

รายการอ้างอิง

1. ASTM E561-94, Standard Practice for R-Curve Determination. ASTM Standard 3.01. American Society for Testing and Materials. 1996.
2. ASTM E647, Standard test method of measurement of fatigue crack growth rates. ASTM Standard 3.01. American Society for Testing and Materials. 1996.
3. F. Alten, JR. Grandt. Fundamentals of structural integrity : John Wiley & Sons, 2004.
4. T. L. Anderson. Fracture mechanics:fundamentals and application. Second Edition , 1995
5. W. F. Deans and C. E. Richards. A simple and sensitive method of monitoring crack and load in compact fracture mechanics specimens using strain gages. Journal of Testing and Evaluation 7, 3, (1979) : 147-154.
6. K. -H. Schwalbe and Dieter Hellmann. Application of the electrical potential method to crack length measurements using Johnson's formula. Journal of Testing and Evaluation 9, 3, (May 1981) : 218-221.
7. D. W. J. Pulle. Crack length measurement : Analysis of the electropotential method using a finite element method. Journal of strain analysis 21, 3, (1986) : 127-134.
8. W. K. Wilson. On the electrical potential analysis of a cracked fracture mechanics test specimen using the finite element method. Engineering fracture mechanics 18, (1983) : 349-358.
9. G. H. Aronson and R. O. Ritchie. Optimization of the electrical potential technique for crack growth monitoring in compact test piece using finite element analysis. Journal of Testing and Evaluation 7, 4, (1979) : 208-215.
10. R. O. Ritchie and K. J. Bathe. On the calibration of the electrical potential technique for monitoring crack growth using finite element methods. International Journal of Fracture 15, 1, (1979) : 47-55.
11. K. -H Schwalbe, W. Setz. R Curve and Fracture Toughness of thin sheet materials. Journal of Testing and Evaluation 9, 4, (1981).
12. C. G. Chipperfield. Detection and Toughness characterisation of ductile crack initiation in 316 stainless steels. International Journal of Fracture 12, 6, (December 1976) : 873-886.

13. R. Brazil, G. W. Simmons and R. P. Wei. Fatigue Crack Growth in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Exposed to Hydrogen containing gases. Journal of Engineering Materials and Technology 101, (July 1979) : 199-204.
14. R. P. Wei and R. L. Brazill. An Assessment of A-C and D-C potential systems for monitoring fatigue crack growth. American Society for Testing and Materials, (1981) : 103-119.
15. Wen-Hwa Chen, Jen-Shiung Chen, Huei-Lu Fang. A theoretical procedure for detection of simulated cracks in a pipe by the direct current-potential drop technique. Nuclear Engineering and design 216, (2002) : 203-211.
16. R. H. Vanstone and T. L. Richardson. Potential-drop monitoring of cracks in surface-flawed specimens. American Society for Testing and Materials, (1985) : 148-166.
17. M. Enmark, G. Lucas and G. R. Odette. An electric potential drop technique for characterizing part-through surface cracks. Journal of nuclear materials 191-194, (1992) : 1038-1041.
18. R. Ghajarieh, M. Saka, T. Sugawara, H. Abe, I. Komura and H. Sakamoto. NDE of multiple cracks on the surface of materials by means of the potential drop technique. NDT & E International, (1994) : 143-150.
19. J. Liu and P. Bowen. DC potential drop calibration in matrix-cladded Ti MMC specimens with a corner notch. International Journal of Fatigue 25, (2003) : 671-676.
20. L. Gandossi, S. A. Summers, N. G. Taylor, R. C. Hurst, B. J. Hulm and J. D. Parker. The potential drop method for monitoring crack growth in real components subjected to combined fatigue and creep conditions: application of FE techniques for deriving calibration curves. International Journal of Pressure Vessels and Piping 78, (2001) : 881-891.
21. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. Fundamentals of physics. Fifth Edition : John Wiley & Sons, 1997.
22. ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 10 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
23. ก่อเกียรติคุณ ภัทรกาญจน์, ธนกาญจน์ ภัทรกาญจน์. ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2530.
24. Metal Handbook, Mechanical testing 8. American Society for metals. 1985

25. Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha. Concepts and application of finite element analysis. John Wiley & Sons, 1989.
26. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
27. Toshihisa Nishioka, Hiroyuki Tokudome, Masahiro Kinoshita. Dynamic fracture-path prediction in impact fracture phenomena using moving finite element method based on Delaunay automatic mesh generation. International Journal of Solids and Structures 38, (2001) : 5273-5301.
28. D. P. Rooke and D. J. Cartwright. Compendium of Stress intensity factors. H.M.S.O, 1976.
29. The Society of Materials Science. Stress intensity factors handbook. First Edition : Pergamon Press, December 1986.
30. API Recommend practice 579. Fitness-for-service. First edition : January 2000.
31. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช. ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความต่างศักย์อ้างอิง

ความต่างศักย์อ้างอิง (คำนวณจากสมการที่ (3.21)) แบ่งได้สองกรณี คือ ความต่างศักย์ตามแนวแกน y และความต่างศักย์ตามแนวแกน x โดยแต่ละตารางประกอบด้วยความต่างศักย์ที่ระยะห่างระหว่างจุดวัดความต่างศักย์ใด ๆ ตามแนวแกนที่ป้อนกระแสไฟฟ้า บนชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยร้าว โดยตารางที่ ก.1 แสดงค่าความต่างศักย์ตามแนวแกน y เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความต่างศักย์ตามแนวแกน x เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x

ความต่างศักย์อ้างอิงจะถูกใช้เป็นผลเฉลยแม่นยำตรงในกรณีชั้นทดสอบไม่มีรอยร้าวในบทที่ 3 และใช้เป็นความต่างศักย์อ้างอิง (V_r) เพื่อหารค่าความต่างศักย์ (Normalize) ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีชั้นทดสอบมีรอยร้าว เพื่อสร้างเส้นโค้งสอบเทียบ (Calibration curve)

ตารางที่ ก.1 ความต่างศักย์ระหว่างจุดวัดสองจุดบนแกน y เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

ระยะห่างระหว่างจุดวัดความต่างศักย์ (mm)	ความต่างศักย์ Exact solutions (μV)
10	21.978
20	43.956
30	65.934
40	87.912
50	109.890
60	131.868
70	153.846
80	175.824

ตารางที่ ก.2 ความต่างศักย์ระหว่างจุดวัดสองจุดบนแกน x เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x

ระยะห่างระหว่างจุดวัดความต่างศักย์ (mm)	ความต่างศักย์ Exact solutions (μV)
10	5.495
20	10.989

ภาคผนวก ข

ลักษณะไฟล์นำเข้าและไฟล์ผลลัพธ์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื้อหาส่วนนี้แสดงรายละเอียดของไฟล์สำหรับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยรายละเอียดไฟล์สองไฟล์ คือ ไฟล์นำเข้าและไฟล์ผลลัพธ์

ข.1 ลักษณะของไฟล์นำเข้า

เนื่องจากขั้นตอนการสร้าง โมเดลขึ้นทดสอบและการสร้างเอลิเมนต์นั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Easy FEM [31] ซึ่งให้ค่าตำแหน่งพิกัดที่จุดต่อ (Nodal Coordinates) , โหลดภาระ (Load) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ซึ่งอยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล .dat ดังรูปที่ ข.1

FILEID=FEMESH SCRIPT COMMAND

DATA_FILE_VERSION=

TITLE=

SUBTITLE=

DATE=

DATA_DIR=

PROG_DIR=

OUTPUT_FILE=

SOL=

PROBLEM_ID=

SOLVER_ID=

REMESH_HMIN=

REMESH_HMAX=

ERROR_MIN=

ERROR_MAX=

ERROR_CUTOFF=

ERROR_INDICATOR_VARS_ID=

```

ERROR_INDICATOR_TYPE_ID=
AUTO_DISPLAY=
BANDWIDTH=
TEMPORAL_DISCRETIZATION=
SHOW_ITERS=
NUMBER_OF_STEP=
TIME_STEP=
ITER_NUMS=
SAVE_ITERS=
OUT_ITERS=
NODE_NUMS=
ELEMENT_NUMS=
NODAL_LOADS=
ELEMENTAL_LOADS=
SIDAL_LOADS=
MAX_PROPERTY_NUMS=
PROPERTY_NUMS=
END=
BEGIN BULK
NODE      NODE(BW)
  1         2
  2         1
  3         3
  4         4
NODE      X      Y      H [NODE=4]
  1     -0.0125  0.05  0.0
  2     -0.0125 -0.05  0.0
  3      0.0125 -0.05  0.0
  4      0.0125  0.05  0.0
ELEM      I      J      K      PROP [TRIANGLE=2]
  1         1      3      4      1
  2         1      2      3      1

```

```

NODE   L-ID   T     Qs
4      1     0.0   0.0
1      1     0.0   0.0
ELEM   L-ID   Q     QS    Ti    H
ELEM   N1    N2    L-ID   Qs1   Qs2   Ti1   Ti2   H
2      2     3     1     80000.0 80000.0 0.0   0.0   0.0
PROPID TYPE   DENSITY  CONDUCTIVITY  SPEC_HEAT  THICK
1      1013  0.0     36400000.0   0.0        0.005
END BULK

```

รูปที่ ข.1 ไฟล์นำเข้านามสกุล .dat ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า
ซึ่งได้จากโปรแกรม Easy FEM [31]

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนหัวของไฟล์ ประกอบไปด้วยข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์ปัญหาด้วย
ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนที่จำเป็นสำหรับการอ่านค่าของ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
สำหรับปัญหาการกระจายศักย์ไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วย

```

NODE_NUMS   บอกจำนวนจุดต่อ
ELEM_NUMS   บอกจำนวนเอลิเมนต์
NODAL_LOADS  บอกจำนวนภาระโหลดบนจุดต่อ
SIDAL_LOADS  บอกจำนวนภาระโหลดบนขอบเอลิเมนต์

```

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนข้อมูลที่กำหนดหมายเลขของจุดต่อและตำแหน่งพิกัดของจุดต่อ

```

ตัวอย่างเช่น :
NODE      X           Y
1         -0.0125    0.05
2         -0.0125   -0.05
3          0.0125   -0.05
4          0.0125    0.05

```

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนข้อมูลที่กำหนดหมายเลขของเอลิเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลขของ
จุดต่อที่รวมกันเป็นเอลิเมนต์นั้น ๆ

```

ตัวอย่างเช่น :
ELEM      I     J     K
1         1     3     4

```


2 1 2 3

ส่วนที่ 4 เป็นส่วนที่บอกว่าจุดต่อใดบ้างที่ได้รับ โหลดภาระ ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลขจุดต่อ, หมายเลขระบุประเภทของโหลดภาระ ถ้าเป็นหมายเลข 1 คือ โหลดภาระศักย์ไฟฟ้า (V) ที่จุดต่อนั้น ถ้าเป็นหมายเลข 2 คือ โหลดภาระความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (\bar{J}) และค่าโหลดภาระที่จุดต่อ

ตัวอย่างเช่น :	NODE	L-ID	T	Qs
	4	1	0.0	0.0
	1	1	0.0	0.0

ส่วนที่ 5 เป็นส่วนที่บอกว่าเอลิเมนต์ใดบ้างที่ได้รับ โหลดภาระด้านขอบข้าง ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลขเอลิเมนต์, หมายเลขจุดต่อของขอบที่ได้รับ โหลดภาระ, หมายเลขระบุประเภทภาระจุดต่อ หมายเลข 1 คือ ภาระโหลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (\bar{J}) และค่าโหลดภาระต่างๆ บนขอบเอลิเมนต์

ตัวอย่างเช่น :	ELEM	N1	N2	L-ID	Qs1	Qs2
	2	2	3	1	80000.	80000.

ส่วนที่ 6 เป็นส่วนข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งส่วนที่จำเป็นในการอ่านค่าของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า คือ

CONDUCTIVITY	บอกค่าสภาพการนำไฟฟ้า
THICK	บอกค่าความหนาของโมเดลชั้นทดสอบ

ข.2 ลักษณะของไฟล์ผลลัพธ์

ผลเฉลยศักย์ไฟฟ้าจะถูกพิมพ์ลงในไฟล์ชื่อที่กำหนดไว้ ซึ่งจะมีด้วยกัน 2 ไฟล์ คือ ไฟล์ผลลัพธ์ที่ระบุค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อและไฟล์สำหรับแสดงผลกราฟฟิกที่ระบุทั้งค่าจำนวนจุดต่อ, จำนวนเอลิเมนต์, ตำแหน่งพิกัดจุดต่อ, ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อ, หมายเลขจุดต่อที่รวมกันเป็นเอลิเมนต์

=====

ไฟล์ผลลัพธ์

NODAL VOLTAGE SOLUTIONS

NODE	VOLTAGE
1	.000000E+00
2	.219780E-03
3	.219780E-03
4	.000000E+00

=====

ไฟล์แสดงผลกราฟฟิก

NPOIN	NELEM	NVAR
4	2	1

NODAL COORDINATES & SOLUTIONS

1	-0.0125	0.05	.000000E+00
2	-0.0125	-0.05	.219780E-03
3	0.0125	-0.05	.219780E-03
4	0.0125	0.05	.000000E+00

ELEMENT NODAL CONNECTIONS

1	1	3	4
2	1	2	3

=====

ภาคผนวก ค

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาคผนวกนี้ประกอบไปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษาฟอร์แทรน 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า และโปรแกรมการประมาณค่าภายในสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ โดยแต่ละโปรแกรมมีรูปแบบไฟล์นำเข้างดังภาคผนวก ข

ค.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า

เงื่อนไขการใช้งาน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า

- (1) ปัญหาสภาวะคงตัว (Steady state) แบบ 2 มิติ
- (2) วัสดุมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic materials)
- (3) เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 3 จุดต่อ
- (4) ฟลักซ์กระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ป้อนเฉพาะที่ผิวด้านข้างของเอลิเมนต์
- (5) รูปแบบไฟล์นำเข้า ดังภาคผนวก ข.1

=====

- C program compute potential voltage for MT specimen
- C
- C
- C analysis program for two-dimensional steady-state current
- C flux without internal current flux generation
- C
- C
- C MXPOI = maximum number of nodes in the model
- C MXELE = maximum number of elements in the model
- C MXHBW = maximum number of half-bandwidth
- C

PARAMETER (MXPOI=2416, MXELE=4564, MXHBW=5000)

C

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

DIMENSION COORD(MXPOI,2), TEMP(MXPOI)

DIMENSION SYSK(MXPOI,MXHBW), SYSQ(MXPOI)

CHARACTER*20 NAME1, NAME2, NAME3

CHARACTER*50 TEXT

C

INTEGER INTMAT(MXELE,3), IBC(MXPOI), LTYPE(MXELE)

C

6000 WRITE(6,6010)

6010 FORMAT(/,'ENTER THE INPUT FILE NAME:')

READ(5,'(A)', ERR=6000) NAME1

OPEN(UNIT=7, FILE=NAME1, STATUS='OLD', ERR=6000)

C-----

C

C read title of computation:

C

C.....read input data:

C

READ(7,*) TEXT !FIELD=FEMESH SCRIPT COMMAND

READ(7,*) TEXT !DATA_FILE_VERSION=1

READ(7,*) TEXT !TITLE=

READ(7,*) TEXT !SUBTITLE=

READ(7,*) TEXT !DATE=

READ(7,*) TEXT !DATA_DIR

READ(7,*) TEXT !PROG_DIR

READ(7,*) TEXT !OUTPUT_FILE

READ(7,*) TEXT !SOL=

READ(7,*) TEXT !PROBLEM_ID

READ(7,*) TEXT !SOLVER_ID

READ(7,*) TEXT !REMESH_HMIN

```

READ(7,*) TEXT !REMESH_HMAX
READ(7,*) TEXT !ERROR_MIN
READ(7,*) TEXT !ERROR_MAX
READ(7,*) TEXT !ERROR_CUTOFF
READ(7,*) TEXT !ERROR_INDICATOR_VARS_ID
READ(7,*) TEXT !ERROR_INDICATOR_TYPE_ID
READ(7,*) TEXT !AUTO_DISPLAY
READ(7,*) TEXT !BANDWIDTH
READ(7,*) TEXT !TEMPORAL_DISCRETIZATION
READ(7,*) TEXT !SHOW_ITERS
READ(7,*) TEXT !NUMBER_OF_STEP
READ(7,*) TEXT !TIME_STEP
READ(7,*) TEXT !ITER_NUMS
READ(7,*) TEXT !SAVE_ITERS
READ(7,*) TEXT !OUT_ITERS

```

C

C

```

READ(7,6001) NPOIN !NODE_NUMS
6001 FORMAT(10X,I8)
      IF(NPOIN.GT.MXPOI) WRITE(6,6002) NPOIN
6002 FORMAT(/, 'INCREASE THE PARAMETER MXPOI TO ', I5)
      IF(NPOIN.GT.MXPOI) STOP

```

C

C

```

READ(7,6003) NELEM !ELEMENT_NUMS
6003 FORMAT(13X,I8)
      IF(NELEM.GT.MXELE) WRITE(6,6004) NELEM
6004 FORMAT(/, 'INCREASE THE PARAMETER MXELE TO ', I5)
      IF(NELEM.GT.MXELE) STOP

```

C

C

C NL = NUMBER OF POINT LOAD (VOLTAGE LOAD)

```

C      NSL = NUMBER OF ELEMENT LOAD (CURRENT FLUX  LOAD)
C
C
      READ(7,6005) NL  !NODAL_LOADS
6005  FORMAT(12X,I8)
C
      READ(7,*)  TEXT !ELEMENT_LOADS
C
      READ(7,6007) NSL  !SIDAL_LOADS
6007  FORMAT(12X,I8)
C
      READ(7,*)  TEXT !MAX_PROPERTY_NUMS
      READ(7,*)  TEXT !PROPERTY_NUMS
      READ(7,*)  TEXT !END=CMD
      READ(7,*)  TEXT !BEGIN BULK
      READ(7,*)  TEXT !NODE  NODE(BW)
C
      DO 6020 I=1, NPOIN
      READ(7,*)  TEXT
6020  CONTINUE
C
      READ(7,*)  TEXT !NODE X Y H
C
      DO 6030 IP=1, NPOIN
      READ(7,*) I, COORD(I,1), COORD(I,2)
      IF(I.NE.IP)  WRITE(6,6008)
6008  FORMAT(/, 'NODE NO.', I8, 'IN DATA FILE IS MISSING')
      IF(I.NE.IP)  STOP
6030  CONTINUE
C
      READ(7,*)  TEXT !ELEM I J K PROP
C

```

```
DO 6040 IE=1, NELEM
  READ(7,*) I, INTMAT(I,1), INTMAT(I,2), INTMAT(I,3)
  IF(I.NE.IE) WRITE(6,6009)
6009 FORMAT(/, 'ELEM NO.', I8, 'IN DATA FILE IS MISSING')
  IF(I.NE.IE) STOP
6040 CONTINUE
C
C   IBC(IP) = 1 ; SPECIFIED TEMPERATURE AT THIS POINT
C   IBC(IP) = 0 ; NOT SPECIFIED TEMPERATURE AT THIS POINT
C
  READ(7,*) TEXT !NODE L-ID T QS
C
  DO 6050 IP=1, NPOIN
    IBC(IP) = 0
    TEMP(IP) = 0.
6050 CONTINUE
C
  DO 6060 I=1, NL
    READ(7,*) IP, LID, TEMP(IP)
    IBC(IP) = 1
6060 CONTINUE
C
  READ(7,*) TEXT !UNUSED LINE
  READ(7,*) TEXT !ELEM N1 N2 L-ID QS1 QS2
C
C   LTYPE(IE) = 1 ; SPECIFIED HEAT-FLUX AT THIS ELEMENT
C   LTYPE(IE) = 0 ; NOT SPECIFIED HEAT-FLUX AT THIS ELEMENT
C
  DO 6070 IE=1, NELEM
    LTYPE(IE) = 0
6070 CONTINUE
C
```

```

DO 6080 I=1, NSL
  READ(7,*)  IE, N1, N2, LID, QS
  LTYPE(IE) = 1
  IF(LTYPE(IE).EQ.1) LT1=1
6080 CONTINUE
C
  READ(7,*)  TEXT !PROP TYPE DENSITY CONDUCTIVITY
*
              !SPEC_HEAT THICK
C
  READ(7,*)  PROP, TYP, DENSITY, TK, Q, THICK
C
  READ(7,*)  TEXT !END BULK
C
C-----
C
  WRITE(6,160)
160  FORMAT(/, ' THE F.E. MODEL INCLUDES THE FOLLOWING',
*
          ' CURRENT TRANSFER MODE(S):',
*
          /, ' -- ELECTRIC CONDUCTIVITY          ')
  IF(LT1.EQ.1) WRITE(6,170)
170  FORMAT( ' -- SPECIFIED SURFACE CURRENT FLUX ')
C
  NEQ = NPOIN
  DO 300 I=1,NEQ
  SYSQ(I) = 0.
300  CONTINUE
C
  compute half-bandwidth:
C
  NHBW = 0
  DO 400 IE=1,NELEM
  MIN = 100000

```



```

MAX = 0
DO 410 IN=1,3
  II = INTMAT(IE,IN)
  IF(II.GT.MAX) MAX = II
  IF(II.LT.MIN) MIN = II
410 CONTINUE
  NDIF = MAX - MIN + 1
  IF(NDIF.GT.NHBW) NHBW = NDIF
400 CONTINUE
C
  IF(NHBW.GT.MXHBW) WRITE(6,420) NHBW
420 FORMAT(/,'INCREASE THE PARAMETER MXHBW TO ',I5)
  IF(NHBW.GT.MXHBW) STOP
C
  DO 430 I=1,NEQ
  DO 430 J=1,NHBW
  SYSK(I,J) = 0.
430 CONTINUE
  WRITE(6,435) NPOIN,NELEM
435 FORMAT(/,'*** THE FINITE ELEMENT MODEL CONSISTS OF', I5,
*          'NODES AND', I5,'ELEMENTS ***')
C
C  establish all element matrices associated with the
C  specified current transfer modes and assemble them for
C  system matrices in the form needed for minimum memory
C  requirement:
C
  WRITE(6,440)
440 FORMAT(/,' *** ESTABLISHING ELEMENT MATRICES AND',
*          ' ASSEMBLING ELEMENT EQUATIONS ***' )
  CALL TRI(NELEM, INTMAT, COORD, TK,
*          QS, THICK, LTYPE, SYSK, SYSQ,

```

```

*           MXPOI, MXELE, MXHBW           )
C
WRITE(6,450)
450 FORMAT(/, '*** APPLYING BOUNDARY CONDITIONS OF NODAL',
*           'VOLTAGES ***'           )
CALL APPLYBC( NHBW, NPOIN, IBC, TEMP, SYSK, SYSQ,
*           MXPOI, MXHBW           )
C
WRITE(6,460)
460 FORMAT(/, '*** SOLVING A SET OF SIMULTANEOUS EQUATIONS',
*           ' FOR VOLTAGE SOLUTIONS ***'           )
WRITE(6,465) NEQ, NHBW
465 FORMAT(5X, '( TOTAL OF', I5,
*           ' EQUATIONS WITH HALF-BANDWIDTH OF', I4, ')')
CALL SOLVE(NEQ, NHBW, SYSK, SYSQ, MXPOI, MXHBW)
C
C output file for nodal voltage solutions:
C
470 WRITE(6,480)
480 FORMAT(/, 'ENTER FILE NAME FOR VOLTAGE'
*           ' SOLUTIONS:'           )
READ(5, '(A)', ERR=470) NAME2
OPEN(UNIT=8, FILE=NAME2, STATUS='NEW', ERR=470)
WRITE(8,490) NPOIN
490 FORMAT(' NODAL VOLTAGE SOLUTIONS [, I5, ]:',
*           //, 2X, 'NODE', 3X, 'VOLTAGE', /           )
DO 500 IP=1, NPOIN
WRITE(8,510) IP, SYSQ(IP)
510 FORMAT(I6, E14.6)
500 CONTINUE
C
C output file for graphic display and interpolation program

```

C

```

550 WRITE(6,560)
560 FORMAT(/,'ENTER FILE NAME FOR GRAPHIC DISPLAY:')
    READ(5,'(A)', ERR=550) NAME3
    OPEN(UNIT=9, FILE=NAME3, STATUS='NEW', ERR=550)
    NVAR = 1
600 WRITE(9,610) NPOIN, NELEM, NVAR
610 FORMAT(' NPOIN, NELEM, NVAR'./,3I8)
    WRITE(9,620) NPOIN
620 FORMAT('NODAL COORDINATES & SOLUTIONS ['I5,']:')
    DO 630 I=1,NPOIN
        WRITE(9,640) I, (COORD(I,J), J=1,2), SYSQ(I)
640 FORMAT(I8,3E14.6)
630 CONTINUE
        WRITE(9,650) NELEM
650 FORMAT('ELEMENT NODAL CONNECTIONS ['I5,']:')
    DO 660 IE=1,NELEM
        WRITE(9,670) IE, (INTMAT(IE,J), J=1,3)
670 FORMAT(4I8)
660 CONTINUE

```

C

```

STOP
END

```

C

C-----

C

```

SUBROUTINE APPLYBC( NHBW, NPOIN, IBC, TEMP, SYSK, SYSQ,
*                   MXPOI, MXHBW )

```

C

C apply voltage boundary conditions with condiiton codes

C of:

C 0 = free to change (to be computed)

```
C          1 = fixed as specified
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION SYSK(MXPOI,MXHBW), SYSQ(MXPOI), TEMP(MXPOI)
C
      INTEGER IBC(MXPOI)
C
      DO 100 IEQ=1,NPOIN
      IF(IBC(IEQ).EQ.0) GO TO 100
C
      IF(IEQ.EQ.1) GO TO 300
      DO 200 N=1,IEQ-1
      IROW = IEQ - N
      ICOL = N + 1
      IF(ICOL.GT.NHBW) GO TO 300
      SYSQ(IROW) = SYSQ(IROW) - SYSK(IROW,ICOL)*TEMP(IEQ)
      SYSK(IROW,ICOL) = 0.
200  CONTINUE
300  CONTINUE
C
      DO 400 ICOL=2,NHBW
      IL = IEQ + ICOL - 1
      IF(IL.GT.NPOIN) GO TO 500
      SYSQ(IL) = SYSQ(IL) - SYSK(IEQ,ICOL)*TEMP(IEQ)
      SYSK(IEQ,ICOL) = 0.
400  CONTINUE
500  CONTINUE
C
      SYSQ(IEQ) = TEMP(IEQ)
      SYSK(IEQ,1) = 1.
C
100  CONTINUE
```

```

C
    RETURN
    END
C
C-----
C
    SUBROUTINE ASSEMBLE( IE, INTMAT, AKE, QE, SYSK, SYSQ,
*                       MXPOI, MXELE, MXHBW           )
C
C    assemble element equations into system equations
C
C    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C    DIMENSION AKE(3,3), QE(3)
C    DIMENSION SYSK(MXPOI,MXHBW), SYSQ(MXPOI)
C
C    INTEGER INTMAT(MXELE,3)
C
C    NNODE = 3
C    NDF   = 1
C
C    DO 100 NR=1,NNODE
C        NODR = INTMAT(IE,NR)
C        DO 100 MR=1,NDF
C
C            denote: NSR = row position in the system eqs.
C                   NER = row position in the element eqs.
C
C            NSR = (NODR-1)*NDF + MR
C            NER = (NR - 1)*NDF + MR
C            SYSQ(NSR) = SYSQ(NSR) + QE(NER)
C
C    DO 200 NC=1,NNODE

```

```

NODC = INTMAT(IE,NC)
DO 200 MC=1,NDF
C
C   denote: NSC = column position in the system eqs.
C           (after rotation - ready for banded solver)
C           NEC = column position in the element eqs.
C
C   NSC = (NODC-1)*NDF + MC - NSR + 1
C   NEC = (NC - 1)*NDF + MC
C   IF(NSC.GT.0)
C     & SYSK(NSR,NSC) = SYSK(NSR,NSC) + AKE(NER,NEC)
200 CONTINUE
C
100 CONTINUE
C
RETURN
END
C
C-----
C
SUBROUTINE SOLVE(NROW, NHBW, GSTIF, XL, MXPOI, MXHBW)
C
C   solve a set of simultaneous equations using gauss
C   elimination. This solver routine can be described
C   by using an example of a set of four simultaneous
C   equations (after applying boundary conditions) as
C   shown below:
C
C   [ A11 A12 A13 0 ] [ X1 ]          [ F1 ]
C   [                   ] [   ]          [   ]
C   [ A12 A22 A23 A24 ] [ X2 ]          [ F2 ]
C   [                   ] [   ]          [   ]

```

```

C   [ A13  A23  A33  A34 ] [ X3 ]           [ F3 ]
C   [                   ] [   ]           [   ]
C   [ 0   A24  A34  A44 ] [ X4 ]           [ F4 ]

```

C

C where the variable XL is the load vector on RHS of the
C equations. The global stiffness matrix above is stored
C in the variable GSTIF in the format shown below:

C (here NROW = 4 and NHBW =3)

```

C                   [ A11  A12  A13 ]
C                   [                   ]
C                   [ A22  A23  A24 ]
C [ GSTIF ]      =  [                   ]
C                   [ A33  A34   0 ]
C                   [                   ]
C                   [ A44   0   0 ]

```

C

C and the output solutions will be restored in the
C variable XL.

C

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

C

```

DIMENSION GSTIF(MXPOI,MXHBW), XL(MXPOI)

```

C

```

NR = NROW

```

```

NC = NHBW

```

C

C diagonalization the matrix:

C

```

DO 10 I=1,NR

```

```

PIVOT1=GSTIF(I,1)

```

```

IF(ABS(PIVOT1).LT.9.E-10) THEN

```

```

WRITE(6,1025) I, PIVOT1

```

```

1025  FORMAT(' EQ. NO.',I5, ' HAS NEARLY ZERO PIVOT OF', E14.6,
*      ' ** STOP **', //,
*      ' *** CHECK NODE AND ELEMENT NUMBERING IN F.E. MODEL ***')
      STOP
      ENDIF
C
      XL(I)=XL(I)/PIVOT1
      DO 20 J=1,NC
20    GSTIF(I,J)=GSTIF(I,J)/PIVOT1
      MM=0
      DO 30 II=I+1,NR
      MM=MM+1
      IF(MM+1.GT.NC) GOTO 30
      PIVOT2=GSTIF(I,MM+1)*PIVOT1
      XL(II)=XL(II)-XL(I)*PIVOT2
      DO 40 JJ=1,NC
      JJJ=JJ+MM
      IF(JJJ.LE.NC)
& GSTIF(II,JJ)=GSTIF(II,JJ)-GSTIF(I,JJJ)*PIVOT2
40    CONTINUE
30    CONTINUE
10    CONTINUE
C
C    back substitution:
C
      DO 70 I=NR-1,1,-1
      II=1
      DO 80 J=I+1,NR
      II=II+1
      IF(II.LE.NHBW) XL(I)=XL(I)-GSTIF(I,II)*XL(J)
80    CONTINUE
70    CONTINUE

```



```

C
    RETURN
    END
C
C-----
C
    SUBROUTINE TRI(NELEM, INTMAT, COORD,  TK,  QS,
*                THICK, LTYPE, SYSK , SYSQ, MXPOI,
*                MXELE, MXHBW                )
C
C    establish element matrices according to the specified current
C    transfers modes and assemble them for system equations
C
    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
    DIMENSION COORD(MXPOI,2), SYSK(MXPOI,MXHBW), SYSQ(MXPOI)
    DIMENSION AKC(3,3), QSS(3)
    DIMENSION AKE(3,3), QE(3), B(2,3), BT(3,2)
C
    INTEGER INTMAT(MXELE,3), LTYPE(MXPOI)
C
C    loop over the number of elements:
C
    DO 5000 IE=1,NELEM
C
C    find element local coordinates:
C
    II = INTMAT(IE,1)
    JJ = INTMAT(IE,2)
    KK = INTMAT(IE,3)
C
    XG1 = COORD(II,1)
    XG2 = COORD(JJ,1)

```

```

XG3 = COORD(KK,1)
YG1 = COORD(II,2)
YG2 = COORD(JJ,2)
YG3 = COORD(KK,2)
AREA = 0.5*(XG2*(YG3-YG1) + XG1*(YG2-YG3) + XG3*(YG1-YG2))
IF(AREA.LE.0.) WRITE(6,5) IE
5  FORMAT(/, ' !!! ERROR !!! ELEMENT NO.', I5,
*      ' HAS NEGATIVE OR ZERO AREA ', /,
*      ' --- CHECK F.E. MODEL FOR NODAL COORINATES',
*      ' AND ELEMENT NODAL CONNECTIONS ---' )
IF(AREA.LE.0.) STOP

C

B1 = YG2 - YG3
B2 = YG3 - YG1
B3 = YG1 - YG2
C1 = XG3 - XG2
C2 = XG1 - XG3
C3 = XG2 - XG1

C

DO 10 I=1,2
DO 10 J=1,3
B(I,J) = 0.
10  CONTINUE

C

B(1,1) = B1
B(1,2) = B2
B(1,3) = B3
B(2,1) = C1
B(2,2) = C2
B(2,3) = C3

C

DO 20 I=1,2

```

```

DO 30 J=1,3
B(I,J) = B(I,J)/(2.*AREA)
BT(J,I) = B(I,J)
30 CONTINUE
20 CONTINUE
C
C zero all coefficients of the final element matrices:
C
DO 50 I=1,3
QE(I) = 0.
DO 50 J=1,3
AKE(I,J) = 0.
50 CONTINUE
C
C element conductivity matrix:
C
DO 100 I=1,3
DO 100 J=1,3
AKC(I,J) = 0.
DO 110 K=1,2
AKC(I,J) = AKC(I,J) + BT(I,K)*B(K,J)
110 CONTINUE
AKC(I,J) = TK*AREA*THICK*AKC(I,J)
100 CONTINUE
DO 120 I=1,3
DO 120 J=1,3
AKE(I,J) = AKE(I,J) + AKC(I,J)
120 CONTINUE
C
C element current vector due to specified surface current flux:
C
EL = 0.

```

IF(LTYPE(IE).NE.1) GO TO 500

IF(YG1.EQ.YG3) EL = ABS(XG1-XG3)

IF(YG1.EQ.YG2) EL = ABS(XG1-XG2)

IF(YG2.EQ.YG3) EL = ABS(XG2-XG3)

C

IF(XG1.EQ.XG3) EL = ABS(YG1-YG3)

IF(XG1.EQ.XG2) EL = ABS(YG1-YG2)

IF(XG2.EQ.XG3) EL = ABS(YG2-YG3)

C

FAC = QS*THICK*EL/2.

DO 410 I=1,3

QSS(I) = FAC

410 CONTINUE

IF(YG1.EQ.YG3) QSS(2) = 0.

IF(YG1.EQ.YG2) QSS(3) = 0.

IF(YG2.EQ.YG3) QSS(1) = 0.

C

IF(XG1.EQ.XG3) QSS(2) = 0.

IF(XG1.EQ.XG2) QSS(3) = 0.

IF(XG2.EQ.XG3) QSS(1) = 0.

C

DO 420 I=1,3

QE(I) = QE(I) + QSS(I)

420 CONTINUE

500 CONTINUE

C

C assemble these element matrices to form system eqations:

C

CALL ASSEMBLE(IE, INTMAT, AKE, QE, SYSK, SYSQ,
* MXPOI, MXELE, MXHBW)

C

5000 CONTINUE

C

RETURN

END

=====

ค.2 โปรแกรมประมาณค่าภายในสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ

โปรแกรมการประมาณค่าภายในสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ จะมีขั้นตอนการทำงานโดยหลังจากผู้ใช้ระบุตำแหน่งพิกัดสองจุดที่ต้องการหาค่าความต่างศักย์ โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าค่าตำแหน่งพิกัดนั้น ๆ อยู่ภายในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมซึ่งล้อมรอบด้วยจุดต่อ (Node) ะไรบ้าง ดังในหัวข้อที่ 2.6 จากนั้นก็จะทำการประมาณค่าภายใน (สมการที่ 2.30) เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์

รูปแบบไฟล์นำเข้า (Input file) ที่ใช้สำหรับโปรแกรมการประมาณค่าภายในนี้ จะใช้ไฟล์ผลลัพธ์สำหรับแสดงผลกราฟฟิกที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาคผนวก ข.2 ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนจุดต่อ, จำนวนเอลิเมนต์, ตำแหน่งพิกัดจุดต่อ, ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่อ, หมายเลขจุดต่อที่รวมกันเป็นเอลิเมนต์

=====

PROGRAM INTERPOLATION

C

C-----

C.....PROGRAM INTERPOLATATION FOR THREE NODES

C.....TRIANGULAR ELEMENT

C-----

C

PARAMETER (MXPOI=20000, MXELE=20000)

INTEGER NPOIN, NELEM, NVAR

C

DIMENSION COORD(MXPOI,2), INTMAT(MXELE,3)

DIMENSION VOLT(MXPOI), ANSWER(2)

C

```

REAL X(3), Y(3), N(3)
REAL V(3), A(3), B(3), C(3)
C
CHARACTER*20 FILENAME
CHARACTER*50 TEXT
C
C.....READ NAME OF DATA FILES
C
2  WRITE(6,5)
5  FORMAT(/, 'ENTER OF DATA FILE FOR INTERPOLATION')
   READ(5, '(A)', ERR=2) FILENAME
   OPEN(UNIT=7, FILE=FILENAME, STATUS='OLD',ERR=2)
C
C  READ NODE-NUMBER, COORDINATES, AND VALUE AT THAT NODE
C
   READ(7,*) TEXT !NPOIN, NELEM, NVAR
   READ(7,*) NPOIN, NELEM, NVAR
   READ(7,*) TEXT !NODAL COORDINATE & SOLUTIONS
   DO 10 IP=1,NPOIN
   READ(7,*) I, (COORD(I,K), K=1,2), VOLT(I)
   IF(I.NE.IP) WRITE(*,100) IP
100  FORMAT(/, 'NODE NO.', I8, 'DATA FILE IS MISSING')
   IF(I.NE.IP) STOP
10  CONTINUE
C
C  READ ELEMENT-NUMBER, NODE-CONNECTON
C
   READ(7,*) TEXT !ELEMENT NODAL CONNECTIONS
   DO 20 IE=1,NELEM
   READ(7,*) I, (INTMAT(I,J), J=1,3)
   IF(I.NE.IE) WRITE(*,200) IE
200  FORMAT(/, 'ELEM NO.', I8, 'DATA FILE IS MISSING')

```

```

        IF(I.NE.IE) STOP
20    CONTINUE
C
C.....INPUT COORDINATE OF POINT TO EVALUATE
C
        DO 9000 M=1,8
        DO 5000 L=1,2
        WRITE(6,300)
300   FORMAT(3X, 'ENTER (-/+)XX COORDINATE')
        READ(5,*) XX
        WRITE(6,400)
400   FORMAT(3X, 'ENTER (-/+)YY COORDINATE')
        READ(5,*) YY
C
C-----
C.....INPUT NODE NUMBER OF TRIANGULAR ELEMENT TO INTERPOLATE
C-----
C
        DO 30 IE=1,NELEM
C
C.....INPUT NODE NUMBER OF FIRST POINT
C
        X(1) = COORD(INTMAT(IE,1),1)
        Y(1) = COORD(INTMAT(IE,1),2)
        V(1) = VOLT(INTMAT(IE,1))
C
C.....INPUT NODE NUMBER OF SECOND POINT
C
        X(2) = COORD(INTMAT(IE,2),1)
        Y(2) = COORD(INTMAT(IE,2),2)
        V(2) = VOLT(INTMAT(IE,2))
C

```

C.....INPUT NODE NUMBER OF THIRD POINT

C

X(3) = COORD(INTMAT(IE,3),1)

Y(3) = COORD(INTMAT(IE,3),2)

V(3) = VOLT(INTMAT(IE,3))

C

C-----

C.....CHECK ELEMENT WHETHER POINT INSIDE

C-----

C

AREA = 0.5*(X(2)*(Y(3)-Y(1)) +
* X(1)*(Y(2)-Y(3)) + X(3)*(Y(1)-Y(2)))

C

AREA1 = 0.5*(X(2)*Y(3) - X(3)*Y(2) +
* (Y(2)-Y(3))*XX + (X(3)-X(2))*YY)
IF(AREA1.LT.0.) GO TO 30

C

AREA2 = 0.5*(X(3)*Y(1) - X(1)*Y(3) +
* (Y(3)-Y(1))*XX + (X(1)-X(3))*YY)
IF(AREA2.LT.0.) GO TO 30

C

AREA3 = 0.5*(X(1)*Y(2) - X(2)*Y(1) +
* (Y(1)-Y(2))*XX + (X(2)-X(1))*YY)
IF(AREA3.LT.0.) GO TO 30

C

AREAT = AREA1 + AREA2 + AREA3

C

C-----

C.....PART OF COMPUTATION

C-----

C

AREA = 0.5*(X(2)*(Y(3)-Y(1)) +


```

*           X(1)*(Y(2)-Y(3)) + X(3)*(Y(1)-Y(2)) )
A(1)  =  X(2)*Y(3)-X(3)*Y(2)
A(2)  =  X(3)*Y(1)-X(1)*Y(3)
A(3)  =  X(1)*Y(2)-X(2)*Y(1)
B(1)  =  Y(2)-Y(3)
B(2)  =  Y(3)-Y(1)
B(3)  =  Y(1)-Y(2)
C(1)  =  X(3)-X(2)
C(2)  =  X(1)-X(3)
C(3)  =  X(2)-X(1)
DO 3 I=1,3
N(I)  =  0.
N(I)  =  (A(I)+(B(I)*XX)+(C(I)*YY))/(2.*AREA)
3     CONTINUE
      ANSWER(L) =  V(1)*N(1)+V(2)*N(2)+V(3)*N(3)
      WRITE(*,14) (INTMAT(IE,J), J=1,3)
14    FORMAT(/, 3X, 'POINT1 = ', I8
*           /, 3X, 'POINT2 = ', I8
*           /, 3X, 'POINT3 = ', I8 )
30    CONTINUE
5000  CONTINUE
      DVOLT  =  0.
      DVOLT  =  ANSWER(1)-ANSWER(2)
      WRITE(*,15) ANSWER(1), ANSWER(2), DVOLT
15    FORMAT(/, 3X, 'ANSWER1= ', E14.6
*           /, 3X, 'ANSWER2= ', E14.6
*           /, 3X, 'DVOLT = ', E14.6 )
9000  CONTINUE
      STOP
      END
=====

```

ภาคผนวก ง

ความต่างศักย์และความต่างศักย์ไร้หน่วย ที่ตำแหน่ง วัดความต่างศักย์เป็นระยะต่าง ๆ

ภาคผนวกนี้แสดงความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ที่จุดวัดความต่างศักย์บนและล่าง กึ่งกลางรอยร้าวเป็นระยะต่าง ๆ โดยแบ่งเป็นสามกรณี คือความต่างศักย์ไร้หน่วยสำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y วัดความต่างศักย์แกน y ($I_y - V_y$) จำนวนแปดตาราง ดังตารางที่ ง.1 ถึง ตารางที่ ง.8 ความต่างศักย์สำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y วัดความต่างศักย์แกน x ($I_y - V_x$) และความต่างศักย์ไร้หน่วยสำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x วัดความต่างศักย์แกน x ($I_x - V_x$) กรณีละสองตาราง ดังตารางที่ ง.9 ถึง ตารางที่ ง.10 และดังตารางที่ ง.11 ถึง ตารางที่ ง.12 ตามลำดับ

ง.1 ความต่างศักย์ไร้หน่วยสำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y วัดความต่างศักย์แกน y

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.030	1.125	1.278	1.487	1.754	2.091	2.529
20	1.027	1.113	1.259	1.458	1.708	2.024	2.425
30	1.024	1.098	1.229	1.408	1.638	1.924	2.270
40	1.019	1.080	1.189	1.349	1.549	1.789	2.078
50	1.014	1.059	1.146	1.277	1.446	1.652	1.884
60	1.009	1.039	1.100	1.200	1.339	1.503	1.683
70	1.005	1.021	1.055	1.125	1.229	1.349	1.476
80	1.003	1.008	1.020	1.055	1.125	1.193	1.258

$V_r = 21.978 \mu V$ (ตารางที่ ก.1)

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.010	1.042	1.098	1.179	1.291	1.441	1.644
20	1.009	1.038	1.090	1.165	1.266	1.404	1.587
30	1.008	1.032	1.077	1.141	1.229	1.348	1.500
40	1.006	1.026	1.060	1.113	1.184	1.276	1.397
50	1.005	1.019	1.044	1.081	1.134	1.205	1.296
60	1.003	1.012	1.028	1.051	1.085	1.134	1.198
70	1.002	1.006	1.014	1.026	1.043	1.070	1.108
80	1.001	1.003	1.005	1.009	1.014	1.022	1.037

$$V_r = 43.956 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.006	1.025	1.059	1.109	1.178	1.274	1.405
20	1.005	1.023	1.054	1.099	1.162	1.248	1.365
30	1.005	1.019	1.046	1.084	1.137	1.210	1.305
40	1.004	1.015	1.036	1.066	1.107	1.162	1.234
50	1.003	1.011	1.025	1.047	1.076	1.115	1.165
60	1.002	1.007	1.016	1.029	1.047	1.071	1.101
70	1.001	1.004	1.008	1.014	1.023	1.034	1.049
80	1.001	1.001	1.003	1.005	1.007	1.011	1.015

$$V_r = 65.934 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

ตารางที่ ง.4 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
20 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.004	1.018	1.043	1.080	1.131	1.201	1.299
20	1.004	1.016	1.039	1.072	1.118	1.182	1.268
30	1.003	1.014	1.033	1.061	1.100	1.153	1.222
40	1.003	1.011	1.026	1.048	1.078	1.117	1.168
50	1.002	1.008	1.018	1.034	1.054	1.082	1.117
60	1.001	1.005	1.012	1.021	1.033	1.050	1.071
70	1.001	1.003	1.006	1.010	1.016	1.024	1.034
80	1.000	1.001	1.002	1.003	1.005	1.007	1.010

$$V_r = 87.912 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

ตารางที่ ง.5 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
25 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.003	1.015	1.034	1.063	1.104	1.16	1.238
20	1.003	1.013	1.031	1.057	1.094	1.144	1.213
30	1.003	1.011	1.026	1.048	1.079	1.121	1.176
40	1.002	1.009	1.020	1.038	1.061	1.092	1.133
50	1.002	1.006	1.015	1.027	1.043	1.065	1.092
60	1.001	1.004	1.009	1.016	1.026	1.039	1.055
70	1.001	1.002	1.005	1.008	1.013	1.019	1.026
80	1.000	1.001	1.002	1.003	1.004	1.006	1.008

$$V_r = 109.890 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

ตารางที่ ง.6 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
30 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.003	1.012	1.028	1.052	1.086	1.133	1.198
20	1.003	1.011	1.026	1.048	1.078	1.120	1.177
30	1.002	1.009	1.022	1.04	1.066	1.101	1.146
40	1.002	1.007	1.017	1.032	1.051	1.077	1.111
50	1.001	1.005	1.012	1.022	1.036	1.054	1.076
60	1.001	1.003	1.008	1.014	1.022	1.032	1.046
70	1.001	1.002	1.004	1.007	1.011	1.015	1.022
80	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003	1.005	1.006

$$V_r = 131.868 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

ตารางที่ ง.7 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
35 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.002	1.01	1.024	1.045	1.074	1.114	1.169
20	1.002	1.009	1.022	1.041	1.067	1.103	1.152
30	1.002	1.008	1.019	1.034	1.056	1.086	1.125
40	1.001	1.006	1.015	1.027	1.044	1.066	1.095
50	1.001	1.004	1.010	1.019	1.030	1.046	1.065
60	1.001	1.003	1.006	1.012	1.019	1.028	1.039
70	1.000	1.002	1.003	1.006	1.009	1.013	1.019
80	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005

$$V_r = 153.846 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.1)}$$

ตารางที่ ง.8 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน y ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
40 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.002	1.009	1.021	1.039	1.065	1.100	1.148
20	1.002	1.008	1.019	1.036	1.059	1.090	1.133
30	1.002	1.007	1.016	1.030	1.049	1.075	1.110
40	1.001	1.005	1.013	1.024	1.038	1.057	1.083
50	1.001	1.004	1.009	1.017	1.027	1.040	1.057
60	1.001	1.002	1.006	1.010	1.016	1.024	1.034
70	1.000	1.001	1.003	1.005	1.008	1.012	1.016
80	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005

$V_r = 175.824 \mu V$ (ตารางที่ ก.1)

ง.2 ความต่างศักย์สำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y วัดความต่างศักย์แกน x

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	0.106	0.557	1.788	5.967	15.112	25.046	36.147
20	0.202	0.979	2.927	7.201	13.917	22.150	31.799
30	0.270	1.267	3.464	7.297	12.718	19.478	27.375
40	0.294	1.380	3.501	6.853	11.238	16.459	22.725
50	0.300	1.325	3.222	5.921	9.351	13.519	18.244
60	0.262	1.141	2.667	4.717	7.254	10.306	13.765
70	0.198	1.141	1.872	3.271	4.955	6.917	9.164
80	0.105	0.438	0.976	1.683	2.529	3.496	4.582

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	0.064	0.302	0.738	1.509	2.825	5.289	9.887
20	0.123	0.544	1.361	2.754	4.995	8.564	14.547
30	0.163	0.725	1.813	3.531	6.220	10.206	15.950
40	0.182	0.813	1.990	3.826	6.489	10.044	14.987
50	0.185	0.802	1.940	3.616	5.929	9.055	12.987
60	0.162	0.707	1.679	3.081	4.937	7.353	10.247
70	0.123	0.529	1.222	2.219	3.493	5.107	7.053
80	0.065	0.278	0.650	1.170	1.823	2.631	3.583

ง.3 ความต่างศักย์ไร้หน่วยสำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x วัดความต่างศักย์แกน x

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.003	1.008	1.019	1.051	1.115	1.174	1.226
20	1.005	1.019	1.050	1.115	1.208	1.308	1.405
30	1.008	1.035	1.089	1.180	1.298	1.430	1.562
40	1.012	1.053	1.129	1.243	1.383	1.535	1.697
50	1.017	1.071	1.167	1.298	1.456	1.634	1.818
60	1.021	1.088	1.200	1.346	1.518	1.714	1.921
70	1.025	1.101	1.223	1.381	1.565	1.771	1.995
80	1.027	1.110	1.239	1.406	1.598	1.811	2.042

$$V_r = 5.495 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.2)}$$

ตารางที่ ง.12 ความต่างศักย์ไว้หน่วยบนแกน x ที่ห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง
10 มม. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน x

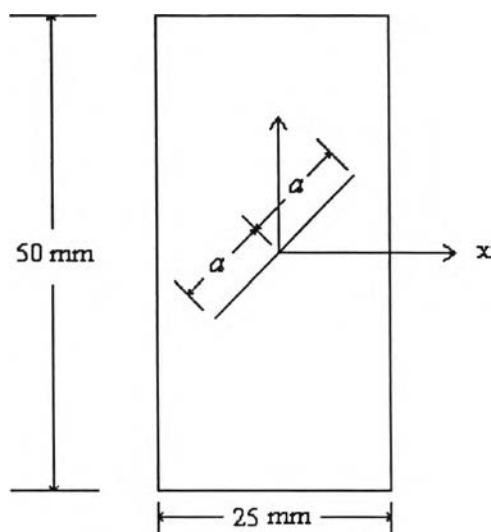
มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.001	1.002	1.004	1.006	1.011	1.017	1.029
20	1.001	1.005	1.010	1.019	1.032	1.051	1.080
30	1.002	1.008	1.020	1.037	1.062	1.096	1.139
40	1.003	1.013	1.031	1.058	1.094	1.139	1.195
50	1.005	1.018	1.043	1.078	1.123	1.182	1.25
60	1.006	1.023	1.054	1.097	1.151	1.219	1.296
70	1.007	1.028	1.062	1.111	1.171	1.246	1.332
80	1.007	1.030	1.068	1.121	1.186	1.264	1.354

$$V_r = 10.989 \mu V \text{ (ตารางที่ ก.2)}$$

ภาคผนวก จ

ทดสอบการใช้เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับสัดส่วนความยาวต่อความกว้างขึ้น ทดสอบเท่ากับ 4 กับขึ้นทดสอบที่มีสัดส่วน ความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2

ขึ้นทดสอบที่มีรอยร้าวแบบซับซ้อน โดยมีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 [] ดังรูปที่ จ.1 ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธี $I_y - V_y$, $I_x - V_x$ (หัวข้อที่ 4.5) แต่วิทยานิพนธ์นี้กำหนดสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 4 จึงต้องทดสอบความแม่นยำของการใช้เส้นกราฟสอบเทียบที่ได้จากขึ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 4 กับขึ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ จ.1 รูปร่างขึ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2

ตัวอย่างที่ 1 สร้างรอยร้าวที่มีค่า $a/w = 0.15$ และมีมุมเอียง $\theta = 25$ องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณต่างศักย์ไว้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน y , V_y/V_r และแกน x , V_x/V_r คือ 1.060 และ 1.015 ตามลำดับ ค่า a/w ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ แสดงอยู่ในตารางที่ จ.1 เมื่อพล็อตจุด $(a/w, \theta)$ แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ จ.2)

กรณี $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 1.00 \times 10^{-8} \theta^4 - 8.07 \times 10^{-7} \theta^3 + 4.41 \times 10^{-5} \theta^2 - 1.73 \times 10^{-4} \theta + 1.38 \times 10^{-1} \quad (จ.1)$$

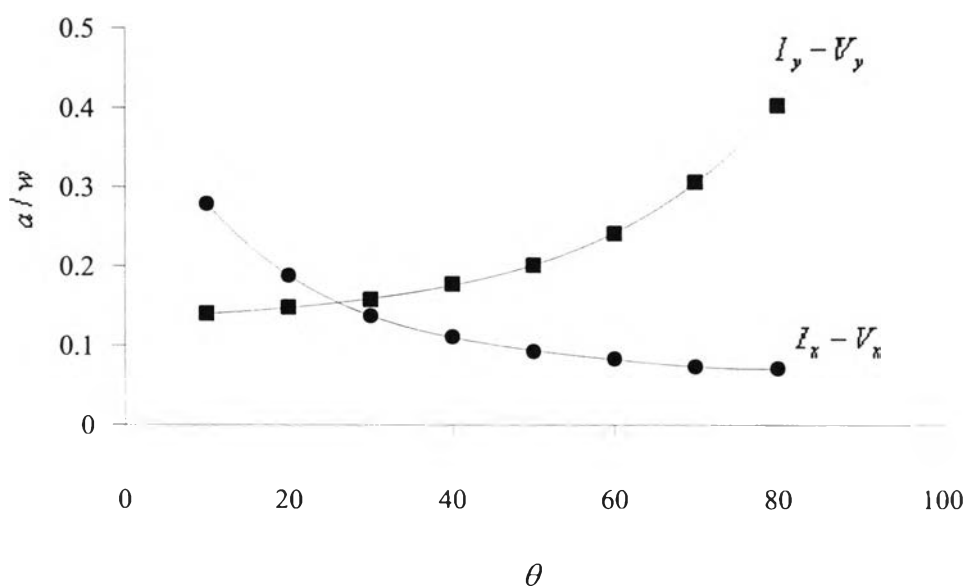
กรณี $I_x - V_x$

$$\frac{a}{w} = 2.13 \times 10^{-8} \theta^4 - 4.96 \times 10^{-6} \theta^3 + 4.46 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.93 \times 10^{-2} \theta + 4.32 \times 10^{-1} \quad (จ.2)$$

แก้สมการ (จ.1) และ (จ.2) คือ $\theta = 26.037$ องศา และ $a/w = 0.154$ ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไร้หน่วย) คือ 4.148 เปอร์เซ็นต์ และ 2.667 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ จ.1 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)

มุมเอียงรอยร้าว θ (องศา)	a/w	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.140	0.279
20	0.148	0.188
30	0.158	0.138
40	0.177	0.111
50	0.201	0.093
60	0.241	0.084
70	0.307	0.074
80	0.404	0.072



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

ตัวอย่างที่ 2 สร้างรอยร้าวที่มีค่า $a/w = 0.65$ และมีมุมเอียง $\theta = 65$ องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ไว้หน่วยที่ตกร้อมจุดที่อยู่บนแกน y , V_y/V_r และแกน x , V_x/V_r คือ 1.504 และ 1.893 ตามลำดับ ค่า a/w ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$ และ $I_x - V_x$ แสดงอยู่ในตารางที่ จ.2 เมื่อพล็อตจุด $(a/w, \theta)$ แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ จ.3)

กรณี $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 4.02 \times 10^{-8} \theta^4 - 4.94 \times 10^{-6} \theta^3 + 2.67 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.95 \times 10^{-3} \theta + 4.25 \times 10^{-1} \quad (\text{จ.3})$$

กรณี $I_x - V_x$

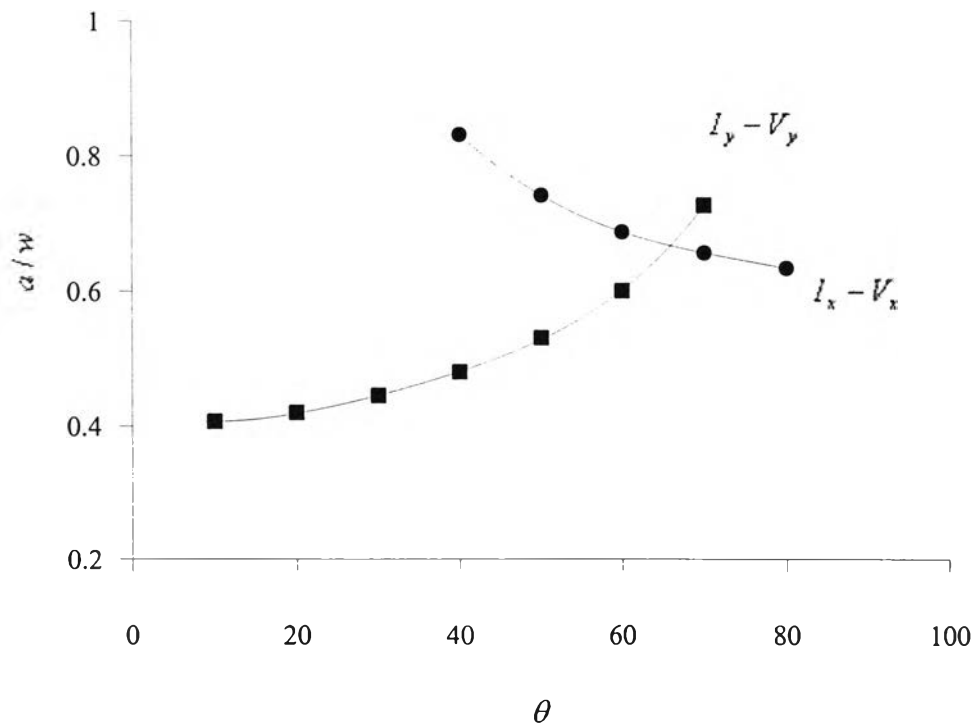
$$\frac{a}{w} = 1.75 \times 10^{-8} \theta^4 - 5.97 \times 10^{-6} \theta^3 + 8.11 \times 10^{-4} \theta^2 - 5.21 \times 10^{-2} \theta + 1.95 \quad (\text{จ.4})$$

แก้สมการ (จ.3) และ (จ.4) คือ $\theta = 65.857$ องศา และ $a/w = 0.666$ ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไว้หน่วย) คือ 1.32 เปอร์เซ็นต์ และ 2.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ จ.2 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)

มุมเอียงรอยร้าว θ (องศา)	a/w	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.407	-
20	0.420	-
30	0.445	-
40	0.480	0.831
50	0.530	0.741
60	0.600	0.687
70	0.726	0.656
80	-	0.637



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง a/w กับ θ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ $I_y - V_y$, $I_x - V_x$
(ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ $a/w = 0.65$ และ $\theta = 65$ องศา)

จากการทดสอบเห็นได้ว่าสามารถใช้กราฟสอบเทียบที่ได้จากชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 4 กับชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 ถึงแม้มีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยที่สูงขึ้น

ภาคผนวก ก

เปรียบเทียบความต่างศักย์ในช่วง 10, 20,..., 80 องศา กับความต่างศักย์ในช่วง 100, 110,..., 170 องศา

ภาคผนวกนี้แสดงการเปรียบเทียบความต่างศักย์ไร้หน่วย (V/V_r) ตามแนวแกน y ของมุมเอียงรอยร้าว (θ) ในช่วง 10, 20,..., 80 องศา กับความต่างศักย์ไร้หน่วยของมุมเอียงรอยร้าวในช่วง 100, 110,..., 170 องศา เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าแกน y โดยแสดงเฉพาะความต่างศักย์ไร้หน่วยสำหรับจุดวัดความต่างศักย์ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางรอยร้าว บนและล่าง 5 มม. เท่านั้น

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1.030	1.125	1.278	1.487	1.754	2.091	2.529
20	1.027	1.113	1.259	1.458	1.708	2.024	2.425
30	1.024	1.098	1.229	1.408	1.638	1.924	2.270
40	1.019	1.080	1.189	1.349	1.549	1.789	2.078
50	1.014	1.059	1.146	1.277	1.446	1.652	1.884
60	1.009	1.039	1.100	1.200	1.339	1.503	1.683
70	1.005	1.021	1.055	1.125	1.229	1.349	1.476
80	1.003	1.008	1.020	1.055	1.125	1.193	1.258

$V_r = 21.978 \mu V$ (ตารางที่ ก.1)

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

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
170	1.030	1.124	1.276	1.486	1.752	2.090	2.527
160	1.027	1.113	1.258	1.459	1.709	2.023	2.423
150	1.024	1.099	1.229	1.408	1.639	1.923	2.271
140	1.019	1.079	1.189	1.349	1.547	1.789	2.081
130	1.014	1.060	1.145	1.278	1.446	1.653	1.885
120	1.010	1.039	1.100	1.200	1.337	1.501	1.683
110	1.006	1.021	1.056	1.126	1.229	1.349	1.476
100	1.003	1.008	1.020	1.055	1.125	1.193	1.259

$V_r = 21.978 \mu V$ (ตารางที่ ก.1)

ภาคผนวก ข

จำนวนจุดต่อและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกราฟสอบเทียบ

ภาคผนวกนี้แสดงจำนวนจุดต่อ (บรรทัดบน) และจำนวนเอลิเมนต์ (บรรทัดล่าง) ที่ใช้คำนวณความต่างศักย์สำหรับเส้นโค้งสอบเทียบ (Calibration curve) $I_y - V_y$ (รูปที่ 4.7), $I_y - V_x$ (รูปที่ 4.8) และ $I_x - V_x$ (รูปที่ 4.9) โดยค่าที่แสดง เลือกจากจำนวนจุดต่อหรือจำนวนเอลิเมนต์ที่ทำให้ความต่างศักย์ที่คำนวณได้ถูกต้อง (กำหนดไว้ไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์, $0.5 > \left| \frac{V_{NEW} - V_{OLD}}{V_{NEW}} \right| \times 100$)

ตารางที่ ข.1 จำนวนจุดต่อและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

มุมเอียงรอยร้าว, θ (องศา)	a/w						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
10	1,077	1,151	1,282	1,372	1,480	2,124	3,563
	2,048	2,188	2,430	2,590	2,786	3,980	6,658
20	1,084	1,098	1,262	1,419	1,515	2,202	3,742
	2,062	2,082	2,390	2,684	2,856	4,134	7,010
30	1,073	1,101	1,251	1,393	1,522	2,339	3,881
	2,040	2,088	2,368	2,632	2,870	4,408	7,278
40	1,065	1,080	1,247	1,437	1,592	2,407	4,183
	2,024	2,046	2,360	2,720	3,010	4,548	7,848
50	1,064	1,084	1,252	1,441	1,576	2,404	4,224
	2,022	2,054	2,370	2,728	2,978	4,542	7,970
50	1,038	1,052	1,268	1,404	1,573	2,416	4,362
	1,970	1,990	2,402	2,654	2,972	4,564	8,206
70	1,067	1,049	1,239	1,413	1,593	2,385	4,432
	2,028	1,984	2,344	2,672	3,012	4,506	8,346
80	1,032	1,061	1,276	1,404	1,607	2,394	4,427
	1,958	2,008	2,418	2,654	3,040	4,522	8,336

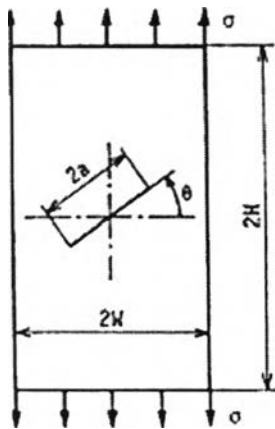
ภาคผนวก ข

ตารางและกราฟคำนวณ Stress intensity factor

ภาคผนวกนี้แสดงกราฟและตารางคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor) สำหรับชิ้นทดสอบที่มีรอยร้าวเอียงอย่างง่าย รอยร้าวแบบซับซ้อน และวิธีคำนวณของ API-579

ข.1 ตารางคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวเอียงอย่างง่าย

ตารางคำนวณ Stress intensity factor (K_I) สำหรับชิ้นทดสอบสัดส่วน H/W เท่ากับ 2 ที่มีรอยร้าวเอียงอย่างง่าย โดย a/w และ θ หากจากวิธีการระบุลักษณะรอยร้าว $I_y - V_y$, $I_x - V_x$



		θ					
		15°	30°	45°	60°	75°	
F_I	a/w	0.1	0.9391	0.7557	0.5046	0.2527	0.0678
	0.2	0.9577	0.7730	0.5181	0.2605	0.0701	
	0.3	0.9904	0.8025	0.5406	0.2730	0.0736	
	0.4	1.0402	0.8456	0.5719	0.2896	0.0783	
	0.5	1.1128	0.9046	0.6119	0.3099	0.0837	
	0.6	1.2183	0.984	0.6611	0.3332	0.0896	
	0.7	1.378	1.091	0.721	0.359	0.0957	
	0.8	1.653	1.245	0.795	0.388	0.102	

รูปที่ ข.1 ตารางคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวเอียง โดย H/W เท่ากับ 2 [29]

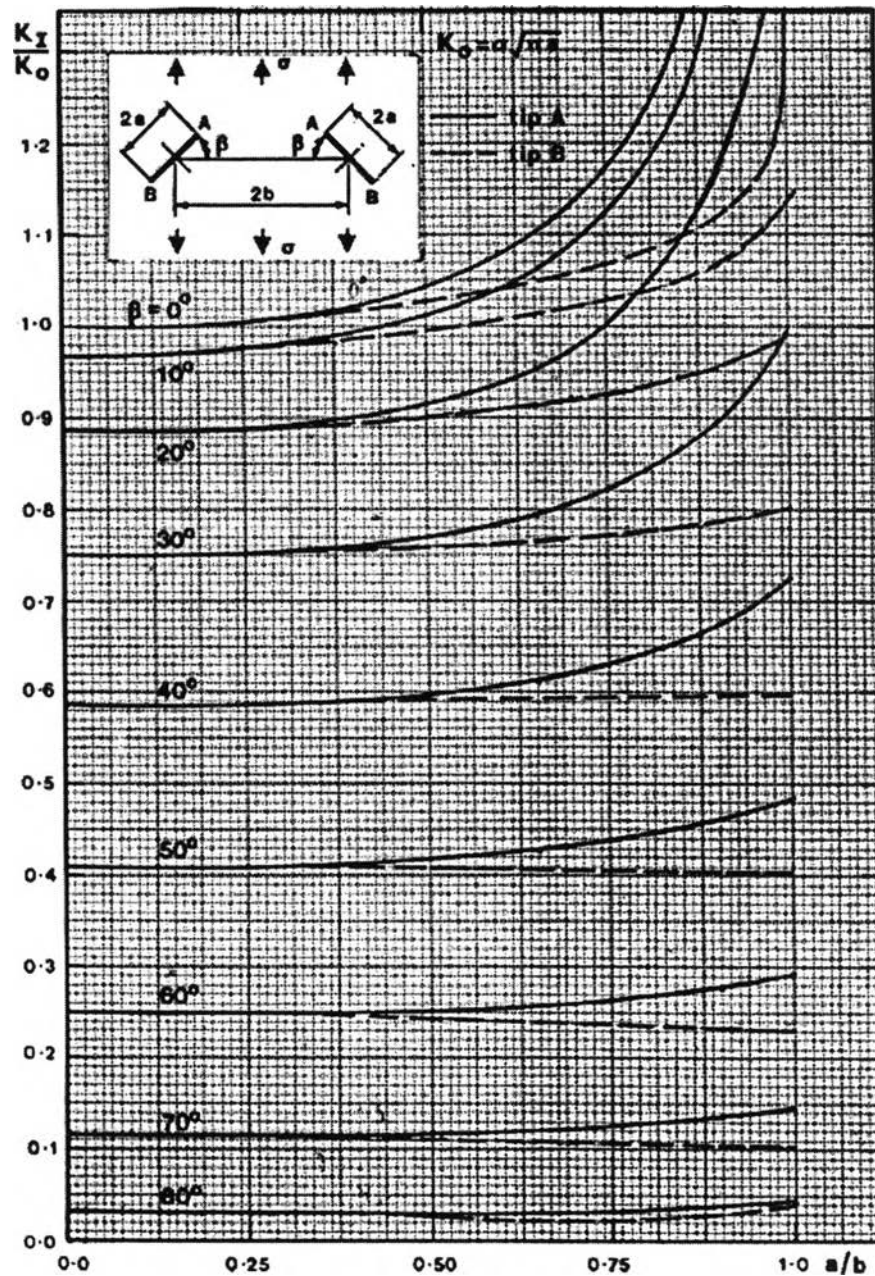
$$K_I = \frac{F_I P \sqrt{\pi a}}{2wt} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ P คือ แรงดึง (1 นิวตัน)

t คือ ความหนาชิ้นทดสอบ

ช.2 กราฟคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวแบบจับซ้อน

กราฟคำนวณ Stress intensity factor ประกอบไปด้วยค่าที่ปลาย A และปลาย B โดยใช้ค่า Stress intensity factor ที่มากที่สุดในการเปรียบเทียบกับ Stress intensity factor ของวิธีการอื่น ๆ



รูปที่ ช.2 กราฟคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวที่จับซ้อน [28]

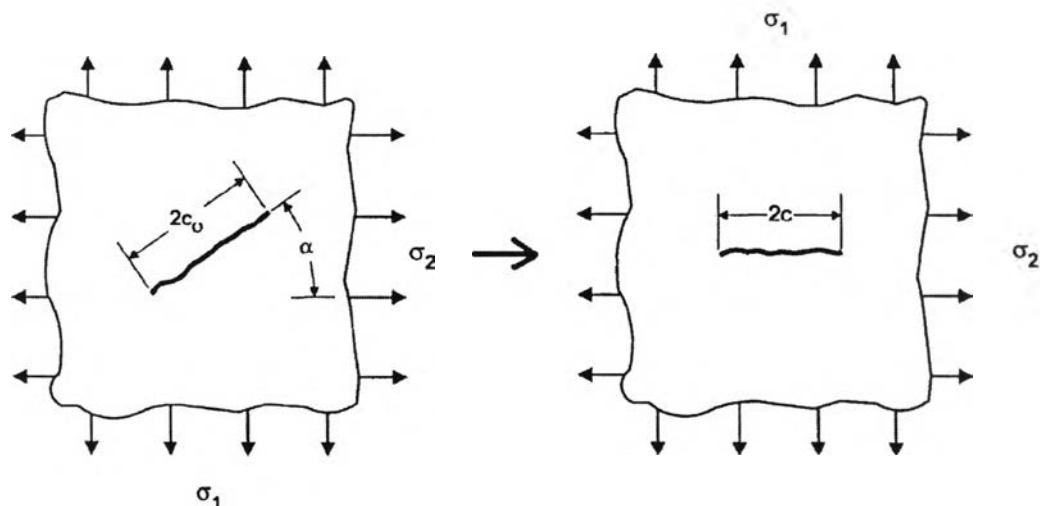
$$K_I = \left(\frac{K_I}{K_0} \right) \cdot \frac{P\sqrt{\pi a}}{2wt} \tag{ช.2}$$

โดยที่ P คือ แรงดึง (1 นิวตัน)

t คือ ความหนาชิ้นทดสอบ

ช.3 วิธีคำนวณขนาดรอยร้าวของ API-579

วิธีการนี้จะเปลี่ยนลักษณะรอยร้าวแบบซับซ้อนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย เพื่อให้สามารถคำนวณ Stress intensity factor ได้จาก Handbook ทั่วไป



รูปที่ ช.3 การเปลี่ยนรอยร้าวเอียงเป็นรอยร้าวแบบไม่เอียง [30]

$$\frac{c}{c_0} = \cos^2 \alpha + \frac{(1-B)\sin \alpha \cos \alpha}{2} + B^2 \sin^2 \alpha \tag{ช.3}$$

โดยที่ $B = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ เมื่อ $\sigma_1 > \sigma_2$ และ $0 \leq B \leq 1$

	$c_1 + c_2 \geq s$	Project flaws onto the same plane. $2c =$ total length of projection based on cracks defined by $2c_1$ and $2c_2$
	$c_1 + c_2 \geq s_1$ and $c_1 + c_2 \geq s_2$	Project flaws onto the same plane. $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$

รูปที่ ช.4 การหาความยาวรอยร้าวรวมของรอยร้าวสองรอยที่อยู่ใกล้กัน [30]

$$K_I = \frac{P}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{4w^2} \sec \frac{\pi a}{2w}} \quad (\text{ซ.4})$$

โดยสมการข้างต้นใช้ได้เฉพาะกรณี $a/w < 0.95$

ซ.4 ตัวอย่างการคำนวณ Stress intensity factor ของรอยร้าวที่ได้จากวิธีวัดความต่างศักย์ตกคร่อม

ตัวอย่าง รอยร้าวแบบซับซ้อนที่มีค่า $a/w = 0.3$ และ $a/b = 1$ และมีมุม $\alpha = 10$ องศา

ขั้นตอนที่ 1 ประยุกต์เส้นโค้งสอบเทียบของวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$ กับขั้นตอนสอบที่มีรอยร้าวแบบซับซ้อน (แสดงดังตัวอย่างที่ 1 ในหัวข้อที่ 4.5.3) ผลเฉลย (ลักษณะรอยร้าว) ที่ได้จะอยู่ในรูปรอยร้าวเอียงเพียงรอยเดียวดังรูปที่ 4.1 โดยรอยร้าวมีลักษณะดังนี้

$$\theta = 14.19 \text{ องศา และ } a/w = 0.46$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า F_I (รูปที่ ซ.1) โดยการประมาณค่าภายในแบบเชิงเส้น (Linear interpolation) โดย F_I ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.08

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณ Stress intensity factor ของรอยร้าวด้วยสมการที่ ซ.1

$$K_I = \frac{1.08 \times \sqrt{\pi(0.46 \times 12.5 \times 10^{-3})}}{2 \times (12.5 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3})}$$

$$K_I = 1,165 \text{ Pa} \cdot \sqrt{m}$$

ซ.5 ตัวอย่างการคำนวณ Stress intensity factor สำหรับรอยร้าวแบบซับซ้อน

ตัวอย่าง รอยร้าวแบบซับซ้อนที่มีค่า $a/w = 0.3$ และ $a/b = 1$ และมีมุม $\alpha = 10$ องศา

ขั้นตอนที่ 1 หาค่า K_I/K_0 จากรูปที่ ซ.2 พบว่าปลาย A เท่ากับ 1.475 และปลาย B เท่ากับ 1.15

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณ Stress intensity factor ที่ปลาย A และ ปลาย B ด้วยสมการที่ ซ.2

$$\text{ปลาย A } K_I = \frac{1.475 \times \sqrt{\pi \times 3.75 \times 10^{-3}}}{2 \times (12.5 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3})}$$

$$K_I = 1,280 \text{ Pa} \cdot \sqrt{m}$$

$$\text{ปลาย B } K_I = \frac{1.15 \times \sqrt{\pi \times 3.75 \times 10^{-3}}}{2 \times (12.5 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3})}$$

$$K_I = 999 \text{ Pa} \cdot \sqrt{m}$$

ข.6 ตัวอย่างการคำนวณ Stress intensity factor ของรอยร้าวที่ได้จากการประยุกต์วิธีมาตรฐาน API 579

ตัวอย่าง รอยร้าวแบบซับซ้อนที่มีค่า $a/w = 0.3$ และ $a/b = 1$ และมีมุม $\alpha = 10$ องศา

ขั้นตอนที่ 1 รอยร้าวเอียงจะถูกเปลี่ยนเป็นรอยร้าวแบบไม่เอียงดังรูปที่ ข.3

$$\frac{c}{c_0} = \cos^2 \alpha + \frac{(1-B)\sin \alpha \cdot \cos \alpha}{2} + B^2 \sin^2 \alpha$$

$$c = 3.75 \cdot \left[\cos^2 10 + \frac{\sin 10 \cdot \cos 10}{2} \right]$$

$$c = 3.958 \text{ มม.}$$

เนื่องจากปัญหารอยร้าวแบบซับซ้อนที่ศึกษา (รูปที่ 4.17) ประกอบด้วยรอยร้าว 2 รอย ตามมาตรฐาน API 579 หากปลายรอยร้าวทั้งสองที่อยู่ใกล้กัน ซ้อนทับกันหรืออยู่ใกล้กัน สอดคล้องกับเงื่อนไขดังรูปที่ ข.4 จะรวมรอยร้าวทั้งสองเป็นรอยร้าวเดียว

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาระยะห่างระหว่างปลายรอยร้าวทั้งสองที่อยู่ใกล้กัน

ปัญหารอยร้าวแบบซับซ้อนที่ศึกษา กำหนดระยะจากกึ่งกลางชั้นทดสอบไปยังกึ่งกลางรอยร้าวแต่ละรอย $b = 3.75$ มม. เมื่อเปรียบเทียบครึ่งหนึ่งของขนาดรอยร้าวแต่ละรอย $c = 3.958$ มม. พบว่าเกิดการทับซ้อน (Overlap) ของปลายรอยร้าวทั้งสอง สอดคล้องกับเงื่อนไขรูปที่ ข.4 กรณีรอยร้าวทับซ้อนกัน ดังนั้น

$$2c = 3.958 + (3.75 \times 2) + 3.958$$

$$2c = 15.416 \text{ มม.}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณ Stress intensity factor ของรอยร้าวด้วยสมการที่ ข.4

$$K_I = \frac{1}{5 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{7.708 \times 10^{-3} \pi}{4 \times (12.5 \times 10^{-3})^2} \sec \frac{7.708 \times 10^{-3} \pi}{2 \times (12.5 \times 10^{-3})}}$$

$$K_I = 1,654 \text{ Pa} \cdot \sqrt{m}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ธนวัฒน์ กรจำรัสกุล เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545

