

การศึกษาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ที่มีรอยร้าวเอียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นาย ธนวัฒน์ กรจำรัสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-17-3711-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON ELECTRICAL-POTENTIAL DISTRIBUTION IN RECTANGULAR PLATE
WITH AN INCLINED CRACK BY FINITE ELEMENT METHOD

Mr. Tanawat Kornchamruskul

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 2005

ISBN 974-17-3711-4

481788

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในแผ่นแบนรูปเหลี่ยมผืนผ้า
ที่มีรอยร้าวเอียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

นายธนวัฒน์ กรจำรัสกุล

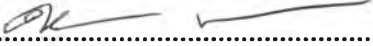
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

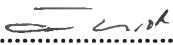
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

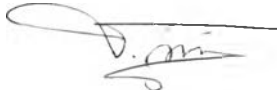
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)


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


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

ธันวาคม กรจารย์สกุล : การศึกษาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าในแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยร้าว
 เอียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (A STUDY ON ELECTRICAL-POTENTIAL DISTRIBUTION IN
 RECTANGULAR PLATE WITH AN INCLINED CRACK BY FINITE ELEMENT METHOD) อ. ที่
 ปรีกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 128 หน้า. ISBN 974-17-3711-4.

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายศักย์ไฟฟ้าในวัตถุแผ่นแบน
 และนำผลการคำนวณมาใช้ร่วมกับหลักการความต่างศักย์ดัดคร่อมเพื่อระบุลักษณะของรอยร้าวเอียงแบบทูล
 ความหนา โปรแกรมที่พัฒนาใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสามจุดต่อ ความถูกต้องของโปรแกรมและความเหมาะสม
 ของชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้พิจารณาจากปัญหา 2 ข้อ คือ ชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว และชิ้นงานทดสอบ MT
 ที่มีรอยร้าวไม่เอียง พบว่าความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง 10 ถึง 80 มม. ซึ่งคำนวณด้วย
 โปรแกรมสอดคล้องกับ ผลเฉลยแม่นยำตรงจากกฎของโอห์มและผลเฉลยของจอห์นสัน ตามลำดับ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีประยุกต์หลักการวัดความต่างศักย์ดัดคร่อมเพื่อระบุลักษณะของรอยร้าวเอียง 2
 วิธี วิธีแรกคือ ป้อนกระแสตามแนวแกน y แล้วหาความต่างศักย์ดัดคร่อมจุดที่อยู่ตามแนวแกน y และตามแนวแกน
 x วิธีที่สองคือ ป้อนกระแสตามแนวแกน y แล้วหาความต่างศักย์ดัดคร่อมจุดที่อยู่ตามแนวแกน y และป้อนกระแส
 ตามแนวแกน x แล้วหาความต่างศักย์ดัดคร่อมจุดที่อยู่ตามแนวแกน x โปรแกรมถูกนำมาใช้คำนวณความต่างศักย์
 ระหว่างจุดซึ่งอยู่คร่อมรอยร้าวเอียงเพื่อหาเส้นโค้งสอบเทียบ สำหรับการระบุรอยร้าวแต่ละวิธี เส้นโค้งสอบเทียบ
 ที่ได้แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไร้หน่วยเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อความยาวไร้หน่วยของรอยร้าวเพิ่มขึ้น
 หรือมุมที่รอยร้าวทำกับแนวแกนป้อนกระแสเพิ่มขึ้น การประยุกต์วิธีที่เสนอกับชิ้นงานทดสอบที่มีรอยร้าวเอียง
 พบว่า วิธีที่เสนอทั้งสองวิธีสามารถระบุลักษณะรอยร้าวเอียงได้ แต่วิธีที่สองสามารถระบุได้แม่นยำกว่า

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการนำหลักการความต่างศักย์ดัดคร่อมที่เสนอไปใช้กับปัญหาที่
 ไม่เหมือนกับปัญหาที่ใช้สร้างเส้นโค้งสอบเทียบ ปัญหาที่ศึกษาคือ การระบุรอยร้าวในชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าว
 2 รอย แต่ละรอยมีความยาว 7.5 มม. เท่ากัน และทำมุมกับแนวระดับ 10, 30 และ 40 องศาเท่ากัน ผลการศึกษา
 พบว่า วิธีความต่างศักย์ดัดคร่อมจะระบุรอยร้าวได้ในด้านไม่พลอคภัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....ธันวาคม กรจารย์สกุล.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2548

4570342721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: D.C. POTENTIAL DROP / FINITE ELEMENT / FRACTURE / INCLINED CRACK / NONDESTRUCTIVE EVALUATION

TANAWAT KORNCAMRUSKUL : A STUDY ON ELECTRICAL-POTENTIAL DISTRIBUTION IN RECTANTULAR PLATE WITHN AN INCLINED CRACK BY FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPONG KASIVITAMNUAY, D. ENG. 128 pp. ISBN 974-17-3711-4

This thesis developed a finite element program for computing an electrical potential field in a thin-plate body and then utilized with the potential drop technique to characterize an inclined through-thickness crack. The program uses linear triangular element. Accuracy of the program and appropriation of element' s type was investigated using 2 problems, first MT specimen without a crack problem and MT specimen with a zero-inclined-angle crack problem. A potential drop between two measuring points having a distance of 10 to 80 mm. conformed well with an exact solution derived from Ohm's law and Johnson' s formula, respectively

This thesis proposed two methods based on potential drop technique for characterizing an inclined crack: first, input current in y-direction and determine a potential between two points laid on y-axis and x-axis; second, input current in y-direction and determine a potential between two points laid on y-axis, and input current in x-direction and measure a potential between two points lie on x-axis. The program was used to compute a potential drop across an inclined crack and constructed the calibration curves corresponding to each method. The calibration curves showed that the normalized potential increases nonlinearly as a normalized crack length increases or the angle between the crack and the current' s input direction increases. Application of the proposed method to characterize an inclined crack demonstrated that both methods could specify the crack length and crack inclination angle, but the second method provided more accurate results.

This thesis initially applied the proposed potential drop technique to a problem that differs from those used in constructing the calibration curves. The problem concerned was crack characterization in MT specimen which contains two inclined cracks. Each crack has 7.5 mm long and their inclination angles with horizontal line are 10, 30 and 40 degrees, respectively. The result showed that this method is unconservative.

Department.....Mechanical Engineering..... Student's signature.....
Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลือของนิสิตห้องปฏิบัติการคำนวณ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการเขียน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยแก้ปัญหา และกลั่นกรองเนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจ

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่สนับสนุนการศึกษา และช่วยเหลือชีวิตส่วนตัวของผู้ทำวิจัยตลอดหลายปี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ค

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตและสมมติฐาน.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุป.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ทัศนวิสัยวรรณกรรม.....	4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้า.....	8
2.1.1 สนามไฟฟ้า.....	8
2.1.2 ศักย์ไฟฟ้า.....	9
2.1.3 กระแสไฟฟ้า.....	10
2.1.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	10
2.1.5 สภาพต้านทานไฟฟ้า.....	11
2.1.6 ความต้านทานไฟฟ้า.....	11
2.2 หลักการความต่างศักย์คคร่อม.....	12

2.3	สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า.....	13
2.4	ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	15
2.5	ฟังก์ชันการประมาณภายในสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ.....	17
2.6	วิธีตรวจหาเอลิเมนต์ที่มีจุดวัดศักย์ไฟฟ้า.....	18
บทที่ 3 การเขียนโปรแกรมและตรวจสอบความถูกต้อง		
3.1	การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์และการเขียนโปรแกรม.....	20
3.2	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	26
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.3.1	รายละเอียดของการจำลองปัญหา.....	27
3.3.2	ชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว.....	28
3.3.3	ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าว.....	30
3.4	อภิปรายผล.....	35
3.4.1	ชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว.....	35
3.4.2	ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าว.....	36
บทที่ 4 การระบุลักษณะรอยร้าวเอียงโดยวิธีความต่างศักย์ตกคร่อม		
4.1	แนวคิดในการระบุลักษณะของรอยร้าวเอียง.....	38
4.1.1	ข้อจำกัดของการประยุกต์วิธีของรอยร้าวไม่เอียง.....	39
4.1.2	วิธีระบุลักษณะรอยร้าวเอียง.....	40
4.1.3	การวิเคราะห์วิธีระบุรอยร้าวเอียงในเชิงมโนทัศน์.....	40
4.2	การสร้างเส้นโค้งสอบเทียบ.....	42
4.2.1	เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....	44
4.2.2	เส้นโค้งสอบเทียบ.....	45
4.3	การระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT ด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	54
4.3.1	ขั้นตอน.....	54
4.3.2	ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	55

4.4 การระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT ด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	58
4.4.1 ขั้นตอน.....	58
4.4.2 ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	58
4.5 การระบุลักษณะรอยร้าวที่ซับซ้อน.....	63
4.5.1 รายละเอียดของปัญหา.....	63
4.5.2 ขั้นตอน.....	64
4.5.3 ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวซับซ้อนด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	64
4.6 อภิปราย.....	69
4.6.1 ชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง.....	69
4.6.2 ชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวซับซ้อน.....	71
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ความต่างศักย์อ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ข ลักษณะไฟล်นำเข้าและไฟล်ผลลัพท์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	81
ข.1 ลักษณะไฟล်นำเข้า.....	81
ข.2 ลักษณะไฟล်ผลลัพท์.....	84
ภาคผนวก ค โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	86
ค.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า.....	86
ค.2 โปรแกรมประมาณค่าภายในสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ.....	104
ภาคผนวก ง ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ที่ตำแหน่งวัดความต่างศักย์ใด ๆ.....	109
ง.1 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y	109

ง.2 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน x เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y	113
ง.3 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน x เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x	114
ภาคผนวก จ ทดสอบการใช้เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับสัดส่วนความยาวต่อ ความกว้างชั้นทดสอบ เท่ากับ 4 กับชั้นทดสอบที่มีสัดส่วน ความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2.....	116
ภาคผนวก ฉ เปรียบเทียบความต่างศักย์ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา กับความต่างศักย์ ในช่วง 100, 110, ..., 170 องศา.....	120
ภาคผนวก ช จำนวนจุดต่อและจำนวนอิเล็กเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ สำหรับกราฟสอบเทียบ.....	122
ภาคผนวก ซ ตารางและกราฟคำนวณ Stress intensity factor.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 ความต่างศักย์ (ΔV) บนชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว.....	30
ตารางที่ 3.2 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 5 มม.....	31
ตารางที่ 3.3 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 10 มม.....	32
ตารางที่ 3.4 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 15 มม.....	32
ตารางที่ 3.5 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 20 มม.....	32
ตารางที่ 3.6 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 25 มม.....	33
ตารางที่ 3.7 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 30 มม.....	33
ตารางที่ 3.8 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 35 มม.....	33
ตารางที่ 3.9 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ระหว่างจุดวัดบนแกน y ที่อยู่เหนือและใต้ รอยร้าวเป็นระยะ 40 มม.....	34
ตารางที่ 3.10 ความผิดพลาดของผลเฉลยความต่างศักย์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ($a/w = 0.7$).....	37
ตารางที่ 4.1 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15$ และ $\theta = 45$ องศา).....	55
ตารางที่ 4.2 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.45$ และ $\theta = 65$ องศา).....	57
ตารางที่ 4.3 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15$ และ $\theta = 25$ องศา).....	59

ตารางที่ 4.4 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.45$ และ $\theta = 65$ องศา).....60

ตารางที่ 4.5 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.65$ และ $\theta = 65$ องศา).....62

ตารางที่ 4.6 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3$, $a/b = 1$ และ $\alpha = 10$ องศา จำนวนสองรอย).....65

ตารางที่ 4.7 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3$, $a/b = 1$ และ $\alpha = 30$ องศา จำนวนสองรอย).....66

ตารางที่ 4.8 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3$, $a/b = 1$ และ $\alpha = 40$ องศา จำนวนสองรอย).....68

ตารางที่ 4.9 ความต่างศักย์ไร้หน่วยของมุมเอียงรอยร้าว (θ) 80 องศา กับมุมเอียงรอยร้าว 100 องศา สำหรับเส้นโค้งสอบเทียบกรณี $I_y - V_y$ 70

ตารางที่ 4.10 ผลการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีสัดส่วนความยาว ต่อความกว้างเท่ากับ 2.....72

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวเอียง 2 รอย ที่ถูกระบุลักษณะด้วยวิธีต่าง ๆ.....73

ตารางที่ ก.1 ความต่างศักย์ระหว่างจุดวัดสองจุดบนแกน y เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y80

ตารางที่ ก.2 ความต่างศักย์ระหว่างจุดวัดสองจุดบนแกน x เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x80

ตารางที่ ง.1 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 5 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y109

ตารางที่ ง.2 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 10 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน110

ตารางที่ ง.3 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 15 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y110

ตารางที่ ง.4 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 20 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y111

ตารางที่ ง.5 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 25 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y111

ตารางที่ ง.6 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 30 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y112

ตารางที่ ง.7 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 35 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน112

ตารางที่ ง.8 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 40 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y113

ตารางที่ ง.9 ความต่างศักย์ (μV) บนแกน x ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว ซ้ายและขวา 5 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y113

ตารางที่ ง.10 ความต่างศักย์ (μV) บนแกน x ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว ซ้ายและขวา 10 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y113

ตารางที่ ง.11 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน x ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 5 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x114

ตารางที่ ง.12 ความต่างศักย์ไร้หน่วยบนแกน x ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 10 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x115

ตารางที่ จ.1 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15, \theta = 25$).....117

ตารางที่ จ.2 ค่า a/w ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.65, \theta = 65$).....118

ตารางที่ ฉ.1 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) บนแกน y ของมุมเอียงรอยร้าว (θ) ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y120

ตารางที่ ฉ.2 ความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) บนแกน y ของมุมเอียงรอยร้าว (θ) ในช่วง 100, 110, ..., 170 องศา เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y121

ตารางที่ ช.1 จำนวนจุดต่อและจำนวนอิเล็กเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์.....122

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดรอยร้าว.....	1
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของประจุทดสอบจากตำแหน่ง i ไป f ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่คงที่.....	9
รูปที่ 2.2 กระแสไฟฟ้าขนาดคงที่ไหลผ่านวัสดุนำไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่นอร์มัลไลซ์แล้วกับความยาวรอยร้าว ที่นอร์มัลไลซ์แล้ว ของชิ้นงานทดสอบแบบ MT.....	12
รูปที่ 2.4 พล็อตกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Differential element หนาหนึ่งหน่วย.....	14
รูปที่ 2.5 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ.....	15
รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ.....	16
รูปที่ 2.7 พิกัดจุดต่อของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ.....	17
รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดวัดศักย์ไฟฟ้า $P(x, y)$	19
รูปที่ 3.1 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า.....	22
รูปที่ 3.2 พล็อตกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าที่ขอบของเอลิเมนต์.....	25
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นทดสอบแบบ MT (ก) ชิ้นงานทดสอบแบบ MT.....	28
(ข) รูปร่างรอยร้าวบนชิ้นงานทดสอบ.....	28
รูปที่ 3.5 การกระจายศักย์ไฟฟ้าบนชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว.....	29
รูปที่ 3.6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานทดสอบแบบ MT ที่มีรอยร้าวไม่เอียง (ก) ตำแหน่งกระแสไหลเข้า-ออกและจุดวัดความต่างศักย์.....	31
(ข) ภาพขยาย.....	31
รูปที่ 3.7 การกระจายศักย์ไฟฟ้าบนชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวไม่เอียง.....	34
รูปที่ 3.8 ความต่างศักย์บนชิ้นงานทดสอบ MT ที่ไม่มีรอยร้าว.....	35
รูปที่ 3.9 ความต่างศักย์ไร้หน่วยที่อัตราส่วน a/w ต่าง ๆ และที่ระยะจากจุดวัด ถึงรอยร้าว 5 ถึง 40 มม.....	37
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง (ทะเลความหนา).....	38
รูปที่ 4.2 เส้นโค้งสอบเทียบของชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง.....	39

รูปที่ 4.3	วิธีที่เสนอเพื่อใช้ระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT	
	(ก) วิธี $I_y - V_y; I_y - V_x$	40
	(ข) วิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$	40
รูปที่ 4.4	ขั้นตอนการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงด้วยวิธี $I_y - V_y; I_y - V_x$	41
รูปที่ 4.5	ขั้นตอนการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงด้วยวิธี $I_y - V_y; I_y - V_x$	43
รูปที่ 4.6	สัญลักษณ์ระดับด้านของชิ้นงานทดสอบ.....	45
รูปที่ 4.7	เส้นโค้งสอบเทียบกรณี $I_y - V_y$ ของชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง.....	46
รูปที่ 4.8	เส้นโค้งสอบเทียบกรณี $I_y - V_x$ ของชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง.....	47
รูปที่ 4.9	เส้นโค้งสอบเทียบกรณี $I_x - V_x$ ของชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง.....	48
รูปที่ 4.10	ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า, μV กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y (a/w เท่ากับ 0.6 และ θ ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)	
	(ก) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 10 องศา.....	49
	(ข) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 20 องศา.....	49
	(ค) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 30 องศา.....	49
	(ง) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 40 องศา.....	49
	(จ) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 50 องศา.....	50
	(ฉ) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 60 องศา.....	50
	(ช) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 70 องศา.....	50
	(ซ) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 80 องศา.....	50
รูปที่ 4.11	ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า, μV กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x (a/w เท่ากับ 0.6 และ θ ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)	
	(ก) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 10 องศา.....	51
	(ข) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 20 องศา.....	51
	(ค) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 30 องศา.....	51
	(ง) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 40 องศา.....	51
	(จ) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 50 องศา.....	52
	(ฉ) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 60 องศา.....	52
	(ช) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 70 องศา.....	52

(ข) a/w เท่ากับ 0.6 และ θ เท่ากับ 80 องศา.....52

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15$ และ $\theta = 45$ องศา).....56

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.45$ และ $\theta = 65$ องศา).....57

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15$ และ $\theta = 25$ องศา).....59

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.45$ และ $\theta = 65$ องศา).....61

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.65$ และ $\theta = 65$ องศา).....62

รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเพียงจำนวนสองรอย.....63

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3, a/b = 1$ และ $\alpha = 10$ องศา).....65

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3, a/b = 1$ และ $\alpha = 30$ องศา).....67

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.3, a/b = 1$ และ $\alpha = 40$ องศา).....68

รูปที่ 4.21 รอยร้าวที่สมมาตรกัน.....71

รูปที่ ข.1 ไฟล์นำเข้านามสกุล .dat ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า
 ซึ่งได้จากโปรแกรม Easy FEM.....83

รูปที่ จ.1 รูปร่างชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2.....116

รูปที่ จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.15$ และ $\theta = 25$ องศา).....117

รูปที่ จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y, I_y - V_x$
 (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.65$ และ $\theta = 65$ องศา).....119

รูปที่ ช.1 ตารางคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวเพียงอย่างง่าย โดย H/W เท่ากับ 2.....123

รูปที่ ช.2 กราฟคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวที่ซับซ้อน.....124

รูปที่ ซ.3	การเปลี่ยนรอยร้าวเอียงเป็นรอยร้าวแบบไม่เอียง.....	125
รูปที่ ซ.4	การหาความยาวรอยร้าวรวมของรอยร้าวสองรอยที่อยู่ใกล้กัน.....	125

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	พื้นที่
a	ความยาวรอยร้าว
\bar{E}	สนามไฟฟ้า
\bar{F}	แรงทางไฟฟ้า
I_x	กระแสไฟฟ้าตามแนวแกน x ของชั้นทดสอบ
I_y	กระแสไฟฟ้าตามแนวแกน y ของชั้นทดสอบ
i	ขนาดกระแสไฟฟ้า
\bar{i}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยบนแกน x
\bar{j}	พลักซ์กระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J_s	พลักซ์กระแสไฟฟ้าบนผิวโดเมน
\bar{j}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยบนแกน y
K_I	Stress intensity factor
$\{K_C\}$	เมตริกซ์การนำไฟฟ้า
k	Electrostatic constant
L	ความยาววัสดุนำไฟฟ้า
m	จำนวนจุดต่อบนอิเล็กโทรด
N	ฟังก์ชันการประมาณภายใน
\hat{n}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
P	แรงดึง
Q	ขนาดประจุไฟฟ้าทั้งหมด
$\{Q_C\}$	เวกเตอร์การนำไฟฟ้า
$\{Q_I\}$	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า
q	ประจุไฟฟ้าขนาด 1 หน่วยประจุ
q_0	ประจุทดสอบ
q_v	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า
R	ความต้านทานไฟฟ้า
R	เศษตกค้าง
r	ระยะห่างระหว่างประจุไฟฟ้า

\vec{s}	เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า
t	ความหนาเอลิเมนต์
U	พลังงานศักย์
ΔU	พลังงานศักย์ที่เปลี่ยนไป
V	ความต่างศักย์
V_r	ความต่างศักย์อ้างอิง
V_x	ความต่างศักย์บนแกน x
V_y	ความต่างศักย์บนแกน y
W	งานทางไฟฟ้า
W_i	ฟังก์ชันน้ำหนักร
w	ความกว้างชั้นทดสอบ
x	ตำแหน่งพิกัดบนแกน x
y	ตำแหน่งพิกัดบนแกน y
α	มุมเอียงรอยร้าว
α_i	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการประมาณภายในสำหรับ เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ
ϵ_0	Permittivity constant
ϕ_i	จุดต่อไม่รู้ค่า
θ	มุมเอียงรอยร้าว
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า
σ	สภาพการนำไฟฟ้า