

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

การขยายตัวของรอยร้าวล้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการใช้งานวัสดุทางวิศวกรรมภายใต้ภาระวงรอบ เนื่องจากแต่ละการใช้งาน รอยร้าวขยายตัวที่อัตราแตกต่างกัน จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบเช่น อัตราส่วนความเค้น รูปทรงของชิ้นงาน ภาระที่กระทำ คุณสมบัติ เช่นเดียวกันกับอิพอกซีเรซินที่นำมาใช้งานทางวิศวกรรมภายใต้ภาระวงรอบ ส่งผลให้รอยร้าวมีการขยายตัวไปด้วยอัตราแตกต่างกัน และมีโอกาสเกิดการคืบ ดังนั้นความเข้าใจถึงผลกระทบของอัตราส่วนความเค้น และการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้สภาพผสมระหว่างการล้าและการคืบจึงมีความจำเป็นในการออกแบบ ผลิต และใช้งานอิพอกซีเรซินในทางวิศวกรรม

งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้นที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าของอิพอกซีเรซิน ในสภาพความเครียดระนาบ (plane strain) โดยในการศึกษานี้สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนดังนี้

1. การศึกษาสมบัติเชิงกล และความต้านทานการแตกหักจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. การศึกษาการคืบ
3. การศึกษาผลกระทบของค่าอัตราส่วนความเค้น (R) ที่มีผลต่อการขยายตัวของรอยร้าวล้า

ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ช่วยทั้งในการออกแบบ วิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่กำลังใช้งาน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานมากที่สุด

3.2 อีพอกซีเรซิน สมบัติเชิงกล และความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซิน

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ไทยอีพอกซี แอนด์ อัลลาลายด์ โปรดักส์ จำกัด โดยเป็นวัสดุที่ได้จากการผสมระหว่างเรซินประเภท DGEBA (diglycidyl ethers bisphenol-A) ชนิดความหนืดต่ำ กับสารที่ทำให้แข็งตัวประเภท aliphatic amine ผสมกันด้วยอัตราส่วนระหว่างเรซิน และสารทำแข็ง 100:35 โดยมวล หล่อเป็นแผ่นหนา 3 และ 10 มิลลิเมตร ขนาด 150X100 มิลลิเมตร ปล่อยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบในเตาอบ Binder ED 53 ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ขึ้นตอนต่าง ๆ ในการเตรียมชิ้นงานแสดงในภาคผนวก ก

จากมาตรฐาน ISO 527-1:Plastic-Determination of tensile properties (part1:general principles) ได้นิยามค่าของความเค้นคราก (yield stress) ของพลาสติก ว่าเป็นความเค้นแรกที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเค้นคงที่หรือลดลง แต่จากการศึกษาสมบัติทางกลอีพอกซีเรซินพบว่าความเค้นครากที่เหมาะสมควรใช้การเลื่อนตำแหน่งไปร้อยละ 0.2 ของความเครียด (0.2 percent offset) [23] สรุปได้ว่าการเลือกสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของอีพอกซีเรซินต้องพิจารณาจากนิยามของกลศาสตร์ของแข็ง อีพอกซีเรซินที่ใช้ในการศึกษามีสมบัติเชิงกลตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

สมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน [23]

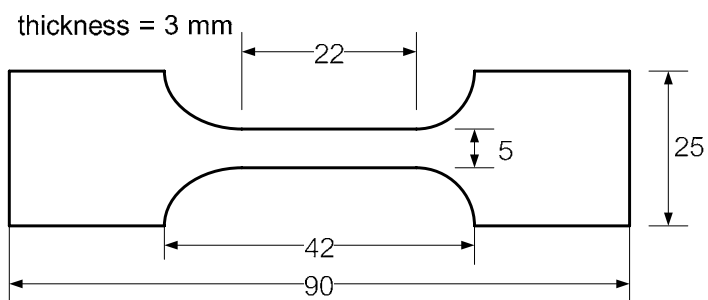
Glass transition temperature (°C)	85
Young's modulus (GPa)	3.8
Yield stress (MPa)	35
Tensile strength (MPa)	76

ความต้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ความหนา และอัตราภาระ ขึ้นทดสอบที่บางมีค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นวิกฤตสูง ขึ้นทดสอบที่หนามีค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นวิกฤตต่ำ ที่อัตราภาระต่ำค่าของแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักจะมีค่าสูง ในขณะที่อัตราภาระสูงแรงสูงสุดจะมีค่าต่ำ [23] เนื่องจากที่อัตราภาระสูงและขึ้นทดสอบหนา อิพอกซีเรซินจะอยู่ภายใต้สภาพความเครียดระนาบ และที่อัตราภาระต่ำและขึ้นทดสอบบาง อิพอกซีเรซินจะอยู่ภายใต้สภาพความเค้นระนาบ เพราะฉะนั้นความต้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซินจะพิจารณาจากค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นวิกฤตที่อัตราภาระสูงและความหนามาก ค่าความต้านทานการแตกหักของอิพอกซีเรซินมีค่าอยู่ที่ $0.99 \text{ MPam}^{1/2}$ [23]

3.3 การศึกษาการคืบ

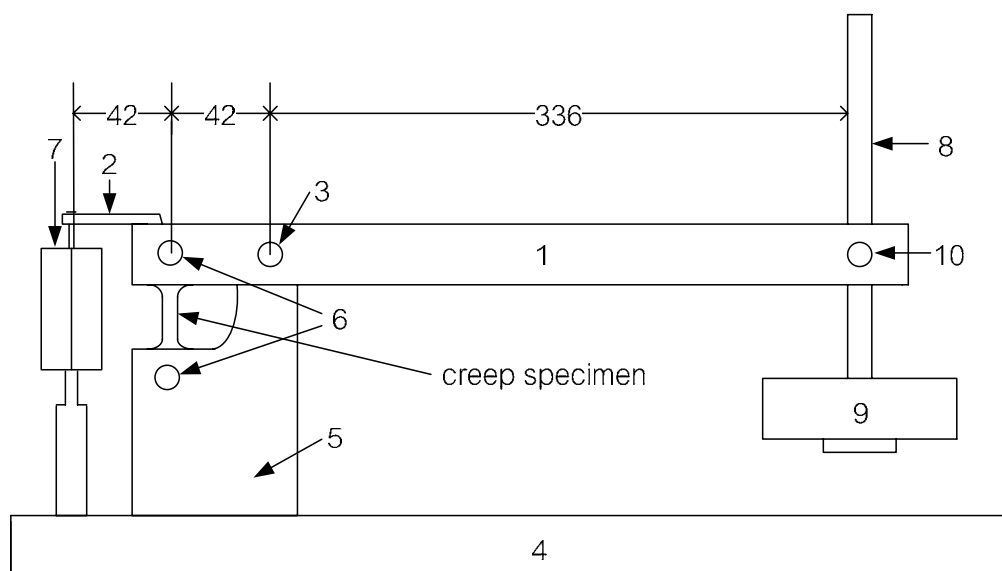
3.3.1 การทดสอบการคืบ

การศึกษาในส่วนนี้อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบการคืบ ASTM D 2990 – 93a Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics ศึกษาจากแผ่นอิพอกซีเรซินความหนา 3 มิลลิเมตร รูปทรงและขนาดเป็นตามภาพที่ 3.1 อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 638M-93 Standard test method for tensile properties of plastics และมีการปรับขนาดความยาวเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเครื่องทดสอบการคืบ การทดสอบทำกับ เครื่องทดสอบการคืบ SM 106 creep measurement apparatus ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบการคืบด้วยแรงดึงแบบคงที่ ทำงานโดยอาศัยหลักการของถ่วงน้ำหนักที่ปลายข้างหนึ่งของคานทำให้เกิดแรงดึงขึ้นกับขึ้นทดสอบที่อีกปลายด้านหนึ่งของคาน ดังแสดงในภาพที่ 3.2 รายละเอียดของตัวเครื่องตามหมายเลขอยู่ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3.1

ขั้นตอนทดสอบการคืบด้วยการรับแรงดึง

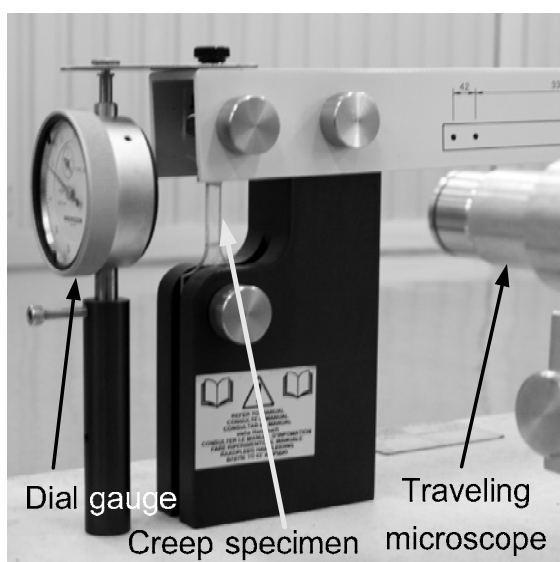


ภาพที่ 3.2

เครื่องทดสอบการคืบ (หน่วยมิลลิเมตร)

การทดสอบทำที่ อุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ระดับความเค้น 14 14.5 15 16 และ 17 MPa (ร้อยละ 70-85 ของความเค้นคราก) ระหว่างการทดสอบบันทึกค่าเวลา อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ และบันทึกค่าการยืดออกจากไมโครมิเตอร์ ค่าที่อ่านได้จากไมโครมิเตอร์ เป็นสองเท่าของการยืดออกของขั้นตอนทดสอบ (ตามอัตราส่วนความยาวของคานระหว่างหมายเลข 7 ถึงหมายเลข 3 กับ หมายเลข 6 ถึงหมายเลข 3) จึงต้องนำค่าจากไมโครมิเตอร์หารสองเพื่อหาค่าการยืดตัวจริงของขั้นตอนทดสอบ และนำมาแปลงเป็นการยืดตัวของบริเวณตรง

กลางซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด (gauge length) โดยอาศัยการติดแผ่นทองแดงสองแผ่นไว้ที่ริมสองด้านของบริเวณ gauge length จากนั้นใช้ traveling microscope วัดระยะห่างของแผ่นทองแดงทั้งสอง เมื่ออิพอกซีเรซินยึดตัวออกระยะห่างของแผ่นทองแดงจะเพิ่มขึ้นเท่ากับบริเวณที่ตรงกลางยึดตัวออก นำค่าที่วัดได้มาทำการเทียบเป็นอัตราส่วนกับค่าการยึดตัวของทั้งชิ้นทดสอบ นำมาหาค่าปรับแก้ (correction factor) เพื่อใช้แปลงทุกค่าที่บันทึกเป็นค่าการยึดตัวของบริเวณพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด เวลาที่ใช้ศึกษา 300 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอที่จะเห็นการคืบปฐุมภูมิและการคืบทุติยภูมิ ลักษณะการศึกษาการคืบเป็นไปตามภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3

การทดลองการคืบ

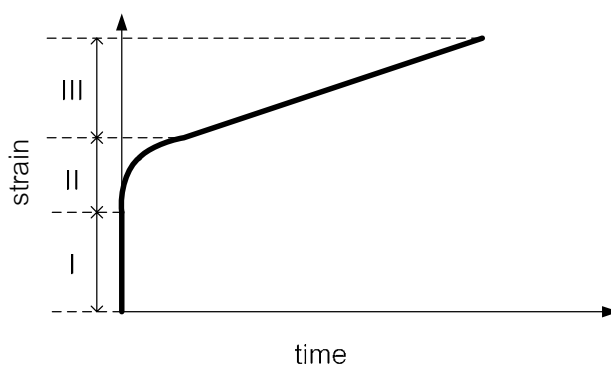
ผลการศึกษาที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (ε) กับเวลาที่แต่ละความเค้น (σ) โดยคำนวณความเค้นและความเครียด ในการคำนวณหาเลขชี้กำลังการคืบ ซึ่งจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดและความเค้นดังแสดงในสมการทั่วไปที่ (3.1) [32]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E} + A_1 \varepsilon^{-p} \sigma^{n_1(1+p)} + A \sigma^n \quad (3.1)$$

โดยที่

$\dot{\epsilon}$	คือ อัตราความเครียดต่อหน่วยเวลา
ϵ	คือ ความเครียด
σ	คือ ความเค้น
$\dot{\sigma}$	คือ อัตราความเค้นต่อหน่วยเวลา (MPa/H)
E	คือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young Modulus)
n_1	คือ เลขชี้กำลังการคืบปฐมภูมิ
n	คือ เลขชี้กำลังการคืบทุติยภูมิ
p	คือ กำลังของการเปลี่ยนแปลงความเครียด
A_1 และ A	คือ ค่าคงที่การคืบของวัสดุ
$\dot{\sigma}/E$	คือ พจน์การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบยืดหยุ่น
$A_1 \epsilon^{-p} \sigma^{n_1(1+p)}$	คือ พจน์การคืบปฐมภูมิ
$A \sigma^n$	คือ พจน์การคืบทุติยภูมิ

จากภาพที่ 3.4 สมการการคืบทั่วไปประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบยืดหยุ่น (elastic) (I) การคืบปฐมภูมิ (primary creep) (II) และการคืบทุติยภูมิ (secondary creep) (III) ดังนั้นเลขชี้กำลังการคืบจึงมีสองค่า คือเลขชี้กำลังการคืบปฐมภูมิ (primary creep exponent, n_1) และเลขชี้กำลังการคืบทุติยภูมิ (secondary creep exponent, n)



ภาพที่ 3.4

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา

3.3.2 การหาเลขชี้กำลังการคืบปฐุมภูมิ

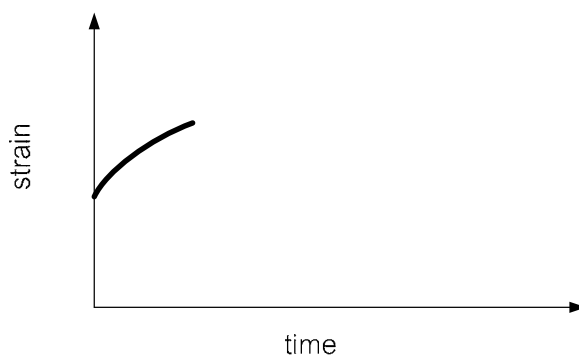
การหาเลขชี้กำลังการคืบปฐุมภูมิจำเป็นต้องทราบอัตราการคืบปฐุมภูมิก่อน อัตราการคืบปฐุมภูมิสามารถหาได้จากสมการ (3.2)

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (3.2)$$

โดยที่

$\Delta \epsilon$ คือ การคืบที่เพิ่มขึ้น ตามความสัมพันธ์ระหว่างการคืบปฐุมภูมิกับเวลาในภาพที่ 3.5

Δt คือ เวลาที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของความเครียด (ชั่วโมง)



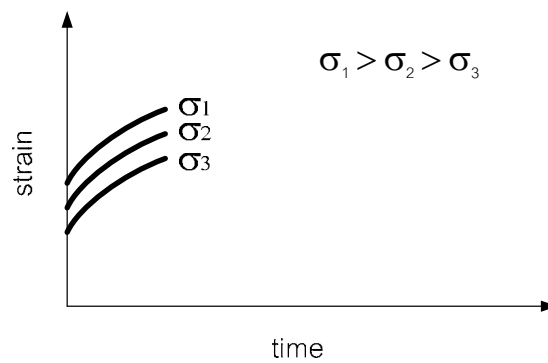
ภาพที่ 3.5

ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบปฐุมภูมิกับเวลา

จากสมการทั่วไปของการคืบที่ (3.1) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบปฐุมภูมิกับความเค้น แสดงได้ดังนี้

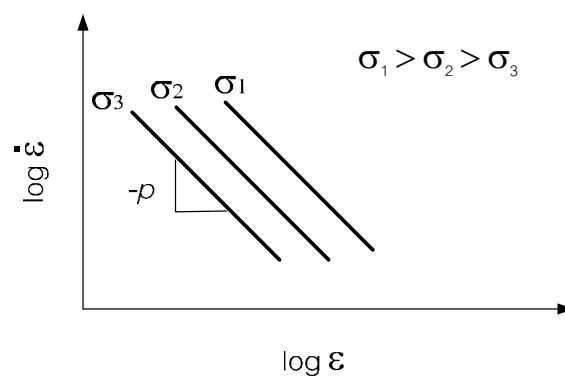
$$\dot{\epsilon} = A_1 \epsilon^{-p} \sigma^{n_1(1+p)} \quad (3.3)$$

โดยในแต่ละความเค้น ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบปฐุมภูมิกับเวลาแสดงในภาพที่



ภาพที่ 3.6

ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบปฐมภูมิกับเวลา



ภาพที่ 3.7

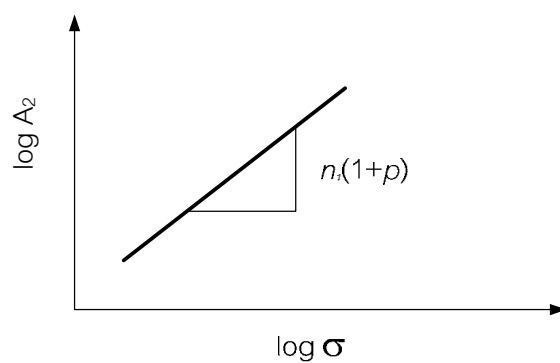
ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบปฐมภูมิและอัตราการคืบปฐมภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบในสมการที่ (3.2) กับการคืบปฐมภูมิ แสดงในภาพที่ 3.7 เป็นสเกลลอการิทึม ความสัมพันธ์ที่ได้เขียนในรูปเอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นสมการที่ (3.4)

$$\dot{\epsilon} = A_2 \epsilon^{-p} \quad (3.4)$$

โดยที่ $A_2 = A_1 \sigma^{n_1(1+p)}$ เมื่อเทียบกับสมการ (3.3)

นำค่าคงที่ A_2 ของสมการ (3.4) มาหาความสัมพันธ์กับความเค้นเป็นสมการ
เอ็กซ์โพเนนเชียลในสเกลลอการิทึม ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8

ความสัมพันธ์ระหว่าง A_2 และความเค้น

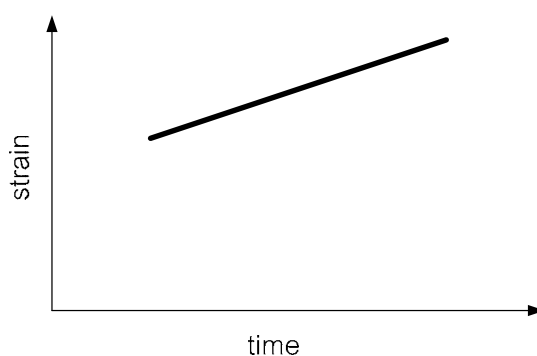
ความชันของกราฟถูกนำมาใช้หาเลขชี้กำลังการคืบปฐุมภูมิ โดยใช้ค่า p จากภาพที่
3.7 รายละเอียดการคำนวณหาเลขชี้กำลังการคืบปฐุมภูมิ อยู่ในภาคผนวก ข

3.3.3 การหาเลขชี้กำลังการคืบทุติยภูมิ

จากสมการทั่วไปของการคืบที่ (3.1) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบทุติยภูมิกับความเค้น แสดงได้ดังนี้

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (3.5)$$

อัตราการคืบในช่วงนี้มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดทุติยภูมิกับเวลาจึงเป็นเส้นตรงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9

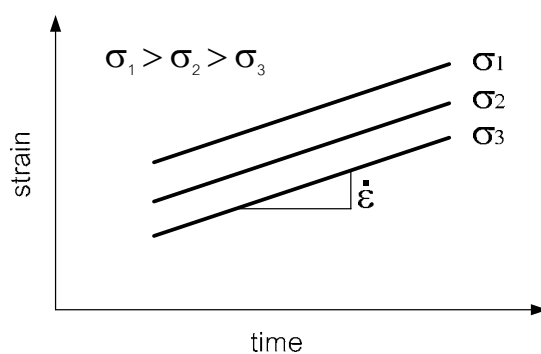
ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบทุติยภูมิกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบทุติยภูมิกับเวลาที่แต่ละความเค้น อยู่ในรูปสมการที่ (3.6)

$$\epsilon = \dot{\epsilon}t + b \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 จะได้อัตราการคืบทุติยภูมิ ที่แต่ละความเค้นดังแสดงในภาพที่

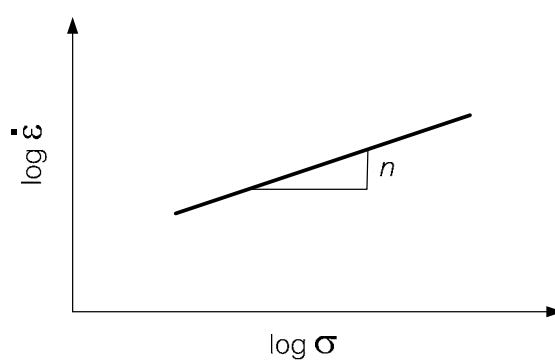
3.10



ภาพที่ 3.10

ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบทุติยภูมิกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการคืบทุติยภูมิกับความเค้น แสดงในภาพที่ 3.11 เป็น
 เกลกลอการที่ม



ภาพที่ 3.11

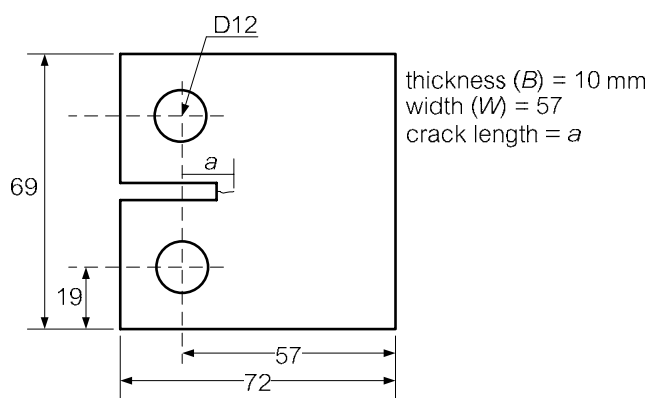
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบทุติยภูมิและความเค้น

จากภาพที่ 3.11 จะได้ความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามสมการที่ (3.5)
 เลขชี้กำลังของสมการที่ได้คือเลขชี้กำลังการคืบทุติยภูมิ รายละเอียดการหาเลขชี้กำลังการคืบ
 ทุติยภูมิอยู่ในภาคผนวก ข

3.4 การศึกษาอัตราการขยายตัวของรอยร้าว

3.4.1 การทดลองการขยายตัวของรอยร้าว

งานวิจัยนี้ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวของอิพอกซีเรซิน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E-647 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates โดยขึ้นทดสอบมีรูปทรงและขนาดตามภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12

ชิ้นทดสอบการดึงแบบ CT

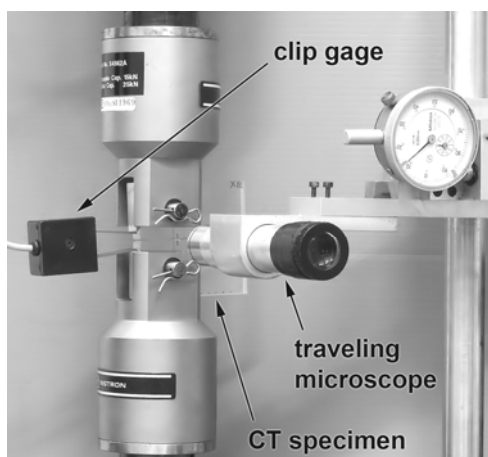
ชิ้นทดสอบเป็นแบบ compact tension (CT) ถูกตัดจากแผ่นอิพอกซีเรซินหนา 10 มม. การเจาะรูใช้ปากกาจับชิ้นอิพอกซีและรองด้วยแผ่นอะคริลิกก่อน โดยแผ่นอะคริลิกที่รองด้านล่างจะป้องกันไม่ให้เจาะทะลุแล้วรูบานออกเกินความกว้างที่ต้องการ เจาะอิพอกซีด้วยสว่านขนาดเล็กก่อนแล้วเพิ่มขนาดที่ต้องการ อุณหภูมิระหว่างการเจาะรูเฉลี่ยอยู่ที่ 30.5°C ไม่มีผลกระทบกับอิพอกซี ความเร็วของดอกสว่านในการเจาะครั้งสุดท้ายต่ำเพื่อป้องกันอุณหภูมิไม่ให้เพิ่มขึ้นและป้องกันความเสียหายที่รอบ ๆ รู จากการตรวจสอบไม่พบรอยร้าวที่บริเวณรอบของรูที่เจาะ การทดสอบทำที่อุณหภูมิห้อง ความขึ้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 อัตราส่วนความเค้น (R) เท่ากับ 0.1, 0.4, 0.7 และ 1.0 ลักษณะของการเป็นรูปไซน์ (sine waveform) ความถี่ 10 Hz รอยร้าวเริ่มต้น (precrack; a) ประกอบด้วยรอยบากจากเลื่อย (machine notch) และรอยบากจากใบมีด (razor notch) โดยควบคุมความยาวรวมของรอยร้าวเริ่มต้นอยู่ประมาณ $a/w = 0.2$ การทดสอบแรงดึงกระทำบนเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine (instron 8872 with 5 kN load cell) แสดงในภาพที่ 3.13 รายละเอียดของเครื่อง และการทำรอยร้าวเริ่มต้นอยู่ในภาคผนวก ค



ภาพที่ 3.13

เครื่อง servo-hydraulic fatigue machine

ระหว่างการทดสอบแรง ระยะขยับของ actuator และจำนวนรอบภาระจะถูกบันทึกค่าไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ระยะเปิดที่ปากของรอยร้าว (crack mount opening displacement) ถูกวัดด้วยคลิปเกจ ที่ติดตั้งที่ปากของรอยร้าวของชิ้นทดสอบ CT และใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง (load-line displacement) ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเปิดที่ปากของรอยร้าวกับการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง อยู่ในภาคผนวก 6 ความยาวของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น วัดด้วย traveling microscope ตามภาพที่ 3.14 จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก



ภาพที่ 3.14

การศึกษารายตัวของรอยร้าว

3.4.2 การคำนวณพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก

พารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหักที่นำมาคำนวณในการวิจัยนี้คือ ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น ค่าพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด และอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง สมการที่ใช้คำนวณมีดังนี้ (ตัวอย่างการคำนวณผลของพารามิเตอร์กลศาสตร์การแตกหัก แสดงในภาคผนวก จ)

การคำนวณพิสัยตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (ΔK) ใช้สมการ (3.7) [33]

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W}(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3.7)$$

$$\alpha = a/W$$

โดยที่

ΔP คือ ผลต่างของแรงดึงมากที่สุดกับน้อยที่สุด

การคำนวณพิสัยอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด (ΔJ) ใช้สมการ (3.8) [34]

$$\Delta J = \frac{2A(1+\beta)}{Bb(1+\beta^2)} \quad (3.8)$$

$$\beta = 2 \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{a}{b} \right) + 0.5 \right]^{1/2} - 2 \left[\left(\frac{a}{b} \right) + 0.5 \right]$$

โดยที่

A คือ พื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง (load-line displacement)

b คือ $W-a$

การคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง (C^*) ใช้สมการ (3.9) [32]

$$C^* = \frac{P_{max} \dot{V}_c}{BW} \left[\frac{n}{n+1} \left(\frac{2}{1+\alpha} + 0.522 \right) \right] \quad (3.9)$$

โดยที่

P_{max} คือ ค่าแรงดึงสูงสุดกรณีภาระวงรอบ และเป็นแรงดึงกรณีภาระสถิตย์

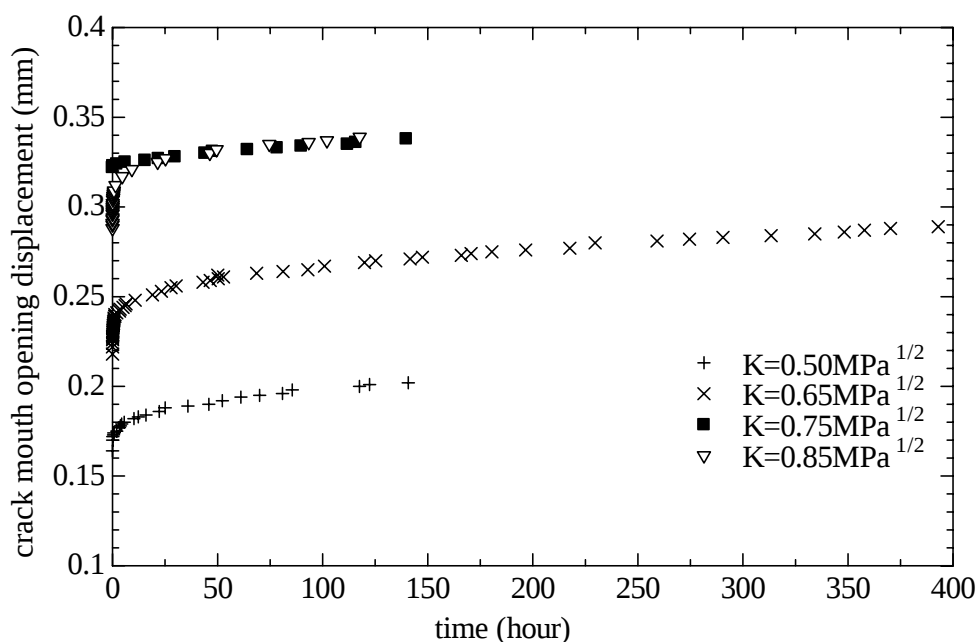
$\dot{V}_c$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรงต่อเวลา (load line displacement rate)

n คือ ค่าเลขชี้กำลังการคืบ (creep exponent) ในช่วงการคืบปฐมภูมิ ใช้ค่า n_1 และในช่วงการคืบทุติยภูมิ ใช้ค่า n

3.4.3 การทดลองการขยายตัวของรอยร้าวคืบ

การขยายตัวของรอยร้าวคืบ (creep crack growth; CCG) เป็นการทดลองที่อัตราส่วนความเค้นเป็น 1 การขยายตัวของรอยร้าวได้รับผลกระทบจากเวลาเท่านั้น การทดสอบกระทำที่ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น 0.5, 0.65, 0.75 และ 0.85 MPam^{1/2} โดยใช้ภาระดึงค้างไว้คงที่ด้วยเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine ที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 ในระหว่างการทดสอบ เก็บข้อมูลระยะเปิดที่ปากของรอยร้าวโดยใช้คลิปเกจ เก็บข้อมูลเวลาโดยนาฬิกา และเก็บข้อมูลการขยายตัวของรอยร้าวโดยใช้เทคนิคแผ่นฟิล์มสำเนา (replication technique) เพราะว่ารอยร้าวคืบมีการขยายตัวน้อยมาก ยากที่จะใช้การวัดโดยตรงได้

จึงใช้เทคนิค แผ่นฟิล์มสำเนา มาทำสำเนารอยร้าวคือปไว้เป็นระยะ (รายละเอียดของเทคนิค แผ่นฟิล์มสำเนาอยู่ในภาคผนวก ฉ) และนำมาถ่ายรูปเพื่อเปรียบเทียบความยาวของรอยร้าวที่ยาวขึ้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image pro express 5 วัดความยาวรอยร้าวจากรูปถ่าย เมื่อได้ความยาว รอยร้าวที่เพิ่มขึ้นแล้วนำไปคำนวณอัตราการขยายตัวของรอยร้าวคือ (da/dt) เวลาที่ใช้ในการ คำนวณอัตราการขยายตัวของรอยร้าวคือจะคิดเวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นรับภาระจนกระทั่งพบว่า รอยร้าวขยายตัวออกไป เพราะกลไกการขยายตัวของรอยร้าวจำเป็นจะต้องสะสมพลังงานเอาไว้ จนกระทั่งมากพอให้รอยร้าวขยายตัวออกไป จึงนำเวลาที่รอยร้าวสะสมพลังงานเอาไว้ทั้งหมดมา คิด การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลัง ใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง ซึ่งหา มาจากระยะเปิดที่ปากของรอยร้าวนำมาคำนวณเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะทางตามแนวแรง ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดที่ปากของรอยร้าวของการขยายตัวของรอยร้าวคือกับเวลาเวลา ที่ ระดับตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเปิดที่ปากของรอยร้าวและเวลา