

การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าว  
ภายใต้สภาวะความเค้นระนาบของท่อเหล็ก  
เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-335 เกรด พี.22



นายภาณุ ประทุมพรรัตน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-466-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ANALYSIS OF SPECIMEN THICKNESS EFFECT ON PLANE STRAIN  
FRACTURE TOUGHNESS TESTING IN ASME SA-335 GRADE P22  
STEEL PIPES**



**Mr. Panu Pratumnopharat**

**ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Mechanical Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**1996**

**ISBN 974-633-466-2**

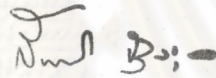
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเครียดระดับของท่อเหล็ก เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-335 เกรด พี. 22

โดย นายภาณุ ประทุมพรรัตน์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

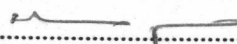


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ชุสุวรรณ)

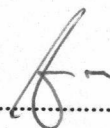
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล ปานงาม)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)



..... กรรมการ  
(อาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



ภาณุ ประทุมทรัพย์ : การวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทาน

ในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นครีครนามของท่อเหล็ก เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-

335 เกรด พี.22 (ANALYSIS OF SPECIMEN THICKNESS EFFECT ON PLANE STRAIN FRACTURE TOUGHNESS TESTING IN ASME SA-335 GRADE P22 STEEL PIPES)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล , 117 หน้า. ISBN 974-633-466-2

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ผลของความหนาขึ้นทดสอบต่อการทดสอบความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นครีครนามของท่อเหล็ก เอ.เอส.เอ็ม.อี. เอส.เอ.-335 เกรด พี.22 และเพื่อประมาณค่าความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นครีครนาม  $K_{IC}$

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ ขึ้นทดสอบ CT จัดวางแนวแบบ C-L เตรียมจากท่อไอตง ASME SA-335 เกรด P22 ของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ ตามข้อกำหนดต่าง ๆ ของมาตรฐาน ASTM E399 โดยมีความหนาของขึ้นทดสอบน้อยกว่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ ขึ้นทดสอบแบ่งเป็น 5 กลุ่มตามความหนา คือ 15.00 , 17.50 , 20.00 , 23.00 และ 25.40 mm และความกว้างของขึ้นทดสอบมีค่าคงที่เท่ากับ 50.80 mm. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ เครื่องทดสอบการแตกร้าวด้วยระบบไฮดรอลิก และการทดสอบทุกอย่างได้กระทำที่อุณหภูมิห้อง

ผลการวิจัยพบว่า

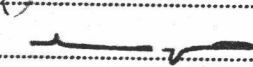
1. ความต้านทานในการแตกร้าว  $K_Q$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นตามมาตรฐานของ ASTM E399 จะต้องใช้ขึ้นทดสอบที่มีความหนาน้อยกว่า 620 mm จึงจะได้ค่า  $K_{IC}$  ที่เชื่อถือได้
2. จากมาตรฐานของ E813 ค่า  $J_{IC}$  ที่ได้จากการทดสอบ J-Integral ด้วยเทคนิควิธีการทดสอบด้วยขึ้นทดสอบหลายชิ้น ได้  $J_{IC}$  เท่ากับ 162.70 kJ/m<sup>2</sup> และแปลงไปเป็น  $K_{IC}$  ได้เท่ากับ 183.80 MPa m<sup>1/2</sup> และคำนวณความหนาน้อยของขึ้นทดสอบได้เท่ากับ 597 mm
3. เพราะความสอดคล้องกันระหว่างค่าความหนาน้อยของขึ้นทดสอบที่คำนวณได้จาก  $K_{IC}$  กับค่าที่ทำนายด้วยมาตรฐานของ E399 เป็นไปด้วยดี จึงเป็นไปได้ที่จะกำหนดให้แนวโน้มของความต้านทานในการแตกร้าว  $K_Q$  มีค่าลดลงเมื่อความหนาของขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไป asymptote กับระดับของ  $K_{IC}$  ที่ความหนาน้อยของขึ้นทดสอบเท่ากับ 597 mm

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....

ปีการศึกษา ..... 2538 .....

ลายมือชื่อนิติ ..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C615955 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: SPECIMEN / SIZE / EFFECTS

PANU PRATUMNOPHARAT : ANALYSIS OF SPECIMEN THICKNESS EFFECT ON PLANE STRAIN FRACTURE TOUGHNESS TESTING IN ASME SA-335 GRADE P22 STEEL PIPES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KOKIAT BUNCHUKUSOL , Ph.D. 117 pp. ISBN 974-633-466-2

This research aimed at analyzing the specimen thickness effect on plane strain fracture toughness testing in ASME SA-335 Grade P22 steel pipes. The research also aimed at evaluating the plane strain fracture toughness  $K_{IC}$ .

The research sample consisted of 15 compact tension specimens with C-L orientation , prepared from super-heater pipes ASME SA-335 Grade P22 in steam turbine power plants , were prepared as per the various recommendations of ASTM E399. However , the thicknesses of the specimen were less than those prescribed in the E399 standard. These can be classified into five groups of thickness ( $B = 15.00 , 17.50 , 20.00 , 23.00$  and  $25.40$ ) and the specimen width was held constant ( $W = 50.80$  mm). The data collection instrument was a servohydraulic testing machine. All tests were carried out at room temperature.

The findings were as follows :

1. The trend of fracture toughness ,  $K_Q$  , decreases as the thickness of CT-specimen increases. According to the E399 standard , a valid  $K_{IC}$ -value is obtained when the minimum specimen thickness must be 620 mm.
2. According to E813 standard , the  $J_{IC}$ -value is obtained from the multispecimen technique ( $J_{IC} = 162.70$  kJ/m<sup>2</sup>) and can be converted to  $K_{IC}$  ( $K_{IC} = 183.80$  MPa m<sup>1/2</sup>). Also , the minimum specimen thickness is 597 mm.
3. Since the agreement between the minimum thickness value obtained from  $K_{IC}$  and the predicted value from E399 standard is reasonably good , it is possible to define a trend of fracture toughness ,  $K_Q$  , decreases as the specimen thickness increases until the  $K_{IC}$  level is asymptotized with the  $K_Q$  at the 597 mm minimum specimen thickness.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล ปานงาม และอาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏตามเอกสารอ้างอิงที่ผู้วิจัยใช้อ้างอิงทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ คุณจิรศักดิ์ เจริญสุข และคุณอดิศักดิ์ ศรีพูนสุข ที่ได้อนุเคราะห์เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณยุทธนา เจริญวงศ์ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและช่วยแนะนำการใช้เครื่องทดสอบ

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแด่ บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภาณุ ประทุมณพรัตน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูปภาพ .....	ฐ

## บทที่

1 บทนำ .....	1
สมมติฐานในการศึกษาวิจัย .....	3
ความมุ่งหมายของการศึกษาวิจัย .....	3
ความสำคัญของการศึกษาวิจัย .....	3
ขอบเขตของการศึกษาวิจัย .....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ .....	5
2 กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น .....	6
ทฤษฎีรอยแตกร้าวของ Griffith .....	6
ความสัมพันธ์ระหว่าง G และ K .....	10
เกณฑ์การแตกหักของวัสดุ .....	11
ขนาดของบริเวณพลาสติกที่ปลายของรอยแตกร้าว .....	17
ความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ .....	19
ลักษณะการเกิดและแพร่ขยายตัวของรอยแตกร้าวในฉันทดสอบ .....	21
3 ความต้านทานในการแตกร้าว .....	23
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการแตกหัก .....	23
การทดสอบหาความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเครียดระนาบ .....	27
ความหมายของ Brittle และ Ductile ตาม ASTM E399 .....	30
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4	33
วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย .....	33
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย .....	33
รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ .....	34
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย .....	36
การทดสอบและการเก็บรวบรวมข้อมูล .....	39
5	44
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	44
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล .....	44
การเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	45
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	65
6	67
การค้นหาแนวทางในการทดสอบให้ได้ $K_{IC}$ .....	67
การแตกร้าวของวัสดุเหนียว .....	67
การทดสอบหาความต้านทานในการแตกร้าวภายใต้สภาวะความเค้นระนาบ .....	68
แนวความคิดพื้นฐานของ J-Integral .....	72
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ J , G และ K .....	76
การหาค่าของ J-Integral และ $J_{IC}$ .....	77
สรุปผลการค้นหาแนวทางในการทดสอบหาค่า $J_{IC}$ .....	83
7	84
ผลการทดสอบ J-Integral .....	84
รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ .....	84
การทดสอบ J-Integral .....	85
ผลการทดสอบ J-Integral .....	87
ผลการแปลงพารามิเตอร์ $J_{IC}$ ไปเป็น $K_{IC}$ .....	100
8	101
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	101
การวิเคราะห์ข้อมูล .....	101
สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	102
ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป .....	104



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก .....	108
ภาคผนวก ก .....	109
ภาคผนวก ข .....	112
ประวัติผู้เขียน .....	117



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr P22 (wt.%) .....	33
4.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของท่อเหล็ก ASME SA-335 Gr P22 .....	33
4.3 แสดงขนาดของชั้นทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย แบ่งตามกลุ่มของความหนา ..	35
4.4 แสดงค่าของ $f(a/w)$ ในช่วง $0.45 \leq a/W \leq 0.75$ .....	43
5.1 แสดงข้อมูลของ $P_Q$ , $P_{max}$ , $K_Q$ และ $K_{max}$ ของชั้นทดสอบทุกชั้น .....	62
7.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ J - Integral ความหนา $B = 12.70$ mm ความกว้าง $W = 25.4$ mm .....	98

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง infinite plate มีรอยแตกกว้างยาว $2a$ รับความเค้นแบบกระจายสม่ำเสมอ .....	7
2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของรอยแตกกว้างไปบนผิวของรอยตัดในจินตนาการ .....	9
2.3 แสดง P- $\Delta$ Curve ในกรณี Load controlled .....	12
2.4 แสดง P- $\Delta$ Curve ในกรณี Displacement controlled .....	13
2.5 แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่กระทำต่อเอลิเมนต์เล็กๆ บริเวณหน้ารอยแตกกว้าง	15
2.6 แสดงขนาดของบริเวณพลาสติกในกรณีความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ ....	17
2.7 แสดงขนาดของบริเวณพลาสติกด้านหน้าของปลายรอยแตกกว้าง .....	18
2.8 แสดงลักษณะการยืดหยุ่นที่ปลายรอยแตกกว้าง .....	20
2.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ปลายรอยแตกกว้างในทิศทางแกน z .....	21
2.10 แสดงการเกิดรอยแตกกว้างแบบ Unstable .....	22
2.11 แสดงการเกิดรอยแตกกว้างแบบ Stable .....	22
3.1 แสดงผลความหนาของชั้นทดสอบต่อค่าความต้านทานในการแตกกว้าง .....	24
3.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของความเค้น .....	25
3.3 แสดง Deformation mode .....	26
3.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของการแตกหักแบบต่าง ๆ .....	27
3.5 แสดง P- $\Delta$ Curve ที่ได้ในระหว่างการทดสอบ $K_{Ic}$ ตาม ASTM E399 .....	28
3.6 แสดงการเกิดรอยแตกกว้างในวัสดุเปราะ .....	30
3.7 แสดงการเกิดรอยแตกกว้างในวัสดุเหนียว .....	31
4.1 แสดงรายละเอียดของชั้นทดสอบแบบ C(T)-Specimen .....	34
4.2 แสดงลักษณะการจัดวางแนวของชั้นทดสอบ .....	35
4.3 แสดงภาพของเครื่องทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย .....	37
4.4 แสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์ (microscope) .....	38
4.5 แสดงขั้นตอนการสร้างรอยแตกกว้างล้าให้กับชั้นทดสอบ .....	40
4.6 แสดง Load - Displacement Record .....	41
4.7 แสดงตำแหน่งในการวัดความยาวของรอยแตกกว้าง .....	41

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ A1 (B = 15.00 mm) .....	47
5.2 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ A2 (B = 15.00 mm) .....	48
5.3 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ A3 (B = 15.00 mm) .....	49
5.4 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ B1 (B = 17.50 mm) .....	50
5.5 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ B2 (B = 17.50 mm) .....	51
5.6 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ B3 (B = 17.50 mm) .....	52
5.7 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ C1 (B = 20.00 mm) .....	53
5.8 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ C2 (B = 20.00 mm) .....	54
5.9 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ C3 (B = 20.00 mm) .....	55
5.10 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ D1 (B = 23.00 mm) .....	56
5.11 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ D2 (B = 23.00 mm) .....	57
5.12 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ D3 (B = 23.00 mm) .....	58
5.13 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ E1 (B = 25.40 mm) .....	59
5.14 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ E2 (B = 25.40 mm) .....	60
5.15 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ E3 (B = 25.40 mm) .....	61
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_0$ และความหนา B .....	64
6.1 แสดงช่วงต่าง ๆ ในการแตกร้าวของวัสดุเหนียว .....	68
6.2 แสดง Griffith instability criterion .....	69
6.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ G ตามความยาวของรอยแตกร้าวเริ่มต้น .....	70
6.4 แสดงรูปร่างของเส้นโค้ง G เมื่อความกว้าง W เปลี่ยนแปลง .....	70
6.5 แสดงวิธีการกราฟิกในการสร้าง R-Curve .....	71
6.6 แสดงสนามการยึดหยุ่นที่ปลายของรอยบาก .....	73
6.7 แสดง closed contour .....	74
6.8 แสดงรูปร่างของชั้นทดสอบแบบต่าง ๆ .....	78
6.9 แสดง P- $\Delta$ Curve ในกรณีของ constant displacement และ constant load .....	79
6.10 แสดงขั้นตอนการสร้าง J- $\sigma$ Curves .....	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.11 แสดง Double Cantilever Beam Specimen .....	82
7.1 แสดงรายละเอียดของชั้นทดสอบ J-Integral .....	84
7.2 แสดงตำแหน่งการวัดของรอยแตกร้าว .....	85
7.3 แสดงพื้นที่ใต้ P- $\Delta$ curve ที่ใช้ในการคำนวณ $J_{PL}$ .....	87
7.4 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J1 .....	88
7.5 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J2 .....	89
7.6 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J3 .....	90
7.7 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J4 .....	91
7.8 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J5 .....	92
7.9 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J6 .....	93
7.10 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J7 .....	94
7.11 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J8 .....	95
7.12 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J9 .....	96
7.13 แสดง P- $\Delta$ record ของชั้นทดสอบ J10 .....	97
7.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J และ $\Delta a$ .....	99
8.1 แสดงระดับ $K_{IC}$ ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ J-Integral .....	102
8.2 แสดงการคาดการณ์แนวโน้มความสัมพันธ์ของ $K_Q$ และความหนา B .....	103

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย