

บทที่ 5

การทดสอบเพื่อหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

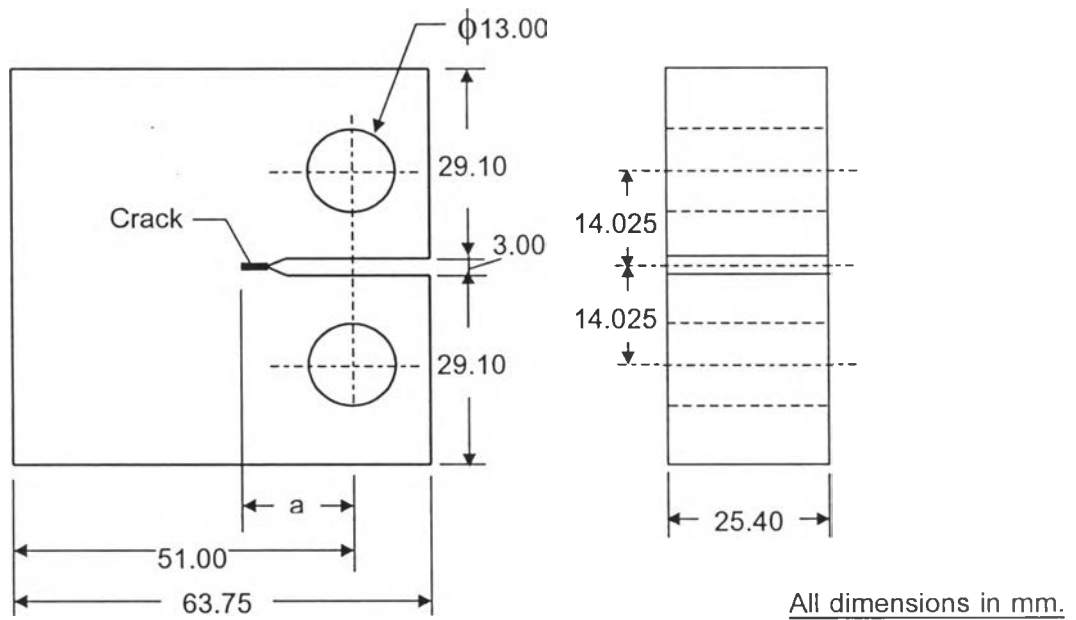
ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึง รายละเอียดของขั้นตอนทดสอบที่ศึกษา เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ สภาพะในการทดสอบ วิธีการทดสอบและวิธีเก็บข้อมูล ผลการทดสอบ และสรุปผลการทดสอบ

5.1 รายละเอียดของขั้นตอนทดสอบ

วัสดุที่นำมาศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ มีอยู่ 2 ชนิดคือ วัสดุ ASME SA-335 Gr P22 และ AL 6063-T6 ดังได้แสดงรายละเอียดของวัสดุทั้ง 2 ชนิดในภาคผนวก ก โดยสาเหตุที่ใช้วัสดุ 2 ชนิดนี้ เนื่องจากต้องการทดสอบวัสดุที่อยู่ในประเภทที่ต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะนำผลจากการทดสอบที่ได้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับการทำนายอายุรอยร้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นความสามารถและขีดจำกัดของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น

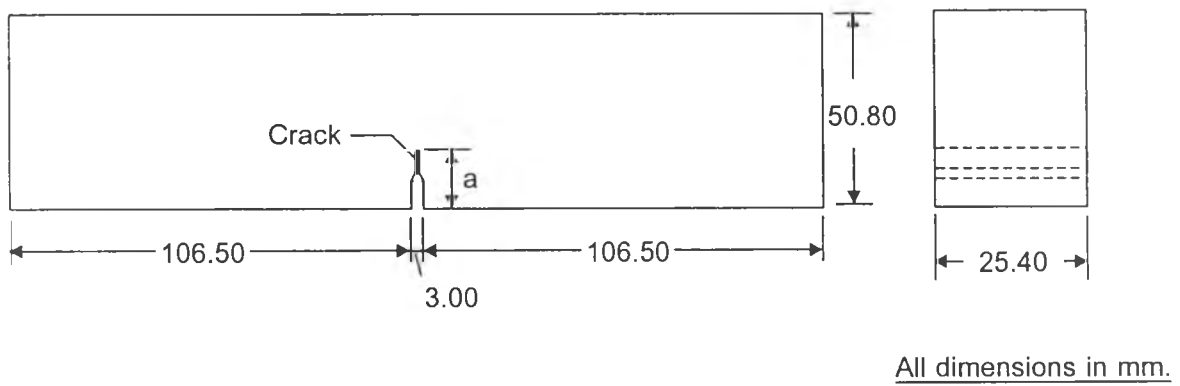
สำหรับรูปแบบของขั้นตอนทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบคือ ขั้นตอนทดสอบมาตรฐานแบบ CT (Compact tension specimen) และแบบคานดัดสามจุดกด (3-point bending specimen) สาเหตุที่เลือกใช้รูปแบบขั้นตอนทดสอบทั้งสอง เนื่องจากเป็นขั้นตอนทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และเพื่อศึกษาผลของรูปแบบขั้นตอนทดสอบต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าว โดยขั้นตอนทดสอบทั้งสองแบบนี้ ได้ทำการออกแบบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM E647-95a [28] ซึ่งมีขนาดมิติของขั้นตอนทดสอบแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

- สำหรับชิ้นทดสอบแบบ CT



รูปที่ 5.1 รูปร่างและขนาดมิติของชิ้นทดสอบแบบ CT

- สำหรับชิ้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกด



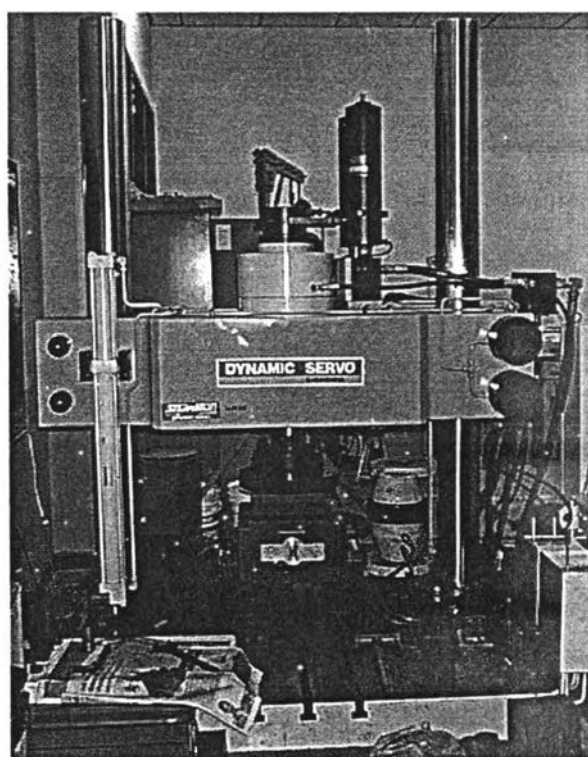
รูปที่ 5.2 รูปร่างและขนาดมิติของชิ้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกด

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. Hydraulic servo testing machine

เป็นเครื่องมือทดสอบของบริษัท Saginomiya ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีความสามารถสร้างภาระสูงสุดได้ 30 ตัน เครื่องทดสอบนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยๆ ดังนี้



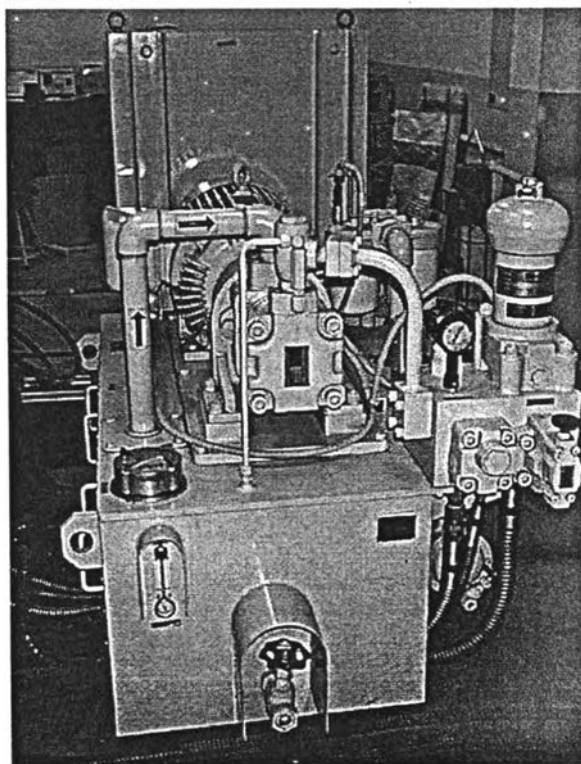
รูปที่ 5.3 เครื่องมือทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

1.1 ส่วนควบคุมหลัก (Main controller) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำหนดและควบคุมสภาวะของการทดสอบ ได้แก่ ขนาดของภาระเฉลี่ย ขนาดของแอมพลิจูดภาระ ความถี่ในการทดสอบ รูปทรงของภาระที่กระทำ และจำนวนรอบของภาระที่กระทำขึ้นทดสอบ ซึ่งส่วนควบคุมหลักนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.4



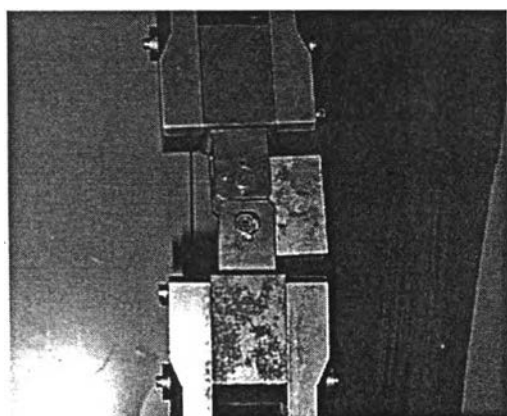
รูปที่ 5.4 ส่วนควบคุมหลักของเครื่องทดสอบความล้า

1.2 ส่วนชุดไฮดรอลิก (Hydraulic unit) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการสร้างความดันให้กับระบบ เพื่อใช้ในการสร้างภาระทดสอบแก่ชิ้นงาน ส่วนชุดไฮดรอลิกแสดงในรูปที่ 5.5

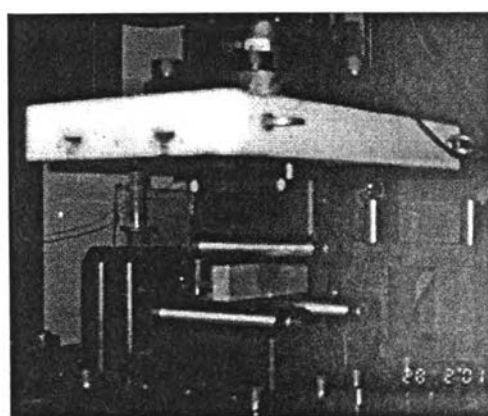


รูปที่ 5.5 ส่วนชุดไฮดรอลิกของเครื่องทดสอบความล้า

1.3 ส่วนยึดจับชิ้นงาน (Actuator and grip device) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดจับชิ้นงานและปรับระยะห่างระหว่างตัวยึดจับฝั่งบนและล่างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 5.6



(ก)



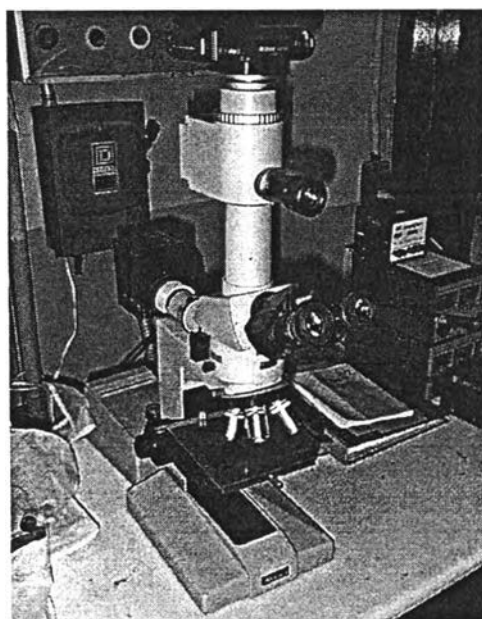
(ข)

รูปที่ 5.6 ก) แสดงส่วนยึดจับชิ้นงานสำหรับขั้นตอนสอบแบบ CT

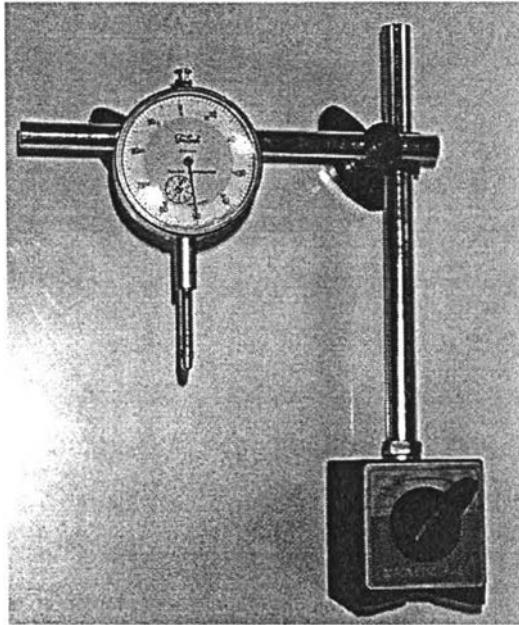
ข) แสดงส่วนยึดจับชิ้นงานสำหรับขั้นตอนสอบแบบคานัดัดสามจุดกด

2. กล้องไมโครสโคปและไดอัลเกจ

กล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกล้อง Nikon AFX-II ดังรูปที่ 5.7 กล้องไมโครสโคปนี้มีกำลังการขยายเท่ากับ 100, 200, 400 และ 1000 เท่า โดยกล้องดังกล่าวนี้ จะถูกนำไปใช้เพื่อช่วยในการส่องดูรอยร้าวที่เกิดขึ้น และทำการวัดขนาดของรอยร้าวบนชิ้นทดสอบด้วยไดอัลเกจดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 กล้องไมโครสโคปที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5.8 ไดอัลเกจและตัวยึดจับ

5.3 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดค่าอัตราส่วนของภาระ (R) ให้มีค่าคงที่ เพื่อตัดผลอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอัตราส่วน และทำการทดสอบกับชิ้นทดสอบที่มีรูปร่างต่างกัน เพื่อศึกษาผลจากการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นทดสอบ โดยชิ้นทดสอบดังกล่าวนี้จะรับภาระในรูปแบบที่ 1 เท่านั้น สภาวะที่ใช้ในการทดสอบต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สภาวะทดสอบที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของวัสดุ	รูปแบบ ชิ้นทดสอบ	ความถี่ (Hz)	ภาระเฉลี่ย (tons)	แอมพลิจูดภาระ (tons)
ASME SA-335	CT	20	2.400	0.800
Gr P22	3-Point Bending	10	2.600	0.867
AL 6063-T6	CT	20	1.000	0.333
	3-Point Bending	10	1.000	0.333

5.4 วิธีการทดสอบ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าตามแนวทางของมาตรฐาน ASTM E647-95a โดยในการทดสอบขั้นทดสอบมาตรฐานนี้ ได้ทำการสร้างรอยร้าวเริ่มต้นก่อนใช้สภาวะทดสอบที่กำหนด เนื่องจากในการสร้างขั้นทดสอบจะต้องผ่านกระบวนการตัดกลึง (Machining) และความร้อน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) ในขั้นทดสอบ ดังนั้นเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลจากความเค้นตกค้างนี้ จึงต้องทำการเดินรอยร้าวเริ่มต้นเป็นระยะหนึ่งก่อนทำการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลจริงในตารางที่ 5.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการสร้างรอยร้าวเริ่มต้น ซึ่งจะใช้สภาวะเริ่มต้นในการสร้างรอยร้าวจะเกิดรอยร้าวขนาดสั้นกว่า 1 มม. จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนภาวะเป็นสภาวะทดสอบตามที่กำหนดในตารางที่ 5.1 และทำการเดินรอยร้าวจนกระทั่งรอยร้าวมีขนาดประมาณ 3 มม. จึงเริ่มทำการเก็บข้อมูล โดยในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวนี้จะเป็นการทดสอบแบบเพิ่มค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK -increasing) เนื่องจากการทดสอบเป็นแบบควบคุมภาวะในการทดสอบ (Load control) ดังนั้นค่าพิสัยความเข้มของความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำการทดสอบจนกระทั่งอัตราการเติบโตของรอยร้าวเกินกว่า 10^{-3} มม.ต่อรอบ จึงหยุดการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 สภาวะในการสร้างรอยร้าวเริ่มต้น

ชนิดของวัสดุ	รูปแบบ ขั้นทดสอบ	ความถี่ (Hz)	ภาระเฉลี่ย (tons)	แอมพลิจูดภาระ (tons)
ASME SA-335	CT	20	2.00	0.70
Gr P22	3-Point Bending	10	2.40	0.70
AL 6063-T6	CT	20	0.70	0.30
	3-Point Bending	10	0.70	0.30

5.5 วิธีการเก็บข้อมูล

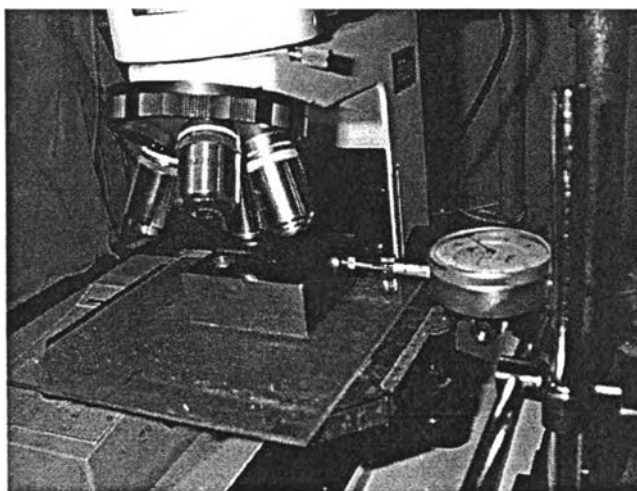
ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบ เพื่อนำไปใช้ในการหาคำนวนอัตราการเติบโตของรอยร้าว คือ

1. จำนวนรอบของภาระ (N)

จำนวนรอบของภาระที่กระทำต่อขั้นทดสอบนี้ สามารถอ่านได้โดยตรงจากหน้าจอแสดงผล ซึ่งมีหน่วยเป็นรอบ

2. ความยาวรอยร้าว (a)

ความยาวรอยร้าวที่เกิดขึ้นในชั้นทดสอบนั้น สามารถวัดได้ทั้งทางด้านซ้ายและขวาของชิ้นงาน โดยส่องผ่านกล้องไมโครสโคป แล้ววัดความยาวรอยร้าวทั้งสองข้างด้วยไดอัลเกจ จากนั้นจึงนำค่าความยาวรอยร้าวทางด้านซ้ายและขวามาหาค่าความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของชั้นทดสอบ ซึ่งลักษณะการวางชั้นทดสอบเพื่อวัดความยาวรอยร้าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การวางชั้นทดสอบบนกล้องไมโครสโคป

5.6 ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะแสดงผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของชั้นทดสอบที่ได้ทำการทดสอบในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK) กับอัตราการเติบโตของรอยร้าว (da/dN) โดยข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองได้แสดงในภาคผนวก ก ในรูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ภายใต้สภาวะที่มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 สำหรับชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT และแบบคานดัดสามจุดกดตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.12 และ 5.13 แสดงผลการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุ AL 6063-T6 ภายใต้สภาวะที่มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 สำหรับชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT และแบบคานดัดสามจุดกดตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาหาสมการแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวในรูปแบบของปารีส โดยการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดได้ดังนี้

สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22

-ชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT

$$\frac{da}{dN} = 2.070 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{2.601} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.976 \quad (5.1ก)$$

-ชั้นทดสอบมาตรฐานแบบคานัดัดสามจุดกด

$$\frac{da}{dN} = 5.624 \times 10^{-9} \cdot \Delta K^{2.987} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.990 \quad (5.1ข)$$

สำหรับวัสดุ AL 6063-T6

-ชั้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT

$$\frac{da}{dN} = 3.795 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{3.538} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.969 \quad (5.2ก)$$

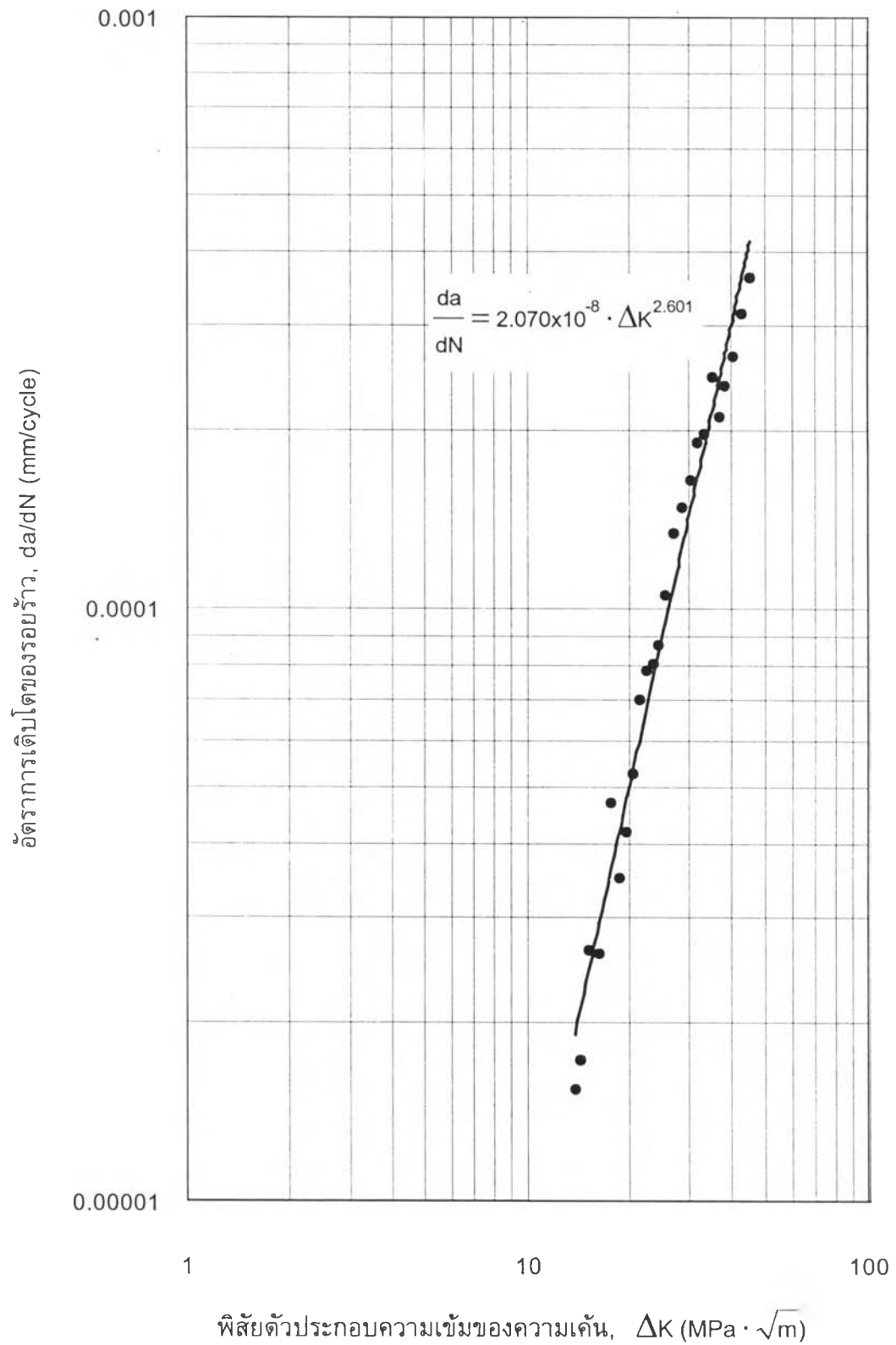
-ชั้นทดสอบมาตรฐานแบบคานัดัดสามจุดกด

$$\frac{da}{dN} = 4.916 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{3.438} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.958 \quad (5.2ข)$$

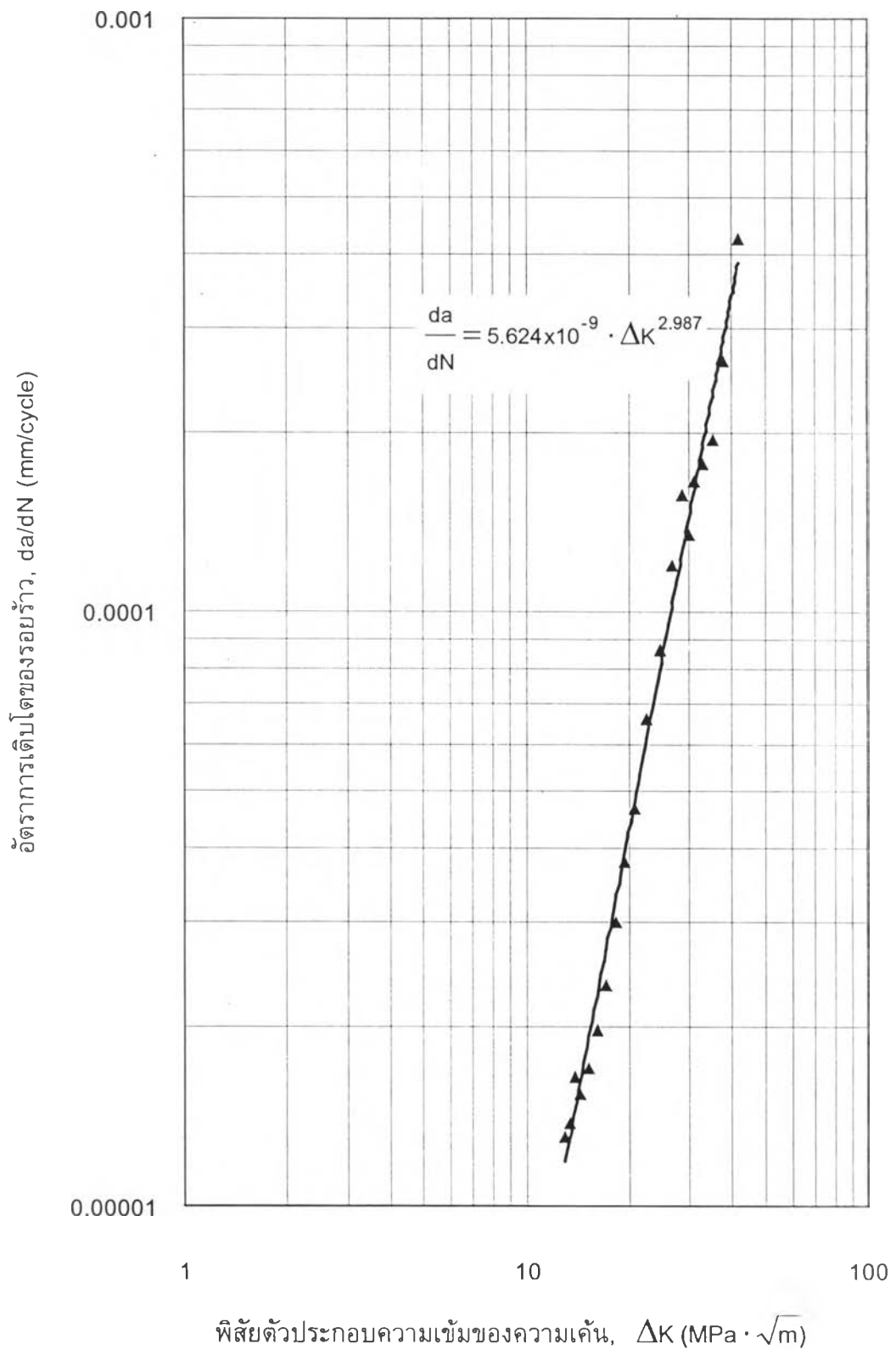
โดยที่ $\frac{da}{dN}$ แทนอัตราการเติบโตของรอยร้าว มีหน่วยเป็น mm/cycle

ΔK แทนพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น
มีหน่วยเป็น $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$

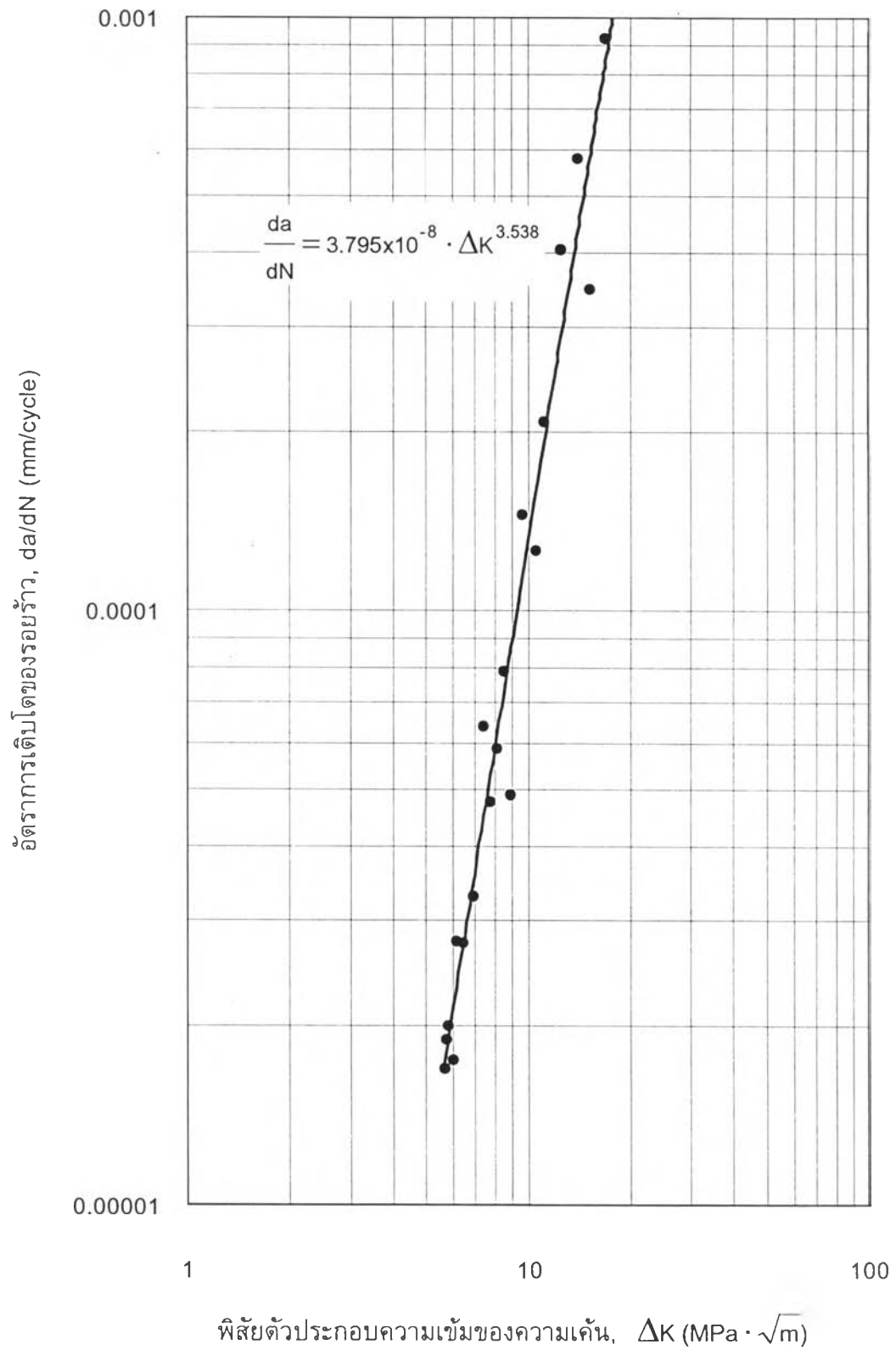
และ R^2 แทนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination)
จากการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด



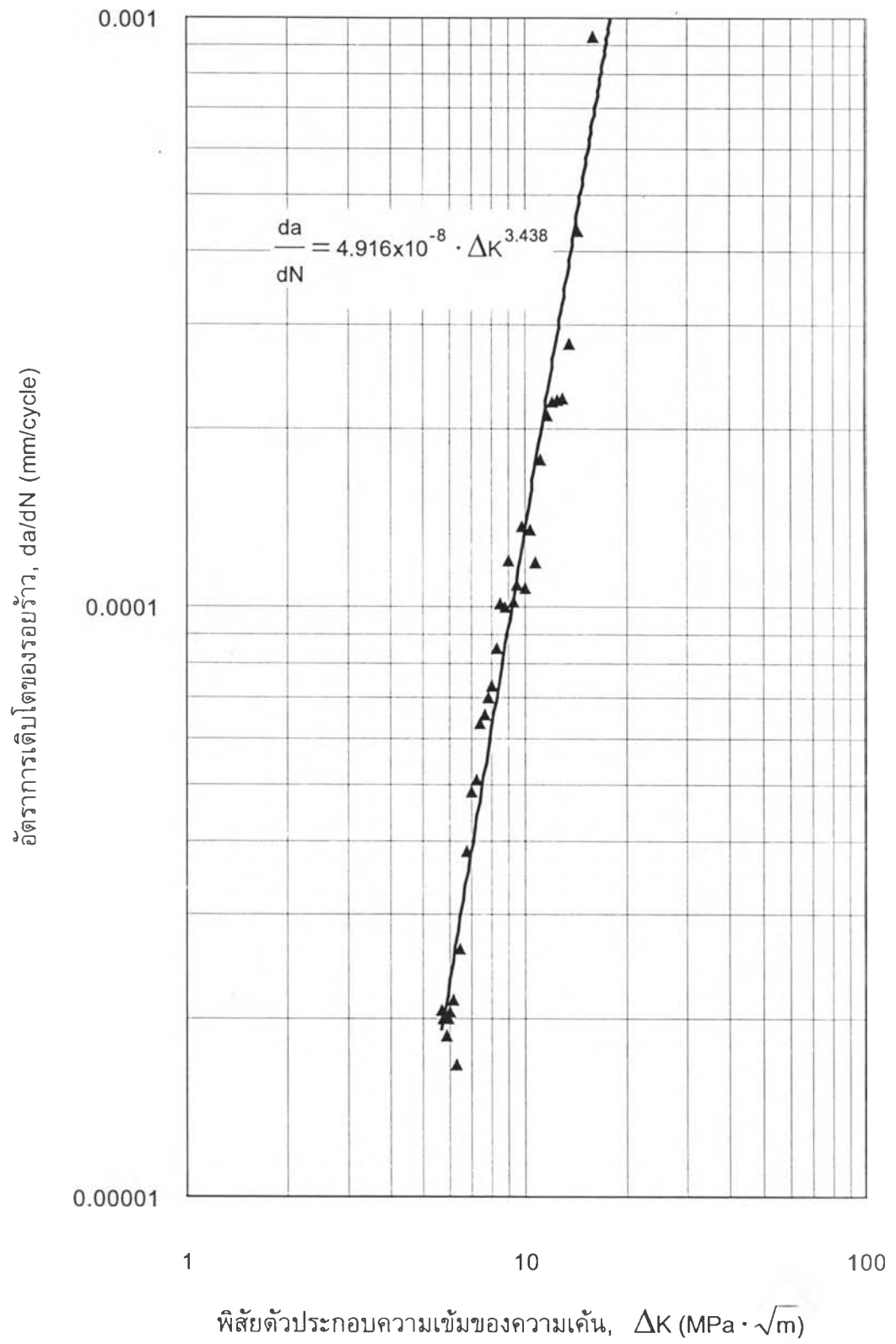
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชิ้นทดสอบแบบ CT ของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.200 ตัน (2.400 ± 0.800 ตัน)



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชิ้นทดสอบแบบคานัดัดสามจุดกุดของวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.467 ตัน (2.600 ± 0.867 ตัน)



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชิ้นทดสอบแบบ CT ของวัสดุ AL 6063-T6 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.333 ตัน (1.000 ± 0.333 ตัน)



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับชิ้นทดสอบแบบคานตัดสามจุดกดของวัสดุ AL 6063-T6 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.333 ตัน (1.000 ± 0.333 ตัน)

5.7 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับวัสดุแต่ละชนิดที่มีอัตราส่วนของภาระเท่ากับ 0.5 ในขั้นตอนทดสอบมาตรฐานแบบ CT และแบบคานตัดสามจุดกด ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วนภาระเท่ากันและลักษณะของภาระที่กระทำต่อรอยร้าวก่อให้เกิดภาระในรูปแบบที่ 1 เช่นเดียวกัน อัตราการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับรูปร่างของขั้นตอนทดสอบ โดยจากผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาหาสมการแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวในรูปแบบสมการของปารีส ซึ่งจากการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดจะได้สมการแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวดังนี้

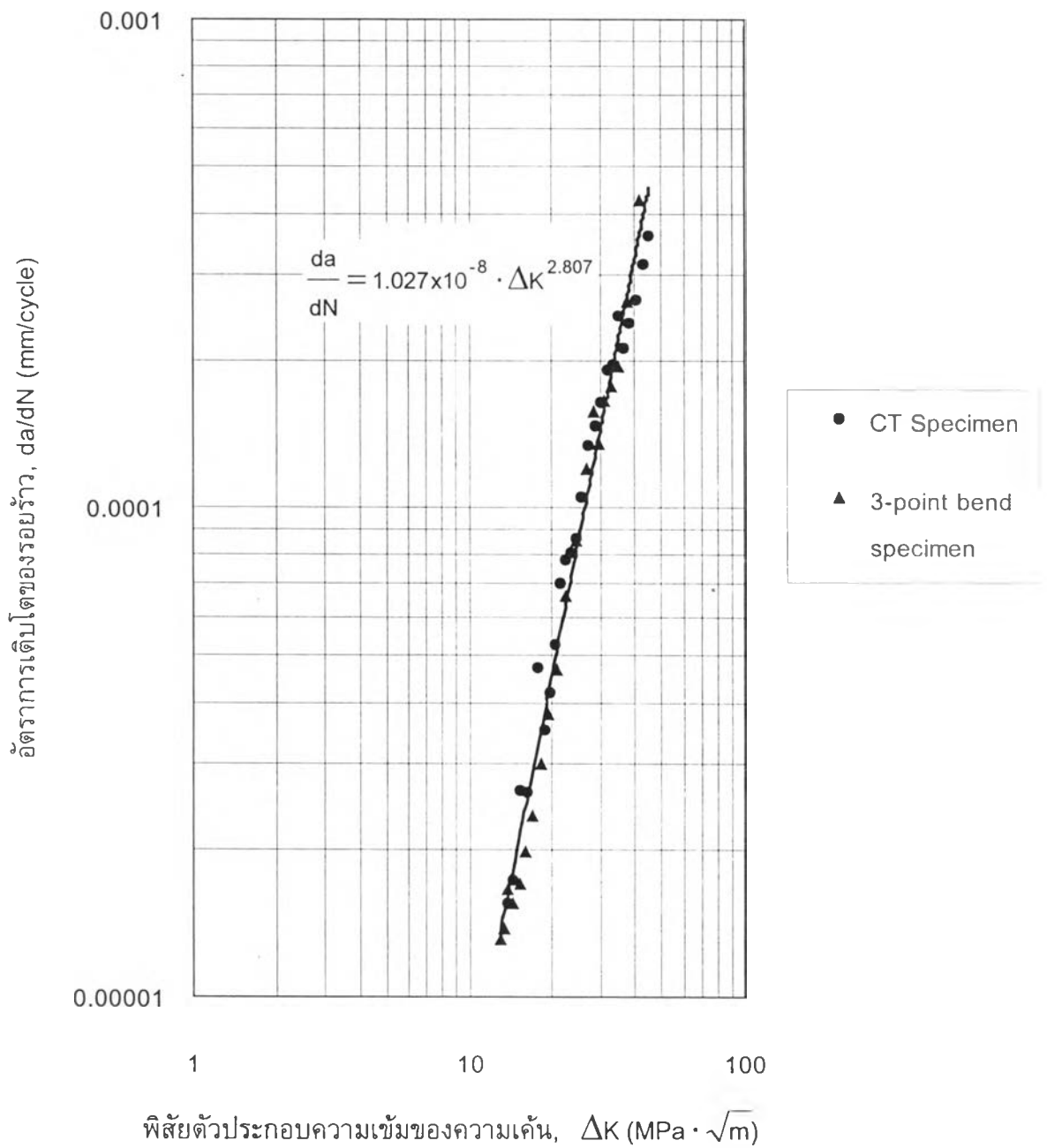
- สำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22

$$\frac{da}{dN} = 1.027 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{2.807} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.978 \quad (5.3)$$

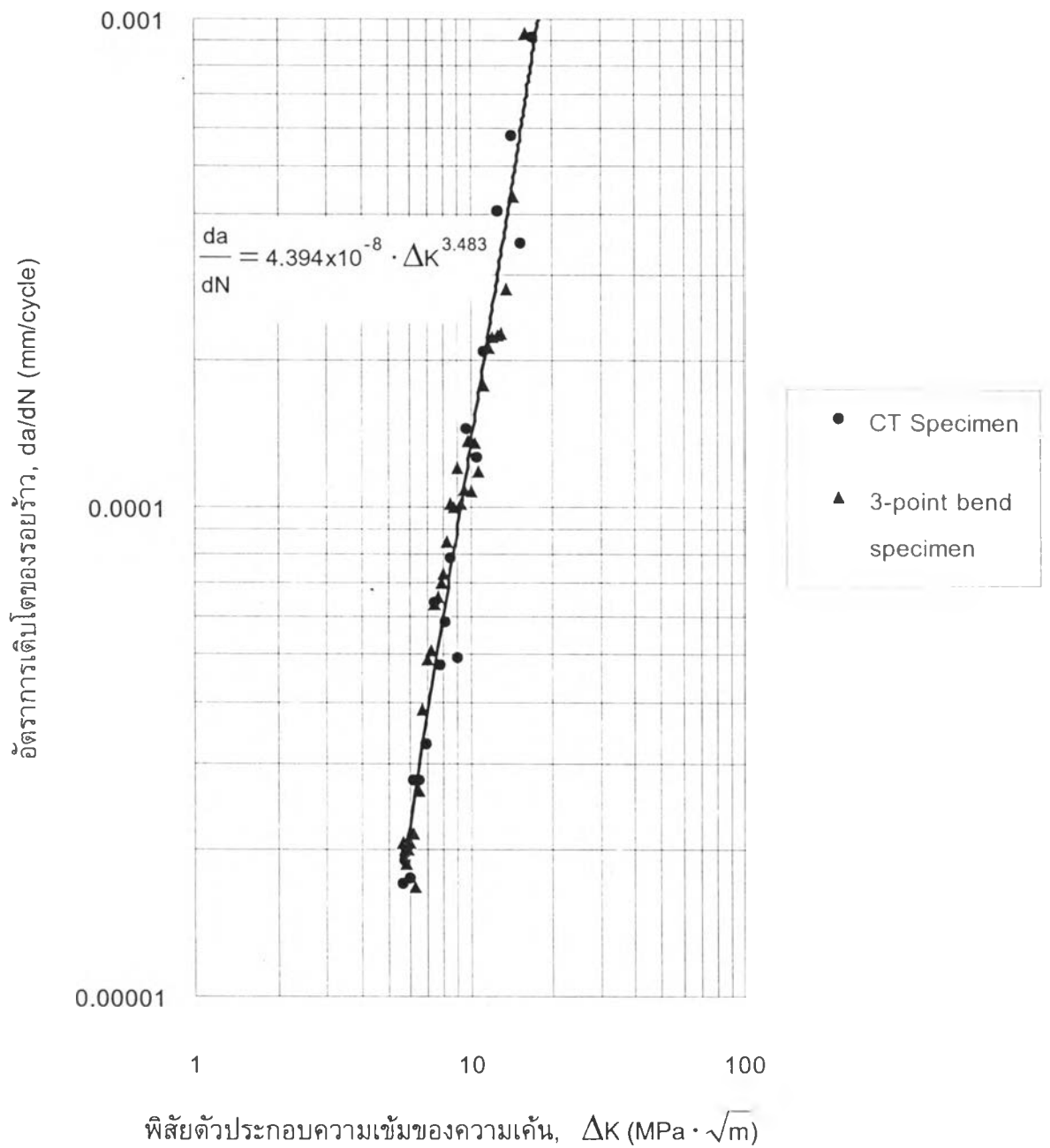
- สำหรับวัสดุ AL 6063-T6

$$\frac{da}{dN} = 4.394 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{3.483} \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.962 \quad (5.4)$$

โดยที่	$\frac{da}{dN}$	แทนอัตราการเติบโตของรอยร้าว มีหน่วยเป็น mm/cycle
	ΔK	แทนพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น มีหน่วยเป็น $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$
และ	R^2	แทนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) จากการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลของรูปร่างของชิ้นทดสอบที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับวัสดุ ASME SA-335 Gr P22 ที่มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงผลของรูปร่างของชั้นทดสอบที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับวัสดุ AL 6063-T6 ที่มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5