

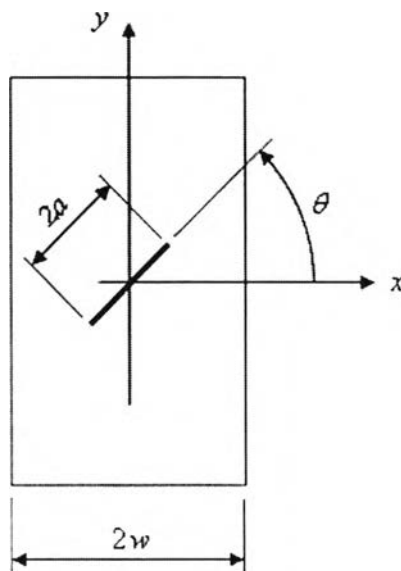


## การระบุลักษณะรอยร้าวเอียง

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการระบุลักษณะของรอยร้าวเอียง ซึ่งประกอบด้วย ความยาวและมุมเอียงของรอยร้าว โดยวิธีความต่างศักย์คคร่อม เนื้อหาภายในบทจะเริ่มจากข้อจำกัดของการนำวิธีที่ใช้กับรอยร้าวไม่เอียงมาประยุกต์กับกรณีรอยร้าวเอียง ก่อนจะนำเสนอวิธีที่แก้ปัญหานี้ได้ ถัดไปจะประยุกต์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างเส้นโค้งสอบเทียบสำหรับใช้กับวิธีการที่เสนอ จากนั้นจะนำวิธีการที่เสนอและเส้นโค้งสอบเทียบ ไปประยุกต์กับการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT และระบุลักษณะรอยร้าวเอียงที่มีความซับซ้อนขึ้น สุดท้ายคือการอภิปรายผล

### 4.1 แนวคิดในการระบุลักษณะของรอยร้าวเอียง

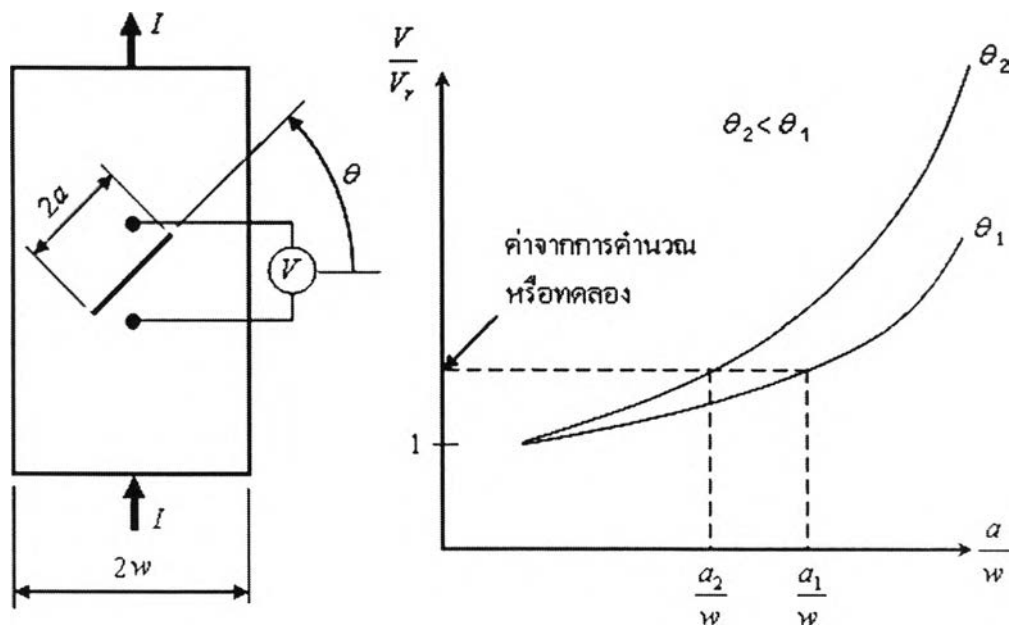
รอยร้าวเอียงในที่นี้หมายถึง รอยร้าวที่มีทิศทางวางตัวไม่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่ทำกับชิ้นทดสอบ MT ขณะทดสอบ ตัวอย่างของชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียงแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 จากรูปมุมเอียงของรอยร้าวกำหนดได้ด้วย  $\theta$  ซึ่งแทนมุมที่รอยร้าวทำกับแกน  $x$  โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อวัดทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นสำหรับรอยร้าวเอียงใด ๆ  $0^\circ < \theta < 180^\circ$



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง (ทะลุความหนา)

#### 4.1.1 ข้อจำกัดของการประยุกต์วิธีของรอยร้าวไม่เอียง

สำหรับขั้นตอนทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวไม่เอียง (หรือ  $\theta = 0^\circ$ ) นั้นการระบุความยาวรอยร้าวสามารถทำได้โดยการวัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดที่คร่อมรอยร้าวแล้วนำไปแทนค่าในเส้นโค้งสอบเทียบ (ที่สร้างขึ้นด้วยเงื่อนไขตำแหน่งป้อนกระแสไฟฟ้า และตำแหน่งวัดความต่างศักย์เดียวกัน) อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการดังกล่าวกับขั้นตอนทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียงนั้นไม่สามารถทำได้เพราะว่า เส้นโค้งสอบเทียบนอกจากจะขึ้นอยู่กับความยาวของรอยร้าวแล้วยังขึ้นอยู่กับมุมเอียงของรอยร้าวด้วย ดังนั้นจะมีคู่ของความยาวรอยร้าวและมุมเอียงมากกว่าหนึ่งคู่ ที่มีความต่างศักย์ (หรือความต่างศักย์ไร้หน่วย) ระหว่างจุดวัดสองจุดเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากรูปเส้นกราฟ  $V/V_r$  กับ  $a/w$  ของรอยร้าวที่มีมุมเอียงมากกว่าจะอยู่ใต้กราฟของรอยร้าวที่มีมุมเอียงน้อยกว่า เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไร้หน่วยระหว่างจุดวัดสองจุดที่กำหนดแล้วนำมาฉายไปบนเส้นโค้งสอบเทียบจะพบว่ามีคำตอบ หรือ  $a/w$  มากกว่า 1 คำตอบ ซึ่งจริงๆ แล้วก็มีจำนวนคำตอบอนันต์คำตอบ เพราะมุมเอียงของรอยร้าวเป็นตัวแปรต่อเนื่อง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีที่ใช้กับขั้นตอนทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวไม่เอียง ไม่สามารถนำมาใช้กับขั้นตอนแบบเดียวกันแต่มีรอยร้าวเอียงได้ ดังนั้นการระบุลักษณะของรอยร้าวเอียงจึงต้องมีจุดวัดความต่างศักย์ (หรือจุดป้อนกระแสไฟฟ้า) ณ ตำแหน่งอื่นเพิ่มเติม



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งสอบเทียบของขั้นตอนทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง

### 4.1.2 วิธีระบุลักษณะรอยร้าวเอียง

การเพิ่มตำแหน่งวัดความต่างศักย์ หรือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งป้อนกระแสไฟฟ้า เพื่อให้สามารถระบุลักษณะรอยร้าวเอียงได้นั้น วิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาวิธี 2 วิธี คือ

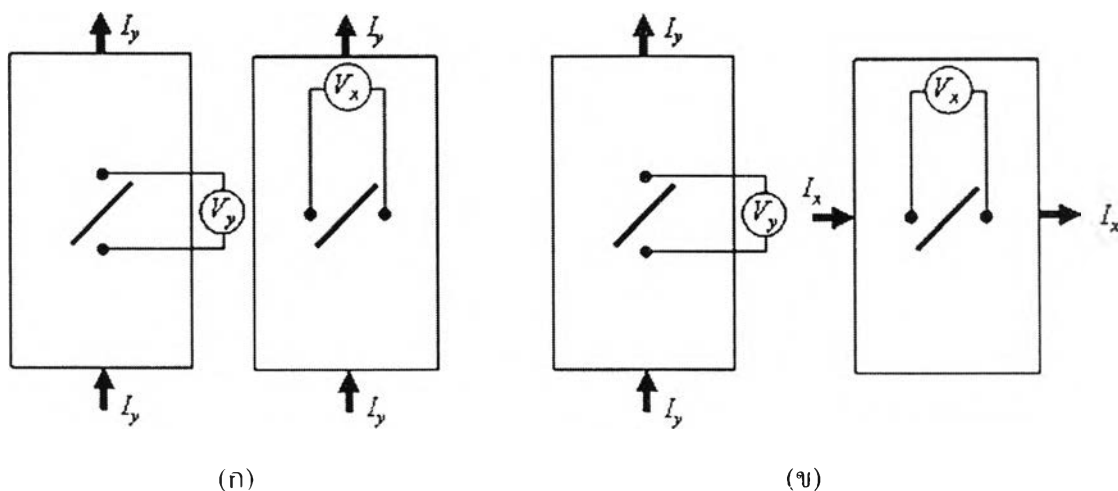
1) ป้อนกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน  $y$  แล้ววัดความต่างศักย์คร่อมจุดที่อยู่บนแนวแกน  $y$  และจุดที่อยู่บนแนวแกน  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ก) ในที่นี้จะเรียกวินี้ว่า “วิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$ ”

2) ป้อนกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน  $y$  แล้ววัดความต่างศักย์คร่อมจุดที่อยู่บนแนวแกน  $y$  และป้อนกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน  $x$  แล้ววัดความต่างศักย์คร่อมจุดที่อยู่บนแนวแกน  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข) ในที่นี้จะเรียกวินี้ว่า “วิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$ ”

### 4.1.3 การวิเคราะห์วิธีระบุรอยร้าวเอียงในเชิงมโนทัศน์

ก) วิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$

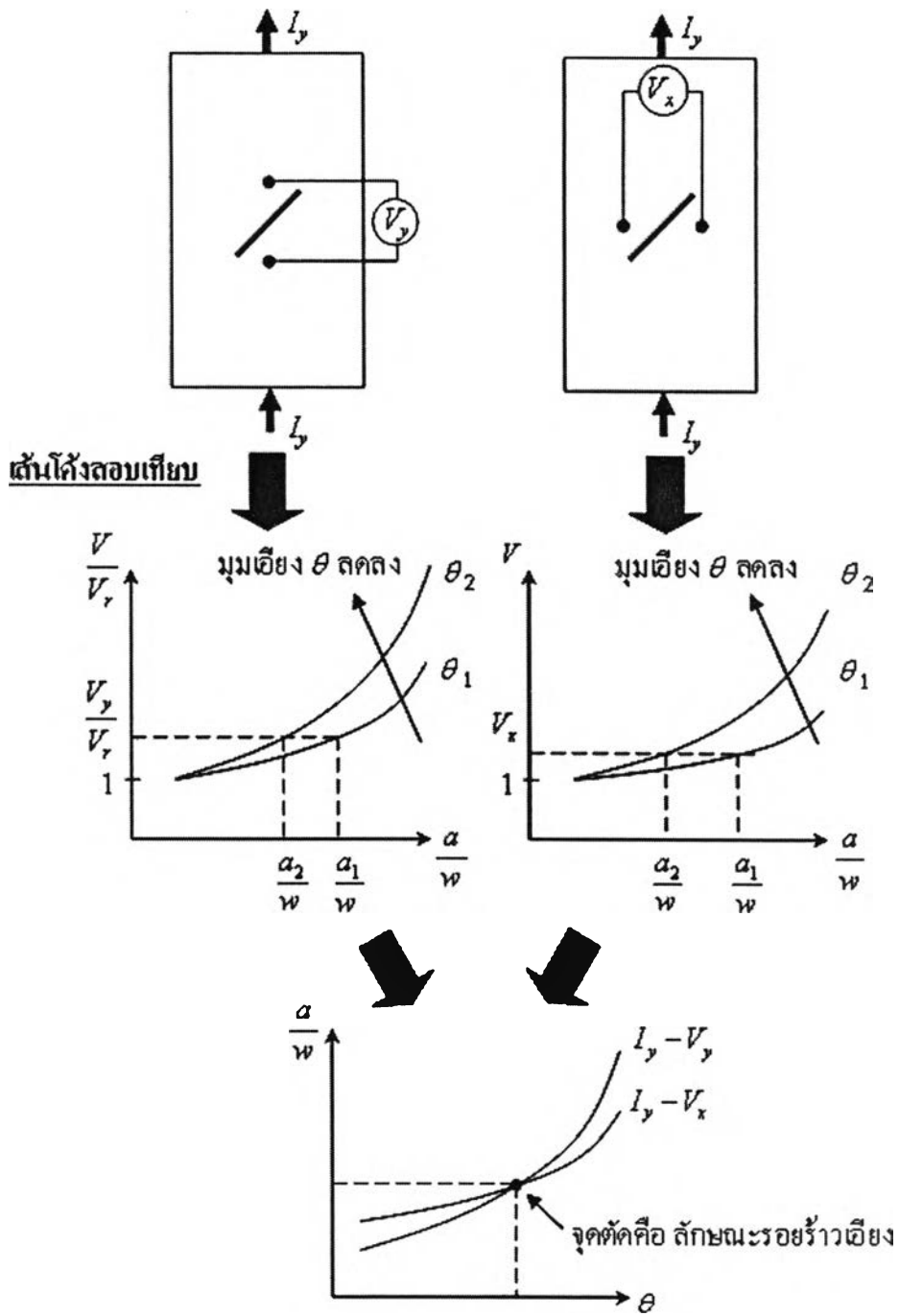
การระบุรอยร้าวด้วยวิธีนี้มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากรูปเมื่อทราบความต่างศักย์คร่อมจุดบนแกน  $y$  คือ  $V_y$  และความต่างศักย์คร่อมจุดบนแกน  $x$  คือ  $V_x$  แล้วนำไปฉายบนเส้นโค้งสอบเทียบ (ของแต่ละกรณี) จะทำให้ได้คู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  เมื่อนำคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละเส้นมาพล็อตบนแกนเดียวกันจะพบว่าเส้นกราฟจะตัดกัน โดยพิกัดของจุดตัดคือลักษณะของรอยร้าวเอียง



รูปที่ 4.3 วิธีที่เสนอเพื่อใช้ระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในขั้นตอนทดสอบ MT

(ก) วิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$

(ข) วิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงด้วยวิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 จะพบว่าแกนความต่างศักย์  $V_r$  ของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_r$  ไม่สามารถนอร์มัลไลซ์ด้วยความต่างศักย์อ้างอิงได้ เพราะจุดวัดศักย์ไฟฟ้าอยู่บนเส้นที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน (Equipotential line) ทำให้ความต่างศักย์อ้างอิงเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_r$  จะขึ้นกับ สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ อุณหภูมิ ขนาดกระแสไฟฟ้า ฯลฯ

นอกจากข้อจำกัดที่กล่าวไปแล้ว ลักษณะของกราฟที่เกิดจากคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ของเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละกรณี จะมีแนวโน้มเหมือนกัน (โค้งขึ้น) ดังนั้นความชันของกราฟบริเวณจุดตัดจะมีค่าแตกต่างกันน้อย ดังนั้นความแม่นยำในการสร้างเส้นโค้งถดถอยกำลังสองน้อยสุดที่ผ่านคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ส่งผลอย่างมากต่อความแม่นยำในการหาพิกัดจุดตัดของเส้นกราฟความสัมพันธ์  $a/w$  กับ  $\theta$

ข) วิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$

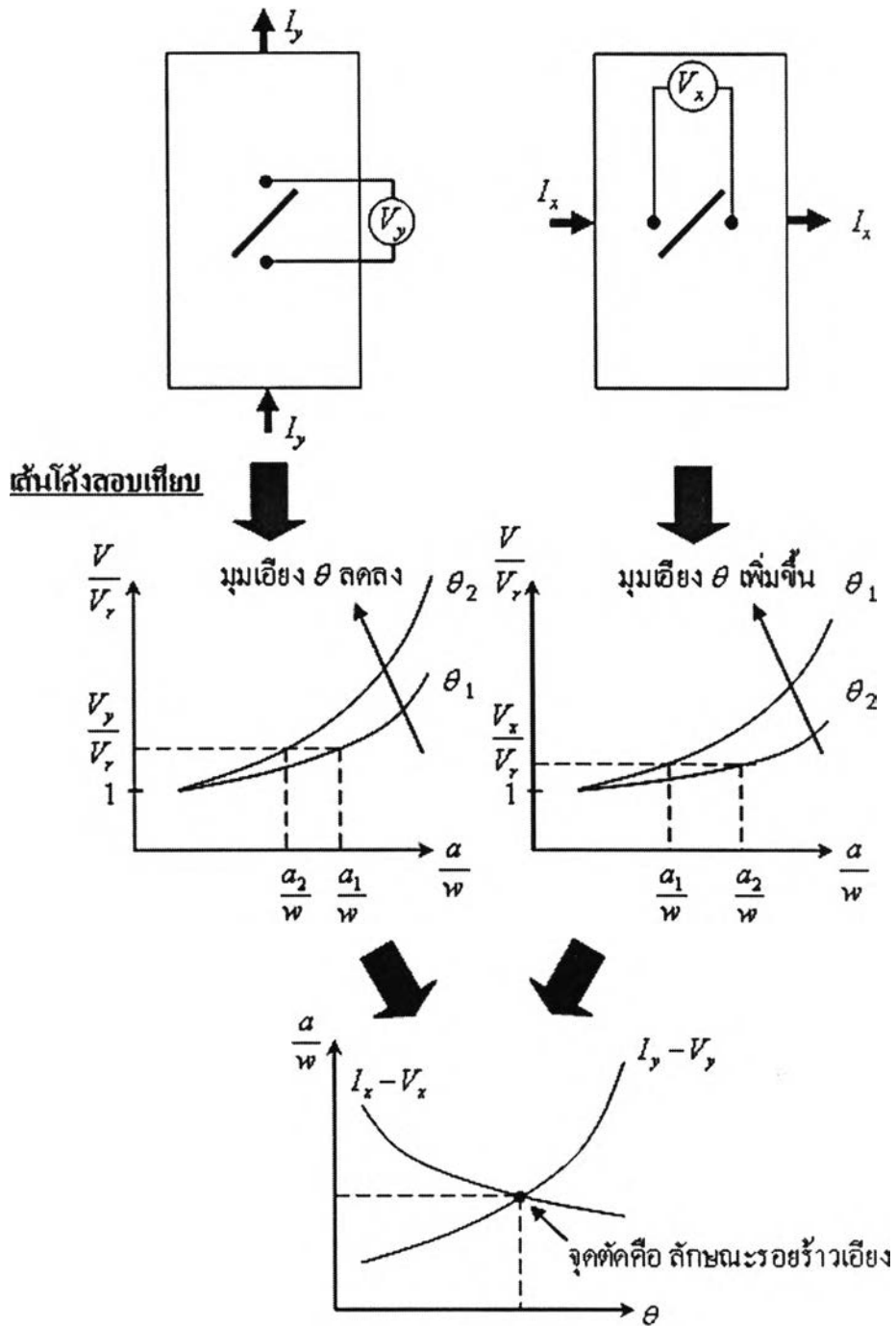
การระบุรอยร้าวด้วยวิธีนี้มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากรูปเมื่อทราบความต่างศักย์ตกคร่อมจุดบนแกน  $y$  คือ  $V_y$  และความต่างศักย์ตกคร่อมจุดบนแกน  $x$  คือ  $V_x$  แล้วนำไปฉายบนเส้นโค้งสอบเทียบ (ของแต่ละกรณี) จะทำให้ได้คู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  เมื่อนำคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละเส้นมาพล็อตบนแกนเดียวกันจะพบว่าเส้นกราฟจะตัดกัน โดยพิกัดของจุดตัดคือลักษณะของรอยร้าวเอียง

อย่างไรก็ดี วิธีนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับวิธีแรก 2 ประการ ประการแรก เส้นโค้งสอบเทียบในกรณี  $I_x - V_x$  สามารถนอร์มัลไลซ์ความต่างศักย์ด้วยความต่างศักย์อ้างอิงได้ ทำให้เส้นโค้งสอบเทียบไม่ขึ้นกับขนาดกระแสไฟฟ้า สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ ฯลฯ ประการที่สอง เส้นโค้งสอบเทียบในกรณี  $I_x - V_x$  ที่มุมเอียง  $\theta$  ต่าง ๆ มีแนวโน้มตรงข้ามกับกรณี  $I_y - V_y$  ดังนั้นเส้นโค้งที่เกิดจากคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ของเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละเส้นจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกัน ดังนั้นความแม่นยำในการสร้างเส้นโค้งถดถอยกำลังสองน้อยสุดที่ผ่านคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ของเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละกรณี ส่งผลต่อความแม่นยำในการพิกัดของจุดตัดของเส้นกราฟความสัมพันธ์  $a/w$  กับ  $\theta$  น้อยกว่าวิธีแรก

ดังนั้น จากการวิเคราะห์ในเชิงมโนทัศน์ (Concept) สรุปได้ว่าวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  เหมาะสมกว่าวิธี  $I_x - V_x; I_y - V_y$

## 4.2 การสร้างเส้นโค้งสอบเทียบ

การสร้างเส้นโค้งสอบเทียบ (Calibration curve) เป็นขั้นตอนสำคัญในการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยหลักการความต่างศักย์ตกคร่อม เมื่อพิจารณาวิธีที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2 จะพบว่าเส้นโค้งสอบเทียบที่ต้องสร้างมีทั้งหมด 3 กรณี คือ 1) เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับกรณี  $I_y - V_y$  2) เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับกรณี  $I_x - V_x$  และ 3) เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับกรณี  $I_x - V_x$



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงด้วยวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$

เนื่องจากเส้นโค้งสอบเทียบขึ้นอยู่กับตำแหน่งป้อนกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งวัดความต่างศักย์ จึงต้องระบุตำแหน่งจุดวัดความต่างศักย์ที่แน่นอน วิทยานิพนธ์นี้ใช้ความไว (Sensitivity) เป็นเกณฑ์ในการระบุตำแหน่งวัดความต่างศักย์ ดังนั้นจึงเลือกตำแหน่งวัดความต่างศักย์ที่อยู่ใกล้รอยร้าวมากที่สุด ซึ่งก็คือ 5 มม.

### 4.2.1 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

#### ก) กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าตามแนวแกน $y$

1) ขอบ AB (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าขนาด 10 แอมแปร์ หรือ 80,000 แอมแปร์/ตารางเมตร สม่ำเสมอ (Uniform) ทั้งพื้นที่

2) ขอบ CD (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): มีกระแสไฟฟ้าไหลออกสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ และกำหนดศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

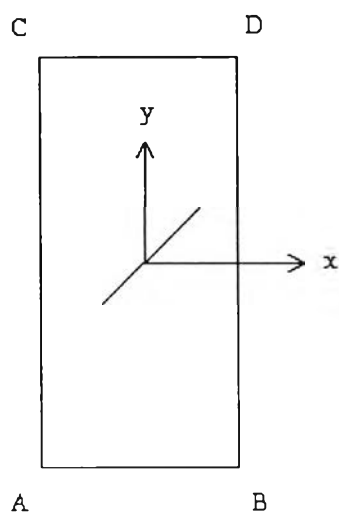
3) ขอบ AC ขอบ BD และขอบรอยร้าว (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้น  $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$

#### ข) กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน $x$

1) ขอบ AC (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าขนาด 10 แอมแปร์ หรือ 20,000 แอมแปร์/ตารางเมตร สม่ำเสมอ (Uniform) ทั้งพื้นที่

2) ขอบ BD (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): มีกระแสไฟฟ้าไหลออกสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ และกำหนดศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

3) ขอบ CD ขอบ AB และขอบรอยร้าว (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ): ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้น  $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$



รูปที่ 4.6 สัญลักษณ์ระดับด้านของขั้นตอนสอบ

### 4.2.2 เส้นโค้งสอบเทียบ

เส้นโค้งสอบเทียบสำหรับกรณี  $I_y - V_y$ ,  $I_y - V_x$  และ  $I_x - V_x$  ที่หาจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ตามลำดับ ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้าสำหรับกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $y$  และกรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $x$  ที่ค่า  $\theta$  ต่าง ๆ (ในช่วง 10 องศา ถึง 80 องศา โดยเพิ่ม  $\theta$  ทีละ 10 องศา) แสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 (รายละเอียดของผลการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ง) เส้นโค้งสอบเทียบแต่ละกรณีสามารถแทนด้วยสมการพหุนามอันดับ 4 ได้ดังนี้

ก) กรณี  $I_y - V_y$

$$\theta = 10^\circ : \frac{V}{V_r} = 4.49\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 5.58\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 5.24\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.32\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.1 ก)$$

$$\theta = 20^\circ : \frac{V}{V_r} = 4.12\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 5.56\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 5.33\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.42\left(\frac{a}{w}\right) + 1.02 \quad (4.1 ข)$$

$$\theta = 30^\circ : \frac{V}{V_r} = 1.77\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 2.52\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 3.81\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.25\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.1 ค)$$

$$\theta = 40^\circ : \frac{V}{V_r} = 1.64\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 2.92\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 4.01\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.43\left(\frac{a}{w}\right) + 1.03 \quad (4.1 ง)$$

$$\theta = 50^\circ : \frac{V}{V_r} = -1.14\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 1.17\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 1.70\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.13\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.1 จ)$$

$$\theta = 60^\circ : \frac{V}{V_r} = -2.78\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 3.65\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 0.15\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.31\left(\frac{a}{w}\right) + 1.00 \quad (4.1 ฉ)$$

$$\theta = 70^\circ : \frac{V}{V_r} = -4.31\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 6.00\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 1.39\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.20\left(\frac{a}{w}\right) + 0.99 \quad (4.1 ช)$$

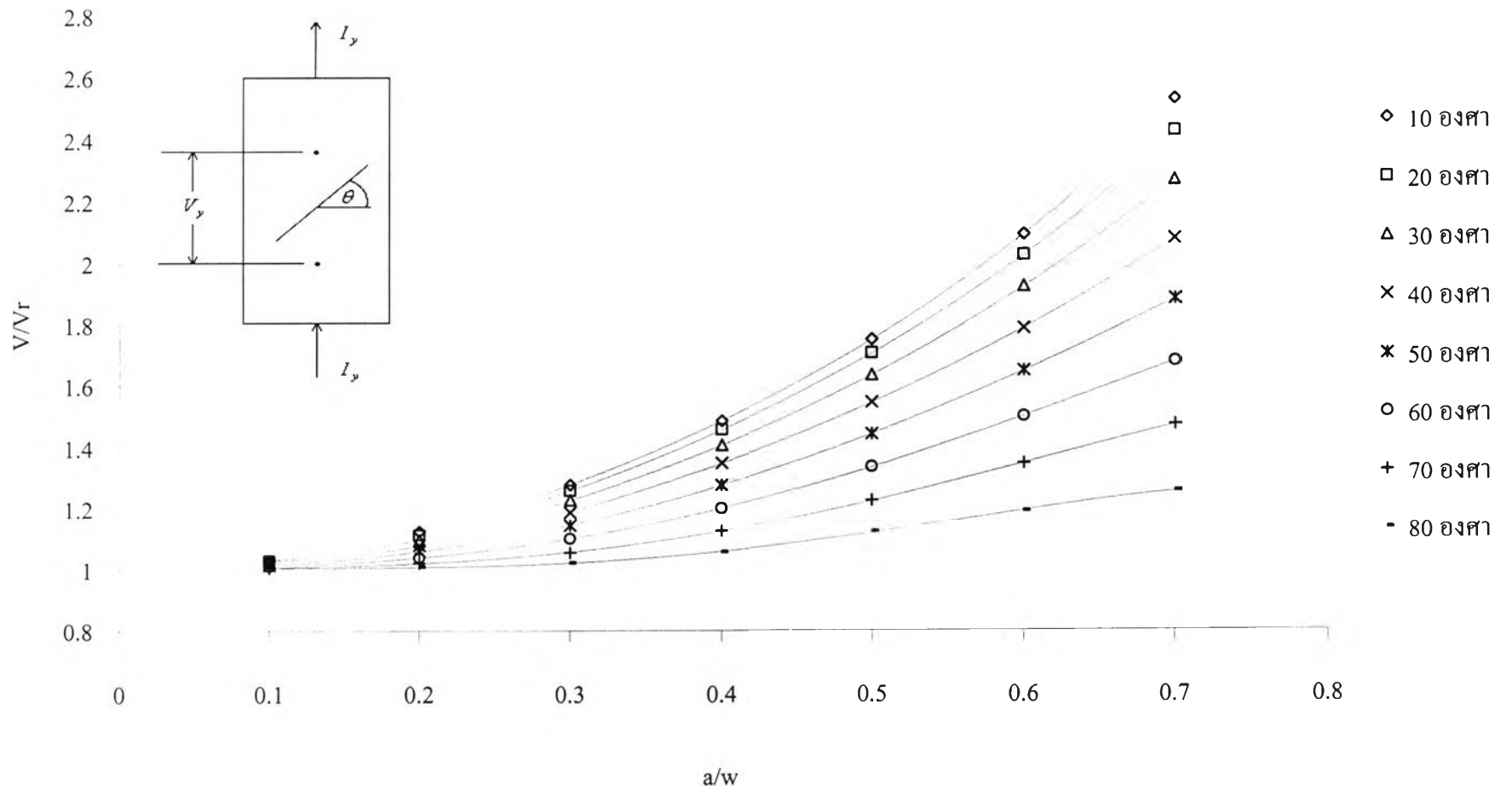
$$\theta = 80^\circ : \frac{V}{V_r} = -5.62\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 8.05\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 2.95\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.45\left(\frac{a}{w}\right) + 0.98 \quad (4.1 ซ)$$

ข) กรณี  $I_y - V_x$

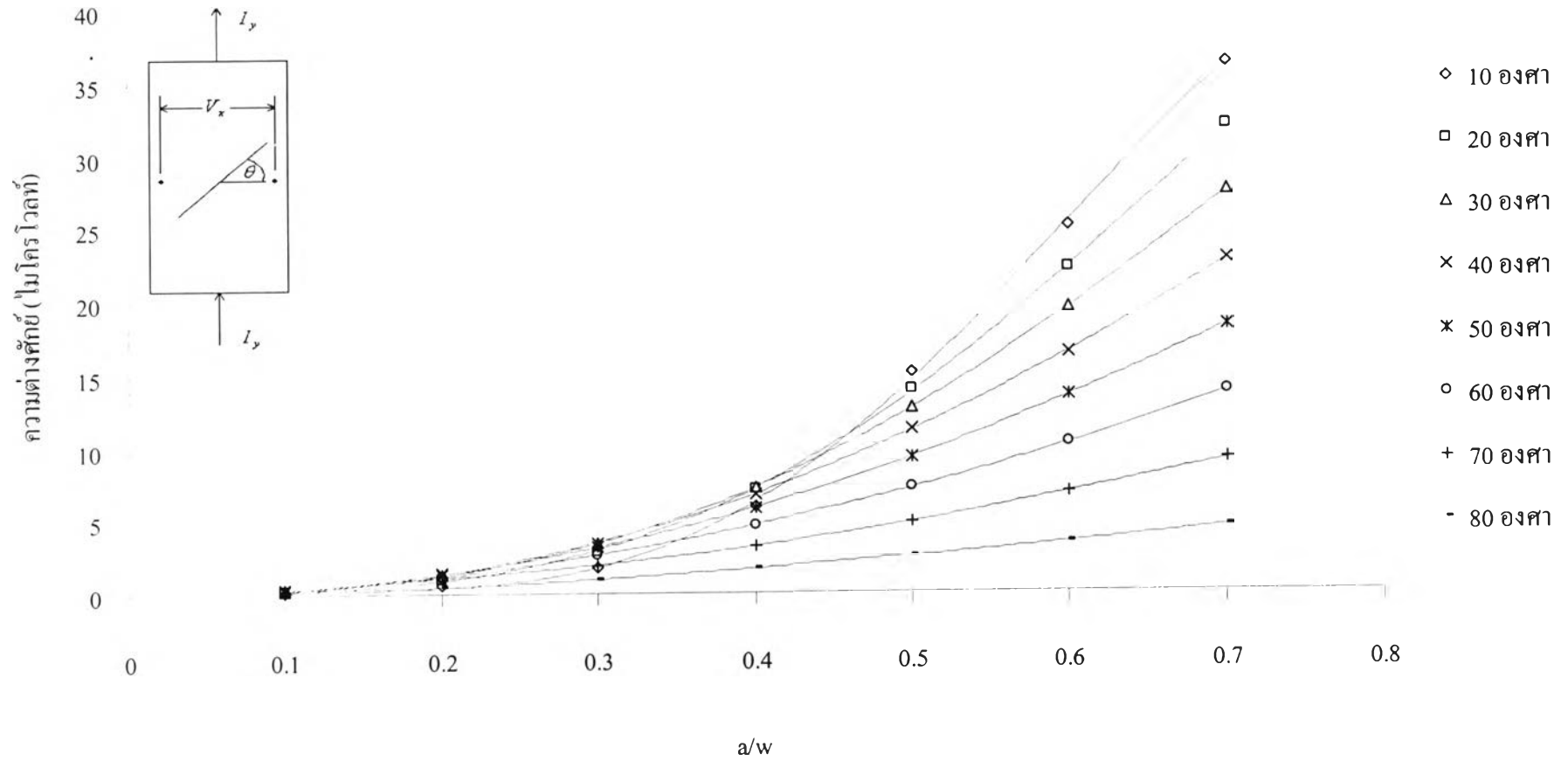
$$\theta = 10^\circ :$$

$$\begin{aligned} V_x = & -6.72 \times 10^{-4} \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 1.03 \times 10^{-3} \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 3.95 \times 10^{-4} \left(\frac{a}{w}\right)^2 \\ & + 5.97 \times 10^{-5} \left(\frac{a}{w}\right) - 2.84 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (4.2 ก)$$

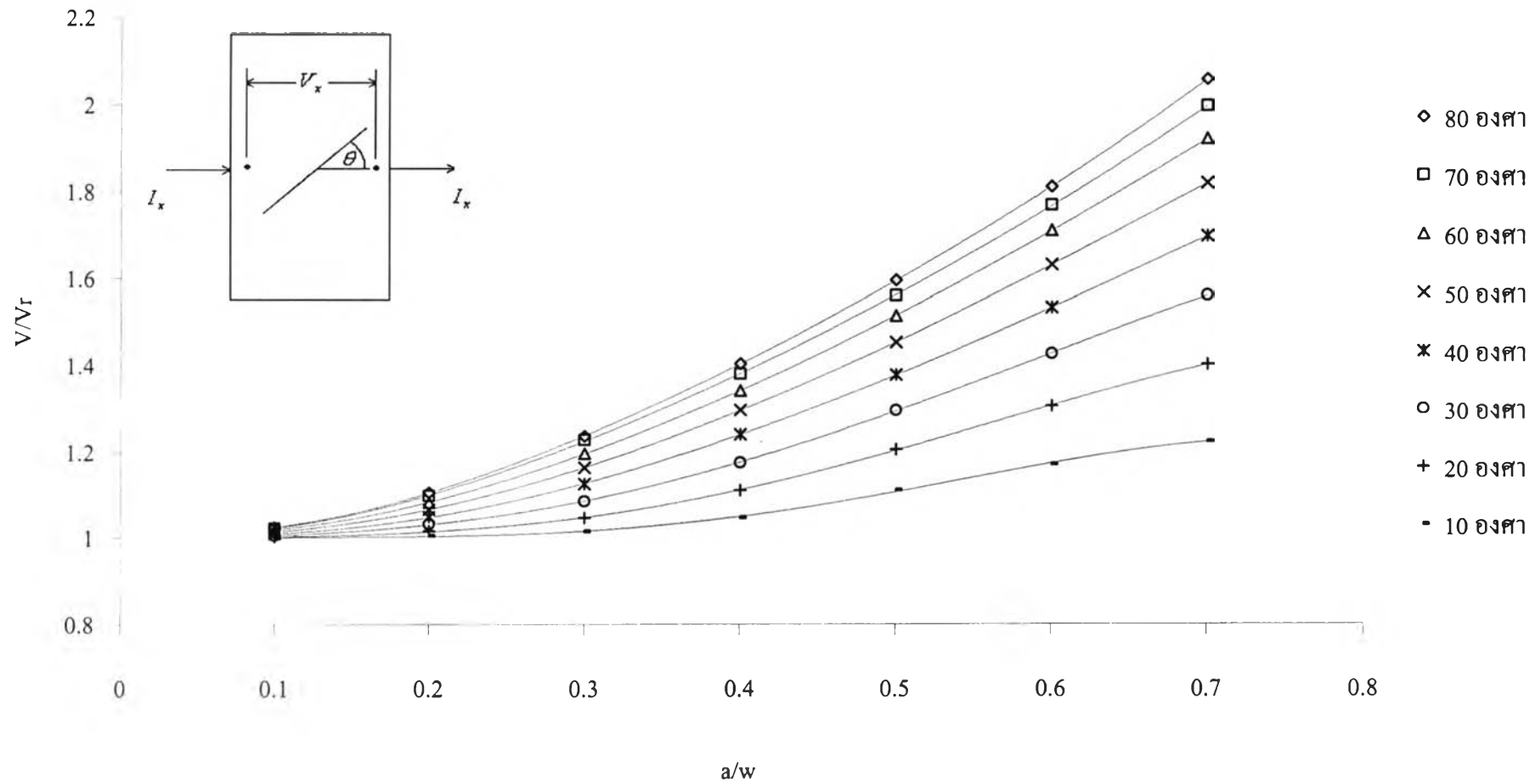




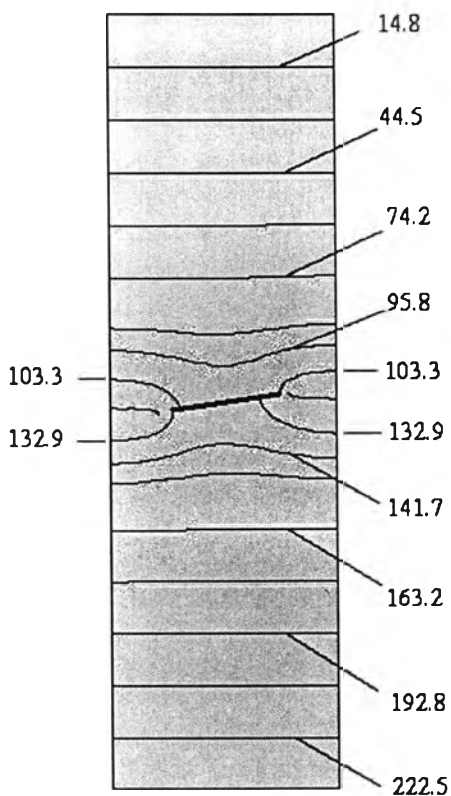
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  ของชั้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง



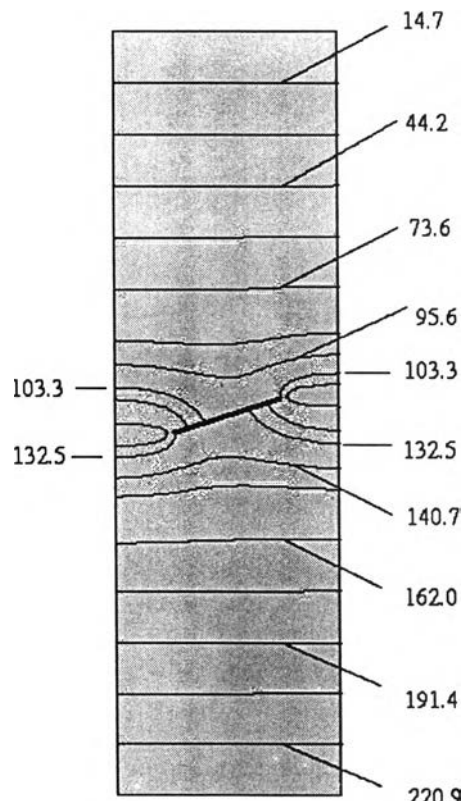
รูปที่ 4.8 เส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_x$  ของชั้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง



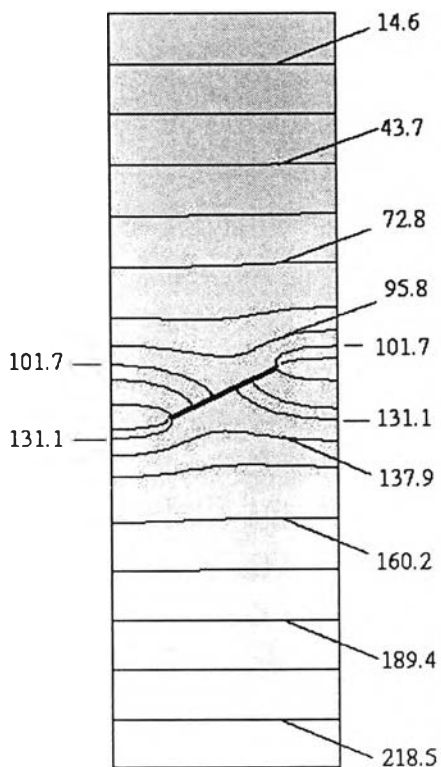
รูปที่ 4.9 เส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_x - V_x$  ของชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง



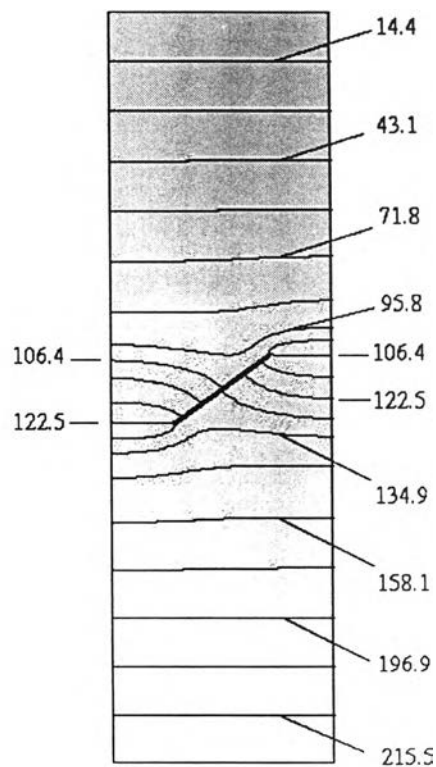
(น)  $\theta = 10^\circ$



(ข)  $\theta = 20^\circ$

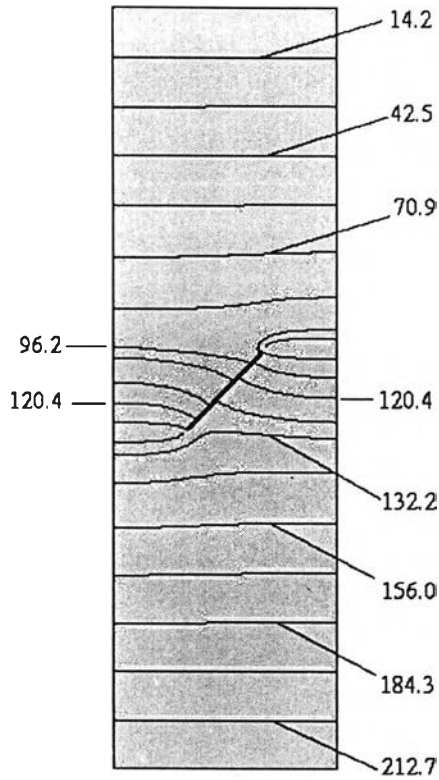


(ค)  $\theta = 30^\circ$

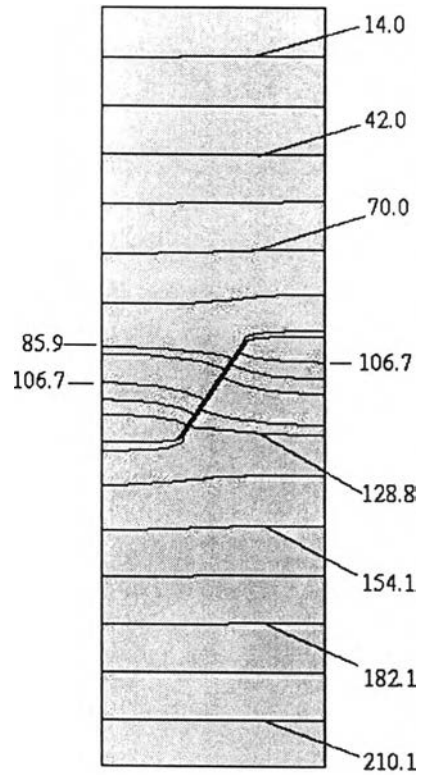


(ง)  $\theta = 40^\circ$

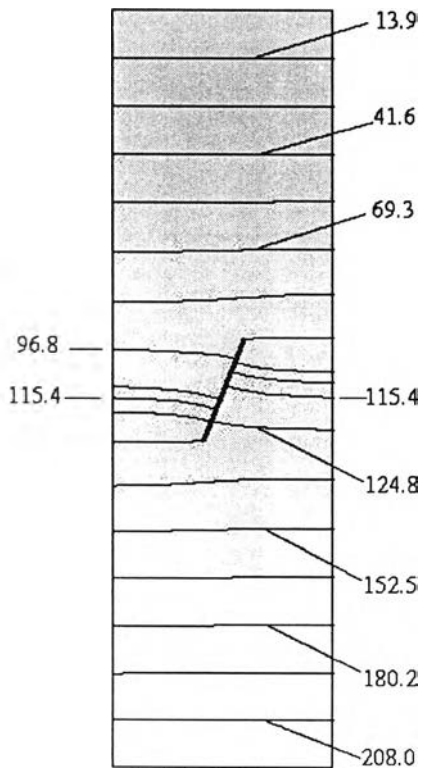
รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า,  $\mu V$  กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $y$   
 ( $a/w$  เท่ากับ 0.6 และ  $\theta$  ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)



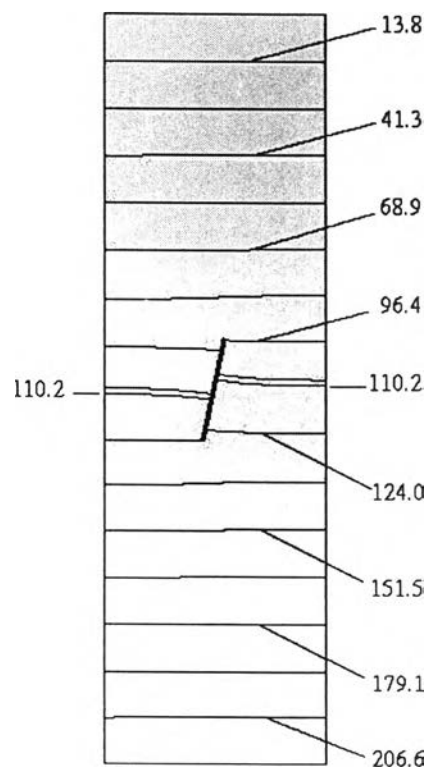
(จ)  $\theta = 50^\circ$



(ฎ)  $\theta = 60^\circ$

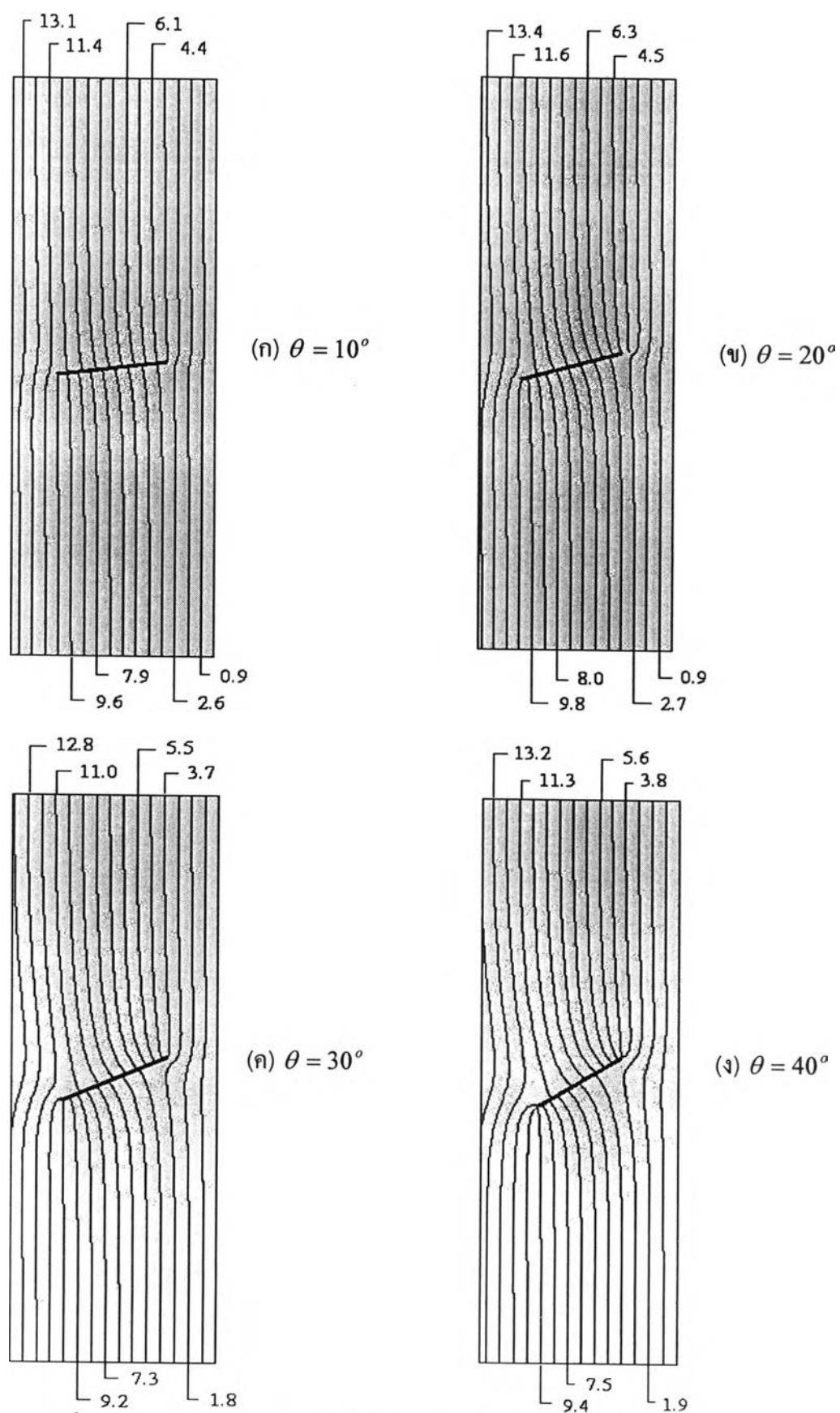


(ช)  $\theta = 70^\circ$

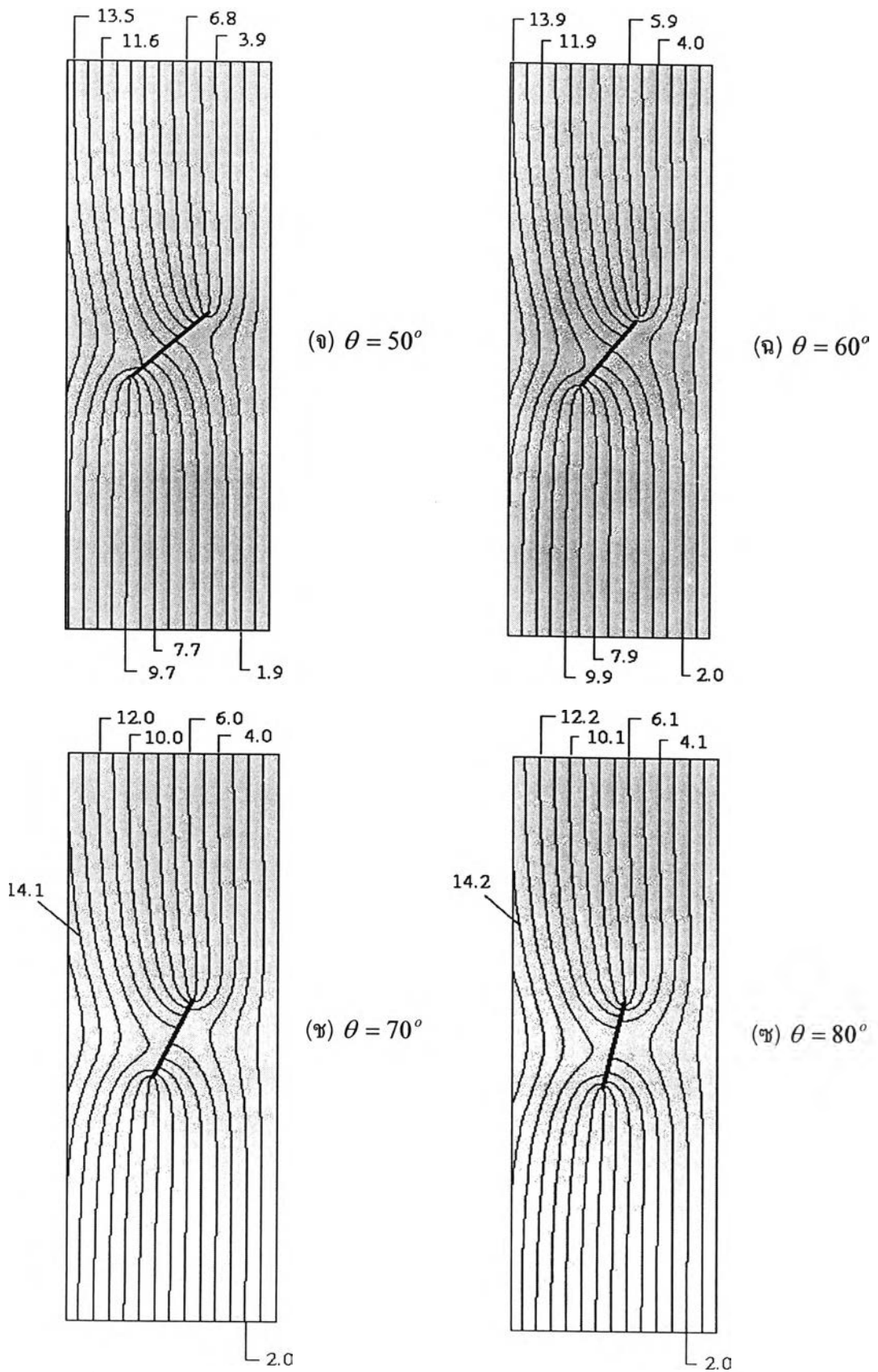


(ฌ)  $\theta = 80^\circ$

รูปที่ 4.10 (ต่อ) ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า,  $\mu V$  กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $y$  ( $a/w$  เท่ากับ 0.6 และ  $\theta$  ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)



รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า,  $\mu V$  กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $x$   
 ( $a/w$  เท่ากับ 0.6 และ  $\theta$  ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)



รูปที่ 4.11 (ต่อ) ลักษณะการกระจายศักย์ไฟฟ้า,  $\mu V$  กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าแกน  $x$   
 ( $a/w$  เท่ากับ 0.6 และ  $\theta$  ในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา ตามลำดับ โดยเพิ่มทีละ 10 องศา)

$$\theta = 20^\circ :$$

$$V_x = -2.22 \times 10^{-4} \left( \frac{a}{w} \right)^4 + 3.39 \times 10^{-4} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 7.66 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 9.39 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right) + 2.67 \times 10^{-7} \quad (4.2 \text{ ข})$$

$$\theta = 30^\circ :$$

$$V_x = -8.79 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^4 + 1.31 \times 10^{-4} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 8.06 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 5.92 \times 10^{-7} \left( \frac{a}{w} \right) + 1.33 \times 10^{-7} \quad (4.2 \text{ ค})$$

$$\theta = 40^\circ :$$

$$V_x = 1.58 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right)^4 - 1.32 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 6.59 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 8.49 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right) + 5.06 \times 10^{-7} \quad (4.2 \text{ ง})$$

$$\theta = 50^\circ :$$

$$V_x = -6.54 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right)^4 - 9.85 \times 10^{-8} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 4.43 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 2.85 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right) + 1.41 \times 10^{-7} \quad (4.2 \text{ จ})$$

$$\theta = 60^\circ :$$

$$V_x = 6.74 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right)^4 - 1.77 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 3.97 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 1.87 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right) + 6.64 \times 10^{-8} \quad (4.2 \text{ ฉ})$$

$$\theta = 70^\circ :$$

$$V_x = -7.07 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^4 + 1.16 \times 10^{-4} \left( \frac{a}{w} \right)^3 - 4.90 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 + 1.61 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right) - 1.02 \times 10^{-6} \quad (4.2 \text{ ช})$$

$$\theta = 80^\circ :$$

$$V_x = 4.75 \times 10^{-6} \left( \frac{a}{w} \right)^4 - 1.13 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 1.59 \times 10^{-5} \left( \frac{a}{w} \right)^2 + 7.29 \times 10^{-7} \left( \frac{a}{w} \right) + 2.96 \times 10^{-8} \quad (4.2 \text{ ซ})$$

ก) กรณี  $I_x - V_x$



$$\theta = 10^\circ : \frac{V}{V_r} = -5.41\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 7.58\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 2.74\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.41\left(\frac{a}{w}\right) + 0.98 \quad (4.3 ก)$$

$$\theta = 20^\circ : \frac{V}{V_r} = -4.27\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 5.52\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 1.15\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.15\left(\frac{a}{w}\right) + 1.00 \quad (4.3 ข)$$

$$\theta = 30^\circ : \frac{V}{V_r} = -2.92\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 3.27\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 0.32\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.03\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.3 ค)$$

$$\theta = 40^\circ : \frac{V}{V_r} = -0.69\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 0.34\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 2.37\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.29\left(\frac{a}{w}\right) + 1.02 \quad (4.3 ง)$$

$$\theta = 50^\circ : \frac{V}{V_r} = -0.621\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 0.42\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 2.48\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.17\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.3 จ)$$

$$\theta = 60^\circ : \frac{V}{V_r} = 0.32\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 1.71\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 3.12\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.15\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.3 ฉ)$$

$$\theta = 70^\circ : \frac{V}{V_r} = 1.25\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 3.17\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 3.93\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.22\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.3 ช)$$

$$\theta = 80^\circ : \frac{V}{V_r} = 1.33\left(\frac{a}{w}\right)^4 - 3.41\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 4.12\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 0.20\left(\frac{a}{w}\right) + 1.01 \quad (4.3 ซ)$$

### 4.3 การระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT ด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$

#### 4.3.1 ขั้นตอน

- 1) กำหนดความยาวและมุมเอียงของรอยร้าวบนชิ้นทดสอบ MT
- 2) ป้อนกระแสไฟฟ้า ตามเงื่อนไขขอบเขต ในหัวข้อ 4.2.1 (ก)
- 3) กำหนดความต่างศักย์ไร้หน่วย ระหว่างจุดอ้างอิงบนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$
- 4) แทนค่า  $V_y/V_r$  ลงในสมการของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  (สมการที่ (4.1)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 5) กำหนดความต่างศักย์ ที่ตกร่อมรอยร้าวระหว่างจุดสองจุดบนแกน  $x$ ,  $V_x$
- 6) แทนค่า  $V_x$  ลงในสมการพหุนามของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_x - V_x$  (สมการที่ (4.2)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 7) พล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบทั้งสอง บนแกนเดียวกัน
- 8) หาจุดตัดของกราฟ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะรอยร้าวที่ระบุได้กับที่กำหนด

#### 4.3.2 ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$

ตัวอย่างที่ 1 สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.15$  และมีมุมเอียง  $\theta = 45$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ตกร้อมจุดที่อยู่บนแกน  $x$  คือ  $0.740 \mu V$  และความต่างศักย์ไว้หน่วยที่ตกร้อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  คือ 1.038 ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_y - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.12)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 8.01 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.38 \times 10^{-5} \theta^3 + 8.67 \times 10^{-4} \theta^2 - 2.40 \times 10^{-2} \theta + 0.41 \quad (4.4 ก)$$

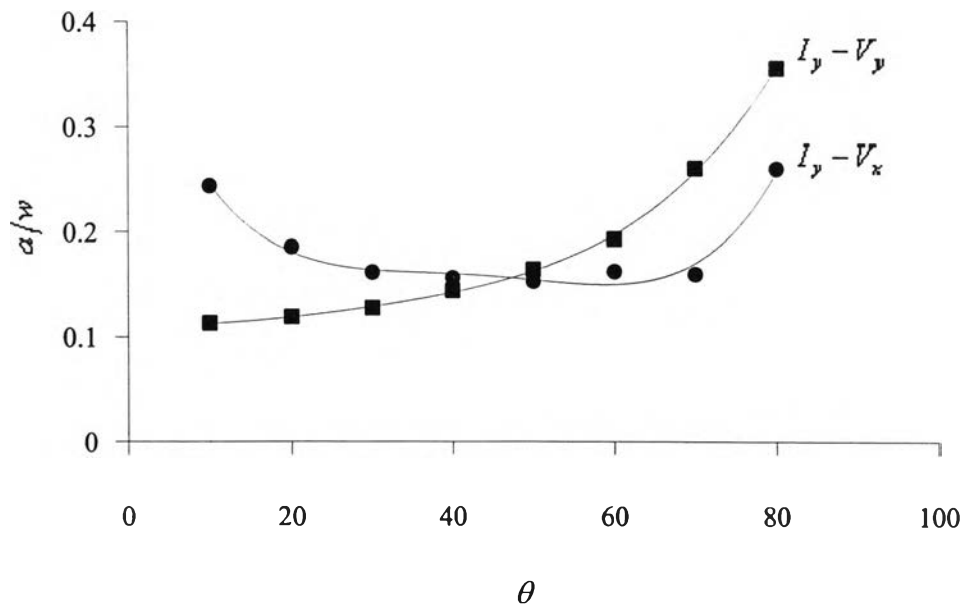
กรณี  $I_y - V_x$

$$\frac{a}{w} = 1.60 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.68 \times 10^{-6} \theta^3 + 8.06 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.73 \times 10^{-4} \theta + 0.12 \quad (4.4 ข)$$

แก้สมการ (4.4ก) และ (4.4ข) จะได้  $\theta = 47.23$  องศา และ  $a/w = 0.16$  ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไว้หน่วย) คือ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่า  $a/w$  ที่มุมเอียงต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_y - V_x$   
(ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ  $a/w = 0.15$  และ  $\theta = 45$  องศา)

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_y - V_x$
10	0.113	0.244
20	0.119	0.186
30	0.128	0.162
40	0.145	0.156
50	0.164	0.153
60	0.193	0.163
70	0.260	0.160
80	0.356	0.260



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

**ตัวอย่างที่ 2** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.45$  และมีมุมเอียง  $\theta = 65$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ดกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $x$  คือ  $5.020 \mu V$  และความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ดกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  คือ 1.220 ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_y - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.13)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 7.76 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.09 \times 10^{-5} \theta^3 + 5.94 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.43 \times 10^{-2} \theta + 0.47 \quad (4.5 ก)$$

กรณี  $I_y - V_x$

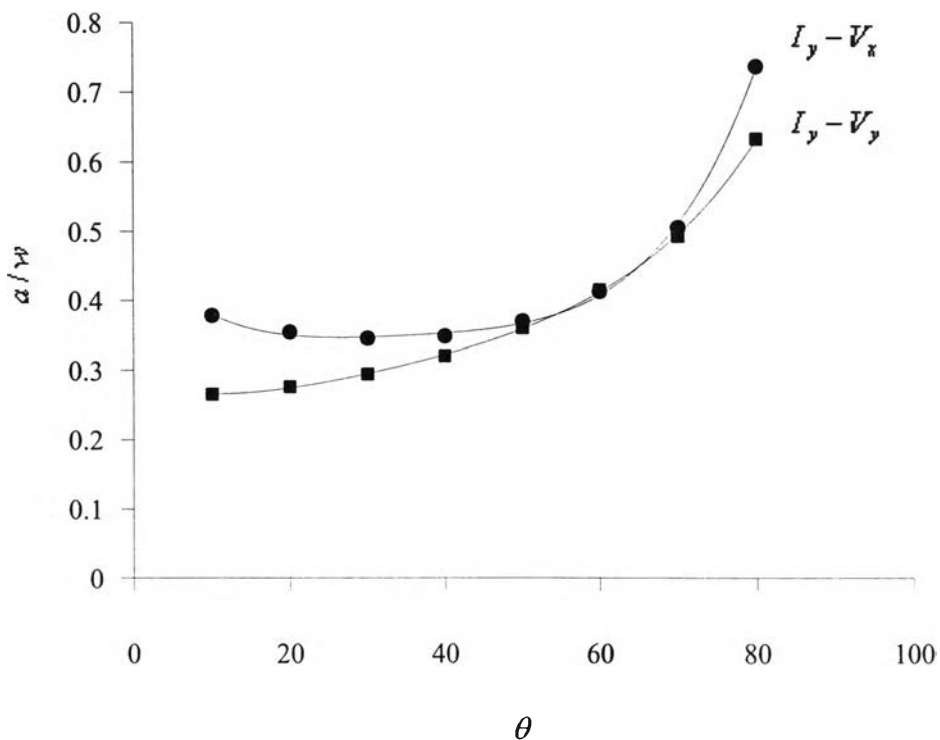
$$\frac{a}{w} = 2.72 \times 10^{-8} \theta^4 - 3.56 \times 10^{-6} \theta^3 + 2.07 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.28 \times 10^{-3} \theta + 0.28 \quad (4.5 ข)$$

แก้สมการ (4.5 ก) และ (4.5 ข) จะได้จุดตัด 2 จุด จุดแรกคือ  $\theta = 54.46$  องศา และ  $a/w = 0.38$  จุดที่สองคือ  $\theta = 65.23$  องศา และ  $a/w = 0.45$  ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงของจุดตัด

แรกและจุดตัดที่สองคือ 16.21 และ 0.45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และความผิดพลาดในการระบุความยาว (ไร้หน่วย) คือ 15.56 เปอร์เซ็นต์ และ 0.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่า  $a/w$  ที่มุมเอียงต่างๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_y - V_x$  (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ  $a/w = 0.45$  และ  $\theta = 65$  องศา)

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_y - V_x$
10	0.266	0.378
20	0.276	0.354
30	0.295	0.345
40	0.321	0.349
50	0.360	0.370
60	0.415	0.413
70	0.493	0.506
80	0.634	0.738



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

#### 4.4 การระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในฉันทดสอบ MT ด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$

##### 4.4.1 ขั้นตอน

- 1) กำหนดความยาวและมุมเอียงของรอยร้าวบนฉันทดสอบ MT
- 2) ป้อนกระแสไฟฟ้า ตามเงื่อนไขขอบเขต ในหัวข้อ 4.2.1 (ก)
- 3) คำนวณความต่างศักย์ไร้หน่วย ระหว่างจุดอ้างอิงบนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$
- 4) แทนค่า  $V_y/V_r$  ลงในสมการของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  (สมการที่ (4.1)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 5) ป้อนกระแสไฟฟ้า ตามเงื่อนไขขอบเขต ในหัวข้อ 4.2.1 (ข)
- 6) คำนวณความต่างศักย์ไร้หน่วยระหว่างจุดอ้างอิงบนแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$
- 7) แทนค่า  $V_x/V_r$  ลงในสมการพหุนามของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_x - V_x$  (สมการที่ (4.3)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 8) พล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบทั้งสอง บนแกนเดียวกัน
- 9) หาจุดตัดของกราฟ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะรอยร้าวที่ระบุได้กับที่กำหนด

##### 4.4.2 ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$

**ตัวอย่างที่ 1** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.15$  และมีมุมเอียง  $\theta = 25$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  คือ 1.059 และ 1.014 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้อยู่ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.14)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 1.27 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.27 \times 10^{-6} \theta^3 + 6.94 \times 10^{-5} \theta^2 - 6.52 \times 10^{-4} \theta + 0.14 \quad (4.6 \text{ ก})$$

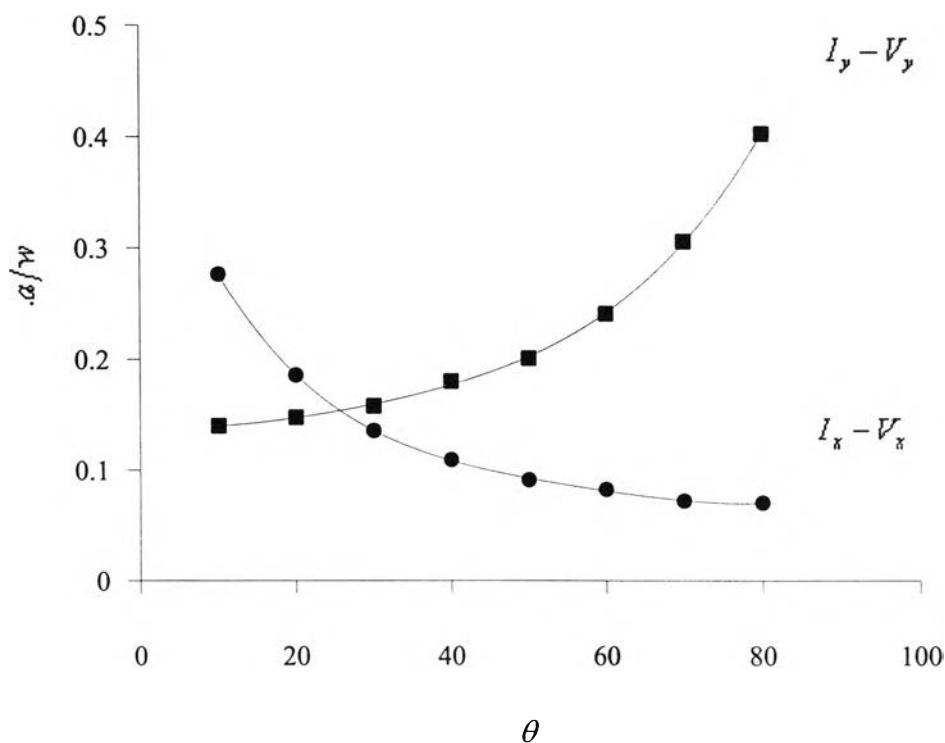
กรณี  $I_x - V_x$

$$\frac{a}{w} = 2.13 \times 10^{-8} \theta^4 - 4.97 \times 10^{-6} \theta^3 + 4.46 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.93 \times 10^{-2} \theta + 0.43 \quad (4.6 \text{ ข})$$

แก้สมการ (4.6 ก) และ (4.6 ข) คือ  $\theta = 25.65$  องศา และ  $a/w = 0.15$  ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไร้หน่วย) คือ 2.6 เปอร์เซ็นต์ และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่า  $a/w$  ที่มุมเอียงต่างๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$   
(ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ  $a/w = 0.15$  และ  $\theta = 25$  องศา)

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.140	0.276
20	0.147	0.185
30	0.158	0.135
40	0.180	0.109
50	0.201	0.091
60	0.241	0.082
70	0.306	0.072
80	0.403	0.070



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

ตัวอย่างที่ 2 สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.45$  และมีมุมเอียง  $\theta = 65$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ไว้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  คือ 1.220 และ 1.451

ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.4 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.15)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 2.72 \times 10^{-8} \theta^4 - 3.56 \times 10^{-6} \theta^3 + 2.07 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.28 \times 10^{-3} \theta + 0.28 \quad (4.7 ก)$$

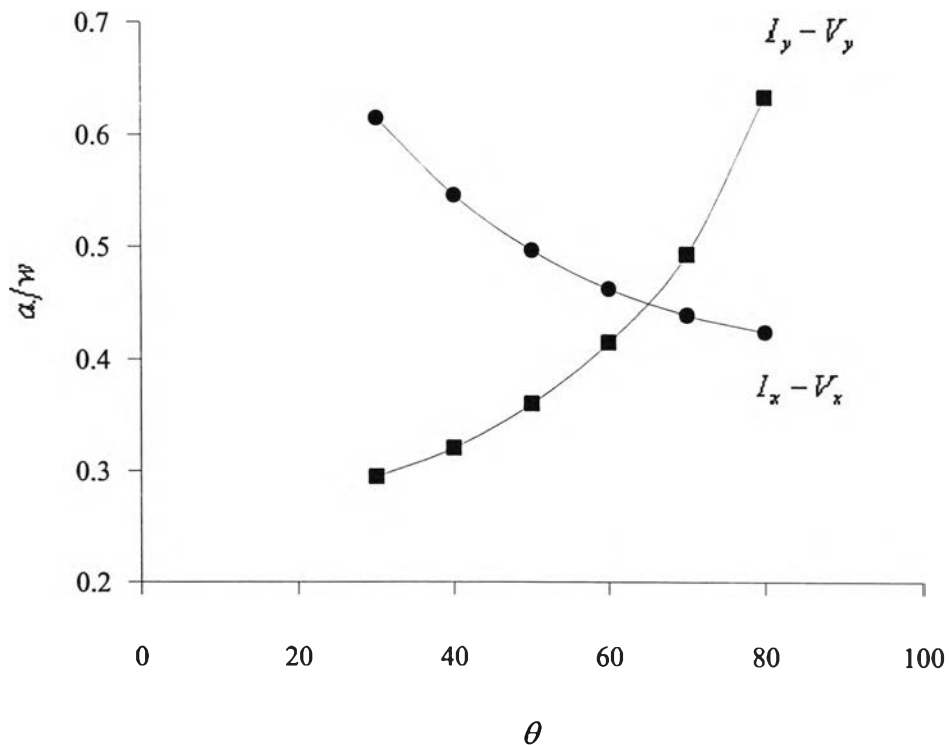
กรณี  $I_x - V_x$

$$\frac{a}{w} = 8.14 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.89 \times 10^{-5} \theta^3 + 1.66 \times 10^{-3} \theta^2 - 6.79 \times 10^{-2} \theta + 1.61 \quad (4.7 ข)$$

จุดตัดที่ได้จากการแก้สมการ (4.6 ก) และ (4.6 ข) คือ  $\theta = 65.08$  องศา และ  $a/w = 0.45$  ดังนั้นความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไร้หน่วย) คือ 0.13 เปอร์เซ็นต์ และศูนย์เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

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)

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.266	-
20	0.276	0.777
30	0.295	0.615
40	0.321	0.546
50	0.360	0.497
60	0.415	0.463
70	0.493	0.440
80	0.634	0.425



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

**ตัวอย่างที่ 3** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.65$  และมีมุมเอียง  $\theta = 65$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ห่างจากรอยร้าว 5 มม. ผลการคำนวณความต่างศักย์ไว้หน่วยที่ดัดคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  คือ 1.502 และ 1.852 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.5 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.16)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 3.94 \times 10^{-8} \theta^4 - 4.82 \times 10^{-6} \theta^3 + 2.61 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.84 \times 10^{-3} \theta + 0.42 \quad (4.8 \text{ ก})$$

กรณี  $I_x - V_x$

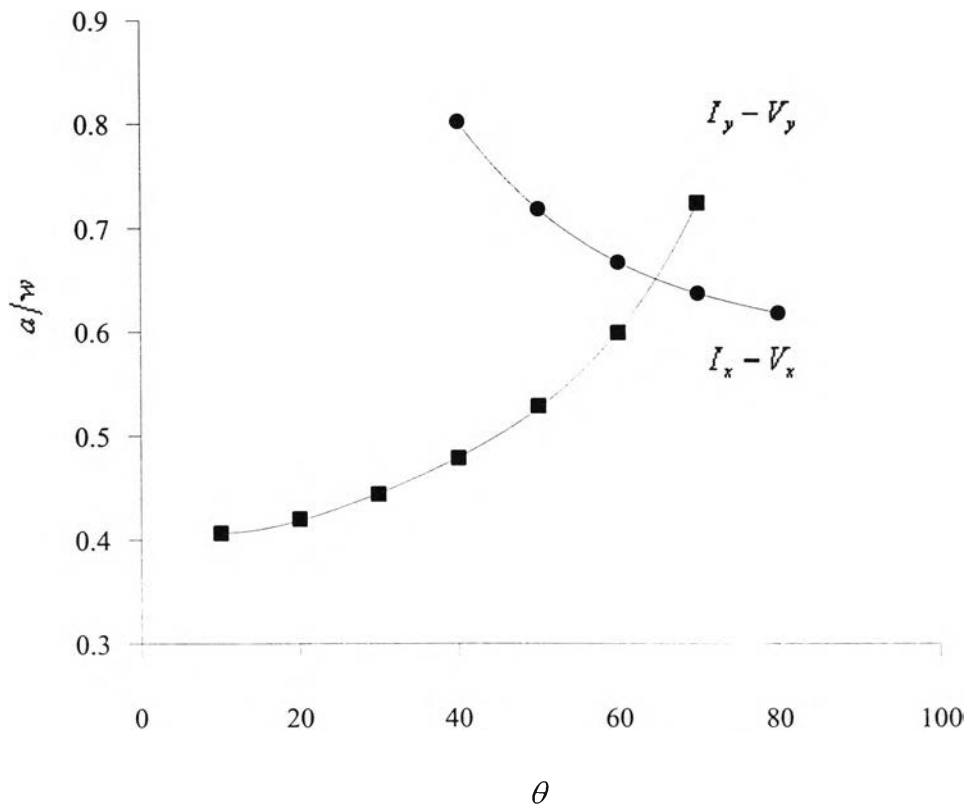
$$\frac{a}{w} = 4.58 \times 10^{-9} \theta^4 - 2.88 \times 10^{-6} \theta^3 + 5.24 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.97 \times 10^{-2} \theta + 1.72 \quad (4.8 \text{ ข})$$



จุดตัดที่ได้จากการแก้สมการ (4.8 ก) และ (4.8 ข) คือ  $\theta = 64.73$  องศา และ  $a/w = 0.65$  ดังนั้น ความผิดพลาดในการระบุมุมเอียงและความยาว (ไร้หน่วย) คือ 0.41 เปอร์เซ็นต์ และ 0.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

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

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.406	-
20	0.420	-
30	0.444	-
40	0.479	0.802
50	0.529	0.719
60	0.599	0.667
70	0.724	0.637
80	-	0.618



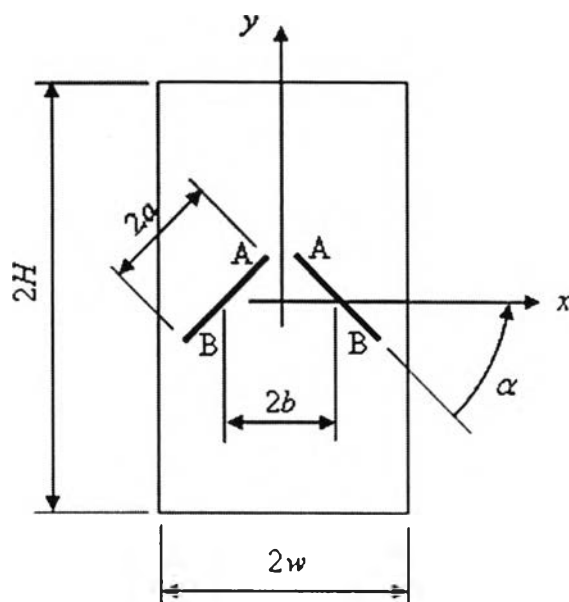
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $a/w$  กับ  $\theta$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$ ,  $I_x - V_x$  (ลักษณะรอยร้าวที่กำหนด คือ  $a/w = 0.65$  และ  $\theta = 65$  องศา)

#### 4.5 การระบุลักษณะรอยร้าวซับซ้อน

หัวข้อที่ 4.4 ได้แสดงการประยุกต์วิธีระบุลักษณะรอยร้าวเอียง 2 วิธี คือ วิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$  และวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  กับปัญหารอยร้าวเอียง (จำนวน 1 รอย) ในชิ้นงานทดสอบ MT ซึ่งผลการประยุกต์แสดงให้เห็นว่า วิธีการทั้งสองสามารถระบุลักษณะรอยร้าวเอียงได้อย่างแม่นยำ และเชื่อถือได้ โดยเฉพาะกรณีของวิธีที่ 2 อย่างไรก็ตาม รอยร้าวที่พบในโครงสร้างมักจะมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าที่วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาไปในตอนต้น ดังนั้นจึงเกิดประเด็นที่น่าสนใจว่าการระบุการระบุลักษณะรอยร้าวที่มีลักษณะแตกต่างจากที่ใช้สร้างเส้นโค้งสอบเทียบจะให้ผลเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยวิธีที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน เช่น API 579 เป็นต้น

##### 4.5.1 รายละเอียดของปัญหา

ปัญหาที่เลือกมาศึกษา คือ ชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง 2 รอยดังแสดงในรูปที่ 4.17 ชิ้นทดสอบที่เลือก กำหนดชิ้นทดสอบมีความหนา 5 มม. มีความกว้าง 25 มม. และมีความยาว 50 มม. ชิ้นงานทดสอบทำจากอะลูมิเนียม (Aluminum) มีสภาพการนำไฟฟ้าเท่ากับ  $3.64 \times 10^7$  (โอห์ม.เมตร)<sup>-1</sup> [21] รอยร้าวจำลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน มีความกว้างที่จุดกึ่งกลาง 0.2 มม. (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียงจำนวนสองรอย

### 4.5.2 ขั้นตอน

- 1) กำหนดความยาวและมุมเอียงของรอยร้าวบนชิ้นงานทดสอบ MT
- 2) ป้อนกระแสไฟฟ้า ตามเงื่อนไขขอบเขต ในหัวข้อ 4.2.1 (ก)
- 3) คำนวณความต่างศักย์ไร้หน่วย ระหว่างจุดอ้างอิงบนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$
- 4) แทนค่า  $V_y/V_r$  ลงในสมการของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  (สมการที่ (4.1)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 5) ป้อนกระแสไฟฟ้า ตามเงื่อนไขขอบเขต ในหัวข้อ 4.2.1 (ข)
- 6) คำนวณความต่างศักย์ไร้หน่วยระหว่างจุดอ้างอิงบนแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$
- 7) แทนค่า  $V_x/V_r$  ลงในสมการพหุนามของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_x - V_x$  (สมการที่ (4.3)) เพื่อหาค่า  $a/w$  ที่มุม  $\theta$  ต่าง ๆ
- 8) พล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบทั้งสอง บนแกนเดียวกัน
- 9) หาจุดตัดของกราฟ เพื่อหาลักษณะรอยร้าวที่ระบุได้ด้วยวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$

### 4.5.3 ตัวอย่างการระบุลักษณะรอยร้าวซับซ้อนด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$

**ตัวอย่างที่ 1** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.3$  และ  $a/b = 1$  และมีมุม  $\alpha = 10$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  จะได้คือ 1.618 และ 1.115 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18)

$$I_y - V_y;$$

$$\frac{a}{w} = 1.73 \times 10^{-8} \theta^4 - 1.71 \times 10^{-6} \theta^3 + 1.19 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.24 \times 10^{-3} \theta + 0.45 \quad (4.9 \text{ ก})$$

$$I_x - V_x;$$

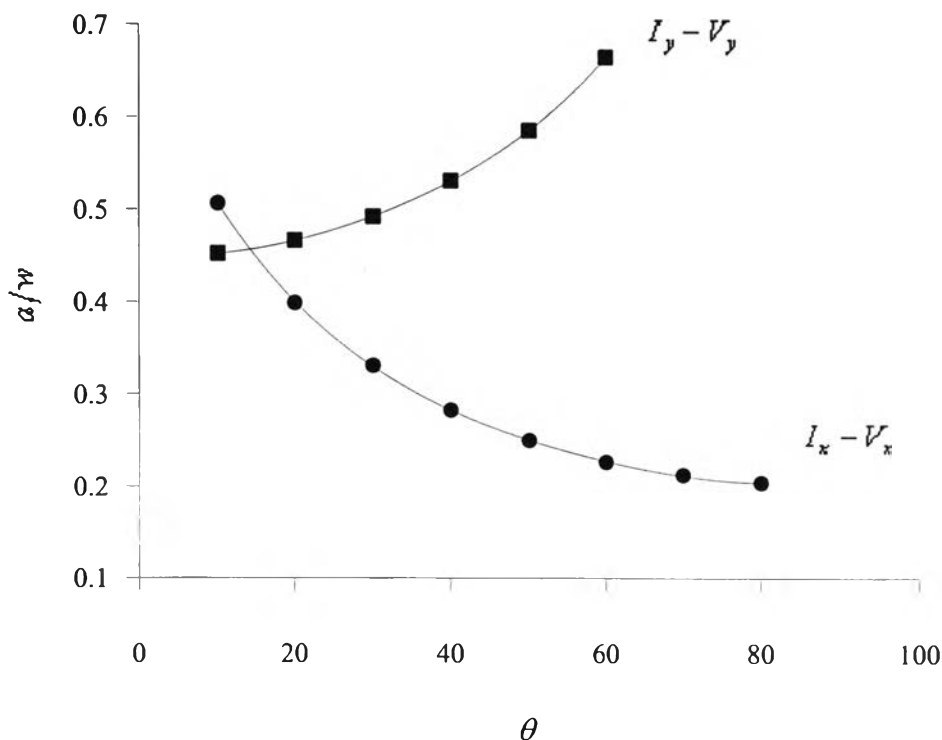
$$\frac{a}{w} = 1.39 \times 10^{-8} \theta^4 - 3.40 \times 10^{-6} \theta^3 + 3.47 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.88 \times 10^{-2} \theta + 0.66 \quad (4.9 \text{ ข})$$

แก้สมการ (4.9ก) และ (4.9ข) จะได้  $\theta = 14.19$  องศา และ  $a/w = 0.46$

ดังนั้นวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  ระบุลักษณะรอยร้าวในรูปที่ 4.12 (ที่มี  $a/w = 0.3, a/b = 1$  และ  $\alpha = 10$  องศา) ว่าเป็นรอยร้าวเอียง 1 รอย (รูปที่ 4.1) ที่มี  $a/w = 0.46$  และ  $\theta = 14.19$  องศา

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

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.452	0.506
20	0.466	0.399
30	0.492	0.331
40	0.531	0.283
50	0.585	0.251
60	0.664	0.227
70	-	0.213
80	-	0.205



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

**ตัวอย่างที่ 2** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.3$  และ  $a/b = 1$  และมีมุม  $\alpha = 30$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ดักคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  จะได้คือ 1.413 และ 1.309 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่างๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ

$I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.7 เมื่อพล็อตจุด ( $a/w, \theta$ ) แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.19)

กรณี  $I_y - V_y$

$$\frac{a}{w} = 2.01 \times 10^{-8} \theta^4 - 2.26 \times 10^{-6} \theta^3 + 1.41 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.74 \times 10^{-3} \theta + 0.37 \quad (4.10 ก)$$

กรณี  $I_x - V_x$

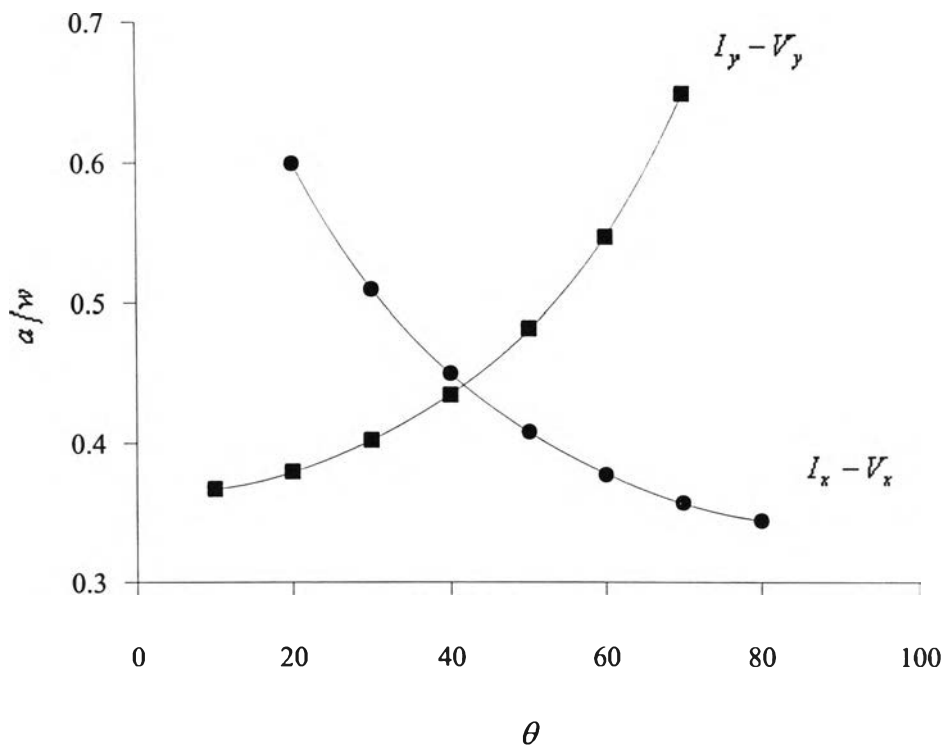
$$\frac{a}{w} = 1.52 \times 10^{-8} \theta^4 - 3.87 \times 10^{-6} \theta^3 + 4.10 \times 10^{-4} \theta^2 - 2.31 \times 10^{-2} \theta + 0.93 \quad (4.10 ข)$$

แก้สมการ (4.10ก) และ (4.10ข) จะได้  $\theta = 41.66$  องศา และ  $a/w = 0.42$

ดังนั้นวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  ระบุลักษณะรอยร้าวในรูปที่ 4.12 ที่มี  $a/w = 0.3, a/b = 1$  และ  $\alpha = 30$  องศา ว่าเป็นรอยร้าวเอียง 1 รอย (รูปที่ 4.1) ที่มี  $a/w = 0.42$  และ  $\theta = 41.66$  องศา

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)

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.367	-
20	0.380	0.599
30	0.402	0.510
40	0.434	0.450
50	0.482	0.408
60	0.547	0.377
70	0.649	0.357
80	-	0.344



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

**ตัวอย่างที่ 3** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.3$  และ  $a/b = 1$  และมีมุม  $\alpha = 40$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  จะได้คือ 1.303 และ 1.400 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.8 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.20)

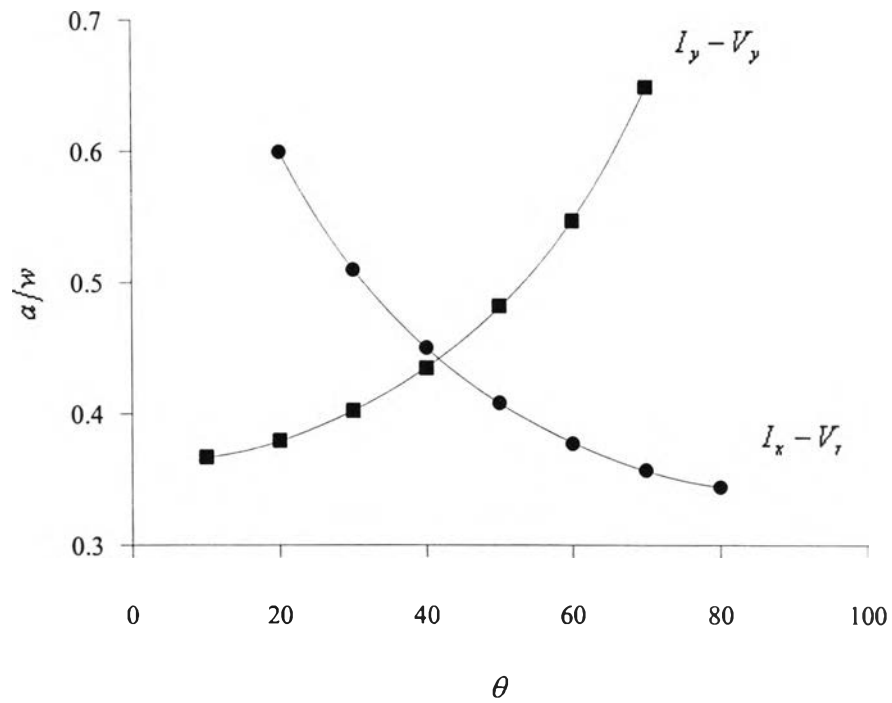
$I_y - V_y$ ;

$$\frac{a}{w} = 8.94 \times 10^{-9} \theta^4 - 7.36 \times 10^{-7} \theta^3 + 6.49 \times 10^{-5} \theta^2 - 4.16 \times 10^{-4} \theta + 0.31 \quad (4.11 \text{ ก})$$

$I_x - V_x$ ;

$$\frac{a}{w} = 3.61 \times 10^{-8} \theta^4 - 8.65 \times 10^{-6} \theta^3 + 8.11 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.80 \times 10^{-2} \theta + 1.19 \quad (4.11 \text{ ข})$$

แก้สมการ (4.11ก) และ (4.11ข) จะได้  $\theta = 55.56$  องศา และ  $a/w = 0.45$



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

**ตัวอย่างที่ 3** สร้างรอยร้าวที่มีค่า  $a/w = 0.3$  และ  $a/b = 1$  และมีมุม  $\alpha = 40$  องศา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นความต่างศักย์ไร้หน่วยที่ตกคร่อมจุดที่อยู่บนแกน  $y$ ,  $V_y/V_r$  และแกน  $x$ ,  $V_x/V_r$  จะได้คือ 1.303 และ 1.400 ตามลำดับ ค่า  $a/w$  ที่มุมต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4.8 เมื่อพล็อตจุด  $(a/w, \theta)$  แล้ววิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการต่อไปนี้ (เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.20)

$$I_y - V_y;$$

$$\frac{a}{w} = 8.94 \times 10^{-9} \theta^4 - 7.36 \times 10^{-7} \theta^3 + 6.49 \times 10^{-5} \theta^2 - 4.16 \times 10^{-4} \theta + 0.31 \quad (4.11 ก)$$

$$I_x - V_x;$$

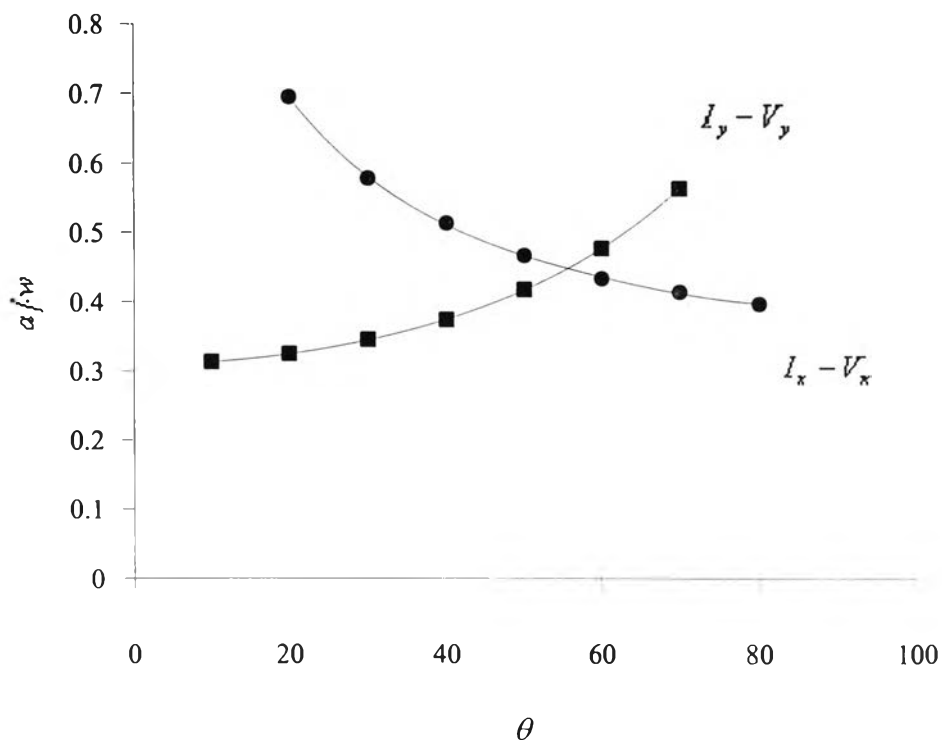
$$\frac{a}{w} = 3.61 \times 10^{-8} \theta^4 - 8.65 \times 10^{-6} \theta^3 + 8.11 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.80 \times 10^{-2} \theta + 1.19 \quad (4.11 ข)$$

แก้สมการ (4.11ก) และ (4.11ข) จะได้  $\theta = 55.56$  องศา และ  $a/w = 0.45$

ดังนั้นวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  ระบุลักษณะรอยร้าวในรูปที่ 4.12 ที่มี  $a/w = 0.3, a/b = 1$  และ  $\alpha = 40$  องศา ว่าเป็นรอยร้าวเอียง 1 รอย (รูปที่ 4.1) ที่มี  $a/w = 0.45$  และ  $\theta = 55.56$  องศา

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

มุมเอียงรอยร้าว $\theta$ (องศา)	$a/w$	
	$I_y - V_y$	$I_x - V_x$
10	0.313	-
20	0.325	0.694
30	0.345	0.578
40	0.374	0.513
50	0.418	0.466
60	0.477	0.433
70	0.563	0.411
80	-	0.397



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



## 4.6 อภิปราย

### 4.6.1 จินตทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวเอียง

#### (1) ลักษณะของเส้นโค้งสอบเทียบ

จากเส้นโค้งสอบเทียบในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 พบว่า ความต่างศักย์ไร้หน่วย (หรือความต่างศักย์) ระหว่างจุดวัดสองจุด ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวรอยร้าวต่อความกว้าง  $a/w$  และมุมเอียง  $\theta$  ในทุกกรณีจะพบว่าความต่างศักย์ไร้หน่วย (หรือความต่างศักย์) เพิ่มขึ้นเมื่อ  $a/w$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากรอยร้าวทำให้พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไหลผ่านได้ลดลง สำหรับผลของมุมเอียง  $\theta$  นั้นพบว่าเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  (รูปที่ 4.7) จะเลื่อนขึ้นเมื่อมุมเอียงมีค่าลดลง โดยอาจสังเกตได้จากความต่างศักย์ไร้หน่วยจะสูงขึ้นตามขนาดสภาพฉายของรอยร้าวบนระนาบที่ตั้งฉากแกนป้อนกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น (ถ้าพิจารณาที่  $a/w$  เดียวกัน) ในทำนองเดียวกันเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_x - V_x$  จะเลื่อนขึ้นเมื่อมุมเอียงมีค่าเพิ่มขึ้น และเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_x$  (รูปที่ 4.8) จะเลื่อนขึ้นเมื่อมุมเอียงมีค่าลดลง เพราะมุมเอียงที่มากขึ้นจนเข้าใกล้จะขนานกับแกนป้อนกระแสไฟฟ้า การรบกวนของรอยร้าวจะลดลง การกระจายของศักย์ไฟฟ้าจึงมีลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform) มากขึ้น ความต่างศักย์บนแกน  $x$  จึงลดลง

เส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_x$  พบว่า  $a/w$  ในช่วงประมาณ 0.1-0.45 เส้นโค้งสอบเทียบของมุมเอียง ( $\theta$ ) 10, 20, 30 และ 40 องศา เกิดการไขว้ตัดกับเส้นโค้งสอบเทียบของมุมอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.8 โดยพบว่าช่วงการไขว้ตัดกันของเส้นกราฟจะลดลงหากจุดวัดความต่างศักย์เข้าใกล้กึ่งกลางรอยร้าวมากขึ้น

#### (2) ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ $a/w$ กับ $\theta$

การใช้วิธี  $I_y - V_y; I_y - V_x$  พบว่าเมื่อพล็อตคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  (รูปที่ 4.7) และกรณี  $I_y - V_x$  (รูปที่ 4.8) บนกราฟเดียวกัน พบว่าจุดตัด (ลักษณะรอยร้าวเอียง) ที่เกิดขึ้นแบ่งได้สองกรณี คือกรณีแรก เกิดจุดตัดเพียงจุดเดียว พบว่าเกิดเมื่อความต่างศักย์ ( $V$ ) ที่คำนวณได้ตกอยู่ในช่วงที่เส้นโค้งไขว้ตัดกัน (ช่วงประมาณ 0.1-0.45 ของเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_x$  (รูปที่ 4.8)) ก่อให้เกิดการซ้ำกันของ  $a/w$  ของมุม  $\theta$  ที่ต่างกัน เกิดลักษณะเส้นโค้งแบบรูปถ้วยดังตัวอย่างรูปที่ 4.10 โดยเท่าที่พบเส้นโค้งแบบรูปถ้วย จะก่อให้เกิดจุดตัดของเส้นกราฟเพียงจุดเดียวทำให้สามารถระบุลักษณะรอยร้าวเอียง ยกเว้นลักษณะรอยร้าวที่ต้องการหาอยู่ตรงจุดตัดของเส้นโค้งสอบเทียบพอดี กรณีที่สอง จุดตัดมากกว่าหนึ่งจุดจะไม่สามารถระบุลักษณะรอยร้าวเอียงได้ เพราะลักษณะเส้นโค้งของคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบในแต่ละกรณีมีแนวโน้มความโค้งไปในทิศเดียวกันดังตัวอย่างรูปที่ 4.11

การใช้วิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  พบว่าเมื่อพล็อตคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  (รูปที่ 4.7) จะได้เส้นโค้งที่ค่า  $a/w$  เพิ่มขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามเมื่อพล็อตคู่อันดับ  $(a/w, \theta)$  ที่ได้จากเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_x - V_x$  (รูปที่ 4.9) จะได้เส้นโค้งที่มีค่า  $a/w$  ลดลงเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้น เส้นโค้งทั้งสองมีแนวโน้มต่างกัน (กรณี  $I_y - V_y$  โค้งขึ้นแต่กรณี  $I_x - V_x$  โค้งลง) จึงเกิดจุดตัด (ลักษณะรอยร้าวเอียง) เพียงจุดเดียว

(3) ความไว (ความชัน) ของเส้นโค้งสอบเทียบแต่ละเส้น (รูปที่ 4.7, 4.8 และรูปที่ 4.9) สูงขึ้นตาม  $a/w$  ที่สูงขึ้นเหมือนกับเส้นโค้งสอบเทียบกรณีรอยร้าวไม่เอียง ผลของมุมเอียงสำหรับเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  และกรณี  $I_x - V_x$  พบว่าความไวจะสูงขึ้นเมื่อมุมที่รอยร้าวทำกับแนวแกนป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ขนาดภาพฉายของรอยร้าวบนระนาบที่ตั้งฉากกับแกนป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น) สำหรับเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_x$  ไม่สามารถระบุได้เนื่องจากการไขว้ตัดกันของเส้นโค้ง แต่ในช่วงที่ไขว้ตัดกัน ความไวมีลักษณะเหมือนเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$  โดยพบว่าความไวหรือความชันเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_x$ ,  $I_y - V_y$  และ  $I_x - V_x$  เรียงจากมากไปน้อยตามลำดับ โดยความชันของเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_x$  สูงกว่าอีกสองกราฟมาก อาจเพราะไม่ได้ถูกนอมัลไลซ์ด้วยความต่างศักย์อ้างอิง

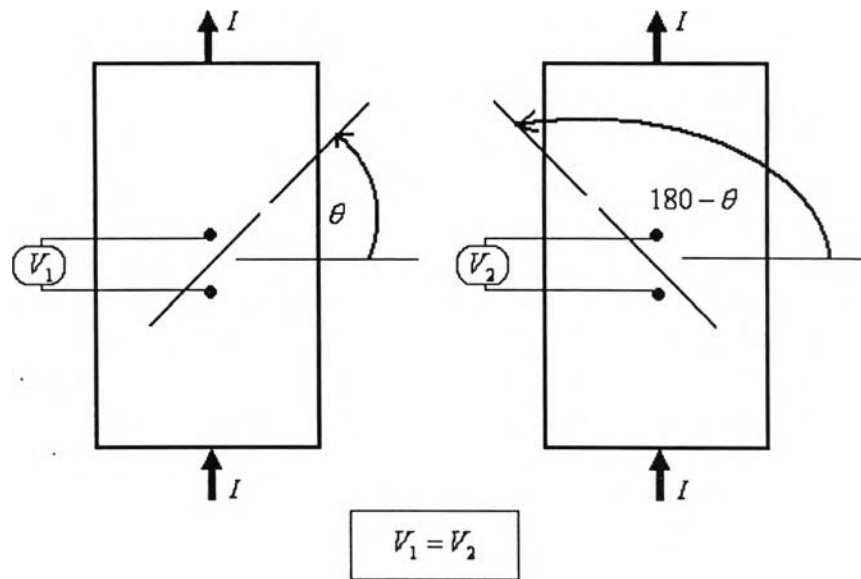
(4) รอยร้าวที่วางตัวสมมาตรกับแกน  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะมีค่าความต่างศักย์ไร้หน่วย  $(V/V_r)$  เท่ากัน ดังนั้นเส้นโค้งสอบเทียบ  $I_y - V_y$  สำหรับมุมเอียงรอยร้าวในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา จะใช้ได้กับกรณีรอยร้าวมีมุมเอียง 100, 110, ..., 170 องศา (ความต่างศักย์ไร้หน่วยในช่วง 10, 20, ..., 80 องศา และช่วง 100, 110, ..., 170 องศา แสดงในภาคผนวก ข) ข้อสรุปข้างต้นสามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{V}{V_r}(\theta) = \frac{V}{V_r}(180 - \theta) \quad (4.12)$$

ดังเช่นกรณี กับมุมเอียงรอยร้าวในช่วง 100, 110, ..., 170 องศา มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (4.12) โดยตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความต่างศักย์ไร้หน่วยดังสมการที่ (4.12)

ตารางที่ 4.9 ความต่างศักย์ไร้หน่วยของมุมเอียงรอยร้าว ( $\theta$ ) 80 องศา กับมุมเอียงรอยร้าว 100 องศา สำหรับเส้นโค้งสอบเทียบกรณี  $I_y - V_y$

มุมเอียงรอยร้าว, $\theta$ (องศา)	$a/w$						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
80	1.003	1.008	1.020	1.055	1.125	1.193	1.258
100	1.003	1.008	1.020	1.055	1.125	1.193	1.259



รูปที่ 4.21 รอยร้าวที่สมมาตรกัน

(5) ถ้าความต่างศักย์ (หรือความต่างศักย์ไร้หน่วย) สำหรับรอยร้าวเฉียงที่ต้องการระบุ มีค่าอยู่ใกล้ขอบเขตบนหรือล่างของเส้นโค้งสอบเทียบ ลักษณะรอยร้าวที่ระบุได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง เพราะว่า  $a/w$  ที่คำนวณได้จากสมการพหุนามของเส้นโค้งสอบเทียบอาจอยู่นอกช่วงของเส้นโค้ง ดังเช่นตารางที่ 4.3 ที่  $\theta$  เท่ากับ 50, 60, 70 และ 80 องศา

(6) วิธีการนี้ไม่สามารถระบุลักษณะรอยร้าวที่มี  $\theta$  เท่ากับศูนย์องศา และ  $\theta$  เท่ากับ 90 องศา เพราะจุดวัดความต่างศักย์ที่ใช้อยู่บนแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้

#### 4.6.2 ชิ้นทดสอบ MT ที่มีรอยร้าวซับซ้อน

##### (1) ผลของสัดส่วนชิ้นทดสอบ

เนื่องจากชิ้นงานทดสอบที่ใช้ระบุลักษณะรอยร้าวซับซ้อนในหัวข้อที่ 4.5 มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 แต่การระบุใช้สร้างเส้นโค้งสอบเทียบ (หัวข้อที่ 4.2) ที่สร้างจากกรณีใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 4 อย่างไรก็ตาม ในเชิงทฤษฎีแล้ว สัดส่วนของชิ้นงานไม่มีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลย หากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดวัดความต่างศักย์มีการกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ในวิทยานิพนธ์นี้กระแสไฟฟ้าจะถูกป้อนเข้าจุดต่อที่ขอบของชิ้น

ทดสอบในลักษณะที่ทำให้การกระจายกระแสไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ทุก ๆ หน้าตัดของชิ้นงาน<sup>1</sup> ดังนั้น โดยหลักการแล้ว เส้นโค้งสอบเทียบที่สร้างไว้ก่อนหน้าจึงใช้กับกรณีชิ้นงานที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 ได้

อย่างไรก็ตามได้ตรวจสอบข้อสรุปข้างต้นอีกทางหนึ่ง ด้วยการประยุกต์วิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  กับชิ้นทดสอบ MT ที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2 และใช้เส้นโค้งสอบเทียบของชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 4 (รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.9) ผลการระบุลักษณะรอยร้าวด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงอยู่ในตารางที่ 4.10 (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก จ) จากตารางจะเห็นว่าลักษณะรอยร้าวที่ระบุได้ใกล้เคียงกับลักษณะรอยร้าวที่กำหนด ดังนั้นจึงยืนยันข้อสรุปข้างต้นที่กล่าวว่า เส้นโค้งสอบเทียบไม่ขึ้นกับสัดส่วนของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 4.10 ผลการระบุลักษณะรอยร้าวเอียงในชิ้นงานทดสอบ MT ที่มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 2

ลำดับ ที่	ลักษณะ รอยร้าว	ความต่างศักย์ไร้หน่วย		ลักษณะรอยร้าวที่ระบุด้วยวิธี $I_y - V_y; I_x - V_x$
		แกน y	แกน x	
1	$a/w = 0.15$ $\theta = 25^\circ$	1.060	1.015	$a/w = 0.15$ $\theta = 26.0^\circ$
2	$a/w = 0.65$ $\theta = 65^\circ$	1.504	1.893	$a/w = 0.67$ $\theta = 65.9^\circ$

## (2) ตัวประกอบความเข้มของความเค้น

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor)  $K$  คือ พารามิเตอร์ที่บอกสภาพความรุนแรงในเนื้อวัสดุที่ปลายรอยร้าว ถ้า  $K$  มีค่าเพิ่มขึ้น โอกาสเสียหายก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น พารามิเตอร์นี้จึงเป็นตัวชี้วัดสภาพของชิ้นส่วน โครงสร้างว่ายังมีความแข็งแรงเหลืออีกเท่าใด

การคำนวณค่า  $K$  ต้องการข้อมูลลักษณะรอยร้าว เช่น ความยาว ลักษณะรอยร้าว มุมเอียง เป็นต้น อย่างไรก็ตามรอยร้าวที่พบมักมีลักษณะที่ซับซ้อน เช่น มีรอยร้าวจำนวนหลายรอย แต่ละรอยมีมุมเอียงต่าง ๆ กัน เป็นต้น ทำให้ผลเฉลย  $K$  ที่มีในคู่มือไม่สอดคล้องกับลักษณะรอยร้าวที่ตรวจพบจริง จึงเกิดวิธีเปลี่ยนลักษณะรอยร้าวที่ซับซ้อนเหล่านี้ให้เป็นรอยร้าวที่ง่ายขึ้น (มีผลเฉลย  $K$ ) ตัวอย่างของมาตรฐานที่กล่าวถึงการระบุลักษณะรอยร้าวได้แก่ มาตรฐาน API 579 [30] เป็นต้น

<sup>1</sup> การป้อนกระแสแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต่างจากวิธีป้อนในการทดลอง ที่กระแสจะไหลเข้าสู่ชิ้นทดสอบหรือไหลออกจากชิ้นทดสอบที่จุดใดจุดหนึ่งที่กำหนด ดังนั้นในกรณีนี้รอยร้าวต้องอยู่ห่างจากจุดป้อนกระแสมากพอที่จะทำให้กระแสไหลสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด

เนื่องจาก ปัญหาที่แสดงในรูปที่ 4.12 นั้นมีผลเฉลย  $K$  [28] จึงกำหนดให้ค่า  $K$  ที่คำนวณจากผลเฉลยนี้เป็นค่าอ้างอิง (ถูกต้อง) และนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $K$  ของรอยร้าวเอียงที่ได้จากการระบุลักษณะด้วยวิธี  $I_y - V_y; I_x - V_x$  และวิธีของ API 579 ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวเอียง 2 รอย ที่ถูกระบุลักษณะด้วยวิธีต่าง ๆ

มุม $\alpha$ (องศา)	$K_I (Pa \cdot \sqrt{m})$			
	จากคู่มือ <sup>(ก)</sup>		วิธี <sup>(ข)</sup>	มาตรฐาน <sup>(ค)</sup>
	ปลาย A	ปลาย B	$I_y - V_y, I_x - V_x$	API 579
10	1280	999	1165	1654
30	868	695	802	1572
40	630	521	406	1459

<sup>(ก)</sup> ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ซ.5

<sup>(ข)</sup>  $K_I$  เท่ากันทั้งสองปลาย และตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ซ.4

<sup>(ค)</sup> ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ซ.6

$K_I$  ที่คำนวณได้มีแนวโน้มลดลง เมื่อค่ามุมเอียงเพิ่มขึ้น เพราะมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นทำให้มีแรงที่กระทำกับรอยร้าวในลักษณะเปิดผิวหน้ารอยร้าวให้ห่างจากกันมีขนาดลดลง

สำหรับรอยร้าว  $a/w = 0.3$  และ  $a/b = 1$  จากตารางพบว่า การใช้วิธี  $I_y - V_y, I_x - V_x$  กับรอยร้าวแบบซับซ้อน ค่า  $K_I$  ที่คำนวณได้มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าจากคู่มือ (ค่าถูกต้อง) และมาตรฐาน API 579 ดังนั้นการใช้วิธี  $I_y - V_y, I_x - V_x$  ประเมินความแข็งแรงที่ยังคงเหลือของโครงสร้างจะไม่ปลอดภัย เพราะประเมินความรุนแรงในเนื้อวัสดุได้ต่ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง ในขณะที่การใช้มาตรฐาน API 579 จะให้ความปลอดภัยสูงกว่า เพราะ  $K_I$  ที่คำนวณได้ สูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตาม ผลต่างระหว่างค่า  $K_I$  ที่ได้จากรวิธี  $I_y - V_y, I_x - V_x$  กับค่าถูกต้อง มีค่าน้อยกว่าผลต่างระหว่างค่า  $K_I$  ที่ได้จกมาตรฐาน API 579 กับค่าถูกต้อง