม่นยำ (รูปที่ 3.34 รูปซ้าย) แล้วนำไปรวมกับค่าประมาณที่ดีที่สุด (รูปกลาง) จะได้ข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน (รูปขวา) ลักษณะการส่งผลของปัจจัยนี้คือ ทำให้ขนาดของข้อมูลดิบทุกข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนจากค่าประมาณที่ดีที่สุดแบบสุ่ม โดยขอบเขตความคลาดเคลื่อนจะแปรผันตามขนาดของค่าประมาณที่ดีที่สุดของข้อมูลดิบ



รูปที่ 3.34 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความแม่นยำ

2.3) ความคลาดเคลื่อนของการตีอูปรกรณ์

ความไม่แน่นอนเนื่องจากปัจจัยนี้ขึ้นกับขนาดของ *BFS* (หรือ *CMOD*) และความยาวรอยร้าว สำหรับ *BFS* ความไม่แน่นอนเนื่องจากตำแหน่งและแนวตีดเคจความเครียดคลาดเคลื่อน รวมถึงความยาวของเคจความเครียด (U_{SG}) หาได้จากสมการต่อไปนี้ รายละเอียดที่มาของสมการอยู่ในภาคผนวก ค.1

$$U_{SG} = \left(1 - M_{\beta} \frac{\left(\frac{1}{3}(-29870 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 23897 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 7581.9 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 1903.5 \right) \left(\left(x + \frac{1}{2}GL\right)^3 - \left(x - \frac{1}{2}GL\right)^3 \right) + GL \right)}{GL} \right) \cdot [BFS] \quad (3.25)$$

$$M_{\beta} = (0.3575 + 0.6425 \cos(2\beta)) \quad (3.26)$$

โดย x คือ ระยะที่ตีดเคจความเครียดคลาดเคลื่อนดังรูป 2.21

β คือ มุมที่ตีดเคจความเครียดคลาดเคลื่อนดังรูป 2.22

GL คือ ความยาวของเคจความเครียด (Gauge length)

[*BFS*] คือ เมทริกซ์แถวซึ่งบรรจุข้อมูล *BFS* แต่ละตำแหน่งในช่วงปลดภาระ

สำหรับ *CMOD* ความไม่แน่นอนเนื่องจากตำแหน่งตีดคลิปกเคจคลาดเคลื่อน (U_{CG}) หาได้จากสมการต่อไปนี้ รายละเอียดที่มาของสมการอยู่ในค.2

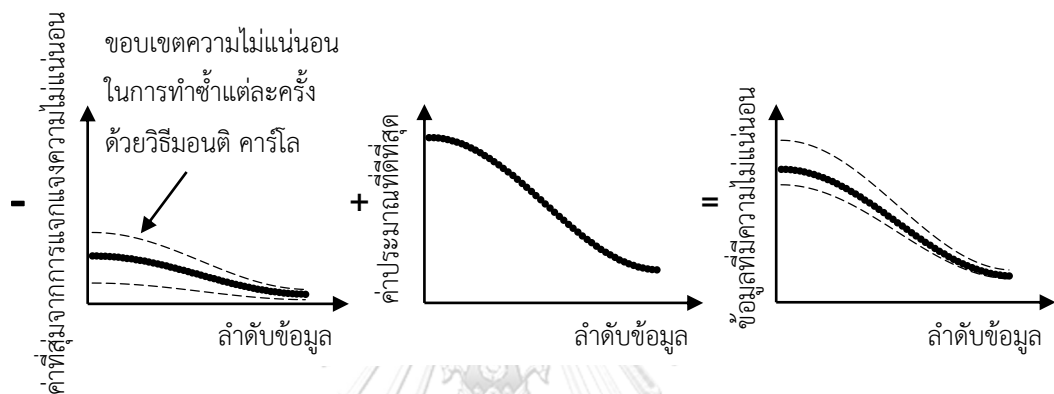
$$U_{CG} = \left(1 - \left(-0.7717 \cdot \left(\frac{y}{W}\right) + 1.192932 \right) \cdot \left(\frac{a}{W}\right) \left(1.004 \cdot \left(\frac{y}{W}\right)^2 + 0.1848 \cdot \left(\frac{y}{W}\right) - 0.1090 \right) \right) \cdot [CMOD] \quad (3.27)$$

โดย y คือ ระยะที่ตีดคลิปกเคจคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่นิยามไว้ในสมการ (2.1) ดังรูป 2.1 (ก)

[*CMOD*] คือ เมทริกซ์แถวซึ่งบรรจุข้อมูล *CMOD* แต่ละตำแหน่งในช่วงปลดภาระ

ในการทำซ้ำแต่ละครั้งด้วยวิธีมอนติ คาร์โล ความไม่แน่นอนของข้อมูลแต่ละตัวจะได้จาก สุ่มค่า x และ β (หรือ y) ตามขนาดและการแจกแจงของแต่ละตัวแปร แล้วแทนลงในสมการ (3.25) (หรือ (3.27)) ความไม่แน่นอนมีลักษณะเป็น ค่าคงที่ \times BFS (หรือ $CMOD$) ดังรูปที่ 3.35 รูปซ้าย แล้วนำไปลบกับค่าประมาณ ที่ดีที่สุด (รูปกลาง) จะได้ข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน (รูปขวา) ลักษณะการส่งผลของปัจจัยนี้ทำให้แอมพลิจูดของ BFS (หรือ $CMOD$) มีขนาดน้อยกว่าค่าจริงแบบสุ่มในแต่ละรอบที่ทำซ้ำด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

การหาค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และ B ของ x , β และ y มีหลักการเหมือนกับการหาค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และ B ของ W และ a_{50}



รูปที่ 3.35 การสุ่มค่าข้อมูลดิบที่ได้รับผลความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนของการติดอุปกรณ์

นอกจากปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนที่ได้อธิบายในข้างต้น ยังมีอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ความแม่นยำของตัวประกอบเกจ (Gauge factor) ของเกจความเครียด แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลของปัจจัยนี้

3) สมการคำนวณปริมาณอนุพันธ์

สมการที่ใช้คำนวณ C และ C_0 คือสมการประมาณความชันของเส้นตรง ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณ $\frac{C}{C_0}$ จึงมีลักษณะดังสมการ (3.28)

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\sum(P-\bar{P})(BFS-\bar{BFS})}{\sum(P-\bar{P})^2}}{\frac{\sum(P_0-\bar{P}_0)(BFS_0-\bar{BFS}_0)}{\sum(P_0-\bar{P}_0)^2}} \quad (3.28)$$

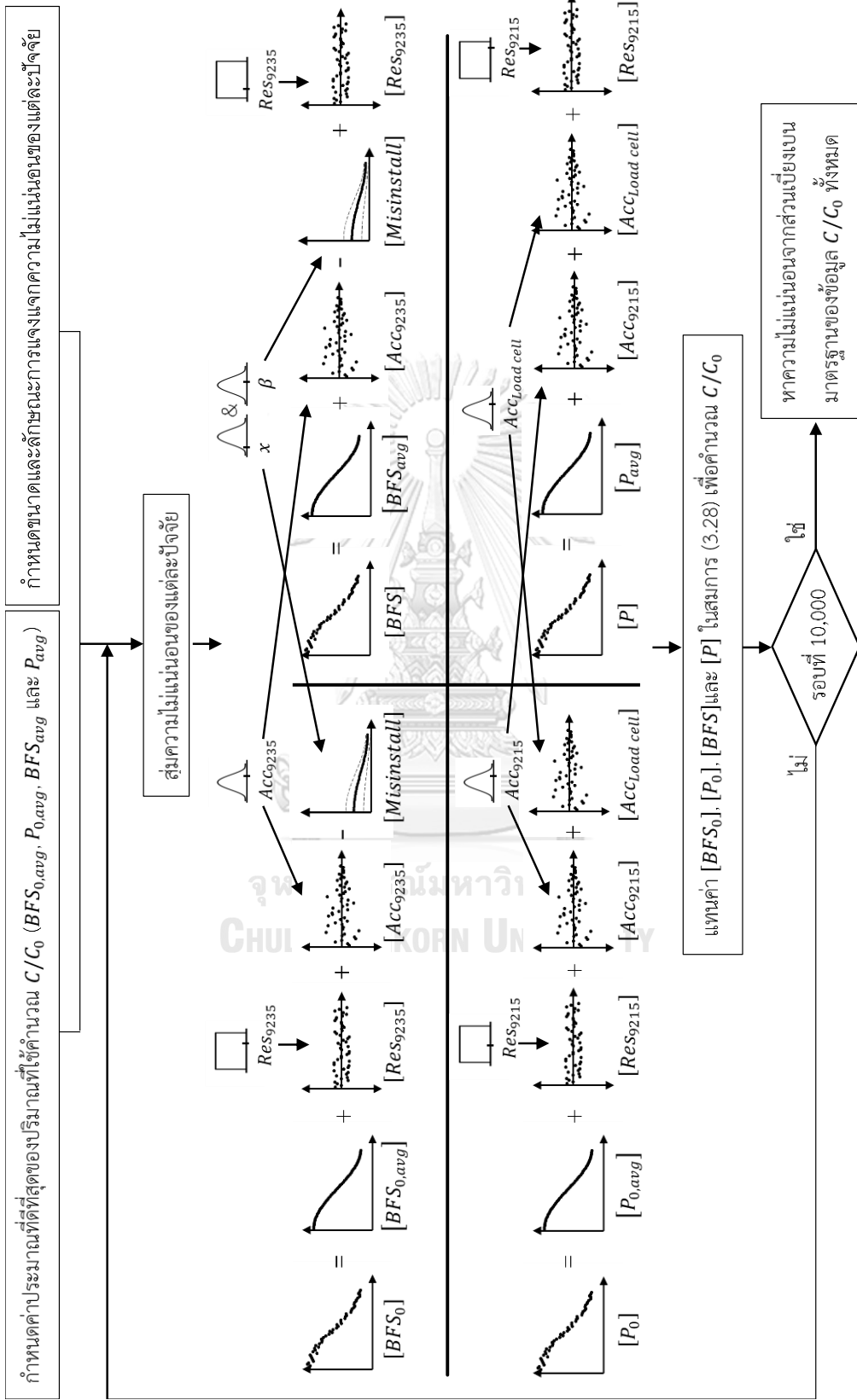
4) การคำนวณความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

การหาความไม่แน่นอนของ C_{BFS} และ C_{CMOD} มีขั้นตอนเหมือนกัน ต่างกันเพียงปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน โดยจะอธิบายขั้นตอนการหาความไม่แน่นอนของ C_{BFS} จากนั้นจึงอธิบาย C_{CMOD} การหาความไม่แน่นอน Type B ของ $\frac{C}{C_0}$ ($U_{C/C_0,B}$) แสดงดังแผนผังในรูป 3.36 เริ่มจากกำหนดค่าประมาณที่ดีที่สุดของความเครียดที่รอยร้าวเริ่มต้น (BFS_0), ภาระที่รอยร้าวเริ่มต้น (P_0), BFS และ P ถัดมากำหนดลักษณะการแจกแจงและขนาดความไม่แน่นอนแต่ละปัจจัยของทั้งสี่ปริมาณ ดังข้อมูลในตาราง 3.14 จากนั้นสุ่มค่าความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยตามลักษณะการแจกแจงแล้วนำไปรวมกับค่าจริงของปริมาณทั้งสี่ วงเล็บก้ามปูของตัวแปร หมายถึง ตัวแปรนั้นเป็นเมทริกซ์แถว (Row matrix) ซึ่งมีข้อมูลขนาดของปริมาณในแต่ละตำแหน่งช่วงปลดภาระเอาไว้ ความหมาย

ของตัวแปรในรูป 3.36 สรุปดังตาราง 3.15 ต่อมานำค่าของปริมาณทั้งสิ้นที่สุ่มได้ไปคำนวณ $\frac{C}{C_0}$ ด้วยสมการ (3.28) แล้วทำบันทึกผลลัพธ์ไว้ ทำการสุ่มค่าและคำนวณซ้ำทั้งหมด 10,000 รอบ แล้วหา u และ U ของ $\frac{C}{C_0}$ จาก SD และ $2 \times SD$ ของผลลัพธ์ $\frac{C}{C_0}$ ที่ได้จากการสุ่มทั้งหมด ตามลำดับ

ตารางที่ 3.15 ความหมายของความไม่แน่นอนของแต่ละตัวแปรในรูป 3.36

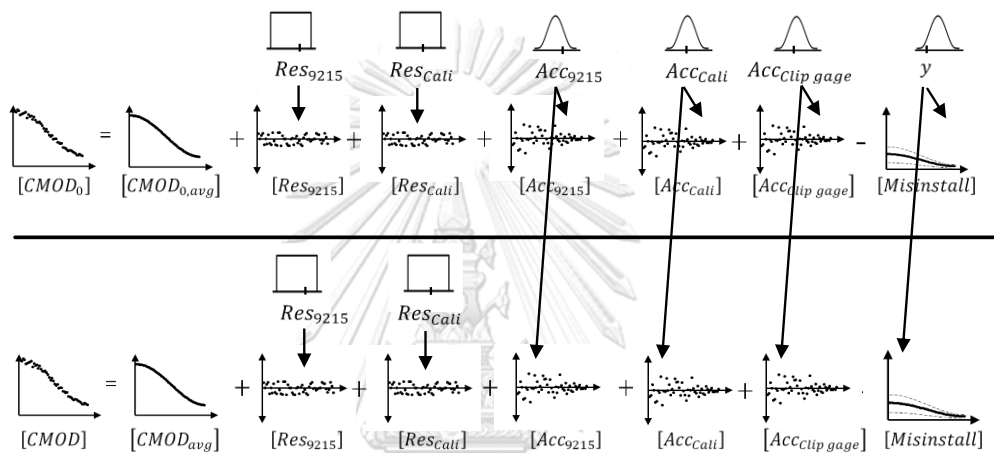
ตัวแปร	ความไม่แน่นอน
<i>Res</i> ₉₂₃₅	ความละเอียดของ ADC (NI 9235)
<i>Acc</i> ₉₂₃₅	ความแม่นยำของ ADC (NI 9235)
<i>Res</i> ₉₂₁₅	ความละเอียดของ ADC (NI 9215)
<i>Acc</i> ₉₂₁₅	ความแม่นยำของ ADC (NI 9215)
<i>Acc</i> _{Load cell}	ความแม่นยำของโหลดเซล
<i>Misinstall</i>	ความคลาดเคลื่อนของการติดตั้ง



รูปที่ 3.36 แผนผังวิธีคำนวณ $U_{C/C_0,B}$ กรณี C_{BFS} ด้วยวิธีมอนติ คาร์ล

การหาความไม่แน่นอนของ C_{CMOD} มีขั้นตอนเหมือนกับ C_{BFS} แต่เปลี่ยนปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอน จากปัจจัยของ BFS เป็นปัจจัยของ $CMOD$ รวมทั้งเปลี่ยน $BFS_{0,avg}$ และ BFS_{avg} เป็น $CMOD_{0,avg}$ และ $CMOD_{avg}$ ตามลำดับดังรูป 3.37 โดยตัวแปร Res_{Cali} และ Acc_{Cali} คือความไม่แน่นอนจากความละเอียดและความแม่นยำของอุปกรณ์สอบเทียบคลิปกเกจตามลำดับ นอกจากนี้เปลี่ยนสมการที่ใช้คำนวณ $\frac{C}{C_0}$ ในเป็นสมการ (3.29)

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\Sigma(P-\bar{P})(CMOD-\bar{CMOD})}{\Sigma(P-\bar{P})^2}}{\frac{\Sigma(P_0-\bar{P}_0)(CMOD_0-\bar{CMOD}_0)}{\Sigma(P_0-\bar{P}_0)^2}} \quad (3.29)$$



รูปที่ 3.37 การสุ่มค่า $CMOD_0$ และ $CMOD$ เพื่อคำนวณ $U_{C/C_0,B}$ กรณี C_{CMOD} ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

3.7.4 วิธีคำนวณความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวจากคอมพลายแอนซ์

U_a สามารถหาได้จากการรวม U_W , $U_{a_{s0}}$, U_{C_0} และ U_C ทั้ง Type A และ B ด้วยวิธี RSS จะได้สมการสำหรับคำนวณ U_a ดังนี้

$$U_a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial W} U_{W,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial W} U_{W,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0,A}}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0,B}}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial C_0} U_{C_0,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial C} U_{C,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial C/C_0} U_{C/C_0,B}\right)^2} \quad (3.30)$$

สมการ (3.30) จะคำนวณผลของ U_W และ $U_{a_{s0}}$ ทั้ง Type A และ B แต่ U_{C_0} และ U_C จะคำนวณผลของ Type A อย่างเดียว โดยความไม่แน่นอน Type B ของ C_0 และ C คิตรงมกันเป็น $U_{C/C_0,B}$ แทน ความหมายของแต่ละพจน์ของสมการ (3.30) ด้านขวา เรียงตามลำดับ

- 1) $\frac{\partial a}{\partial W} U_{W,A}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{W,A}$ (U_a by W,A)
- 2) $\frac{\partial a}{\partial W} U_{W,B}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{W,B}$ (U_a by W,B)
- 3) $\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0,A}}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{a_{s0,A}}$ (U_a by $a_{s0,A}$)

- 4) $\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0},B}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{a_{s0},B}$ (U_a by a_{s0},B)
- 5) $\frac{\partial a}{\partial C_0} U_{C_0,A}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{C_0,A}$ (U_a by C_0,A)
- 6) $\frac{\partial a}{\partial C} U_{C,A}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{C,A}$ (U_a by C,A)
- 7) $\frac{\partial a}{\partial C/C_0} U_{C/C_0,B}$ คือ ขนาดของ U_a ที่เกิดจาก $U_{C/C_0,B}$ (U_a by $C/C_0,B$)

การคำนวณ U_a ที่ทุกความยาวรอยร้าวใช้สมการ (3.30) ยกเว้นที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของแต่ละ R (ความยาวรอยร้าวที่เก็บค่า C_0) U_a จะหาได้จากสมการ (3.31)

$$U_a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0},A}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial a_{s0}} U_{a_{s0},B}\right)^2} \quad (3.31)$$

เนื่องจากผู้วิจัยพบว่าที่ขอบหน้ารอยร้าวเริ่มต้น C_0 และ C เป็นค่าเดียวกัน ทำให้ C_0 และ C ในสมการที่ใช้คำนวณ a สมการ (3.4) – (3.7) ตัดกัน สมการที่ C_0 และ C ตัดกันแล้วกลายเป็นฟังก์ชันของ W และ a_{s0} แค่สองตัว ผู้วิจัยได้ลองนำสมการนี้ไปหาความไม่แน่นอนด้วยวิธีมอนติ คาร์โล ซึ่งมีความไม่แน่นอน 2 ตัว คือ U_W และ $U_{a_{s0}}$ พบว่ามีเพียง $U_{a_{s0}}$ เท่านั้นที่ทำให้เกิด U_a โดย U_a ที่คำนวณได้จากวิธีมอนติ คาร์โล จะเท่ากับที่คำนวณได้จากสมการ (3.31) ส่วน U_W ไม่ส่งผลต่อขนาด U_a เลยไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดขนาด U_W สาเหตุที่มีเพียง $U_{a_{s0}}$ เท่านั้นที่ทำให้เกิด U_a ผู้วิจัยมีความเห็นว่าสมการที่ใช้คำนวณ a ที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นเป็นสมการที่พยายามจะทำให้ a และ a_{s0} มีค่าเท่ากัน หรือก็คือ $a = a_{s0}$ U_a ที่ความยาวรอยร้าวนี้จึงเกิดจาก $U_{a_{s0}}$ เพียงอย่างเดียว

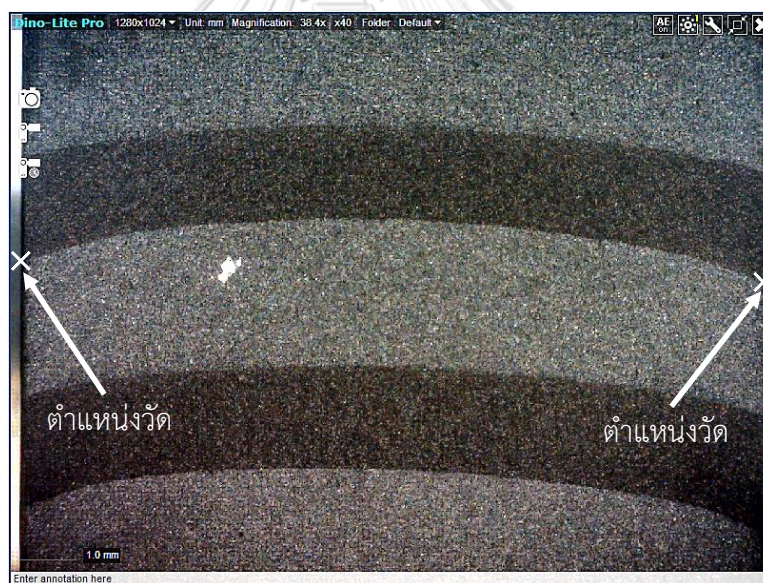
บทที่ 4

ความยาวรอยร้าวกายภาพ

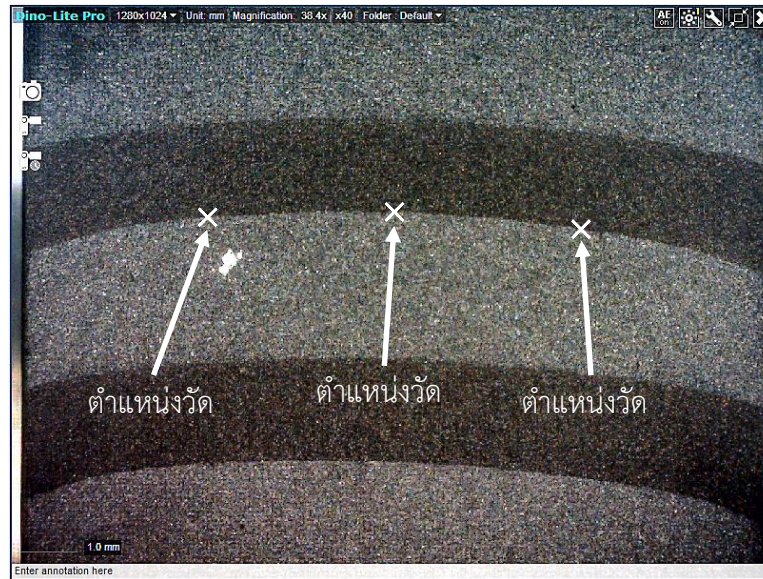
บทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่าง a_s นิยามต่าง ๆ กับ a เริ่มจากหัวข้อ 4.1 นำเสนอผลการวัด a_s นิยามต่าง ๆ หัวข้อ 4.2 อภิปรายความสอดคล้องของ a_s และ a

4.1 ผลการวัดความยาวรอยร้าวกายภาพ

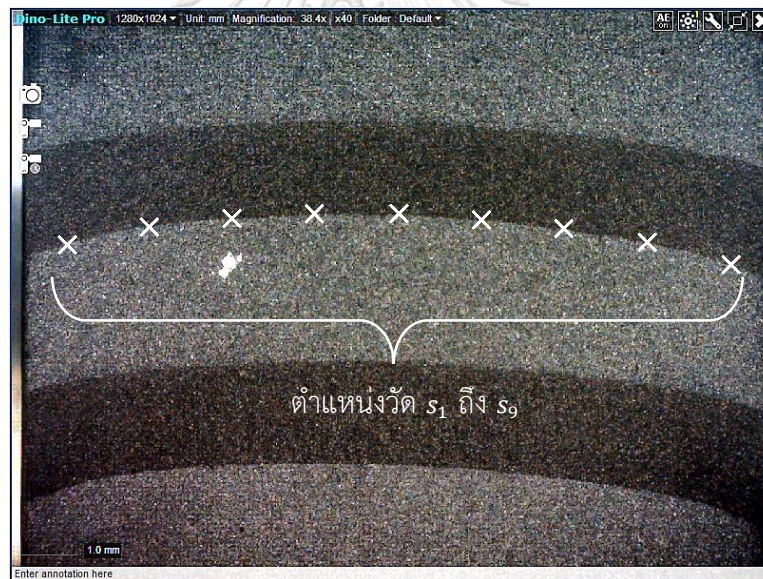
การวัด a_s ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนขอบหน้ารอยร้าวจะวัดระยะ d และ s อย่างละ 5 ครั้ง ด้วยวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.2.3 และ 3.4 การวัดระยะ s ของนิยามต่าง ๆ จะวัดที่ตำแหน่งซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.2 รูปที่ 4.1 – 4.3 แสดงตัวอย่างการวัดระยะ s จากภาพถ่ายสำหรับวิธีเฉลี่ย 2, 3 และ 9 ตำแหน่ง ตามลำดับ จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของระยะ d มารวมกับค่าเฉลี่ยของระยะ s_i เมื่อ i คือ หมายเลขของตำแหน่งที่วัด จะได้ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนขอบหน้ารอยร้าว สุดท้าย นำความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเหล่านี้ไปแทนนิยามต่าง ๆ ที่อธิบายในหัวข้อ 2.2 ก็จะได้ a_s สำหรับนิยามนั้น ตัวอย่างข้อมูลการวัดและการคำนวณ a_s อยู่ในภาคผนวก ง.1 ผลการวัด a_s ของชิ้นทดสอบ A1 – A10 ด้วยนิยามต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.1 – 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งวัดระยะ s วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งวัดระยะ s วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งวัดระยะ s วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.1 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A1

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	13.06	13.67	13.56	13.56
2	15.60	16.06	15.95	15.95
3	16.43	17.02	16.91	16.91
4	17.50	18.03	17.93	17.93
5	18.94	19.59	19.49	19.49
6	20.34	20.89	20.78	20.77
7	21.82	22.51	22.38	22.37
8	23.56	24.02	23.94	23.93
9	24.88	25.48	25.39	25.37
10	26.61	27.13	27.06	27.04
11	27.71	28.42	28.30	28.28
12	29.76	30.22	30.17	30.15
13	30.67	31.30	31.19	31.18

ตารางที่ 4.2 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A2

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.80	13.43	13.30	13.30
2	14.35	14.86	14.76	14.77
3	15.71	16.34	16.21	16.22
4	17.25	17.77	17.66	17.66
5	18.77	19.43	19.31	19.31
6	20.64	21.17	21.05	21.05
7	22.06	22.72	22.55	22.55
8	23.45	23.95	23.83	23.83
9	25.13	25.81	25.68	25.66
10	26.33	26.89	26.79	26.78
11	28.32	28.89	28.70	28.68
12	28.84	29.47	29.32	29.31
13	30.78	31.38	31.26	31.24

ตารางที่ 4.3 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A3

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	13.13	13.69	13.68	13.61
2	14.65	15.15	15.14	15.08
3	16.20	16.76	16.73	16.67
4	17.47	18.04	18.03	17.97
5	19.00	19.59	19.57	19.51
6	20.49	21.04	21.01	20.95
7	22.14	22.75	22.73	22.67
8	23.59	24.16	24.14	24.09
9	24.92	25.61	25.57	25.52
10	26.26	26.89	26.85	26.80
11	28.02	28.73	28.67	28.62
12	29.28	29.87	29.82	29.78
13	31.55	31.61	31.55	31.53

ตารางที่ 4.4 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A4

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.59	13.15	13.03	13.03
2	13.88	14.39	14.31	14.27
3	15.44	16.01	15.93	15.89
4	16.90	17.37	17.28	17.24
5	18.52	19.07	18.98	18.94
6	19.90	20.43	20.35	20.32
7	21.52	22.09	21.99	21.96
8	22.98	23.51	23.42	23.39
9	24.71	25.31	25.21	25.18
10	26.07	26.62	26.53	26.50
11	27.79	28.41	28.31	28.27
12	29.37	29.83	29.75	29.72
13	30.73	31.24	31.15	31.12

ตารางที่ 4.5 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A5

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.40	13.09	12.96	12.94
2	13.88	14.45	14.33	14.33
3	15.49	16.14	16.02	16.01
4	17.06	17.58	17.47	17.46
5	18.49	19.20	19.05	19.03
6	20.24	20.74	20.65	20.64
7	21.64	22.35	22.25	22.23
8	23.33	23.87	23.78	23.76
9	24.70	25.36	25.25	25.23
10	26.43	26.90	26.81	26.79

ตารางที่ 4.6 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A6

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.05	12.71	12.59	12.60
2	13.85	14.41	14.30	14.30
3	15.32	16.03	15.90	15.90
4	16.80	17.38	17.28	17.28
5	18.47	19.27	19.11	19.11
6	20.00	20.65	20.54	20.54
7	21.35	22.01	21.85	21.86
8	23.07	23.60	23.51	23.50
9	24.58	25.22	25.07	25.07
10	25.98	26.52	26.41	26.40

ตารางที่ 4.7 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A7

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.77	13.33	13.26	13.23
2	14.09	14.57	14.49	14.47
3	15.84	16.46	16.37	16.34
4	17.00	17.54	17.45	17.43
5	18.48	19.08	18.99	18.96
6	20.05	20.54	20.43	20.40
7	21.48	22.10	21.95	21.92
8	23.17	23.62	23.50	23.48
9	24.52	25.04	24.89	24.86
10	26.27	26.69	26.54	26.53

ตารางที่ 4.8 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A8

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.81	13.31	13.25	13.20
2	14.05	14.57	14.52	14.48
3	15.66	16.23	16.18	16.14
4	17.27	17.80	17.75	17.70
5	18.80	19.41	19.34	19.29
6	20.17	20.67	20.63	20.58
7	21.79	22.36	22.28	22.24
8	23.10	23.61	23.54	23.51
9	24.56	25.17	25.10	25.05
10	26.06	26.55	26.50	26.46

ตารางที่ 4.9 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A9

ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.62	13.25	13.14	13.14
2	14.39	14.97	14.86	14.86
3	15.42	16.09	15.96	15.96
4	17.08	17.61	17.52	17.52
5	18.61	19.25	19.13	19.12
6	19.99	20.53	20.43	20.43
7	21.42	22.15	22.02	22.00
8	23.05	23.58	23.48	23.47
9	25.01	25.80	25.67	25.65
10	26.24	26.82	26.71	26.70
11	27.59	28.32	28.22	28.20
12	29.36	29.89	29.77	29.76
13	30.47	31.11	31.00	30.98

ตารางที่ 4.10 ความยาวรอยร้าวกายภาพของชิ้นทดสอบ A10

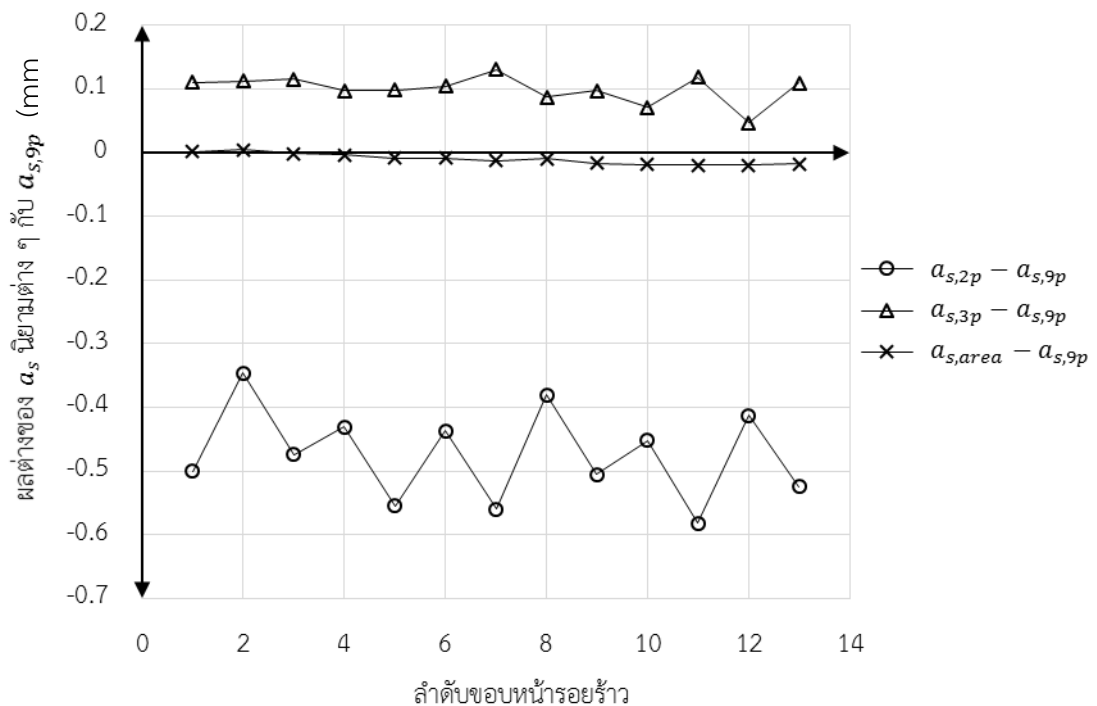
ลำดับขอบ หน้ารอยร้าว	$a_{s,2p}$ (mm)	$a_{s,3p}$ (mm)	$a_{s,9p}$ (mm)	$a_{s,area}$ (mm)
1	12.35	12.94	12.89	12.85
2	13.97	14.55	14.47	14.43
3	15.62	16.28	16.21	16.16
4	17.01	17.54	17.48	17.44
5	18.36	19.09	18.99	18.94
6	19.86	20.38	20.29	20.26
7	21.48	22.11	22.05	22.00
8	22.82	23.33	23.23	23.20
9	24.57	25.08	25.02	24.98
10	25.92	26.46	26.36	26.32

อภิปรายความแตกต่างของความยาวรอยร้าวกายภาพแต่ละนิยาม

เมื่อพิจารณาข้อมูล a_s จากตารางที่ 4.1 ถึง 4.10 จะพบว่าในทุกกรณีที่ขอบหน้ารอยร้าวเดียวกัน a_s ของแต่ละนิยามมีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1) วิธีเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง 2) วิธีเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง 3) วิธีพื้นสมมูล 4) วิธีเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง

เพื่อให้เห็นภาพของข้อสรุปข้างต้นชัดเจนขึ้นจึงทำการหาผลต่างระหว่าง $a_{s,9p}$ และ a_s นิยามอื่น ๆ ที่ขอบหน้ารอยร้าวเดียวกันกับข้อมูลทั้ง 10 ตาราง ยกตัวอย่าง ขึ้นทดสอบ A1 (ตาราง 4.1) ดังกราฟในรูปที่ 4.4 แกนตั้งของกราฟ คือ ผลต่างความยาวรอยร้าวระหว่าง a_s แต่ละนิยามกับ $a_{s,9p}$ ที่ขอบหน้ารอยร้าวเดียวกัน หากผลต่างมีค่าเป็นบวกแสดงว่า a_s นิยามนั้นมากกว่า $a_{s,9p}$ ในทางตรงกันข้ามหากผลต่างมีค่าเป็นลบแสดงว่า a_s นิยามนั้นน้อยกว่า $a_{s,9p}$

จากข้อมูลในกราฟพบว่าผล $a_{s,3p}$ มีค่าเป็นบวกมากที่สุดจึงมีค่ามากที่สุด $a_{s,area}$ ตีลบเล็กน้อยจึงมีขนาดน้อยกว่า $a_{s,9p}$ แต่มีขนาดใกล้เคียงกับ $a_{s,9p}$ (ต่างกันไม่เกิน 0.05 mm) สุดท้าย $a_{s,2p}$ ตีลบมากที่สุดจึงมีค่าน้อยสุด โดยขึ้นทดสอบอื่นที่เหลือก็มีแนวโน้มของผลต่างเช่นนี้

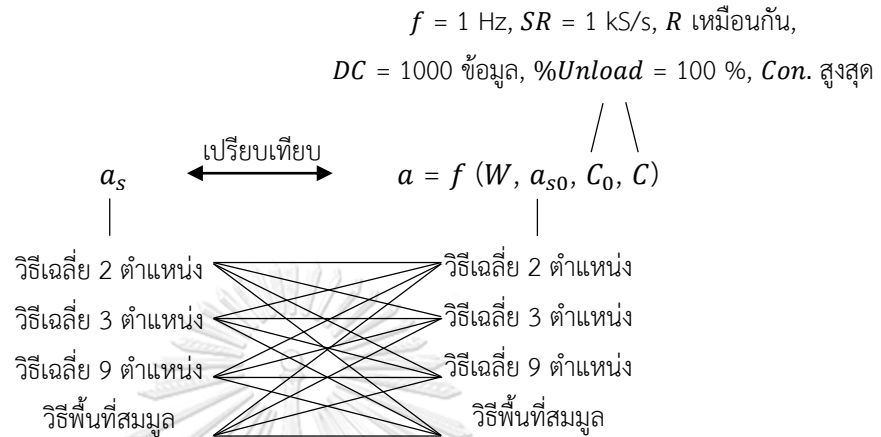


รูปที่ 4.4 ผลต่างของ a_s ภาพนิยามต่าง ๆ เทียบกับ $a_{s,9p}$ ของขึ้นทดสอบ A1

4.2 วิเคราะห์ความสอดคล้อง

หัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่าง a_s และ a โดยการคำนวณ a ในแต่ละขึ้นทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบจะใช้ C_0 และ C ที่ได้จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s ซึ่งอยู่ใกล้กับขอบหน้ารอยร้าวมากที่สุด และใช้ R เดียวกัน, $DC = 1000$ ข้อมูล, $\%Unload = 100$ %, $Con.$ สูงสุดของแต่ละความยาวรอยร้าว เนื่องจาก a_{s0} (ที่ใช้คำนวณ a) และ a_s มีหลายนิยาม ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการคำนวณ a โดยใช้ a_{s0} จากทุกนิยาม แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ a_s แต่ละนิยามแบบพบกันหมด เงื่อนไขการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังแผนภาพใน

รูปที่ 4.5 a ที่คำนวณได้และ a_s จากขั้นตอนสอบ A1 – A10 แสดงดังตาราง 4.11 – 4.20 ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าวจะแสดงความยาวรอยร้าว 3 ตัว คือ 1) a_s 2) a จากวิธี C_{BFS} 3) a จากวิธี C_{CMOD} ที่ขอบหน้ารอยร้าวต่าง ๆ โดยจะนำเสนอความยาวรอยร้าวทั้ง 3 ตัว กรณีที่ใช้ a_s และ a_{s0} นิยามเฉลี่ย 2, 3, 9 ตำแหน่ง และพื้นที่สมมูล



รูปที่ 4.5 เงื่อนไขการเปรียบเทียบ a_s กับ a

ตารางที่ 4.11 ขั้นตอนสอบ A1 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}, SR = 1 \text{ kS/s}$, รูปร่างคลื่น ไซน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	13.06	13.06	13.06	13.67	13.67	13.67	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56
2	15.60	15.60	15.60	16.06	16.06	16.06	15.95	15.95	15.95	15.95	15.95	15.95
3	16.43	16.41	16.45	17.02	17.01	17.03	16.91	16.90	16.92	16.90	16.90	16.92
4	17.50	17.59	17.60	18.03	18.04	18.04	17.93	17.93	17.93	17.93	17.94	17.94
5	18.94	18.98	19.06	19.59	19.58	19.61	19.49	19.47	19.51	19.48	19.48	19.51
6	20.34	20.44	20.47	20.89	20.90	20.89	20.78	20.78	20.79	20.77	20.79	20.79
7	21.82	21.89	22.02	22.51	22.49	22.53	22.38	22.38	22.44	22.37	22.38	22.44
8	23.56	23.60	23.65	24.02	24.05	24.03	23.94	23.94	23.94	23.93	23.94	23.94
9	24.88	24.91	25.08	25.48	25.49	25.55	25.39	25.38	25.47	25.37	25.38	25.47
10	26.61	26.70	26.76	27.13	27.13	27.11	27.06	27.02	27.03	27.04	27.03	27.03
11	27.71	27.83	28.04	28.41	28.38	28.47	28.30	28.28	28.39	28.28	28.28	28.39
12	29.76	29.80	29.87	30.22	30.19	30.18	30.17	30.10	30.10	30.15	30.10	30.10
13	30.67	30.80	31.05	31.30	31.30	31.42	31.19	31.21	31.35	31.17	31.21	31.35

ตารางที่ 4.12 ชั้นทดสอบ A2 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.80	12.80	12.80	13.43	13.43	13.43	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30
2	14.35	14.35	14.35	14.86	14.86	14.86	14.76	14.76	14.76	14.77	14.77	14.77
3	15.71	15.74	15.76	16.34	16.36	16.36	16.21	16.24	16.24	16.22	16.23	16.23
4	17.25	17.26	17.27	17.76	17.77	17.75	17.65	17.66	17.66	17.66	17.68	17.67
5	18.77	18.85	18.90	19.43	19.47	19.47	19.31	19.34	19.36	19.31	19.34	19.35
6	20.64	20.66	20.69	21.17	21.16	21.14	21.05	21.06	21.06	21.05	21.08	21.06
7	22.06	22.13	22.19	22.72	22.74	22.72	22.55	22.62	22.61	22.55	22.61	22.61
8	23.45	23.45	23.47	23.95	23.94	23.89	23.83	23.84	23.81	23.83	23.86	23.82
9	25.13	25.27	25.33	25.81	25.85	25.82	25.67	25.74	25.72	25.66	25.73	25.71
10	26.33	26.39	26.42	26.89	26.86	26.80	26.79	26.77	26.73	26.78	26.79	26.74
11	28.32	28.31	28.40	28.89	28.86	28.83	28.69	28.75	28.74	28.68	28.74	28.74
12	28.84	28.93	29.00	29.47	29.37	29.35	29.32	29.29	29.29	29.31	29.30	29.29
13	30.78	30.98	31.12	31.38	31.49	31.50	31.26	31.39	31.42	31.24	31.38	31.42

ตารางที่ 4.13 ชั้นทดสอบ A3 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	13.13	13.13	13.13	13.69	13.69	13.69	13.68	13.68	13.68	13.61	13.61	13.61
2	14.65	14.65	14.65	15.15	15.15	15.15	15.14	15.14	15.14	15.08	15.08	15.08
3	16.19	16.16	16.15	16.75	16.71	16.68	16.73	16.71	16.68	16.66	16.64	16.61
4	17.47	17.52	17.54	18.04	18.02	18.02	18.03	18.01	18.01	17.97	17.95	17.95
5	19.00	19.01	19.02	19.59	19.56	19.52	19.57	19.55	19.52	19.51	19.49	19.46
6	20.49	20.50	20.55	21.04	21.00	21.00	21.01	20.99	20.99	20.95	20.93	20.93
7	22.14	22.16	22.21	22.75	22.71	22.68	22.72	22.70	22.67	22.67	22.64	22.62
8	23.59	23.64	23.69	24.16	24.12	24.11	24.14	24.11	24.10	24.09	24.05	24.05
9	24.91	25.01	25.08	25.61	25.53	25.51	25.57	25.53	25.50	25.51	25.47	25.45
10	26.26	26.33	26.38	26.88	26.80	26.76	26.85	26.79	26.75	26.80	26.73	26.71
11	28.02	28.11	28.21	28.73	28.60	28.59	28.67	28.60	28.59	28.62	28.53	28.54
12	29.28	29.28	29.37	29.87	29.71	29.71	29.82	29.70	29.70	29.78	29.65	29.66
13	31.55	30.98	31.14	31.61	31.43	31.47	31.55	31.43	31.47	31.53	31.37	31.43

ตารางที่ 4.14 ชั้นทดสอบ A4 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)
1	12.59	12.59	12.59	13.15	13.15	13.15	13.03	13.03	13.03	13.03	13.03	13.03
2	13.87	13.87	13.87	14.39	14.39	14.39	14.31	14.31	14.31	14.27	14.27	14.27
3	15.44	15.48	15.45	16.01	16.02	15.99	15.93	15.90	15.87	15.89	15.90	15.87
4	16.90	16.86	16.85	17.37	17.37	17.34	17.28	17.29	17.26	17.24	17.25	17.23
5	18.52	18.53	18.52	19.07	19.08	19.02	18.98	18.95	18.91	18.94	18.95	18.91
6	19.90	19.93	19.95	20.43	20.44	20.41	20.35	20.36	20.34	20.32	20.32	20.31
7	21.52	21.56	21.57	22.08	22.10	22.04	21.99	21.98	21.94	21.96	21.98	21.94
8	22.98	23.03	23.06	23.51	23.53	23.49	23.42	23.45	23.43	23.39	23.41	23.40
9	24.71	24.81	24.83	25.31	25.33	25.27	25.21	25.21	25.18	25.18	25.21	25.18
10	26.06	26.16	26.19	26.62	26.63	26.58	26.53	26.56	26.52	26.50	26.52	26.50
11	27.79	27.92	27.97	28.41	28.41	28.35	28.31	28.30	28.27	28.27	28.30	28.27
12	29.37	29.37	29.43	29.83	29.81	29.77	29.74	29.75	29.72	29.72	29.71	29.70
13	30.72	30.84	30.92	31.24	31.28	31.26	31.14	31.18	31.19	31.12	31.18	31.19

ตารางที่ 4.15 ชั้นทดสอบ A5 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{MOD} (mm)
1	12.40	12.40	12.40	13.09	13.09	13.09	12.95	12.95	12.95	12.94	12.94	12.94
2	13.88	13.88	13.88	14.45	14.45	14.45	14.33	14.33	14.33	14.33	14.33	14.33
3	15.49	15.49	15.49	16.14	16.14	16.16	16.02	16.00	16.02	16.01	16.00	16.02
4	17.06	17.06	17.06	17.57	17.58	17.57	17.47	17.47	17.46	17.46	17.46	17.46
5	18.49	18.49	18.49	19.19	19.15	19.18	19.05	19.01	19.06	19.03	19.01	19.05
6	20.24	20.24	20.24	20.74	20.76	20.74	20.65	20.65	20.64	20.64	20.64	20.64
7	21.64	21.64	21.64	22.35	22.37	22.42	22.25	22.24	22.30	22.23	22.23	22.30
8	23.33	23.33	23.33	23.87	23.87	23.85	23.78	23.75	23.75	23.76	23.75	23.75
9	24.70	24.70	24.70	25.36	25.40	25.46	25.25	25.27	25.35	25.23	25.27	25.35
10	26.43	26.43	26.43	26.89	26.87	26.83	26.81	26.76	26.74	26.79	26.76	26.75

ตารางที่ 4.16 ขึ้นทดสอบ A6 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.05	12.05	12.05	12.71	12.71	12.71	12.59	12.59	12.59	12.60	12.60	12.60
2	13.85	13.85	13.85	14.41	14.41	14.41	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
3	15.32	15.34	15.31	16.03	15.98	15.93	15.90	15.86	15.83	15.90	15.87	15.83
4	16.80	16.83	16.85	17.38	17.39	17.38	17.28	17.28	17.28	17.28	17.28	17.28
5	18.47	18.55	18.55	19.27	19.19	19.13	19.11	19.07	19.03	19.11	19.09	19.04
6	20.00	20.09	20.13	20.65	20.65	20.63	20.54	20.54	20.53	20.54	20.54	20.53
7	21.35	21.33	21.35	22.01	21.96	21.90	21.85	21.84	21.81	21.86	21.86	21.82
8	23.07	23.05	23.09	23.60	23.59	23.56	23.50	23.48	23.47	23.50	23.49	23.47
9	24.58	24.63	24.67	25.22	25.24	25.18	25.07	25.13	25.09	25.07	25.15	25.09
10	25.98	25.96	26.00	26.52	26.48	26.42	26.41	26.38	26.35	26.40	26.38	26.34

ตารางที่ 4.17 ขึ้นทดสอบ A7 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.77	12.77	12.77	13.33	13.33	13.33	13.26	13.26	13.26	13.23	13.23	13.23
2	14.09	14.09	14.09	14.57	14.57	14.57	14.49	14.49	14.49	14.47	14.47	14.47
3	15.84	15.93	15.99	16.46	16.47	16.51	16.37	16.40	16.45	16.34	16.37	16.42
4	17.00	17.04	17.07	17.54	17.52	17.53	17.45	17.44	17.46	17.43	17.42	17.44
5	18.48	18.52	18.61	19.08	19.06	19.11	18.99	19.00	19.05	18.96	18.97	19.02
6	20.05	20.03	20.06	20.54	20.51	20.49	20.43	20.44	20.43	20.40	20.41	20.40
7	21.48	21.56	21.67	22.10	22.10	22.14	21.95	22.03	22.08	21.92	22.00	22.06
8	23.17	23.14	23.18	23.62	23.61	23.58	23.50	23.53	23.52	23.48	23.51	23.50
9	24.52	24.51	24.63	25.04	25.03	25.06	24.89	24.97	25.01	24.86	24.94	24.99
10	26.27	26.16	26.16	26.69	26.61	26.52	26.54	26.54	26.47	26.53	26.52	26.45

ตารางที่ 4.18 ขึ้นทดสอบ A8 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.3 สลับ 0.7, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.81	12.81	12.81	13.31	13.31	13.31	13.25	13.25	13.25	13.20	13.20	13.20
2	14.05	14.05	14.05	14.57	14.57	14.57	14.52	14.52	14.52	14.48	14.48	14.48
3	15.66	15.73	15.70	16.23	16.23	16.18	16.18	16.17	16.12	16.13	16.12	16.07
4	17.27	17.25	17.25	17.80	17.77	17.75	17.75	17.72	17.70	17.70	17.68	17.71
5	18.80	18.59	18.86	19.41	19.38	19.31	19.34	19.33	19.26	19.29	19.28	19.21
6	20.17	20.13	20.11	20.67	20.65	20.58	20.63	20.60	20.53	20.58	20.55	20.55
7	21.79	21.86	21.82	22.36	22.35	22.25	22.28	22.29	22.20	22.24	22.24	22.15
8	23.10	23.07	23.07	23.61	23.57	23.51	23.54	23.52	23.46	23.51	23.48	23.49
9	24.56	24.68	24.66	25.17	25.16	25.05	25.09	25.10	25.01	25.05	25.05	24.96
10	26.06	26.01	26.04	26.55	26.49	26.44	26.50	26.44	26.40	26.46	26.40	26.43

ตารางที่ 4.19 ขึ้นทดสอบ A9 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสาม
มุม, ภาระสูงสุด = 9 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.62	12.62	12.62	13.24	13.24	13.24	13.13	13.13	13.13	13.14	13.14	13.14
2	14.39	14.39	14.39	14.97	14.97	14.97	14.86	14.86	14.86	14.86	14.86	14.86
3	15.42	15.47	15.57	16.09	16.08	16.16	15.96	15.97	16.06	15.96	15.98	16.06
4	17.08	17.03	17.02	17.61	17.61	17.58	17.52	17.50	17.47	17.52	17.50	17.47
5	18.61	18.62	18.74	19.25	19.23	19.30	19.13	19.12	19.20	19.12	19.12	19.21
6	19.99	19.93	19.95	20.53	20.52	20.48	20.43	20.40	20.37	20.43	20.41	20.38
7	21.42	21.51	21.65	22.15	22.11	22.18	22.02	22.01	22.09	22.00	22.01	22.09
8	23.05	22.99	23.02	23.58	23.56	23.51	23.48	23.45	23.42	23.47	23.45	23.42
9	25.01	25.13	25.30	25.79	25.71	25.78	25.67	25.61	25.70	25.65	25.61	25.70
10	26.24	26.21	26.27	26.82	26.76	26.71	26.71	26.65	26.63	26.70	26.65	26.63
11	27.59	27.69	27.90	28.32	28.25	28.34	28.22	28.15	28.26	28.20	28.16	28.26
12	29.36	29.26	29.36	29.89	29.77	29.75	29.77	29.67	29.68	29.76	29.67	29.68
13	30.47	30.55	30.80	31.11	31.06	31.18	31.00	30.97	31.11	30.98	30.97	31.12

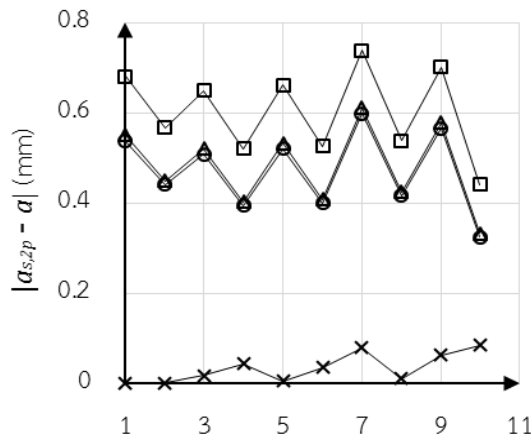
ตารางที่ 4.20 ขึ้นทดสอบ A10 a_s และ a จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s, รูปร่างคลื่น สามเหลี่ยม สามารถ, ภาระสูงสุด = 13 kN, R 0.1 สลับ 0.5, $DC = 1000$ ข้อมูล, %Unload = 100 % และ Con. สูงสุด

ลำดับ ขอบ หน้า	เฉลี่ย 2 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง			เฉลี่ย 9 ตำแหน่ง			พื้นที่สมมูล		
	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)	a_s (mm)	a วิธี C_{BFS} (mm)	a วิธี C_{CMOD} (mm)
1	12.35	12.35	12.35	12.94	12.94	12.94	12.89	12.89	12.89	12.84	12.84	12.84
2	13.97	13.97	13.97	14.54	14.54	14.54	14.47	14.47	14.47	14.43	14.43	14.43
3	15.61	15.66	15.67	16.28	16.24	16.24	16.20	16.19	16.19	16.16	16.15	16.15
4	17.01	16.96	16.98	17.54	17.53	17.52	17.48	17.45	17.45	17.44	17.41	17.41
5	18.36	18.43	18.48	19.09	19.01	19.02	18.98	18.96	18.97	18.94	18.92	18.93
6	19.86	19.77	19.79	20.38	20.34	20.31	20.29	20.26	20.24	20.26	20.22	20.21
7	21.48	21.57	21.64	22.11	22.15	22.14	22.05	22.10	22.10	21.99	22.05	22.06
8	22.82	22.71	22.72	23.33	23.26	23.21	23.23	23.19	23.14	23.20	23.15	23.11
9	24.57	24.50	24.60	25.08	25.06	25.06	25.02	25.01	25.02	24.98	24.97	24.99
10	25.92	25.84	25.92	26.46	26.38	26.35	26.36	26.31	26.29	26.32	26.27	26.26

ผลการเปรียบเทียบ a_s และ a

การเปรียบเทียบ a_s และ a จะใช้วิธีหาผลต่างของความยาวรอยร้าวทั้งสอง ยกตัวอย่างผลการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลจากขึ้นทดสอบ A5 กรณี a ได้จากวิธี C_{BFS} และ C_{CMOD} แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ในแต่ละรูปประกอบด้วย 4 กราฟ แกนตั้งของกราฟแต่ละอัน คือ ค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่าง a_s นิยามหนึ่งและ a ที่ใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ ส่วนแกนนอนคือลำดับขอบหน้ารอยร้าว โดยผลต่างที่แสดงเป็นแกนตั้งในกราฟแปรผกผันกับความสอดคล้องระหว่าง a_s และ a กราฟแต่ละอันจะเปลี่ยนนิยามของ a_s เป็นนิยามต่าง ๆ ยกตัวอย่างรูป 4.6 (ก) – 4.6 (ง) a_s ที่ใช้เปรียบเทียบได้จากนิยาม เฉลี่ย 2, 3, 9 ตำแหน่ง และพื้นที่สมมูลตามลำดับ สัญลักษณ์ของข้อมูลในรูป 4.6 และ 4.7 แสดงถึง a ที่ใช้เปรียบเทียบคำนวณโดยใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ ตามความหมายของสัญลักษณ์ที่กำกับไว้ได้กราฟ

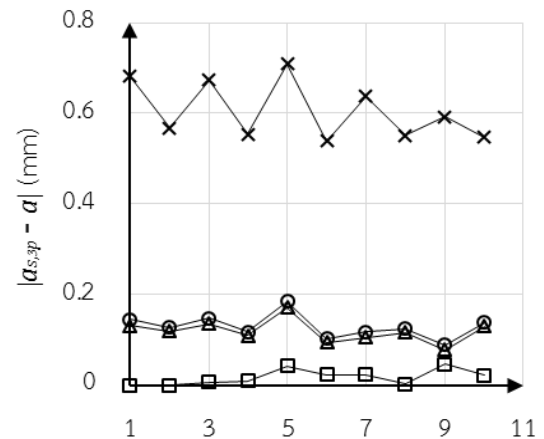
ผลการเปรียบเทียบในรูป 4.6 และ 4.7 พบว่าผลต่างระหว่าง a_s และ a จะน้อยที่สุด (สอดคล้องกันมากที่สุด) เมื่อ a_s และ a_{s0} ได้จากนิยามเดียวกัน ซึ่งเป็นเช่นนี้กับทุกขึ้นทดสอบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่านิยามของ a_s ที่สอดคล้องกับ a มากที่สุด คือ นิยามเดียวกับที่ใช้หาค่า a_{s0}



ลำดับขอบหน้ารอยร้าว

× ใช้ $a_{s0,2p}$ □ ใช้ $a_{s0,3p}$
 ▲ ใช้ $a_{s0,9p}$ ○ ใช้ $a_{s0,area}$

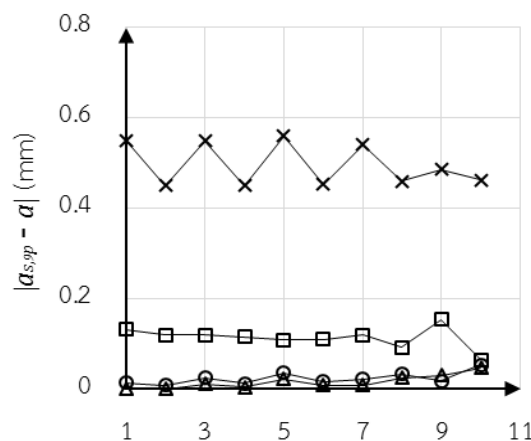
(ก)



ลำดับขอบหน้ารอยร้าว

× ใช้ $a_{s0,2p}$ □ ใช้ $a_{s0,3p}$
 ▲ ใช้ $a_{s0,9p}$ ○ ใช้ $a_{s0,area}$

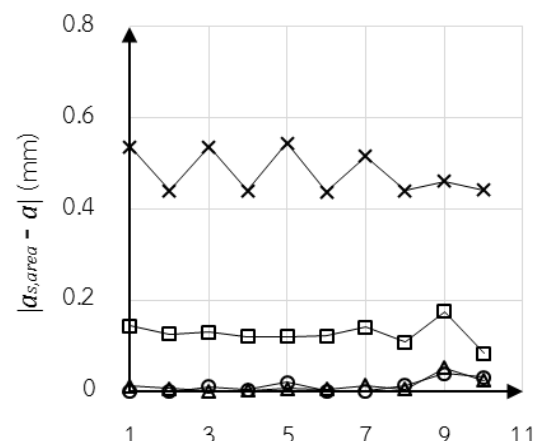
(ข)



ลำดับขอบหน้ารอยร้าว

× ใช้ $a_{s0,2p}$ □ ใช้ $a_{s0,3p}$
 ▲ ใช้ $a_{s0,9p}$ ○ ใช้ $a_{s0,area}$

(ค)



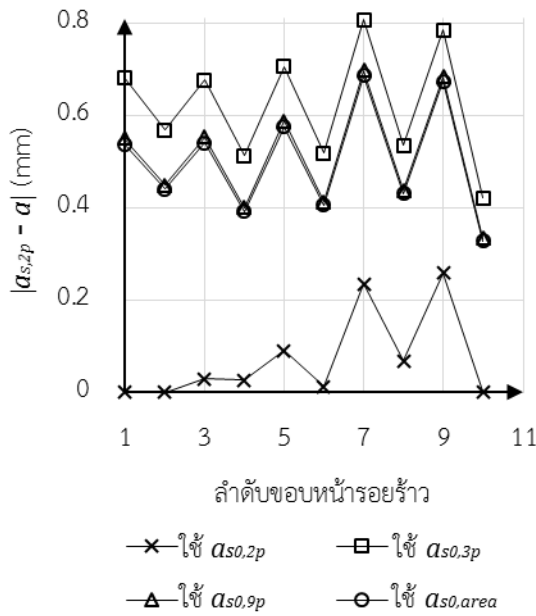
ลำดับขอบหน้ารอยร้าว

× ใช้ $a_{s0,2p}$ □ ใช้ $a_{s0,3p}$
 ▲ ใช้ $a_{s0,9p}$ ○ ใช้ $a_{s0,area}$

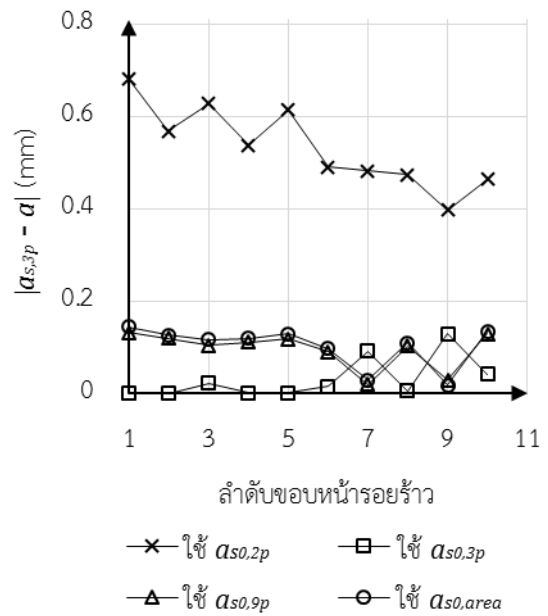
(ง)

รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบ a_s และ a จากวิธี CBFS

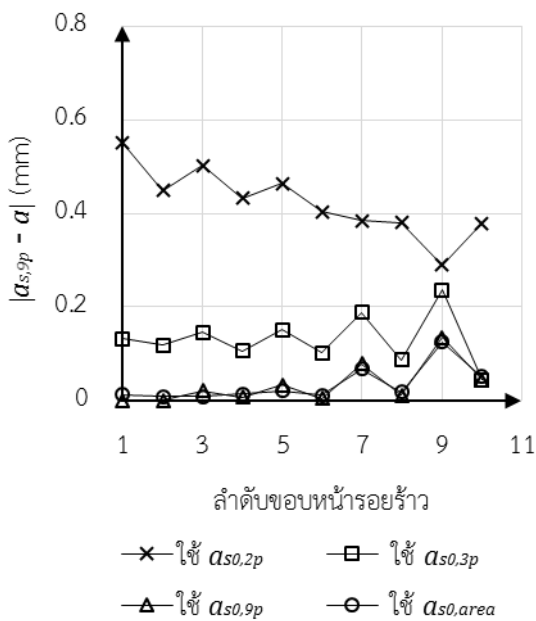
- ก) a_s นิยามเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง
- ข) a_s นิยามเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง
- ค) a_s นิยามเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง
- ง) a_s นิยามพื้นที่สมมูล



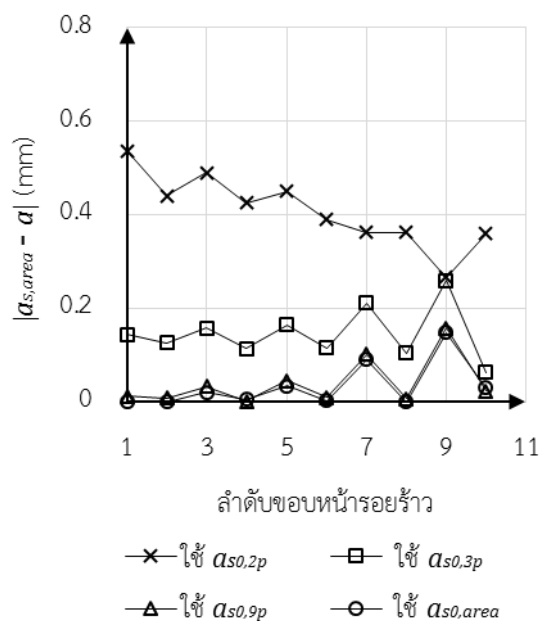
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบ a_s และ a จากวิธี C_{cm0d}

- ก) a_s นิยามเฉลี่ย 2 ตำแหน่ง
- ข) a_s นิยามเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง
- ค) a_s นิยามเฉลี่ย 9 ตำแหน่ง
- ง) a_s นิยามพื้นที่ที่สมดุล

บทที่ 5

ความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว

ในบทนี้หัวข้อ 5.1 จะอธิบายแนวทางการวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a หัวข้อ 5.2 วิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดทดสอบ หัวข้อ 5.3 วิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดวิเคราะห์ข้อมูล หัวข้อ 5.4 วิเคราะห์ผลของการใช้ a_{s0} ที่ใช้ค่านิยม a นียามต่าง ๆ หัวข้อ 5.5 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่ทำให้เกิด U_a หัวข้อ 5.6 วิเคราะห์ผลของ U_a ต่อ $U_{da/dN}$ และ U_{RL}

5.1 แนวทางการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้ คือ หาขนาดของ U_a และวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อ U_a ปัจจัยที่ศึกษาแบ่งเป็น 3 หมวด คือ 1) สภาวะทดสอบ 2) การวิเคราะห์ข้อมูล C 3) นียามที่ใช้หา a_{s0} จากข้อมูลสภาวะทดสอบ ในตาราง 3.4 และนียามที่ใช้หา a_{s0} สามารถสรุปเงื่อนไขของปัจจัยที่ศึกษาได้ดังตารางที่ 5.1 (ในตารางที่ 5.1 ค่าสูงสุดของ DC เท่ากับ SR/f ข้อมูล)

การศึกษาค่าของปัจจัยต่าง ๆ จะนำข้อมูลค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ไปคำนวณ U_a ด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) จะได้ข้อมูล U_a 8 ตัว คือ 1) U_a by $U_{W,A}$ 2) U_a by $U_{W,B}$ 3) U_a by $U_{a_{s0},A}$ 4) U_a by $U_{a_{s0},B}$ 5) U_a by $U_{C_0,A}$ 6) U_a by $U_{C,A}$ 7) U_a by $U_{C/C_0,B}$ 8) U_a (รวมผลของ 1 ถึง 7) จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ผลของแต่ละปัจจัยรวมถึงหาว่าความไม่แน่นอนตัวไหนที่ทำให้เกิด U_a (รวม) มากที่สุด

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยและขอบเขตที่ศึกษา

หมวด	ปัจจัย	ค่าที่ใช้
สภาวะทดสอบ	ความยาวรอยร้าว	13 – 31 mm ⁽¹⁾ / 13 – 26.5 mm ⁽²⁾
	f	1, 5, 10, 20 Hz ⁽³⁾ / 1, 2, 5 Hz ⁽⁴⁾
	ภาระสูงสุด	9 / 13 kN
	R	0.1, 0.3, 0.5, 0.7
	SR	1, 5, 10 kS/s
	รูปร่างคลื่น	ไซน์ / สามเหลี่ยมสมมาตร
การวิเคราะห์ข้อมูล	%Unload	100, 80, 60 %
	DC	สูงสุด, 1000, 500, 250 ข้อมูล
	$Con.$	10 – 100 รอบ
นียาม a_{s0}		เฉลี่ย 2, 3, 9 ตำแหน่ง และพื้นที่สมมูล

(1) สำหรับภาระสูงสุด 9 kN (2) สำหรับภาระสูงสุด 13 kN

(3) สำหรับคลื่นไซน์ (4) สำหรับคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร

เนื่องจากปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากดังตาราง 5.1 ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของปัจจัยทั้งหมดได้พร้อมกัน จึงแบ่งการศึกษาเป็น 3 หัวข้อ ตามหมวดของปัจจัยที่ศึกษา คือ 1) สภาวะทดสอบ 2) การวิเคราะห์ข้อมูล C 3) นิยามของ a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ในตาราง คือ หมวดของปัจจัยที่ศึกษา และปัจจัยที่ศึกษา ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ที่ 3 – 5 คือ ค่าของเงื่อนไขที่ใช้ศึกษาผลของปัจจัยทั้ง 3 หมวด ช่องที่แรเงาในตาราง หมายถึงเงื่อนไขที่ต้องเปลี่ยนเมื่อศึกษาปัจจัยแต่ละหมวด

การศึกษาปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบจะวิเคราะห์ U_a ที่ได้จากสภาวะทดสอบ รูปร่างคลื่น, ภาระสูงสุด, ความยาวรอยร้าว, R , f และ SR ค่าต่าง ๆ โดยกำหนดวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล และนิยาม a_{s0} เพียงค่าเดียว ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

ในทำนองเดียวกันการศึกษาปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูลจะวิเคราะห์ U_a ที่ได้จาก DC , $\%Unload$ และ $Con.$ ค่าต่าง ๆ โดยกำหนดสภาวะทดสอบ และนิยาม a_{s0} เพียงค่าเดียว ยกเว้นสภาวะทดสอบ รูปร่างคลื่น และความยาวรอยร้าว ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

สุดท้ายการศึกษาผลของนิยาม a_{s0} จะใช้ข้อมูลจากเงื่อนไขต่าง ๆ เพียงค่าเดียว ยกเว้นความยาวรอยร้าว แล้วเปลี่ยน a_{s0} ที่ใช้เป็น $a_{s0,2p}$, $a_{s0,3p}$, $a_{s0,9p}$ และ $a_{s0,area}$ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5 รายละเอียดและผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 หมวดจะอธิบายในหัวข้อ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขที่ใช้ศึกษาผลของปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบ, การวิเคราะห์ข้อมูล และนิยามของ a_{s0}

หมวด	ปัจจัย	1) สภาวะทดสอบ	2) การวิเคราะห์ข้อมูล	3) นิยามของ a_{s0}
สภาวะทดสอบ	ความยาวรอยร้าว	13 – 31 mm ⁽¹⁾ / 13 – 26.5 mm ⁽²⁾	13 – 31 mm	13 – 31 mm
	f	1, 5, 10, 20 Hz ⁽³⁾ / 1, 2, 5 Hz ⁽⁴⁾	1 Hz	1 Hz
	ภาระสูงสุด	9 / 13 kN	9 kN	9 kN
	R	0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.1	0.1
	SR	1, 5, 10 kS/s	10 kS/s	10 kS/s
	รูปร่างคลื่น	ไซน์ / สามเหลี่ยมสมมาตร	ไซน์ / สามเหลี่ยมสมมาตร	ไซน์
การวิเคราะห์ข้อมูล	$\%Unload$	100 %	100, 80, 60 %	100 %
	DC	สูงสุด ข้อมูล	10000, 1000, 500, 250 ข้อมูล	10000 ข้อมูล
	$Con.$	10 รอบ	10, 50, 100 รอบ	10 รอบ
นิยาม a_{s0}	เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง	เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง	เฉลี่ย 2, 3, 9 ตำแหน่ง, พื้นที่สมมูล	

(1) สำหรับภาระสูงสุด 9 kN (2) สำหรับภาระสูงสุด 13 kN

(3) สำหรับคลื่นไซน์ (4) สำหรับคลื่นสามเหลี่ยมสมมาตร

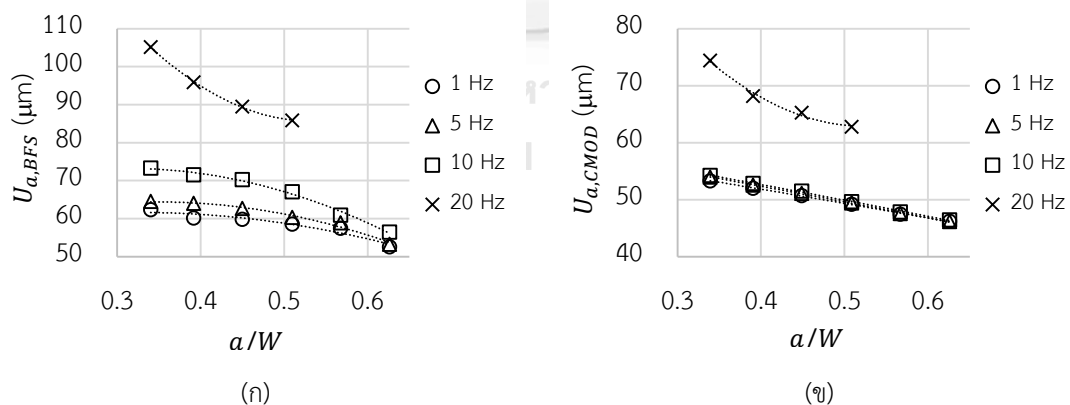
5.2 ผลของปัจจัยในหมวดสภาวะทดสอบ

การศึกษาปัจจัยหมวดนี้ จะคำนวณ U_a โดยนำข้อมูลค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และ B ของปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ 3 ไปคำนวณ U_a ด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) โดยใช้ข้อมูลจากขั้นตอนทดสอบ A1 – A10 (ข้อมูลดังกล่าวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.2 – ง.4) จากการคำนวณจะได้ข้อมูล U_a 8 ตัวตามที่ได้กล่าวในข้างต้น ผลการคำนวณ U_a ทั้ง 8 ตัวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.5.1

5.2.1 ผลของความยาวรอยร้าวต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 ที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของทุกขั้นตอนทดสอบและทุกสภาวะทดสอบ พบว่า $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ มีขนาดประมาณ $55 \mu\text{m}$ ใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งความยาวรอยร้าวเริ่มต้น คือ ขอบหน้ารอยร้าวอันแรกของ R แต่ละค่า กรณี $R = 0.1$ หรือ 0.3 คือขอบหน้ารอยร้าวลำดับที่ 1 ส่วนกรณี $R = 0.5$ หรือ 0.7 คือขอบหน้ารอยร้าวลำดับที่ 2 สาเหตุที่ U_a มีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ความยาวรอยร้าวนี้ U_a เกิดจาก $U_{a,s0,3p}$ Type A และ B รวมกันดังสมการ (3.31) ซึ่ง $U_{a,s0,3p}$ Type A และ B รวมกันมีค่าประมาณ $55 \mu\text{m}$ ใกล้เคียงกันทุกขั้นตอนทดสอบ ทำให้การวิเคราะห์ผลของปัจจัยอื่นที่เหลือจะละเว้นข้อมูล U_a ที่ความยาวรอยร้าวต้น

นอกจากนี้หากพิจารณา U_a ในตาราง ง.26 – ง.45 โดยไม่นับ U_a ที่ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น ณ สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a จะมีขนาดลดลงเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น และเป็นเช่นนี้กับทุกขั้นตอนทดสอบ เพื่อให้เห็นภาพยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A1 ตาราง ง.27 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1, 5, 10, 20 \text{ Hz}$, $R = 0.1$ และ $SR = 10 \text{ kS/s}$ ดังกราฟในรูปที่ 5.1(ก) และ 5.1(ข) ตามลำดับ แกนตั้งของกราฟทั้งสองในรูปคือ U_a ส่วนแกนนอน คือ ความยาวรอยร้าวในรูป (a/W) เครื่องหมายของข้อมูลที่แตกต่างกันแสดงถึง U_a ได้จากสภาวะทดสอบ f ต่างกัน จากกราฟทั้งสองในรูปพบว่าเมื่อ a/W เพิ่มขึ้น U_a มีขนาดลดลงตามที่ได้กล่าวในข้างต้น



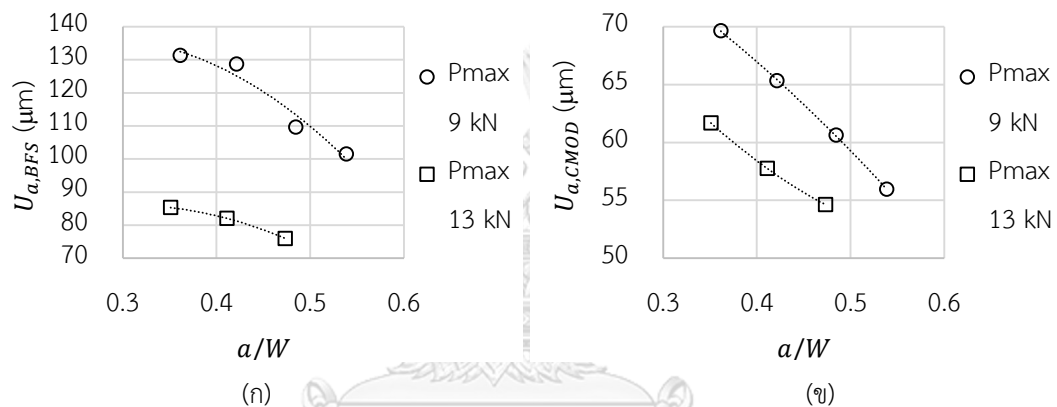
รูปที่ 5.1 ผลของความยาวรอยร้าว และ f ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1, 5, 10, 20 \text{ Hz}$, $R = 0.1$ และ $SR = 10 \text{ kS/s}$

5.2.2 ผลของความถี่การระต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ f เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกรณี R 0.1 และ f 20 Hz ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ ที่สภาวะทดสอบเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังรูป 5.1 จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบ U_a มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ f เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น โดย f ส่งผลต่อ $U_{a,BFS}$ มากกว่า $U_{a,CMOD}$

5.2.3 ผลของภาระสูงสุดต่อ U_a

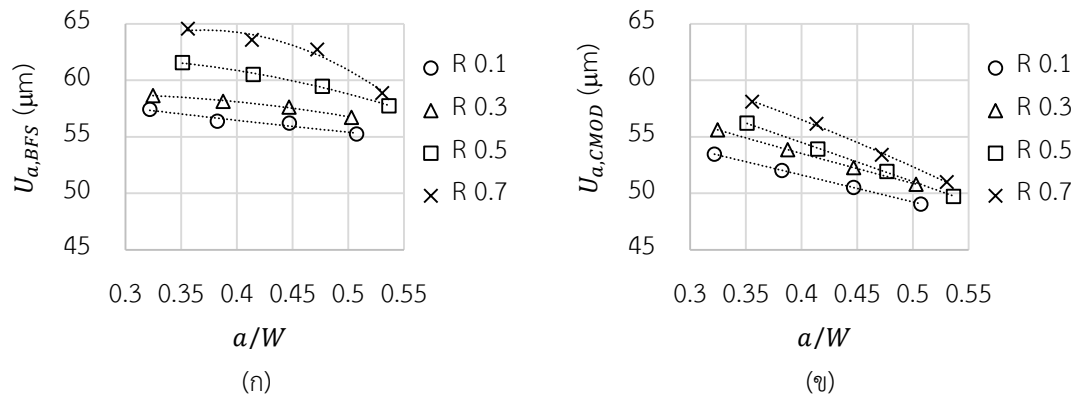
หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a จะลดลงเมื่อภาระสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ R 0.7 ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A3, A7 ตาราง ง.38 และ ง.39 ตามลำดับ สภาวะทดสอบภาระสูงสุด = 9 และ 13 kN, $R = 0.7$, $f = 20$ Hz ดังรูป 5.2 จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบว่า U_a ลดลงเมื่อภาระสูงสุดเพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น



รูปที่ 5.2 ผลของภาระสูงสุดต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A3, A7 ที่สภาวะทดสอบภาระสูงสุด = 9 และ 13 kN, $R = 0.7$, $f = 20$ Hz

5.2.4 ผลของอัตราส่วนการระต่อ U_a

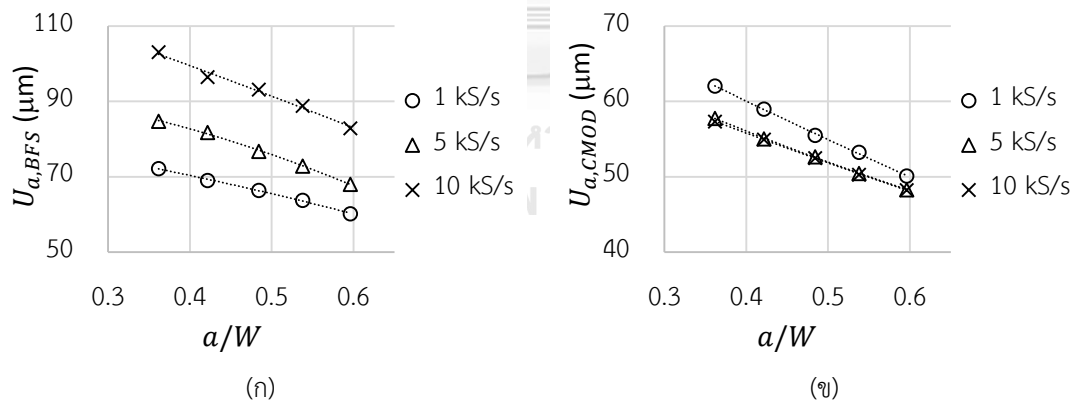
หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a จะเพิ่มขึ้นเมื่อ R เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณี $R = 0.1$ & $f = 20$ Hz ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A5, A8 ตาราง ง.35 และ ง.41 ตามลำดับ สภาวะทดสอบ $R = 0.1, 0.3, 0.5$ และ 0.7 , $f = 1$ Hz, $SR = 1$ kS/s ดังรูป 5.3 จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบว่า U_a เพิ่มขึ้นเมื่อ R เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น



รูปที่ 5.3 ผลของอัตราส่วนการระต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A5, A8 ที่สภาวะทดสอบ $R = 0.1, 0.3, 0.5$ และ $0.7, f = 1 \text{ Hz}, SR = 1 \text{ kS/s}$

5.2.5 ผลของ Sampling rate ต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ $U_{a,BFS}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ SR เพิ่มขึ้น ส่วน $U_{a,CMOD}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อ SR เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A3 ตาราง ง.31 สภาวะทดสอบ $SR = 1, 5$ และ $10 \text{ kS/s}, f = 1 \text{ Hz}, R = 0.7$ ดังรูป 5.4 จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบว่า U_a มีความสัมพันธ์กับ SR ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น สาเหตุที่ SR ส่งผลต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันคาดว่าเกิดจากสัญญาณรบกวนที่ NI 9235 (วัด BFS) สร้างเพิ่มขึ้นตาม SR ตามที่ระบุในข้อมูลจำเพาะ [37] ส่วนสัญญาณรบกวนที่ NI 9215 (วัด CMOD) สร้างไม่ขึ้นกับ SR ตามข้อมูลจำเพาะ [38]

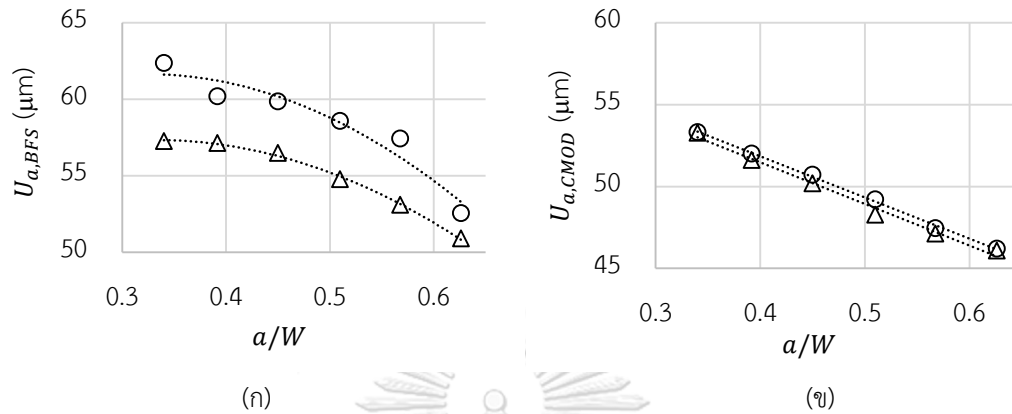


รูปที่ 5.4 ผลของ Sampling rate ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A3 ที่สภาวะทดสอบ $SR = 1, 5$ และ $10 \text{ kS/s}, f = 1 \text{ Hz}, R = 0.7$

5.2.6 ผลของรูปร่างคลื่นต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.26 – ง.45 พบว่าสภาวะทดสอบต่าง ๆ ส่งผลต่อ U_a ทั้งกรณีรูปร่างคลื่น ไชน์ และ สามเหลี่ยมสมมาตร ในทิศทางเดียวกัน แต่รูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตรจะมีขนาด U_a น้อยกว่ารูปร่างคลื่น ไชน์ ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A1, A9 ตาราง ง.27 และ ง.43 ตามลำดับ สภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}, SR = 10 \text{ kS/s}, R = 0.1$ ดังกราฟในรูป 5.5 เครื่องหมายวงกลม

และสามเหลี่ยม คือ ข้อมูลกรณีรูปร่างคลื่น ไชน์ และ สามเหลี่ยมสมมาตร ตามลำดับ จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบว่า U_a กรณีรูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตร น้อยกว่า U_a กรณีรูปร่างคลื่น ไชน์ ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น ตารางที่ 5.3 สรุปผลของปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบต่อ U_a



รูปที่ 5.5 ผลของรูปร่างคลื่นต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A1 และ A9 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}$, $SR = 10 \text{ kS/s}$, $R = 0.1$

ตารางที่ 5.3 สรุปผลของปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบต่อ U_a

ปัจจัย	$U_{a,BFS}$	$U_{a,CMOD}$
a/W	แปรผกผัน	แปรผกผัน
f	แปรผัน	แปรผัน
SR	แปรผัน	แปรผกผัน
R	แปรผัน	แปรผัน
	*ยกเว้นที่ $R 0.1$ & $f 20\text{Hz}$	*ยกเว้นที่ $R 0.1$ & $f 20\text{Hz}$
ภาวะสูงสุด	แปรผกผัน	แปรผกผัน

5.3 ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

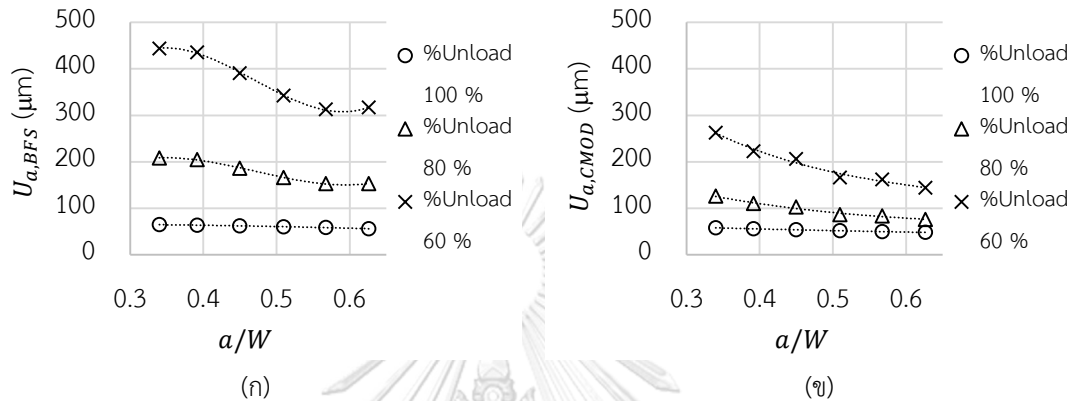
การศึกษาปัจจัยหมวดนี้ จะคำนวณ U_a โดยนำข้อมูลค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และ B ของปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ 4 ไปคำนวณ U_a ด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) โดยใช้ข้อมูลจากชั้นทดสอบ A1, A2 และ A9 (ข้อมูลดังกล่าวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.2 – ง.4) จากการคำนวณจะได้ข้อมูล U_a 8 ตัวตามที่ได้กล่าวในข้างต้น ผลการคำนวณ U_a ทั้ง 8 ตัวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.5.2

5.3.1 ผลของ %Unload ต่อ U_a

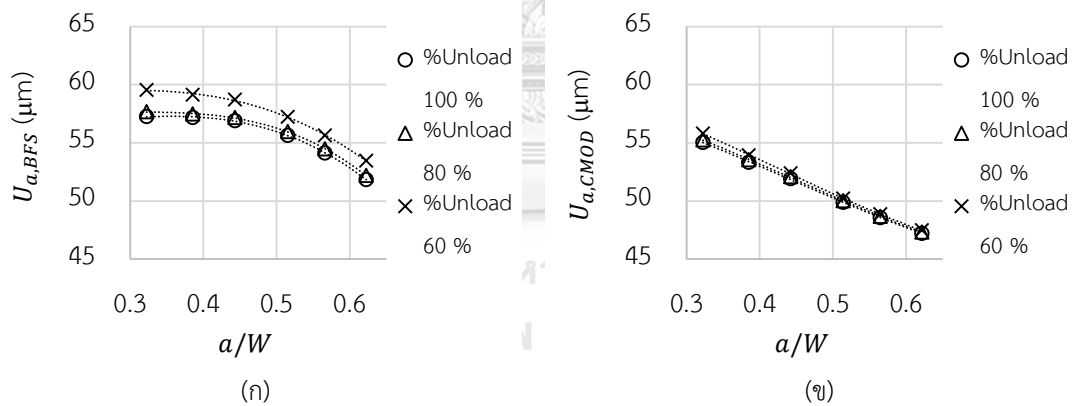
หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.46 – ง.54 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a เพิ่มขึ้นเมื่อ %Unload ลดลง โดยกรณีรูปร่างคลื่น ไชน์ U_a จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่โดยกรณีรูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตร U_a จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จาก

- ชั้นทดสอบ A2 ตาราง ง.50 และ ง.51 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น ไชน์, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 250$ ข้อมูล, $Con. = 10$ รอบ
- ชั้นทดสอบ A9 ตาราง ง.53 และ ง.54 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตร, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 10000$ ข้อมูล, $Con. = 10$ รอบ

ดังรูป 5.6 และ 5.7 จากกราฟในรูปทั้งสองจะพบว่า U_a มีความสัมพันธ์กับ %Unload ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น



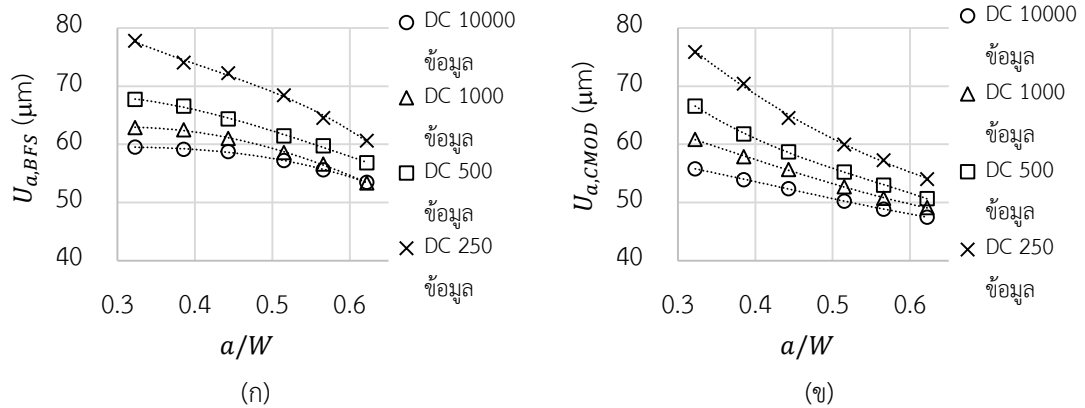
รูปที่ 5.6 ผลของ %Unload ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A2 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น ไชน์, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 250$ ข้อมูล, $Con. = 10$ รอบ



รูปที่ 5.7 ผลของ %Unload ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A9 สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น สามเหลี่ยมสมมาตร, %Unload = 100, 80 และ 60 %, $DC = 10000$ ข้อมูล, $Con. = 10$ รอบ

5.3.2 ผลของจำนวนข้อมูลต่อรอบต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.46 – ง.54 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a เพิ่มขึ้นเมื่อ DC ลดลง ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A9 ตาราง ง.53 และ ง.54 สภาวะทดสอบ $DC = 10000, 1000, 250, 100$ ข้อมูล, %Unload 60 %, $Con. = 10$ รอบ ดังรูป 5.8 จากกราฟทั้งสองในรูปจะพบว่า U_a เพิ่มขึ้นเมื่อ DC ลดลง ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น



รูปที่ 5.8 ผลของ DC ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A9 สภาวะทดสอบ DC = 10000, 1000, 250, 100 ข้อมูล, %Unload 60 %, Con. 10 รอบ

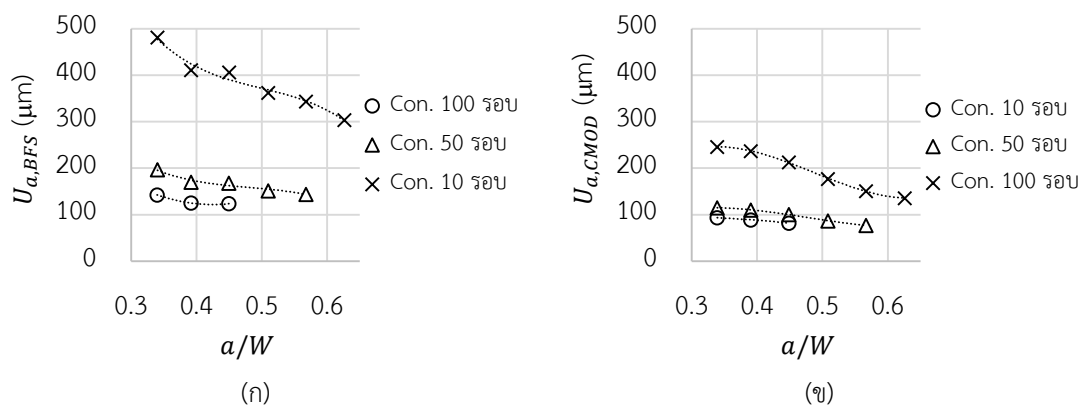
5.3.3 ผลของจำนวนรอบที่เก็บข้อมูลต่อเนื่องต่อ U_a

หากพิจารณาข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ ในตาราง ง.46 – ง.54 พบว่าที่สภาวะทดสอบหนึ่ง ๆ U_a ลดลงเมื่อ Con. เพิ่มขึ้น

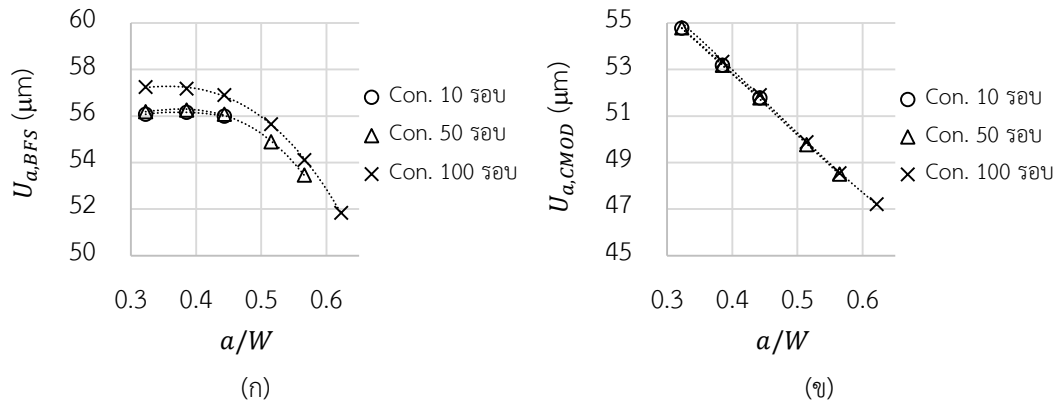
เนื่องจาก Con. สามารถลด $U_{C_{0,A}}$ และ $U_{C,A}$ ลงได้ตามสมการ $\frac{SD}{\sqrt{n}}$ โดยจะช่วยลด U_a ได้มากในกรณีที่ $U_{C_{0,A}}$ และ $U_{C,A}$ มีค่ามาก และไม่ค่อยมีผลหาก $U_{C_{0,A}}$ และ $U_{C,A}$ มีค่าน้อย ยกตัวอย่าง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ สภาวะทดสอบ Con. ต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจาก

- ขั้นตอนทดสอบ A1 ตาราง ง.47 และ ง.48 สภาวะทดสอบ Con. = 10, 50, 100 รอบ, %Unload = 60%, DC = 250 ข้อมูล
- ขั้นตอนทดสอบ A9 ตาราง ง.53 และ ง.54 สภาวะทดสอบ Con. = 10, 50, 100 รอบ, %Unload = 100%, DC = 10000 ข้อมูล

ดังรูป 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ โดยสภาวะทดสอบของรูป 5.9 เป็นกรณีที่ $U_{C_{0,A}}$ และ $U_{C,A}$ มีค่ามาก การเพิ่ม Con. จึงช่วยลด U_a ได้อย่างมาก สภาวะทดสอบของรูป 5.10 เป็นกรณีที่ $U_{C_{0,A}}$ และ $U_{C,A}$ มีค่าน้อย การเพิ่ม Con. จึงไม่ช่วยลด U_a มากนัก ตารางที่ 5.4 สรุปผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูลต่อ U_a



รูปที่ 5.9 ผลของ Con. ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากขั้นตอนทดสอบ A1 สภาวะทดสอบ Con. = 10, 50, 100 รอบ, %Unload = 60 %, DC = 250 ข้อมูล



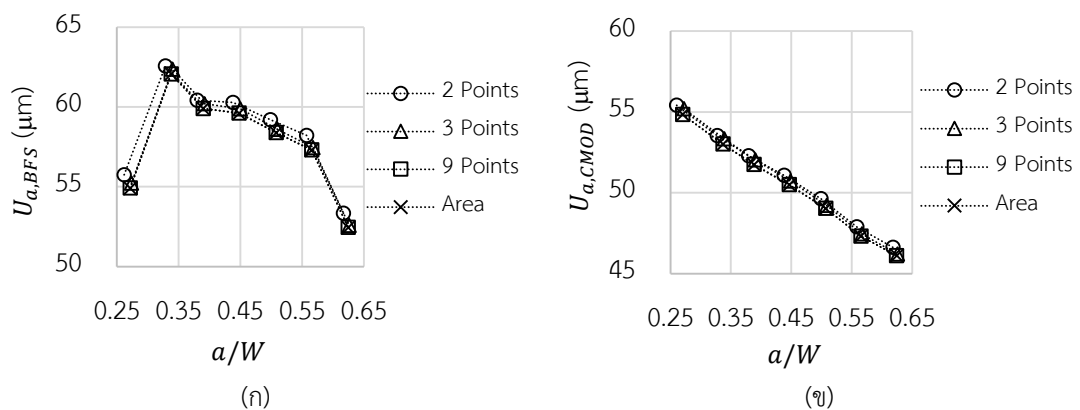
รูปที่ 5.10 ผลของ Con. ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A9 สภาวะทดสอบ Con. = 10, 50, 100 รอบ, %Unload = 100 %, DC = 10000 ข้อมูล

ตารางที่ 5.4 สรุปผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ที่ข้อมูลต่อ U_a

ปัจจัย	$U_{a,BFS}$	$U_{a,CMOD}$
%Unload	แปรผกผัน	แปรผกผัน
DC	แปรผกผัน	แปรผกผัน
Con.	แปรผกผัน	แปรผกผัน

5.4 ผลของนิยามความยาวรอยร้าวเริ่มต้น

การศึกษาผลของการใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ จะคำนวณ U_a โดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และ B ของปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ 5 ไปคำนวณ U_a ด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) โดยใช้ข้อมูลจากชั้นทดสอบ A1 (ข้อมูลดังกล่าวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.2 - ง.4) จากการคำนวณจะได้ข้อมูล U_a 8 ตัวตามที่ได้กล่าวในข้างต้น ผลการคำนวณ U_a ทั้ง 8 ตัวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.5.3 ข้อมูลจากตาราง ง.65 พบว่าการใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ ที่ขอบหน้ารอยร้าวหนึ่ง ๆ a/W จะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยและมี U_a ต่างกันน้อยกว่า $1 \mu\text{m}$ ทั้ง $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ ดังกราฟในรูปที่ 5.11 ทำให้สรุปได้ว่าการใช้ a_{s0} ไม่ว่านิยามใดก็ทำให้เกิด U_a เท่ากันที่ขอบหน้ารอยร้าวหนึ่ง ๆ เนื่องจาก $U_{a,s0}$ จาก a_{s0} แต่ละนิยามมีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.11 ผลของนิยาม a_{s0} ต่อ $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากชั้นทดสอบ A1

5.5 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของ W , a_{s0} , C_0 และ C ที่ทำให้เกิด U_a

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือต้องการศึกษาว่าความไม่แน่นอนจากปริมาณใดที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด ข้อมูลในตาราง ง.26 – ง.65 นำเสนอข้อมูล U_a 8 ตัว ของแต่ละขั้นตอนทดสอบ คือ 1) U_a by $U_{W,A}$ 2) U_a by $U_{W,B}$ 3) U_a by $U_{a_{s0},A}$ 4) U_a by $U_{a_{s0},B}$ 5) U_a by $U_{C_0,A}$ 6) U_a by $U_{C_0,B}$ 7) U_a by $U_{C/C_0,B}$ 8) U_a (รวม) ตัวที่ 1 – 7 จะใช้วิเคราะห์หาความไม่แน่นอนที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด ส่วนตัวที่ 8 จะใช้แบ่งหมวดการศึกษา จากข้อมูลในตาราง ทำให้ทราบว่า $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ จากทุกขั้นตอนทดสอบและทุกสภาวะทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 50 – 450 μm และ 45 – 280 μm ตามลำดับ การศึกษาแบ่งเป็น 2 หมวด คือ 1) กรณี U_a มีค่าใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$ (ประมาณ 55 μm) 2) กรณี U_a มีค่ามากกว่า U_a by $a_{s0,3p}$

5.5.1 กรณี U_a มีค่าใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$

พิจารณาข้อมูล U_a ทั้ง 8 ตัวของขั้นตอนทดสอบ A1 จากตาราง ง.26 และ ง.27 กรณีสภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}$, $SR = 1 \text{ kS/s}$, $R = 0.1$ (กรณีนี้ U_a มีค่าใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$) รวมถึงจัดอันดับปริมาณที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด จะได้ข้อมูล U_a ทั้ง 8 ตัว และอันดับที่ทำให้เกิด U_a กรณี $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ ดังตาราง 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ การจัดอันดับจะให้ความสำคัญกับ U_a ที่เกิดจากปริมาณต่าง ๆ ที่ a/W ช่วงแรกมากกว่าที่ a/W ช่วงท้าย จากตาราง 5.4 พบว่าปริมาณที่ทำให้เกิด $U_{a,BFS}$ มากที่สุดได้ดังนี้

- 1) U_a by $a_{s0,3p,B}$, 2) U_a by $a_{s0,3p,A}$, 3) U_a by C_0,A และ 4) U_a by W,B

ส่วนตาราง 5.5 พบว่าปริมาณที่ทำให้เกิด $U_{a,CMOD}$ มากที่สุด คือ

- 1) U_a by $a_{s0,3p,B}$, 2) U_a by $a_{s0,3p,A}$, 3) U_a by $C/C_0,B$ และ 4) U_a by W,B

ความไม่แน่นอนอื่นที่ไม่ได้แสดงทำให้เกิด U_a น้อยมาก ในกรณี U_a ใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$ อันดับจะเป็นเช่นนี้เสมอทุกขั้นตอนทดสอบ และทุกสภาวะทดสอบ อันดับที่ได้ทำให้สรุปได้ว่า ในกรณีที่ U_a ใกล้เคียงกับ U_a by $a_{s0,3p}$ U_a by $a_{s0,3p,B}$ เป็นปริมาณที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด รองลงมา คือ U_a by $a_{s0,3p,A}$ ในกรณีนี้หากต้องการให้ U_a มีค่าน้อยลงจึงควรลดขนาด U_a by $a_{s0,3p,B}$ มากที่สุด รองลงมาคือ U_a by $a_{s0,3p,A}$ ขนาด U_a by $a_{s0,3p,B}$ สามารถลดได้ด้วยการใช้อุปกรณ์วัด $a_{s0,3p}$ ที่มีความละเอียด หรือ ความแม่นยำมากขึ้น ส่วน U_a by $a_{s0,3p,A}$ สามารถลดได้โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการวัดเพื่อให้ $U_{a_{s0,3p,A}}$ มีค่าน้อยลง ดังสมการ $U_{a_{s0,3p,A}} = \frac{SD}{\sqrt{n}}$ เมื่อ n เป็นจำนวนครั้งที่วัด

ตารางที่ 5.5 $U_{a,BFS}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของชิ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}$, $SR = 1 \text{ kS/s}$, $R = 0.1$

a/W (-)	0.341	0.392	0.450	0.510	0.568	0.627	อันดับที่ทำให้เกิด U_a
U_a by W,A (μm)	1.5	2.5	3.8	5.1	6.6	8.1	-
U_a by W,B (μm)	4.2	7.2	10.6	14.5	18.6	23.0	4
U_a by $a_{s0,3p,A}$ (μm)	20.1	20.0	19.7	18.9	17.7	16.1	2
U_a by $a_{s0,3p,B}$ (μm)	50.5	50.3	49.5	47.6	44.6	40.6	1
U_a by C_0,A (μm)	20.3	20.2	19.9	17.3	13.8	8.2	3
U_a by C,A (μm)	11.4	9.3	7.2	5.8	3.9	1.4	-
U_a by $C/C_0,B$ (μm)	0.3	0.2	0.4	0.6	1.0	1.4	-
U_a (μm)	59.3	59.0	58.4	56.5	53.9	50.8	-

ตารางที่ 5.6 $U_{a,CMOD}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของชิ้นทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $f = 1 \text{ Hz}$, $SR = 1 \text{ kS/s}$, $R = 0.1$

a/W (-)	0.340	0.391	0.449	0.509	0.568	0.627	อันดับที่ทำให้เกิด U_a
U_a by W,A (μm)	1.6	2.9	4.3	5.9	7.4	9.0	-
U_a by W,B (μm)	4.7	8.1	12.2	16.6	21.0	25.6	4
U_a by $a_{s0,3p,A}$ (μm)	19.3	18.4	17.3	15.8	14.2	12.4	2
U_a by $a_{s0,3p,B}$ (μm)	48.6	46.4	43.4	39.8	35.7	31.1	1
U_a by C_0,A (μm)	3.9	3.8	3.5	3.2	2.9	2.5	-
U_a by C,A (μm)	4.6	3.8	2.2	1.9	1.5	1.2	-
U_a by $C/C_0,B$ (μm)	10.9	13.2	15.7	17.2	17.1	16.4	3
U_a (μm)	54.0	52.6	51.2	49.5	47.7	46.2	-

5.5.2 กรณี U_a มีค่ามากกว่า U_a by $as0,3p$

หัวข้อนี้จะศึกษาปริมาณที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด กรณี U_a มีค่ามากกว่า U_a by $a_{s0,3p}$ ยกตัวอย่างพิจารณาข้อมูล U_a ทั้ง 8 ตัวของชิ้นทดสอบ A1 จากตาราง ง.26 และ ง.27 กรณีสภาวะทดสอบ $f = 20 \text{ Hz}$, $SR = 1 \text{ kS/s}$, $R = 0.1$ รวมถึงจัดอันดับปริมาณที่ทำให้เกิด U_a มากที่สุด จะได้ข้อมูล U_a ทั้ง 8 ตัว และอันดับที่ทำให้เกิด U_a กรณี $U_{a,BFS}$ และ $U_{a,CMOD}$ ดังตาราง 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ การจัดอันดับจะให้ความสำคัญกับ U_a ที่เกิดจากปริมาณต่าง ๆ ที่ a/W ช่วงแรกมากกว่าที่ a/W ช่วงท้าย จากตาราง 5.7 พบว่าปริมาณที่ทำให้เกิด $U_{a,BFS}$ มากที่สุดได้ดังนี้

1) U_a by $C_{0,A}$, 2) U_a by $a_{s0,3p,B}$, 3) U_a by $C_{,A}$, 4) U_a by $a_{s0,3p,A}$ และ 5) U_a by W,B

ส่วนตาราง 5.8 พบว่าปริมาณที่ทำให้เกิด $U_{a,CMOD}$ มากที่สุด คือ

1) U_a by $a_{s0,3p,B}$, 2) U_a by $C_{0,A}$, 3) U_a by $a_{s0,3p,A}$, 4) U_a by $C/C_{0,B}$, 5) U_a by W,B และ 6) U_a by $C_{,A}$

ความไม่แน่นอนอื่นที่ไม่ได้แสดงทำให้เกิด U_a น้อยมาก อันดับของปริมาณที่ทำให้เกิด U_a กรณีนี้จะขึ้นอยู่กับสถานะทดสอบ วิธีการลดค่า U_a ให้น้อยลงจะขึ้นอยู่กับว่าปริมาณตัวไหนส่งผลให้เกิด U_a มากที่สุด ถ้าเป็นความไม่แน่นอน Type A อาจใช้วิธีวัดปริมาณซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ความไม่แน่นอนลดลงตามสมการ $\frac{SD}{\sqrt{n}}$ หรือถ้าเป็นความไม่แน่นอน Type B อาจใช้วิธีใช้อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดและความแม่นยำมากขึ้น

ตารางที่ 5.7 $U_{a,BFS}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของชิ้นทดสอบ A1 ที่สถานะทดสอบ $f = 20$ Hz, $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$

a/W (-)	0.340	0.391	0.449	0.509	อันดับ ที่ทำให้เกิด U_a
U_a by W,A (μm)	1.5	2.5	3.7	5.1	-
U_a by W,B (μm)	4.2	7.1	10.6	14.4	5
U_a by $a_{s0,3p,A}$ (μm)	20.1	20.0	19.7	18.9	4
U_a by $a_{s0,3p,B}$ (μm)	50.5	50.3	49.5	47.6	2
U_a by $C_{0,A}$ (μm)	71.7	71.4	70.2	65.8	1
U_a by $C_{,A}$ (μm)	54.2	33.5	10.7	13.5	3
U_a by $C/C_{0,B}$ (μm)	0.5	0.9	1.4	1.8	-
U_a (μm)	105.2	95.9	89.5	85.9	-

ตารางที่ 5.8 $U_{a,CMOD}$ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากปริมาณ W , a_{s0} , C_0 และ C ของชิ้นทดสอบ A1 ที่สถานะทดสอบ $f = 20$ Hz, $SR = 1$ kS/s, $R = 0.1$

a/W (-)	0.341	0.394	0.452	0.512	อันดับ ที่ทำให้เกิด U_a
U_a by W,A (μm)	1.7	2.9	4.4	5.9	-
U_a by W,B (μm)	4.8	8.3	12.4	16.7	5
U_a by $a_{s0,3p,A}$ (μm)	19.3	18.4	17.2	15.8	3
U_a by $a_{s0,3p,B}$ (μm)	48.5	46.3	43.3	39.7	1
U_a by $C_{0,A}$ (μm)	43.0	40.5	37.1	34.5	2
U_a by $C_{,A}$ (μm)	27.4	9.7	3.3	3.7	6
U_a by $C/C_{0,B}$ (μm)	15.7	15.7	17.4	17.6	4
U_a (μm)	74.4	68.2	65.3	62.8	-

5.6 ผลของ U_a ต่อการทำนายอายุการใช้งานที่เหลือ

เป้าหมายของการเก็บข้อมูล a จากการทดสอบภาระล้า คือ นำไปคำนวณ da/dN เพื่อใช้ทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของวัสดุที่มีรอยร้าวก่อนเสียหาย (Remaining life, RL) หัวข้อนี้จะเลือก U_a ที่สภาวะทดสอบหนึ่งไปคำนวณ $U_{da/dN}$ เพื่อหา U_{RL} แล้ววิเคราะห์หว่า U_a มีนัยยะสำคัญต่อการทำนาย RL มากน้อยแค่ไหน โดยใช้สมการของปารีส (Paris's law) คำนวณ da/dN ดังสมการ (5.1)

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K^m \quad (5.1)$$

เมื่อ m และ C_p เป็นค่าคงที่ของวัสดุ การคำนวณ $\frac{da}{dN}$ ใช้วิธีเฉลี่ยข้อมูล 2 ตำแหน่ง (Secant method) ดังสมการ (5.2)

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N} \quad (5.2)$$

เมื่อ a_{i+1} และ a_i คือ ความยาวรอยร้าวลำดับที่ $i+1$ และ i ตามลำดับ N คือ จำนวนรอบระหว่าง a_{i+1} และ a_i การคำนวณ ΔK ใช้สมการ (5.3)

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \frac{a}{W})}{(1 - \frac{a}{W})^{1.5}} \left(0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right) \quad (5.3)$$

เมื่อ ΔP คือ แอมพลิจูดของภาระล้า และ a ในกรณีนี้ คือ ค่าเฉลี่ยของ a_{i+1} และ a_i เนื่องจาก $\frac{da}{dN}$ เป็นสมการการหา $U_{da/dN}$ จึงต้องหาความไม่แน่นอนของตัวสมการหรือก็คือหาความไม่แน่นอนของ m และ C_p (U_m และ U_{C_p}) การหา U_m และ U_{C_p} จะต้องจัดรูปสมการ (5.1) ให้เป็นฟังก์ชันเส้นตรงโดยการ take log สมการทั้งสองข้างจะได้สมการ (5.4)

$$\log \frac{da}{dN} = m \log \Delta K + \log C_p \quad (5.4)$$

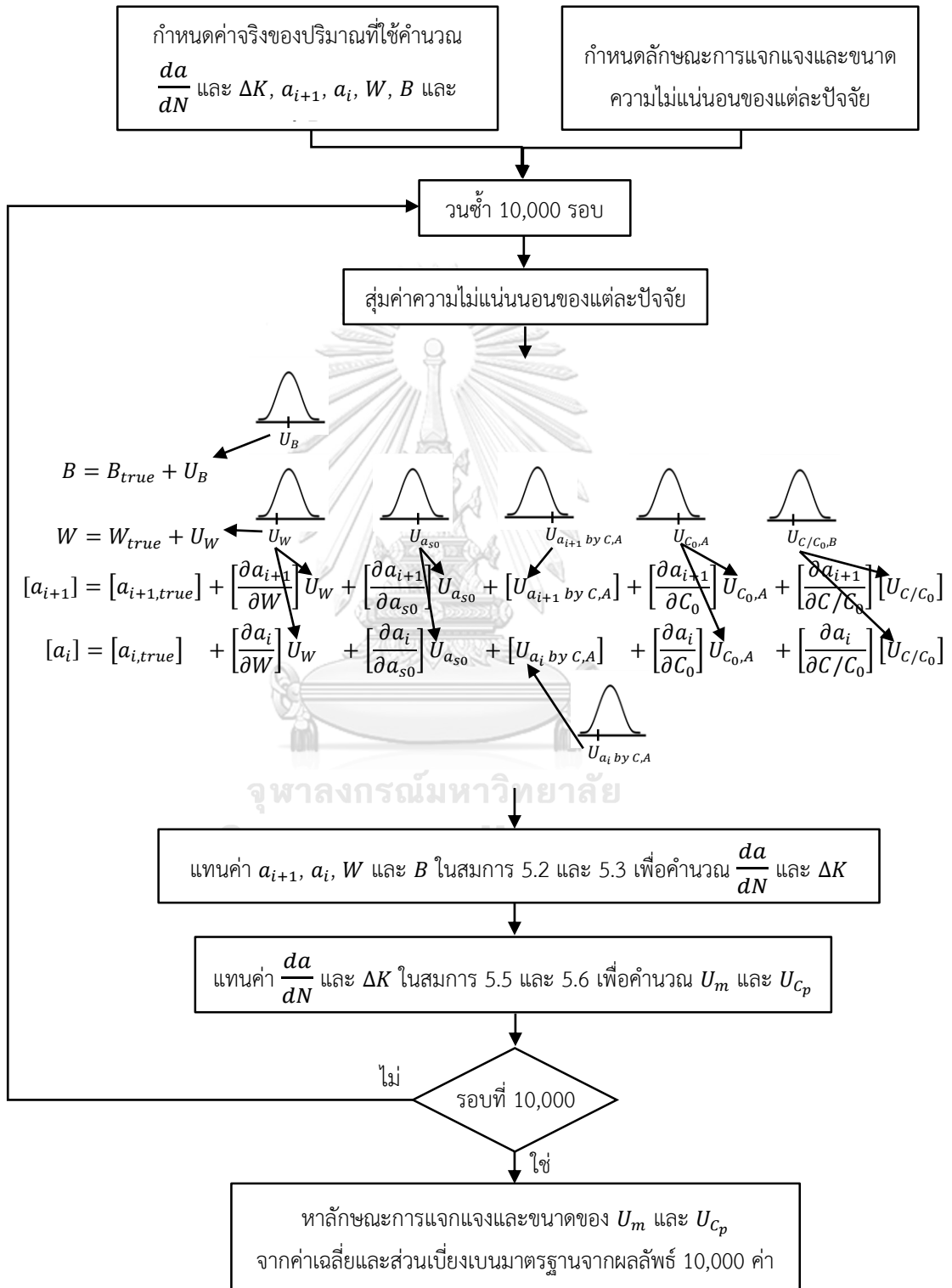
หากเปรียบเทียบกับฟอร์มของสมการเส้นตรง ($y = mx + c$) $\log \frac{da}{dN}$ และ $\log \Delta K$ ก็คือ y และ x ตามลำดับ m คือความชัน และ C_p คือค่าคงที่ m และ C_p คำนวณได้จาก (5.5) และ (5.6) ตามลำดับ

$$m = \frac{\Sigma(\log \Delta K - \overline{\log \Delta K})(\log \frac{da}{dN} - \overline{\log \frac{da}{dN}})}{\Sigma(\log \Delta K - \overline{\log \Delta K})^2} \quad (5.5)$$

$$C_p = \overline{\log \frac{da}{dN}} - m \overline{\log \Delta K} \quad (5.6)$$

การหาความไม่แน่นอนจะใช้วิธีมอนติ คาร์โล หา U_m และ U_{C_p} พร้อมกัน ดังแผนผังในรูป 5.12 ขั้นตอนเริ่มจากสุ่มค่า a_{i+1} , a_i , W และ B โดยสุ่มค่าความไม่แน่นอนจากปัจจัยต่าง ๆ ของแต่ละปริมาณแล้วนำไปบวกกับค่าประมาณที่ดีที่สุดของปริมาณทั้งสิ้น ปริมาณที่มีเครื่องหมายวงเล็บกำมปูหมายถึงปริมาณนั้นเป็นเมทริกซ์ซึ่งบรรจุข้อมูลที่ a ต่าง ๆ จากนั้นแทนลงในสมการ (5.2) และ (5.3) เพื่อคำนวณ $\frac{da}{dN}$ และ ΔK แล้วแทนปริมาณทั้งสองลงในสมการ (5.5) และ (5.6) เพื่อคำนวณ m และ C_p สุดท้ายทำการกระบวนการนี้ซ้ำ 10,000 รอบจะหา U_m และ U_{C_p} ได้จาก SD ของผลลัพธ์ เนื่องจาก a_{i+1} , a_i และ W เป็นฟังก์ชันของ W ความไม่แน่นอนที่เกิดจาก W ของ

ปริมาณทั้ง 3 นี้จึงไม่เป็นอิสระต่อกัน รวมถึง a_{i+1} และ a_i เป็นฟังก์ชันของ a_{s0} และ C_0 นอกจากนี้ C และ C_0 ใช้ อุปกรณ์วัดเครื่องเดียวกัน ทำให้ต้องคำนึงผลความไม่แน่นอนที่ไม่เป็นอิสระกันของปริมาณทั้งสิ้น โดยสมการสำหรับ สุ่มค่าปริมาณทั้งสี่มีลักษณะดังรูป 5.12



รูปที่ 5.12 แผนผัง วิธีมอนติ คาร์โล สำหรับหา U_m และ U_{Cp}

สภาวะทดสอบที่เลือกมาคำนวณ U_m และ U_{C_p} คือ ซึ้นทดสอบ A1, สภาวะทดสอบรูปร่างคลื่น ไชน์, ภาระสูงสุด 9 kN, a/W ค่าต่าง ๆ, R 0.1, f 1 Hz, SR 10 kS/s, DC 10,000 ข้อมูล, %Unload 100 %, Con. 20 รอบ และ a_{s0} เฉลี่ย 3 ตำแหน่ง จากซึ้นทดสอบ A1 ข้อมูลที่ต้องใช้ในวิธีนี้แสดงดัง 5.9 และ 5.10 ผลลัพธ์จากการสุ่มด้วยวิธีมอนติ คาร์โล พบว่า $U_{da/dN}$ สำหรับ a_{BFS} และ a_{CMOD} มีค่าดังสมการ (5.7) และ (5.8) ตามลำดับ

$$\frac{da}{dN_{BFS}} = (3.601 \pm 0.257) \times 10^{-12} \Delta K^{(3.127 \pm 0.02190)} \quad (5.7)$$

$$\frac{da}{dN_{CMOD}} = (1.184 \pm 0.033) \times 10^{-12} \Delta K^{(3.443 \pm 0.00887)} \quad (5.8)$$

หน่วยของ da/dN คือ mm และหน่วยของ ΔK คือ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

ตารางที่ 5.9 ข้อมูล a, ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C สำหรับหา U_m และ U_{C_p} ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

หมายเลข รอบ	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
	a (mm)	$\bar{C} \times 10^{-9}$ (1/N)	$\bar{C}_0 \times 10^{-9}$ (1/N)	$U_{C_0,A}$ $\times 10^{-9}$ (1/N)	$U_{C/C_0,B}$ $\times 10^{-3}$ (-)	U_a by C,A (μm)	a (mm)	$\bar{C} \times 10^{-9}$ (m/N)	$\bar{C}_0 \times 10^{-9}$ (m/N)	$U_{C_0,A}$ $\times 10^{-9}$ (m/N)	$U_{C/C_0,B}$ $\times 10^{-3}$ (-)	U_a by C,A (μm)
380500	13.47	28.04	28.46	0.3497	0.0010	16.84	13.53	8.52	8.61	0.0175	0.1128	3.44
392496	13.67	28.46	28.46	0.3497	0.0010	17.09	13.67	8.61	8.61	0.0175	0.1140	3.48
899000	16.65	39.23	28.46	0.3497	0.0069	12.88	16.70	10.77	8.61	0.0175	0.3242	2.39
910947	16.99	40.03	28.46	0.3497	0.0070	13.14	17.00	10.96	8.61	0.0175	0.3300	2.43
1081100	19.19	51.50	28.46	0.3497	0.0177	6.03	19.23	13.06	8.61	0.0175	0.6119	2.15
1089695	19.57	52.52	28.46	0.3497	0.0180	6.15	19.58	13.30	8.61	0.0175	0.6230	2.19
1230500	22.03	69.43	28.46	0.3497	0.0441	6.19	22.07	16.45	8.61	0.0175	1.0991	1.86
1236095	22.48	70.85	28.46	0.3497	0.0450	6.32	22.49	16.76	8.61	0.0175	1.1200	1.90
1337600	25.19	96.52	28.46	0.3497	0.1068	4.16	25.22	21.49	8.61	0.0175	1.8040	1.68
1339825	25.48	97.63	28.46	0.3497	0.1080	4.21	25.50	21.73	8.61	0.0175	1.8240	1.70
1400600	28.07	133.73	28.46	0.3497	0.2701	3.86	28.09	28.26	8.61	0.0175	2.6864	0.92
1401815	28.37	135.16	28.46	0.3497	0.2730	3.90	28.40	28.57	8.61	0.0175	2.7160	0.93
1433790	31.04	191.85	28.46	0.3497	0.5631	1.95	31.06	38.72	8.61	0.0175	4.2454	0.67
1434424	31.31	193.52	28.46	0.3497	0.5680	1.97	31.35	39.08	8.61	0.0175	4.2850	0.68

ตารางที่ 5.10 ข้อมูล W, B, a_{s0} และ ΔP สำหรับหา U_m และ U_{C_p} ด้วยวิธีมอนติ คาร์โล

W		B		a_{s0}		ΔP
Mean (mm)	U_W (mm)	Mean (mm)	U_B (mm)	Mean (mm)	$U_{a_{s0}}$ (mm)	Mean (mm)
50.05	0.0293	12.49	0.01395	13.06	0.02821	81000

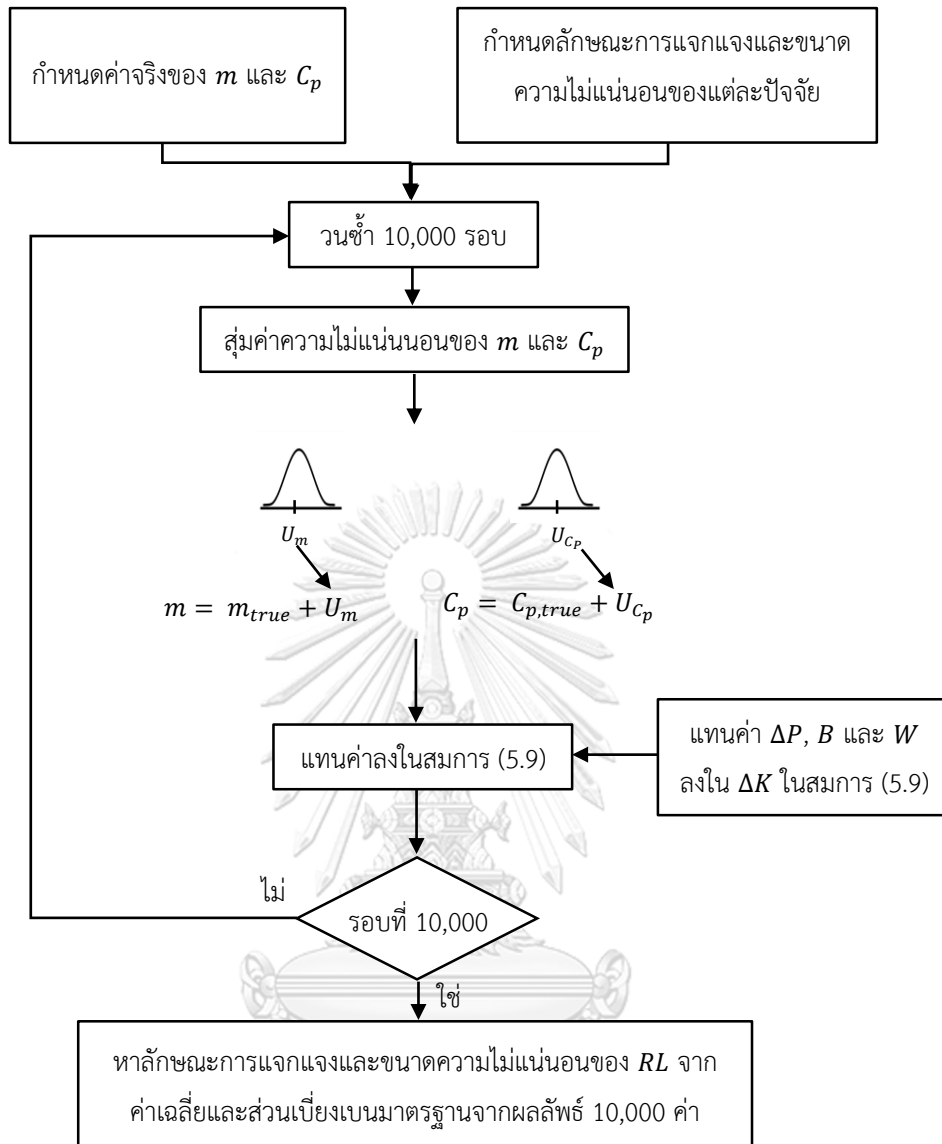
หลังจากได้ความไม่แน่นอนของสมการ $\frac{da}{dN}$ แล้ว จะหา ความไม่แน่นอนของ RL ที่คำนวณจากสมการนี้ ก่อนอื่นต้องจัดรูปสมการ (5.1) ให้เป็นฟอร์มสำหรับคำนวณ RL ก่อน ดังสมการ (5.9)

$$\int_0^{N_{final}} dN = \int_{a_{initial}}^{a_{final}} \frac{1}{C_p \Delta K^m} da \quad (5.9)$$

สมมติใจที่ยืนยันมาว่าวัสดุมีความยาวรอยร้าวเริ่มต้น 15 mm จะต้องรับภาระอีกที่รอบความยาวรอยร้าวถึงจะเป็น 30 mm แล้วหาความไม่แน่นอนของจำนวนรอบที่วัสดุต้องรับภาระในแต่ละกรณี โดยกำหนดให้วัสดุรับ ΔK แบบเดียวกับที่ใช้หา $U_{da/dN}$ (ข้อมูล ΔP , B และ W อยู่ในตาราง 5.32) การหาความไม่แน่นอนของ RL ใช้วิธีมอนติ คาร์โล ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 5.13 เริ่มจากแทนค่าปริมาณ ΔP , B และ W ที่ใช้คำนวณ ΔK โดยสมมติว่าปริมาณเหล่านี้ไม่มีความไม่แน่นอน จากนั้นสุ่มค่า m และ C_p โดยสุ่มค่าความไม่แน่นอนจากปัจจัยต่าง ๆ ของแต่ละปริมาณแล้วนำไปบวกกับค่าประมาณที่ดีที่สุดของปริมาณทั้งสอง ถัดมาคำนวณ RL แล้วทำซ้ำ 10,000 รอบสุดท้ายหา U_{RL} จาก SD ของผลลัพธ์ ในกรณีสมการ a_{BFS} และ a_{CMOD} จะได้ RL ดังตาราง 5.11 เนื่องจากสถานะทดสอบที่นำมาคำนวณ U_{RL} เป็นสถานะทดสอบที่มีค่า U_a ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับกรณีทั้งหมดที่ทดสอบแต่ยังทำให้เกิด U_{RL} ถึง 10 % และ 4 % จากค่าที่ทำนาย ที่ความมั่นใจ 95 % กรณีใช้ a_{BFS} และ a_{CMOD} ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยสรุปว่า U_a มีนัยยะสำคัญต่อการทำนาย RL

ตารางที่ 5.11 RL และ U_{RL} ซึ่งทำนายจากสมการ (5.7) และ (5.8)

a_{final} (mm)	a_{BFS}		a_{CMOD}	
	$RL \pm U_{RL} \times 10^5$ (รอบ)	U_{RL}/RL (%)	$RL \pm U_{RL} \times 10^5$ (รอบ)	U_{RL}/RL (%)
30	2.504 ± 0.2458	9.8	2.911 ± 0.1136	3.9

รูปที่ 5.13 แผนผัง วิธีมอนติ คาร์โล สำหรับหา ต่อ U_{RL}

บทที่ 6

สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาความสอดคล้องระหว่าง a และ a_s นิยามต่าง ๆ (เฉลี่ย 2, 3, 9 ตำแหน่ง และพื้นที่สมมูล) โดยให้ภาระล้าแก่ชิ้นทดสอบแล้วเก็บข้อมูล C เพื่อนำไปคำนวณ a พร้อมกับเปลี่ยน R เพื่อสร้างขอบหน้ารอยร้าวสำหรับวัด a_s ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ เนื่องจาก $a = f(W, a_{s0}, C_0, C)$ ดังนั้นจึงคำนวณ a จาก a_{s0} แต่ละนิยาม แล้วนำไปเทียบกับ a_s ทั้งสี่นิยาม พบว่า a และ a_s จะสอดคล้องกันมากที่สุดเมื่อ a_{s0} และ a_s ได้จากนิยามเดียวกัน ดังรูป 4.6 และ 4.7

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการหาขนาด U_a โดยจะต้องหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนทั้ง Type A และ B ของ W, a_{s0}, C_0 และ C ด้วยวิธีในหัวข้อ 3.7 แล้วนำไปคำนวณ U_a ด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) อีกทั้งศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a ประกอบด้วย ปัจจัยหมวดการทดสอบ, การวิเคราะห์ข้อมูล และผลของการใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ พบว่าปัจจัยทั้งสองหมวดส่งผลต่อ U_a ดังตาราง 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ โดยสภาวะทดสอบที่ส่งผลต่อ U_a มากที่สุด คือ %Unload

จากการนำข้อมูล U_a ที่สภาวะทดสอบหนึ่งไปคำนวณหาขนาดของ U_{RL} พบว่า U_a ที่มีขนาดประมาณ 50 – 60 μm ส่งผลให้เกิด U_{RL} ประมาณ 10 % และ 4 % จากค่าที่ทำนาย ที่ความมั่นใจ 95 % กรณีใช้ a_{BFS} และ a_{CMOD} ตามลำดับ ผู้วิจัยมีความเห็นว่ามึนยยะสำคัญต่อการทำนาย RL

ข้อมูลและข้อสรุปของงานวิจัยที่สามารถนำไปประยุกต์กับระบบทดสอบอื่นได้ คือ 1) วิธีการหาขนาด U_a , 2) แนวโน้มการส่งผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ U_a และวิธีลดผลเหล่านั้น, 3) วิธีการหาขนาด U_{RL} และมึนยยะสำคัญของ U_a ต่อ U_{RL} 4) ยืนยันว่า a สอดคล้องกับ a_s เมื่อ a_{s0} และ a_s ได้จากนิยามเดียวกัน

ประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติม คือ

- 1) ศึกษา U_a ที่ใช้วิธีการคำนวณ C วิธีอื่นซึ่งอาจทำให้เกิด U_C ไม่เท่ากัน เช่น ใช้วิธีการเลือกข้อมูลช่วงปลดภาระแบบอื่น หรือ ปรับค่า E_{eff} จนกว่า a และ a_s ที่ขอบหน้ารอยร้าวสุดท้ายจะเท่ากันแทนขอบหน้ารอยร้าวแรก
- 2) งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแบบ ΔK เพิ่มขึ้น ควรศึกษาเพิ่มเติมกรณีการทดสอบแบบ ΔK ลดลง
- 3) ศึกษา U_a กรณีการทดสอบหาความต้านทานการแตกหัก
- 4) ศึกษาผลจากปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนอื่น เช่น ความแม่นยำของสมการคำนวณ a , ผลของแบนวิทท์ต่อขนาดสัญญาณ, รูปทรงของชิ้นทดสอบ เป็นต้น
- 5) การใช้ a_{s0} นิยามต่าง ๆ จะทำให้คำนวณ a ได้ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจส่งผลต่อสมการ da/dN ที่ประมาณค่าได้ และส่งผลสืบเนื่องไปยังค่า RL ที่ทำนายได้จะไม่เท่ากัน
- 6) ศึกษาวิธีการลด U_{RL}

รายการอ้างอิง

1. Stephens, R.I., et al., *Metal Fatigue in Engineering*. 2000: John Wiley & Sons.
2. *How Old Is Too Old? The Impact off Aging Aircraft on Aviation Safety*. 2007.
3. *Fitness for Service and Remaining Life Assessment*. [cited 2018; Available from: <http://www.sonomatic.com/advanced-inspection/applications/pressure-vessels/fitness-for-service-andremaining-life-assessment>].
4. Peace, R., H.C. Furtado, and I. Le May, *Remaining Life Assessment of Welded Pipes Containing Cracks*. International journal of pressure vessels and piping, 2006. 83(11-12): p. 798-802.
5. *ASM Handbook Vol. 19, Fatigue and Fracture*. ASM International, 1996. 19.
6. Riddell, W.T. and R.S. Piascik, *A Back-Faced Strain Compliance Expression for the Compact Tension Specimen*. Journal of testing and evaluation, 1999. 27(2): p. 167-170.
7. Newman Jr, J., Y. Yamada, and M. James, *Back-Face Strain Compliance Relation for Compact Specimens for Wide Range in Crack Lengths*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. 78(15): p. 2707-2711.
8. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. 2013: ASTM International.
9. Maxwell, D., *Strain Based Compliance Method for Determining Crack Length for a C (T) Specimen*. 1987: Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Air Force Systems Command.
10. Gilbert, C., et al., *Back-Face Strain Compliance and Electrical-Potential Crack Length Calibrations for the Disk-Shaped Compact-Tension DC (T) Specimen*. Journal of testing and evaluation, 1994. 22(2): p. 117-120.
11. Riddell, W.T. and R.S. Piascik, *A Back Face Strain Compliance Expression for the Compact Tension Specimen*. Journal of testing and evaluation, 1999. 27: p. 2.
12. Salem, J. and L. Ghosn, *Measuring Crack Length in Coarse Grain Ceramics*. International Journal of Fracture, 2010. 164(2): p. 319-323.

13. Maxwell, D., J.P. Gallagher, and N.E. Ashbaugh, *Evaluation of Cod Compliance Determined Crack Growth Rates*. 1984, DAYTON UNIV OH RESEARCH INST.
14. Deans, W., et al., *A Strain Gauging Technique for Monitoring Fracture Mechanics Specimens During Environmental Testing*. *Journal of testing and evaluation*, 1977. 13(4): p. 152-156.
15. Deans, W. and C. Richards, *A Simple and Sensitive Method of Monitoring Crack and Load in Compact Fracture Mechanics Specimens Using Strain Gages*. *Journal of Testing and Evaluation*, 1979. 7(3): p. 147-154.
16. Sankararaman, S., Y. Ling, and S. Mahadevan, *Uncertainty Quantification and Model Validation of Fatigue Crack Growth Prediction*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. 78(7): p. 1487-1504.
17. Hewitt, R.L., *Accuracy and Precision of Crack Length Measurements Using a Compliance Technique*. *Journal of Testing and Evaluation*, 1983. 11(2): p. 150-155.
18. Gordon, J. *The Development of a Single Specimen Unloading Compliance Test System*. in *ECF6, Amsterdam 1986*. 1986.
19. *Standard Guide for Evaluation Data Acquisition System Used in Cyclic Fatigue and Fracture Mechanics Testing*. 2010: ASTM International.
20. *Errors Due to Misalignment of Strain Gages*”, *Tech Note TN-511, MICRO-MEASUREMENTS*. [cited 2018; Available from: <http://www.vishaypg.com/docs/11061/tn511tn5.pdf>.
21. Saxena, A. and S. Hudak, *Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens*. *International Journal of Fracture*, 1978. 14(5): p. 453-468.
22. James, M.A. and J. Newman, *Characterization of Crack Length Measurement Methods for Flat Fracture with Tunneling*. *Journal of ASTM International*, 2005. 2(3): p. 1-16.
23. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. 2013: ASTM International.

24. James, M. and J. Newman Jr, *The Effect of Crack Tunneling on Crack Growth: Experiments and CTOA Analyses*. Engineering Fracture Mechanics, 2003. 70(3-4): p. 457-468.
25. Bailey, P., *Sources of Variation in JIC Measurements of Ductile Fracture Toughness Using Unloading Compliance*. Procedia Structural Integrity, 2016. 2: p. 3758-3763.
26. Koester, K., H. Barth, and R. Ritchie, *Effect of Aging on the Transverse Toughness of Human Cortical Bone: Evaluation by R-Curves*. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2011. 4(7): p. 1504-1513.
27. Van den Bosch, J., et al., *Fracture Toughness Assessment of Ferritic–Martensitic Steel in Liquid Lead–Bismuth Eutectic*. Journal of Nuclear materials, 2009. 385(2): p. 250-257.
28. Thurston, K.V., et al., *Effect of Temperature on The Fatigue-Crack Growth Behavior of the High-Entropy Alloy CrMnFeCoNi*. Intermetallics, 2017. 88: p. 65-72.
29. Bao, C., L. Cai, and C. Dan, *Estimation of Fatigue Crack Growth Behavior for Small-Sized C-Shaped Inside Edge-Notched Tension (CIET) Specimen Using Compliance Technique*. International Journal of Fatigue, 2015. 81: p. 202-212.
30. de Souza, R.F. and C. Ruggieri, *Revised Wide Range Compliance Solutions for Selected Standard and Non-Standard Fracture Test Specimens Based on Crack Mouth Opening Displacement*. Engineering Fracture Mechanics, 2017. 178: p. 77-92.
31. Coleman, H.W. and W.G. Steele, *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. 2018: John Wiley & Sons.
32. Ratcliffe, C. and B. Ratcliffe, *Doubt-Free Uncertainty In Measurement: An Introduction for Engineers and Students*. 2014: Springer.
33. BIPM, I., I. IFCC, and I. IUPAC, OIML, *Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM, 2008. 100.
34. มังกรแก้ว, ช., *การสร้างแบบจำลองอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าสำหรับเหล็กกล้า A516 เกรด 70 จากสมบัติความแข็งแรงล้า*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

35. Chen, X., et al., *Uniaxial Low Cycle Fatigue Behavior for Pre-Corroded 16MND5 Bainitic Steel in Simulated Pressurized Water Reactor Environment*. Journal of Nuclear Materials, 2018. 504: p. 267-276.
36. Spätig, P., et al., *Influence of Mean Stress and Light Water Reactor Environment on Fatigue Life and Dislocation Microstructures of 316L Austenitic Steel*. Journal of Nuclear Materials, 2018.
37. *NI 9235 Manual*. [cited 2018; Available from: http://www.ni.com/pdf/manuals/374645a_02.pdf.
38. *NI 9215 Manual*. [cited 2018; Available from: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373779g.pdf>.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การสอบเทียบเครื่องมือวัด

ก.1 สอบเทียบกล้องขยายดิจิทัล

การสอบเทียบกล้องขยายดิจิทัลที่กำลังขยายต่าง ๆ จะสอบเทียบกับเกจบล็อกที่มีขนาดใกล้เคียงกับระยะที่ใช้กล้องขยายวัด ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- กำลังขยาย 20 เท่า ใช้วัดระยะจากแนวหาระถึงปลาย Notch (d) และระยะติดคลิปเกจ (y) ดังรูป 3.7 มีขนาดประมาณ 10 และ 12.5 mm ตามลำดับ ใช้เกจบล็อกขนาด 12 mm ในสอบเทียบ

- กำลังขยาย 30 เท่า ใช้วัดตำแหน่งติดเกจความเครียด (f_2) ดังรูป 3.9 มีขนาดประมาณ 10 mm ใช้เกจบล็อกขนาด 10 mm ในสอบเทียบ



(ก)

(ข)

รูปที่ ก.1 การสอบเทียบกล้องขยายดิจิทัล

วิธีการสอบเทียบทั้งสองกำลังขยายเหมือนกัน คือ วางเกจบล็อกบนแท่นวางดังรูป ก.1(ก) จากนั้นถ่ายภาพเกจบล็อกด้วยกล้องขยาย ถัดมาปรับกำลังขยายของกล้องให้ได้ค่าที่ต้องการแล้วปรับภาพให้ชัดเจนด้วยการปรับระยะกล้องขยายตามแนวตั้ง สูดทำยวัดขนาดเกจบล็อกด้วยฟังก์ชันวัดระยะบนรูปถ่ายของซอฟต์แวร์กล้องขยาย ดังรูป ก.1(ข) ทำการวัดวัดขนาดเกจบล็อกซ้ำ 25 ครั้ง โดยทุก ๆ การวัดซ้ำ 5 ครั้งจะจัดระบบทดสอบใหม่ด้วยการวางเกจบล็อกใหม่, ปรับกำลังขยายใหม่ และปรับระยะกล้องขยายตามแนวตั้ง เพื่อให้ได้ผลของความไม่แน่นอนจากการตั้งระบบทดสอบ ข้อมูลการวัดเกจบล็อกที่กำลังขยาย 20 และ 30 เท่า แสดงดังตาราง ก.1

จากตารางจะพบว่าระยะที่กล้องขยายวัดคลาดเคลื่อนจากระยะของเกจบล็อก 0.0296 และ 0.0355 mm สำหรับกำลังขยาย 20 และ 30 เท่าตามลำดับ ซึ่งค่านี้จะต้องนำไปชดเชยทุกค่าที่กล้องขยายวัด โดยค่าที่ชดเชยนี้มีความไม่แน่นอนดัง SD_c ของค่าเฉลี่ยในตาราง นอกจากนี้กล้องขยายมีความละเอียด 0.033 และ 0.021 mm สำหรับกำลังขยาย 20 และ 30 เท่าตามลำดับ ความแม่นยำ (หรือความไม่แน่นอน) ของกล้องขยายเกิดจากความไม่แน่นอนของปริมาณที่ใช้ชดเชย, ความละเอียด และความแม่นยำของเกจบล็อก ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (ก.1) จะได้ความแม่นยำของกล้องขยายที่กำลังขยาย 20 และ 30 เท่า เป็น 0.02382 และ 0.01301 mm ตามลำดับ

$$Acc_{scope} = 2 \times \sqrt{u_{ค่าที่ชดเชย}^2 + \left(\frac{resolution}{\sqrt{3}}\right)^2 + Acc_{gauge\ block}^2} \quad (ก.1)$$

สำหรับกำลังขยาย 20 เท่า

$$Acc_{scope} = 2 \times \sqrt{0.01391^2 + \left(\frac{0.033}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.0003}{2}\right)^2} \quad (ก.2)$$

$$= 0.02382 \text{ mm}$$

สำหรับกำลังขยาย 30 เท่า

$$Acc_{scope} = 2 \times \sqrt{0.00389^2 + \left(\frac{0.021}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.0003}{2}\right)^2} \quad (ก.3)$$

$$= 0.01301 \text{ mm}$$

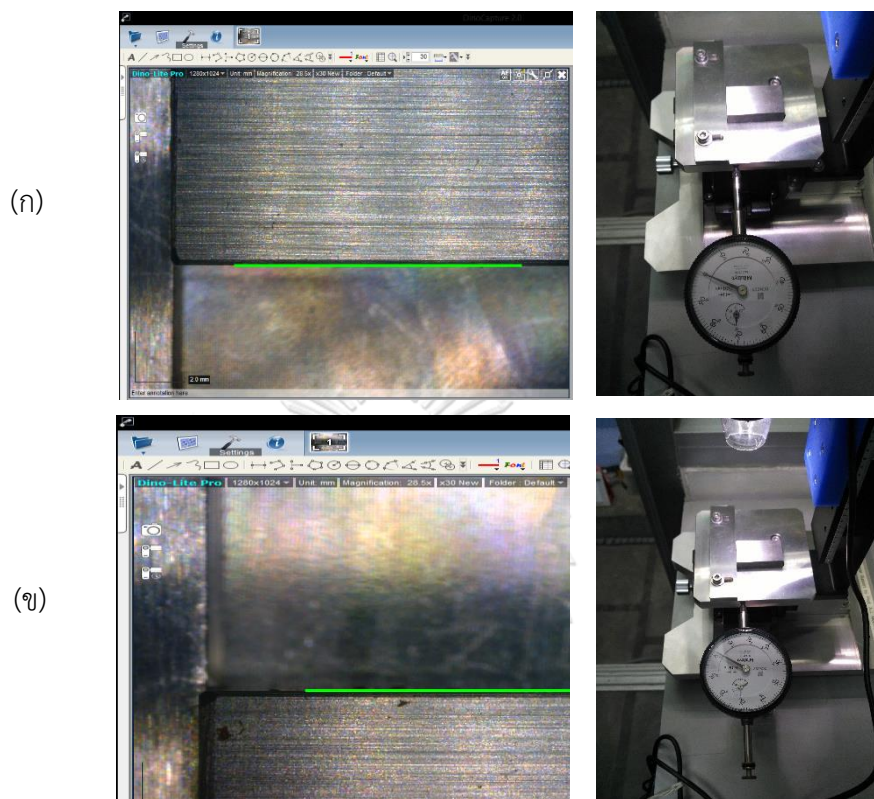
ตารางที่ ก.1 ผลการวัดเกจบล็อกที่กำลังขยาย 20 และ 30 เท่า (ค่าในตารางมีหน่วยเป็น mm)

		รอบที่วัด	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ระยะที่คลาดเคลื่อนจากเกจบล็อก	SD_c ของค่าเฉลี่ย
กำลังขยาย 20 เท่า	รอบที่จัดระบบใหม่	1	12.000	12.034	11.899	11.933	12.034	11.9704	0.0296	0.01391
		2	11.832	11.966	11.899	11.899	12.000			
		3	11.966	11.899	11.866	12.034	11.966			
		4	11.966	12.067	11.899	12.067	11.966			
		5	11.966	12.067	12.000	12.034	12.000			
กำลังขยาย 30 เท่า	รอบที่จัดระบบใหม่	1	9.978	9.935	10.000	9.935	9.957	9.9645	0.0355	0.00389
		2	9.957	9.957	9.957	9.957	9.978			
		3	9.957	9.957	9.957	9.978	9.957			
		4	9.978	9.978	10.000	9.978	9.935			
		5	9.978	9.978	9.957	9.978	9.935			

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.2 สอบเทียบไดอัลเกจ

การสอบเทียบไดอัลเกจต้องการทราบว่าการติดตั้งไดอัลเกจดีเพียงพอที่จะวัด a_{50} หรือไม่ โดยจะสอบเทียบกับเกจบล็อกขนาด 18 และ 20 mm วิธีการสอบเทียบไดอัลเกจเริ่มจาก วางเกจบล็อกบนแท่นวางจากนั้นถ่ายภาพเกจบล็อกด้วยกล้องขยาย ถัดมาวาดเส้นตรงบนภาพที่ขอบด้านหนึ่งของเกจบล็อกเพื่อมาร์กตำแหน่งแล้วตั้งค่าไดอัลเกจเป็นศูนย์ ดังรูป ก.2(ก) จากนั้นขยับแท่นวางขึ้นทดสอบของกล้องขยายตามแนวความหนาของเกจบล็อก เมื่อเส้นมาร์กถึงขอบอีกด้านหนึ่งอ่านระยะของเกจบล็อกจากไดอัลเกจ ดังรูป ก.2(ข) วัดเกจบล็อกขนาด 18 และ 20 mm ซ้ำอย่างละ 10 ครั้ง โดยทุกครั้งจะจัดระบบทดสอบใหม่ด้วยการวางเกจบล็อกใหม่ เพื่อให้ได้ผลของความไม่แน่นอนจากการตั้งระบบทดสอบ ข้อมูลการวัดขนาดเกจบล็อกขนาด 18 และ 20 mm แสดงดังตาราง ก.2 จากตารางพบว่าค่าเฉลี่ยที่วัดได้เท่ากับขนาดของเกจบล็อกดังนั้นสรุปว่าไดอัลเกจที่ติดตั้งดีพอที่จะวัดขอบหน้ารอยร้าว



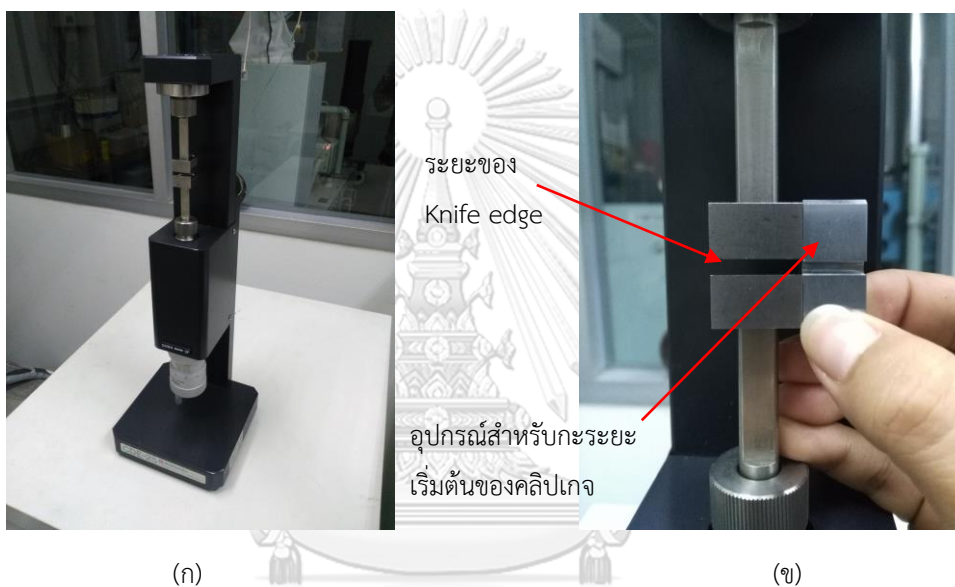
รูปที่ ก.2 การสอบเทียบไดอัลเกจ

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดเกจบล็อกขนาด 18 และ 20 mm ด้วยไดอัลเกจ (ค่าในตารางมีหน่วยเป็น mm)

ครั้งที่วัด	เกจบล็อกขนาด 18 mm	เกจบล็อกขนาด 20 mm
1	18.00	20.01
2	18.01	20.00
3	17.99	20.01
4	18.01	20.01
5	18.00	20.01
6	18.00	20.00
7	18.00	20.00
8	18.01	19.99
9	17.99	20.00
10	18.00	20.00
ค่าเฉลี่ย	18.00	20.00

ก.3 สอบเทียบคลิบเกจ

การสอบเทียบคลิบเกจจะใช้ Extensometer Calibration device รุ่น Shimadzu CDE - 25C2 ดังรูป ก.3(ก) ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะดังนี้ ความแม่นยำ 2.0 μm หรือ 0.6 % ของปริมาณที่วัด (เลือกอันที่มากกว่า), ความละเอียด 1 μm และพิสัย 25 mm วิธีการสอบเทียบเริ่มจาก ตั้งระยะ Knife edge ของอุปกรณ์สอบเทียบให้ใกล้เคียงกับระยะ 0 mm ของคลิบเกจด้วยอุปกรณ์ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้นของการสอบเทียบ ดังรูป ก.3(ข) แล้วรีเซ็ตค่าที่ชุดควบคุมอ่านจากคลิบเกจให้เป็น 0 mm จากนั้นติดตั้งคลิบเกจกับอุปกรณ์สอบเทียบพร้อมกับต่อสายสัญญาณของคลิบเกจเข้ากับอุปกรณ์ควบคุม ถัดมาใช้คำสั่ง Calibration ของชุดควบคุมโดยใช้อุปกรณ์สอบเทียบปรับระยะตามตัวเลขด้านซ้ายมือของตารางบนหน้าจอของแล้วรอกค่าไปเรื่อย ๆ จนครบ ดังรูป ก.4 ชุดควบคุมจะคำนวณ Calibration curve สำหรับการใช้งานโดยอัตโนมัติ



รูปที่ ก.3 อุปกรณ์สอบเทียบคลิบเกจและการตั้งระยะเริ่มต้นของคลิบเกจ



รูปที่ ก.4 การปรับระยะของคลิบเกจและกรอกข้อมูลให้ชุดควบคุมเพื่อสอบเทียบคลิบเกจ

ก.4 สอบเทียบโหลดเซลล์

โหลดเซลล์ที่ใช้ในงานวิจัยได้ส่งไปสอบเทียบที่บริษัท Bara Scientific เอกสารยืนยันการสอบเทียบโหลดเซลล์ แสดงดังรูป ก.5



Bara Scientific Co., Ltd.
988 U Chu Liang Building Floor 7 Rama 4 Road Silom
Bangrak Bangkok Thailand 10500
Tel : 02-6324300 Fax : 02-6375496-7
www.barascientific.com



NAC
THAILAND
NSC-TISI-TIS 17025
CALIBRATION 0209

Certificate of Calibration

Number of page(s) 1/4

Certificate No.	BSCC-FO-093105/16		
Equipment	Universal Testing Machine		
Manufacturer	SHIMADZU		
Model	EHF-EM100KN-20L	Serial No. :	I41104200187
Capacity	20000N	Serial No. :	N561801
Submitted by	Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University 254 Phayathai Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330		
Calibration range	4000N~20000N		
Resolution	0.1N	Indicator :	Digital
Calibration mode	Compression		
Date of Receipt	23 - May - 2016		
Date of Calibration	23 - May - 2016	Issue date :	26 - May - 2016
Calibration location	Laboratory		
Condition of the item	It is good. (Refer to FM-FO-508-01)		
Environments	Temperature	31.0 °C ± 2 °C	
	Relative Humidity	58.0 % ± 10 %	
Calibration Method	ISO 7500-1 : 2004(E)		

Force - Proving Instrument	Model	Serial No.	Certificate No.	Cal Date	Due Date
Load Cell 20kN (HI) Compression	P	P-7703(HI)	MF-0041-14	2-Jun-14	2-Jun-16
Indicator : Morehouse	M4215A/USB	61123			

Traceability This certificate is traceable to the International System of Unit which is maintained by National Institute of Metrology (Thailand).

Calibrated by



Mr. Vorapong Buathong
Calibration Officer

Approved by



Mr. Suraphol Joraphong
Service Manager

The above results are valid exclusively for the calibrated item(s) as mention in this report / certificate. Advertising the report / Certificate and publicity of the results are prohibited and also shall not be reproduced except in full, without written approval of the Bara Scientific Co., Ltd.

FM-FO-510-02 Rev 06 (09/01/08)

รูปที่ ก.5 เอกสารยืนยันการสอบเทียบโหลดเซลล์

ก.5 สอบเทียบ ADC

ADC ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย NI 9215 และ NI9235 ได้ส่งไปสอบเทียบที่บริษัท National Instrument Malaysia เอกสารยืนยันการสอบเทียบของ NI 9215 และ NI9235 แสดงดังรูป ก.6 และ ก.7 ตามลำดับ

Traceable Calibration Certificate			
Certificate Number:	4780576.1	OE Number:	20965715
Date Printed:	27-SEP-2016	Page:	1 of 4
Customer:	National Instruments Singapore Pte Ltd (NIH) 1 Gateway Drive Westgate Tower, #08-01 608531 Singapore SINGAPORE		
Manufacturer:	National Instruments	Model:	NI 9215 (BNC)
Serial Number:	1914A4E	Description:	MODULE ASSY.NI 9215 W/BNC,4-CHANNEL SSH ANALOG INPUT
Part Number:	199269A-01L		
Calibration Date:	27-SEP-2016	Recommended Calibration Due:	27-SEP-2017
Procedure Name:	NI 9215 (BNC)	Verification Results:	As Found: Passed As Left: Passed
Procedure Version:	3.6.0.0	Calibration Executive Version:	3.6.4.0
Lab Technician:	Mohd Zulkepri Ismail	Driver Info:	NI-DAQmx:15.5.0
Temperature:	23.0° C	Humidity:	46.9% RH

The data found in this certificate must be interpreted as:

As Found	The calibration data of the unit as received by National Instruments.
As Left	The calibration data of the unit when returned from National Instruments.

The As Found and As Left readings are identical for units not adjusted or repaired.

Results are reviewed to establish where any measurement results exceeded the manufacturer's specifications. Measured values greater than the Manufacturer's specification limits are marked as 'Failed', measured values within the Manufacturer's specifications are marked as 'Passed'.

This certificate applies exclusively to the item identified above and shall not be reproduced except in full, without National Instruments written authorization. Calibration certificates without signatures are not valid.

The Calibration Certificate can be viewed or downloaded online at www.ni.com/calibration/. To request a hard copy, contact NI Customer Service at Tel:(800) 531-5066 or E-mail customer.service@ni.com

Ming Hui

Ming Hui Tan
Technical Manager

รูปที่ ก.6 เอกสารยืนยันการสอบเทียบ NI 9215

 Traceable Calibration Certificate			
Certificate Number:	4780978.1	OE Number:	20965715
Date Printed:	27-SEP-2016	Page:	1 of 11
Customer:	National Instruments Singapore Pte Ltd (NIH) 1 Gateway Drive Westgate Tower, #08-01 608531 Singapore SINGAPORE		
Manufacturer:	National Instruments	Model:	NI 9235
Serial Number:	1541B96	Description:	CCA, NI 9235, 8 CHANNEL QUARTER-BRIDGE INPUT
Part Number:	196394C-02L		
Calibration Date:	27-SEP-2016	Recommended Calibration Due:	27-SEP-2017
Procedure Name:	NI 9235	Verification Results:	As Found: Passed As Left: Passed
Procedure Version:	3.4.1.0	Calibration Executive Version:	3.6.5.0
Lab Technician:	Mohd Zulkepri Ismail	Driver Info:	NI-DAQmx:15.5.0
Temperature:	23.0° C	Humidity:	46.7% RH

The data found in this certificate must be interpreted as:

As Found The calibration data of the unit as received by National Instruments.
As Left The calibration data of the unit when returned from National Instruments.

The As Found and As Left readings are identical for units not adjusted or repaired.

Results are reviewed to establish where any measurement results exceeded the manufacturer's specifications. Measured values greater than the Manufacturer's specification limits are marked as 'Failed', measured values within the Manufacturer's specifications are marked as 'Passed'.

This certificate applies exclusively to the item identified above and shall not be reproduced except in full, without National Instruments written authorization. Calibration certificates without signatures are not valid.

The Calibration Certificate can be viewed or downloaded online at www.ni.com/calibration/. To request a hard copy, contact NI Customer Service at Tel:(800) 531-5066 or E-mail customer.service@ni.com

Ming Hui

Ming Hui Tan
Technical Manager

รูปที่ ก.7 เอกสารยืนยันการสอบเทียบ NI 9235

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

การใช้ค่าคงที่ k ในการคำนวณความยาวรอยร้าว

บทนี้จะเปรียบเทียบการคำนวณ a ด้วยสมการ (2.1) 1) วิธีปรับค่า E_{eff} จนกว่า a จะเท่ากับ a_{s0} และ 2) วิธีแทนค่า E_{eff} ด้วยสมการ (3.3) และ (3.4) สำหรับ C_{BFS} และ C_{CMOD} ตามลำดับแล้วปรับค่าคงที่ k จนกว่า a จะเท่ากับ a_{s0} การเปรียบเทียบจะกำหนดค่า W , a_{s0} , C_0 และ C จากขั้นตอนทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $R = 0.1$, $f = 1$ Hz, $SR = 10$ kS/s, $DC = 10000$ ข้อมูล, %Unload = 100 %, Con. = 10 รอบ, a_{s0} นียามเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง ดังตาราง ข.1

ตารางที่ ข.1 W , a_{s0} , C_0 และ C จากขั้นตอนทดสอบ A1 ที่สภาวะทดสอบ $R = 0.1$, $f = 1$ Hz, $SR = 10$ kS/s, $DC = 10000$ ข้อมูล, %Unload = 100 %, Con. = 10 รอบ, a_{s0} นียามเฉลี่ย 3 ตำแหน่ง

W (mm)	ลำดับขอบหน้า	$C_{BFS} \times 10^9$ (1/N)	$C_{CMOD} \times 10^9$ (m/N)
50.05	1	28.47	8.61
a_{s0} (mm)	3	40.10	10.94
13.666	5	52.28	13.29
	7	70.75	16.76
	9	97.49	21.69
	11	135.09	28.57
	13	193.04	39.18

จากข้อมูลในตารางจะสามารถคำนวณ E_{eff} สำหรับ C_{BFS} และ C_{CMOD} ได้ 217.53 และ 210.73 GPa ตามลำดับ ส่วน k สำหรับ C_{BFS} และ C_{CMOD} จะได้ 0.99673 และ 1.00183 ตามลำดับ เมื่อนำ E_{eff} และ k ไปคำนวณ a จะได้ผลลัพธ์ดังตาราง ข.2 a จากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากันทุกประการ ซึ่งเป็นเช่นนี้กับทุกสภาวะทดสอบ และทุกขั้นตอนทดสอบ

ตารางที่ ข.2 a_{BFS} และ a_{CMOD} จากวิธีปรับค่า E_{eff} และ k

ลำดับขอบหน้า	a จาก C_{BFS} (mm)		a จาก C_{CMOD} (mm)	
	วิธีปรับค่า E_{eff}	วิธีปรับค่า k	วิธีปรับค่า E_{eff}	วิธีปรับค่า k
1	13.666	13.666	13.666	13.666
3	17.009	17.009	17.005	17.005
5	19.582	19.582	19.580	19.580
7	22.486	22.486	22.490	22.490
9	25.484	25.484	25.490	25.490
11	28.384	28.384	28.393	28.393
13	31.320	31.320	31.343	31.343

ภาคผนวก ค

ความไม่แน่นอนเนื่องจากอุปกรณ์วัดการเสีย

ค.1 เกจความเครียด

หัวข้อนี้จะนำเสนอที่มาของสมการ (3.25) และ (3.26) ปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของ *BFS* ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งเกจความเครียดประกอบด้วย 1) ตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียด 2) ความยาวเกจความเครียด และ 3) แนวที่ติดตั้งเกจความเครียด โดยจะอธิบายแต่ละปัจจัยต่อไปนี้

1) ตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียด

BFS ที่นิยามไว้ในสมการคำนวณ a (2.1) เป็นความเครียดตามแกน x ในรูป 2.1 (ข) (แนวความสูงของชิ้นทดสอบ) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังชิ้นทดสอบ เรียกว่า *BFS* อุดมคติ หากติดตั้งเกจความเครียดคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งดังกล่าวจะทำให้ *BFS* ที่วัดได้คลาดเคลื่อนไปจาก *BFS* ที่อุดมคติ ซึ่งส่งผลให้ a ที่คำนวณได้คลาดเคลื่อน การหาผลของตำแหน่งติดตั้งเกจความเครียดต่อ *BFS* ที่วัดได้จะต้องหาขนาด *BFS* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวด้านหลังชิ้นทดสอบก่อน ผู้วิจัยใช้วิธีสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของครึ่งหนึ่งของชิ้นทดสอบแบบ C(T) ขนาดเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยดังรูป ค.1 กำหนด Support บริเวณปลายรอยร้าวเป็นแบบ Fixed และบริเวณที่ยังไม่มีรอยร้าวเป็น Roller/Slider จากนั้นให้ภาระแก่แบบจำลองที่ตั้งตั้งแต่ 1 – 15 kN ที่ความยาวรอยร้าว 10 – 30 mm พบว่าอัตราส่วนระหว่าง *BFS* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแกน x ในรูป ค.1 กับ *BFS* อุดมคติ ($x = 0$) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (ค.1)

$$\frac{BFS_{x,\beta=0}}{BFS_{x=0,\beta=0}} = \left(-29870 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 23897 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 7581.9 \frac{a}{W} - 1903.5 \right) x^2 + 1 \quad (\text{ค.1})$$

โดย $BFS_{x,\beta=0}$ คือ ความเครียดตามแนวแกน x ที่ด้านหลังชิ้นทดสอบ ณ ตำแหน่งใด ๆ ตามแกน x

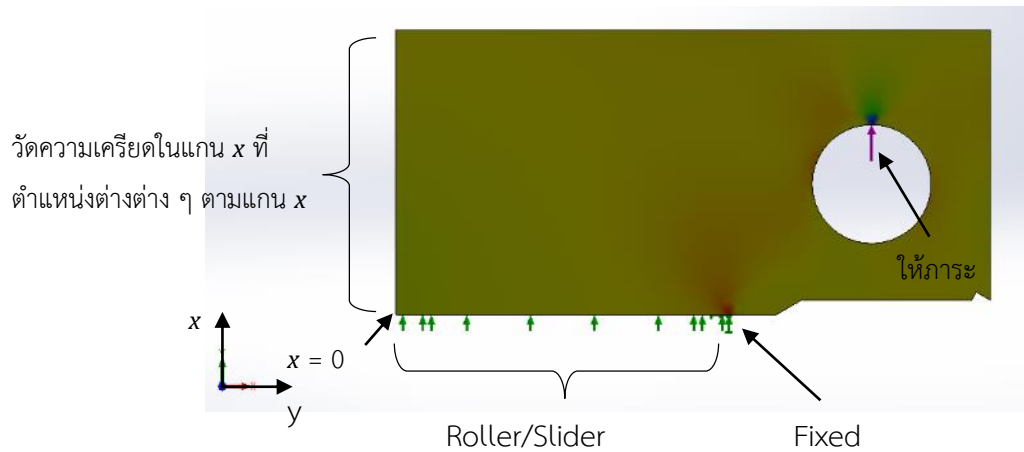
$BFS_{x=0,\beta=0}$ คือ *BFS* อุดมคติ

x คือ ระยะที่ติดตั้งเกจความเครียดห่างจากตำแหน่งกึ่งกลาง

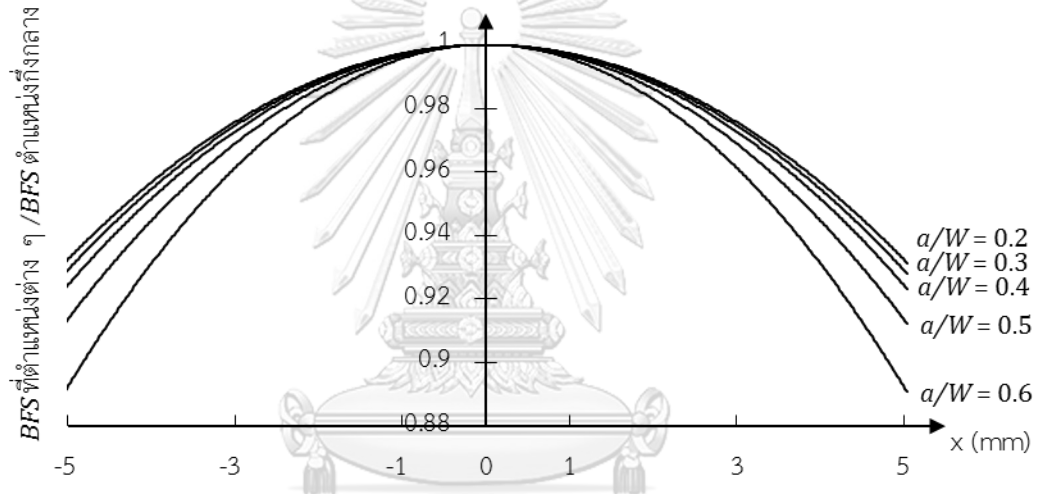
ตัวห้อย β ของตัวแปร *BFS* แสดงถึงมุมที่ติดตั้งเกจความเครียดเอียงไปจากแนวแกน x ถ้าเป็น 0 หมายความว่าติดตั้งเกจความเครียดขนานกับแกน x ส่วนตัวห้อย x ของตัวแปร *BFS* มีความหมายเดียวกับตัวแปร x

เมื่อนำสมการ (ค.1) ไปพล็อตโดยให้แกนตั้งเป็น $\frac{BFS_{x,\beta=0}}{BFS_{x=0,\beta=0}}$ แกนนอนเป็น x ที่ $\frac{a}{W}$ ค่าต่าง ๆ จะได้

กราฟดังรูป ค.2 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเกจความเครียดคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งกึ่งกลาง *BFS* ที่วัดได้จะคลาดเคลื่อนไปจาก *BFS* อุดมคติ



รูปที่ ค.1 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นทดสอบแบบ C(T)



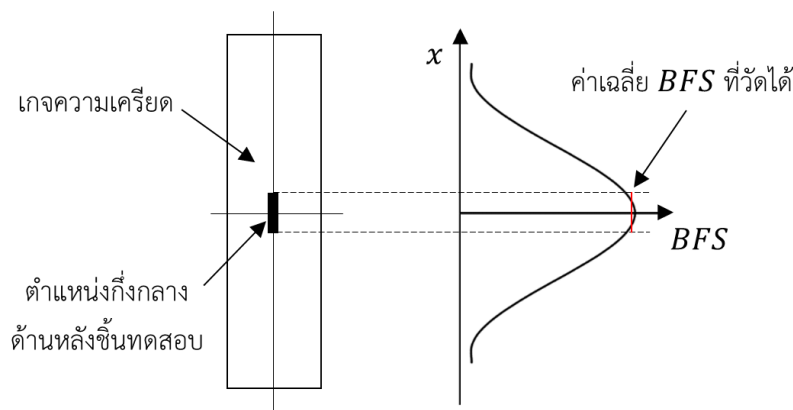
รูปที่ ค.2 กราฟอัตราส่วน BFS ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแกน x กับ BFS อุดมคติ ที่ x และ a/W ค่าต่าง ๆ

2) ความยาวเกจความเคียด

ปัจจัยนี้ทำให้ขนาดของ BFS ที่วัดได้เป็น BFS เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งตลอดความยาวเกจ ยกตัวอย่างติด
 เกจความเคียดที่ตำแหน่งกึ่งกลางดังรูป ค.2 ค่าที่เกจความเคียดวัดได้จะมีค่าดังเส้นสีแดง ขนาดของ BFS เฉลี่ย
 แสดงดังสมการ (ค.2)

$$BFS_{GL} = \int_{x-0.5GL}^{x+0.5GL} BFS dx / GL \tag{ค.2}$$

เมื่อ GL คือ ความยาวเกจ (มีขนาด 5 mm สำหรับงานวิจัยนี้) และ BFS_{GL} คือ BFS เฉลี่ยจากความยาวเกจ



รูปที่ ค.3 ผลของความยาวเกจความเครียดต่อ BFS ที่วัดได้

แทน BFS ในสมการ (ค.2) ด้วย $BFS_{x,\beta=0}$ จากสมการ (ค.1) จะได้สมการ (ค.3)

$$BFS_{x,\beta=0,GL} = \int_{x-0.5GL}^{x+0.5GL} \left[\left(-29870 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 23897 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 7581.9 \frac{a}{W} - 1903.5 \right) x^2 + 1 \right] BFS_{x=0,\beta=0} dx / GL \quad (\text{ค.3})$$

จัดรูปสมการ (ค.3) โดยหาร $BFS_{x=0,\beta=0}$ ทั้งสองฝั่งจะได้สมการ (ค.4)

$$\frac{BFS_{x,\beta=0,GL}}{BFS_{x=0,\beta=0}} = \int_{x-0.5GL}^{x+0.5GL} \left[\left(-29870 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 23897 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 7581.9 \frac{a}{W} - 1903.5 \right) x^2 + 1 \right] dx / GL \quad (\text{ค.4})$$

ความหมายของพจน์ด้านซ้ายในสมการ (ค.4) คือ อัตราส่วนระหว่าง BFS เฉลี่ยจากความยาวเกจที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแกน x กับ BFS อุดมคติ

3) แนวคิดเกจความเครียด

BFS อุดมคติเป็นความเครียดตามแกน x การติดเกจความเครียดเอียงไปจากแนวแกน x จะทำให้วัดขนาด BFS ได้น้อยกว่า BFS อุดมคติ ขนาดความเครียดที่วัดได้เมื่อติดเกจความเครียดเอียงแสดงดังสมการ (ค.5)

$$\frac{BFS_{x,\beta}}{BFS_{x,\beta=0}} = \frac{\cos(2\beta) - 1}{\frac{1 - \frac{1}{\mu}}{-1 - \frac{1}{\mu}} + 1} + 1 \quad (\text{ค.5})$$

เมื่อ $BFS_{x,\beta}$ คือ ความเครียดที่มุมใด ๆ จากแนวแกน x ที่ด้านหลังขึ้นทดสอบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแกน x

$BFS_{x,\beta=0}$ คือ ความเครียดตามแนวแกน x ที่ด้านหลังขึ้นทดสอบ ณ ตำแหน่งใด ๆ ตามแกน x

β คือ มุมที่ติดเกจความเครียดเอียงไปจากแกน x ดังรูป 2.22

μ คือ อัตราส่วนปัวร์ซอง (ประมาณ 0.265 สำหรับเหล็กกล้า)

เมื่อแทน $BFS_{x,\beta=0}$ ในสมการ (ค.5) ด้วย $BFS_{x,\beta=0,GL}$ จากสมการ (ค.4) จะได้สมการ (ค.6)

$$BFS_{x,\beta,GL} = \left(\frac{\cos(2\beta) - 1}{\frac{1 - \frac{1}{\mu}}{-1 - \frac{1}{\mu}} + 1} + 1 \right) \int_{x-0.5GL}^{x+0.5GL} \left[\left(-29870 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 23897 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 7581.9 \frac{a}{W} - 1903.5 \right) x^2 + 1 \right] BFS_{x=0,\beta=0} dx / GL \quad (\text{ค.6})$$

จัดรูปสมการโดยหาร $BFS_{x=0,\beta=0}$ ทั้งสองด้าน แล้วลบด้วย 1 จะได้สมการ (ค.7)

$$1 - \frac{BFS_{x,\beta,GL}}{BFS_{x=0,\beta=0}} = 1 - \left(\frac{\cos(2\beta)-1}{\frac{1}{\mu}+1} + 1 \right) \int_{x-0.5GL}^{x+0.5GL} \left[\left(\frac{-29870 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 23897 \left(\frac{a}{W}\right)^2}{-7581.9 \frac{a}{W} - 1903.5} \right) x^2 + 1 \right] dx / GL \quad (ค.7)$$

ความหมายของสมการ (ค.7) คือ อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนของ BFS เฉลี่ยจากความยาวเกจซึ่งตำแหน่งและแนวติดตั้งความเครียดคลาดเคลื่อน เทียบกับ BFS อุดมคติ จากนั้นอินทิเกรตพจน์ด้านขวาในสมการ (ค.7), แทนค่า μ และคูณด้วย $BFS_{x=0,\beta=0}$ ทั้งสองด้าน จะได้ความคลาดเคลื่อนของ $BFS_{x,\beta,GL}$ จาก BFS อุดมคติดังสมการ (ค.8) และ (ค.9) หรือก็คือสมการ (3.25) และ (3.26) ตามลำดับ และเมื่อนำสมการทั้งสองนี้ไปในวิธีมอนติ คาร์โลจะสมารถใช้หาความไม่แน่นอนของ BFS ที่เกิดจาก x และ β ได้

$$\text{ความคลาดเคลื่อนของ } BFS_{x,\beta,GL} = \left(1 - M_\beta \frac{\left(\frac{-29870 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3}{\frac{1}{3} + 23897 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2} \right) \left(\left(x + \frac{1}{2}GL\right)^3 - \left(x - \frac{1}{2}GL\right)^3 \right) + GL}{-7581.9 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1903.5} \right) \cdot BFS_{x=0,\beta=0} \quad (ค.8)$$

$$M_\beta = (0.3575 + 0.6425 \cos(2\beta)) \quad (ค.9)$$

ค.2 คลิปเกจ

หัวข้อนี้จะนำเสนอที่มาของสมการ (3.27) $CMOD$ ที่นิยามไว้ในสมการคำนวณ a (2.1) เป็นระยะแอ้าปรอยร้าวที่ตำแหน่งห่างจากแนวหาระ $0.25W$ ดังรูป ค.4 เรียกว่า $CMOD$ อุดมคติ หากติดตั้งคลิปเกจคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งดังกล่าวตามแกน y ในรูป จะทำให้ $CMOD$ ที่วัดได้คลาดเคลื่อนไปจากที่นิยามไว้ในสมการ ซึ่งส่งผลให้ a ที่คำนวณได้คลาดเคลื่อน งานวิจัยที่นำเสนอสมการ (2.1) ของวิธี C_{CMOD} [21] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $CMOD$ ที่ตำแหน่งอุดมคติ และตำแหน่งต่าง ๆ ดังสมการ (ค.10)

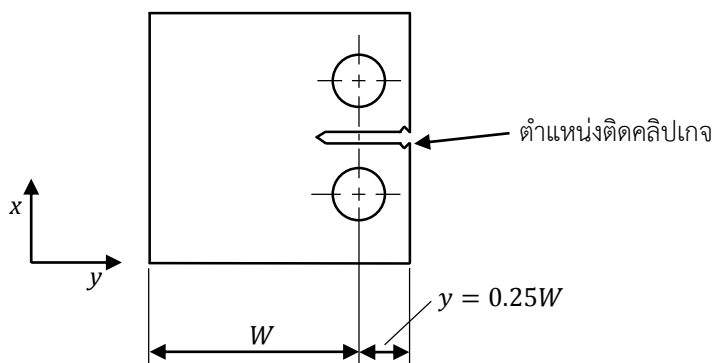
$$\frac{CMOD_y}{CMOD_{y=0.25W}} = \frac{\frac{x_0+y}{W} + \frac{y}{W}}{\frac{x_0}{W} + 0.25} \quad (ค.10)$$

เมื่อ $CMOD_y$ คือ $CMOD$ ที่ตำแหน่งใด ๆ ตามแกน y จากแนวหาระ

$CMOD_{y=0.25W}$ คือ $CMOD$ ที่ตำแหน่งอุดมคติ

x_0 คือ ตำแหน่งแกนหมุน (axis of rotation) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ a/W ดังตาราง ค.1

y คือ ระยะที่ติดตั้งคลิปเกจห่างจากแนวหาระ



รูปที่ ค.4 ตำแหน่งติดคลิบเกจ

ตารางที่ ค.1 x_0/W ที่ a/W ต่าง ๆ

a/W	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	0.975	1
x_0/W	0.281	0.330	0.378	0.422	0.466	0.507	0.551	0.593	0.639	0.687	0.737	0.785	0.832	0.874	0.916	0.958	0.979	1

ผู้วิจัยพยายามจัดรูปสมการ (ค.10) ให้เป็นฟังก์ชันของ y , a และ W โดยแทนค่า x_0/W และ y ที่ a/W ค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ค.10) จะได้ข้อมูล $1 - \frac{CMOD_y}{CMOD_{y=0.25W}}$ (หรือก็คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนของ $CMOD$ ที่ตำแหน่ง y ต่าง ๆ เทียบกับ $CMOD$ อุดมคติ) ดังตาราง ค.2 จากนั้นพิดข้อมูลในตารางจะได้สมการ (ค.11)

$$1 - \frac{CMOD_y}{CMOD_{y=0.25W}} = 1 - \left(-0.7717 \cdot \left(\frac{y}{W} \right) + 1.1929 \right) \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{\left(1.004 \cdot \left(\frac{y}{W} \right)^2 + 0.1848 \cdot \left(\frac{y}{W} \right) - 0.1090 \right)} \quad (\text{ค.11})$$

คูณสมการด้วย $CMOD_{y=0.25W}$ ทั้งสองด้านจะได้ $CMOD$ ที่คลาดเคลื่อนจาก $CMOD$ อุดมคติ ดังสมการ (ค.12) หรือก็คือสมการ (3.27) $CMOD$

$$\text{ความคลาดเคลื่อนของ } CMOD = \left(1 - \left(-0.7717 \cdot \left(\frac{y}{W} \right) + 1.1929 \right) \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{\left(\begin{matrix} 1.004 \cdot \left(\frac{y}{W} \right)^2 \\ + 0.1848 \cdot \left(\frac{y}{W} \right) \\ - 0.1090 \end{matrix} \right)} \right) \cdot CMOD_{y=0.25W} \quad (\text{ค.12})$$

และเมื่อนำสมการนี้ไปในวิธีมอนติ คาร์โลจะสามารถใช้หาความไม่แน่นอนของ $CMOD$ ที่เกิดจาก y ได้

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนของ $CMOD$ ที่ตำแหน่ง y ต่าง ๆ เทียบกับ $CMOD$ ที่ตำแหน่งอุดมคติ

	a/W									
y/W	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
0.24	-0.0188	-0.0172	-0.0159	-0.0149	-0.0140	-0.0132	-0.0125	-0.0119	-0.0113	-0.0107
0.245	-0.0094	-0.0086	-0.0080	-0.0074	-0.0070	-0.0066	-0.0062	-0.0059	-0.0056	-0.0053
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.255	0.0094	0.0086	0.0080	0.0074	0.0070	0.0066	0.0062	0.0059	0.0056	0.0053
0.26	0.0188	0.0172	0.0159	0.0149	0.0140	0.0132	0.0125	0.0119	0.0113	0.0107

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดสอบ

ง.1 ความยาวรอยร้าวกายภาพนิยามต่าง ๆ

หัวข้อนี้จะนำเสนอข้อมูลและวิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวกายภาพ (\bar{a}_s) นิยามต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากชั้นทดสอบ A5 ดังตาราง ง.1 – ง.4 การหา \bar{a}_s เริ่มจากนำ d และ s ที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากการวัดหลายครั้งไปหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำไปคำนวณ \bar{a}_s นิยามต่าง ๆ ด้วยสมการคำนวณ a_s ของแต่ละนิยาม หน่วยของระยะต่าง ๆ ในตาราง ง.1 – ง.4 คือ mm

ตารางที่ ง.1 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\bar{a}_{s,2p}$

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\bar{a}_{s,2p}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
1	s_1	3.07	3.08	3.11	3.05	3.04	3.07	12.40
	s_2	2.69	2.69	2.69	2.69	2.70	2.69	
2	s_1	4.57	4.51	4.54	4.55	4.56	4.55	13.87
	s_2	4.17	4.17	4.17	4.13	4.14	4.16	
3	s_1	6.10	6.11	6.12	6.15	6.17	6.13	15.49
	s_2	5.80	5.83	5.83	5.78	5.79	5.81	
4	s_1	7.66	7.65	7.65	7.71	7.65	7.66	17.06
	s_2	7.40	7.41	7.41	7.43	7.43	7.42	
5	s_1	9.09	9.07	9.14	9.10	9.06	9.09	18.49
	s_2	8.85	8.84	8.86	8.85	8.81	8.84	
6	s_1	10.78	10.76	10.78	10.76	10.76	10.77	20.24
	s_2	10.70	10.64	10.62	10.68	10.69	10.67	
7	s_1	12.24	12.28	12.23	12.30	12.27	12.26	21.63
	s_2	11.98	11.94	11.96	11.91	12.00	11.96	
8	s_1	13.93	13.95	13.95	13.91	13.89	13.93	23.36
	s_2	13.70	13.75	13.77	13.74	13.77	13.75	
9	s_1	15.27	15.26	15.35	15.33	15.28	15.30	24.71
	s_2	15.08	15.10	15.06	15.02	15.10	15.07	
10	s_1	16.91	16.97	16.95	16.93	16.92	16.94	26.43
	s_2	16.87	16.85	16.95	16.85	16.88	16.88	

ตารางที่ ง.2 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,3p}}$

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,3p}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
1	s_1	3.62	3.63	3.62	3.64	3.64	3.63	13.09
	s_2	3.65	3.65	3.64	3.64	3.65	3.65	
	s_3	3.40	3.42	3.41	3.41	3.42	3.41	
2	s_1	4.97	4.97	5.01	4.98	4.94	4.97	14.45
	s_2	4.99	5.02	5.03	5.02	4.99	5.01	
	s_3	4.81	4.81	4.78	4.81	4.80	4.80	
3	s_1	6.65	6.69	6.68	6.69	6.68	6.68	16.14
	s_2	6.70	6.70	6.73	6.72	6.71	6.71	
	s_3	6.45	6.46	6.47	6.49	6.48	6.47	
4	s_1	8.07	8.08	8.09	8.09	8.09	8.08	17.57
	s_2	8.15	8.15	8.12	8.14	8.14	8.14	
	s_3	7.94	7.90	7.93	7.95	7.93	7.93	
5	s_1	9.70	9.72	9.72	9.72	9.69	9.71	19.19
	s_2	9.79	9.79	9.79	9.78	9.78	9.79	
	s_3	9.51	9.51	9.55	9.50	9.52	9.52	
6	s_1	11.26	11.29	11.26	11.27	11.27	11.27	20.74
	s_2	11.35	11.37	11.32	11.29	11.30	11.33	
	s_3	11.03	11.05	11.07	11.06	11.05	11.05	
7	s_1	12.80	12.88	12.87	12.86	12.84	12.85	22.35
	s_2	13.00	12.96	13.00	12.99	12.96	12.98	
	s_3	12.63	12.66	12.62	12.67	12.68	12.65	
8	s_1	14.35	14.35	14.35	14.37	14.34	14.35	23.87
	s_2	14.41	14.49	14.45	14.46	14.45	14.45	
	s_3	14.23	14.23	14.25	14.21	14.26	14.24	
9	s_1	15.79	15.84	15.89	15.86	15.88	15.85	25.36
	s_2	15.96	15.92	15.95	15.97	15.97	15.95	
	s_3	15.67	15.68	15.71	15.71	15.70	15.69	
10	s_1	17.37	17.31	17.33	17.36	17.36	17.35	26.89
	s_2	17.54	17.49	17.49	17.48	17.48	17.50	
	s_3	17.25	17.28	17.29	17.27	17.27	17.27	

ตารางที่ ง.3 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,9p}}$

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,9p}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
1	s_1	3.26	3.23	3.24	3.24	3.24	3.24	12.95
	s_2	3.46	3.49	3.48	3.51	3.51	3.49	
	s_3	3.62	3.63	3.62	3.62	3.64	3.63	
	s_4	3.65	3.62	3.65	3.64	3.66	3.64	
	s_5	3.65	3.65	3.64	3.64	3.65	3.65	
	s_6	3.55	3.55	3.58	3.56	3.54	3.56	
	s_7	3.46	3.45	3.45	3.45	3.44	3.45	
	s_8	3.22	3.25	3.27	3.22	3.24	3.24	
	s_9	2.91	2.93	2.91	2.91	2.95	2.92	
2	s_1	4.70	4.66	4.69	4.68	4.68	4.68	14.33
	s_2	4.87	4.90	4.88	4.88	4.87	4.88	
	s_3	4.97	4.96	4.95	4.95	4.94	4.95	
	s_4	5.00	4.98	4.99	4.98	5.00	4.99	
	s_5	4.99	5.02	5.03	5.02	4.99	5.01	
	s_6	4.97	4.93	4.91	4.92	4.92	4.93	
	s_7	4.81	4.81	4.80	4.81	4.80	4.81	
	s_8	4.65	4.64	4.62	4.64	4.65	4.64	
	s_9	4.36	4.36	4.38	4.38	4.37	4.37	
3	s_1	6.21	6.24	6.26	6.24	6.26	6.24	16.02
	s_2	6.55	6.55	6.57	6.58	6.59	6.57	
	s_3	6.69	6.69	6.68	6.70	6.71	6.69	
	s_4	6.74	6.76	6.75	6.74	6.73	6.74	
	s_5	6.70	6.70	6.73	6.72	6.71	6.71	
	s_6	6.57	6.61	6.61	6.65	6.68	6.62	
	s_7	6.50	6.50	6.53	6.53	6.54	6.52	
	s_8	6.28	6.30	6.30	6.31	6.32	6.30	
	s_9	5.97	5.95	5.96	5.96	5.98	5.96	
4	s_1	7.79	7.80	7.78	7.78	7.79	7.79	17.47
	s_2	7.99	8.00	8.01	8.00	8.01	8.00	
	s_3	8.09	8.08	8.11	8.10	8.12	8.10	
	s_4	8.15	8.13	8.12	8.14	8.12	8.13	
	s_5	8.15	8.15	8.12	8.14	8.14	8.14	
	s_6	8.08	8.06	8.08	8.05	8.05	8.06	
	s_7	7.95	7.95	7.96	7.95	7.96	7.95	

ตารางที่ ง.3 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,9p}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,9p}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
4	s_8	7.80	7.76	7.78	7.76	7.77	7.77	17.47
	s_9	7.50	7.49	7.52	7.51	7.53	7.51	
5	s_1	9.29	9.26	9.26	9.26	9.26	9.27	19.05
	s_2	9.56	9.56	9.55	9.56	9.56	9.56	
	s_3	9.70	9.70	9.76	9.76	9.76	9.74	
	s_4	9.73	9.74	9.79	9.77	9.79	9.76	
	s_5	9.79	9.79	9.79	9.78	9.78	9.79	
	s_6	9.65	9.65	9.67	9.65	9.65	9.65	
	s_7	9.58	9.56	9.55	9.55	9.56	9.56	
	s_8	9.36	9.30	9.34	9.31	9.31	9.32	
	s_9	8.96	8.88	8.95	8.94	8.96	8.94	
6	s_1	10.92	10.93	10.92	10.90	10.90	10.91	20.65
	s_2	11.11	11.16	11.12	11.14	11.15	11.14	
	s_3	11.27	11.27	11.26	11.27	11.27	11.27	
	s_4	11.30	11.30	11.30	11.31	11.30	11.30	
	s_5	11.35	11.37	11.32	11.29	11.30	11.33	
	s_6	11.26	11.25	11.24	11.27	11.27	11.26	
	s_7	11.14	11.11	11.12	11.16	11.14	11.13	
	s_8	10.99	10.97	10.98	10.98	10.97	10.98	
	s_9	10.77	10.79	10.71	10.73	10.71	10.74	
7	s_1	12.39	12.41	12.42	12.39	12.40	12.40	22.25
	s_2	12.75	12.72	12.73	12.75	12.74	12.74	
	s_3	12.87	12.90	12.87	12.86	12.85	12.87	
	s_4	12.90	12.94	12.97	12.96	13.01	12.96	
	s_5	13.00	12.96	13.00	12.99	12.96	12.98	
	s_6	12.92	12.96	12.92	12.91	12.90	12.92	
	s_7	12.78	12.82	12.73	12.73	12.80	12.77	
	s_8	12.56	12.56	12.54	12.55	12.58	12.56	
	s_9	12.20	12.18	12.24	12.25	12.22	12.22	
8	s_1	14.02	14.01	14.01	14.03	13.93	14.00	23.78
	s_2	14.24	14.26	14.24	14.23	14.21	14.24	
	s_3	14.34	14.37	14.37	14.37	14.40	14.37	
	s_4	14.45	14.47	14.45	14.47	14.46	14.46	
	s_5	14.41	14.49	14.45	14.46	14.45	14.45	

ตารางที่ ง.3 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,9p}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,9p}}$
		1	2	3	4	5		
8	s_6	14.37	14.38	14.34	14.40	14.40	14.38	23.78
	s_7	14.28	14.25	14.28	14.27	14.29	14.27	
	s_8	14.07	14.14	14.14	14.12	14.12	14.12	
	s_9	13.89	13.85	13.86	13.85	13.87	13.86	
9	s_1	15.39	15.42	15.39	15.41	15.39	15.40	25.25
	s_2	15.68	15.70	15.68	15.71	15.69	15.69	
	s_3	15.89	15.87	15.90	15.89	15.90	15.89	
	s_4	15.92	15.99	16.00	16.01	15.95	15.97	
	s_5	15.96	15.92	15.95	15.97	15.97	15.95	
	s_6	15.91	15.92	15.91	15.91	15.92	15.91	
	s_7	15.72	15.74	15.72	15.69	15.75	15.72	
	s_8	15.51	15.51	15.58	15.55	15.53	15.54	
	s_9	15.27	15.28	15.28	15.28	15.26	15.27	
10	s_1	16.98	17.00	17.00	17.02	17.02	17.00	26.81
	s_2	17.24	17.19	17.23	17.24	17.22	17.22	
	s_3	17.34	17.34	17.37	17.35	17.37	17.35	
	s_4	17.46	17.47	17.44	17.41	17.45	17.45	
	s_5	17.54	17.49	17.49	17.48	17.48	17.50	
	s_6	17.43	17.44	17.41	17.40	17.39	17.41	
	s_7	17.33	17.30	17.32	17.31	17.31	17.31	
	s_8	17.17	17.16	17.14	17.18	17.18	17.17	
	s_9	16.98	16.98	17.01	16.98	16.99	16.99	

ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,area}}$

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,area}}$
		1	2	3	4	5		
1	s_0	3.07	3.08	3.11	3.05	3.04	3.07	12.94
	s_1	3.26	3.23	3.24	3.24	3.24	3.24	
	s_2	3.46	3.49	3.48	3.51	3.51	3.49	
	s_3	3.62	3.63	3.62	3.62	3.64	3.63	
	s_4	3.65	3.62	3.65	3.64	3.66	3.64	
	s_5	3.65	3.65	3.64	3.64	3.65	3.65	

ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,area}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,area}}$
		1	2	3	4	5		
1	s_6	3.55	3.55	3.58	3.56	3.54	3.56	12.94
	s_7	3.46	3.45	3.45	3.45	3.44	3.45	
	s_8	3.22	3.25	3.27	3.22	3.24	3.24	
	s_9	2.91	2.93	2.91	2.91	2.95	2.92	
	s_{10}	2.69	2.69	2.69	2.69	2.70	2.69	
2	s_0	4.57	4.51	4.54	4.55	4.56	4.55	14.33
	s_1	4.70	4.66	4.69	4.68	4.68	4.68	
	s_2	4.87	4.90	4.88	4.88	4.87	4.88	
	s_3	4.97	4.96	4.95	4.95	4.94	4.95	
	s_4	5.00	4.98	4.99	4.98	5.00	4.99	
	s_5	4.99	5.02	5.03	5.02	4.99	5.01	
	s_6	4.97	4.93	4.91	4.92	4.92	4.93	
	s_7	4.81	4.81	4.80	4.81	4.80	4.81	
	s_8	4.65	4.64	4.62	4.64	4.65	4.64	
	s_9	4.36	4.36	4.38	4.38	4.37	4.37	
	s_{10}	4.17	4.17	4.17	4.13	4.24	4.18	
3	s_0	5.99	6.11	6.12	6.25	6.17	6.13	16.01
	s_1	6.21	6.24	6.26	6.24	6.26	6.24	
	s_2	6.55	6.55	6.57	6.58	6.59	6.57	
	s_3	6.69	6.69	6.68	6.70	6.71	6.69	
	s_4	6.74	6.76	6.75	6.74	6.73	6.74	
	s_5	6.70	6.70	6.73	6.72	6.71	6.71	
	s_6	6.57	6.61	6.61	6.65	6.68	6.62	
	s_7	6.50	6.50	6.53	6.53	6.54	6.52	
	s_8	6.28	6.30	6.30	6.31	6.32	6.30	
	s_9	5.97	5.95	5.96	5.96	5.98	5.96	
	s_{10}	5.80	5.83	5.83	5.75	5.79	5.80	
4	s_0	7.66	7.65	7.65	7.71	7.65	7.66	17.46
	s_1	7.79	7.80	7.78	7.78	7.79	7.79	
	s_2	7.99	8.00	8.01	8.00	8.01	8.00	
	s_3	8.09	8.08	8.11	8.10	8.12	8.10	
	s_4	8.15	8.13	8.12	8.14	8.12	8.13	
	s_5	8.15	8.15	8.12	8.14	8.14	8.14	
	s_6	8.08	8.06	8.08	8.05	8.05	8.06	

ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,area}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,area}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
4	s_7	7.95	7.95	7.96	7.95	7.96	7.95	17.46
	s_8	7.80	7.76	7.78	7.76	7.77	7.77	
	s_9	7.50	7.49	7.52	7.51	7.53	7.51	
	s_{10}	7.40	7.41	7.41	7.43	7.43	7.42	
5	s_0	9.09	9.07	9.14	9.10	9.06	9.09	19.03
	s_1	9.29	9.26	9.26	9.26	9.26	9.27	
	s_2	9.56	9.56	9.55	9.56	9.56	9.56	
	s_3	9.70	9.70	9.76	9.76	9.76	9.74	
	s_4	9.73	9.74	9.79	9.77	9.79	9.76	
	s_5	9.79	9.79	9.79	9.78	9.78	9.79	
	s_6	9.65	9.65	9.67	9.65	9.65	9.65	
	s_7	9.58	9.56	9.55	9.55	9.56	9.56	
	s_8	9.36	9.30	9.34	9.31	9.31	9.32	
	s_9	8.96	8.88	8.95	8.94	8.96	8.94	
	s_{10}	8.85	8.84	8.86	8.85	8.81	8.84	
6	s_0	10.78	10.76	10.84	10.76	10.76	10.78	20.64
	s_1	10.92	10.93	10.92	10.90	10.90	10.91	
	s_2	11.11	11.16	11.12	11.14	11.15	11.14	
	s_3	11.27	11.27	11.26	11.27	11.27	11.27	
	s_4	11.30	11.30	11.30	11.31	11.30	11.30	
	s_5	11.35	11.37	11.32	11.29	11.30	11.33	
	s_6	11.26	11.25	11.24	11.27	11.27	11.26	
	s_7	11.14	11.11	11.12	11.16	11.14	11.13	
	s_8	10.99	10.97	10.98	10.98	10.97	10.98	
	s_9	10.77	10.79	10.71	10.73	10.71	10.74	
	s_{10}	10.70	10.64	10.62	10.58	10.69	10.65	
7	s_0	12.24	12.28	12.33	12.30	12.27	12.28	22.23
	s_1	12.39	12.41	12.42	12.39	12.40	12.40	
	s_2	12.75	12.72	12.73	12.75	12.74	12.74	
	s_3	12.87	12.90	12.87	12.86	12.85	12.87	
	s_4	12.90	12.94	12.97	12.96	13.01	12.96	
	s_5	13.00	12.96	13.00	12.99	12.96	12.98	
	s_6	12.92	12.96	12.92	12.91	12.90	12.92	
	s_7	12.78	12.82	12.73	12.73	12.80	12.77	

ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,area}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,area}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
7	s_8	12.56	12.56	12.54	12.55	12.58	12.56	22.23
	s_9	12.20	12.18	12.24	12.25	12.22	12.22	
	s_{10}	11.89	11.94	11.96	11.91	12.00	11.94	
8	s_0	13.93	13.85	13.95	13.91	13.89	13.91	23.76
	s_1	14.02	14.01	14.01	14.03	13.93	14.00	
	s_2	14.24	14.26	14.24	14.23	14.21	14.24	
	s_3	14.34	14.37	14.37	14.37	14.40	14.37	
	s_4	14.45	14.47	14.45	14.47	14.46	14.46	
	s_5	14.41	14.49	14.45	14.46	14.45	14.45	
	s_6	14.37	14.38	14.34	14.40	14.40	14.38	
	s_7	14.28	14.25	14.28	14.27	14.29	14.27	
	s_8	14.07	14.14	14.14	14.12	14.12	14.12	
	s_9	13.89	13.85	13.86	13.85	13.87	13.86	
9	s_0	15.27	15.21	15.35	15.33	15.28	15.29	25.23
	s_1	15.39	15.42	15.39	15.41	15.39	15.40	
	s_2	15.68	15.70	15.68	15.71	15.69	15.69	
	s_3	15.89	15.87	15.90	15.89	15.90	15.89	
	s_4	15.92	15.99	16.00	16.01	15.95	15.97	
	s_5	15.96	15.92	15.95	15.97	15.97	15.95	
	s_6	15.91	15.92	15.91	15.91	15.92	15.91	
	s_7	15.72	15.74	15.72	15.69	15.75	15.72	
	s_8	15.51	15.51	15.58	15.55	15.53	15.54	
	s_9	15.27	15.28	15.28	15.28	15.26	15.27	
10	s_{10}	15.08	15.20	14.91	14.95	15.20	15.07	26.79
	s_0	16.91	16.97	17.01	16.93	16.92	16.95	
	s_1	16.98	17.00	17.00	17.02	17.02	17.00	
	s_2	17.24	17.19	17.23	17.24	17.22	17.22	
	s_3	17.34	17.34	17.37	17.35	17.37	17.35	
	s_4	17.46	17.47	17.44	17.41	17.45	17.45	
	s_5	17.54	17.49	17.49	17.48	17.48	17.50	
	s_6	17.43	17.44	17.41	17.40	17.39	17.41	
s_7	17.33	17.30	17.32	17.31	17.31	17.31		

ตารางที่ ง.4 การวัดระยะ d และ s ตำแหน่งต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ A5 เพื่อคำนวณ $\overline{a_{s,area}}$ (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	d	รอบที่วัด					ค่าเฉลี่ย	$\overline{a_{s,area}}$
		1	2	3	4	5		
		9.551	9.517	9.517	9.517	9.517	9.523	
10	s_8	17.17	17.16	17.14	17.18	17.18	17.17	26.79
	s_9	16.98	16.98	17.01	16.98	16.99	16.99	
	s_{10}	16.87	16.80	16.95	16.85	16.88	16.87	

ง.2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของความกว้างชั้นทดสอบ

ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ W หาได้จากวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.7.1 ตาราง ง.5 แสดงข้อมูล \bar{W} , $U_{W,A}$, $U_{W,B}$ และ U_W จากข้อมูลในตารางพบว่า U_W ของทุกชั้นทดสอบมีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีค่าประมาณ 60 μm นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่แน่นอน Type B ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนมากกว่า Type A ค่อนข้างมาก (ประมาณ 2.5 เท่า) ดังนั้นหาก U_W เป็นปริมาณที่ทำให้เกิด U_a อย่างมีนัยยะสำคัญ $U_{W,B}$ จะเป็นความไม่แน่นอนที่ควรพิจารณาเพื่อหาวิธีลดค่า

ตารางที่ ง.5 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ W จากแต่ละชั้นทดสอบ

ชั้นทดสอบ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
\bar{W} (mm)	50.05	50.07	49.92	50.17	50.14	50.04	49.99	50.00	50.05	50.05
$U_{W,A}$ (μm)	19.5	26.0	22.2	20.4	22.2	21.0	14.2	24.2	20.8	31.0
$U_{W,B}$ (μm)	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
U_W (μm)	58.5	61.0	59.5	58.8	59.5	59.1	57.0	60.3	59.0	63.3

ง.3 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น

ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ a_{s0} หาได้จากวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.7.2 ตาราง ง.6 – ง.9 แสดงข้อมูล $\overline{a_{s0}}$, $U_{a_{s0,A}}$, $U_{a_{s0,B}}$ และ $U_{a_{s0}}$ นิยามต่าง ๆ ของแต่ละชั้นทดสอบ จากข้อมูลในตาราง $U_{a_{s0}}$ จากทุกนิยาม และทุกชั้นทดสอบมีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 57 μm $U_{a_{s0,B}}$ ผลส่งผลให้เกิด $U_{a_{s0}}$ ค่อนข้างมาก (ประมาณ 2 เท่า) ดังนั้นหาก $U_{a_{s0}}$ เป็นปริมาณที่ทำให้เกิด U_a อย่างมีนัยยะสำคัญ $U_{a_{s0,B}}$ จะเป็นความไม่แน่นอนที่ควรพิจารณาเพื่อหาวิธีลดค่า

ตารางที่ ง.6 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,2p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ

ลำดับ ขอบหน้า	ชั้นทดสอบ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	$\bar{a}_{s0,2p}$ (mm)	13.06	12.80	13.12	12.59	12.40	12.04	12.76	12.81	12.65	12.35
	$U_{a_{s0,2p-A}}$ (μm)	21.9	29.3	26.0	20.8	26.4	23.7	20.0	26.5	25.2	24.6
	$U_{a_{s0,2p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,2p}}$ (μm)	56.4	59.7	58.1	56.0	58.3	57.1	55.7	58.4	57.8	57.5
2	$\bar{a}_{s0,2p}$ (mm)	15.60	14.35	14.64	13.87	13.87	13.83	14.07	14.05	14.41	13.98
	$U_{a_{s0,2p-A}}$ (μm)	21.9	24.6	24.7	23.2	27.5	24.1	21.1	24.5	24.8	25.2
	$U_{a_{s0,2p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,2p}}$ (μm)	56.4	57.5	57.6	56.9	58.8	57.3	56.1	57.5	57.6	57.8

ตารางที่ ง.7 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,3p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ

ลำดับ ขอบหน้า	ชั้นทดสอบ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	$\bar{a}_{s0,3p}$ (mm)	13.67	13.43	13.68	13.15	13.09	12.69	13.31	13.31	13.27	12.95
	$U_{a_{s0,3p-A}}$ (μm)	20.7	25.2	25.6	19.7	20.4	24.2	19.9	23.9	24.7	24.9
	$U_{a_{s0,3p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,3p}}$ (μm)	55.9	57.8	58.0	55.6	55.9	57.3	55.7	57.2	57.6	57.7
2	$\bar{a}_{s0,3p}$ (mm)	16.06	14.86	15.14	14.39	14.45	14.40	14.56	14.57	15.00	14.55
	$U_{a_{s0,3p-A}}$ (μm)	20.6	24.4	24.9	20.7	24.3	23.7	19.9	23.4	24.2	24.5
	$U_{a_{s0,3p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,3p}}$ (μm)	55.9	57.4	57.7	56.0	57.4	57.1	55.7	57.0	57.4	57.5

ตารางที่ ง.8 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{s0,9p}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ

ลำดับ ขอบหน้า	ชั้นทดสอบ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	$\bar{a}_{s0,9p}$ (mm)	13.56	13.30	13.68	13.03	12.95	12.58	13.25	13.25	13.16	12.89
	$U_{a_{s0,9p-A}}$ (μm)	19.8	24.1	24.3	19.9	20.6	23.5	19.8	23.5	24.3	24.4
	$U_{a_{s0,9p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,9p}}$ (μm)	55.6	57.3	57.4	55.7	55.9	57.0	55.6	57.0	57.4	57.4
2	$\bar{a}_{s0,9p}$ (mm)	15.95	14.76	15.13	14.31	14.33	14.28	14.48	14.52	14.89	14.47
	$U_{a_{s0,9p-A}}$ (μm)	19.8	24.2	24.3	19.8	20.5	23.4	19.9	23.4	24.2	24.1
	$U_{a_{s0,9p-B}}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{s0,9p}}$ (μm)	55.7	57.3	57.4	55.6	55.9	57.0	55.7	57.0	57.3	57.3

ตารางที่ ง.9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $a_{so,area}$ จากแต่ละชั้นทดสอบ

ลำดับ ขอบหน้า	ชั้นทดสอบ	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	$\bar{a}_{so,area}$ (mm)	13.56	13.30	13.61	13.03	12.94	12.59	13.21	13.20	13.17	12.85
	$U_{a_{so,area},A}$ (μm)	19.8	24.1	24.2	19.8	20.4	23.4	19.8	23.4	24.3	24.3
	$U_{a_{so,area},B}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{so,area}}$ (μm)	55.6	57.3	57.4	55.6	55.9	57.0	55.6	57.0	57.4	57.4
2	$\bar{a}_{so,area}$ (mm)	15.95	14.77	15.07	14.27	14.33	14.28	14.45	14.48	14.89	14.43
	$U_{a_{so,area},A}$ (μm)	19.8	24.1	24.2	19.8	20.4	23.4	19.8	23.4	24.2	24.1
	$U_{a_{so,area},B}$ (μm)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
	$U_{a_{so,area}}$ (μm)	55.6	57.3	57.4	55.6	55.9	57.0	55.6	57.0	57.3	57.3

ง.4 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของคอมพลายแอนซ์

ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C หาได้จากวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 3.7.3 ข้อมูลของ C_0 และ C จากสภาวะทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ U_α แบ่งเป็น 2 หมวด 1) การทดสอบ และ 2) การวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแสดงอยู่ในหัวข้อ ง.4.1 – ง.4.2 ตามลำดับ แต่ละตารางในหัวข้อนี้จะนำเสนอค่าเฉลี่ย, ความไม่แน่นอน Type A และความไม่แน่นอน Type B ของ C_{BFS} และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ โดยหน่วยของค่าต่าง ๆ ในตารางสำหรับวิธี C_{BFS} และ C_{CMOD} คือ $\times 10^{-9}$ 1/N และ $\times 10^{-9}$ m/N ตามลำดับ ยกเว้น $U_{C/C_0,B}$ ที่ไม่มีหน่วย

ง.4.1 หมวดการทดสอบ

ข้อมูลของชั้นทดสอบ A1 – A10 แสดงดังตาราง ง.10 – ง.19

ตารางที่ ง.10 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1	5	10	20	1	5	10	20				
0.1	1	\bar{C}_0	28.50	28.49	28.47	28.44	28.53	28.72	8.60	8.60	8.61	8.61	8.64	8.63
		$U_{C_0,A}$	2.17E-2	3.30E-2	6.27E-2	8.06E-2	5.76E-2	1.57E-1	2.70E-3	4.37E-3	3.47E-3	4.13E-3	4.73E-3	2.58E-2
	3	\bar{C}	40.14	40.10	40.10	40.09	40.11	40.07	10.95	10.94	10.94	10.95	10.98	11.01
		$U_{C,A}$	3.00E-2	4.08E-2	4.13E-2	7.26E-2	6.12E-2	1.84E-1	1.17E-3	2.70E-3	1.74E-3	2.39E-3	5.10E-3	2.94E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.00E-5	9.70E-6	6.95E-6	7.75E-6	9.65E-6	3.86E-5	5.13E-4	3.53E-4	3.30E-4	4.31E-4	5.09E-4	7.44E-4
	5	\bar{C}	52.36	52.31	52.28	52.20	52.31	52.65	13.29	13.29	13.29	13.30	13.33	13.42
		$U_{C,A}$	3.92E-2	3.78E-2	4.82E-2	1.05E-1	7.98E-2	1.56E-1	3.41E-3	2.37E-3	9.83E-4	2.47E-3	3.13E-3	1.16E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.91E-5	1.78E-5	1.78E-5	1.82E-5	2.03E-5	8.70E-5	7.92E-4	6.45E-4	6.23E-4	7.11E-4	7.63E-4	9.52E-4
	7	\bar{C}	70.93	70.85	70.75	70.65	70.65	71.21	16.78	16.77	16.76	16.76	16.80	16.94
		$U_{C,A}$	4.04E-2	4.15E-2	6.85E-2	1.76E-1	1.54E-1	4.86E-2	4.38E-3	2.65E-3	1.58E-3	2.84E-3	6.96E-3	5.57E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.76E-5	4.54E-5	4.48E-5	4.62E-5	4.86E-5	1.81E-4	1.27E-3	1.05E-3	1.12E-3	1.16E-3	1.27E-3	1.42E-3

ตารางที่ ง.10 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับ
วิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	9	\bar{C}	97.83	97.66	97.49	97.39	97.48	98.19	21.74	21.72	21.69	21.70	21.73	21.94
		$U_{C,A}$	7.62E-2	6.89E-2	6.16E-2	7.54E-2	7.21E-2	1.37E-1	4.69E-3	4.30E-3	3.05E-3	1.86E-3	9.89E-3	7.42E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.16E-4	1.12E-4	1.08E-4	1.14E-4	1.23E-4	3.42E-4	1.96E-3	1.76E-3	1.82E-3	1.83E-3	1.88E-3	2.04E-3
	11	\bar{C}	135.57	135.29	135.09	134.84	134.85	-	28.65	28.61	28.57	28.55	28.60	-
		$U_{C,A}$	6.57E-2	8.87E-2	5.61E-2	8.04E-2	6.61E-2	-	4.99E-3	4.43E-3	3.93E-3	7.40E-3	4.65E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	2.65E-4	2.78E-4	2.73E-4	2.41E-4	2.56E-4	-	2.87E-3	2.77E-3	2.72E-3	2.69E-3	2.80E-3	-
	13	\bar{C}	193.69	193.32	193.04	192.45	192.15	-	39.31	39.24	39.18	39.12	39.16	-
		$U_{C,A}$	3.15E-2	2.93E-2	3.56E-2	1.29E-1	2.47E-1	-	2.67E-3	4.16E-3	5.73E-3	6.86E-3	1.79E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	5.96E-4	5.86E-4	5.68E-4	6.20E-4	5.80E-4	-	4.33E-3	4.31E-3	4.28E-3	4.13E-3	4.25E-3	-
0.5	2	\bar{C}_0	36.34	36.29	36.28	36.23	36.34	36.53	10.24	10.24	10.24	10.25	10.28	10.35
		$U_{C_0,A}$	3.63E-2	7.47E-2	9.30E-2	1.42E-1	6.97E-2	1.37E-1	5.13E-3	3.45E-3	9.38E-3	8.92E-3	9.16E-3	2.13E-2
	4	\bar{C}	44.52	44.58	44.47	44.51	44.53	44.78	11.86	11.85	11.85	11.87	11.90	11.97
		$U_{C,A}$	5.12E-2	3.95E-2	1.43E-1	5.82E-2	1.53E-1	1.44E-1	2.27E-3	4.83E-3	7.82E-3	4.54E-3	4.76E-3	2.14E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.03E-5	1.68E-5	5.10E-6	8.87E-6	1.93E-5	2.92E-5	6.39E-4	3.17E-4	2.43E-4	4.44E-4	6.22E-4	9.09E-4
	6	\bar{C}	59.83	59.77	59.70	59.69	59.86	60.28	14.77	14.76	14.76	14.78	14.82	14.94
		$U_{C,A}$	5.78E-2	8.28E-2	1.78E-1	1.04E-1	1.71E-1	1.51E-1	4.24E-3	7.06E-3	3.85E-3	4.74E-3	4.18E-3	9.73E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.12E-5	2.53E-5	1.60E-5	5.57E-5	3.94E-5	7.15E-5	8.12E-4	5.16E-4	4.80E-4	6.63E-4	7.96E-4	1.13E-3
	8	\bar{C}	83.33	83.17	83.17	83.25	83.23	83.96	19.13	19.12	19.11	19.14	19.18	19.37
		$U_{C,A}$	8.81E-2	1.84E-1	1.50E-1	1.48E-1	2.98E-1	2.48E-1	8.37E-3	6.90E-3	6.57E-3	4.28E-3	1.00E-2	1.07E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.58E-5	5.05E-5	5.14E-5	4.83E-5	5.78E-5	1.59E-4	1.12E-3	9.10E-4	8.76E-4	1.01E-3	1.17E-3	1.47E-3
	10	\bar{C}	116.79	116.77	116.72	116.58	116.74	117.75	25.27	25.26	25.26	25.28	25.36	25.64
		$U_{C,A}$	8.49E-2	7.98E-2	5.15E-2	1.10E-1	1.82E-1	2.36E-1	4.28E-3	1.11E-2	6.26E-3	9.57E-3	1.10E-2	8.36E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.35E-4	1.30E-4	1.38E-4	1.55E-4	1.51E-4	2.57E-4	1.81E-3	1.51E-3	1.45E-3	1.57E-3	1.78E-3	2.15E-3
	12	\bar{C}	167.43	167.12	167.09	166.85	166.81	-	34.47	34.44	34.41	34.42	34.47	-
		$U_{C,A}$	6.59E-2	1.21E-1	5.24E-2	1.57E-1	3.48E-1	-	5.86E-3	1.01E-2	3.80E-3	1.25E-2	2.31E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	3.46E-4	2.92E-4	3.43E-4	3.35E-4	3.34E-4	-	2.68E-3	2.35E-3	2.33E-3	2.43E-3	2.66E-3	-

ตารางที่ ง.11 ชั้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	1	\bar{C}_0	28.10	28.09	28.10	28.12	28.07	28.45	8.56	8.56	8.57	8.58	8.58	8.71
		$U_{C_0,A}$	4.11E-2	4.82E-2	3.68E-2	5.03E-2	1.12E-1	1.42E-1	4.93E-3	3.99E-3	2.08E-3	3.08E-3	8.53E-3	7.31E-3
	3	\bar{C}	37.91	37.83	37.90	37.86	37.92	38.23	10.55	10.55	10.54	10.55	10.58	10.74
		$U_{C,A}$	3.74E-2	6.63E-2	3.32E-2	9.23E-2	8.45E-2	1.29E-1	1.83E-3	4.46E-3	3.69E-3	4.31E-3	3.81E-3	3.74E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.61E-5	9.60E-6	6.01E-6	1.89E-5	1.68E-5	2.38E-5	4.87E-4	3.17E-4	2.85E-4	3.88E-4	5.03E-4	7.03E-4
	5	\bar{C}	52.21	52.14	52.12	52.10	52.15	52.47	13.32	13.31	13.31	13.32	13.33	13.52
		$U_{C,A}$	3.61E-2	9.39E-2	4.33E-2	1.02E-1	6.27E-2	1.54E-1	3.80E-3	3.05E-3	2.22E-3	3.12E-3	6.22E-3	4.34E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.36E-5	2.14E-5	1.86E-5	2.49E-5	3.50E-5	8.54E-5	8.17E-4	6.63E-4	6.37E-4	7.28E-4	7.90E-4	9.91E-4
	7	\bar{C}	73.37	73.31	73.24	73.09	73.18	73.66	17.26	17.24	17.23	17.24	17.25	17.44
		$U_{C,A}$	4.01E-2	3.58E-2	4.37E-2	1.19E-1	5.22E-2	6.74E-2	4.31E-3	3.67E-3	1.82E-3	4.02E-3	1.07E-2	9.64E-3
		$U_{C/C_0,B}$	6.16E-5	5.37E-5	5.18E-5	5.55E-5	5.90E-5	1.65E-4	1.28E-3	1.17E-3	1.19E-3	1.20E-3	1.29E-3	1.42E-3
	9	\bar{C}	102.55	102.37	102.29	102.06	102.00	102.84	22.57	22.54	22.52	22.51	22.54	22.74
		$U_{C,A}$	4.12E-2	8.34E-2	3.05E-2	1.15E-1	2.39E-1	8.89E-2	2.54E-3	3.46E-3	2.23E-3	6.55E-3	6.97E-3	1.80E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.43E-4	1.28E-4	1.22E-4	1.43E-4	1.30E-4	3.07E-4	1.96E-3	1.90E-3	1.92E-3	1.85E-3	1.99E-3	2.13E-3
	11	\bar{C}	144.22	144.00	143.70	143.41	143.33	-	30.14	30.09	30.04	30.01	30.03	-
		$U_{C,A}$	6.24E-2	3.42E-2	2.38E-2	7.02E-2	1.26E-1	-	5.50E-3	1.90E-3	4.66E-3	3.73E-3	1.04E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	3.02E-4	3.06E-4	3.12E-4	3.07E-4	3.05E-4	-	3.08E-3	2.98E-3	2.90E-3	3.05E-3	3.04E-3	-
	13	\bar{C}	199.19	198.74	198.46	197.98	197.81	-	40.25	40.19	40.12	40.06	40.08	-
$U_{C,A}$		5.12E-2	1.01E-1	7.87E-2	4.52E-2	2.96E-1	-	6.81E-3	3.00E-3	2.80E-3	6.11E-3	1.52E-2	-	
$U_{C/C_0,B}$		6.95E-4	6.57E-4	6.56E-4	5.92E-4	6.49E-4	-	4.51E-3	4.42E-3	4.15E-3	4.25E-3	4.48E-3	-	
0.5	2	\bar{C}_0	32.64	32.57	32.62	32.64	32.62	32.75	9.51	9.52	9.52	9.52	9.55	9.66
		$U_{C_0,A}$	1.31E-1	1.04E-1	9.32E-2	6.11E-2	3.94E-2	2.07E-1	5.87E-3	2.52E-3	2.95E-3	5.95E-3	6.00E-3	5.20E-3
	4	\bar{C}	43.90	43.96	43.86	43.81	43.97	44.20	11.75	11.75	11.75	11.76	11.79	11.90
		$U_{C,A}$	9.82E-2	6.05E-2	1.25E-1	2.29E-1	1.98E-1	1.52E-1	6.49E-3	5.58E-3	1.92E-3	3.38E-3	5.36E-3	4.90E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.66E-5	9.67E-6	9.38E-6	1.19E-5	2.71E-5	2.67E-5	7.03E-4	3.81E-4	3.20E-4	5.45E-4	7.14E-4	9.93E-4
	6	\bar{C}	62.48	62.42	62.36	62.44	62.52	62.94	15.26	15.26	15.26	15.27	15.31	15.45
		$U_{C,A}$	7.61E-2	1.03E-1	1.48E-1	1.81E-1	6.97E-2	1.33E-1	4.34E-3	2.67E-3	2.87E-3	5.81E-3	5.86E-3	2.89E-3
		$U_{C/C_0,B}$	3.23E-5	4.20E-5	2.43E-5	3.30E-5	3.13E-5	9.53E-5	1.06E-3	6.99E-4	6.42E-4	8.10E-4	9.85E-4	1.31E-3
	8	\bar{C}	83.73	83.69	83.67	83.62	83.84	84.41	19.14	19.14	19.14	19.16	19.21	19.40
		$U_{C,A}$	4.56E-2	9.43E-2	6.56E-2	9.58E-2	9.19E-2	6.97E-2	7.00E-3	4.49E-3	5.28E-3	3.88E-3	7.45E-3	7.17E-3
		$U_{C/C_0,B}$	6.58E-5	5.93E-5	6.46E-5	7.23E-5	7.77E-5	1.34E-4	1.39E-3	1.10E-3	1.07E-3	1.21E-3	1.37E-3	1.67E-3
	10	\bar{C}	115.21	115.17	115.04	115.03	115.21	116.22	24.86	24.85	24.84	24.86	24.92	25.22
		$U_{C,A}$	1.18E-1	6.99E-2	1.03E-1	1.48E-1	8.52E-2	1.49E-1	3.64E-3	3.85E-3	3.53E-3	5.99E-3	1.21E-2	1.72E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.62E-4	1.42E-4	1.50E-4	1.65E-4	1.72E-4	2.57E-4	2.05E-3	1.74E-3	1.74E-3	1.87E-3	2.11E-3	2.40E-3
	12	\bar{C}	153.89	153.75	153.74	153.65	153.81	-	31.97	31.95	31.93	31.95	32.02	-
		$U_{C,A}$	9.07E-2	2.28E-1	6.08E-2	7.30E-2	1.08E-1	-	4.38E-3	4.55E-3	5.76E-3	5.23E-3	7.97E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	3.28E-4	2.88E-4	2.80E-4	2.75E-4	3.12E-4	-	2.87E-3	2.58E-3	2.42E-3	2.67E-3	2.94E-3	-

ตารางที่ 12 ชั้นทดสอบ A3 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{CMOD}						
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.3	1	\bar{C}_0	28.87	28.85	28.83	28.85	28.87	28.89	8.78	8.79	8.79	8.80	8.82	8.84
		$U_{C_0,A}$	3.37E-2	5.86E-2	1.05E-1	5.71E-2	1.17E-1	2.55E-1	2.76E-3	1.84E-3	2.01E-3	7.87E-3	9.49E-3	1.34E-2
	3	\bar{C}	39.38	39.36	39.31	39.33	39.38	39.51	10.89	10.89	10.88	10.90	10.92	10.97
		$U_{C,A}$	4.91E-2	3.00E-2	8.22E-2	3.60E-2	6.60E-2	2.15E-1	3.61E-3	2.73E-3	3.28E-3	3.20E-3	8.73E-3	2.49E-2
		$U_{C/C_0,B}$	3.05E-5	1.43E-5	9.36E-6	1.75E-5	2.91E-5	4.13E-5	5.92E-4	3.56E-4	3.17E-4	4.54E-4	5.72E-4	8.10E-4
	5	\bar{C}	52.90	52.86	52.78	52.83	52.81	53.03	13.49	13.48	13.48	13.49	13.53	13.60
		$U_{C,A}$	1.83E-2	4.08E-2	8.02E-2	8.44E-2	1.55E-1	1.60E-1	2.67E-3	3.21E-3	4.96E-3	4.90E-3	3.06E-3	2.51E-2
		$U_{C/C_0,B}$	4.95E-5	2.39E-5	1.94E-5	3.23E-5	3.18E-5	5.60E-5	8.58E-4	6.38E-4	6.32E-4	7.08E-4	8.56E-4	1.08E-3
	7	\bar{C}	73.60	73.47	73.49	73.43	73.41	74.02	17.36	17.35	17.34	17.36	17.40	17.51
		$U_{C,A}$	3.89E-2	6.66E-2	5.82E-2	7.41E-2	1.06E-1	1.00E-1	3.64E-3	2.86E-3	3.26E-3	6.63E-3	8.64E-3	1.50E-2
		$U_{C/C_0,B}$	7.33E-5	5.57E-5	4.58E-5	5.61E-5	6.57E-5	7.30E-5	1.32E-3	1.11E-3	1.08E-3	1.19E-3	1.33E-3	1.51E-3
	9	\bar{C}	99.83	99.64	99.52	99.49	99.57	100.25	22.17	22.15	22.13	22.14	22.18	22.38
		$U_{C,A}$	3.79E-2	7.74E-2	1.17E-1	6.82E-2	1.10E-1	7.41E-2	4.34E-3	3.49E-3	3.09E-3	6.69E-3	5.61E-3	9.02E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.39E-4	1.26E-4	1.12E-4	1.23E-4	1.31E-4	2.32E-4	2.08E-3	1.67E-3	1.73E-3	1.81E-3	1.93E-3	2.27E-3
	11	\bar{C}	141.46	141.09	140.88	140.48	140.45	-	29.75	29.70	29.65	29.63	29.66	-
		$U_{C,A}$	5.85E-2	4.89E-2	3.97E-2	1.71E-1	3.10E-1	-	6.73E-3	3.44E-3	4.28E-3	6.97E-3	1.40E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	3.23E-4	3.06E-4	3.05E-4	2.72E-4	2.70E-4	-	2.98E-3	2.68E-3	2.75E-3	2.80E-3	2.89E-3	-
	13	\bar{C}	200.62	200.20	199.92	199.48	199.37	-	40.61	40.54	40.47	40.43	40.47	-
$U_{C,A}$		7.65E-2	1.33E-1	4.18E-2	9.39E-2	1.72E-1	-	8.11E-3	4.26E-3	5.56E-3	5.50E-3	1.53E-2	-	
$U_{C/C_0,B}$		6.73E-4	6.04E-4	6.16E-4	6.76E-4	5.95E-4	-	4.56E-3	4.26E-3	4.05E-3	4.12E-3	4.48E-3	-	
0.7	2	\bar{C}_0	33.37	33.15	33.18	33.11	33.34	33.40	9.69	9.69	9.70	9.70	9.72	9.82
		$U_{C_0,A}$	1.06E-1	1.99E-1	3.03E-1	2.93E-1	1.21E-1	2.09E-1	9.38E-3	1.11E-2	6.44E-3	1.17E-2	7.13E-3	9.26E-3
	4	\bar{C}	44.86	44.74	44.86	44.73	44.67	45.09	11.96	11.96	11.97	11.97	12.00	12.09
		$U_{C,A}$	1.31E-1	1.93E-1	1.54E-1	2.90E-1	4.59E-1	3.18E-1	7.77E-3	9.03E-3	4.60E-3	1.35E-2	1.59E-2	2.58E-2
		$U_{C/C_0,B}$	3.20E-5	2.23E-5	1.19E-5	3.21E-5	6.52E-5	5.95E-5	1.12E-3	5.57E-4	4.14E-4	7.98E-4	1.13E-3	1.54E-3
	6	\bar{C}	61.15	61.10	61.13	60.81	61.13	61.12	15.07	15.08	15.08	15.09	15.13	15.23
		$U_{C,A}$	1.18E-1	9.92E-2	1.24E-1	4.14E-1	2.60E-1	7.22E-1	1.60E-2	8.09E-3	4.68E-3	9.62E-3	1.09E-2	3.90E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.57E-5	3.67E-5	2.85E-5	1.11E-4	1.17E-4	6.79E-5	1.41E-3	7.89E-4	7.01E-4	1.06E-3	1.47E-3	1.87E-3
	8	\bar{C}	85.05	85.10	84.95	84.98	85.00	85.47	19.52	19.51	19.52	19.54	19.58	19.76
		$U_{C,A}$	1.56E-1	1.25E-1	2.31E-1	2.39E-1	2.41E-1	5.50E-1	4.79E-3	1.60E-2	1.00E-2	1.02E-2	1.26E-2	2.98E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.46E-4	7.54E-5	6.91E-5	1.86E-4	8.66E-5	1.20E-4	1.88E-3	1.24E-3	1.16E-3	1.54E-3	1.89E-3	2.49E-3
	10	\bar{C}	114.11	114.07	114.06	114.05	114.21	115.20	24.78	24.79	24.80	24.83	24.89	25.16
		$U_{C,A}$	9.25E-2	1.21E-1	8.09E-2	2.19E-1	1.88E-1	3.69E-1	1.53E-2	8.76E-3	3.96E-3	8.30E-3	1.22E-2	1.24E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.04E-4	1.43E-4	1.47E-4	2.51E-4	2.25E-4	2.83E-4	2.53E-3	1.78E-3	1.67E-3	2.05E-3	2.39E-3	3.21E-3
	12	\bar{C}	160.32	160.32	160.07	160.26	160.24	-	33.30	33.29	33.28	33.33	33.42	-
		$U_{C,A}$	1.69E-1	1.43E-1	2.42E-1	1.52E-1	5.73E-1	-	3.55E-3	5.31E-3	1.08E-2	6.41E-3	2.83E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	3.28E-4	3.29E-4	3.35E-4	5.08E-4	3.49E-4	-	3.53E-3	2.78E-3	2.67E-3	3.10E-3	3.57E-3	-

ตารางที่ 13 ชั้นทดสอบ A4 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.3	1	\bar{C}_0	27.58	27.54	27.60	27.58	27.49	27.68	8.49	8.50	8.50	8.51	8.54	8.58
		$U_{C_0,A}$	1.90E-2	6.98E-2	3.86E-2	7.36E-2	1.17E-1	1.24E-1	8.15E-3	2.68E-3	5.20E-3	2.72E-3	3.44E-3	1.21E-2
	3	\bar{C}	36.94	36.94	36.92	36.87	36.82	37.06	10.39	10.39	10.39	10.40	10.41	10.50
		$U_{C,A}$	2.80E-2	4.28E-2	9.37E-2	6.36E-2	1.38E-1	1.03E-1	1.70E-3	1.49E-3	1.76E-3	3.31E-3	5.69E-3	3.90E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.29E-5	1.22E-5	5.42E-6	2.44E-5	9.65E-6	1.90E-5	5.74E-4	3.50E-4	2.99E-4	4.47E-4	5.82E-4	8.30E-4
	5	\bar{C}	50.53	50.49	50.48	50.46	50.45	50.74	13.01	13.01	13.01	13.02	13.04	13.14
		$U_{C,A}$	7.57E-2	8.70E-2	5.30E-2	7.05E-2	1.09E-1	1.77E-1	2.22E-3	3.07E-3	1.69E-3	4.60E-3	6.82E-3	4.43E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.32E-5	2.09E-5	2.04E-5	4.43E-5	3.34E-5	3.12E-5	8.25E-4	6.75E-4	6.39E-4	7.69E-4	8.72E-4	1.09E-3
	7	\bar{C}	69.14	69.16	69.02	69.00	69.11	69.55	16.49	16.48	16.48	16.50	16.52	16.66
		$U_{C,A}$	5.76E-2	4.10E-2	9.35E-2	9.83E-2	8.55E-2	9.47E-2	5.84E-3	5.77E-3	6.08E-3	6.13E-3	4.78E-3	5.04E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.95E-5	4.57E-5	4.47E-5	6.79E-5	5.20E-5	9.14E-5	1.33E-3	1.10E-3	1.12E-3	1.27E-3	1.31E-3	1.51E-3
	9	\bar{C}	97.42	97.37	97.18	97.19	97.18	98.02	21.69	21.67	21.65	21.67	21.70	21.90
$U_{C,A}$		1.07E-1	6.70E-2	1.20E-1	1.25E-1	2.10E-1	1.45E-1	4.48E-3	3.22E-3	3.49E-3	3.32E-3	7.68E-3	1.46E-2	
$U_{C/C_0,B}$		1.28E-4	1.18E-4	1.23E-4	1.53E-4	1.41E-4	1.83E-4	2.02E-3	1.87E-3	1.83E-3	1.85E-3	2.00E-3	2.24E-3	
11	\bar{C}	137.63	137.30	137.11	136.81	136.66	-	28.97	28.93	28.89	28.87	28.89	-	
	$U_{C,A}$	8.61E-2	1.03E-1	6.83E-2	1.62E-1	2.60E-1	-	6.27E-3	7.41E-3	4.72E-3	5.77E-3	1.81E-2	-	
	$U_{C/C_0,B}$	2.72E-4	2.85E-4	2.82E-4	3.05E-4	2.95E-4	-	2.98E-3	2.90E-3	2.81E-3	2.87E-3	3.07E-3	-	
13	\bar{C}	194.94	194.53	194.30	193.89	194.02	-	39.43	39.38	39.32	39.31	39.35	-	
	$U_{C,A}$	8.71E-2	9.12E-2	1.11E-1	8.22E-2	1.97E-1	-	6.89E-3	3.73E-3	5.74E-3	3.10E-3	1.13E-2	-	
	$U_{C/C_0,B}$	6.54E-4	6.65E-4	5.70E-4	6.33E-4	6.32E-4	-	4.66E-3	4.23E-3	4.58E-3	4.30E-3	4.39E-3	-	
0.7	2	\bar{C}_0	31.03	31.18	30.96	31.08	30.90	31.29	9.22	9.23	9.22	9.23	9.25	9.31
		$U_{C_0,A}$	1.81E-1	1.17E-1	1.99E-1	1.85E-1	3.83E-1	1.90E-1	8.47E-3	3.85E-3	8.32E-3	1.48E-2	1.39E-2	1.39E-2
	4	\bar{C}	42.22	42.24	42.15	42.17	42.16	42.39	11.42	11.41	11.41	11.43	11.46	11.55
		$U_{C,A}$	9.34E-2	1.23E-1	1.66E-1	1.52E-1	2.39E-1	2.35E-1	1.16E-2	1.30E-2	6.45E-3	1.38E-2	1.57E-2	3.66E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.94E-5	2.68E-5	3.79E-5	3.49E-5	1.27E-4	9.73E-5	1.15E-3	5.57E-4	4.31E-4	8.69E-4	1.17E-3	1.66E-3
	6	\bar{C}	57.88	57.94	57.85	57.86	57.66	58.40	14.42	14.42	14.41	14.44	14.47	14.60
		$U_{C,A}$	1.55E-1	1.16E-1	1.65E-1	2.06E-1	6.57E-1	1.82E-1	7.06E-3	7.16E-3	8.65E-3	1.09E-2	8.91E-3	9.53E-3
		$U_{C/C_0,B}$	9.63E-5	2.34E-5	6.58E-5	4.81E-5	1.79E-4	7.29E-5	1.47E-3	8.70E-4	7.21E-4	1.15E-3	1.46E-3	2.02E-3
	8	\bar{C}	80.02	79.98	79.91	79.86	79.90	80.81	18.52	18.51	18.52	18.54	18.57	18.78
		$U_{C,A}$	1.20E-1	1.11E-1	1.66E-1	2.41E-1	2.10E-1	1.43E-1	9.96E-3	5.56E-3	6.33E-3	1.54E-2	2.03E-2	1.42E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.53E-5	9.23E-5	6.98E-5	6.65E-5	2.39E-4	2.08E-4	1.89E-3	1.32E-3	1.16E-3	1.50E-3	2.00E-3	2.67E-3
	10	\bar{C}	111.98	112.04	111.91	111.90	112.04	113.42	24.34	24.33	24.33	24.37	24.41	24.73
$U_{C,A}$		1.44E-1	1.28E-1	1.23E-1	1.95E-1	3.71E-1	1.95E-1	8.73E-3	8.94E-3	1.29E-2	9.48E-3	2.13E-2	2.46E-2	
$U_{C/C_0,B}$		2.03E-4	1.59E-4	1.71E-4	1.72E-4	3.62E-4	4.12E-4	2.63E-3	1.94E-3	1.85E-3	2.28E-3	2.69E-3	3.68E-3	
12	\bar{C}	161.52	161.62	161.65	161.46	162.05	-	33.37	33.35	33.35	33.40	33.48	-	
	$U_{C,A}$	1.24E-1	2.48E-1	2.07E-1	4.38E-1	1.72E-1	-	6.11E-3	2.77E-2	9.17E-3	1.13E-2	2.22E-2	-	
	$U_{C/C_0,B}$	3.61E-4	3.56E-4	3.61E-4	4.00E-4	3.99E-4	-	3.99E-3	3.14E-3	2.92E-3	3.49E-3	3.73E-3	-	

ตารางที่ ง.14 ชั้นทดสอบ A5 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	1	\bar{C}_0	27.58	27.54	27.60	27.58	27.49	27.68	8.49	8.50	8.50	8.51	8.54	8.58
		$U_{C_0,A}$	1.90E-2	6.98E-2	3.86E-2	7.36E-2	1.17E-1	1.24E-1	8.15E-3	2.68E-3	5.20E-3	2.72E-3	3.44E-3	1.21E-2
	3	\bar{C}	36.84	36.79	36.75	36.66	36.68	36.71	10.32	10.31	10.30	10.29	10.30	10.39
		$U_{C,A}$	5.36E-2	3.77E-2	4.12E-2	3.76E-2	7.63E-2	2.16E-1	2.09E-3	1.84E-3	1.18E-3	4.18E-3	7.11E-3	7.51E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.11E-5	5.95E-6	6.77E-6	6.88E-6	7.86E-6	1.13E-5	4.12E-4	3.21E-4	2.98E-4	3.66E-4	4.09E-4	5.31E-4
	5	\bar{C}	50.31	50.24	50.18	50.11	50.09	50.38	12.93	12.92	12.91	12.91	12.92	13.00
		$U_{C,A}$	2.46E-2	3.73E-2	3.44E-2	3.04E-2	6.56E-2	1.04E-1	1.84E-3	1.53E-3	1.66E-3	7.38E-4	4.90E-3	1.09E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.36E-5	1.79E-5	1.72E-5	1.70E-5	2.59E-5	4.10E-5	7.37E-4	6.82E-4	6.41E-4	6.62E-4	7.17E-4	8.35E-4
	7	\bar{C}	70.36	70.28	70.22	70.12	70.10	70.53	16.71	16.69	16.68	16.68	16.69	16.81
		$U_{C,A}$	3.54E-2	4.49E-2	1.74E-2	3.07E-2	7.88E-2	4.18E-2	1.63E-3	2.67E-3	2.01E-3	1.52E-3	5.93E-3	2.53E-3
		$U_{C/C_0,B}$	4.97E-5	5.08E-5	5.35E-5	5.30E-5	5.76E-5	1.15E-4	1.24E-3	1.25E-3	1.16E-3	1.20E-3	1.21E-3	1.35E-3
	9	\bar{C}	97.32	97.18	96.98	96.77	96.71	-	21.67	21.64	21.61	21.59	21.59	-
		$U_{C,A}$	3.52E-2	3.09E-2	4.56E-2	4.69E-2	1.60E-1	-	2.69E-3	2.63E-3	3.08E-3	5.75E-3	6.22E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.21E-4	1.23E-4	1.13E-4	1.21E-4	1.38E-4	-	1.93E-3	1.95E-3	1.86E-3	1.90E-3	1.98E-3	-
	0.5	2	\bar{C}_0	30.98	30.94	30.95	30.89	30.95	31.03	9.18	9.17	9.17	9.18	9.20
$U_{C_0,A}$			2.69E-2	5.00E-2	5.28E-2	1.62E-1	1.06E-1	1.82E-1	5.34E-3	3.18E-3	5.73E-3	3.57E-3	5.14E-3	4.78E-3
4		\bar{C}	42.68	42.70	42.65	42.65	42.68	42.88	11.50	11.50	11.49	11.51	11.53	11.61
		$U_{C,A}$	7.06E-2	8.73E-2	6.24E-2	1.08E-1	1.00E-1	1.12E-1	2.46E-3	2.47E-3	6.07E-3	4.78E-3	5.69E-3	6.92E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.65E-5	2.00E-5	6.73E-6	9.18E-6	1.37E-5	2.97E-5	5.59E-4	3.46E-4	3.19E-4	4.58E-4	5.71E-4	7.60E-4
6		\bar{C}	59.33	59.28	59.25	59.17	59.28	59.64	14.66	14.65	14.65	14.67	14.69	14.81
		$U_{C,A}$	5.03E-2	3.86E-2	8.45E-2	1.01E-1	7.69E-2	8.38E-2	2.41E-3	6.56E-3	7.19E-3	4.39E-3	4.24E-3	3.53E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.53E-5	2.17E-5	2.14E-5	2.32E-5	2.79E-5	7.00E-5	8.22E-4	7.06E-4	6.43E-4	7.54E-4	8.22E-4	1.05E-3
8		\bar{C}	82.21	82.05	82.07	82.06	81.95	82.74	18.91	18.90	18.89	18.90	18.93	19.10
		$U_{C,A}$	5.20E-2	1.56E-1	7.90E-2	4.66E-2	1.87E-1	6.17E-2	4.83E-3	3.28E-3	3.55E-3	7.88E-3	4.76E-3	6.24E-3
		$U_{C/C_0,B}$	6.54E-5	6.68E-5	6.11E-5	6.55E-5	6.99E-5	1.76E-4	1.35E-3	1.18E-3	1.17E-3	1.21E-3	1.32E-3	1.46E-3
10		\bar{C}	114.16	113.98	113.76	113.62	113.77	-	24.69	24.66	24.63	24.62	24.65	-
		$U_{C,A}$	9.65E-2	7.90E-2	1.14E-1	8.16E-2	6.64E-2	-	5.21E-3	2.56E-3	5.41E-3	8.52E-3	1.13E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.68E-4	1.50E-4	1.48E-4	1.58E-4	1.63E-4	-	2.01E-3	1.87E-3	1.81E-3	1.88E-3	2.25E-3	-

ตารางที่ ง.15 ชั้นทดสอบ A6 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	1	\bar{C}_0	26.02	26.02	26.05	26.04	26.05	26.24	8.17	8.17	8.18	8.19	8.20	8.22
		$U_{C_0,A}$	2.31E-2	2.59E-2	2.78E-2	4.15E-2	7.15E-2	8.52E-2	2.23E-3	2.56E-3	2.09E-3	2.34E-3	5.37E-3	2.16E-2
	3	\bar{C}	36.21	36.18	36.12	36.08	36.18	36.27	10.26	10.25	10.25	10.25	10.26	10.29
		$U_{C,A}$	5.27E-2	6.83E-2	5.28E-2	7.19E-2	1.50E-2	1.39E-1	3.11E-3	4.06E-3	1.42E-3	1.38E-3	4.81E-3	1.04E-2
		$U_{C/C_0,B}$	9.35E-6	7.26E-6	6.78E-6	6.93E-6	8.95E-6	4.78E-5	4.34E-4	3.46E-4	3.14E-4	3.92E-4	4.27E-4	5.67E-4
	5	\bar{C}	50.47	50.40	50.33	50.26	50.24	50.44	13.01	13.01	12.99	13.00	13.00	13.08
		$U_{C,A}$	2.33E-2	2.83E-2	3.59E-2	5.77E-2	5.66E-2	8.98E-2	4.53E-3	2.60E-3	1.94E-3	2.36E-3	4.31E-3	8.88E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.36E-5	2.02E-5	1.93E-5	1.92E-5	3.37E-5	7.00E-5	8.13E-4	7.27E-4	7.29E-4	7.35E-4	8.22E-4	9.06E-4
	7	\bar{C}	67.35	67.24	67.19	67.09	67.14	67.52	16.19	16.18	16.17	16.17	16.19	16.29
		$U_{C,A}$	4.92E-2	4.35E-2	2.92E-2	4.47E-2	3.01E-2	3.99E-2	1.23E-3	4.07E-3	3.02E-3	3.11E-3	2.84E-3	1.52E-3
		$U_{C/C_0,B}$	4.97E-5	4.49E-5	4.56E-5	4.80E-5	4.62E-5	1.81E-4	1.27E-3	1.21E-3	1.17E-3	1.23E-3	6.24E-2	1.31E-3
	9	\bar{C}	95.52	95.34	95.23	94.93	94.92	-	21.38	21.35	21.33	21.31	21.33	-
		$U_{C,A}$	2.32E-2	4.60E-2	2.77E-2	5.85E-2	5.32E-2	-	3.14E-3	3.21E-3	2.93E-3	2.69E-3	3.68E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.32E-4	1.27E-4	1.16E-4	1.13E-4	1.32E-4	-	2.06E-3	1.89E-3	1.91E-3	1.96E-3	2.02E-3	-
	0.5	2	\bar{C}_0	30.62	30.63	30.58	30.61	30.62	30.84	9.12	9.12	9.12	9.13	9.15
$U_{C_0,A}$			1.24E-1	5.58E-2	9.23E-2	1.04E-1	1.27E-1	8.21E-2	6.54E-3	2.35E-3	7.63E-3	5.00E-3	4.14E-3	1.88E-3
4		\bar{C}	41.64	41.62	41.58	41.58	41.51	41.80	11.32	11.31	11.31	11.32	11.34	11.42
		$U_{C,A}$	5.71E-2	5.63E-2	1.23E-1	9.83E-2	1.02E-1	1.30E-1	1.59E-3	4.11E-3	4.02E-3	8.31E-3	3.04E-3	3.84E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.96E-5	1.05E-5	1.26E-5	3.38E-5	2.30E-5	1.83E-5	5.45E-4	3.35E-4	2.99E-4	4.17E-4	5.38E-4	7.66E-4
6		\bar{C}	58.26	58.28	58.22	58.15	58.25	58.66	14.51	14.50	14.50	14.51	14.53	14.65
		$U_{C,A}$	5.61E-2	4.67E-2	7.61E-2	1.44E-1	1.13E-1	1.51E-1	2.06E-3	4.51E-3	4.01E-3	7.92E-3	3.91E-3	4.11E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.44E-5	2.26E-5	2.15E-5	6.16E-5	3.43E-5	5.14E-5	8.33E-4	6.69E-4	6.56E-4	7.48E-4	8.64E-4	1.04E-3
8		\bar{C}	79.42	79.37	79.32	79.25	79.23	79.93	18.43	18.42	18.41	18.43	18.47	18.63
		$U_{C,A}$	3.77E-2	7.86E-2	9.47E-2	1.01E-1	1.51E-1	1.67E-1	5.83E-3	4.32E-3	6.27E-3	3.93E-3	3.88E-3	5.09E-3
		$U_{C/C_0,B}$	7.05E-5	5.71E-5	5.85E-5	7.37E-5	6.42E-5	9.90E-5	1.33E-3	1.12E-3	1.13E-3	1.22E-3	1.28E-3	1.50E-3
10		\bar{C}	108.72	108.48	108.35	108.22	108.25	-	23.76	23.73	23.72	23.70	23.75	-
		$U_{C,A}$	6.20E-2	1.06E-1	1.28E-1	1.64E-1	1.43E-1	-	2.86E-3	6.59E-3	3.56E-3	8.83E-3	3.66E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.39E-4	1.35E-4	1.45E-4	1.48E-4	1.40E-4	-	1.89E-3	1.73E-3	1.74E-3	1.83E-3	1.99E-3	-

ตารางที่ ง.16 ชั้นทดสอบ A7 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.3	1	\bar{C}_0	27.28	27.29	27.32	27.30	27.35	27.46	8.38	8.38	8.39	8.40	8.41	8.48
		$U_{C_0,A}$	3.40E-2	4.26E-2	4.42E-2	4.57E-2	2.54E-2	7.80E-2	4.85E-3	1.69E-3	1.35E-3	2.12E-3	3.76E-3	4.94E-3
	3	\bar{C}	37.68	37.60	37.64	37.55	37.57	37.83	10.52	10.52	10.51	10.52	10.55	10.62
		$U_{C,A}$	2.56E-2	3.76E-2	1.87E-2	6.58E-2	8.75E-2	6.09E-2	2.99E-3	2.44E-3	2.09E-3	4.44E-3	2.92E-3	4.19E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.66E-5	6.47E-6	8.23E-6	7.52E-6	2.53E-5	1.24E-5	4.87E-4	3.59E-4	3.24E-4	3.93E-4	4.71E-4	6.26E-4
	5	\bar{C}	49.24	49.25	49.20	49.10	49.13	49.43	12.77	12.76	12.75	12.76	12.79	12.88
		$U_{C,A}$	6.17E-2	2.75E-2	1.15E-2	5.52E-2	1.23E-1	4.80E-2	3.84E-3	4.37E-3	3.16E-3	5.03E-3	3.25E-3	2.97E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.73E-5	1.73E-5	1.58E-5	1.59E-5	1.78E-5	2.37E-5	7.21E-4	6.35E-4	6.14E-4	6.98E-4	7.57E-4	8.43E-4
	7	\bar{C}	67.64	67.55	67.46	67.35	67.32	67.72	16.22	16.20	16.19	16.19	16.22	16.34
		$U_{C,A}$	2.13E-2	2.27E-2	3.03E-2	4.45E-2	7.40E-2	6.33E-2	4.54E-3	4.20E-3	1.93E-3	6.90E-3	5.16E-3	3.34E-3
		$U_{C/C_0,B}$	4.34E-5	4.07E-5	4.10E-5	4.29E-5	6.71E-5	6.94E-5	1.22E-3	1.13E-3	1.07E-3	1.16E-3	1.17E-3	1.30E-3
	9	\bar{C}	92.51	92.43	92.28	92.09	92.04	-	20.79	20.77	20.75	20.75	20.77	-
		$U_{C,A}$	5.41E-2	3.00E-2	3.61E-2	8.66E-2	1.17E-1	-	7.34E-3	3.23E-3	5.15E-3	4.41E-3	7.00E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.06E-4	1.06E-4	1.09E-4	1.04E-4	1.34E-4	-	1.86E-3	1.79E-3	1.69E-3	1.78E-3	1.83E-3	-
	0.7	2	\bar{C}_0	30.91	30.97	30.72	30.90	30.89	31.13	9.18	9.19	9.18	9.19	9.22
$U_{C_0,A}$			1.17E-1	7.55E-2	1.80E-1	6.41E-2	1.58E-1	1.42E-1	1.04E-2	5.39E-3	6.87E-3	9.71E-3	7.39E-3	9.22E-3
4		\bar{C}	41.90	41.87	41.82	41.79	42.00	42.25	11.38	11.39	11.39	11.41	11.43	11.54
		$U_{C,A}$	1.59E-1	1.68E-1	2.81E-1	2.64E-1	8.51E-2	8.64E-2	1.18E-2	6.66E-3	6.25E-3	5.24E-3	7.81E-3	9.76E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.70E-5	4.36E-5	8.90E-6	5.36E-5	1.85E-5	2.51E-5	8.60E-4	4.46E-4	3.59E-4	6.26E-4	8.63E-4	1.22E-3
6		\bar{C}	57.13	57.06	57.04	57.04	57.07	57.66	14.29	14.28	14.28	14.30	14.34	14.47
		$U_{C,A}$	6.28E-2	1.17E-1	1.31E-1	1.03E-1	9.80E-2	1.04E-1	9.61E-3	7.61E-3	8.53E-3	7.72E-3	3.11E-3	7.16E-3
		$U_{C/C_0,B}$	6.70E-5	5.33E-5	2.50E-5	1.54E-4	1.43E-4	4.54E-5	1.09E-3	7.49E-4	6.44E-4	8.79E-4	1.14E-3	1.50E-3
8		\bar{C}	79.17	79.16	78.95	78.90	79.17	79.85	18.38	18.38	18.37	18.40	18.44	18.63
		$U_{C,A}$	7.28E-2	7.60E-2	1.76E-1	3.32E-1	1.83E-1	6.93E-2	3.59E-3	4.29E-3	3.04E-3	7.75E-3	7.21E-3	7.12E-3
		$U_{C/C_0,B}$	7.22E-5	1.12E-4	5.58E-5	8.57E-5	2.70E-4	3.11E-4	1.54E-3	1.15E-3	1.11E-3	1.34E-3	1.55E-3	1.95E-3
10		\bar{C}	109.81	109.85	109.77	109.65	109.91	-	23.87	23.86	23.85	23.88	23.93	-
		$U_{C,A}$	1.51E-1	1.20E-1	1.15E-1	2.50E-1	1.50E-1	-	4.52E-3	1.01E-2	6.85E-3	1.15E-2	1.88E-2	-
		$U_{C/C_0,B}$	2.50E-4	1.80E-4	1.35E-4	1.73E-4	3.12E-4	-	2.32E-3	1.86E-3	1.81E-3	2.03E-3	2.39E-3	-

ตารางที่ ง.17 ชั้นทดสอบ A8 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.3	1	\bar{C}_0	27.41	27.38	27.36	27.46	27.43	27.60	8.43	8.44	8.45	8.45	8.47	8.53
		$U_{C_0,A}$	4.01E-2	7.80E-2	1.11E-1	4.07E-2	6.06E-2	7.76E-2	6.26E-3	3.51E-3	4.83E-3	3.87E-3	2.12E-3	3.27E-3
	3	\bar{C}	36.93	36.91	36.84	36.85	36.90	37.05	10.35	10.35	10.34	10.35	10.36	10.43
		$U_{C,A}$	2.39E-2	4.46E-2	9.63E-2	5.39E-2	4.37E-2	6.10E-2	2.74E-3	3.92E-3	4.17E-3	2.16E-3	4.08E-3	2.28E-3
		$U_{C/C_0,B}$	9.27E-6	6.17E-6	6.36E-6	8.34E-6	1.94E-5	1.16E-5	4.68E-4	3.09E-4	3.01E-4	3.69E-4	4.66E-4	5.99E-4
	5	\bar{C}	51.15	51.05	51.04	50.88	50.96	51.28	13.08	13.07	13.07	13.07	13.09	13.18
		$U_{C,A}$	3.14E-2	6.03E-2	3.25E-2	1.46E-1	7.29E-2	6.58E-2	2.49E-3	1.78E-3	1.84E-3	4.93E-3	4.21E-3	1.83E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.97E-5	1.77E-5	1.84E-5	1.78E-5	2.67E-5	6.16E-5	7.69E-4	6.49E-4	6.54E-4	7.29E-4	7.53E-4	9.31E-4
	7	\bar{C}	69.63	69.51	69.40	69.28	69.33	69.63	16.52	16.49	16.48	16.48	16.49	16.61
		$U_{C,A}$	3.34E-2	2.79E-2	9.48E-2	5.51E-2	6.41E-2	1.16E-1	1.91E-3	3.39E-3	2.44E-3	2.92E-3	5.38E-3	4.91E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.04E-5	4.71E-5	4.73E-5	4.62E-5	5.69E-5	9.57E-5	1.20E-3	1.12E-3	1.09E-3	1.17E-3	1.24E-3	1.31E-3
	9	\bar{C}	93.99	93.85	93.66	93.59	93.54	-	20.98	20.96	20.93	20.92	20.94	-
		$U_{C,A}$	5.77E-2	3.94E-2	9.66E-2	4.24E-2	8.33E-2	-	3.63E-3	1.87E-3	2.66E-3	4.17E-3	3.34E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.09E-4	1.14E-4	1.07E-4	1.08E-4	1.24E-4	-	1.84E-3	1.77E-3	1.77E-3	1.84E-3	1.83E-3	-
	0.7	2	\bar{C}_0	31.04	30.92	30.83	31.09	31.09	31.12	9.17	9.17	9.17	9.18	9.20
$U_{C_0,A}$			1.09E-1	1.67E-1	2.98E-1	7.52E-2	8.26E-2	1.33E-1	5.57E-3	6.22E-3	3.84E-3	3.70E-3	5.56E-3	4.42E-3
4		\bar{C}	43.18	43.11	43.08	42.98	43.10	43.52	11.56	11.56	11.55	11.57	11.59	11.68
		$U_{C,A}$	6.45E-2	9.93E-2	9.59E-2	3.20E-1	1.39E-1	8.01E-2	4.47E-3	2.28E-3	5.02E-3	4.93E-3	5.75E-3	5.31E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.51E-5	2.43E-5	1.40E-5	4.31E-5	4.56E-5	4.58E-5	8.53E-4	4.64E-4	3.77E-4	6.25E-4	8.78E-4	1.17E-3
6		\bar{C}	58.17	58.09	58.06	58.15	58.09	58.55	14.37	14.37	14.37	14.39	14.41	14.54
		$U_{C,A}$	6.03E-2	8.40E-2	6.93E-2	7.84E-2	1.49E-1	1.46E-1	3.40E-3	3.64E-3	4.04E-3	4.25E-3	7.66E-3	1.07E-2
		$U_{C/C_0,B}$	3.00E-5	2.21E-5	3.59E-5	2.73E-5	3.38E-5	8.41E-5	1.17E-3	7.29E-4	6.76E-4	9.00E-4	1.13E-3	1.53E-3
8		\bar{C}	78.87	79.02	78.89	78.62	79.08	79.72	18.25	18.25	18.25	18.27	18.31	18.49
		$U_{C,A}$	2.23E-1	8.33E-2	1.66E-1	3.51E-1	1.61E-1	1.61E-1	5.60E-3	2.59E-3	7.49E-3	6.10E-3	5.53E-3	1.41E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.77E-5	5.49E-5	5.96E-5	1.91E-4	7.83E-5	2.93E-4	1.55E-3	1.15E-3	1.14E-3	1.35E-3	1.54E-3	1.92E-3
10		\bar{C}	108.49	108.45	108.40	108.37	108.57	-	23.68	23.68	23.67	23.70	23.76	-
		$U_{C,A}$	1.02E-1	8.18E-2	1.41E-1	1.60E-1	3.29E-1	-	1.08E-2	1.08E-2	1.19E-2	9.56E-3	5.27E-3	-
		$U_{C/C_0,B}$	1.86E-4	1.60E-4	1.50E-4	1.95E-4	1.46E-4	-	2.17E-3	1.82E-3	1.76E-3	1.99E-3	2.23E-3	-

ตารางที่ ง.18 ชั้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}					
			1			2	5	1			2	5	
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.1	1	\bar{C}_0	27.41	27.38	27.36	27.46	27.43	8.41	8.41	8.41	8.41	8.42	
		$U_{C_0,A}$	4.01E-2	7.80E-2	1.11E-1	4.07E-2	6.06E-2	2.22E-3	2.37E-3	1.41E-3	2.88E-3	4.60E-3	
	3	\bar{C}	36.93	36.91	36.84	36.85	36.90	10.34	10.34	10.33	10.33	10.35	
		$U_{C,A}$	2.39E-2	4.46E-2	9.63E-2	5.39E-2	4.37E-2	2.61E-3	2.79E-3	3.82E-3	3.26E-3	3.54E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	9.27E-6	6.17E-6	6.36E-6	8.34E-6	1.94E-5	5.70E-4	3.52E-4	3.30E-4	3.58E-4	4.55E-4	
	5	\bar{C}	51.15	51.05	51.04	50.88	50.96	13.06	13.06	13.05	13.05	13.07	
		$U_{C,A}$	3.14E-2	6.03E-2	3.25E-2	1.46E-1	7.29E-2	1.22E-3	1.34E-3	1.07E-3	1.96E-3	5.45E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	1.97E-5	1.77E-5	1.84E-5	1.78E-5	2.67E-5	8.36E-4	6.98E-4	6.72E-4	6.85E-4	8.08E-4	
	7	\bar{C}	69.63	69.51	69.40	69.28	69.33	16.40	16.39	16.38	16.38	16.39	
		$U_{C,A}$	3.34E-2	2.79E-2	9.48E-2	5.51E-2	6.41E-2	1.97E-3	2.62E-3	2.16E-3	3.39E-3	9.39E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	5.04E-5	4.71E-5	4.73E-5	4.62E-5	5.69E-5	1.30E-3	1.13E-3	1.12E-3	1.16E-3	1.17E-3	
	9	\bar{C}	93.99	93.85	93.66	93.59	93.54	22.34	22.31	22.29	22.27	22.28	
		$U_{C,A}$	5.77E-2	3.94E-2	9.66E-2	4.24E-2	8.33E-2	2.30E-3	1.35E-3	9.73E-4	3.59E-3	7.11E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	1.09E-4	1.14E-4	1.07E-4	1.08E-4	1.24E-4	2.18E-3	1.99E-3	1.92E-3	1.96E-3	1.99E-3	
	11	\bar{C}	134.72	134.50	134.30	134.06	133.97	28.46	28.43	28.39	28.35	28.36	
		$U_{C,A}$	3.76E-2	2.73E-2	2.03E-2	6.14E-2	1.11E-1	2.02E-3	1.81E-3	2.05E-3	3.85E-3	1.52E-2	
		$U_{C/C_0,B}$	2.61E-4	2.80E-4	2.87E-4	2.61E-4	2.77E-4	3.03E-3	2.98E-3	2.86E-3	2.80E-3	2.97E-3	
	13	\bar{C}	189.53	189.25	189.00	188.71	188.61	38.48	38.44	38.39	38.35	38.36	
		$U_{C,A}$	2.38E-2	1.82E-2	2.95E-2	4.10E-2	1.12E-1	2.23E-3	2.37E-3	1.94E-3	3.84E-3	1.32E-2	
		$U_{C/C_0,B}$	5.91E-4	5.70E-4	6.09E-4	5.08E-4	6.54E-4	4.53E-3	4.52E-3	4.39E-3	4.27E-3	4.46E-3	
	0.5	2	\bar{C}_0	32.72	32.74	32.71	32.71	32.71	9.56	9.56	9.56	9.56	9.58
			$U_{C_0,A}$	3.14E-2	3.06E-2	6.15E-2	4.76E-2	8.44E-2	1.36E-3	4.27E-3	1.04E-2	2.89E-3	1.16E-2
		4	\bar{C}	42.92	42.91	42.92	42.92	43.01	11.56	11.55	11.55	11.56	11.58
			$U_{C,A}$	3.91E-2	5.03E-2	3.48E-2	5.52E-2	1.04E-1	3.17E-3	1.60E-3	2.27E-3	3.91E-3	1.07E-2
$U_{C/C_0,B}$			1.32E-5	8.18E-6	6.80E-6	8.32E-6	1.57E-5	8.29E-4	4.24E-4	3.39E-4	4.29E-4	6.13E-4	
6		\bar{C}	58.00	57.98	58.00	57.98	57.95	14.42	14.42	14.42	14.42	14.45	
		$U_{C,A}$	2.53E-2	2.42E-2	4.32E-2	3.80E-2	8.23E-2	3.32E-3	2.66E-3	2.54E-3	4.45E-3	9.55E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	2.82E-5	2.00E-5	1.90E-5	2.23E-5	4.61E-5	1.06E-3	6.63E-4	5.92E-4	6.55E-4	8.39E-4	
8		\bar{C}	79.80	79.78	79.82	79.75	79.70	18.46	18.47	18.46	18.47	18.51	
		$U_{C,A}$	3.23E-2	6.22E-2	7.18E-2	3.12E-2	1.14E-1	2.76E-2	3.40E-3	8.18E-3	4.23E-3	1.50E-2	
		$U_{C/C_0,B}$	5.92E-5	5.12E-5	7.70E-5	5.54E-5	9.19E-5	1.48E-3	1.06E-3	1.03E-3	1.09E-3	1.24E-3	
10		\bar{C}	113.12	113.05	113.03	112.98	113.08	24.54	24.53	24.53	24.53	24.57	
		$U_{C,A}$	4.53E-2	5.91E-2	4.50E-2	4.20E-2	1.18E-1	4.10E-3	2.99E-3	2.57E-3	7.60E-3	9.96E-3	
		$U_{C/C_0,B}$	1.45E-4	1.48E-4	1.51E-4	1.39E-4	1.85E-4	2.20E-3	1.68E-3	1.68E-3	1.73E-3	1.92E-3	
12		\bar{C}	160.54	160.39	160.23	160.18	159.98	33.21	33.18	33.15	33.15	33.21	
		$U_{C,A}$	6.02E-2	6.78E-2	3.34E-2	7.49E-2	1.66E-1	4.66E-3	2.33E-3	3.60E-3	6.79E-3	1.76E-2	
		$U_{C/C_0,B}$	3.41E-4	3.74E-4	3.38E-4	3.49E-4	4.04E-4	3.14E-3	2.78E-3	2.64E-3	2.71E-3	2.86E-3	

ตารางที่ ง.19 ชั้นทดสอบ A10 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ C_0 และ C ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการทดสอบ

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}				
			1			2	5	1			2	5
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10
0.1	1	\bar{C}_0	26.93	26.95	26.99	26.97	26.97	8.33	8.33	8.34	8.34	8.35
		$U_{C_0,A}$	1.79E-2	1.76E-2	1.43E-2	1.60E-2	5.94E-2	2.33E-3	2.28E-3	1.22E-3	2.96E-3	3.62E-3
	3	\bar{C}	37.76	37.74	37.67	37.64	37.61	10.52	10.51	10.50	10.49	10.50
		$U_{C,A}$	1.86E-2	1.96E-2	1.90E-2	2.17E-2	6.74E-2	2.27E-3	2.04E-3	1.57E-3	2.18E-3	4.33E-3
		$U_{C/C_0,B}$	9.94E-6	6.79E-6	6.24E-6	6.83E-6	9.29E-6	4.80E-4	3.60E-4	3.26E-4	3.60E-4	3.88E-4
	5	\bar{C}	50.29	50.24	50.18	50.11	50.05	12.93	12.92	12.91	12.90	12.91
		$U_{C,A}$	1.61E-2	1.42E-2	1.08E-2	2.82E-2	9.88E-2	2.01E-3	1.33E-3	1.21E-3	2.50E-3	8.02E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.93E-5	1.77E-5	1.66E-5	1.91E-5	2.32E-5	7.63E-4	6.76E-4	6.64E-4	6.65E-4	7.11E-4
	7	\bar{C}	69.71	69.63	69.55	69.46	69.45	16.54	16.52	16.51	16.50	16.51
		$U_{C,A}$	7.94E-3	1.70E-2	1.93E-2	2.77E-2	1.01E-1	1.12E-3	1.32E-3	1.92E-3	1.88E-3	8.66E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.31E-5	4.79E-5	5.22E-5	4.76E-5	5.65E-5	1.23E-3	1.21E-3	1.15E-3	1.16E-3	1.23E-3
	9	\bar{C}	95.18	95.06	94.92	94.80	94.71	21.19	21.16	21.14	21.12	21.13
		$U_{C,A}$	1.64E-2	1.88E-2	1.10E-2	3.15E-2	4.43E-2	1.28E-3	1.64E-3	1.53E-3	3.23E-3	1.09E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.22E-4	1.17E-4	1.22E-4	1.18E-4	1.36E-4	1.88E-3	1.74E-3	1.80E-3	1.86E-3	1.86E-3
	0.5	2	\bar{C}_0	31.57	31.58	31.55	31.56	31.61	9.31	9.31	9.31	9.31
$U_{C_0,A}$			3.42E-2	3.93E-2	2.33E-2	2.60E-2	7.77E-2	2.91E-3	5.83E-3	3.12E-3	2.36E-3	9.68E-3
4		\bar{C}	42.91	42.91	42.89	42.88	42.89	11.55	11.55	11.55	11.55	11.57
		$U_{C,A}$	2.39E-2	3.01E-2	2.16E-2	4.72E-2	8.32E-2	3.05E-3	3.21E-3	3.36E-3	6.81E-3	6.37E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.14E-5	7.47E-6	6.91E-6	7.50E-6	2.33E-5	6.15E-4	3.62E-4	3.05E-4	3.73E-4	4.88E-4
6		\bar{C}	57.38	57.36	57.34	57.36	57.35	14.29	14.29	14.28	14.28	14.31
		$U_{C,A}$	2.66E-2	2.99E-2	3.66E-2	1.87E-2	1.34E-1	1.53E-3	3.72E-3	2.20E-3	2.23E-3	1.35E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.36E-5	2.08E-5	2.08E-5	2.03E-5	5.17E-5	8.63E-4	6.39E-4	5.90E-4	6.27E-4	7.22E-4
8		\bar{C}	77.98	77.95	77.91	77.85	77.92	18.06	18.05	18.05	18.05	18.08
		$U_{C,A}$	3.65E-2	2.41E-2	2.42E-2	3.97E-2	8.45E-2	3.37E-3	3.81E-3	3.31E-3	3.65E-3	8.02E-3
		$U_{C/C_0,B}$	5.19E-5	5.19E-5	4.76E-5	5.00E-5	9.36E-5	1.25E-3	1.00E-3	9.90E-4	1.11E-3	1.16E-3
10		\bar{C}	109.33	109.22	109.11	109.00	108.93	23.82	23.80	23.77	23.76	23.79
		$U_{C,A}$	3.00E-2	3.11E-2	3.18E-2	3.04E-2	1.07E-1	2.70E-3	1.81E-3	3.26E-3	3.31E-3	9.42E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.45E-4	1.38E-4	1.29E-4	1.31E-4	2.04E-4	1.91E-3	1.64E-3	1.68E-3	1.70E-3	1.80E-3

ง.4.2 หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของชั้นทดสอบ A1, A2 และ A9 สำหรับ C_{BFS} แสดงดังตาราง ง.20, ง.21 และ ง.22 ตามลำดับ ส่วนข้อมูลของชั้นทดสอบ A1, A2 และ A9 สำหรับ C_{CMOD} แสดงดังตาราง ง.23, ง.24 และ ง.25 ตามลำดับ

ตารางที่ ง.20 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	28.47	28.49	28.48	28.50	28.59	28.61	28.60	28.60	28.64	28.69	28.67	28.67
		$U_{C_0,A}$	3.14E-2	2.88E-2	3.57E-2	3.35E-2	2.47E-1	2.58E-1	2.70E-1	2.77E-1	5.62E-1	5.70E-1	5.81E-1	5.91E-1
	50	\bar{C}	28.49	28.49	28.49	28.49	28.49	28.50	28.50	28.49	28.42	28.43	28.42	28.45
		$U_{C_0,A}$	1.58E-2	1.57E-2	1.60E-2	1.81E-2	8.51E-2	8.56E-2	8.73E-2	9.11E-2	1.93E-1	1.94E-1	1.96E-1	1.99E-1
	100	\bar{C}	28.49	28.49	28.49	28.50	28.46	28.46	28.46	28.47	28.33	28.34	28.34	28.38
		$U_{C_0,A}$	9.65E-3	9.76E-3	9.97E-3	1.13E-2	6.04E-2	6.01E-2	6.14E-2	6.33E-2	1.36E-1	1.36E-1	1.38E-1	1.40E-1
3	10	\bar{C}	40.10	40.10	40.12	40.14	40.11	40.12	40.14	40.15	40.01	40.02	40.06	40.07
		$U_{C,A}$	2.06E-2	1.69E-2	1.89E-2	2.23E-2	2.32E-1	2.33E-1	2.43E-1	2.43E-1	5.27E-1	5.28E-1	5.44E-1	5.43E-1
		$U_{C/C_0,B}$	6.95E-6	1.14E-5	1.53E-5	2.06E-5	7.48E-6	1.42E-5	1.97E-5	2.59E-5	1.04E-5	2.49E-5	3.63E-5	4.83E-5
	50	\bar{C}	40.09	40.09	40.10	40.11	40.12	40.12	40.13	40.15	40.05	40.05	40.06	40.09
		$U_{C,A}$	9.63E-3	1.15E-2	1.23E-2	1.36E-2	9.70E-2	9.85E-2	9.96E-2	1.01E-1	2.17E-1	2.18E-1	2.20E-1	2.22E-1
		$U_{C/C_0,B}$	6.95E-6	1.14E-5	1.53E-5	2.06E-5	7.48E-6	1.42E-5	1.97E-5	2.59E-5	1.04E-5	2.49E-5	3.63E-5	4.83E-5
	100	\bar{C}	40.05	40.06	40.06	40.07	40.03	40.03	40.04	40.05	39.88	39.88	39.89	39.92
		$U_{C,A}$	1.06E-2	1.14E-2	1.21E-2	1.24E-2	8.21E-2	8.27E-2	8.37E-2	8.45E-2	1.84E-1	1.84E-1	1.85E-1	1.87E-1
		$U_{C/C_0,B}$	6.95E-6	1.14E-5	1.53E-5	2.06E-5	7.48E-6	1.42E-5	1.97E-5	2.59E-5	1.04E-5	2.49E-5	3.63E-5	4.83E-5
5	10	\bar{C}	52.28	52.29	52.29	52.31	52.54	52.55	52.54	52.57	52.73	52.76	52.74	52.78
		$U_{C,A}$	2.41E-2	2.28E-2	2.35E-2	2.89E-2	2.72E-1	2.69E-1	2.69E-1	2.79E-1	6.48E-1	6.50E-1	6.53E-1	6.64E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.78E-5	1.96E-5	2.13E-5	2.47E-5	1.79E-5	2.11E-5	2.41E-5	2.94E-5	1.87E-5	2.75E-5	3.46E-5	4.71E-5
	50	\bar{C}	52.29	52.30	52.31	52.32	52.49	52.49	52.50	52.53	52.59	52.61	52.61	52.65
		$U_{C,A}$	7.92E-3	9.01E-3	1.02E-2	1.14E-2	9.72E-2	9.71E-2	9.79E-2	1.03E-1	2.27E-1	2.27E-1	2.28E-1	2.35E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.78E-5	1.96E-5	2.13E-5	2.47E-5	1.79E-5	2.11E-5	2.41E-5	2.94E-5	1.87E-5	2.75E-5	3.46E-5	4.71E-5
	100	\bar{C}	52.28	52.29	52.29	52.31	52.52	52.53	52.53	52.55	52.68	52.70	52.71	52.75
		$U_{C,A}$	6.51E-3	7.12E-3	8.12E-3	9.63E-3	6.82E-2	6.90E-2	6.93E-2	7.21E-2	1.59E-1	1.60E-1	1.61E-1	1.64E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.78E-5	1.96E-5	2.13E-5	2.47E-5	1.79E-5	2.11E-5	2.41E-5	2.94E-5	1.87E-5	2.75E-5	3.46E-5	4.71E-5
7	10	\bar{C}	70.75	70.76	70.78	70.81	71.11	71.14	71.16	71.18	71.36	71.38	71.43	71.50
		$U_{C,A}$	3.43E-2	3.79E-2	3.27E-2	2.38E-2	3.15E-1	3.16E-1	3.20E-1	3.34E-1	7.66E-1	7.73E-1	7.78E-1	7.99E-1
		$U_{C/C_0,B}$	4.48E-5	4.63E-5	4.76E-5	4.99E-5	4.50E-5	4.76E-5	4.96E-5	5.33E-5	4.55E-5	5.17E-5	5.79E-5	6.99E-5
	50	\bar{C}	70.75	70.77	70.77	70.77	70.72	70.73	70.73	70.73	70.45	70.45	70.48	70.48
		$U_{C,A}$	1.25E-2	1.30E-2	1.30E-2	1.40E-2	1.34E-1	1.34E-1	1.35E-1	1.39E-1	3.04E-1	3.05E-1	3.07E-1	3.12E-1
		$U_{C/C_0,B}$	4.48E-5	4.63E-5	4.76E-5	4.99E-5	4.50E-5	4.76E-5	4.96E-5	5.33E-5	4.55E-5	5.17E-5	5.79E-5	6.99E-5
	100	\bar{C}	70.75	70.76	70.76	70.77	70.85	70.86	70.87	70.87	70.76	70.77	70.79	70.80
		$U_{C,A}$	9.19E-3	9.31E-3	9.79E-3	9.97E-3	9.38E-2	9.41E-2	9.53E-2	9.79E-2	2.17E-1	2.18E-1	2.19E-1	2.23E-1
		$U_{C/C_0,B}$	4.48E-5	4.63E-5	4.76E-5	4.99E-5	4.50E-5	4.76E-5	4.96E-5	5.33E-5	4.55E-5	5.17E-5	5.79E-5	6.99E-5

ตารางที่ ง.20 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
9	10	\bar{C}	97.49	97.50	97.51	97.53	97.95	97.97	97.97	98.00	98.22	98.23	98.28	98.32
		$U_{C,A}$	3.08E-2	2.91E-2	2.84E-2	3.66E-2	4.44E-1	4.45E-1	4.50E-1	4.60E-1	1.01E+0	1.02E+0	1.02E+0	1.04E+0
		$U_{C/C_0,B}$	1.08E-4	1.10E-4	1.14E-4	1.20E-4	1.07E-4	1.11E-4	1.17E-4	1.27E-4	1.06E-4	1.25E-4	1.44E-4	1.73E-4
	50	\bar{C}	97.55	97.56	97.57	97.58	97.65	97.65	97.66	97.67	97.44	97.44	97.46	97.50
		$U_{C,A}$	1.29E-2	1.34E-2	1.35E-2	1.59E-2	1.58E-1	1.61E-1	1.63E-1	1.67E-1	3.63E-1	3.66E-1	3.68E-1	3.72E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.08E-4	1.10E-4	1.14E-4	1.20E-4	1.07E-4	1.11E-4	1.17E-4	1.27E-4	1.06E-4	1.25E-4	1.44E-4	1.73E-4
11	10	\bar{C}	135.09	135.12	135.12	135.13	134.93	134.96	134.95	134.95	134.24	134.28	134.28	134.28
		$U_{C,A}$	2.80E-2	2.76E-2	2.59E-2	2.12E-2	4.18E-1	4.20E-1	4.25E-1	4.36E-1	9.62E-1	9.70E-1	9.74E-1	9.75E-1
		$U_{C/C_0,B}$	2.73E-4	2.73E-4	2.73E-4	2.75E-4	2.72E-4	2.72E-4	2.73E-4	2.75E-4	2.71E-4	2.75E-4	2.79E-4	2.91E-4
	50	\bar{C}	135.06	135.07	135.07	135.08	135.16	135.16	135.16	135.17	134.78	134.79	134.79	134.82
		$U_{C,A}$	1.63E-2	1.74E-2	1.79E-2	1.85E-2	2.02E-1	2.04E-1	2.07E-1	2.11E-1	4.60E-1	4.62E-1	4.64E-1	4.67E-1
		$U_{C/C_0,B}$	2.73E-4	2.73E-4	2.73E-4	2.75E-4	2.72E-4	2.72E-4	2.73E-4	2.75E-4	2.71E-4	2.75E-4	2.79E-4	2.91E-4
13	10	\bar{C}	193.04	193.04	193.06	193.09	193.49	193.49	193.50	193.54	193.61	193.60	193.64	193.68
		$U_{C,A}$	1.78E-2	2.52E-2	3.14E-2	3.42E-2	4.73E-1	4.83E-1	4.93E-1	4.95E-1	1.06E+0	1.08E+0	1.10E+0	1.11E+0
		$U_{C/C_0,B}$	5.68E-4	5.69E-4	5.69E-4	5.72E-4	5.65E-4	5.65E-4	5.66E-4	5.71E-4	5.60E-4	5.64E-4	5.68E-4	5.88E-4

ตารางที่ ง.21 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.60	8.60	8.60	8.60
		$U_{C_0,A}$	1.73E-3	1.67E-3	1.73E-3	1.69E-3	1.67E-2	1.69E-2	1.71E-2	1.73E-2	3.96E-2	4.00E-2	4.02E-2	4.08E-2
	50	\bar{C}	8.61	8.61	8.61	8.61	8.60	8.60	8.60	8.60	8.59	8.59	8.59	8.59
		$U_{C_0,A}$	5.35E-4	5.39E-4	5.60E-4	6.22E-4	8.26E-3	8.33E-3	8.41E-3	8.56E-3	1.89E-2	1.90E-2	1.91E-2	1.93E-2
	100	\bar{C}	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61	8.61
		$U_{C_0,A}$	4.09E-4	4.02E-4	4.03E-4	4.26E-4	6.49E-3	6.54E-3	6.60E-3	6.73E-3	1.50E-2	1.51E-2	1.52E-2	1.53E-2
3	10	\bar{C}	10.94	10.94	10.94	10.94	10.93	10.93	10.93	10.93	10.90	10.90	10.90	10.90
		$U_{C,A}$	8.72E-4	9.91E-4	1.17E-3	1.62E-3	2.54E-2	2.57E-2	2.59E-2	2.63E-2	5.81E-2	5.86E-2	5.90E-2	5.96E-2
		$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	5.38E-4	6.80E-4	9.04E-4	3.51E-4	6.61E-4	8.73E-4	1.18E-3	4.26E-4	1.01E-3	1.39E-3	1.94E-3
	50	\bar{C}	10.94	10.94	10.94	10.94	10.95	10.95	10.95	10.95	10.95	10.95	10.95	10.95
		$U_{C,A}$	4.82E-4	5.00E-4	5.38E-4	6.72E-4	1.08E-2	1.09E-2	1.10E-2	1.12E-2	2.49E-2	2.50E-2	2.52E-2	2.55E-2
		$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	5.38E-4	6.80E-4	9.04E-4	3.51E-4	6.61E-4	8.73E-4	1.18E-3	4.26E-4	1.01E-3	1.39E-3	1.94E-3
100	\bar{C}	10.94	10.94	10.94	10.94	10.96	10.96	10.96	10.96	10.97	10.97	10.97	10.97	
	$U_{C,A}$	3.83E-4	3.79E-4	3.90E-4	4.48E-4	7.54E-3	7.60E-3	7.68E-3	7.84E-3	1.74E-2	1.75E-2	1.76E-2	1.79E-2	
	$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	5.38E-4	6.80E-4	9.04E-4	3.51E-4	6.61E-4	8.73E-4	1.18E-3	4.26E-4	1.01E-3	1.39E-3	1.94E-3	
5	10	\bar{C}	13.29	13.29	13.29	13.29	13.28	13.28	13.28	13.28	13.25	13.25	13.25	13.25
		$U_{C,A}$	4.91E-4	5.05E-4	6.00E-4	1.11E-3	3.13E-2	3.15E-2	3.19E-2	3.26E-2	7.20E-2	7.24E-2	7.30E-2	7.38E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.23E-4	7.57E-4	9.06E-4	1.12E-3	6.32E-4	8.74E-4	1.08E-3	1.44E-3	6.90E-4	1.19E-3	1.62E-3	2.24E-3

ตารางที่ ง.21 ชั้นทดสอบ A1 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
5	50	\bar{C}	13.29	13.29	13.29	13.29	13.29	13.29	13.29	13.29	13.27	13.27	13.27	13.27
		$U_{C,A}$	3.86E-4	4.10E-4	4.40E-4	6.09E-4	1.18E-2	1.19E-2	1.20E-2	1.23E-2	2.72E-2	2.74E-2	2.76E-2	2.80E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.23E-4	7.57E-4	9.06E-4	1.12E-3	6.32E-4	8.74E-4	1.08E-3	1.44E-3	6.90E-4	1.19E-3	1.62E-3	2.24E-3
	100	\bar{C}	13.28	13.28	13.28	13.28	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30	13.30
		$U_{C,A}$	4.40E-4	4.23E-4	4.07E-4	4.52E-4	9.22E-3	9.32E-3	9.40E-3	9.61E-3	2.16E-2	2.17E-2	2.18E-2	2.21E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.23E-4	7.57E-4	9.06E-4	1.12E-3	6.32E-4	8.74E-4	1.08E-3	1.44E-3	6.90E-4	1.19E-3	1.62E-3	2.24E-3
7	10	\bar{C}	16.76	16.76	16.76	16.76	16.75	16.75	16.75	16.75	16.70	16.70	16.70	16.70
		$U_{C,A}$	7.88E-4	8.72E-4	8.37E-4	1.26E-3	2.59E-2	2.61E-2	2.63E-2	2.69E-2	5.91E-2	5.94E-2	5.98E-2	6.05E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.25E-3	1.41E-3	1.62E-3	1.13E-3	1.39E-3	1.60E-3	1.96E-3	1.17E-3	1.68E-3	2.14E-3	2.78E-3
	50	\bar{C}	16.75	16.75	16.76	16.76	16.75	16.75	16.75	16.75	16.69	16.69	16.69	16.69
		$U_{C,A}$	5.64E-4	5.80E-4	6.17E-4	7.24E-4	1.30E-2	1.31E-2	1.33E-2	1.36E-2	3.01E-2	3.03E-2	3.05E-2	3.09E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.25E-3	1.41E-3	1.62E-3	1.13E-3	1.39E-3	1.60E-3	1.96E-3	1.17E-3	1.68E-3	2.14E-3	2.78E-3
	100	\bar{C}	16.75	16.75	16.75	16.75	16.76	16.76	16.76	16.76	16.72	16.72	16.72	16.72
		$U_{C,A}$	5.14E-4	5.08E-4	5.15E-4	5.83E-4	1.04E-2	1.05E-2	1.07E-2	1.09E-2	2.43E-2	2.45E-2	2.47E-2	2.50E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.25E-3	1.41E-3	1.62E-3	1.13E-3	1.39E-3	1.60E-3	1.96E-3	1.17E-3	1.68E-3	2.14E-3	2.78E-3
9	10	\bar{C}	21.69	21.69	21.69	21.69	21.70	21.70	21.70	21.70	21.62	21.62	21.62	21.62
		$U_{C,A}$	1.53E-3	1.64E-3	1.61E-3	1.66E-3	4.17E-2	4.18E-2	4.22E-2	4.29E-2	9.59E-2	9.61E-2	9.67E-2	9.79E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.82E-3	1.91E-3	2.02E-3	2.23E-3	1.82E-3	1.99E-3	2.20E-3	2.63E-3	1.85E-3	2.36E-3	2.81E-3	3.58E-3
	50	\bar{C}	21.69	21.69	21.69	21.69	21.72	21.72	21.72	21.72	21.67	21.67	21.67	21.67
		$U_{C,A}$	9.54E-4	8.85E-4	8.35E-4	8.46E-4	1.73E-2	1.75E-2	1.77E-2	1.80E-2	4.03E-2	4.04E-2	4.07E-2	4.12E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.82E-3	1.91E-3	2.02E-3	2.23E-3	1.82E-3	1.99E-3	2.20E-3	2.63E-3	1.85E-3	2.36E-3	2.81E-3	3.58E-3
11	10	\bar{C}	28.57	28.57	28.57	28.57	28.58	28.58	28.58	28.58	28.50	28.50	28.50	28.50
		$U_{C,A}$	1.97E-3	1.88E-3	1.85E-3	2.18E-3	4.77E-2	4.81E-2	4.86E-2	4.96E-2	1.10E-1	1.10E-1	1.11E-1	1.12E-1
		$U_{C/C_0,B}$	2.72E-3	2.85E-3	2.99E-3	3.20E-3	2.73E-3	2.99E-3	3.16E-3	3.50E-3	2.73E-3	3.33E-3	3.89E-3	4.80E-3
	50	\bar{C}	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.57	28.47	28.47	28.47	28.47
		$U_{C,A}$	7.50E-4	7.78E-4	8.58E-4	1.10E-3	2.04E-2	2.06E-2	2.09E-2	2.13E-2	4.66E-2	4.68E-2	4.72E-2	4.77E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.72E-3	2.85E-3	2.99E-3	3.20E-3	2.73E-3	2.99E-3	3.16E-3	3.50E-3	2.73E-3	3.33E-3	3.89E-3	4.80E-3
13	10	\bar{C}	39.18	39.18	39.18	39.18	39.09	39.09	39.09	39.09	38.88	38.88	38.88	38.88
		$U_{C,A}$	2.86E-3	3.53E-3	4.33E-3	6.07E-3	8.23E-2	8.31E-2	8.40E-2	8.59E-2	1.84E-1	1.85E-1	1.87E-1	1.89E-1
		$U_{C/C_0,B}$	4.28E-3	4.43E-3	4.55E-3	4.91E-3	4.25E-3	4.50E-3	4.77E-3	5.40E-3	4.23E-3	4.93E-3	5.69E-3	7.07E-3

ตารางที่ ง.22 ซึ้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ของหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	28.10	28.12	28.13	28.15	28.18	28.19	28.20	28.22	28.20	28.19	28.19	28.21
		$U_{C_0,A}$	1.84E-2	2.57E-2	2.79E-2	3.95E-2	2.15E-1	2.25E-1	2.28E-1	2.38E-1	4.84E-1	4.95E-1	4.90E-1	5.10E-1
		\bar{C}	28.11	28.12	28.12	28.14	28.04	28.05	28.05	28.07	27.86	27.87	27.88	27.90
	50	$U_{C_0,A}$	1.05E-2	1.08E-2	1.27E-2	1.56E-2	8.19E-2	8.35E-2	8.53E-2	8.88E-2	1.82E-1	1.83E-1	1.84E-1	1.89E-1
		\bar{C}	28.12	28.12	28.12	28.14	28.06	28.06	28.06	28.08	27.89	27.90	27.91	27.94
		$U_{C_0,A}$	7.06E-3	7.66E-3	8.60E-3	1.04E-2	5.74E-2	5.85E-2	5.93E-2	6.20E-2	1.28E-1	1.29E-1	1.29E-1	1.33E-1
3	10	\bar{C}	37.90	37.88	37.89	37.92	37.89	37.89	37.88	37.92	37.78	37.79	37.80	37.84
		$U_{C,A}$	1.66E-2	2.29E-2	2.56E-2	3.07E-2	2.13E-1	2.13E-1	2.17E-1	2.22E-1	4.73E-1	4.80E-1	4.84E-1	4.85E-1
		$U_{C/C_0,B}$	6.01E-6	9.44E-6	1.26E-5	1.69E-5	6.40E-6	1.13E-5	1.52E-5	2.11E-5	8.23E-6	1.98E-5	2.74E-5	3.80E-5
	50	\bar{C}	37.88	37.88	37.88	37.89	37.88	37.88	37.88	37.90	37.77	37.78	37.78	37.81
		$U_{C,A}$	1.05E-2	1.17E-2	1.30E-2	1.42E-2	9.25E-2	9.39E-2	9.51E-2	9.84E-2	2.11E-1	2.14E-1	2.17E-1	2.22E-1
		$U_{C/C_0,B}$	6.01E-6	9.44E-6	1.26E-5	1.69E-5	6.40E-6	1.13E-5	1.52E-5	2.11E-5	8.23E-6	1.98E-5	2.74E-5	3.80E-5
100	\bar{C}	37.87	37.88	37.88	37.89	37.89	37.89	37.90	37.91	37.80	37.81	37.81	37.84	
	$U_{C,A}$	7.38E-3	8.05E-3	8.76E-3	1.01E-2	6.45E-2	6.53E-2	6.61E-2	6.83E-2	1.47E-1	1.49E-1	1.50E-1	1.54E-1	
	$U_{C/C_0,B}$	6.01E-6	9.44E-6	1.26E-5	1.69E-5	6.40E-6	1.13E-5	1.52E-5	2.11E-5	8.23E-6	1.98E-5	2.74E-5	3.80E-5	
5	10	\bar{C}	52.12	52.11	52.11	52.11	52.24	52.22	52.23	52.23	52.22	52.20	52.21	52.21
		$U_{C,A}$	2.16E-2	2.85E-2	3.16E-2	3.28E-2	3.25E-1	3.29E-1	3.35E-1	3.42E-1	7.41E-1	7.43E-1	7.54E-1	7.78E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.86E-5	2.32E-5	2.74E-5	3.39E-5	1.88E-5	2.67E-5	3.29E-5	4.32E-5	2.10E-5	3.99E-5	5.34E-5	7.44E-5
	50	\bar{C}	52.11	52.10	52.11	52.12	52.26	52.26	52.26	52.27	52.28	52.28	52.28	52.30
		$U_{C,A}$	1.47E-2	1.57E-2	1.65E-2	1.79E-2	1.30E-1	1.32E-1	1.33E-1	1.36E-1	2.97E-1	2.97E-1	2.97E-1	3.03E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.86E-5	2.32E-5	2.74E-5	3.39E-5	1.88E-5	2.67E-5	3.29E-5	4.32E-5	2.10E-5	3.99E-5	5.34E-5	7.44E-5
	100	\bar{C}	52.11	52.11	52.12	52.13	52.23	52.23	52.24	52.25	52.21	52.22	52.23	52.26
		$U_{C,A}$	1.03E-2	1.03E-2	1.08E-2	1.12E-2	8.70E-2	8.81E-2	8.89E-2	9.15E-2	2.01E-1	2.01E-1	2.02E-1	2.06E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.86E-5	2.32E-5	2.74E-5	3.39E-5	1.88E-5	2.67E-5	3.29E-5	4.32E-5	2.10E-5	3.99E-5	5.34E-5	7.44E-5
7	10	\bar{C}	73.24	73.26	73.27	73.29	73.83	73.84	73.86	73.89	74.34	74.34	74.35	74.43
		$U_{C,A}$	2.19E-2	2.28E-2	2.20E-2	2.52E-2	2.95E-1	2.95E-1	2.96E-1	3.08E-1	6.89E-1	6.74E-1	6.85E-1	7.00E-1
		$U_{C/C_0,B}$	5.18E-5	5.34E-5	5.53E-5	5.87E-5	5.16E-5	5.55E-5	5.98E-5	6.71E-5	5.26E-5	6.96E-5	8.70E-5	1.09E-4
	50	\bar{C}	73.21	73.22	73.23	73.24	73.36	73.36	73.37	73.37	73.28	73.29	73.29	73.33
		$U_{C,A}$	1.47E-2	1.48E-2	1.61E-2	1.80E-2	1.53E-1	1.53E-1	1.55E-1	1.59E-1	3.44E-1	3.45E-1	3.49E-1	3.55E-1
		$U_{C/C_0,B}$	5.18E-5	5.34E-5	5.53E-5	5.87E-5	5.16E-5	5.55E-5	5.98E-5	6.71E-5	5.26E-5	6.96E-5	8.70E-5	1.09E-4
	100	\bar{C}	73.21	73.22	73.23	73.25	73.51	73.52	73.53	73.54	73.63	73.63	73.65	73.68
		$U_{C,A}$	9.53E-3	9.53E-3	9.91E-3	1.08E-2	9.50E-2	9.56E-2	9.73E-2	9.94E-2	2.17E-1	2.17E-1	2.20E-1	2.23E-1
		$U_{C/C_0,B}$	5.18E-5	5.34E-5	5.53E-5	5.87E-5	5.16E-5	5.55E-5	5.98E-5	6.71E-5	5.26E-5	6.96E-5	8.70E-5	1.09E-4
9	10	\bar{C}	102.29	102.30	102.30	102.26	102.19	102.19	102.20	102.18	101.71	101.74	101.76	101.77
		$U_{C,A}$	1.53E-2	2.22E-2	2.63E-2	3.03E-2	3.21E-1	3.12E-1	3.20E-1	3.23E-1	7.20E-1	7.12E-1	7.15E-1	7.11E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.22E-4	1.24E-4	1.25E-4	1.27E-4	1.22E-4	1.25E-4	1.26E-4	1.32E-4	1.22E-4	1.33E-4	1.39E-4	1.56E-4

ตารางที่ ง.22 ชั้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
9	50	\bar{C}	102.29	102.29	102.29	102.29	102.29	102.29	102.30	102.30	101.94	101.95	101.97	101.98
		$U_{C,A}$	9.76E-3	1.12E-2	1.31E-2	1.33E-2	1.40E-1	1.41E-1	1.42E-1	1.45E-1	3.18E-1	3.18E-1	3.20E-1	3.25E-1
		$U_{C/C_0,B}$	1.22E-4	1.24E-4	1.25E-4	1.27E-4	1.22E-4	1.25E-4	1.26E-4	1.32E-4	1.22E-4	1.33E-4	1.39E-4	1.56E-4
11	10	\bar{C}	143.70	143.70	143.70	143.71	143.36	143.37	143.38	143.38	142.46	142.48	142.50	142.48
		$U_{C,A}$	1.19E-2	1.87E-2	1.98E-2	2.17E-2	4.32E-1	4.40E-1	4.43E-1	4.47E-1	9.82E-1	9.83E-1	9.92E-1	9.94E-1
		$U_{C/C_0,B}$	3.12E-4	3.15E-4	3.18E-4	3.26E-4	3.09E-4	3.14E-4	3.18E-4	3.28E-4	3.07E-4	3.17E-4	3.25E-4	3.46E-4
	50	\bar{C}	143.70	143.72	143.72	143.74	143.72	143.73	143.75	143.76	143.28	143.29	143.29	143.33
		$U_{C,A}$	8.10E-3	7.90E-3	9.56E-3	1.15E-2	1.52E-1	1.55E-1	1.57E-1	1.59E-1	3.47E-1	3.48E-1	3.52E-1	3.55E-1
		$U_{C/C_0,B}$	3.12E-4	3.15E-4	3.18E-4	3.26E-4	3.09E-4	3.14E-4	3.18E-4	3.28E-4	3.07E-4	3.17E-4	3.25E-4	3.46E-4
13	10	\bar{C}	198.46	198.45	198.45	198.45	197.41	197.39	197.39	197.39	195.70	195.68	195.67	195.66
		$U_{C,A}$	3.93E-2	4.44E-2	5.33E-2	6.86E-2	8.47E-1	8.56E-1	8.70E-1	8.93E-1	1.92E+0	1.93E+0	1.95E+0	1.98E+0
		$U_{C/C_0,B}$	6.56E-4	6.57E-4	6.58E-4	6.65E-4	6.49E-4	6.50E-4	6.54E-4	6.64E-4	6.41E-4	6.48E-4	6.64E-4	6.94E-4

ตารางที่ ง.23 ชั้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.54	8.54	8.54	8.54
		$U_{C_0,A}$	1.04E-3	1.03E-3	1.04E-3	9.26E-4	1.81E-2	1.82E-2	1.86E-2	1.90E-2	4.26E-2	4.26E-2	4.32E-2	4.39E-2
	50	\bar{C}	8.57	8.57	8.57	8.57	8.58	8.58	8.58	8.58	8.57	8.57	8.57	8.57
		$U_{C_0,A}$	4.76E-4	4.63E-4	4.19E-4	4.07E-4	8.63E-3	8.70E-3	8.84E-3	9.05E-3	2.02E-2	2.04E-2	2.05E-2	2.09E-2
	100	\bar{C}	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57	8.54	8.54	8.54	8.54
		$U_{C_0,A}$	3.40E-4	3.46E-4	3.56E-4	3.98E-4	6.28E-3	6.33E-3	6.43E-3	6.57E-3	1.45E-2	1.46E-2	1.47E-2	1.49E-2
3	10	\bar{C}	10.54	10.54	10.54	10.54	10.52	10.52	10.52	10.52	10.47	10.47	10.47	10.47
		$U_{C,A}$	1.85E-3	1.61E-3	1.47E-3	1.42E-3	3.83E-2	3.85E-2	3.90E-2	3.96E-2	8.98E-2	9.02E-2	9.07E-2	9.20E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.85E-4	4.85E-4	6.45E-4	8.61E-4	3.07E-4	6.13E-4	8.17E-4	1.14E-3	3.74E-4	9.67E-4	1.32E-3	1.87E-3
	50	\bar{C}	10.55	10.55	10.55	10.55	10.54	10.54	10.54	10.54	10.51	10.51	10.51	10.51
		$U_{C,A}$	5.02E-4	4.59E-4	4.44E-4	5.08E-4	1.21E-2	1.22E-2	1.23E-2	1.26E-2	2.81E-2	2.83E-2	2.85E-2	2.88E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.85E-4	4.85E-4	6.45E-4	8.61E-4	3.07E-4	6.13E-4	8.17E-4	1.14E-3	3.74E-4	9.67E-4	1.32E-3	1.87E-3
	100	\bar{C}	10.54	10.54	10.54	10.54	10.55	10.55	10.55	10.55	10.53	10.53	10.53	10.53
		$U_{C,A}$	4.69E-4	4.38E-4	4.19E-4	4.32E-4	8.21E-3	8.29E-3	8.38E-3	8.57E-3	1.91E-2	1.93E-2	1.94E-2	1.96E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.85E-4	4.85E-4	6.45E-4	8.61E-4	3.07E-4	6.13E-4	8.17E-4	1.14E-3	3.74E-4	9.67E-4	1.32E-3	1.87E-3
5	10	\bar{C}	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.28	13.28	13.28	13.28
		$U_{C,A}$	1.11E-3	1.16E-3	1.28E-3	1.74E-3	2.88E-2	2.90E-2	2.94E-2	2.99E-2	6.67E-2	6.71E-2	6.76E-2	6.87E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.37E-4	7.94E-4	9.43E-4	1.15E-3	6.52E-4	9.10E-4	1.13E-3	1.48E-3	7.17E-4	1.23E-3	1.69E-3	2.26E-3

ตารางที่ ง.23 ขึ้นทดสอบ A2 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
5	50	\bar{C}	13.31	13.31	13.31	13.31	13.29	13.29	13.29	13.29	13.24	13.24	13.24	13.24
		$U_{C,A}$	4.88E-4	5.14E-4	5.75E-4	7.06E-4	1.14E-2	1.15E-2	1.16E-2	1.18E-2	2.61E-2	2.63E-2	2.65E-2	2.67E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.37E-4	7.94E-4	9.43E-4	1.15E-3	6.52E-4	9.10E-4	1.13E-3	1.48E-3	7.17E-4	1.23E-3	1.69E-3	2.26E-3
	100	\bar{C}	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.31	13.27	13.27	13.27	13.27
		$U_{C,A}$	3.23E-4	3.46E-4	3.83E-4	4.77E-4	8.21E-3	8.28E-3	8.36E-3	8.51E-3	1.88E-2	1.89E-2	1.90E-2	1.93E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.37E-4	7.94E-4	9.43E-4	1.15E-3	6.52E-4	9.10E-4	1.13E-3	1.48E-3	7.17E-4	1.23E-3	1.69E-3	2.26E-3
7	10	\bar{C}	17.23	17.23	17.23	17.23	17.27	17.27	17.27	17.27	17.26	17.26	17.26	17.27
		$U_{C,A}$	9.12E-4	9.41E-4	1.06E-3	1.63E-3	3.46E-2	3.50E-2	3.53E-2	3.59E-2	7.92E-2	7.98E-2	8.02E-2	8.09E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.19E-3	1.30E-3	1.44E-3	1.64E-3	1.21E-3	1.43E-3	1.65E-3	1.99E-3	1.26E-3	1.77E-3	2.18E-3	2.89E-3
	50	\bar{C}	17.23	17.23	17.23	17.23	17.24	17.24	17.23	17.23	17.18	17.18	17.18	17.18
		$U_{C,A}$	5.10E-4	5.66E-4	6.40E-4	8.39E-4	1.32E-2	1.33E-2	1.35E-2	1.37E-2	3.00E-2	3.02E-2	3.03E-2	3.06E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.19E-3	1.30E-3	1.44E-3	1.64E-3	1.21E-3	1.43E-3	1.65E-3	1.99E-3	1.26E-3	1.77E-3	2.18E-3	2.89E-3
	100	\bar{C}	17.23	17.23	17.23	17.23	17.24	17.24	17.24	17.24	17.19	17.19	17.19	17.19
		$U_{C,A}$	4.35E-4	4.71E-4	5.23E-4	6.51E-4	1.05E-2	1.06E-2	1.07E-2	1.09E-2	2.40E-2	2.41E-2	2.43E-2	2.46E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.19E-3	1.30E-3	1.44E-3	1.64E-3	1.21E-3	1.43E-3	1.65E-3	1.99E-3	1.26E-3	1.77E-3	2.18E-3	2.89E-3
9	10	\bar{C}	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.51	22.44	22.44	22.44	22.43
		$U_{C,A}$	1.12E-3	1.23E-3	1.37E-3	1.90E-3	3.75E-2	3.78E-2	3.80E-2	3.87E-2	8.50E-2	8.55E-2	8.59E-2	8.72E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.92E-3	2.05E-3	2.19E-3	2.46E-3	1.94E-3	2.16E-3	2.35E-3	2.71E-3	1.98E-3	2.51E-3	2.95E-3	3.82E-3
	50	\bar{C}	22.52	22.52	22.52	22.52	22.53	22.53	22.53	22.53	22.48	22.48	22.48	22.48
		$U_{C,A}$	4.89E-4	4.91E-4	5.32E-4	7.00E-4	1.68E-2	1.69E-2	1.71E-2	1.75E-2	3.86E-2	3.88E-2	3.90E-2	3.95E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.92E-3	2.05E-3	2.19E-3	2.46E-3	1.94E-3	2.16E-3	2.35E-3	2.71E-3	1.98E-3	2.51E-3	2.95E-3	3.82E-3
11	10	\bar{C}	30.04	30.04	30.04	30.04	29.98	29.98	29.98	29.98	29.82	29.82	29.82	29.82
		$U_{C,A}$	2.33E-3	2.66E-3	3.26E-3	4.00E-3	6.36E-2	6.42E-2	6.51E-2	6.61E-2	1.44E-1	1.45E-1	1.46E-1	1.48E-1
		$U_{C/C_0,B}$	2.90E-3	3.06E-3	3.18E-3	3.49E-3	2.91E-3	3.13E-3	3.37E-3	3.90E-3	2.91E-3	3.51E-3	4.09E-3	5.06E-3
	50	\bar{C}	30.04	30.04	30.04	30.04	30.03	30.03	30.03	30.03	29.95	29.95	29.95	29.94
		$U_{C,A}$	6.74E-4	7.15E-4	8.36E-4	1.13E-3	2.41E-2	2.44E-2	2.47E-2	2.52E-2	5.52E-2	5.56E-2	5.59E-2	5.66E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.90E-3	3.06E-3	3.18E-3	3.49E-3	2.91E-3	3.13E-3	3.37E-3	3.90E-3	2.91E-3	3.51E-3	4.09E-3	5.06E-3
13	10	\bar{C}	40.12	40.12	40.12	40.12	39.92	39.91	39.91	39.91	39.61	39.61	39.61	39.61
		$U_{C,A}$	1.40E-3	1.80E-3	2.34E-3	4.06E-3	9.85E-2	9.95E-2	1.01E-1	1.03E-1	2.26E-1	2.27E-1	2.29E-1	2.32E-1
		$U_{C/C_0,B}$	4.15E-3	4.34E-3	4.56E-3	4.92E-3	4.16E-3	4.45E-3	4.84E-3	5.37E-3	4.23E-3	5.03E-3	5.81E-3	6.89E-3

ตารางที่ ง.24 ซึ้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ของหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	27.49	27.50	27.50	27.53	27.54	27.55	27.57	27.58	27.52	27.53	27.56	27.59
		$U_{C_0,A}$	5.69E-3	1.12E-2	9.64E-3	1.02E-2	6.83E-3	1.28E-2	2.19E-2	2.88E-2	1.37E-2	2.04E-2	3.48E-2	4.51E-2
	50	\bar{C}	27.50	27.50	27.50	27.50	27.55	27.55	27.56	27.57	27.52	27.54	27.55	27.58
		$U_{C_0,A}$	5.71E-3	8.13E-3	9.85E-3	1.04E-2	6.82E-3	9.33E-3	1.16E-2	1.40E-2	9.74E-3	1.16E-2	1.66E-2	2.25E-2
	100	\bar{C}	27.50	27.50	27.50	27.51	27.55	27.55	27.56	27.58	27.52	27.53	27.55	27.58
		$U_{C_0,A}$	3.93E-3	5.40E-3	6.22E-3	7.55E-3	4.43E-3	6.29E-3	7.75E-3	1.08E-2	6.76E-3	9.07E-3	1.18E-2	1.70E-2
3	10	\bar{C}	36.71	36.72	36.73	36.74	36.72	36.71	36.73	36.75	36.68	36.66	36.66	36.70
		$U_{C,A}$	4.00E-3	1.20E-2	1.24E-2	2.11E-2	6.52E-3	1.89E-2	2.17E-2	2.81E-2	9.29E-3	1.32E-2	2.23E-2	4.08E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.98E-6	9.47E-6	1.18E-5	1.63E-5	6.44E-6	1.24E-5	1.62E-5	2.34E-5	8.32E-6	2.09E-5	2.90E-5	4.26E-5
	50	\bar{C}	36.72	36.73	36.73	36.75	36.73	36.74	36.76	36.77	36.69	36.71	36.71	36.75
		$U_{C,A}$	4.04E-3	5.03E-3	6.73E-3	1.10E-2	4.93E-3	8.62E-3	1.16E-2	1.58E-2	5.78E-3	1.18E-2	1.66E-2	2.31E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.98E-6	9.47E-6	1.18E-5	1.63E-5	6.44E-6	1.24E-5	1.62E-5	2.34E-5	8.32E-6	2.09E-5	2.90E-5	4.26E-5
	100	\bar{C}	36.72	36.73	36.74	36.76	36.73	36.74	36.76	36.78	36.69	36.71	36.73	36.78
		$U_{C,A}$	3.31E-3	3.69E-3	4.56E-3	7.14E-3	4.08E-3	5.84E-3	7.86E-3	1.10E-2	5.46E-3	8.73E-3	1.22E-2	1.68E-2
		$U_{C/C_0,B}$	5.98E-6	9.47E-6	1.18E-5	1.63E-5	6.44E-6	1.24E-5	1.62E-5	2.34E-5	8.32E-6	2.09E-5	2.90E-5	4.26E-5
5	10	\bar{C}	50.80	50.79	50.79	50.82	50.82	50.81	50.83	50.85	50.74	50.76	50.83	50.84
		$U_{C,A}$	1.49E-2	2.48E-2	2.98E-2	3.07E-2	1.17E-2	2.90E-2	2.39E-2	3.09E-2	1.66E-2	4.84E-2	4.01E-2	4.04E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.79E-5	2.03E-5	2.28E-5	2.78E-5	1.81E-5	2.33E-5	2.76E-5	3.62E-5	1.92E-5	3.24E-5	4.20E-5	6.08E-5
	50	\bar{C}	50.81	50.81	50.81	50.83	50.81	50.82	50.82	50.85	50.72	50.75	50.76	50.79
		$U_{C,A}$	5.03E-3	7.85E-3	1.02E-2	1.20E-2	5.47E-3	9.66E-3	1.24E-2	1.59E-2	8.05E-3	1.52E-2	2.00E-2	1.93E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.79E-5	2.03E-5	2.28E-5	2.78E-5	1.81E-5	2.33E-5	2.76E-5	3.62E-5	1.92E-5	3.24E-5	4.20E-5	6.08E-5
	100	\bar{C}	50.80	50.80	50.81	50.82	50.80	50.81	50.82	50.83	50.72	50.73	50.76	50.79
		$U_{C,A}$	3.48E-3	5.28E-3	6.74E-3	8.37E-3	4.06E-3	7.02E-3	9.33E-3	1.18E-2	5.37E-3	1.10E-2	1.44E-2	1.59E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.79E-5	2.03E-5	2.28E-5	2.78E-5	1.81E-5	2.33E-5	2.76E-5	3.62E-5	1.92E-5	3.24E-5	4.20E-5	6.08E-5
7	10	\bar{C}	68.61	68.62	68.65	68.66	68.59	68.62	68.64	68.66	68.45	68.48	68.50	68.53
		$U_{C,A}$	1.25E-2	1.94E-2	2.40E-2	4.10E-2	1.58E-2	2.12E-2	3.29E-2	5.27E-2	2.08E-2	2.27E-2	4.11E-2	7.83E-2
		$U_{C/C_0,B}$	4.17E-5	4.36E-5	4.63E-5	4.97E-5	4.19E-5	4.70E-5	5.24E-5	6.03E-5	4.36E-5	5.81E-5	7.09E-5	9.17E-5
	50	\bar{C}	68.59	68.60	68.61	68.62	68.58	68.60	68.61	68.61	68.43	68.43	68.45	68.49
		$U_{C,A}$	6.00E-3	7.73E-3	9.59E-3	1.34E-2	6.42E-3	8.48E-3	1.13E-2	1.68E-2	8.89E-3	1.42E-2	1.93E-2	2.74E-2
		$U_{C/C_0,B}$	4.17E-5	4.36E-5	4.63E-5	4.97E-5	4.19E-5	4.70E-5	5.24E-5	6.03E-5	4.36E-5	5.81E-5	7.09E-5	9.17E-5
	100	\bar{C}	68.60	68.60	68.61	68.62	68.59	68.60	68.61	68.61	68.43	68.44	68.46	68.48
		$U_{C,A}$	3.74E-3	4.90E-3	6.06E-3	8.46E-3	4.08E-3	5.88E-3	7.88E-3	1.16E-2	5.78E-3	8.79E-3	1.21E-2	1.68E-2
		$U_{C/C_0,B}$	4.17E-5	4.36E-5	4.63E-5	4.97E-5	4.19E-5	4.70E-5	5.24E-5	6.03E-5	4.36E-5	5.81E-5	7.09E-5	9.17E-5
9	10	\bar{C}	100.84	100.84	100.84	100.86	100.66	100.66	100.67	100.67	100.34	100.34	100.34	100.36
		$U_{C,A}$	1.18E-2	1.59E-2	1.72E-2	2.69E-2	1.42E-2	2.71E-2	3.03E-2	3.66E-2	1.63E-2	2.82E-2	3.42E-2	4.82E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.38E-4	1.39E-4	1.42E-4	1.45E-4	1.37E-4	1.41E-4	1.47E-4	1.56E-4	1.38E-4	1.49E-4	1.63E-4	1.89E-4

ตารางที่ ง.24 ชั้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,BFS}$ และ C_{BFS} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
9	50	\bar{C}	100.85	100.84	100.85	100.86	100.67	100.67	100.68	100.69	100.34	100.35	100.36	100.40
		$U_{C,A}$	5.13E-3	6.93E-3	9.22E-3	1.14E-2	5.72E-3	8.28E-3	1.17E-2	1.42E-2	7.91E-3	1.08E-2	1.42E-2	1.97E-2
		$U_{C/C_0,B}$	1.38E-4	1.39E-4	1.42E-4	1.45E-4	1.37E-4	1.41E-4	1.47E-4	1.56E-4	1.38E-4	1.49E-4	1.63E-4	1.89E-4
11	10	\bar{C}	134.30	134.30	134.32	134.33	133.88	133.89	133.90	133.91	133.30	133.32	133.33	133.36
		$U_{C,A}$	1.02E-2	1.44E-2	2.55E-2	2.26E-2	1.78E-2	2.17E-2	3.66E-2	3.87E-2	2.45E-2	3.59E-2	3.72E-2	3.76E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.87E-4	2.89E-4	2.90E-4	2.95E-4	2.86E-4	2.90E-4	2.94E-4	3.09E-4	2.86E-4	3.01E-4	3.16E-4	3.62E-4
	50	\bar{C}	134.30	134.31	134.31	134.32	133.89	133.89	133.89	133.90	133.28	133.29	133.30	133.31
		$U_{C,A}$	4.64E-3	5.63E-3	8.68E-3	1.05E-2	5.28E-3	7.96E-3	1.28E-2	1.44E-2	8.07E-3	1.31E-2	1.73E-2	2.20E-2
		$U_{C/C_0,B}$	2.87E-4	2.89E-4	2.90E-4	2.95E-4	2.86E-4	2.90E-4	2.94E-4	3.09E-4	2.86E-4	3.01E-4	3.16E-4	3.62E-4
13	10	\bar{C}	189.00	189.00	188.97	188.95	187.62	187.63	187.59	187.56	186.31	186.28	186.22	186.21
		$U_{C,A}$	1.48E-2	1.80E-2	2.14E-2	4.03E-2	1.27E-2	2.42E-2	1.94E-2	4.00E-2	2.13E-2	4.52E-2	4.85E-2	6.29E-2
		$U_{C/C_0,B}$	6.09E-4	6.12E-4	6.12E-4	6.13E-4	6.05E-4	6.09E-4	6.10E-4	6.16E-4	6.05E-4	6.25E-4	6.35E-4	6.75E-4

ตารางที่ ง.25 ชั้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
1	10	\bar{C}_0	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41
		$U_{C_0,A}$	7.06E-4	6.92E-4	6.82E-4	8.82E-4	7.05E-4	6.37E-4	8.70E-4	8.07E-4	1.07E-3	1.27E-3	1.48E-3	1.45E-3
	50	\bar{C}	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41
		$U_{C_0,A}$	3.35E-4	3.35E-4	3.50E-4	3.88E-4	4.23E-4	4.26E-4	4.53E-4	4.96E-4	5.71E-4	6.16E-4	6.25E-4	6.91E-4
	100	\bar{C}	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41	8.41
		$U_{C_0,A}$	3.56E-4	3.55E-4	3.64E-4	3.66E-4	4.23E-4	4.24E-4	4.43E-4	4.43E-4	4.93E-4	5.21E-4	5.57E-4	5.58E-4
3	10	\bar{C}	10.33	10.33	10.33	10.33	10.34	10.34	10.34	10.34	10.33	10.33	10.33	10.33
		$U_{C,A}$	1.91E-3	1.92E-3	1.92E-3	2.05E-3	1.98E-3	2.03E-3	2.05E-3	2.08E-3	1.64E-3	1.61E-3	1.57E-3	1.76E-3
		$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	6.03E-4	7.97E-4	1.12E-3	3.64E-4	8.08E-4	1.11E-3	1.52E-3	4.54E-4	1.17E-3	1.68E-3	2.34E-3
	50	\bar{C}	10.33	10.33	10.33	10.33	10.34	10.34	10.34	10.34	10.33	10.33	10.34	10.33
		$U_{C,A}$	5.61E-4	5.62E-4	5.63E-4	5.86E-4	6.69E-4	6.69E-4	6.72E-4	6.56E-4	9.29E-4	9.21E-4	8.81E-4	8.95E-4
		$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	6.03E-4	7.97E-4	1.12E-3	3.64E-4	8.08E-4	1.11E-3	1.52E-3	4.54E-4	1.17E-3	1.68E-3	2.34E-3
	100	\bar{C}	10.33	10.33	10.33	10.33	10.34	10.34	10.34	10.34	10.33	10.33	10.34	10.33
		$U_{C,A}$	3.82E-4	3.81E-4	3.80E-4	3.87E-4	4.44E-4	4.44E-4	4.55E-4	4.62E-4	6.03E-4	5.96E-4	6.22E-4	6.31E-4
		$U_{C/C_0,B}$	3.30E-4	6.03E-4	7.97E-4	1.12E-3	3.64E-4	8.08E-4	1.11E-3	1.52E-3	4.54E-4	1.17E-3	1.68E-3	2.34E-3
5	10	\bar{C}	13.05	13.05	13.05	13.05	13.06	13.06	13.06	13.06	13.05	13.05	13.05	13.05
		$U_{C,A}$	5.37E-4	4.59E-4	5.23E-4	6.76E-4	9.11E-4	6.95E-4	8.12E-4	7.59E-4	1.45E-3	1.47E-3	1.71E-3	1.71E-3
		$U_{C/C_0,B}$	6.72E-4	8.73E-4	1.04E-3	1.34E-3	7.09E-4	1.04E-3	1.30E-3	1.77E-3	7.82E-4	1.47E-3	1.95E-3	2.81E-3

ตารางที่ ง.25 ขึ้นทดสอบ A9 ค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนของ $C_{0,CMOD}$ และ C_{CMOD} ที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์ผลของปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	Con. (รอบ)	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
5	50	\bar{C}	13.05	13.05	13.05	13.05	13.06	13.06	13.06	13.06	13.05	13.05	13.05	13.05
		$U_{C,A}$	2.52E-4	2.40E-4	2.51E-4	2.70E-4	3.67E-4	3.71E-4	3.88E-4	3.98E-4	5.13E-4	5.39E-4	5.76E-4	5.87E-4
		$U_{C/C_0,B}$	6.72E-4	8.73E-4	1.04E-3	1.34E-3	7.09E-4	1.04E-3	1.30E-3	1.77E-3	7.82E-4	1.47E-3	1.95E-3	2.81E-3
	100	\bar{C}	13.05	13.05	13.05	13.05	13.06	13.06	13.06	13.06	13.05	13.05	13.05	13.05
		$U_{C,A}$	1.90E-4	1.84E-4	1.94E-4	1.94E-4	2.43E-4	2.49E-4	2.60E-4	2.64E-4	3.60E-4	3.82E-4	4.20E-4	4.56E-4
		$U_{C/C_0,B}$	6.72E-4	8.73E-4	1.04E-3	1.34E-3	7.09E-4	1.04E-3	1.30E-3	1.77E-3	7.82E-4	1.47E-3	1.95E-3	2.81E-3
7	10	\bar{C}	16.38	16.38	16.38	16.38	16.39	16.39	16.39	16.39	16.37	16.37	16.37	16.37
		$U_{C,A}$	1.08E-3	1.10E-3	1.18E-3	1.36E-3	1.27E-3	1.25E-3	1.38E-3	1.40E-3	1.91E-3	1.64E-3	1.67E-3	1.66E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.31E-3	1.47E-3	1.78E-3	1.15E-3	1.48E-3	1.75E-3	2.24E-3	1.21E-3	1.92E-3	2.42E-3	3.23E-3
	50	\bar{C}	16.38	16.38	16.38	16.38	16.39	16.39	16.39	16.39	16.37	16.37	16.37	16.37
		$U_{C,A}$	3.86E-4	3.91E-4	4.04E-4	4.31E-4	4.78E-4	5.32E-4	5.58E-4	5.89E-4	6.66E-4	7.00E-4	7.32E-4	8.49E-4
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.31E-3	1.47E-3	1.78E-3	1.15E-3	1.48E-3	1.75E-3	2.24E-3	1.21E-3	1.92E-3	2.42E-3	3.23E-3
	100	\bar{C}	16.38	16.38	16.38	16.38	16.39	16.39	16.39	16.39	16.37	16.37	16.37	16.37
		$U_{C,A}$	2.75E-4	2.78E-4	2.82E-4	3.19E-4	3.34E-4	3.56E-4	3.84E-4	4.17E-4	4.71E-4	4.81E-4	5.17E-4	5.93E-4
		$U_{C/C_0,B}$	1.12E-3	1.31E-3	1.47E-3	1.78E-3	1.15E-3	1.48E-3	1.75E-3	2.24E-3	1.21E-3	1.92E-3	2.42E-3	3.23E-3
9	10	\bar{C}	22.29	22.29	22.29	22.29	22.27	22.27	22.27	22.27	22.22	22.22	22.22	22.22
		$U_{C,A}$	4.87E-4	4.47E-4	3.90E-4	6.29E-4	8.70E-4	8.44E-4	7.93E-4	1.08E-3	1.97E-3	2.03E-3	1.99E-3	1.95E-3
		$U_{C/C_0,B}$	1.92E-3	2.13E-3	2.36E-3	2.62E-3	1.94E-3	2.31E-3	2.65E-3	3.17E-3	1.98E-3	2.76E-3	3.40E-3	4.40E-3
	50	\bar{C}	22.29	22.29	22.29	22.29	22.27	22.27	22.27	22.27	22.22	22.22	22.22	22.22
		$U_{C,A}$	3.42E-4	3.24E-4	3.27E-4	3.45E-4	3.96E-4	3.81E-4	4.02E-4	4.48E-4	6.57E-4	6.49E-4	6.44E-4	6.80E-4
		$U_{C/C_0,B}$	1.92E-3	2.13E-3	2.36E-3	2.62E-3	1.94E-3	2.31E-3	2.65E-3	3.17E-3	1.98E-3	2.76E-3	3.40E-3	4.40E-3
11	10	\bar{C}	28.39	28.39	28.39	28.39	28.33	28.33	28.33	28.33	28.24	28.24	28.24	28.23
		$U_{C,A}$	1.03E-3	1.12E-3	1.26E-3	1.24E-3	1.16E-3	1.28E-3	1.52E-3	1.72E-3	1.24E-3	1.23E-3	1.17E-3	1.32E-3
		$U_{C/C_0,B}$	2.86E-3	3.02E-3	3.20E-3	3.56E-3	2.89E-3	3.27E-3	3.66E-3	4.27E-3	2.93E-3	3.70E-3	4.50E-3	5.78E-3
	50	\bar{C}	28.39	28.39	28.39	28.39	28.33	28.33	28.33	28.33	28.24	28.24	28.24	28.23
		$U_{C,A}$	4.27E-4	4.36E-4	4.36E-4	4.63E-4	4.55E-4	4.63E-4	5.11E-4	6.17E-4	5.99E-4	6.21E-4	6.19E-4	7.36E-4
		$U_{C/C_0,B}$	2.86E-3	3.02E-3	3.20E-3	3.56E-3	2.89E-3	3.27E-3	3.66E-3	4.27E-3	2.93E-3	3.70E-3	4.50E-3	5.78E-3
13	10	\bar{C}	38.39	38.38	38.38	38.38	38.13	38.13	38.12	38.12	37.87	37.86	37.86	37.86
		$U_{C,A}$	9.71E-4	9.58E-4	7.90E-4	9.58E-4	8.38E-4	7.87E-4	6.06E-4	1.21E-3	1.18E-3	1.32E-3	1.13E-3	1.89E-3
		$U_{C/C_0,B}$	4.39E-3	4.63E-3	4.94E-3	5.35E-3	4.39E-3	4.85E-3	5.28E-3	6.02E-3	4.41E-3	5.44E-3	6.30E-3	7.90E-3

ง.5 ข้อมูลความไม่แน่นอนของความยาวรอยร้าว

หัวข้อนี้จะนำเสนอข้อมูล U_a ที่ได้จากเงื่อนไขต่าง ๆ โดยแบ่งตามหมวดของปัจจัยที่ศึกษา คือ 1) ปัจจัยหมวดสภาวะทดสอบ 2) ปัจจัยหมวดการวิเคราะห์ข้อมูล และ 3) ผลของนิยาม a_{s0} โดยจะนำเสนอที่หัวข้อ ง.5.1 – ง.5.3 ตามลำดับ U_a ที่จะนำเสนอในแต่ละหัวข้อมี 8 ตัว คือ 1) U_a by $U_{W,A}$ 2) U_a by $U_{W,B}$ 3) U_a by $U_{a_{s0},A}$ 4) U_a by $U_{a_{s0},B}$ 5) U_a by $U_{C_0,A}$ 6) U_a by $U_{C,A}$ 7) U_a by $U_{C/C_0,B}$ 8) U_a (รวมผลของ 1 ถึง 7) การนำเสนอจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) U_a ที่เกิดจาก $U_W, U_{a_{s0}}$ (ตัวที่ 1 ถึง 4) ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ และเงื่อนไขแบบเดียว
- 2) U_a ที่เกิดจาก U_{C_0}, U_C และ U_a (ตัวที่ 5 ถึง 8) ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ตามปัจจัยที่ศึกษา

สาเหตุที่นำเสนอเช่นนี้เนื่องจากข้อมูล U_a ทั้ง 8 ตัวจากทุกเงื่อนไขมีจำนวนมาก แต่จากการศึกษาพบว่าขนาดของ U_a ตัวที่ 1 ถึง 4 แทบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขที่ศึกษา ทำให้สามารถนำเสนอ U_a ตัวที่ 1 ถึง 4 แค่เงื่อนไขแบบเดียวได้ การนำเสนอแบบนี้จะช่วยให้จำนวนข้อมูลที่ได้นำเสนอลดลง หน่วยของค่าต่าง ๆ ในตารางภายในหัวข้อนี้ทั้งหมด คือ μm ยกเว้น a/W และ U_a by $C/C_0,B$ ที่ไม่มีหน่วย

ง.5.1 หมวดสภาวะทดสอบ

หัวข้อนี้จะนำเสนอ U_a ทั้ง 8 ตัว จากวิธี C_{BFS} และ วิธี C_{MOD} ของชั้นทดสอบ A1 – A10 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 โดยจะนำเสนอที่หัวข้อ ง.5.1.1 – ง.5.1.10 ตามลำดับ U_a ตัวที่ 1 ถึง 4 ที่นำเสนอของแต่ละของชั้นทดสอบได้จากสภาวะทดสอบ $f = 1$ Hz และ $SR = 1$ kS/s U_a ตัวที่ 5 ถึง 8 ของแต่ละของชั้นทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข f, SR, R และความยาวรอยร้าว เป็นค่าต่าง ๆ ส่วนเงื่อนไข ภาวะสูงสุด, R และรูปร่างคลื่น จะเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนชั้นทดสอบ

ง.5.1.1 ชั้นทดสอบ A1

ตารางที่ ง.26 ชั้นทดสอบ A1 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

		R						0.1						0.5					
ลำดับขอบหน้า		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12					
วิธี C_{BFS}	a/W	0.274	0.341	0.392	0.450	0.510	0.568	0.627	0.321	0.361	0.418	0.481	0.542	0.603					
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.5	2.5	3.8	5.1	6.6	8.1	0.1	0.9	2.1	3.5	5.0	6.7					
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	4.2	7.2	10.6	14.5	18.6	23.0	0.3	2.6	5.9	9.8	14.2	18.8					
	U_a by $U_{a_{s0},3p,A}$	20.4	20.1	20.0	19.7	18.9	17.7	16.1	20.4	20.3	20.1	19.6	18.5	17.0					
	U_a by $U_{a_{s0},3p,B}$	51.3	50.5	50.3	49.5	47.6	44.6	40.6	51.4	51.2	50.8	49.4	46.8	43.0					
วิธี C_{MOD}	a/W	0.273	0.340	0.391	0.449	0.509	0.568	0.627	0.321	0.360	0.417	0.480	0.541	0.603					
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.6	2.9	4.3	5.9	7.4	9.0	< 0.1	1.0	2.5	4.1	5.8	7.6					
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.7	8.1	12.2	16.6	21.0	25.6	0.1	2.9	7.0	11.7	16.5	21.5					
	U_a by $U_{a_{s0},3p,A}$	20.4	19.3	18.4	17.3	15.8	14.2	12.4	20.4	19.8	18.7	17.3	15.6	13.7					
	U_a by $U_{a_{s0},3p,B}$	51.3	48.6	46.4	43.4	39.8	35.7	31.1	51.6	49.9	47.2	43.5	39.3	34.5					

ตารางที่ ง.27 ขึ้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	1	a/W	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
	3	a/W	0.341	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.339	0.339	0.339	0.339	0.341
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	20.3	22.7	23.8	28.2	42.4	71.7	3.9	4.5	4.7	6.5	5.9	43.0
		U_a by $U_{C,A}$	11.4	16.9	18.6	19.8	24.4	54.2	4.6	3.8	3.4	5.1	5.3	27.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	10.9	7.5	7.0	9.2	10.9	15.7
		U_a	59.3	61.5	62.4	64.6	73.3	105.2	54.0	53.4	53.3	54.0	54.2	74.8
	5	a/W	0.392	0.392	0.392	0.392	0.392	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.390	0.394
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	20.2	22.6	23.7	28.1	42.2	71.4	3.8	4.3	4.4	6.2	5.6	40.5
		U_a by $U_{C,A}$	9.3	14.2	8.7	18.1	18.6	33.5	3.8	2.4	3.1	4.3	5.5	9.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	13.2	10.8	10.4	11.9	12.8	15.7
		U_a	59.0	60.8	60.2	64.1	71.5	95.9	52.6	52.0	52.0	52.6	52.9	67.3
	7	a/W	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.448	0.452
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	19.9	22.2	23.3	27.7	41.5	70.2	3.5	4.0	4.2	5.8	5.3	37.1
		U_a by $U_{C,A}$	7.2	7.8	8.9	14.2	15.9	10.7	2.2	2.5	2.7	3.3	4.4	3.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	1.4	15.7	13.1	13.9	14.5	15.8	17.4
		U_a	58.4	59.3	59.9	62.7	70.3	89.5	51.2	50.5	50.7	51.1	51.5	63.5
	9	a/W	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.508	0.512
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	17.3	15.8	23.2	26.8	39.8	65.8	3.2	3.9	3.5	5.5	4.8	34.5
		U_a by $U_{C,A}$	5.8	6.5	5.9	8.0	8.1	13.5	1.9	2.2	2.4	2.3	4.2	3.7
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	1.8	17.2	15.5	16.1	16.1	16.6	17.6	
U_a		56.5	56.1	58.6	60.3	67.1	85.9	49.5	49.0	49.2	49.4	49.6	60.4	
11	a/W	0.568	0.568	0.568	0.567	0.567	-	0.568	0.567	0.567	0.567	0.566	-	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.8	16.5	24.0	27.0	31.3	-	2.9	3.4	3.1	4.6	4.4	-	
	U_a by $U_{C,A}$	3.9	4.5	5.2	6.3	6.4	-	1.5	1.3	1.3	2.4	3.1	-	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	-	17.1	16.6	16.3	16.2	16.9	-	
	U_a	53.9	54.7	57.4	58.9	61.0	-	47.7	47.5	47.4	47.6	47.9	-	
13	a/W	0.627	0.627	0.626	0.626	0.626	-	0.627	0.626	0.626	0.625	0.625	-	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	8.2	17.8	15.7	17.5	23.9	-	2.5	3.8	2.9	4.2	4.7	-	
	U_a by $U_{C,A}$	1.4	1.8	2.8	4.5	10.4	-	1.2	1.1	1.0	1.9	3.3	-	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	-	16.4	16.4	16.4	15.8	16.3	-	
	U_a	50.8	53.2	52.6	53.3	56.5	-	46.2	46.3	46.2	46.1	46.5	-	

ตารางที่ ง.27 ขึ้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.5	2	a/W	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321
		U_a	55.3	55.3	55.3	55.3	55.3	55.3	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5
	4	a/W	0.361	0.360	0.360	0.360	0.361	0.361	0.360	0.360	0.360	0.360	0.360	0.360
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	21.8	27.1	30.5	34.1	52.2	52.8	7.8	5.9	6.9	9.1	8.0	19.3
		U_a by $U_{C,A}$	20.2	23.3	29.0	39.0	31.4	44.4	6.5	5.8	6.6	8.4	10.1	16.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	14.7	7.3	5.6	10.2	14.3	20.9
		U_a	62.7	65.8	69.4	75.7	82.2	88.4	56.6	54.9	54.9	56.1	57.1	63.0
	6	a/W	0.418	0.417	0.417	0.418	0.418	0.418	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417	0.417
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	21.6	26.9	30.2	33.8	51.7	52.4	7.4	5.6	6.5	8.6	7.5	18.0
		U_a by $U_{C,A}$	15.3	19.9	17.7	22.6	27.7	31.9	5.1	4.1	3.8	6.1	8.4	9.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.3	0.2	0.6	0.5	0.8	14.2	9.0	8.4	11.6	13.9	19.8
		U_a	61.1	64.4	65.2	68.4	80.4	82.4	53.9	52.5	52.5	53.6	54.3	58.6
	8	a/W	0.481	0.480	0.480	0.481	0.481	0.481	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	21.0	26.2	29.4	32.8	50.3	50.9	6.8	5.1	6.0	7.9	7.0	16.2
		U_a by $U_{C,A}$	11.8	13.0	20.2	17.2	23.4	18.5	4.2	4.0	4.2	5.1	6.9	4.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	1.3	13.9	11.3	10.9	12.6	14.5	18.2
		U_a	59.3	61.5	64.8	65.6	77.5	76.6	51.0	50.2	50.2	50.9	51.5	54.4
	10	a/W	0.542	0.542	0.542	0.542	0.542	0.543	0.541	0.541	0.541	0.541	0.541	0.542
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	19.9	24.8	27.8	31.1	47.6	48.2	6.1	4.6	5.4	7.1	6.3	14.1
		U_a by $U_{C,A}$	7.5	7.5	9.1	14.0	20.6	15.3	3.7	2.9	2.6	3.7	6.4	2.0
U_a by $C/C_{0,B}$		0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	1.4	15.4	12.8	12.3	13.4	15.1	18.1	
U_a		56.7	58.6	60.1	62.6	73.9	72.9	48.8	47.8	47.8	48.4	49.0	51.2	
12	a/W	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	-	0.603	0.602	0.602	0.602	0.602	-	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	18.3	22.8	25.6	28.6	43.8	-	5.4	4.1	4.8	6.3	5.5	-	
	U_a by $U_{C,A}$	5.6	6.4	6.4	8.1	12.2	-	2.0	2.2	1.8	2.9	5.7	-	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.2	1.0	1.2	1.2	1.2	-	14.7	12.9	12.8	13.4	14.7	-	
	U_a	53.9	55.7	56.9	58.5	67.9	-	46.4	45.7	45.7	46.1	46.7	-	

ง.5.1.2 ชั้นทดสอบ A2

ตารางที่ ง.28 ชั้นทดสอบ A2 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1						0.5						
		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W	0.269	0.327	0.389	0.455	0.517	0.577	0.629	0.297	0.355	0.423	0.479	0.537	0.587
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.8	3.4	5.3	7.2	9.2	11.0	0.1	1.7	3.6	5.2	7.1	8.8
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.8	7.3	11.2	15.2	19.5	23.4	0.3	3.6	7.6	11.1	15.0	18.8
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.9	24.5	24.4	23.9	22.9	21.4	19.6	24.0	23.9	23.6	23.0	21.9	20.5
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	50.5	50.2	49.3	47.2	44.0	40.3	51.3	50.9	50.4	49.2	46.8	43.8
วิธี C_{MOD}	a/W	0.268	0.326	0.388	0.453	0.515	0.575	0.629	0.296	0.354	0.422	0.477	0.535	0.586
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.9	3.9	6.0	8.1	10.3	12.2	0.1	1.9	4.1	6.0	8.1	10.0
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.1	8.3	12.8	17.3	21.8	25.9	0.1	4.1	8.8	12.8	17.3	21.3
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.9	23.7	22.5	20.9	19.0	17.0	14.9	24.1	23.0	21.5	20.1	18.3	16.5
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.2	48.9	46.3	43.0	39.2	34.9	30.8	51.5	49.2	46.0	42.9	39.0	35.2

ตารางที่ ง.29 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1	5	10	20	1	5	10	20				
0.1	1	a/W	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268
		U_a	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.328	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.8	14.2	17.7	28.0	30.6	87.3	6.9	4.4	3.9	7.1	10.1	39.3
		U_a by $U_{C,A}$	12.3	15.6	13.7	24.2	27.9	36.7	4.7	3.5	4.4	3.6	6.1	15.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	10.8	7.1	6.3	8.6	11.2	15.6
		U_a	59.2	60.1	60.6	67.4	69.9	110.1	56.2	55.3	55.2	55.8	56.9	70.6
	5	a/W	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.7	14.2	17.6	27.8	30.4	86.8	6.5	4.2	3.7	6.7	9.6	37.2
		U_a by $U_{C,A}$	11.7	10.8	13.9	13.0	17.3	21.3	3.3	2.8	2.3	3.5	7.0	12.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.9	13.6	11.1	10.6	12.2	13.2	16.6
		U_a	59.2	59.1	60.7	64.2	66.4	105.7	54.5	53.6	53.5	54.2	55.2	67.5
	7	a/W	0.455	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.453	0.453	0.453	0.452	0.453	0.452
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.5	13.9	17.2	27.3	29.9	85.0	6.0	3.9	3.5	6.2	8.9	34.7
		U_a by $U_{C,A}$	6.3	7.6	8.9	11.5	9.1	3.4	2.4	2.2	2.2	2.2	5.4	14.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.2	15.3	14.0	14.3	14.4	15.5	17.1
		U_a	58.1	58.3	59.4	63.5	64.2	101.9	52.5	52.0	52.0	52.3	53.2	64.7

ตารางที่ ง.29 ขึ้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.1	9	a/W	0.517	0.517	0.516	0.516	0.516	0.517	0.515	0.515	0.514	0.514	0.514	0.513
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.5	14.4	16.7	27.2	26.7	79.1	5.4	3.1	3.0	4.9	8.2	29.6
		U_a by $U_{C,A}$	4.4	6.2	4.3	8.8	12.3	3.3	1.4	1.9	1.2	2.3	4.0	23.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	1.5	16.3	15.9	16.1	15.5	16.6	18.0
		U_a	56.9	57.3	57.7	62.1	62.5	96.5	50.6	50.3	50.3	50.4	51.2	63.6
	11	a/W	0.577	0.577	0.576	0.576	0.576	-	0.575	0.575	0.574	0.574	0.574	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	11.1	14.4	15.9	23.3	24.7	-	4.3	3.0	2.8	4.7	6.9	-
		U_a by $U_{C,A}$	2.9	4.5	2.4	5.4	7.6	-	1.4	1.0	1.1	1.2	3.3	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	17.1	16.6	16.2	17.1	17.0	-
		U_a	54.6	55.5	55.8	58.6	59.4	-	49.0	48.7	48.6	49.1	49.4	-
	13	a/W	0.629	0.629	0.629	0.629	0.628	-	0.629	0.575	0.628	0.627	0.627	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.5	15.3	9.9	15.7	25.7	-	4.8	3.0	2.3	2.9	6.9	-
		U_a by $U_{C,A}$	1.9	3.8	2.8	1.9	8.7	-	1.5	1.0	1.0	1.2	2.7	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4	-	16.5	16.6	15.3	15.7	16.6	-
		U_a	52.9	54.1	52.8	54.2	58.5	-	47.9	48.7	47.3	47.4	48.2	-
0.5	2	a/W	0.297	0.297	0.297	0.297	0.297	0.297	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296
		U_a	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	4	a/W	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355	0.354	0.354	0.354	0.354	0.354	0.354
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	28.2	33.6	34.3	42.1	46.1	45.5	7.4	5.9	5.8	8.6	9.3	10.0
		U_a by $U_{C,A}$	19.0	21.0	26.3	40.0	37.1	38.1	7.9	6.1	3.8	7.3	7.1	6.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.8	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	15.2	8.2	6.9	11.8	15.5	21.6
		U_a	65.9	68.9	71.0	81.0	81.7	81.9	57.6	55.7	55.4	56.9	57.8	59.9
	6	a/W	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422	0.421
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	28.0	33.3	33.9	41.7	45.7	45.0	6.9	5.5	5.4	8.1	8.7	9.3
		U_a by $U_{C,A}$	17.3	13.0	23.1	22.6	31.5	26.8	4.5	3.4	4.4	5.3	4.9	4.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	1.0	16.5	10.9	10.0	12.6	15.4	20.4
		U_a	65.2	66.7	69.7	73.6	79.0	76.9	54.9	53.2	53.1	54.1	54.9	56.6
	8	a/W	0.479	0.479	0.479	0.479	0.479	0.479	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.476
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.3	32.4	33.2	40.6	44.5	43.9	6.4	5.1	5.1	7.5	8.1	8.7
		U_a by $U_{C,A}$	9.7	12.5	14.5	16.5	19.9	19.1	3.5	3.1	2.7	3.8	4.1	4.0
U_a by $C/C_{0,B}$		0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	1.0	16.1	12.8	12.3	14.1	15.9	19.4	
U_a		62.7	65.6	66.4	70.9	74.0	73.4	52.5	51.4	51.3	52.1	52.7	54.0	

ตารางที่ ง.29 ขึ้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.5	10	a/W	0.537	0.537	0.537	0.537	0.537	0.538	0.535	0.535	0.535	0.535	0.535	0.535
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.9	30.8	31.7	38.7	42.3	41.7	5.9	4.7	4.6	6.9	7.4	7.9
		U_a by $U_{C,A}$	7.8	7.9	12.6	13.1	16.1	14.8	2.2	2.6	1.9	3.7	4.1	5.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	1.3	16.6	14.2	14.1	15.2	17.2	19.5
		U_a	60.6	62.9	64.1	67.9	70.7	70.0	50.3	49.5	49.4	50.1	50.8	51.8
	12	a/W	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	-	0.586	0.586	0.586	0.585	0.585	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	24.3	28.9	29.8	36.3	39.7	-	5.3	4.2	4.2	6.2	6.7	-
		U_a by $U_{C,A}$	5.0	8.5	11.3	10.8	9.0	-	2.2	2.1	1.7	2.0	3.0	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	-	16.3	14.7	13.8	15.2	16.8	-
		U_a	58.2	60.7	61.6	64.8	66.6	-	48.6	47.9	47.7	48.3	49.0	-

ง.5.1.3 ขึ้นทดสอบ A3

ตารางที่ ง.30 ขึ้นทดสอบ A3 U_a by w และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.3							0.7					
		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W	0.274	0.334	0.391	0.454	0.511	0.572	0.629	0.303	0.360	0.420	0.482	0.535	0.594
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.6	2.9	4.4	5.9	7.6	9.4	0.1	1.5	2.9	4.4	5.9	7.7
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.9	7.1	10.9	14.6	18.9	23.2	0.3	3.6	7.1	11.0	14.7	19.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	25.3	24.9	24.8	24.3	23.4	21.8	19.9	24.6	24.5	24.3	23.6	22.5	20.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	50.6	50.3	49.4	47.5	44.4	40.4	51.3	51.0	50.6	49.1	46.9	43.5
วิธี C_{MOD}	a/W	0.273	0.332	0.389	0.452	0.508	0.570	0.627	0.302	0.359	0.419	0.481	0.534	0.593
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.7	3.2	5.0	6.7	8.6	10.4	0.0	1.6	3.3	5.2	6.8	8.7
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.2	8.0	12.4	16.6	21.2	25.7	0.1	4.1	8.3	12.8	16.9	21.6
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	25.2	24.1	22.9	21.3	19.6	17.5	15.3	24.7	23.6	22.3	20.5	18.8	16.7
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	48.9	46.5	43.3	39.9	35.5	31.1	51.6	49.2	46.4	42.8	39.3	34.8

ตารางที่ ง.31 ขึ้นทดสอบ A3 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{CMOD}							
			1		5	10	20	1		5	10	20			
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10		
0.3	1	a/W	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274
		U_a	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2
	3	a/W	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.4	30.8	36.3	32.4	41.1	56.7	6.4	5.0	4.9	8.7	10.3	18.2	
		U_a by $U_{C,A}$	18.3	21.2	18.4	25.3	31.5	41.2	4.7	4.5	3.8	6.5	9.6	17.0	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.2	0.1	0.2	0.4	0.6	13.0	7.8	7.0	10.0	12.6	17.8	
		U_a	65.5	67.8	69.6	69.9	76.6	90.0	56.8	55.7	55.5	56.7	57.9	62.7	
	5	a/W	0.393	0.392	0.392	0.392	0.392	0.392	0.390	0.390	0.390	0.390	0.390	0.390	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.3	30.7	36.1	32.3	40.9	56.3	6.1	4.8	4.7	8.3	9.8	16.9	
		U_a by $U_{C,A}$	9.0	14.5	16.4	17.0	25.4	24.4	4.5	2.7	3.2	5.6	8.3	13.9	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.6	14.5	10.8	10.7	12.0	14.4	18.2	
		U_a	63.5	66.0	69.1	67.3	74.3	83.5	55.0	53.9	53.9	54.8	56.0	59.7	
	7	a/W	0.456	0.456	0.456	0.455	0.455	0.456	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.454	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	26.8	30.2	35.4	31.7	40.1	55.1	5.7	4.4	4.4	7.7	9.1	15.1	
		U_a by $U_{C,A}$	8.3	12.2	15.6	13.5	17.5	8.6	3.1	2.6	2.3	4.4	5.8	7.4	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	16.1	13.5	13.3	14.6	16.2	18.4	
		U_a	62.9	65.0	68.3	66.0	71.3	79.2	53.0	52.1	52.1	52.9	53.7	56.0	
	9	a/W	0.513	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.510	0.510	0.509	0.509	0.509	0.510	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.8	29.2	34.1	30.5	38.6	52.7	5.2	4.1	4.0	7.1	8.4	13.3	
		U_a by $U_{C,A}$	6.1	10.8	7.4	10.0	15.4	1.6	2.7	1.9	1.9	3.1	4.4	1.7	
U_a by $C/C_{0,B}$		0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	1.2	18.3	14.7	15.2	16.0	17.0	20.0		
U_a		61.3	63.5	65.4	63.9	69.2	76.4	51.6	50.3	50.5	51.1	51.7	53.6		
11	a/W	0.574	0.574	0.573	0.573	0.573	-	0.572	0.571	0.571	0.571	0.570	-		
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	24.1	27.5	31.8	28.5	36.1	-	4.7	3.6	3.6	6.3	7.5	-		
	U_a by $U_{C,A}$	4.2	8.0	5.6	7.1	12.1	-	1.6	1.7	1.2	1.9	5.2	-		
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	-	17.4	15.7	16.1	16.5	17.1	-		
	U_a	58.8	60.7	62.5	61.1	65.7	-	49.2	48.5	48.7	49.1	49.7	-		
13	a/W	0.631	0.631	0.630	0.630	0.630	-	0.629	0.629	0.628	0.628	0.628	-		
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.6	27.2	30.6	19.9	25.1	-	3.6	2.6	2.8	7.0	7.0	-		
	U_a by $U_{C,A}$	2.4	7.5	3.2	4.4	8.5	-	1.4	1.5	1.2	1.7	4.5	-		
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.5	1.4	1.4	1.5	1.3	-	17.1	16.0	15.3	15.5	16.9	-		
	U_a	57.6	58.8	60.1	55.5	58.0	-	47.7	47.2	47.0	47.6	48.2	-		

ตารางที่ ง.31 ชั้นทดสอบ A3 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.7	2	a/W	0.304	0.304	0.304	0.304	0.304	0.304	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2
	4	a/W	0.361	0.362	0.362	0.362	0.362	0.361	0.360	0.360	0.360	0.360	0.360	0.360
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	31.9	48.6	77.0	63.0	80.4	90.2	13.4	10.8	12.0	10.3	12.9	19.1
		U_a by $U_{C,A}$	31.4	40.2	38.5	47.7	58.8	76.7	9.6	9.0	8.2	12.0	15.8	19.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.3	0.2	0.5	0.9	0.9	24.1	12.0	8.9	17.2	24.3	33.3
		U_a	72.2	84.8	103.1	97.3	114.6	131.3	62.0	57.8	57.3	59.5	63.3	69.6
	6	a/W	0.421	0.421	0.422	0.421	0.421	0.421	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	31.6	48.2	76.2	62.5	79.7	89.4	12.6	10.1	11.3	9.7	12.1	17.5
		U_a by $U_{C,A}$	23.8	34.1	17.6	53.1	55.0	73.2	9.0	6.2	6.4	8.2	9.2	17.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.6	0.4	0.3	1.2	1.2	0.7	22.7	12.7	11.3	17.1	23.7	30.3
		U_a	69.0	81.8	96.5	99.6	112.1	128.6	59.0	55.0	55.0	56.4	59.3	65.3
	8	a/W	0.484	0.484	0.484	0.484	0.484	0.485	0.482	0.482	0.482	0.482	0.483	0.483
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	30.8	46.9	73.8	60.7	77.4	86.8	11.7	9.4	10.4	9.0	11.2	15.5
		U_a by $U_{C,A}$	18.7	24.2	11.4	20.6	40.8	37.1	5.5	5.8	4.8	6.8	10.4	13.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.1	0.6	0.5	1.4	0.6	0.9	21.6	14.3	13.3	17.7	21.8	28.7
		U_a	66.4	76.8	93.2	84.9	103.8	109.6	55.5	52.7	52.5	53.7	56.2	60.6
	10	a/W	0.537	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.535	0.535	0.536	0.536	0.536	0.536
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	29.5	45.0	70.0	57.9	73.9	82.8	10.7	8.6	9.6	8.2	10.3	13.5
		U_a by $U_{C,A}$	15.2	18.1	5.6	22.1	28.8	21.7	7.0	5.2	4.0	4.4	10.2	4.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.1	0.7	0.8	1.3	1.2	1.5	21.0	14.7	13.9	17.0	19.8	26.5
		U_a	63.8	72.9	88.8	82.5	96.2	101.4	53.2	50.5	50.3	51.1	53.2	56.0
	12	a/W	0.596	0.596	0.596	0.596	0.596	-	0.594	0.594	0.594	0.594	0.595	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.6	42.0	64.2	53.7	68.4	-	9.5	7.6	8.5	7.3	9.1	-
		U_a by $U_{C,A}$	11.1	10.9	2.5	15.3	23.6	-	3.5	3.3	3.2	4.0	9.2	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.1	1.1	1.1	1.7	1.2	-	19.4	15.2	14.6	17.0	19.5	-
		U_a	60.3	68.0	82.9	76.6	89.4	-	50.1	48.3	48.3	48.9	50.8	-

ง.5.1.4 ชั้นทดสอบ A4

ตารางที่ ง.32 ชั้นทดสอบ A4 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

		R	0.3						0.7						
		ลำดับขอบหน้า	1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W		0.263	0.321	0.382	0.442	0.506	0.568	0.625	0.288	0.347	0.409	0.470	0.532	0.596
	U_a by $U_{W,A}$		0.1	1.4	2.6	3.9	5.5	7.0	8.6	0.1	1.4	2.7	4.1	5.6	7.3
	U_a by $U_{W,B}$		0.3	3.7	7.2	10.7	14.8	19.1	23.3	0.3	3.8	7.3	11.0	15.2	19.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$		19.4	19.0	18.9	18.7	17.9	16.8	15.3	20.5	20.3	20.1	19.6	18.7	17.2
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$		51.4	50.4	50.1	49.4	47.5	44.4	40.5	51.3	50.8	50.4	49.2	46.8	43.1
วิธี C_{MOD}	a/W		0.262	0.319	0.379	0.440	0.504	0.566	0.624	0.287	0.346	0.407	0.469	0.530	0.594
	U_a by $U_{W,A}$		0.1	1.5	2.9	4.5	6.2	7.9	9.5	0.1	1.5	3.1	4.7	6.4	8.2
	U_a by $U_{W,B}$		0.2	4.0	8.0	12.1	16.7	21.3	25.8	0.1	4.1	8.3	12.7	17.4	22.3
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$		19.3	18.5	17.5	16.4	15.0	13.4	11.7	20.5	19.6	18.5	17.1	15.5	13.6
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$		51.1	48.8	46.3	43.4	39.6	35.4	31.0	51.5	49.1	46.3	43.0	39.0	34.2

ตารางที่ ง.33 ชั้นทดสอบ A4 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5		10		1		5		10	
			10	10	10	10	1	5	10	10	10	10		
0.3	1	a/W	0.263	0.263	0.263	0.263	0.263	0.263	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261
		U_a	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.6	54.6	54.6	54.6	54.6	54.6
	3	a/W	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.318	0.318	0.318	0.318	0.317	0.318
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.8	30.0	36.8	44.7	42.4	56.8	8.1	5.2	7.1	6.6	8.0	19.6
		U_a by $U_{C,A}$	21.3	26.5	25.3	28.0	32.6	34.6	5.0	4.1	4.1	6.8	9.1	6.6
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.1	0.4	0.1	0.3	12.9	7.9	6.7	10.1	13.2	18.7
		U_a	63.6	67.2	70.1	75.5	76.0	85.7	54.8	53.4	53.4	54.2	55.4	59.3
	5	a/W	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.379	0.378	0.378	0.378	0.378	0.379
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.7	29.9	36.6	44.4	42.1	56.5	7.7	5.0	6.8	6.3	7.6	18.6
		U_a by $U_{C,A}$	19.0	23.3	23.6	22.9	22.8	27.0	4.7	2.8	3.8	4.9	6.6	3.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3	14.1	11.5	10.9	13.1	14.9	18.7
		U_a	62.9	66.1	69.4	73.7	72.3	82.8	53.0	51.9	52.0	52.6	53.4	56.9
	7	a/W	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.439	0.439	0.438	0.438	0.438	0.439
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.5	29.5	36.1	43.8	41.5	55.7	7.2	4.7	6.3	5.9	7.1	17.4
		U_a by $U_{C,A}$	15.0	17.7	15.2	13.4	17.4	17.8	3.8	4.0	3.1	5.0	4.3	5.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.3	0.3	0.5	0.4	0.7	16.8	13.9	14.1	16.0	16.6	19.1
		U_a	61.6	64.1	66.7	70.8	70.3	79.6	51.7	50.5	50.7	51.4	51.7	54.9

ตารางที่ ง.33 ขึ้นทดสอบ A4 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.3	9	a/W	0.505	0.505	0.505	0.505	0.505	0.506	0.503	0.503	0.503	0.502	0.502	0.503
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	24.7	28.6	34.8	42.1	39.9	53.5	6.6	4.3	5.8	5.4	6.5	15.9
		U_a by $U_{C,A}$	15.0	14.6	11.4	11.1	11.8	11.8	2.8	2.2	2.7	3.7	3.8	7.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7	0.9	17.7	16.4	16.1	16.2	17.6	19.6
		U_a	60.5	62.1	64.6	68.7	67.5	76.4	49.8	49.1	49.2	49.2	49.8	52.9
	11	a/W	0.567	0.567	0.567	0.566	0.566	-	0.565	0.564	0.564	0.564	0.563	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.6	27.2	32.7	39.4	37.4	-	5.9	3.8	5.2	4.8	5.8	-
		U_a by $U_{C,A}$	11.6	12.6	8.5	9.9	10.2	-	2.4	2.1	2.1	2.7	4.7	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	-	17.4	17.0	16.5	16.9	18.1	-
		U_a	58.0	59.7	61.7	65.7	64.6	-	47.9	47.5	47.5	47.6	48.3	-
	13	a/W	0.624	0.624	0.624	0.624	0.624	-	0.623	0.622	0.622	0.622	0.621	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	16.7	27.4	28.9	43.8	31.7	-	5.9	3.6	4.5	3.5	5.9	-
		U_a by $U_{C,A}$	10.1	10.1	8.2	6.5	10.0	-	1.3	1.9	1.3	1.6	2.5	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.4	1.5	1.3	1.4	1.4	-	17.5	15.9	17.3	16.3	16.7	-
		U_a	53.6	57.9	58.3	66.8	60.0	-	46.8	46.0	46.6	46.2	46.6	-
0.7	2	a/W	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.4	55.4	55.4	55.4	55.4	55.4
	4	a/W	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	0.345	0.345	0.345	0.345	0.345	0.346
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	40.4	57.8	69.4	68.2	91.8	88.8	11.7	10.7	10.7	14.9	17.3	16.1
		U_a by $U_{C,A}$	29.7	43.0	51.7	60.2	63.4	48.8	10.8	10.2	9.9	16.2	13.0	11.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.5	0.5	1.8	1.4	25.0	12.1	9.4	18.9	25.5	36.2
		U_a	74.3	90.5	102.5	106.2	124.3	115.3	60.7	56.4	55.8	60.5	62.7	67.2
	6	a/W	0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	0.409	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406	0.407
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	40.1	57.4	68.9	67.7	91.1	88.2	11.0	10.1	10.1	14.1	16.3	15.2
		U_a by $U_{C,A}$	29.4	23.4	28.0	44.7	54.3	38.5	8.9	7.4	9.7	9.6	10.8	6.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	0.2	0.7	0.5	1.8	0.8	23.8	14.1	11.7	18.7	23.7	32.8
		U_a	74.1	82.8	92.4	97.9	119.4	110.8	57.7	54.1	53.8	56.6	59.2	62.6
	8	a/W	0.469	0.469	0.470	0.470	0.470	0.470	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.469
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	39.2	56.0	67.3	66.0	88.9	86.1	10.2	9.3	9.4	13.1	15.1	14.1
		U_a by $U_{C,A}$	16.1	19.1	26.5	33.7	41.8	35.4	6.1	7.4	6.5	10.9	11.7	10.0
U_a by $C/C_{0,B}$		0.5	0.7	0.5	0.5	1.7	1.5	22.2	15.5	13.6	17.6	23.5	31.2	
U_a		68.9	80.3	90.4	91.9	112.3	107.7	54.4	52.0	51.4	54.1	56.9	59.9	

ตารางที่ ง.33 ชั้นทดสอบ A4 $U_{a \text{ by } C_{0,A}}$, $U_{a \text{ by } C_{,A}}$, $U_{a \text{ by } C/C_{0,B}}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1			5	10	20	1			5	10	20
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	10
0.7	10	a/W	0.531	0.531	0.532	0.532	0.532	0.533	0.529	0.529	0.529	0.529	0.530	0.531
		$U_{a \text{ by } U_{C_{0,A}}}$	37.3	53.3	63.9	62.8	84.5	81.8	9.3	8.5	8.5	11.9	13.7	12.7
		$U_{a \text{ by } U_{C,A}}$	11.0	14.1	16.2	24.2	24.2	27.8	5.4	5.0	4.5	5.5	9.3	8.8
		$U_{a \text{ by } C/C_{0,B}}$	1.0	0.8	0.8	0.9	1.8	2.0	21.3	15.7	15.0	18.4	21.8	29.6
		U_a	65.7	76.4	84.6	85.6	102.6	101.3	51.7	49.5	49.2	51.1	53.4	56.7
	12	a/W	0.595	0.595	0.595	0.595	0.595	-	0.593	0.593	0.593	0.593	0.593	-
		$U_{a \text{ by } U_{C_{0,A}}}$	34.3	49.0	58.8	57.8	77.8	-	8.1	7.4	7.4	10.4	12.0	-
		$U_{a \text{ by } U_{C,A}}$	8.6	11.0	11.8	18.1	17.2	-	3.9	4.1	3.8	3.8	5.6	-
		$U_{a \text{ by } C/C_{0,B}}$	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	-	20.7	16.3	15.2	18.1	19.3	-
		U_a	62.1	71.6	78.8	79.2	94.6	-	49.3	47.5	47.1	48.7	49.7	-

ง.5.1.5 ชั้นทดสอบ A5

ตารางที่ ง.34 ชั้นทดสอบ A5 $U_{a \text{ by } W}$ และ $U_{a \text{ by } a_{s0,3p}}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1					0.5				
		1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
วิธี C_{BFS}	a/W	0.262	0.323	0.384	0.448	0.509	0.289	0.352	0.415	0.477	0.538
	$U_{a \text{ by } U_{W,A}}$	0.1	1.6	2.9	4.5	6.0	0.1	1.6	3.0	4.6	6.2
	$U_{a \text{ by } U_{W,B}}$	0.3	3.9	7.4	11.2	15.0	24.0	23.8	23.6	22.9	21.8
	$U_{a \text{ by } U_{a_{s0,3p},A}}$	20.2	19.8	19.7	19.3	18.6	0.3	3.9	7.6	11.4	15.5
	$U_{a \text{ by } U_{a_{s0,3p},B}}$	51.4	50.3	50.1	49.2	47.4	51.3	50.8	50.4	49.1	46.6
วิธี C_{MOD}	a/W	0.261	0.322	0.383	0.447	0.508	0.288	0.350	0.414	0.476	0.535
	$U_{a \text{ by } U_{W,A}}$	0.1	1.7	3.3	5.1	6.9	0.1	1.7	3.5	5.3	7.1
	$U_{a \text{ by } U_{W,B}}$	0.2	4.3	8.3	12.8	17.1	24.1	22.9	21.5	19.9	18.1
	$U_{a \text{ by } U_{a_{s0,3p},A}}$	20.1	19.1	18.1	16.9	15.5	0.1	4.3	8.7	13.2	17.7
	$U_{a \text{ by } U_{a_{s0,3p},B}}$	51.1	48.6	46.1	43.0	39.3	51.5	49.0	46.0	42.6	38.6

ตารางที่ ง.35 ขึ้นทดสอบ A5 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.1	1	a/W	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9
	3	a/W	0.323	0.323	0.322	0.321	0.322	0.321	0.322	0.321	0.321	0.320	0.320	0.320
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	11.8	17.8	21.0	16.0	36.9	46.7	2.9	2.3	2.4	3.1	7.4	27.4
		U_a by $U_{C,A}$	14.6	9.4	10.7	20.8	16.1	51.4	4.1	3.0	2.8	4.1	8.2	20.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	9.1	7.1	6.6	8.1	9.1	11.8
		U_a	57.4	57.9	59.2	60.3	67.6	88.2	53.5	53.1	53.0	53.4	54.4	63.8
	5	a/W	0.383	0.383	0.383	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.381	0.381	0.381	0.380
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	11.8	17.7	20.9	16.0	36.7	46.5	2.8	2.2	2.3	3.0	7.0	26.5
		U_a by $U_{C,A}$	9.0	8.3	2.3	8.4	15.0	25.0	2.9	2.6	3.1	2.5	5.8	19.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	12.3	11.4	10.8	11.1	12.1	14.1
		U_a	56.4	57.8	58.3	57.3	67.3	75.8	52.0	51.8	51.7	51.8	52.6	61.7
	7	a/W	0.448	0.448	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.446	0.446	0.446	0.446	0.445
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	11.7	17.4	20.5	15.3	31.3	47.1	2.6	2.0	2.1	2.5	6.5	25.5
		U_a by $U_{C,A}$	8.9	4.9	0.2	11.9	12.7	13.1	1.8	2.4	1.7	1.3	3.3	11.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	15.0	15.1	14.1	14.5	14.7	16.4
		U_a	56.2	57.2	58.0	57.6	63.9	73.1	50.5	50.6	50.3	50.4	50.9	58.2
	9	a/W	0.508	0.508	0.507	0.507	0.507	-	0.507	0.507	0.506	0.506	0.506	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	12.1	18.7	22.4	14.7	30.1	-	2.5	1.7	2.0	2.3	5.9	-
		U_a by $U_{C,A}$	7.2	3.6	2.1	5.3	12.6	-	1.7	1.5	1.5	2.7	4.0	-
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	-	16.5	16.7	15.9	16.3	17.0	-	
U_a		55.2	56.7	58.0	55.7	62.6	-	49.1	49.1	48.9	49.1	49.7	-	
0.5	2	a/W	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288
		U_a	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.8	56.8	56.8	56.8	56.8	56.8
	4	a/W	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	21.0	20.4	28.1	41.7	33.3	37.1	7.3	6.1	6.6	6.3	8.6	9.6
		U_a by $U_{C,A}$	13.5	18.7	22.8	23.2	26.9	24.9	4.5	4.7	5.1	5.6	10.5	7.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	12.0	7.4	6.8	9.8	12.2	16.3
		U_a	61.5	62.7	66.9	73.8	70.7	71.8	56.2	55.3	55.3	55.8	57.2	57.9
	6	a/W	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	20.8	20.2	27.9	41.3	33.0	36.8	6.9	5.7	6.2	5.9	8.1	9.1
		U_a by $U_{C,A}$	8.3	14.8	13.5	13.6	18.0	14.9	4.3	5.1	4.3	4.7	7.7	4.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.7	13.0	11.2	10.2	11.9	13.0	16.6
		U_a	60.5	61.5	64.2	71.1	67.6	68.8	53.9	53.4	53.2	53.6	54.5	55.2

ตารางที่ ง.35 ชั้นทดสอบ A5 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.5	8	a/W	0.477	0.477	0.477	0.477	0.476	0.477	0.475	0.475	0.475	0.475	0.475	0.475
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	20.3	19.7	27.1	40.3	32.1	35.8	6.4	5.3	5.7	5.5	7.5	8.4
		U_a by $U_{C,A}$	6.4	10.0	8.6	11.3	16.6	11.3	3.4	3.0	2.9	4.6	5.0	2.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	1.2	15.3	13.4	13.3	13.8	15.0	16.5
		U_a	59.5	59.8	62.4	69.5	66.3	67.1	51.9	51.3	51.3	51.5	52.1	52.6
	10	a/W	0.537	0.537	0.537	0.536	0.536	-	0.535	0.535	0.534	0.534	0.534	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	19.3	18.7	25.8	38.3	30.5	-	5.8	4.8	5.2	5.0	6.8	-
		U_a by $U_{C,A}$	6.0	6.7	8.7	9.5	12.6	-	2.4	2.4	2.3	3.2	5.1	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	-	15.8	14.8	14.3	14.9	17.8	-
		U_a	57.7	57.6	60.6	66.9	63.4	-	49.7	49.3	49.2	49.4	50.8	-

ง.5.1.6 ชั้นทดสอบ A6

ตารางที่ ง.36 ชั้นทดสอบ A6 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1					0.5				
		1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
วิธี C_{BFS}	a/W	0.254	0.320	0.384	0.439	0.505	0.288	0.347	0.412	0.471	0.529
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.6	3.0	4.2	5.8	0.1	1.4	2.8	4.2	5.7
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.2	7.8	11.1	15.2	23.4	23.2	23.0	22.4	21.4
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	23.9	23.3	23.2	22.9	22.0	0.3	3.8	7.5	11.1	15.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.2	49.9	49.2	47.3	51.3	50.8	50.4	49.2	47.0
วิธี C_{MOD}	a/W	0.253	0.317	0.381	0.437	0.502	0.287	0.346	0.411	0.470	0.527
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.7	3.3	4.8	6.5	0.1	1.6	3.3	4.9	6.5
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	4.5	8.7	12.5	17.1	23.5	22.4	21.0	19.6	17.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	23.7	22.5	21.3	20.0	18.3	0.1	4.2	8.6	12.9	17.1
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	50.9	48.3	45.7	43.1	39.3	51.5	49.1	46.1	42.9	39.2

ตารางที่ ง.37 ชั้นทดสอบ A6 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}						
			1		5	10	20	1		5	10	20			
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10		
0.1	1	a/W	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253
		U_a	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.1	56.1	56.1	56.1	56.1	56.1
	3	a/W	0.320	0.319	0.319	0.319	0.319	0.318	0.318	0.318	0.317	0.317	0.316	0.316	0.316
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.2	15.1	12.2	20.6	28.3	57.2	4.7	3.3	3.3	4.6	8.1	33.4	
		U_a by $U_{C,A}$	8.8	12.7	12.4	20.5	20.8	34.3	3.0	3.4	3.3	3.7	7.4	17.9	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	9.5	7.6	6.9	8.6	9.4	12.5	
		U_a	58.0	58.9	58.2	62.7	65.7	86.8	54.6	54.3	54.2	54.6	55.5	66.8	
	5	a/W	0.384	0.384	0.383	0.383	0.383	0.382	0.381	0.381	0.381	0.380	0.380	0.381	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.2	15.0	12.1	20.5	28.1	56.9	4.4	3.1	3.2	4.4	7.7	31.6	
		U_a by $U_{C,A}$	5.0	7.0	8.6	10.4	11.6	18.5	3.0	3.1	2.7	2.8	5.1	10.5	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.7	13.3	11.9	12.0	12.1	13.5	14.9	
		U_a	57.6	58.0	57.6	60.2	63.4	81.7	53.3	52.9	52.9	53.0	53.9	63.0	
	7	a/W	0.439	0.439	0.438	0.438	0.438	0.438	0.437	0.437	0.436	0.436	0.436	0.437	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.0	14.8	11.9	21.6	28.6	54.0	4.2	2.9	3.0	4.2	7.5	30.4	
		U_a by $U_{C,A}$	6.2	7.8	5.5	7.8	8.8	7.2	1.7	2.3	1.9	2.3	4.4	1.5	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	1.3	15.8	15.0	14.6	15.4	15.7	16.2	
		U_a	57.6	58.0	57.1	60.1	63.1	77.9	52.0	51.8	51.6	52.0	52.6	60.2	
	9	a/W	0.505	0.504	0.504	0.504	0.503	-	0.502	0.502	0.501	0.501	0.501	-	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.5	15.6	10.2	20.7	27.5	-	3.0	2.6	2.8	3.9	6.8	-	
		U_a by $U_{C,A}$	1.9	5.3	4.2	7.2	7.4	-	1.6	1.6	1.3	2.4	2.3	-	
U_a by $C/C_{0,B}$		0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	-	17.6	16.2	16.5	16.9	17.4	-		
U_a		56.4	57.1	55.8	59.0	61.7	-	50.4	49.9	50.0	50.3	50.8	-		
0.5	2	a/W	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	0.287	
		U_a	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	
	4	a/W	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	19.4	14.9	26.8	24.3	36.3	28.9	7.0	3.9	6.1	6.2	7.4	7.1	
		U_a by $U_{C,A}$	12.0	14.7	17.3	18.2	27.4	25.6	4.4	5.7	4.7	6.5	6.6	4.8	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.2	0.2	0.5	0.3	0.3	11.8	7.3	6.5	9.1	11.7	16.6	
		U_a	60.4	59.8	64.4	63.7	72.1	68.0	56.0	55.0	55.0	55.6	56.2	57.2	
	6	a/W	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413	0.412	0.411	0.411	0.411	0.411	0.412	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	19.2	14.8	26.6	24.1	36.0	28.7	6.6	3.7	5.8	5.9	7.0	6.7	
		U_a by $U_{C,A}$	9.9	9.4	13.7	16.8	17.7	19.0	4.7	3.4	3.4	5.6	5.3	3.3	
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.6	0.2	0.2	0.6	0.3	0.5	13.3	10.7	10.5	11.9	13.8	16.6	
		U_a	60.0	58.6	63.5	63.2	68.8	65.7	53.8	52.9	53.0	53.5	54.1	54.6	

ตารางที่ ง.37 ชั้นทดสอบ A6 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.5	8	a/W	0.472	0.471	0.472	0.471	0.471	0.472	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	18.8	14.4	26.0	23.6	35.1	28.0	6.1	3.4	5.4	5.5	6.5	6.2
		U_a by $U_{C,A}$	6.9	10.6	10.8	15.5	18.1	17.1	3.7	3.1	3.8	3.6	3.5	6.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.7	15.4	13.1	13.1	14.2	14.9	17.4
		U_a	58.9	58.2	62.1	62.2	68.0	64.4	52.0	51.0	51.3	51.6	51.9	52.9
	10	a/W	0.529	0.529	0.529	0.529	0.529	-	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	17.9	13.8	24.8	22.5	33.6	-	5.6	3.1	4.9	5.0	6.0	-
		U_a by $U_{C,A}$	5.8	6.4	8.3	13.7	10.8	-	1.9	2.9	2.4	3.8	2.7	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	-	15.6	14.3	14.4	15.2	16.5	-
		U_a	57.3	56.2	60.1	60.2	64.6	-	49.7	49.1	49.3	49.6	50.1	-

ง.5.1.7 ชั้นทดสอบ A7

ตารางที่ ง.38 ชั้นทดสอบ A7 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.3					0.7				
		1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
วิธี C_{BFS}	a/W	0.267	0.330	0.382	0.442	0.501	0.291	0.350	0.410	0.472	0.532
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.0	1.8	2.7	3.6	0.1	0.9	1.8	2.8	3.8
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	4.0	7.0	10.6	14.3	19.6	19.4	19.3	18.8	17.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	19.7	19.3	19.2	19.0	18.3	0.3	3.7	7.2	11.0	15.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.4	50.2	49.5	47.8	51.3	50.9	50.5	49.3	46.9
วิธี C_{MOD}	a/W	0.265	0.329	0.381	0.441	0.499	0.290	0.349	0.408	0.470	0.529
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.1	2.0	3.1	4.1	0.0	1.1	2.1	3.2	4.4
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.4	7.9	12.1	16.3	19.7	18.8	17.7	16.5	15.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	19.6	18.6	17.8	16.7	15.4	0.1	4.1	8.2	12.7	17.1
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.2	48.6	46.5	43.5	40.1	51.5	49.1	46.4	43.0	39.2

ตารางที่ ง.39 ชั้นทดสอบ A7 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.3	1	a/W	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
		U_a	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8
	3	a/W	0.330	0.330	0.330	0.329	0.330	0.330	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	15.5	16.1	25.1	22.1	26.3	34.0	5.1	4.5	4.8	6.2	7.5	7.6
		U_a by $U_{C,A}$	9.3	14.3	16.5	19.8	16.8	16.5	3.2	3.1	3.7	3.8	3.9	4.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	10.6	7.8	7.1	8.6	10.3	13.7
		U_a	57.1	58.3	61.9	61.8	62.5	66.1	53.7	53.2	53.1	53.5	54.0	54.8
	5	a/W	0.382	0.382	0.382	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.381	0.380
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	15.4	16.1	25.0	22.0	26.2	33.9	4.8	4.3	4.6	6.0	7.2	7.2
		U_a by $U_{C,A}$	7.8	11.0	11.8	13.9	13.3	12.3	4.7	4.5	3.5	4.2	3.7	2.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	12.3	10.9	10.5	12.0	13.0	14.5
		U_a	56.9	57.6	60.9	60.2	61.7	65.1	52.4	52.0	51.9	52.4	52.7	53.1
	7	a/W	0.443	0.443	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	15.2	15.8	24.7	20.1	27.5	31.9	4.5	4.1	4.3	5.6	7.2	7.2
		U_a by $U_{C,A}$	5.3	5.8	9.1	12.4	11.8	12.0	3.0	2.6	2.1	4.0	4.1	2.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	15.4	14.3	13.6	14.7	14.8	16.4
		U_a	56.4	56.7	60.2	59.1	61.8	64.0	50.9	50.6	50.4	50.9	51.2	51.6
	9	a/W	0.502	0.501	0.501	0.501	0.501	-	0.500	0.500	0.499	0.499	0.499	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	16.6	13.8	27.6	17.3	22.8	-	5.0	3.5	4.3	5.2	6.5	-
		U_a by $U_{C,A}$	4.8	4.9	6.3	11.1	11.0	-	2.6	2.2	2.1	2.2	3.6	-
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	-	16.9	16.3	15.4	16.3	16.7	-	
U_a		56.0	55.2	60.3	57.1	59.0	-	49.4	49.1	48.9	49.3	49.7	-	
0.7	2	a/W	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291
		U_a	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	55.1	55.1	55.1	55.1	55.1	55.1
	4	a/W	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.8	38.4	51.0	61.6	60.7	51.6	12.0	10.0	9.0	11.3	11.3	14.1
		U_a by $U_{C,A}$	21.4	31.2	39.7	37.3	32.5	40.3	9.5	7.6	7.5	8.7	9.1	11.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.6	0.1	0.8	0.3	0.4	18.6	9.7	7.8	13.6	18.7	26.4
		U_a	64.9	73.7	84.6	90.4	87.9	85.3	58.0	55.1	54.6	56.3	57.8	61.7
	6	a/W	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.410
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	27.6	38.1	50.7	61.1	60.3	51.2	11.3	9.4	8.5	10.7	10.7	13.3
		U_a by $U_{C,A}$	13.0	23.4	28.1	41.9	33.1	33.5	9.3	7.7	8.7	9.7	8.4	5.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.6	0.3	1.6	1.5	0.5	17.8	12.2	10.5	14.3	18.6	24.4
		U_a	62.5	70.5	79.6	92.1	87.8	82.0	55.4	53.3	52.9	54.4	55.4	57.7

ตารางที่ ง.39 ชั้นทดสอบ A7 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{c,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.7	8	a/W	0.473	0.473	0.473	0.473	0.473	0.473	0.471	0.471	0.471	0.471	0.471	0.471
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	26.9	37.3	49.4	59.6	58.8	50.0	10.5	8.7	7.9	9.9	9.9	12.3
		U_a by $U_{C_{c,A}}$	11.1	18.2	15.3	24.6	30.8	18.9	4.5	3.6	5.2	4.8	8.9	3.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.8	0.4	0.6	2.0	2.3	18.1	13.5	13.1	15.8	18.2	22.9
		U_a	61.3	68.1	74.7	84.1	85.5	75.9	52.5	50.7	50.5	51.6	53.0	54.6
	10	a/W	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	-	0.530	0.530	0.529	0.529	0.529	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.6	35.8	47.1	56.8	56.0	-	9.6	8.0	7.2	9.0	9.1	-
		U_a by $U_{C_{c,A}}$	11.2	16.0	12.4	18.3	16.4	-	3.7	3.2	3.4	3.7	8.7	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.3	0.9	0.7	0.9	1.6	-	19.1	15.3	15.0	16.7	19.7	-
		U_a	59.6	65.6	71.6	79.5	78.5	-	50.4	48.8	48.6	49.5	51.2	-

ง.5.1.8 ชั้นทดสอบ A8

ตารางที่ ง.40 ชั้นทดสอบ A8 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.3					0.7				
		1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
วิธี C_{BFS}	a/W	0.266	0.325	0.388	0.447	0.503	0.291	0.355	0.413	0.471	0.529
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.7	3.2	4.8	6.3	0.1	1.8	3.2	4.8	6.5
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.8	7.3	10.8	14.4	23.1	22.9	22.7	22.2	21.2
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	23.6	23.2	23.1	22.7	22.0	0.3	4.0	7.3	10.9	14.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.4	50.2	49.4	47.7	51.3	50.8	50.5	49.3	47.0
วิธี C_{MOD}	a/W	0.265	0.323	0.385	0.444	0.500	0.291	0.354	0.411	0.469	0.528
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.8	3.6	5.4	7.2	0.1	1.9	3.7	5.5	7.5
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.0	8.2	12.3	16.3	23.2	22.0	20.9	19.4	17.7
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	23.5	22.5	21.3	20.0	18.4	0.1	4.4	8.4	12.6	17.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.2	48.9	46.3	43.4	40.1	51.5	48.9	46.3	43.1	39.3

ตารางที่ ง.41 ชั้นทดสอบ A8 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{CMOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.3	1	a/W	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
		U_a	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.3	56.3	56.3	56.3	56.3	56.3
	3	a/W	0.325	0.325	0.325	0.325	0.325	0.324	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322	0.322
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.9	21.2	26.7	22.9	23.2	28.3	7.4	4.5	4.6	4.5	5.9	8.2
		U_a by $U_{C,A}$	12.0	16.7	17.4	18.1	15.8	26.4	4.0	4.0	3.8	4.6	5.2	6.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	10.5	6.9	6.7	8.3	10.4	13.5
		U_a	58.7	61.9	64.2	62.9	62.4	67.8	55.6	54.8	54.7	55.0	55.6	56.6
	5	a/W	0.388	0.388	0.388	0.387	0.387	0.387	0.386	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.8	21.0	26.6	22.8	23.1	28.2	7.0	4.2	4.3	4.2	5.6	7.8
		U_a by $U_{C,A}$	8.6	12.0	8.5	16.4	15.5	13.8	3.3	2.7	3.0	3.8	4.8	2.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	12.9	10.9	11.0	12.3	12.7	15.7
		U_a	58.1	60.8	62.4	62.5	62.3	64.0	53.9	53.1	53.2	53.5	53.8	54.7
	7	a/W	0.448	0.447	0.447	0.447	0.446	0.446	0.444	0.444	0.443	0.443	0.443	0.443
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.6	20.7	26.2	18.4	22.6	27.9	6.6	4.0	4.1	3.8	5.5	7.7
		U_a by $U_{C,A}$	6.4	7.3	7.4	6.1	10.6	14.1	2.5	2.5	2.6	2.7	3.5	4.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.7	15.0	14.0	13.6	14.6	15.5	16.5
		U_a	57.6	59.8	61.9	58.9	61.0	63.8	52.3	51.8	51.7	52.0	52.4	53.1
	9	a/W	0.504	0.504	0.503	0.503	0.502	-	0.500	0.500	0.500	0.499	0.499	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.7	21.2	29.6	20.2	21.7	-	5.9	3.8	4.1	3.7	5.5	-
		U_a by $U_{C,A}$	4.6	4.9	7.4	4.0	11.2	-	2.8	1.9	1.6	1.8	2.1	-
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	-	16.6	16.1	16.1	16.7	16.7	-	
U_a		56.7	59.0	62.7	58.6	60.0	-	50.8	50.4	50.4	50.6	50.8	-	
0.7	2	a/W	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291
		U_a	56.3	56.3	56.3	56.3	56.3	56.3	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5	56.5
	4	a/W	0.356	0.356	0.356	0.356	0.356	0.356	0.355	0.354	0.354	0.354	0.354	0.355
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	26.2	42.4	60.2	48.5	53.9	63.7	9.3	10.0	8.9	9.1	8.9	6.5
		U_a by $U_{C,A}$	18.8	21.9	27.8	42.5	45.6	42.1	7.8	7.0	7.4	9.2	7.6	6.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.3	0.2	0.6	0.6	0.6	18.1	9.8	8.0	13.3	18.6	24.9
		U_a	64.6	73.6	86.7	85.4	90.1	94.7	58.1	56.1	55.7	57.0	58.2	60.0
	6	a/W	0.413	0.414	0.414	0.414	0.414	0.414	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.412
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	26.0	42.1	59.7	48.2	53.5	63.3	8.8	9.5	8.4	8.6	8.4	6.1
		U_a by $U_{C,A}$	15.4	20.0	18.8	31.4	31.6	24.2	7.1	4.8	5.2	7.2	7.0	8.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.9	19.0	11.8	10.9	14.5	18.2	24.6
		U_a	63.6	72.8	83.9	80.2	83.6	87.8	56.1	54.0	53.7	54.8	55.8	58.1

ตารางที่ ง.41 ชั้นทดสอบ A8 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}						วิธี C_{MOD}					
			1		5	10	20	1		5	10	20		
			1	5	10	10	10	10	1	5	10	10	10	
0.7	8	a/W	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.473	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	25.4	41.1	58.2	47.0	52.3	61.8	8.2	8.8	7.8	8.0	7.8	5.7
		U_a by $U_{C,A}$	15.0	11.0	12.1	27.1	20.5	33.0	4.9	3.9	4.1	5.5	5.9	10.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	1.4	0.6	2.2	18.3	13.6	13.5	16.0	18.3	22.7
		U_a	62.7	69.8	81.2	77.6	78.8	89.3	53.4	52.0	51.8	52.7	53.4	55.5
	10	a/W	0.530	0.530	0.531	0.531	0.531	-	0.528	0.528	0.528	0.528	0.528	-
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	21.1	44.6	58.4	45.7	49.2	-	7.4	9.1	7.2	7.4	7.3	-
		U_a by $U_{C,A}$	9.7	11.2	7.1	12.9	17.6	-	4.2	3.4	3.8	3.3	3.8	-
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	0.8	0.8	1.0	0.7	-	18.1	15.1	14.6	16.5	18.6	-
		U_a	58.9	71.0	79.9	72.0	75.2	-	51.0	50.3	49.8	50.4	51.1	-

ง.5.1.9 ชั้นทดสอบ A9

ตารางที่ ง.42 ชั้นทดสอบ A9 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1							0.5					
		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W	0.266	0.323	0.386	0.443	0.515	0.566	0.622	0.300	0.353	0.411	0.471	0.535	0.596
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.4	2.7	4.0	5.7	7.1	8.7	0.1	1.3	2.5	3.9	5.6	7.2
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.7	7.3	10.7	15.3	18.8	23.0	0.3	3.3	6.7	10.4	14.8	19.3
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.4	24.0	23.9	23.5	22.4	21.2	19.4	23.9	23.8	23.6	23.0	21.9	20.2
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.4	50.2	49.4	47.2	44.6	40.8	51.3	51.0	50.6	49.4	46.9	43.3
วิธี C_{MOD}	a/W	0.264	0.323	0.385	0.443	0.514	0.565	0.622	0.299	0.351	0.409	0.469	0.533	0.594
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.5	3.1	4.6	6.5	8.0	9.6	0.0	1.4	2.9	4.6	6.4	8.2
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.1	8.3	12.2	17.4	21.2	25.6	0.1	3.7	7.7	12.1	17.0	21.8
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.3	23.2	22.0	20.6	18.6	16.9	14.8	24.0	23.0	21.8	20.2	18.3	16.1
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.1	48.8	46.2	43.4	39.1	35.6	31.2	51.6	49.4	46.8	43.4	39.2	34.6

ตารางที่ ง.43 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}				
			1			2	5	1			2	5
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10
0.1	1	a/W	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6
	3	a/W	0.323	0.323	0.323	0.323	0.322	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.6	11.5	10.1	10.2	22.2	4.2	4.7	4.2	4.2	9.7
		U_a by $U_{C,A}$	6.6	6.3	6.3	8.5	18.6	4.5	4.3	3.7	4.4	7.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	12.7	7.9	7.4	8.0	10.2
		U_a	57.4	57.5	57.2	57.6	63.1	56.0	55.2	55.0	55.2	56.5
	5	a/W	0.386	0.386	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.6	11.5	10.0	10.2	22.1	3.9	4.5	4.0	4.0	9.1
		U_a by $U_{C,A}$	5.2	4.6	4.8	6.7	17.9	1.4	1.5	1.4	2.6	6.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	14.0	11.7	11.3	11.5	13.6
		U_a	57.3	57.4	57.2	57.4	62.9	54.0	53.5	53.3	53.4	54.9
	7	a/W	0.444	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.442	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.4	11.3	9.9	10.0	21.8	3.7	4.2	3.7	3.7	8.6
		U_a by $U_{C,A}$	3.6	3.8	3.8	5.9	14.4	1.6	1.6	1.5	2.8	6.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	16.2	14.1	14.0	14.5	14.7
		U_a	57.0	57.2	56.9	57.1	61.7	52.5	52.0	51.9	52.1	53.1
	9	a/W	0.516	0.515	0.515	0.515	0.515	0.514	0.514	0.514	0.514	0.513
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.1	10.7	9.6	9.2	19.9	3.3	3.9	3.5	3.4	7.9
		U_a by $U_{C,A}$	2.3	2.4	2.5	3.9	11.5	1.1	1.0	0.9	2.1	4.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	18.0	16.5	15.9	16.3	16.5
		U_a	55.7	55.8	55.6	55.7	59.4	50.6	50.1	49.9	50.1	50.8
	11	a/W	0.567	0.566	0.566	0.566	0.565	0.565	0.565	0.565	0.564	0.564
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.5	9.9	9.0	7.5	19.5	2.9	3.8	2.0	3.2	7.3
		U_a by $U_{C,A}$	1.9	1.8	1.5	3.1	10.4	0.8	0.7	0.8	1.5	4.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	17.9	17.6	17.0	16.6	17.7
		U_a	54.2	54.3	54.1	54.0	57.8	48.9	48.9	48.5	48.5	49.5
	13	a/W	0.623	0.623	0.622	0.622	0.622	0.622	0.622	0.622	0.621	0.621
U_a by $U_{C_{0,A}}$		6.8	6.8	6.1	6.4	15.1	2.5	2.3	1.6	3.4	6.0	
U_a by $U_{C,A}$		1.2	0.8	1.3	1.7	9.2	0.4	0.5	0.5	1.0	3.7	
U_a by $C/C_{0,B}$		1.3	1.3	1.4	1.2	1.5	17.3	17.4	16.9	16.5	17.2	
U_a		51.9	51.9	51.8	51.9	54.4	47.4	47.4	47.2	47.2	47.8	

ตารางที่ ง.43 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}				
			1			2	5	1			2	5
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10
0.5	2	a/W	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.299	0.299	0.299	0.299	0.299
		U_a	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	4	a/W	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.8	15.4	14.3	13.4	26.0	3.8	4.8	7.1	6.4	10.5
		U_a by U_{C_A}	10.5	8.6	10.1	11.8	20.4	3.3	2.4	2.7	3.9	10.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	18.4	9.4	7.5	9.5	13.6
	6	U_a	59.2	59.1	59.0	59.1	65.3	57.9	55.7	55.7	56.0	58.2
		a/W	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.7	15.3	14.2	13.3	25.8	3.6	4.6	6.7	6.1	9.9
		U_a by U_{C_A}	8.2	8.0	7.7	8.2	18.5	3.1	3.7	3.3	4.0	9.7
	8	U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	17.9	11.2	10.0	11.0	14.1
		U_a	58.8	58.9	58.6	58.4	64.6	55.4	53.7	53.7	53.9	55.9
		a/W	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	14.3	14.9	13.9	13.0	25.2	3.4	4.3	6.2	5.6	9.2
	10	U_a by U_{C_A}	5.9	6.6	7.5	6.8	16.1	7.2	3.0	3.5	3.4	7.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.5	0.4	0.4	0.4	0.7	18.0	12.9	12.5	13.3	15.1
		U_a	57.8	58.0	57.8	57.6	63.2	53.4	51.5	51.7	51.8	53.3
		a/W	0.536	0.535	0.536	0.535	0.535	0.534	0.534	0.533	0.533	0.533
	12	U_a by $U_{C_{0,A}}$	13.6	14.1	13.1	12.3	23.9	3.0	3.8	5.6	5.1	8.3
		U_a by U_{C_A}	4.0	3.8	3.8	4.4	13.9	1.6	1.6	1.4	2.4	6.2
U_a by $C/C_{0,B}$		0.7	0.8	0.8	0.7	1.0	18.2	13.9	14.0	14.4	15.9	
U_a		55.9	56.0	55.8	55.7	60.7	50.4	49.1	49.3	49.4	50.6	
12	a/W	0.596	0.596	0.596	0.595	0.595	0.594	0.594	0.594	0.594	0.594	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	12.6	13.1	12.1	11.4	22.1	2.7	3.4	5.0	4.5	7.3	
	U_a by U_{C_A}	2.9	2.9	2.6	3.9	12.7	1.2	1.1	1.1	1.9	5.6	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.1	1.3	1.1	1.2	1.4	17.0	15.0	14.3	14.7	15.5	
	U_a	53.6	53.7	53.5	53.4	58.0	47.9	47.3	47.2	47.3	48.2	

ง.5.1.10 ชั้นทดสอบ A10

ตารางที่ ง.44 ชั้นทดสอบ A10 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1					0.5				
	ลำดับขอบหน้า	1	3	5	7	9	2	4	6	8	10
วิธี C_{BFS}	a/W	0.259	0.326	0.381	0.444	0.502	0.291	0.351	0.407	0.465	0.528
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	2.4	4.1	6.2	8.3	0.2	2.1	3.9	5.9	8.3
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	4.2	7.4	11.1	14.8	24.2	24.0	23.8	23.3	22.2
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.7	24.1	24.0	23.6	22.8	0.3	3.8	7.0	10.6	14.7
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.3	50.0	49.3	47.6	51.3	50.9	50.5	49.4	47.1
วิธี C_{MOD}	a/W	0.258	0.324	0.379	0.441	0.500	0.290	0.350	0.405	0.463	0.526
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	2.6	4.6	7.0	9.3	0.1	2.3	4.5	6.8	9.5
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.6	8.3	12.5	16.7	24.3	23.2	22.0	20.5	18.6
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.5	23.2	22.1	20.7	19.1	0.1	4.2	8.0	12.2	16.9
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.0	48.4	46.1	43.1	39.7	51.5	49.1	46.6	43.5	39.4

ตารางที่ ง.45 ชั้นทดสอบ A10 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{A,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}				
			1			2	5	1			2	5
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10
0.1	1	a/W	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.258	0.258	0.258	0.258	0.258
		U_a	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6
	3	a/W	0.326	0.325	0.325	0.325	0.325	0.324	0.324	0.323	0.323	0.323
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	7.3	6.3	5.3	7.3	18.0	5.6	4.7	4.9	4.1	8.1
		U_a by $U_{C,A}$	5.1	4.6	4.7	5.7	16.2	3.2	2.7	2.2	3.0	7.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	10.4	7.8	7.1	7.8	8.5
		U_a	56.7	56.5	56.4	56.7	61.0	55.3	54.8	54.7	54.8	55.7
	5	a/W	0.381	0.381	0.380	0.380	0.380	0.379	0.379	0.378	0.378	0.378
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	7.2	6.3	5.3	7.3	17.9	5.4	4.5	4.7	3.9	7.7
		U_a by $U_{C,A}$	3.7	2.7	3.5	5.4	14.2	1.6	1.7	1.8	2.7	6.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	12.8	11.4	11.2	11.2	12.0
		U_a	56.7	56.5	56.5	56.9	60.6	53.9	53.5	53.5	53.5	54.4
	7	a/W	0.444	0.444	0.443	0.443	0.443	0.442	0.441	0.441	0.441	0.440
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	7.5	5.4	5.0	7.4	18.5	5.1	4.2	4.0	3.9	6.5
		U_a by $U_{C,A}$	2.8	2.7	2.4	4.7	10.0	1.4	1.3	1.2	1.8	5.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	15.1	14.9	14.2	14.3	15.3
		U_a	56.7	56.4	56.4	56.8	59.9	52.4	52.3	52.1	52.2	52.9

ตารางที่ ง.45 ชั้นทดสอบ A10 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาสภาวะทดสอบ ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 3 (ต่อ)

R	ลำดับ ขอบหน้า	f (Hz)	วิธี C_{BFS}					วิธี C_{MOD}				
			1			2	5	1			2	5
			1	5	10	10	10	1	5	10	10	10
0.1	9	a/W	0.502	0.502	0.502	0.501	0.501	0.500	0.499	0.499	0.499	0.499
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.5	4.9	4.7	7.3	17.7	4.7	4.1	3.9	3.8	5.2
		U_a by $U_{C,A}$	1.8	1.6	1.7	3.1	10.5	0.8	1.0	0.6	1.6	5.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	16.6	15.4	16.0	16.6	16.6
		U_a	55.8	55.6	55.6	56.0	59.1	51.1	50.6	50.8	51.0	51.4
0.5	2	a/W	0.291	0.291	0.291	0.291	0.291	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290
		U_a	56.7	56.7	56.7	56.7	56.7	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	4	a/W	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.3	9.8	8.4	9.8	22.8	6.9	6.9	6.9	5.1	10.7
		U_a by $U_{C,A}$	7.3	7.0	7.4	8.1	17.2	6.1	5.3	6.1	6.1	9.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	13.3	7.8	6.6	8.1	10.6
		U_a	57.8	57.7	57.5	57.8	63.2	56.8	55.7	55.7	55.7	57.3
	6	a/W	0.407	0.407	0.407	0.407	0.407	0.405	0.405	0.405	0.405	0.405
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.2	9.8	8.3	9.7	22.6	6.5	6.5	6.6	4.8	10.2
		U_a by $U_{C,A}$	5.8	5.8	5.4	6.2	18.1	2.4	2.4	2.3	3.4	8.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	14.3	10.6	9.8	10.4	12.0
		U_a	57.6	57.6	57.3	57.6	63.4	54.7	53.8	53.7	53.7	55.3
	8	a/W	0.466	0.466	0.465	0.465	0.465	0.463	0.463	0.463	0.463	0.463
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.0	9.6	8.1	9.5	22.1	6.1	6.1	6.2	4.5	9.5
		U_a by $U_{C,A}$	4.0	4.4	3.7	5.8	15.8	1.9	2.0	1.9	2.4	7.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	15.3	12.3	12.1	13.6	14.2
		U_a	57.0	57.0	56.7	57.1	62.3	52.7	51.9	51.9	52.1	53.4
	10	a/W	0.528	0.528	0.528	0.527	0.527	0.526	0.526	0.526	0.525	0.525
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.5	9.1	7.8	9.1	21.1	5.5	5.5	5.6	4.1	8.6
		U_a by $U_{C,A}$	2.7	2.5	2.8	4.1	12.7	1.0	1.0	1.0	1.9	5.0
U_a by $C/C_{0,B}$		0.8	0.7	0.7	0.7	1.1	16.1	13.8	14.2	14.4	15.2	
U_a		55.7	55.6	55.4	55.7	60.1	50.6	50.0	50.1	50.0	51.1	

ง.5.2 หมวดการวิเคราะห์ข้อมูล

หัวข้อนี้จะนำเสนอ U_a ทั้ง 8 ตัว จากวิธี C_{BFS} และวิธี C_{CMOD} ของชั้นทดสอบ A1, A2 และ A9 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 โดยจะนำเสนอที่หัวข้อ ง.5.2.1 – ง.5.2.3 ตามลำดับ U_a ตัวที่ 1 ถึง 4 ที่นำเสนอของแต่ละของชั้นทดสอบได้จากเงื่อนไข $\%Unload = 100 \%$, $DC = 10000$ ข้อมูล และ $Con. = 10$ รอบ U_a ตัวที่ 5 ถึง 8 ของแต่ละของชั้นทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข $\%Unload$, DC , $Con.$ และความยาวรอยร้าว เป็นค่าต่าง ๆ ส่วนเงื่อนไข รูปร่างคลื่น จะเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนชั้นทดสอบ โดย U_a ตัวที่ 5 ถึง 8 จะนำเสนอแยกเป็น 2 ตารางเป็นของวิธี C_{BFS} และ วิธี C_{CMOD}

ง.5.2.1 ชั้นทดสอบ A1

ตารางที่ ง.46 ชั้นทดสอบ A1 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1						0.5						
		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W	0.274	0.341	0.392	0.450	0.510	0.568	0.627	0.321	0.361	0.418	0.481	0.542	0.603
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.5	2.5	3.8	5.1	6.6	8.1	0.1	0.9	2.1	3.5	5.0	6.7
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	4.2	7.2	10.6	14.5	18.6	23.0	0.3	2.6	5.9	9.8	14.2	18.8
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	20.4	20.1	20.0	19.7	18.9	17.7	16.1	20.4	20.3	20.1	19.6	18.5	17.0
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	50.5	50.3	49.5	47.6	44.6	40.6	51.4	51.2	50.8	49.4	46.8	43.0
วิธี C_{CMOD}	a/W	0.273	0.340	0.391	0.449	0.509	0.568	0.627	0.321	0.360	0.417	0.480	0.541	0.603
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.6	2.9	4.3	5.9	7.4	9.0	< 0.1	1.0	2.5	4.1	5.8	7.6
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.7	8.1	12.2	16.6	21.0	25.6	0.1	2.9	7.0	11.7	16.5	21.5
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	20.4	19.3	18.4	17.3	15.8	14.2	12.4	20.4	19.8	18.7	17.3	15.6	13.7
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	48.6	46.4	43.4	39.8	35.7	31.1	51.6	49.9	47.2	43.5	39.3	34.5

ตารางที่ ง.47 ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	$\%Unload$ DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
	3	a/W	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.8	24.1	24.6	28.0	149.1	148.3	151.5	156.3	338.0	337.6	341.5	346.6
		U_a by $U_{C,A}$	18.6	20.0	21.2	21.8	144.1	145.2	146.9	148.2	323.7	324.1	326.1	329.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	0.5	0.7
	5	U_a	62.4	62.9	63.5	65.1	214.4	214.6	218.0	222.2	471.1	471.1	475.4	481.2
		a/W	0.392	0.392	0.392	0.392	0.393	0.393	0.393	0.393	0.394	0.394	0.394	0.394
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.7	24.0	24.5	27.8	148.4	147.6	150.8	155.5	336.2	335.9	339.8	344.8
		U_a by $U_{C,A}$	8.7	9.5	10.9	12.9	90.9	91.9	92.2	95.9	211.2	212.8	213.3	217.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5
	U_a	60.2	60.4	60.9	62.7	182.4	182.3	185.0	190.7	400.8	401.4	404.9	411.2	

ตารางที่ ง.47 ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	7	a/W	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.451	0.451	0.451	0.451
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.3	23.6	24.1	27.4	145.9	145.2	148.3	153.0	330.7	330.4	334.2	339.2
		U_a by $U_{C,A}$	8.9	9.1	9.5	9.7	91.1	91.4	92.5	95.0	210.8	211.4	213.1	216.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5
		U_a	59.9	60.0	60.3	61.7	180.5	180.0	183.1	188.2	396.0	396.0	400.1	405.9
	9	a/W	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.2	23.6	24.4	28.8	133.0	132.9	135.5	140.9	303.3	303.2	306.2	312.1
		U_a by $U_{C,A}$	5.9	6.3	6.5	7.5	74.5	75.6	76.6	78.4	170.7	171.9	173.1	175.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.9
		U_a	58.6	58.8	59.1	61.2	161.6	161.9	164.5	169.9	352.1	352.7	355.8	361.8
	11	a/W	0.568	0.568	0.568	0.567	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	24.0	23.9	24.4	27.6	129.7	130.3	132.9	138.6	295.5	296.3	299.9	304.6
		U_a by $U_{C,A}$	5.2	5.6	5.7	5.9	64.8	65.5	66.2	67.7	147.8	148.6	149.1	150.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		U_a	57.4	57.4	57.7	59.1	154.0	154.8	157.3	162.8	334.5	335.5	338.9	343.6
13	a/W	0.626	0.626	0.626	0.626	0.627	0.627	0.627	0.627	0.628	0.628	0.628	0.627	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	15.7	15.4	16.7	18.0	115.9	119.1	123.7	130.2	267.8	272.1	276.0	280.4	
	U_a by $U_{C,A}$	2.8	3.1	3.3	3.6	44.5	45.0	45.4	46.6	100.9	102.0	103.0	104.7	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
	U_a	52.6	52.5	52.9	53.3	133.9	136.8	140.9	147.0	290.5	294.9	298.8	303.5	
50	1	a/W	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	
	3	a/W	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.4	9.5	9.7	11.1	59.0	58.7	60.0	61.8	133.7	133.6	135.1	137.1
		U_a by $U_{C,A}$	7.4	7.9	8.4	8.6	57.0	57.5	58.1	58.6	128.1	128.3	129.1	130.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	0.5	0.7
		U_a	55.9	56.0	56.1	56.3	98.5	98.6	99.8	101.2	193.0	193.1	194.7	196.9
	5	a/W	0.392	0.392	0.392	0.392	0.393	0.393	0.393	0.393	0.394	0.394	0.394	0.394
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.4	9.5	9.7	11.0	58.7	58.4	59.7	61.5	133.0	132.9	134.4	136.4
		U_a by $U_{C,A}$	3.4	3.8	4.3	5.1	35.9	36.4	36.5	38.0	83.5	84.2	84.4	86.0
U_a by $C/C_{0,B}$		0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	
U_a		55.6	55.6	55.7	56.0	87.9	87.9	88.8	90.6	166.3	166.5	167.9	170.3	

ตารางที่ ง.47 ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	7	a/W	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.451	0.451	0.451	0.451
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.2	9.3	9.5	10.8	57.7	57.4	58.7	60.5	130.9	130.7	132.2	134.2
		U_a by $U_{C,A}$	3.5	3.6	3.8	3.8	36.0	36.2	36.6	37.6	83.4	83.7	84.3	85.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5
		U_a	55.3	55.3	55.4	55.6	87.1	87.0	88.0	89.7	164.4	164.5	166.0	168.2
	9	a/W	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.2	9.3	9.6	11.4	52.6	52.6	53.6	55.8	120.0	120.0	121.2	123.5
		U_a by $U_{C,A}$	2.4	2.5	2.6	3.0	29.5	29.9	30.3	31.0	67.5	68.0	68.5	69.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.9
		U_a	54.3	54.3	54.4	54.8	80.6	80.7	81.5	83.3	147.7	147.9	149.1	151.3
	11	a/W	0.568	0.568	0.568	0.567	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.5	9.5	9.7	10.9	51.3	51.5	52.6	54.8	116.9	117.2	118.7	120.5
		U_a by $U_{C,A}$	2.1	2.2	2.3	2.3	25.6	25.9	26.2	26.8	58.5	58.8	59.0	59.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		U_a	52.8	52.8	52.9	53.1	77.4	77.6	78.4	80.1	140.7	141.1	142.3	144.1
100	1	a/W	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	
	3	a/W	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.6	6.6	6.8	7.7	41.2	40.9	41.8	43.1	93.3	93.2	94.3	95.7
		U_a by $U_{C,A}$	5.1	5.5	5.8	6.0	39.8	40.1	40.6	40.9	89.4	89.5	90.0	90.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	0.5	0.7
		U_a	55.2	55.3	55.3	55.4	79.1	79.1	79.8	80.7	140.2	140.2	141.3	142.8
	5	a/W	0.392	0.392	0.392	0.392	0.393	0.393	0.393	0.393	0.394	0.394	0.394	0.394
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.5	6.6	6.8	7.7	41.0	40.8	41.6	42.9	92.8	92.7	93.8	95.2
		U_a by $U_{C,A}$	2.4	2.6	3.0	3.6	25.1	25.4	25.5	26.5	58.3	58.8	58.9	60.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5
		U_a	55.1	55.1	55.1	55.3	72.8	72.7	73.3	74.4	122.5	122.6	123.5	125.1
	7	a/W	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.451	0.451	0.451	0.451
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.4	6.5	6.7	7.6	40.3	40.1	41.0	42.3	91.3	91.2	92.3	93.7
		U_a by $U_{C,A}$	2.5	2.5	2.6	2.7	25.2	25.2	25.6	26.2	58.2	58.4	58.9	59.7
U_a by $C/C_{0,B}$		0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	
U_a		54.9	54.9	54.9	55.0	72.2	72.2	72.8	73.7	121.2	121.2	122.3	123.7	

ตารางที่ ง.48 ขึ้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
	3	a/W	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.340	0.340	0.340	0.340
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.7	4.6	4.6	4.9	73.9	74.5	75.2	76.7	170.8	171.8	172.7	174.7
		U_a by $U_{C,A}$	3.4	3.4	3.5	4.0	67.5	68.1	68.7	70.2	155.9	156.7	157.6	159.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.0	11.5	14.5	19.3	7.5	14.1	18.6	25.0	9.1	21.4	29.5	41.3
		U_a	53.3	54.1	54.8	56.3	113.3	114.6	116.1	119.1	237.3	239.3	241.5	246.0
	5	a/W	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.4	4.4	4.4	4.6	70.5	71.1	71.8	73.2	163.1	164.1	164.9	166.8
		U_a by $U_{C,A}$	3.1	3.0	2.9	3.2	64.9	65.6	66.2	67.6	151.8	152.7	153.7	155.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.4	12.7	15.2	18.8	10.6	14.6	18.1	24.2	11.6	19.8	27.1	37.5
		U_a	52.0	52.5	53.2	54.3	108.9	110.2	111.5	114.4	228.8	230.6	232.6	236.8
	7	a/W	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.448	0.448	0.448	0.448
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.2	4.1	4.1	4.3	66.1	66.6	67.2	68.6	152.9	153.8	154.6	156.4
		U_a by $U_{C,A}$	2.7	2.7	2.7	3.1	54.7	55.2	55.9	57.2	127.7	128.5	129.6	131.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	13.9	15.6	17.6	20.1	14.1	17.3	19.9	24.3	14.6	21.0	26.8	34.7
		U_a	50.7	51.2	51.8	52.8	99.5	100.7	102.0	104.5	205.6	207.2	209.3	212.8
	9	a/W	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.5	3.5	3.6	4.0	55.5	55.9	56.5	57.6	127.6	128.4	129.1	130.6
		U_a by $U_{C,A}$	2.4	2.2	2.1	2.0	44.4	44.7	45.2	46.0	103.5	103.9	104.5	105.8
U_a by $C/C_{0,B}$		16.1	16.8	17.8	19.6	16.0	17.5	19.3	23.1	16.3	20.8	24.8	31.5	
U_a		49.2	49.5	49.8	50.5	86.3	87.1	88.0	90.1	171.5	172.8	174.2	177.2	
11	a/W	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.566	0.566	0.566	0.566	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.1	3.2	3.3	3.6	48.3	48.7	49.2	50.1	110.7	111.4	112.2	113.2	
	U_a by $U_{C,A}$	1.3	1.4	1.5	1.9	36.0	36.4	36.8	37.5	82.6	83.0	83.6	84.6	
	U_a by $C/C_{0,B}$	16.3	17.1	18.0	19.2	16.4	17.9	19.0	21.0	16.5	20.1	23.5	29.0	
	U_a	47.4	47.7	48.1	48.6	76.7	77.4	78.2	79.6	146.1	147.3	148.6	150.9	
13	a/W	0.626	0.626	0.626	0.626	0.625	0.625	0.625	0.625	0.624	0.624	0.624	0.624	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.9	2.8	2.9	3.2	41.3	41.6	42.1	43.0	95.4	95.9	96.5	97.7	
	U_a by $U_{C,A}$	1.0	1.2	1.5	2.1	34.1	34.4	34.7	35.5	77.4	77.8	78.2	79.2	
	U_a by $C/C_{0,B}$	16.4	16.9	17.3	18.7	16.3	17.3	18.3	20.7	16.3	19.1	22.0	27.3	
	U_a	46.2	46.4	46.6	47.2	70.7	71.2	71.9	73.5	131.2	132.2	133.3	135.7	

ตารางที่ ง.48 ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	1	a/W	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2
	3	a/W	0.339	0.339	0.339	0.339	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.8	1.8	1.8	1.9	29.2	29.5	29.7	30.3	67.6	68.0	68.3	69.1
		U_a by $U_{C_{C,A}}$	1.4	1.3	1.4	1.6	26.7	26.9	27.2	27.8	61.7	62.0	62.4	63.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.0	11.5	14.5	19.3	7.5	14.1	18.6	25.0	9.1	21.4	29.5	41.3
		U_a	53.1	53.8	54.5	56.0	66.2	67.5	68.8	71.3	105.9	108.1	110.4	115.1
	5	a/W	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.8	1.7	1.7	1.8	27.9	28.1	28.4	29.0	64.5	64.9	65.3	66.0
		U_a by $U_{C_{C,A}}$	1.2	1.2	1.1	1.3	25.7	25.9	26.2	26.8	60.1	60.4	60.8	61.6
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.4	12.7	15.2	18.8	10.6	14.6	18.1	24.2	11.6	19.8	27.1	37.5
		U_a	51.8	52.3	52.9	54.1	64.2	65.2	66.2	68.6	102.3	104.0	106.1	110.1
	7	a/W	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.448	0.448	0.448	0.448
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.6	1.6	1.6	1.7	26.1	26.4	26.6	27.1	60.5	60.8	61.2	61.9
		U_a by $U_{C_{C,A}}$	1.1	1.1	1.1	1.2	21.6	21.8	22.1	22.6	50.5	50.8	51.3	52.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	13.9	15.6	17.6	20.1	14.1	17.3	19.9	24.3	14.6	21.0	26.7	34.7
		U_a	50.5	51.0	51.6	52.6	60.9	61.9	62.8	64.8	93.7	95.3	97.2	100.5
	9	a/W	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509	0.509
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.4	1.4	1.4	1.6	22.0	22.1	22.3	22.8	50.5	50.8	51.1	51.7
		U_a by $U_{C_{C,A}}$	1.0	0.9	0.8	0.8	17.6	17.7	17.9	18.2	40.9	41.1	41.3	41.9
U_a by $C/C_{0,B}$		16.1	16.8	17.8	19.6	16.0	17.5	19.3	23.1	16.3	20.8	24.8	31.5	
U_a		49.1	49.3	49.6	50.3	56.5	57.1	57.8	59.4	81.5	82.8	84.1	87.0	
11	a/W	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.567	0.566	0.566	0.566	0.566	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.2	1.2	1.3	1.4	19.1	19.3	19.5	19.8	43.8	44.1	44.4	44.8	
	U_a by $U_{C_{C,A}}$	0.5	0.5	0.6	0.8	14.3	14.4	14.6	14.8	32.7	32.9	33.1	33.5	
	U_a by $C/C_{0,B}$	16.3	17.1	18.0	19.2	16.4	17.9	19.0	21.0	16.5	20.1	23.5	29.0	
	U_a	47.3	47.6	47.9	48.4	53.0	53.6	54.1	55.0	72.4	73.5	74.8	77.1	
100	1	a/W	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	0.273	
		U_a	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	55.2	
	3	a/W	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.340	0.340	0.340	0.340
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.3	1.3	1.3	1.3	20.4	20.6	20.8	21.2	47.2	47.4	47.7	48.2
		U_a by $U_{C_{C,A}}$	0.9	0.9	1.0	1.1	18.6	18.8	19.0	19.4	43.0	43.2	43.5	44.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.0	11.5	14.5	19.3	7.5	14.1	18.6	25.0	9.1	21.4	29.5	41.3
		U_a	53.0	53.8	54.5	56.0	59.8	61.1	62.4	64.9	83.2	85.7	88.3	93.5

ตารางที่ ง.48 ชั้นทดสอบ A1 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
100	5	a/W	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.2	1.2	1.2	1.3	19.5	19.6	19.8	20.2	45.0	45.3	45.5	46.0
		U_a by $U_{C,A}$	0.9	0.8	0.8	0.9	17.9	18.1	18.3	18.7	41.9	42.2	42.4	43.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.4	12.7	15.2	18.8	10.6	14.6	18.1	24.2	11.5	19.8	27.1	37.5
		U_a	51.8	52.3	52.9	54.1	58.1	59.1	60.2	62.5	80.5	82.4	84.7	89.1
	7	a/W	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.448	0.448	0.448	0.448
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.2	1.1	1.1	1.2	18.2	18.4	18.6	18.9	42.2	42.4	42.7	43.2
		U_a by $U_{C,A}$	0.7	0.7	0.7	0.8	15.1	15.2	15.4	15.8	35.3	35.5	35.8	36.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	13.9	15.6	17.6	20.1	14.1	17.3	19.9	24.3	14.6	21.0	26.8	34.7
		U_a	50.5	51.0	51.6	52.5	55.8	56.8	57.7	59.6	74.8	76.5	78.6	82.1

ง.5.2.2 ชั้นทดสอบ A2

ตารางที่ ง.49 ชั้นทดสอบ A2 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1						0.5						
	ลำดับขอบหน้า	1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	a/W	0.269	0.327	0.389	0.455	0.517	0.577	0.629	0.297	0.355	0.423	0.479	0.537	0.587
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.8	3.4	5.3	7.2	9.2	11.0	0.1	1.7	3.6	5.2	7.1	8.8
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.8	7.3	11.2	15.2	19.5	23.4	0.3	3.6	7.6	11.1	15.0	18.8
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.9	24.5	24.4	23.9	22.9	21.4	19.6	24.0	23.9	23.6	23.0	21.9	20.5
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.3	50.5	50.2	49.3	47.2	44.0	40.3	51.3	50.9	50.4	49.2	46.8	43.8
วิธี C_{CMOD}	a/W	0.268	0.326	0.388	0.453	0.515	0.575	0.629	0.296	0.354	0.422	0.477	0.535	0.586
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.9	3.9	6.0	8.1	10.3	12.2	0.1	1.9	4.1	6.0	8.1	10.0
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.1	8.3	12.8	17.3	21.8	25.9	0.1	4.1	8.8	12.8	17.3	21.3
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.9	23.7	22.5	20.9	19.0	17.0	14.9	24.1	23.0	21.5	20.1	18.3	16.5
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.2	48.9	46.3	43.0	39.2	34.9	30.8	51.5	49.2	46.0	42.9	39.0	35.2

ตารางที่ ง.50 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269
		U_a	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1
	3	a/W	0.327	0.327	0.327	0.327	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	17.7	19.2	21.5	26.1	143.8	146.5	148.8	155.3	323.5	325.7	326.3	334.5
		U_a by $U_{C,A}$	13.7	15.0	16.3	18.7	119.7	121.2	122.8	126.8	273.8	276.9	279.7	286.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.5
		U_a	60.6	61.3	62.4	64.8	195.4	198.3	200.9	208.2	427.5	431.2	433.5	443.8
	5	a/W	0.389	0.389	0.389	0.389	0.390	0.390	0.390	0.390	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	17.6	19.0	21.4	25.9	143.0	145.7	147.9	154.4	321.6	323.9	324.5	332.6
		U_a by $U_{C,A}$	13.9	13.8	14.5	15.1	116.6	118.0	119.0	122.5	268.9	269.1	270.3	275.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.6	0.8
		U_a	60.7	61.1	62.0	63.9	192.9	195.8	198.1	205.0	423.0	424.8	426.1	435.4
	7	a/W	0.454	0.454	0.454	0.454	0.455	0.455	0.455	0.455	0.457	0.457	0.457	0.457
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	17.2	18.7	21.0	25.4	140.3	142.9	145.1	151.5	315.3	317.5	318.1	326.1
		U_a by $U_{C,A}$	8.9	8.9	9.3	10.1	88.7	89.2	90.8	92.7	202.3	202.4	204.6	208.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.8
		U_a	59.4	59.8	60.7	62.5	175.2	177.6	180.1	186.3	378.8	380.7	382.4	390.9
	9	a/W	0.516	0.516	0.516	0.516	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	16.7	17.7	20.1	24.3	132.3	135.1	137.6	143.3	296.1	298.3	298.5	306.1
		U_a by $U_{C,A}$	4.3	4.9	5.6	6.0	61.9	62.2	62.8	64.1	141.1	141.1	141.7	143.8
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	
U_a		57.7	58.1	58.9	60.5	156.2	158.6	161.0	166.3	332.6	334.6	335.0	342.6	
11	a/W	0.576	0.576	0.576	0.576	0.577	0.577	0.577	0.576	0.577	0.577	0.577	0.577	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	15.9	16.5	19.3	23.8	124.9	127.4	130.1	135.3	278.9	280.8	281.7	289.1	
	U_a by $U_{C,A}$	2.4	2.4	2.8	3.4	45.4	46.1	46.8	47.2	103.5	103.9	104.9	106.0	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	
	U_a	55.8	56.0	56.9	58.6	143.2	145.6	148.2	153.0	302.2	304.1	305.3	312.5	
13	a/W	0.629	0.629	0.629	0.629	0.629	0.628	0.628	0.628	0.629	0.628	0.628	0.628	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.9	12.6	14.6	21.2	116.9	122.2	123.9	131.6	266.2	269.4	270.4	283.0	
	U_a by $U_{C,A}$	2.8	3.2	3.7	4.9	56.5	57.1	57.8	59.3	127.8	128.7	130.1	132.5	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	
	U_a	52.8	53.4	53.9	56.2	139.8	144.5	146.2	153.4	299.8	303.1	304.5	316.7	

ตารางที่ ง.50 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	1	a/W	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269
		U_a	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1
	3	a/W	0.327	0.327	0.327	0.327	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	7.0	7.6	8.5	10.3	56.9	58.0	58.9	61.4	128.0	128.9	129.1	132.4
		U_a by $U_{C,A}$	5.4	5.9	6.4	7.4	47.4	48.0	48.6	50.2	108.3	109.5	110.7	113.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.5
		U_a	57.0	57.1	57.3	57.7	93.0	94.0	94.8	97.3	176.9	178.2	179.1	183.0
	5	a/W	0.389	0.389	0.389	0.389	0.390	0.390	0.390	0.390	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	7.0	7.5	8.5	10.3	56.6	57.7	58.5	61.1	127.3	128.1	128.4	131.6
		U_a by $U_{C,A}$	5.5	5.5	5.7	6.0	46.1	46.7	47.1	48.5	106.4	106.5	106.9	108.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.6	0.8
		U_a	57.1	57.2	57.3	57.6	92.2	93.2	93.9	96.2	175.2	175.9	176.4	179.9
	7	a/W	0.454	0.454	0.454	0.454	0.455	0.455	0.455	0.455	0.457	0.457	0.457	0.456
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.8	7.4	8.3	10.1	55.5	56.6	57.4	59.9	124.8	125.6	125.9	129.1
		U_a by $U_{C,A}$	3.5	3.5	3.7	4.0	35.1	35.3	35.9	36.7	80.1	80.1	81.0	82.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.8
		U_a	56.7	56.7	56.9	57.2	86.4	87.2	88.0	89.9	158.5	159.2	159.8	163.0
	9	a/W	0.516	0.516	0.516	0.516	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517	0.517
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.6	7.0	8.0	9.6	52.4	53.4	54.4	56.7	117.1	118.0	118.1	121.1
		U_a by $U_{C,A}$	1.7	1.9	2.2	2.4	24.5	24.6	24.8	25.3	55.8	55.8	56.1	56.9
U_a by $C/C_{0,B}$		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	
U_a		55.5	55.6	55.7	56.0	79.8	80.6	81.3	83.0	140.9	141.7	141.8	144.7	
11	a/W	0.576	0.576	0.576	0.576	0.577	0.577	0.577	0.576	0.577	0.577	0.577	0.577	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.3	6.5	7.6	9.4	49.4	50.4	51.5	53.5	110.3	111.1	111.5	114.4	
	U_a by $U_{C,A}$	1.0	0.9	1.1	1.4	17.9	18.3	18.5	18.7	41.0	41.1	41.5	42.0	
	U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	
	U_a	53.8	53.9	54.0	54.3	75.0	75.7	76.5	77.9	129.3	130.0	130.4	133.0	
100	1	a/W	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	
		U_a	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	57.1	
	3	a/W	0.327	0.327	0.327	0.327	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	0.328	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.9	5.3	5.9	7.2	39.7	40.5	41.1	42.9	89.3	89.9	90.1	92.4
		U_a by $U_{C,A}$	3.8	4.1	4.5	5.2	33.1	33.5	33.9	35.0	75.6	76.5	77.2	79.0
		U_a	56.6	56.7	56.8	57.0	76.4	77.0	77.5	78.9	129.8	130.8	131.3	133.9

ตารางที่ ง.50 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
100	5	a/W	0.389	0.389	0.389	0.389	0.390	0.390	0.390	0.390	0.391	0.391	0.391	0.391
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.9	5.3	5.9	7.2	39.5	40.2	40.8	42.6	88.8	89.4	89.6	91.8
		U_a by $U_{C,A}$	3.8	3.8	4.0	4.2	32.2	32.6	32.9	33.8	74.3	74.3	74.6	76.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.6	0.8
		U_a	56.7	56.8	56.8	57.0	76.0	76.6	77.0	78.4	128.8	129.2	129.5	131.9
	7	a/W	0.454	0.454	0.454	0.454	0.455	0.455	0.455	0.455	0.457	0.457	0.457	0.457
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.8	5.2	5.8	7.0	38.7	39.5	40.1	41.8	87.1	87.7	87.8	90.1
		U_a by $U_{C,A}$	2.5	2.5	2.6	2.8	24.5	24.6	25.1	25.6	55.9	55.9	56.5	57.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.8
		U_a	56.4	56.4	56.5	56.6	72.5	72.9	73.4	74.5	117.7	118.1	118.6	120.7

ตารางที่ ง.51 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.9	4.0	4.1	4.6	72.7	73.3	74.4	76.1	168.5	169.6	171.1	173.2
		U_a by $U_{C,A}$	4.4	4.1	3.9	4.1	77.2	77.9	78.8	80.5	180.1	181.2	182.4	184.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	6.3	10.8	14.4	19.2	6.8	13.6	18.2	25.4	8.3	21.5	29.2	41.5
		U_a	55.2	55.9	56.7	58.1	119.4	120.8	122.6	126.0	252.7	255.0	257.6	262.3
	5	a/W	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.7	3.8	3.9	4.4	68.8	69.4	70.4	72.0	159.6	160.6	162.0	164.1
		U_a by $U_{C,A}$	2.3	2.4	2.7	3.4	57.9	58.4	59.0	60.1	133.2	133.8	134.8	136.5
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.6	13.2	15.7	19.3	10.9	15.2	18.9	24.7	12.0	20.5	28.2	37.8
		U_a	53.5	54.1	54.8	56.0	104.6	105.8	107.3	110.1	214.6	216.5	219.0	222.9
	7	a/W	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.5	3.5	3.6	4.0	63.9	64.5	65.4	66.9	148.3	149.3	150.6	152.5
		U_a by $U_{C,A}$	2.2	2.4	2.6	3.3	53.2	53.7	54.3	55.4	121.7	122.4	123.1	124.6
U_a by $C/C_{0,B}$		14.3	15.6	17.3	19.6	14.5	17.1	19.8	23.9	15.1	21.2	26.1	34.6	
U_a		52.0	52.4	52.9	53.8	98.0	99.1	100.5	103.0	198.8	200.5	202.5	206.1	

ตารางที่ ง.51 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	9	a/W	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.515	0.515	0.515	0.515
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.0	2.9	2.8	2.8	52.8	53.2	54.1	55.3	123.8	124.5	125.5	127.3
		U_a by $U_{C,A}$	1.2	1.2	1.3	1.7	38.5	38.9	39.2	40.0	88.7	89.1	89.6	90.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	16.1	17.2	18.3	20.6	16.2	18.0	19.6	22.7	16.6	21.0	24.6	31.9
		U_a	50.3	50.7	51.1	51.9	82.5	83.3	84.3	86.2	160.4	161.7	163.2	166.5
	11	a/W	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.8	2.7	2.4	2.4	49.9	50.3	51.1	52.3	117.3	118.1	119.2	121.1
		U_a by $U_{C,A}$	1.1	1.2	1.4	1.9	39.8	40.2	40.7	41.5	91.4	92.0	92.5	93.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	16.2	17.1	17.8	19.5	16.3	17.5	18.9	21.8	16.3	19.6	22.9	28.3
		U_a	48.6	48.9	49.1	49.8	80.2	80.9	82.0	83.8	156.4	157.7	159.3	162.3
	13	a/W	0.628	0.628	0.628	0.628	0.627	0.627	0.627	0.627	0.626	0.626	0.626	0.626
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.3	2.2	2.1	1.9	43.9	44.2	44.9	45.7	102.8	103.2	104.5	106.0
		U_a by $U_{C,A}$	1.0	1.1	1.3	1.9	35.1	35.4	35.9	36.7	80.8	81.3	81.8	82.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	15.3	16.0	16.8	18.1	15.4	16.5	18.0	20.0	15.8	18.8	21.7	25.7
		U_a	47.3	47.5	47.8	48.3	73.4	74.0	75.0	76.3	139.0	140.0	141.7	144.1
50	1	a/W	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.6	1.6	1.6	1.8	28.8	29.0	29.4	30.1	66.7	67.1	67.7	68.5
		U_a by $U_{C,A}$	1.7	1.6	1.6	1.6	30.5	30.8	31.2	31.9	71.3	71.7	72.2	73.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	6.3	10.8	14.4	19.2	6.8	13.6	18.2	25.4	8.3	21.5	29.2	41.5
		U_a	54.9	55.6	56.4	57.8	69.1	70.4	71.7	74.4	112.1	114.3	116.7	121.4
	5	a/W	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.5	1.5	1.5	1.7	27.2	27.5	27.9	28.5	63.1	63.6	64.1	64.9
		U_a by $U_{C,A}$	0.9	1.0	1.1	1.3	22.9	23.1	23.3	23.8	52.7	53.0	53.3	54.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.6	13.2	15.7	19.3	10.9	15.2	18.9	24.7	12.0	20.5	28.2	37.8
		U_a	53.3	53.9	54.6	55.7	64.1	65.2	66.4	68.7	98.2	100.0	102.4	106.2
	7	a/W	0.452	0.452	0.452	0.452	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.4	1.4	1.4	1.6	25.3	25.5	25.9	26.5	58.7	59.1	59.6	60.3
		U_a by $U_{C,A}$	0.9	0.9	1.0	1.3	21.0	21.2	21.5	21.9	48.1	48.4	48.7	49.3
U_a by $C/C_{0,B}$		14.3	15.6	17.3	19.6	14.5	17.1	19.8	23.9	15.1	21.2	26.1	34.6	
U_a		51.9	52.2	52.8	53.6	61.5	62.3	63.3	65.1	92.0	93.6	95.3	98.7	

ตารางที่ ง.51 ชั้นทดสอบ A2 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	9	a/W	0.514	0.514	0.514	0.514	0.515	0.515	0.515	0.515	0.515	0.515	0.515	0.515
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.2	1.1	1.1	1.1	20.9	21.1	21.4	21.9	49.0	49.3	49.6	50.4
		U_a by $U_{C,A}$	0.5	0.5	0.5	0.7	15.2	15.4	15.5	15.8	35.1	35.3	35.4	35.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	16.1	17.2	18.3	20.6	16.2	18.0	19.6	22.7	16.6	20.9	24.6	31.9
		U_a	50.3	50.6	51.0	51.9	56.5	57.2	57.9	59.2	78.5	79.8	81.2	84.3
	11	a/W	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574	0.574
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.1	1.1	1.0	0.9	19.7	19.9	20.2	20.7	46.4	46.7	47.1	47.9
		U_a by $U_{C,A}$	0.4	0.5	0.5	0.7	15.7	15.9	16.1	16.4	36.1	36.4	36.6	37.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	16.2	17.1	17.8	19.5	16.3	17.5	18.9	21.8	16.3	19.6	22.9	28.3
		U_a	48.5	48.8	49.1	49.7	54.7	55.2	55.8	57.1	76.3	77.4	78.6	81.0
100	1	a/W	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.1	1.1	1.1	1.3	20.1	20.2	20.5	21.0	46.5	46.8	47.2	47.8
		U_a by $U_{C,A}$	1.2	1.1	1.1	1.1	21.3	21.5	21.7	22.2	49.7	50.0	50.4	51.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	6.3	10.8	14.4	19.2	6.8	13.6	18.2	25.4	8.3	21.5	29.2	41.5
		U_a	54.9	55.6	56.4	57.8	62.3	63.5	64.8	67.5	87.6	90.2	92.7	97.9
	5	a/W	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.0	1.0	1.1	1.2	19.0	19.2	19.4	19.9	44.1	44.3	44.7	45.3
		U_a by $U_{C,A}$	0.6	0.7	0.7	0.9	16.0	16.1	16.3	16.6	36.8	37.0	37.2	37.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	10.6	13.2	15.7	19.3	10.9	15.2	18.9	24.7	12.0	20.5	28.2	37.8
		U_a	53.3	53.9	54.6	55.7	58.9	59.9	61.1	63.3	78.5	80.5	83.1	87.3
	7	a/W	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453	0.453
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.0	1.0	1.0	1.1	17.7	17.8	18.1	18.5	40.9	41.2	41.6	42.1
		U_a by $U_{C,A}$	0.6	0.7	0.7	0.9	14.7	14.8	15.0	15.3	33.6	33.8	34.0	34.4
U_a by $C/C_{0,B}$		14.3	15.6	17.3	19.6	14.5	17.1	19.8	23.9	15.1	21.2	26.1	34.6	
U_a		51.9	52.3	52.8	53.6	56.8	57.6	58.5	60.2	74.3	76.0	77.8	81.5	

จ.5.2.3 ชั้นทดสอบ A9

ตารางที่ 5.2 ชั้นทดสอบ A9 U_a by W และ U_a by $a_{s0,3p}$ ทั้ง Type A และ B ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ

	R	0.1							0.5					
		1	3	5	7	9	11	13	2	4	6	8	10	12
วิธี C_{BFS}	ลำดับขอบหน้า													
	a/W	0.266	0.323	0.386	0.443	0.515	0.566	0.622	0.300	0.353	0.411	0.471	0.535	0.596
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.4	2.7	4.0	5.7	7.1	8.7	0.1	1.3	2.5	3.9	5.6	7.2
	U_a by $U_{W,B}$	0.3	3.7	7.3	10.7	15.3	18.8	23.0	0.3	3.3	6.7	10.4	14.8	19.3
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.4	24.0	23.9	23.5	22.4	21.2	19.4	23.9	23.8	23.6	23.0	21.9	20.2
U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.4	50.4	50.2	49.4	47.2	44.6	40.8	51.3	51.0	50.6	49.4	46.9	43.3	
วิธี C_{MOD}	a/W	0.264	0.323	0.385	0.443	0.514	0.565	0.622	0.299	0.351	0.409	0.469	0.533	0.594
	U_a by $U_{W,A}$	0.1	1.5	3.1	4.6	6.5	8.0	9.6	0.0	1.4	2.9	4.6	6.4	8.2
	U_a by $U_{W,B}$	0.2	4.1	8.3	12.2	17.4	21.2	25.6	0.1	3.7	7.7	12.1	17.0	21.8
	U_a by $U_{a_{s0,3p},A}$	24.3	23.2	22.0	20.6	18.6	16.9	14.8	24.0	23.0	21.8	20.2	18.3	16.1
	U_a by $U_{a_{s0,3p},B}$	51.1	48.8	46.2	43.4	39.1	35.6	31.2	51.6	49.4	46.8	43.4	39.2	34.6

ตารางที่ 5.3 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.323	0.323	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.1	13.8	15.9	19.3	11.3	16.1	19.8	27.5	17.3	23.2	30.1	43.3
		U_a by $U_{C,A}$	6.3	7.1	8.7	13.7	7.8	11.2	15.0	21.1	10.5	16.7	23.4	32.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.6
		U_a	57.2	58.1	58.9	60.8	57.7	59.3	61.3	65.9	59.5	62.9	67.7	77.8
	5	a/W	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	10.0	13.7	15.8	19.2	11.3	16.0	19.7	27.4	17.2	23.1	29.9	43.1
		U_a by $U_{C,A}$	4.8	7.3	9.3	11.5	5.6	9.7	12.8	16.3	7.4	15.2	19.8	21.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6
		U_a	57.2	58.2	59.0	60.4	57.5	59.1	60.8	64.5	59.1	62.5	66.6	74.0
	7	a/W	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.442	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.9	13.6	15.6	18.9	11.1	15.8	19.4	27.0	17.0	22.7	29.5	42.5
		U_a by $U_{C,A}$	3.8	4.9	6.1	8.5	4.1	5.9	7.9	11.7	5.8	8.9	12.2	16.9
U_a by $C/C_{0,B}$		0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.7	
U_a		56.9	57.8	58.4	59.6	57.2	58.4	59.7	63.2	58.7	61.0	64.4	72.2	

ตารางที่ 5.53 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	9	a/W	0.515	0.515	0.515	0.515	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.6	13.2	15.6	19.0	11.3	15.5	19.7	27.5	16.2	20.1	26.9	39.9
		U_a by $U_{C,A}$	2.5	3.2	4.0	4.9	2.6	3.8	5.3	6.2	3.7	5.2	7.2	9.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9
		U_a	55.6	56.4	57.1	58.1	56.0	57.1	58.5	61.6	57.2	58.6	61.5	68.4
	11	a/W	0.566	0.566	0.566	0.566	0.565	0.565	0.565	0.565	0.564	0.564	0.564	0.564
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	9.0	12.8	15.6	16.5	10.8	14.7	18.4	22.1	15.4	18.4	26.3	35.6
		U_a by $U_{C,A}$	1.5	1.8	2.8	3.4	1.7	2.6	4.2	4.7	2.6	4.3	5.6	7.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.3
		U_a	54.1	54.9	55.6	55.9	54.5	55.4	56.6	57.9	55.6	56.6	59.8	64.6
	13	a/W	0.622	0.622	0.622	0.622	0.621	0.621	0.621	0.621	0.620	0.620	0.620	0.619
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	6.1	9.8	9.6	11.0	8.3	11.0	16.2	17.0	14.0	13.4	23.6	31.5
		U_a by $U_{C,A}$	1.3	1.5	1.6	2.9	1.3	1.6	2.1	3.1	2.1	2.8	3.8	5.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6
		U_a	51.8	52.4	52.4	52.7	52.2	52.7	54.0	54.3	53.5	53.3	56.8	60.7
50	1	a/W	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	
	3	a/W	0.323	0.323	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.0	5.5	6.3	7.6	4.5	6.4	7.8	10.9	6.8	9.2	11.9	17.1
		U_a by $U_{C,A}$	2.5	2.8	3.5	5.4	3.1	4.4	6.0	8.4	4.1	6.6	9.3	12.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.6
		U_a	56.2	56.3	56.5	56.8	56.3	56.5	56.9	57.7	56.6	57.1	58.0	59.9
	5	a/W	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.0	5.4	6.3	7.6	4.5	6.3	7.8	10.8	6.8	9.1	11.8	17.0
		U_a by $U_{C,A}$	1.9	2.9	3.7	4.6	2.2	3.8	5.1	6.4	2.9	6.0	7.9	8.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6
		U_a	56.3	56.4	56.6	56.8	56.3	56.6	56.9	57.5	56.6	57.1	57.9	59.3
	7	a/W	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.9	5.4	6.2	7.5	4.4	6.2	7.7	10.7	6.7	9.0	11.7	16.8
		U_a by $U_{C,A}$	1.5	1.9	2.4	3.4	1.6	2.3	3.1	4.6	2.3	3.5	4.8	6.7
U_a by $C/C_{0,B}$		0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.7	
U_a		56.1	56.2	56.3	56.5	56.1	56.3	56.5	57.1	56.4	56.8	57.3	58.8	

ตารางที่ 5.53 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{BFS} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	9	a/W	0.515	0.515	0.515	0.515	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.8	5.2	6.2	7.5	4.5	6.1	7.8	10.9	6.4	8.0	10.6	15.8
		U_a by $U_{C,A}$	1.0	1.3	1.6	1.9	1.0	1.5	2.1	2.5	1.5	2.0	2.9	3.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9
		U_a	54.9	55.0	55.1	55.3	55.0	55.1	55.4	55.9	55.2	55.4	55.9	57.1
	11	a/W	0.566	0.566	0.566	0.566	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.564	0.564	0.564
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.6	5.1	6.2	6.5	4.3	5.8	7.3	8.7	6.1	7.3	10.4	14.1
		U_a by $U_{C,A}$	0.6	0.7	1.1	1.3	0.7	1.0	1.6	1.8	1.0	1.7	2.2	2.8
		U_a by $C/C_{0,B}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.3
		U_a	53.5	53.6	53.7	53.8	53.5	53.7	53.9	54.1	53.7	53.9	54.4	55.3
100	1	a/W	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
		U_a	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9	56.9
	3	a/W	0.322	0.323	0.323	0.323	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.8	3.8	4.4	5.3	3.1	4.4	5.5	7.6	4.8	6.4	8.3	12.0
		U_a by $U_{C,A}$	1.7	2.0	2.4	3.8	2.2	3.1	4.2	5.8	2.9	4.6	6.5	8.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.4	0.6
		U_a	56.1	56.1	56.2	56.4	56.1	56.2	56.4	56.8	56.3	56.5	57.0	57.9
	5	a/W	0.386	0.386	0.386	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.8	3.8	4.4	5.3	3.1	4.4	5.4	7.6	4.7	6.4	8.3	11.9
		U_a by $U_{C,A}$	1.3	2.0	2.6	3.2	1.5	2.7	3.5	4.5	2.0	4.2	5.5	6.0
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6
		U_a	56.2	56.2	56.3	56.4	56.2	56.3	56.5	56.8	56.3	56.6	56.9	57.6
	7	a/W	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.443	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.7	3.7	4.3	5.2	3.1	4.4	5.4	7.4	4.7	6.3	8.1	11.7
		U_a by $U_{C,A}$	1.0	1.4	1.7	2.3	1.1	1.6	2.2	3.2	1.6	2.4	3.4	4.7
		U_a by $C/C_{0,B}$	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.7
		U_a	56.0	56.1	56.1	56.2	56.0	56.1	56.2	56.5	56.1	56.3	56.6	57.3

ตารางที่ ง.54 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by $C_{C,A}$, U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload DC (ข้อมูล)	100 %				80 %				60 %			
			10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
10	1	a/W	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
		U_a	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6
	3	a/W	0.322	0.322	0.322	0.322	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.2	4.2	4.3	4.3	5.0	5.0	5.2	5.2	5.8	6.2	6.6	6.6
		U_a by $U_{C,A}$	3.7	3.7	3.7	3.7	4.3	4.3	4.4	4.4	5.8	5.7	6.0	6.1
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.4	13.5	17.8	25.0	8.1	18.0	24.9	33.9	10.1	26.2	37.6	52.3
		U_a	55.0	56.2	57.4	60.0	55.2	57.6	60.1	64.4	55.8	60.8	66.6	75.9
	5	a/W	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	4.0	4.0	4.1	4.1	4.7	4.7	5.0	5.0	5.5	5.8	6.2	6.2
		U_a by $U_{C,A}$	1.4	1.3	1.4	1.4	1.8	1.8	1.9	1.9	2.6	2.8	3.0	3.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	11.3	14.6	17.5	22.4	11.9	17.5	21.8	29.7	13.1	24.6	32.7	47.1
		U_a	53.3	54.1	55.0	56.7	53.5	55.1	56.6	60.1	53.9	57.9	61.8	70.5
	7	a/W	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.7	3.7	3.8	3.8	4.4	4.5	4.7	4.7	5.2	5.5	5.9	5.9
		U_a by $U_{C,A}$	1.5	1.5	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.5	2.6	2.8	3.2
		U_a by $C/C_{0,B}$	14.0	16.4	18.5	22.3	14.4	18.5	21.9	28.1	15.2	24.1	30.4	40.5
		U_a	51.9	52.6	53.3	54.7	52.1	53.4	54.7	57.4	52.4	55.7	58.7	64.5
	9	a/W	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.513	0.513	0.513	0.513
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	3.5	3.4	3.6	3.6	4.0	3.9	4.0	4.2	4.4	4.6	4.7	5.0
		U_a by $U_{C,A}$	0.9	0.9	0.9	1.0	1.2	1.1	1.2	1.3	1.7	1.6	1.6	1.7
U_a by $C/C_{0,B}$		15.9	17.7	19.6	21.8	16.2	19.2	22.1	26.4	16.5	23.0	28.3	36.7	
U_a		49.9	50.5	51.2	52.1	50.0	51.1	52.2	54.2	50.2	52.7	55.2	60.0	
11	a/W	0.565	0.565	0.565	0.565	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	2.0	2.0	2.1	2.3	2.5	2.6	2.7	3.0	3.4	3.7	3.8	4.2	
	U_a by $U_{C,A}$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	
	U_a by $C/C_{0,B}$	17.0	17.9	19.0	21.1	17.2	19.4	21.8	25.4	17.5	22.1	26.9	34.5	
	U_a	48.5	48.9	49.3	50.2	48.7	49.5	50.5	52.2	48.9	50.7	53.0	57.3	
13	a/W	0.622	0.621	0.621	0.621	0.620	0.620	0.620	0.620	0.619	0.619	0.619	0.619	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.6	1.7	1.4	1.6	2.3	2.4	2.3	2.4	3.1	3.4	3.2	3.2	
	U_a by $U_{C,A}$	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	1.1	
	U_a by $C/C_{0,B}$	16.9	17.8	19.0	20.6	17.1	18.9	20.5	23.4	17.3	21.4	24.7	31.0	
	U_a	47.2	47.6	48.0	48.7	47.3	48.0	48.7	50.0	47.5	49.1	50.7	54.0	

ตารางที่ ง.54 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{CMOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
50	1	a/W	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
		U_a	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6
	3	a/W	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.7	1.7	1.7	1.7	2.0	2.0	2.1	2.1	2.3	2.4	2.6	2.6
		U_a by $U_{C,A}$	1.5	1.5	1.4	1.5	1.7	1.7	1.7	1.8	2.3	2.3	2.4	2.4
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.4	13.5	17.8	25.0	8.1	18.0	24.9	33.9	10.1	26.2	37.6	52.3
		U_a	54.8	55.9	57.1	59.8	54.9	57.2	59.7	64.1	55.3	60.3	66.1	75.4
	5	a/W	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	1.9	2.0	2.0	2.2	2.3	2.5	2.5
		U_a by $U_{C,A}$	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	11.3	14.6	17.5	22.4	11.9	17.5	21.8	29.7	13.1	24.6	32.7	47.0
		U_a	53.2	54.0	54.8	56.6	53.3	54.9	56.4	59.9	53.6	57.5	61.5	70.1
	7	a/W	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.2	2.3	2.3
		U_a by $U_{C,A}$	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.3
		U_a by $C/C_{0,B}$	14.0	16.4	18.5	22.3	14.4	18.5	21.9	28.1	15.2	24.1	30.4	40.5
		U_a	51.8	52.5	53.2	54.6	51.9	53.2	54.5	57.2	52.1	55.4	58.4	64.2
	9	a/W	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.513	0.513	0.513	0.513
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.5	1.6	1.6	1.8	1.8	1.9	2.0
		U_a by $U_{C,A}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7
U_a by $C/C_{0,B}$		15.9	17.7	19.6	21.8	16.2	19.2	22.1	26.4	16.5	23.0	28.3	36.7	
U_a		49.8	50.4	51.1	51.9	49.9	50.9	52.1	54.1	50.0	52.5	55.1	59.8	
11	a/W	0.565	0.565	0.565	0.565	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	0.564	
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.5	1.6	
	U_a by $U_{C,A}$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	
	U_a by $C/C_{0,B}$	16.9	17.9	19.0	21.1	17.2	19.4	21.8	25.4	17.5	22.1	26.9	34.5	
	U_a	48.5	48.9	49.3	50.1	48.6	49.5	50.4	52.1	48.7	50.6	52.8	57.1	
100	1	a/W	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	
		U_a	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	56.6	
	3	a/W	0.322	0.322	0.322	0.322	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.7	1.8	
		U_a by $U_{C,A}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.6	1.6	1.7	
		U_a by $C/C_{0,B}$	7.4	13.5	17.8	25.0	8.1	18.0	24.9	33.9	10.1	26.2	37.6	
U_a	54.8	55.9	57.1	59.8	54.9	57.2	59.7	64.0	55.2	60.3	66.1			

ตารางที่ ง.54 ชั้นทดสอบ A9 U_a by $C_{0,A}$, U_a by C_A , U_a by $C/C_{0,B}$ และ U_a ของวิธี C_{MOD} ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 4 (ต่อ)

Con. (รอบ)	ลำดับ ขอบหน้า	%Unload	100 %				80 %				60 %			
		DC (ข้อมูล)	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250	10000	1000	500	250
100	5	a/W	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7
		U_a by $U_{C,A}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	11.3	14.6	17.5	22.4	11.9	17.5	21.8	29.7	13.1	24.6	32.7	47.1
		U_a	53.2	54.0	54.8	56.6	53.3	54.8	56.4	59.9	53.6	57.5	61.4	70.1
	7	a/W	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442	0.442
		U_a by $U_{C_{0,A}}$	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
		U_a by $U_{C,A}$	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9
		U_a by $C/C_{0,B}$	14.0	16.4	18.5	22.3	14.4	18.5	21.9	28.1	15.1	24.1	30.4	40.5
		U_a	51.8	52.5	53.2	54.6	51.9	53.2	54.5	57.2	52.1	55.4	58.4	64.2

ง.5.3 ผลของนิยามความยาวรอยร้าวกายภาพเริ่มต้น

หัวข้อนี้จะนำเสนอ U_a ทั้ง 8 ตัว จากวิธี C_{BFS} และวิธี C_{MOD} ของชั้นทดสอบ A1 ที่เงื่อนไขต่าง ๆ
กรณีศึกษานิยาม a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5 ซึ่งจะกำหนดเงื่อนไขสภาวะทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูล เพียง
ค่าเดียว แล้วเปลี่ยนนิยามของ a_{s0} เป็นนิยามต่าง ๆ

ตารางที่ ง.55 ชั้นทดสอบ A1 U_a ที่เกิดจาก U_W , $U_{a_{s0}}$, U_{C_0} , U_C และ U_a รวม ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษานิยาม
 a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5

ลำดับ ขอบหน้า	นิยาม a_{s0} ที่ ใช้คำนวณ a	วิธี C_{BFS}				วิธี C_{MOD}			
		$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$	$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$
1	a/W	0.262	0.274	0.272	0.272	0.260	0.273	0.270	0.270
	U_a by $U_{a_{s0,A}}$	21.6	20.4	19.5	19.5	21.5	20.4	19.5	19.5
	U_a by $U_{a_{s0,B}}$	51.4	51.3	51.3	51.3	51.1	51.3	51.2	51.2
	U_a	55.8	55.2	54.9	54.9	55.4	55.2	54.8	54.8
3	a/W	0.328	0.340	0.338	0.338	0.328	0.339	0.337	0.337
	U_a by $U_{W,A}$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	1.6	1.6	1.6
	U_a by $U_{W,B}$	4.3	4.2	4.2	4.2	4.7	4.6	4.6	4.6
	U_a by $U_{a_{s0,A}}$	21.2	20.1	19.2	19.2	20.4	19.3	18.5	18.5
	U_a by $U_{a_{s0,B}}$	50.3	50.5	50.5	50.5	48.4	48.6	48.6	48.6
	U_a by $U_{C_{0,A}}$	23.8	23.8	23.8	23.8	4.7	4.7	4.7	4.7
	U_a by $U_{C,A}$	18.6	18.6	18.6	18.6	3.5	3.4	3.4	3.4
	U_a by $C/C_{0,B}$	0.1	0.1	0.1	0.1	7.1	7.0	7.0	7.0
U_a	62.6	62.4	62.1	62.1	53.5	53.3	53.0	53.0	

ตารางที่ ง.55 ขึ้นทดสอบ A1 U_a ที่เกิดจาก U_W , $U_{a_{s0}}$, U_{C_0} , U_C และ U_a รวม ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษา नियาม a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5 (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	नियาม a_{s0} ที่ ใช้คำนวณ a	วิธี C_{BFS}				วิธี C_{MOD}			
		$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$	$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$
5	a/W	0.380	0.392	0.390	0.390	0.380	0.391	0.389	0.389
	U_a by $U_{W,A}$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9
	U_a by $U_{W,B}$	7.2	7.1	7.1	7.1	8.2	8.1	8.1	8.1
	U_a by $U_{a_{s0},A}$	21.1	20.0	19.1	19.1	19.5	18.4	17.7	17.6
	U_a by $U_{a_{s0},B}$	50.1	50.3	50.3	50.3	46.2	46.4	46.4	46.4
	U_a by $U_{C_0,A}$	23.7	23.7	23.7	23.7	4.5	4.4	4.5	4.5
	U_a by $U_{C,A}$	8.7	8.7	8.7	8.7	3.1	3.1	3.1	3.1
	U_a by $C/C_0,B$	0.2	0.2	0.2	0.2	10.5	10.4	10.5	10.5
	U_a	60.4	60.2	59.9	59.9	52.3	52.0	51.7	51.7
7	a/W	0.438	0.450	0.448	0.448	0.438	0.449	0.447	0.447
	U_a by $U_{W,A}$	3.7	3.7	3.7	3.7	4.3	4.3	4.3	4.3
	U_a by $U_{W,B}$	10.6	10.6	10.6	10.6	12.2	12.2	12.2	12.2
	U_a by $U_{a_{s0},A}$	20.8	19.7	18.8	18.8	18.3	17.3	16.6	16.5
	U_a by $U_{a_{s0},B}$	49.4	49.5	49.5	49.5	43.4	43.5	43.5	43.5
	U_a by $U_{C_0,A}$	23.4	23.3	23.3	23.3	4.2	4.2	4.2	4.2
	U_a by $U_{C,A}$	9.0	8.9	8.9	8.9	2.7	2.7	2.7	2.7
	U_a by $C/C_0,B$	0.3	0.3	0.3	0.3	14.1	13.9	14.0	14.0
	U_a	60.3	59.9	59.6	59.6	51.1	50.7	50.5	50.5
9	a/W	0.499	0.510	0.508	0.508	0.499	0.509	0.507	0.507
	U_a by $U_{W,A}$	5.1	5.1	5.1	5.1	5.8	5.8	5.8	5.8
	U_a by $U_{W,B}$	14.4	14.5	14.4	14.4	16.5	16.5	16.5	16.5
	U_a by $U_{a_{s0},A}$	20.1	18.9	18.1	18.1	16.8	15.8	15.2	15.1
	U_a by $U_{a_{s0},B}$	47.8	47.6	47.6	47.6	39.9	39.8	39.8	39.8
	U_a by $U_{C_0,A}$	23.4	23.2	23.3	23.3	3.6	3.5	3.5	3.5
	U_a by $U_{C,A}$	6.0	5.9	6.0	6.0	2.4	2.4	2.4	2.4
	U_a by $C/C_0,B$	0.6	0.6	0.6	0.6	16.3	16.1	16.1	16.1
	U_a	59.2	58.6	58.4	58.4	49.6	49.2	49.0	49.0

ตารางที่ 5.55 ชั้นทดสอบ A1 U_a ที่เกิดจาก U_W , $U_{a_{s0}}$, U_{C_0} , U_C และ U_a รวม ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กรณีศึกษานิยาม a_{s0} ดังตาราง 5.2 คอลัมน์ที่ 5 (ต่อ)

ลำดับ ขอบหน้า	นิยาม a_{s0} ที่ ใช้คำนวณ a	วิธี C_{BFS}				วิธี C_{MOD}			
		$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$	$a_{s0,2p}$	$a_{s0,3p}$	$a_{s0,9p}$	$a_{s0,area}$
11	a/W	0.557	0.568	0.566	0.566	0.558	0.567	0.565	0.565
	U_a by $U_{W,A}$	6.5	6.5	6.5	6.5	7.4	7.4	7.4	7.4
	U_a by $U_{W,B}$	18.4	18.5	18.5	18.5	20.9	20.9	20.9	20.9
	U_a by $U_{a_{s0},A}$	19.0	17.7	17.0	17.0	15.1	14.2	13.6	13.6
	U_a by $U_{a_{s0},B}$	45.0	44.7	44.7	44.7	35.9	35.8	35.8	35.8
	U_a by $U_{C_0,A}$	24.3	24.0	24.0	24.0	3.2	3.1	3.1	3.1
	U_a by $U_{C,A}$	5.3	5.2	5.2	5.2	1.3	1.3	1.3	1.3
	U_a by $C/C_0,B$	1.0	1.0	1.0	1.0	16.6	16.3	16.4	16.4
	U_a	58.2	57.4	57.3	57.3	47.9	47.4	47.3	47.3
13	a/W	0.617	0.626	0.624	0.624	0.618	0.626	0.625	0.625
	U_a by $U_{W,A}$	8.0	8.1	8.1	8.1	9.0	9.0	9.0	9.0
	U_a by $U_{W,B}$	22.8	22.9	22.9	22.9	25.5	25.5	25.5	25.5
	U_a by $U_{a_{s0},A}$	17.3	16.2	15.5	15.5	13.2	12.4	11.9	11.9
	U_a by $U_{a_{s0},B}$	41.2	40.7	40.8	40.8	31.3	31.2	31.2	31.2
	U_a by $U_{C_0,A}$	16.0	15.7	15.8	15.8	2.9	2.9	2.9	2.9
	U_a by $U_{C,A}$	2.8	2.8	2.8	2.8	1.0	1.0	1.0	1.0
	U_a by $C/C_0,B$	1.3	1.3	1.3	1.3	16.7	16.4	16.4	16.4
	U_a	53.3	52.6	52.5	52.4	46.6	46.2	46.1	46.1

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติภณ รุ่งวงชिरา เกิดวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2556 และเข้าศึกษาต่อ
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2557

