

## บทที่ 2

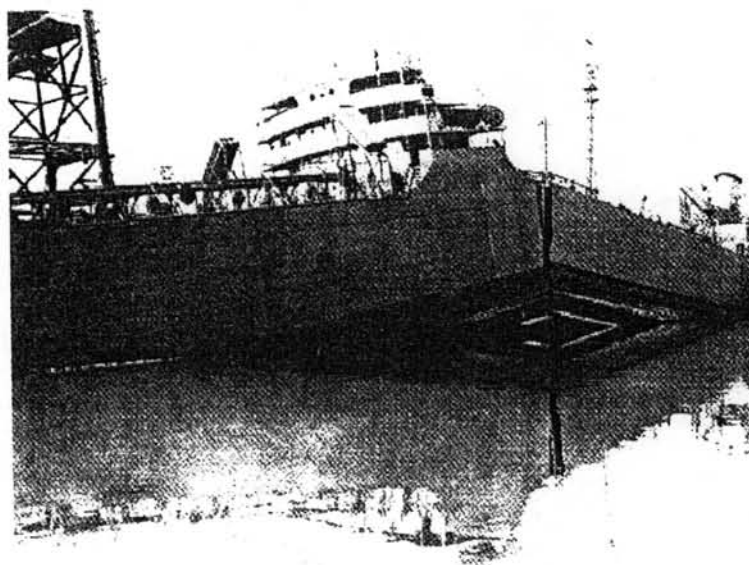
### การศึกษาเบื้องต้นด้านกลศาสตร์การแตกหัก

กลศาสตร์การแตกหักเป็นศาสตร์ที่ศึกษาถึงความแข็งแรงของวัสดุที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น และพฤติกรรมการเสียรูปที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในสภาวะของภาระกระทำที่เกิดแบบซ้ำไปซ้ำมา ซึ่งนับได้ว่าเป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของแข็งที่ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาเพื่อการใช้งานโดยเฉพาะและเพื่อตอบคำถามเบื้องต้นเหล่านี้อันประกอบด้วย

- ชิ้นส่วนกลตลอดจนโครงสร้างจะเกิดความเสียหายขึ้นเมื่อไหร่ เมื่อเริ่มปรากฏรอยร้าว
- ขนาดของรอยร้าวต้องยาวเท่าไรชิ้นส่วนกลและโครงสร้างจึงจะเกิดความเสียหาย
- ในเชิงของการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์และประเมินผลด้านความเสียหาย ควรเป็นช่วงใดเมื่อรอยร้าวมีการเติบโต

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันด้านการออกแบบเพื่อการใช้งานของชิ้นส่วนกล โครงสร้าง จะใช้หลักเกณฑ์การคราก (yield criteria) ในการออกแบบแต่เมื่อชิ้นส่วนกลถูกนำไปใช้งาน สักระยะหนึ่งพบว่ายังคงปรากฏความเสียหาย จากหลักการนี้เองเป็นเหตุผลให้เริ่มมีความสนใจในการพัฒนาหาคำตอบเพื่อแก้ปัญหาด้านกลศาสตร์การแตกหัก

โดยเริ่มตั้งแต่อดีต สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 (ปี 1943) เป็นเหตุการณ์เริ่มต้นของการเริ่มมีแนวความคิดเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักโดยความเสียหายเกิดขึ้นกับเรือบรรทุกสินค้าที่ชื่อ ลิเบอร์ตี (Liberty ship : SS Schenectady) ที่พัฒนาการก่อสร้างและประกอบลำเรือโดยการเชื่อม แทนการใช้หมุดตอกย้ำ การออกแบบโดยให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นให้มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นครากอย่างมากก็ยังคงเกิดความเสียหายขึ้นกับเรือ ซึ่งสาเหตุของความเสียหายมาจากการเกิดรอยร้าวที่โครงสร้างเรือทำให้ความแข็งแรงของตัวโครงสร้างเรือลดลง ประกอบกับภาระกระทำที่ก่อความเสียหายเป็นผลมาจากการกระแทกของระลอกคลื่นทะเลต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เรือเกิดการโก่งตัวขึ้นและแอ่นตัวลงถูกกระทำในลักษณะสภาวะเช่นนี้ ซ้ำไปซ้ำมา ทำให้โครงสร้างเรือเกิดความล้า อันเป็นผลจากโมเมนต์ดัดได้ห้องเรือจากการกระแทกของคลื่นจนเข้าสู่สภาวะของความเสียหายในลำดับต่อมา



รูปที่ 2.1 สภาพความเสียหายของ Liberty ship  
ที่เกิดรอยร้าวในโครงสร้างจนนำไปสู่ความเสียหาย

## 2.1 วิวัฒนาการด้านกลศาสตร์การแตกหัก

ด้วยเหตุการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้เองจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของกลศาสตร์การแตกหักโดยการนำของ Griffith [3] ได้นำเสนอแนวความคิดเห็นที่ว่า " การเติบโตของรอยร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานสุทธิลดลง " โดยการใช้ทฤษฎีของการดูดพลังงาน แต่อย่างไรก็ดีทฤษฎี Griffith สามารถใช้ได้กับวัสดุเปราะเท่านั้น หลังจากนั้น Irwin [4] ได้นิยามและปรับแต่งสมการของ Griffith เสียใหม่ให้สามารถใช้กับวัสดุเหนียวได้ สำหรับทฤษฎีของ Irwin ได้กำหนดปริมาณ อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเครียด (Strain energy release rate) ขึ้น โดยปริมาณดังกล่าว คือ พลังงานทั้งหมดที่ถูกใช้ไปในระหว่างที่ รอยร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยและที่หนึ่งหน่วยความหนา แม้ว่าปริมาณดังกล่าวจะมอง ภาพรวมในการขยายตัวรอยร้าวก็ตามแต่ก็มีความสัมพันธ์ที่แน่นชัดกับพารามิเตอร์ตัวประกอบ ความเข้มของความเค้น  $K$  (Stress intensity factor) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่ควบคุม พฤติกรรมของรอยร้าวโดยพารามิเตอร์นี้จะขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ ขนาดรอยร้าว และภาวะที่กระทำ เกณฑ์การแตกหักในเทอมของพารามิเตอร์  $K$  คือ วัสดุจะแตกหักเสียหาย เมื่อตัวประกอบความเข้มของความเค้น  $K$  (Stress intensity factor) มีค่าเท่ากับ  $K$  จักฤติ

## 2.2 ลำดับชั้นของความเสียหายเนื่องมาจากความล้า

ความเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือโครงสร้างภายใต้สภาวะความเค้นที่กระทำกลับไปกลับมา ซึ่งจะส่งผลให้ความทนทานของชิ้นงานกล โครงสร้าง ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดความเสียหายขึ้น โดยมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของวัสดุปัจจัยดังกล่าวได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ รูปทรงของวัสดุชิ้นงาน และลักษณะของความหนาแน่นของความเค้น (Stress concentration) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ลักษณะของผิวที่มีความขรุขระ สภาวะของความเค้นตกค้างภายใน (Residual stress) สภาวะแวดล้อม (Environment) จากสิ่งเหล่านี้เองได้มีการแบ่งการเกิดปรากฏการณ์เป็น 3 ช่วง โดย Suresh S. [5]

### 2.2.1 ช่วงที่ 1 การกำเนิดรอยร้าวเบื้องต้น (Crack initiation)

การพิจารณาวัสดุในระดับโครงสร้าง Microstructure ของเนื้อวัสดุทุกชนิดจะมีลักษณะเป็น Inhomogeneity อันเกิดจากสาเหตุหลายอย่าง เช่น โครงสร้าง grain ของ crystal ที่ประกอบในวัสดุที่เกิดจากการไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมที่ต่างกันเนื้อวัสดุ และอื่น ๆ นอกจากนี้ภายใต้ภาระกระทำซึ่งกระทำกลับไปกลับมาบนชิ้นงาน และเนื่องจากความเป็น Inhomogeneity ของวัสดุเอง ทำให้ลักษณะการกระจายของความเค้นภายในเนื้อวัสดุเกิดไม่สม่ำเสมอซึ่งบริเวณที่มีความเค้นสูงจะเป็นจุดเริ่มในการเกิดความเสียหายขึ้น รอยร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความล้ามักเกิดจากบริเวณที่ผิวของวัสดุ ชิ้นงาน หรือบริเวณส่วนที่อ่อนแอที่สุดของวัสดุชิ้นงานที่ได้รับภาระกระทำ ซึ่งก็มีบ้างที่รอยร้าวบางส่วนเกิดขึ้นจากรอยตำหนิ (defect) ภายในของเนื้อวัสดุเอง และโดยทั่วไปชิ้นส่วนในทางวิศวกรรมซึ่งทำจากวัสดุโลหะต่าง ๆ มักจะมีแหล่งกำเนิดของรอยร้าวเกิดขึ้นไม่มากนักน้อย ตัวอย่างเช่น รอยขีดข่วน ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะเป็นบริเวณส่วนที่อ่อนแอมากที่สุด เมื่ออยู่ภายใต้ภาระกระทำของสภาวะความเค้นที่สูงๆ หรือภายใต้ภาระกระทำที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ตัวอย่างเช่น สภาพสภาวะของการกัดกร่อนซึ่งจากข้อสมมุติฐานดังกล่าวนี้ สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics, LEFM)

### 2.2.2 ช่วงที่ 2 การเติบโตของรอยร้าว (Crack Growth)

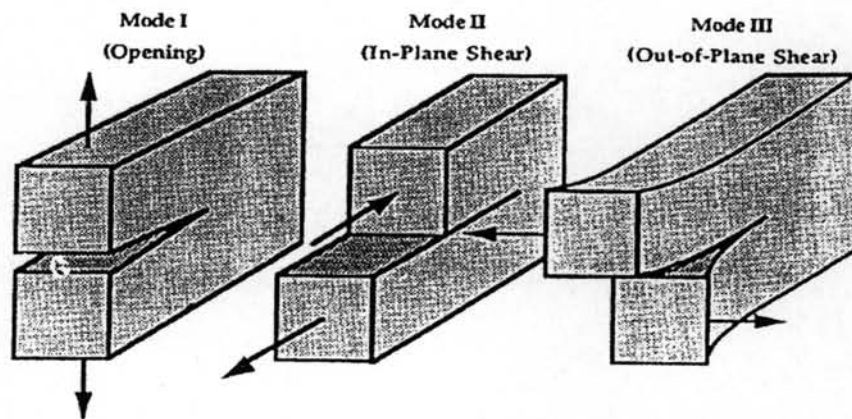
บริเวณจุดกำเนิดของรอยร้าวภายใต้ภาระกระทำจะทำให้เกิดการเติบโตของรอยร้าวขึ้น ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่จะสามารถทำการตรวจพบรอยร้าวได้เนื่องจากรอยร้าวมีการเติบโตแบบคงที่เนื่องจากความล้า และนับเป็นช่วงเวลาส่วนใหญ่ส่วนหนึ่งของอายุความล้า (Fatigue life) ของวัสดุ

### 2.2.3 ช่วงที่ 3 การแตกหัก (Fracture)

หลังจากรอยร้าวมีการเติบโตแบบคงที่ในระยะหนึ่งจนสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีระดับความเข้มของความเค้นที่สูงขึ้นและมีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานจะลดลงจนกระทั่งเมื่อชิ้นงานไม่สามารถจะรับภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ยังคงที่ตลอดเวลาได้ จนทำให้เกิดก็จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งการแตกหักในลักษณะเป็นแบบ Ductile fracture ซึ่งเกิด Plastic deformation ค่อนข้างสูง

### 2.3 ทิศทางของภาระกระทำต่อชิ้นวัสดุและลักษณะพื้นฐานรอยร้าวที่เกิดขึ้น

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น  $K$  (Stress intensity factor) ใช้แสดงความรุนแรงของภาระกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ณ บริเวณปลายรอยร้าวสามารถแบ่งได้ใน 3 ลักษณะตามทิศทางของภาระกระทำ (mode of loading)



รูปที่ 2.2 ลักษณะพื้นฐานของภาระกระทำ (mode of loading) ที่ทำให้เกิดความรุนแรงต่อรอยร้าวในลักษณะต่างกัน

### 2.3.1 รอยร้าวในลักษณะที่ 1 (mode I)

รูปแบบของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับตัวประกอบความเข้มของความเค้น,  $K_I$  (Stress intensity factor I) โดยมีลักษณะของรอยร้าวเป็นแบบเปิด (Opening mode) และมีลักษณะคือ ผิวหน้าของรอยร้าว (Crack faces) ทั้งสองข้างจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ภาวะกระทำต่อรอยร้าวแบบนี้ จะพบมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากความรุนแรงของภาวะกระทำ และมักจะนำไปสู่ความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างมากกว่าภาวะกระทำต่อรอยร้าวในแบบอื่น เป็นเหตุให้ภาวะกระทำต่อรอยร้าวในแบบนี้ 1 ถูกนำมาศึกษาวิจัยมากที่สุด

### 2.3.2 รอยร้าวในลักษณะที่ 2 (mode II)

รูปแบบของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับตัวประกอบความเข้มของความเค้น,  $K_{II}$  (Stress intensity factor II) โดยมีลักษณะของรอยร้าวเป็นแบบเฉือน (Sliding mode) และมีลักษณะของรอยร้าวที่ปรากฏ คือ ผิวหน้าของรอยร้าวทั้งสองจะไถลสัมผัสกันไปในทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าว

### 2.3.3 รอยร้าวในลักษณะที่ 3 (mode III)

รูปแบบของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับตัวประกอบความเข้มของความเค้น,  $K_{III}$  (Stress intensity factor III) โดยมีลักษณะของรอยร้าวเป็นแบบฉีก (Tearing mode) และมีลักษณะที่ผิวหน้าของรอยร้าวทั้งสองจะไถลสัมผัสกันไปในทิศทางขนานกับขอบหน้าของรอยร้าว

จากรูปแบบลักษณะพื้นฐานของภาวะกระทำทั้ง 3 รูปแบบ สามารถที่จะอธิบายลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้โดยทั่วไปอย่างเพียงพอ แม้ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นในความเป็นจริงในทางปฏิบัติจะเป็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแบบผสม (mixed mode) ระหว่างลักษณะพื้นฐานข้างต้น แต่ในทางกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นมักศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับรอยร้าวแบบที่ 1 เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีลักษณะที่รุนแรงและชัดเจนกว่าแบบอื่นนั่นเอง

## 2.4 พื้นฐานกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics, LEFM) ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการประยุกต์ทฤษฎีทางอิลาสติกซิตี กับวัตถุที่มีรอยร้าว หรือตำหนิ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นเท่านั้น แม้ว่ากลศาสตร์การแตกหักจะสามารถประยุกต์ใช้ในงานได้ในวงจำกัดก็ตามแต่ก็เป็นพื้นฐานสำคัญในการเรียนรู้ขั้นสูงต่อไป

### 2.4.1 ข้อสมมุติของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

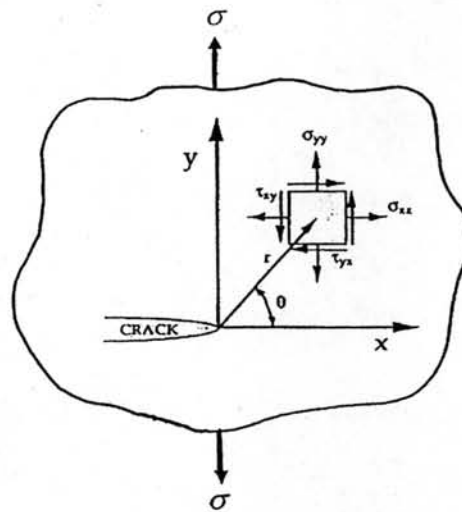
เนื่องจากกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นตั้งอยู่บนรากฐานของการประยุกต์ทฤษฎีทางอิลาสติกซิตี (Theory of elasticity) กับวัตถุที่มีรอยร้าว หรือตำหนิ ดังนั้นจึงมีข้อสมมุติต่างๆ เหมือนกับที่กล่าวในทฤษฎีทางอิลาสติกซิตีดังนี้

- มีระยะเคลื่อนตัวน้อย (Small displacement) ทำให้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น
- วัสดุมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสมบัติเหมือนในทุกๆ จุด (Homogeneous)
- วัสดุมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic)

### 2.4.2 การวิเคราะห์ความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว

การวิเคราะห์ความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวสามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน มีนักวิจัยหลายท่านได้ตีพิมพ์ผลเฉลยแม่นยำตรงของความเค้นในวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีรอยร้าวออกมา ได้แก่ Westergaard, Irwin, Sneddon และ Williams อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ปัญหาถูกจำกัดอยู่ที่วัตถุต้องมีขนาดใหญ่ (Infinite body) มีรูปร่างและเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่ซับซ้อน

หลักการคือ การพิจารณาตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณปลายรอยร้าวที่รัศมี  $r$  ใดๆ ในระบบพิกัด  $(r, \theta)$  และกำหนดให้เป็น element เล็กๆ ขนาดสี่เหลี่ยมใกล้กับปลายรอยร้าวเกิดสนามความเค้นโดยรอบบริเวณขอบทั้งสองด้านเนื่องจากภาระกระทำซึ่งประกอบด้วยความเค้น  $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx})$  โดยพิจารณาใน 2 มิติ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบพิกัดและสนามความเค้นที่ปลายรอยร้าวใน 2 มิติ

สนามความเค้นสำหรับวัตถุยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีรอยร้าวซึ่งได้รับความเค้น ( $\sigma$ ) กระทำที่ infinity สามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปคือ

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \dots (\text{other term}) \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้

$\sigma_{ij}$  คือ องค์ประกอบของความเค้น (Stress tensor)

$k$  คือ ตัวประกอบคงตัว

$f_{ij}$  คือ ฟังก์ชันไร้หน่วยของมุม  $\theta$

การพิจารณาองค์ประกอบของความเค้นจะพิจารณาเพียงเทอมแรกของอนุกรมอนันต์ในสมการที่ (2.1) ก็พอเพียงในการบ่งบอกสถานะของความเค้นในบริเวณใกล้ๆ ณ บริเวณปลายรอยร้าวได้ Suresh S. [5] ทั้งนี้เพราะเทอมอันดับสูงขึ้นไปเหลือจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ  $r$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และเรียกบริเวณที่เป็นเทอมแรกของสมการทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมสนามความเค้นดังกล่าวนี้ว่า "Singularity dominated zone" สำหรับขอบเขตของบริเวณดังกล่าวถูกจำกัดโดยความแตกต่างของผลเฉลยซึ่งได้จากการพิจารณาเฉพาะเทอมแรกกับผลเฉลยที่ได้จากการพิจารณาทุกๆ เทอมแตกต่างกันไม่เกิน 10%

สำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) ของภาวะกระทำในแบบที่ 1 ที่ปลายรอยร้าวโดยฟังก์ชันความเค้นของ Westergaard สามารถเขียนอยู่ในรูปของระบบสมการเมตริกที่บ่งบอกค่าความเค้นที่เกิดจากภาวะกระทำ

พิจารณาใน 2 มิติ คือ

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.2n)$$

โดยกำหนดให้วัสดุเป็นแผ่นบางมีความหนาไม่มาก

- กรณี *Plane stress* กำหนดให้ค่า  $\sigma_{zz} = 0$  (2.2ข)

- กรณี *Plane strain* กำหนดให้ค่า  $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$   
และให้  $\epsilon_{zz} = 0$  (2.2ค)

ดังนั้นสามารถที่จะหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) สำหรับภาวะที่ 1 ได้ดังนี้คือ

$$K_I = \lim_{\theta, r \rightarrow 0} (\sigma_{yy} \sqrt{2\pi r}) \quad (2.3)$$

#### 2.4.3 การหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) เพื่อประยุกต์ใช้กับการทดลอง (Experimental method)

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) จะมีค่าแตกต่างกันไปตามรูปร่างของชิ้นงาน ขนาดความยาวรอยร้าว และลักษณะของภาวะกระทำ วิธีการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) ดังกล่าวนี้อาจทำได้ในหลายวิธีการ เช่น

- วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method)
- วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)
- วิธีการทดลอง (Experimental method)

การหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก จึงมักเขียนสมการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K$ ) เสียใหม่ในรูปแบบ



ของตัวประกอบเรขาคณิตที่หาได้จากตารางในรูปที่ 2.4 ที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบและลักษณะของชิ้นงานทดสอบ

$$K_I = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.4)$$

โดยกำหนดค่า  $F$  คือ ตัวประกอบเรขาคณิตซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ในวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะแตกต่างกันไปตามรูปทรงของวัตถุ และหากนำมาพิจารณาโดยสัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานทดสอบ  $F$  จะมีค่าเท่ากับ  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  และขนาดรอยร้าวในกรณีที่วัตถุมีขนาดไม่จำกัด


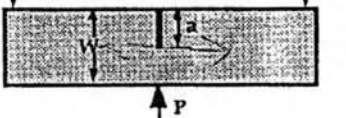
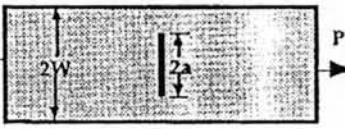
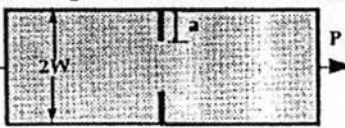
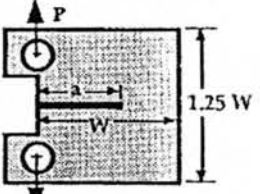
อย่างไรก็ดีในแง่ของวิธีการทดลอง (Experimental method) การกำหนดขนาดของภาระกระทำเพื่อหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) จะสะดวกกว่าในรูปแบบของการกำหนดขนาดของความเค้นที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบทำให้ความสัมพันธ์ที่ใช้เพื่อหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) จึงนิยมเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้ คือ

$$K_I = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.5)$$

โดยกำหนดค่าดังนี้

$P$	แทนค่า	ภาระกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ
$B$	แทนค่า	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
$f\left(\frac{a}{W}\right)$	แทนค่า	ตัวประกอบเรขาคณิตโดยสัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานทดสอบ
$W$	แทนค่า	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าว
$a$	แทนค่า	ความยาวรอยร้าว

จากสมการ (2.5) เพื่อให้สะดวกและสามารถนำไปหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) สำหรับภาระกระทำแบบที่ 1 ได้แสดงรูปแบบตัวประกอบเรขาคณิตที่อยู่ในรูปแบบ  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  ที่โดยสัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานทดสอบ Anderson T.L. [6] ดังรูปที่ 2.4

GEOMETRY	$f(a/W)^*$
<p>Single Edge Notched Tension (SENT)</p> 	$\frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[ 0.752 + 2.02 \left( \frac{a}{W} \right) + 0.37 \left( 1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right]$
<p>Single Edge Notched Bend (SENB)</p> 	$\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left( 1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[ 1.99 - \frac{a}{W} \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left( \frac{a}{W} \right) + 2.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right]$
<p>Center Cracked Tension (CCT)</p> 	$\sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec \frac{\pi a}{2W}} \left[ 1 - 0.025 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$
<p>Double Edge Notched Tension (DENT)</p> 	$\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \left[ 1.122 - 0.561 \left( \frac{a}{W} \right) - 0.205 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 0.471 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 0.190 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$
<p>Compact Specimen</p> 	$\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left( 1 - \frac{a}{W} \right)^{3/7}} \left[ 0.886 + 4.64 \left( \frac{a}{W} \right) - 13.32 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left( \frac{a}{W} \right)^3 - 5.60 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$

รูปที่ 2.4 ตัวประกอบเรขาคณิตที่อยู่ในรูปแบบ  $f\left(\frac{a}{W}\right)$

ที่สัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานทดสอบ

ดังนั้นรูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบในงานวิทยานิพนธ์ คือ ชิ้นงานทดสอบแบบ Compact-tension (CT specimen) และแสดงรายละเอียดของชิ้นงานมาตรฐาน (รูปที่ 2.6) ดังนั้นสำหรับความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $K_I$ ) ในชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E647-05 [2] นั้น คือ

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

.....(2.6)

#### 2.4.4 ความสัมพันธ์ของความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) ความเค้น และความยาวรอยร้าว

จากความสัมพันธ์ของความเค้นจะเห็นว่า Distribution ของความเค้นมีขนาดเปลี่ยนแปลงตาม  $K$  และ  $a$  เท่านั้น จากหลักการของ LEFM ความสัมพันธ์ได้แสดงถึงตัวแปรพื้นฐานและความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นและความยาวรอยร้าวในโครงสร้างหรือชิ้นงานซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการเกิดความเสียหาย (การแตกหัก)

##### 1. ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness, $K_{IC}$ ) ของวัสดุ

ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) ของวัสดุ หมายถึง ความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานที่มีรอยร้าวซึ่งในการพิจารณาตามหลักการของ LEFM จะทำการวิเคราะห์ความเสียหายและนิยามความต้านทานการแตกหักของวัสดุโดยใช้ Critical stress intensity factor ( $K_C$ )

$K_{IC}$  คือ Stress intensity factor ภายใต้สภาวะการทดสอบที่เป็น Plane strain

$K_C$  คือ Stress intensity factor ภายใต้สภาวะการทดสอบที่เป็น Plane stress

$K_{Id}$  คือ Stress intensity factor ภายใต้สภาวะการทดสอบที่เป็น Dynamic

##### 2. ขนาดความยาวรอยร้าว ( $a$ )

การแตกหักของวัสดุมักมีจุดเริ่มต้นซึ่งเกิดขึ้นในชิ้นงานจากความบกพร่อง Defect หรือความไม่ต่อเนื่องของวัสดุชิ้นงานที่ใช้งาน เช่น รอยร้าว รูพรุน ขนาดเล็กมากที่เกิดในรอย

เชื่อมความบกพร่องที่เกิดขึ้นในระดับ grain ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางกลล้วนเป็นต้นเหตุของรอยร้าวทั้งสิ้น

### 3. ระดับความเค้น ( $\sigma$ )

ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานก็เป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำให้เกิดความเสียหายสำหรับวัสดุที่มีความยาวรอยร้าวค่าหนึ่งชิ้นงานซึ่งตกอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าสูงจะมีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานซึ่งตกอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าสูงจะมีค่า Stress intensity factor ( $K$ ) เข้าใกล้ Critical fracture toughness ( $K_C$ ) มากกว่าชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นที่มีค่าต่ำกว่า ซึ่งในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ใช้งานภายใต้ความเค้นสูงต้องระมัดระวัง

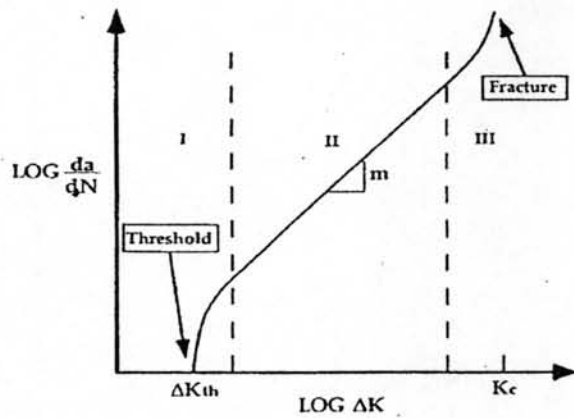
### 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า และพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

การอธิบายถึงพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุชนิดหนึ่งนั้นต้องอาศัยข้อมูลและผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจริง พิจารณาจากรูปที่ 2.5 (ข) ทั้งนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue crack growth rate,  $\frac{da}{dN}$ ) และพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor,  $\Delta K$ ) ซึ่งสำหรับวัสดุในแต่ละชนิดจะให้ผลที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป

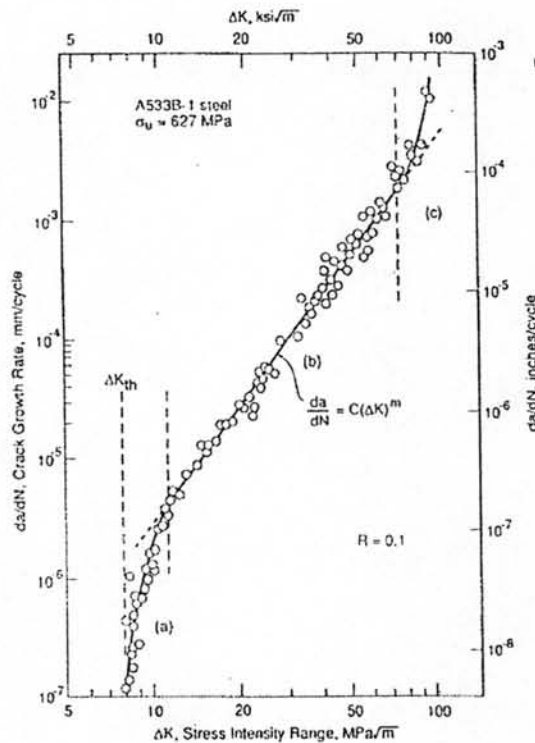
โดยทั่วไปเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเขียนเป็นกราฟบน log log สเกล

โดยเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{da}{dN}$  กับ  $\Delta K$  และแบ่งช่วงของเส้นกราฟเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกของการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจะเป็นไปอย่างช้า ๆ หรือไม่เกิดขึ้นเลย หรืออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจะเป็นแบบเดิน ๆ หยุด ๆ และพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) ในช่วงแรกจัดได้ว่าอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ จากนั้นอัตราการเติบโตของรอยร้าวจะเติบโตอย่างต่อเนื่องภายใต้ภาระกระทำที่คงที่ จนเข้าสู่ในช่วงที่สองของการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าและมีอัตราการเติบโตของรอยร้าวแบบสม่ำเสมอและพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) อยู่ในระดับกลาง จากนั้นอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจะเติบโตแบบรวดเร็วเข้าสู่ในช่วงที่สามซึ่งเป็นช่วงที่

อัตราการการเติบโตรอยร้าวไม่มีเสถียรภาพและมีพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) อยู่ในระดับที่สูงจัดเป็นช่วงที่วัสดุที่อยู่ภายใต้ภาระกระทำเกิดความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 2.5



ก )



ข )

รูปที่ 2.5 ก) ลักษณะทั่วไปของกราฟเส้นโค้งอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวใน 3 ช่วง  
 ข) กราฟ log-log scale แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้ากับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

เมื่อพิจารณาเส้นโค้งอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าดังรูปที่ 2.5 (ก) สามารถแบ่งเส้นโค้งของการเติบโตรอยร้าวได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

### 2.5.1 ช่วงที่ I เป็นช่วงบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า (Threshold regime)

เส้นโค้งอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าบริเวณใกล้ขีดเริ่มในช่วงที่ I เป็นช่วงที่เรียกว่า Threshold effects พารามิเตอร์ที่สำคัญในบริเวณช่วงนี้ก็คือ พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า ( $\Delta K_{th}$ ) การเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในบริเวณช่วงที่ 1 (threshold regime) อัตราการเติบโตของรอยร้าวจะมีค่าต่ำมากหรือรอยร้าวไม่เติบโตเลย (เมื่อ  $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ )

อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าหาได้จากการทำการทดลองผลของการทดสอบชิ้นวัสดุโดยทั่วไปอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้าในช่วงที่ 1 นี้ พบว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  จะพิจารณาอยู่ในช่วง  $10^{-8} \text{ mm./cycle}$  จนถึง  $10^{-6} \text{ mm./cycle}$  ซึ่งเป็นช่วงที่กำหนดจากมาตรฐาน ASTM E647-05 [2] ทั้งนี้ขึ้นกับ ชนิดของ material และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

พฤติกรรมของการเติบโตของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณช่วงที่ 1 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อัตราส่วนภาระ ( $R$ ) ความถี่ ( $f$ ) จำนวนรอบ ( $N$ ) ของภาระกระทำ หรือภายใต้สภาพสภาวะแวดล้อมที่กัดกร่อน จากที่กล่าวมานี้ปัจจัยของอัตราส่วนภาระ ( $R$ ) มีผลต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่เด่นชัดที่สุดกว่าปัจจัยอื่น ๆ โดยนิยามของอัตราส่วนภาระ ( $R$ ) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดต่อความเค้นสูงสุด

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (2.7)$$

### 2.5.2 ช่วงที่ II เป็นช่วงบริเวณรอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (Stable crack growth regime)

สำหรับในช่วงบริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่มีความสำคัญไม่น้อยกว่าในช่วงที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากอายุความล้าส่วนใหญ่จะตกอยู่ในบริเวณที่ 2 และเป็นช่วงที่อัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจากความล้ามีการเติบโตแบบคงที่และสม่ำเสมอ และในช่วงที่ 2 พบว่าอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  จะพิจารณาอยู่ในช่วง  $10^{-6} \text{ mm./cycle}$  จนถึง

$10^{-4} \text{ mm./cycle}$  และกราฟในช่วงนี้จะแสดงผลเป็นเส้นตรงด้วยเหตุนี้เองจึงมีนักวิจัยนำไปสร้างสมการสำหรับทำนายอายุความล้าภายใต้ภาวะกระทำที่คงที่

นักวิจัยที่มีแนวคิดเริ่มแรกคือ P.C. Paris ได้เป็นผู้ที่เสนอแนวความคิดเป็นคนแรก ในปี (1960) ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริง โดยเป็นช่วงที่คาดการณ์ถึงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าก่อนที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

สมการ P.C. Paris คือ

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.8)$$

โดยกำหนดให้	$C$	แทนค่า	ค่าคงที่
	$m$	แทนค่า	ความชัน (Slope) ในมาตราส่วน log
	$a$	แทนค่า	ความยาวรอยร้าว (Crack length)
	$N$	แทนค่า	จำนวนรอบของภาระกระทำ (Cycle)
	$K$	แทนค่า	ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor)

### 2.5.3 ช่วงที่ III เป็นช่วงบริเวณรอยร้าวเติบโตอย่างไม่มีเสถียรภาพ (Unstable crack growth)

ในบริเวณที่ 3 นี้ อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเกิดความเสียหายในที่สุด การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าในช่วงที่ 3 มักไม่ค่อยคำนึงถึงเพราะช่วงบริเวณดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่เกิดความเสียหายแบบฉับพลัน และพฤติกรรมอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าบริเวณนี้จะขึ้นกับอัตราส่วนภาระ ( $R$ ) อย่างมากแต่จะไม่ขึ้นกับลักษณะของสภาพแวดล้อม (Environment) มากนัก โดยที่อายุความล้าในช่วงนี้จะมีระยะเวลาที่สั้นมากงานในทางวิศวกรรมจึงมักไม่ค่อยให้ความสนใจต่อพฤติกรรมในช่วงบริเวณดังกล่าวนี้มากนัก

## 2.6 วิธีการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า

วิธีการทดสอบ ขั้นตอน และวิธีการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าอยู่ภายใต้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E647-05[2] วิธีการทดสอบครอบคลุมถึงวิธีการหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าจากบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า  $\Delta K = \Delta K_{th}$  ไปจนถึง  $\Delta K = \Delta K_{max}$  ในช่วงที่ 1 บนเส้นโค้งอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า และระบุถึงคุณลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ใช้สำหรับการทดสอบมี 2 แบบ คือ Compact-tension (CT) และ Middle-tension (MT) มาตรฐานของการทดสอบไม่จำกัดชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการดำเนินการทดสอบจะเป็นวัสดุชนิดใดก็ได้

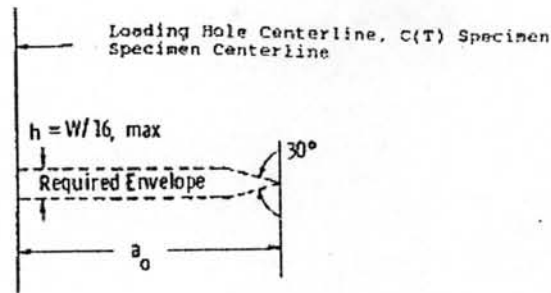
ดังนั้นรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยจะมุ่งเน้นในแบบแรกเท่านั้น คือ แบบ Compact-tension (CT) โดยจะกล่าวถึง ข้อกำหนด และการแนะนำขนาด ชิ้นงานทดสอบ สลักยึดชิ้นงานทดสอบ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการดำเนินการทดสอบ

### 2.6.1 การเตรียมขนาดชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมรูปแบบและขนาดชิ้นงานทดสอบแบบ Compact-tension (CT) ภายใต้มาตรฐาน ASTM E647-05[2] แสดงในรูปที่ 2.6 มีรายละเอียดโดยระบุคุณลักษณะของชิ้นงานทดสอบ โดยหลักจะพิจารณาค่าขนาดในมิติอื่นๆ จากขนาดของรูร้อยสลักที่ขึ้นกับค่าของ  $W$  โดยที่ค่า  $W$  คือ ความยาวของพื้นที่ที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าวโดยวัดจากกึ่งกลางของรูเจาะร้อยสลักไปจนถึงอีกด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบ







รูปที่ 2.7 ขนาดมาตรฐานของรอยบากกล

3. ขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบ ( $B$ ) ให้อยู่ในช่วงความหนาที่  $\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4}$  และนอกจากนี้ยังยอมให้ความหนาของชิ้นงานทดสอบมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นไปจนถึง  $\frac{W}{2}$  ได้
4. หากภายหลังจากการสร้างรอยร้าวเริ่มต้นแล้วขนาดของความยาวที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าว (Specimen's uncracked ligament) จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$W - a \geq \left( \frac{4}{\pi} \right) \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.9)$$

โดยกำหนดให้

$(W - a)$  เท่ากับ ความยาวของพื้นที่ที่ยังไม่ปรากฏรอยร้าวทั้งนี้นับจากบริเวณปลายรอยร้าวที่เกิดจากการสร้างรอยร้าวล่า (pre-crack) ไปจนถึงอีกขอบด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบโดยพิจารณาได้จากรูปที่ (2.6)

$K_{\max}$  เท่ากับ ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสูงสุด

$\Delta K$  เท่ากับ พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น

$R$  เท่ากับ อัตราส่วนภาระ

$\sigma_{YS}$  เท่ากับ ความเค้นต้านแรงดึงคราก (yield stress)

ในส่วนของการหาความเค้นต้านแรงดึงครากที่จุดยิลด์สเตรส (yield stress) สามารถทำได้โดย วิธี 0.20 % ออฟเซตยิลด์สเตรส (0.20 % offset yield stress)

วิธีการหาจุดยิลด์สเตรส(yield stress) คือ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทำการลากเส้นตรงขนานกับเส้นตรงในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นที่ความเครียด (strain) ประมาณ 0.20 % ซึ่งแล้วแต่คุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดไปตัดกับเส้นกราฟความเค้นและความเครียดที่จุดใดนั้นถือเป็นจุดยิลด์สเตรส (yield stress)

## 2.6.2 วิธีการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

ขั้นตอนในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวของชิ้นงานทดสอบสามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการในการดำเนินการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ โดยดำเนินการแบบต่อเนื่องโดยไม่หยุดพักเครื่องทดสอบมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรก คือ เริ่มกระบวนการสร้างรอยร้าวล้าก่อนหน้า (pre-crack) ซึ่งในขั้นตอนนี้กระทำต่อจากบริเวณปลายรอยบากกลที่ท่ามุม 30 องศา ให้มีความยาวของรอยร้าวต่ำสุดมีขนาดเท่ากับ  $0.1B$  หรือขนาด  $h$  ทั้งนี้เพื่อทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างรอยบากกลนั้นถูกขจัดให้หมดไป สำหรับการลดภาระในขั้นตอนแรกนี้ การลดภาระโหลดต้องไม่สูงเกิน 20% ของภาระโหลดก่อนหน้า

ขั้นตอนที่สอง คือ ดำเนินการต่อจากขั้นตอนแรก ทำการทดสอบภายใต้แนวทางที่กำหนดของการทดสอบแบบลด  $K$ -decreasing หรือ Step down load method เป็นวิธีการลดภาระโหลดทำให้พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) มีค่าลดลงเนื่องจากรอยร้าวมีขนาดยาวขึ้น ทำการลดภาระลงมาเรื่อยๆ ครั้งละไม่เกิน 10 % จนกระทั่งอัตราการเติบโตของรอยร้าวลดน้อยลงจนอยู่ในช่วง  $10^{-8} \text{ mm./cycle}$  จึงยุติการทดสอบ ขั้นตอนดังกล่าวนี้เป็นขั้นตอนที่ทำต่อเนื่องจากขั้นตอนแรก มีรายละเอียดดังนี้ โดยในขณะที่ทำการทดสอบภาระโหลดและอัตราส่วนภาระคงที่ทุกช่วงที่  $P_{\max}$  ลดลงแบบ Step down load โดยการกำหนดให้ผลต่างของความยาวรอยร้าวคงที่ทุกช่วง ( $\Delta a$ ) 0.25 mm. แต่ไม่เกิน 1.00 mm. ) โดยขณะทำการทดสอบนั้นต้องทำการเก็บข้อมูลค่า  $P_{\max}$  และค่า  $P_{\min}$  ที่ทำการลดภาระโหลดลงมาในแต่ละช่วงของการทดสอบ ในขั้นตอนของการลดภาระโหลด  $P_{\max}$  ลงมาในแต่ละช่วงที่ผลต่างของความยาวรอยร้าวคงที่ ( $\Delta a$ ) การลดภาระโหลดลงมาในแต่ละช่วงต้องไม่สูงเกิน 10% ของภาระโหลดก่อนหน้าตลอดจนข้อมูลจำนวนรอบของภาระโหลดที่กระทำ และความยาวรอยร้าวที่ปรากฏอยู่ที่ด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานทดสอบในแต่ละช่วงโดยนำไปหาค่าเฉลี่ยและนำไปประมวลผลและแสดงผลการทดลองออกมาเป็นกราฟ log log สเกล ในลำดับต่อไป

### 2.6.3 ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการทดสอบ

1. ขนาดความยาวของรอยร้าวก่อนหน้า (pre-crack) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.1B$  หรือเท่ากับ  $h$

2. การสร้างรอยร้าวก่อนหน้าที่ยอมให้มีการเริ่มต้นการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าที่ต่อจากปลายรอยบากกล (Machined notch) ในช่วงต้นของการเติบโตรอยร้าวโดยใช้ภาระโหลดที่ค่าสูงๆ ได้ แต่ต้องทำการลดขนาดภาระลงจนกว่าค่า  $P_{max}$  สุดท้ายในช่วงของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าไม่มากกว่า  $P_{max}$  ในตอนเริ่มต้นทำการทดสอบ การลดขนาดภาระต้องไม่สูงเกินกว่า 20 % ของภาระก่อนหน้าในแต่ละครั้งที่รอยร้าวขยายตัวทั้งนี้เพื่อป้องกันการหยุดการเติบโตของรอยร้าว

3. การวัดความยาวรอยร้าว (Crack length) ที่บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานทดสอบต้องมีการเติบโตรอยร้าวไม่ต่ำกว่า  $0.002W$  และในขั้นตอนการตรวจวัดความยาวรอยร้าวต้องกระทำในแนวระนาบสมมาตรเท่านั้น แต่สำหรับชิ้นงานทดสอบที่ค่า  $W > 127$  มม. การวัดความยาวต้องไม่ต่ำกว่า 0.25 มม.

ถ้าหากในกรณีที่มีการตรวจวัดความยาวรอยร้าวที่บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานทดสอบมีความแตกต่างกันของความยาวรอยร้าวเกิน  $0.25B$  มาตรฐานจะถือว่าข้อมูลที่ได้นั้นไม่ถูกต้อง (invalid) ทั้งในขณะที่ทำการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าและขณะทำการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว

4. การปรับระดับของภาระโหลด (Load level) และความถี่ที่ใช้งาน สามารถส่งผลต่อการเติบโตของรอยร้าวทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเกิดการแกว่งตัวได้ ดังนั้นการที่มีการเพื่อให้รอยร้าวได้มีการเติบโตหรือขยายตัวได้เพียงพอก่อนที่จะเข้าสู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดจะเป็นแนวทางหนึ่งทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้

สำหรับการแกว่งตัวของอัตราการเติบโตของรอยร้าวสามารถที่จะเกิดขึ้นได้และจะหายไป ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาการทดสอบที่ใช้ในขั้นตอนของการทดสอบ และถ้าหากในช่วงเวลาการทดสอบเกิดการหยุดชะงักของการกระทำของภาระโหลดไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ก็ตามจะถือว่าข้อมูลที่ได้มาในช่วงระยะเวลาการทดสอบดังกล่าวใช้ไม่ได้ (invalid)

5. การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว แบบการทดสอบแบบลด  $K$  ( $K$ -decreasing) ในขั้นตอนของวิธีการดังกล่าวนี้จะเริ่มต้นที่ระดับค่าของภาระไหลดที่มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า ณ ภาระไหลดสูงสุดที่กระทำในช่วงต่อจากการสร้างรอยร้าวล้ำก่อนหน้าซึ่งจะต้องเริ่มทำการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกันของความยาวรอยร้าวในทุกช่วงที่ทำการลดระดับค่าภาระไหลด ซึ่งกระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกระทั่งพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) มีค่าต่ำสุด

นอกจากในช่วงการทดสอบแบบลด ( $K$ -decreasing) ถูกกำหนดให้มีการลดภาระที่ต้องไม่สูงเกินกว่า 10 % และเป็นลักษณะของการลดลงของภาระไหลดแบบ Shedding load มีวิธีการดังนี้ คือ ภายหลังจากที่ทำการปรับภาระลงมาแล้วปล่อยให้ภาระกระทำกับชิ้นเหล็กกล้าทดสอบคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งจนรอยร้าวเติบโตภายใต้ข้อกำหนด จากนั้นทำการปรับภาระลงมาอีกระดับหนึ่งกระทำในลักษณะเช่นนี้อย่างต่อเนื่องเรียกวิธีการดังกล่าวนี้ว่า Shedding load ในขั้นตอนนี้สามารถที่จะทำการตอบตรวจสอบการลดลงของภาระไหลด  $P_{\max}$  ได้จากสมการดังนี้

$$(P_{\max 1} - P_{\max 2}) / P_{\max 1} \leq 0.02 \quad (2.10)$$

โดยกำหนด  $P_{\max 1}$  เท่ากับ ค่าภาระไหลดสูงสุดของภาระก่อนหน้า

$P_{\max 2}$  เท่ากับ ค่าภาระไหลดสูงสุดที่ทำการลดลงต่อจากค่าภาระไหลดสูงสุดของภาระก่อนหน้า

6. ผลต่างความยาวรอยร้าว ( $\Delta a$ ) โดยเลือกใช้รูปที่กำหนดแบบ Compact-tension (CT specimen) ที่มาตรฐานกำหนดไว้มีดังนี้

$$\Delta a \leq 0.04W \quad \text{สำหรับ} \quad 0.25 \leq \frac{a}{W} \leq 0.40 \quad (2.11ก)$$

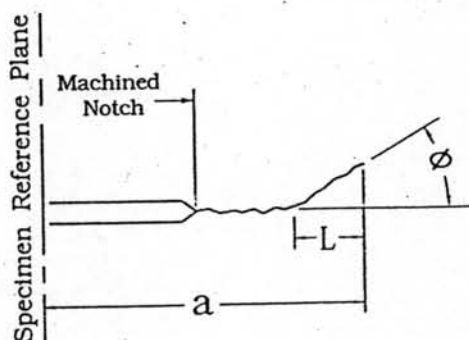
$$\Delta a \leq 0.02W \quad \text{สำหรับ} \quad 0.40 \leq \frac{a}{W} \leq 0.60 \quad (2.11ข)$$

$$\Delta a \leq 0.01W \quad \text{สำหรับ} \quad \frac{a}{W} \geq 0.60 \quad (2.11ค)$$

จากช่วงดังกล่าวนี้ค่า  $\Delta a$  ต่ำสุดที่มาตรฐานยอมรับได้ คือ 0.25 มม. และสำหรับการทดสอบแบบลด ( $K$ -decreasing) ที่ผู้วิจัยใช้ในการดำเนินการทดสอบนี้ผู้วิจัยยึดตามมาตรฐาน

แนะนำให้มีค่าของผลต่างความยาวรอยร้าวในแต่ละช่วงของการปรับภาระโหลดลดลงที่  $\Delta a = 0.50$  มม. (ทุกช่วงตลอดการทดลอง)

7. ณ ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของเส้นทางการเติบโตของรอยร้าวในขณะดำเนินการทดสอบ รอยร้าวที่เติบโตนั้นเกิดการเบี่ยงเบนจากระนาบสามมาตรมากกว่า 20 องศา เป็นระยะทางเท่ากับ  $0.1W$  หรือมากกว่าจะถือว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถือเป็นข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง ในส่วนของเส้นทางการเติบโตของรอยร้าวที่อยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 องศาจะถือเป็นข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นทางการเบี่ยงเบนของการเติบโตรอยร้าวจาก

แนวระนาบสมมาตร

8. สำหรับอุปกรณ์การตรวจวัดการเติบโตของรอยร้าวให้ใช้กล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยายต่ำอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 เท่า (20x ถึง 50x) ในขั้นตอนของการเฝ้าติดตามการเติบโตของรอยร้าว มาตรฐานแนะนำให้ทำเครื่องหมายลงบนชิ้นงานทดสอบได้โดยตรงและใช้ไฟส่องตรวจหาการขยายตัวของรอยร้าวที่บริเวณปลายรอยร้าว (Crack tip) นอกจากนี้ให้ใช้สเกลชนิดที่ทำจากพลาสติก (polyester scale) ติดเข้ากับชิ้นงานทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องกว่าซึ่งจะช่วยลดข้อผิดพลาดในขณะทำการตรวจวัดได้ในอีกระดับหนึ่ง

9. ในการคำนวณหาพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ( $\Delta K$ ) ที่ได้จากการทดสอบ โดยเลือกแบบชิ้นงานทดสอบแบบ Compact-tension (CT specimen) สามารถหาค่าได้จาก

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

โดยกำหนดให้

..... (2.12)

$\alpha$  เท่ากับ  $\frac{a}{W}$  สำหรับข้อมูลที่ถูกต้องค่าของ  $\frac{a}{W} \geq 0.2$

$B$  เท่ากับ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

$W$  เท่ากับ ระยะจากกึ่งกลางรูเจาะร้อยสลักจนถึงขอบอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน