

การตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

ปริญญานิพนธ์
ของ
ชัชวาลย์ สอนศิริ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2551

การตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

ปริญญานิพนธ์
ของ
ชัชวาลย์ สอนศิริ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

บทคัดย่อ
ของ
ชัชวาลย์ สอนศิริ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2551

ชัชวาลย์ สอนศิริ. (2551). การตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยใช้การประมวลผลภาพแบบ
ดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุมปริญญาบัตร: พลตรี ศาสตราจารย์ สมชาย สิงห์โต,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน.

เพื่อป้องกันการแตกหักบนภาชนะความดันผนังบาง และชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่าง ๆ นั้น การ
พัฒนาระบบตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น สถาบันปิโตรเลียมแห่งอเมริกา
(API) ได้กำหนดมาตรฐานการตรวจ และประเมินสภาพรอยแตกบนระบบท่อส่งและภาชนะบรรจุน้ำมัน
ปิโตรเลียมไว้โดยเรียกว่า 'Fitness – For – Service' ซึ่งในการปฏิบัติงานจริง วิศวกรจะต้องประจำอยู่
ที่ภาคสนามเพื่อประเมินสภาพรอยแตกบนระบบท่อส่ง และภาชนะบรรจุน้ำมัน ซึ่งจะมีความไม่สะดวก
หลายอย่าง จึงทำให้ต้นทุนการตรวจประเมินสูงมาก ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะนำเทคนิคต่างๆของการ
ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลมาช่วยในการจับภาพของรอยแตกบนผิวของชิ้นส่วน ซึ่งจะมีความคล่องตัว
และสามารถเก็บรายละเอียดได้มากกว่าการตรวจจברอยแตกโดยตรงอย่างที่เคยเป็นมา หลังจากนั้นจึง
นำภาพถ่ายดิจิทัลเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลเพื่อหาขนาดที่แม่นยำตรงใน
ภายหลังได้อย่างสะดวก และมีเวลาเพิ่มที่ในการวิเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถทำได้ทุกเวลาที่ต้องการ ตัว
ประกอบความหนาแน่นของความเค้น K_I จะถูกคำนวณ และเปรียบเทียบกับความทนทานต่อการแตก
หักของวัสดุ K_{IC} ดังนั้นด้วยวิธีการนี้วิศวกรจะสามารถประเมินรอยแตกได้โดยไม่ต้องอยู่ที่ภาคสนาม

งานวิจัยนี้พบว่า วิธีการตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะในกรณีของความเค้นระนาบ ด้วย
การประมวลผลภาพแบบดิจิทัล ให้ผลลัพธ์ที่ตรงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ 96.03%
และแสดงพฤติกรรมของรอยแตกที่ขยายตัวออกได้ตรงกันกับสถานะจริงของการทดสอบภาระดึงได้ ค่า
ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น K_I ที่คำนวณได้จากการวัดรอยแตกที่เติบโตโดยการประมวล
ผลภาพแบบดิจิทัล จะสูงกว่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} ที่คำนวณได้จากการทดสอบ
แบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี ซึ่งสอดคล้องกันกับทฤษฎีที่ว่า ค่าตัวประกอบ
ความหนาแน่นของความเค้นในกรณีของความเค้นระนาบ จะสูงกว่าความต้านทานต่อการแตกหักของ
วัสดุแบบความเค้นระนาบ

CRACK MONITORING ON THE METAL PARTS
USING
DIGITAL IMAGE PROCESSING

A THESIS
BY
CHATCHAWAN SONSIRI

Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2008

Chatchawan Sonsiri. (2008). *Crack Monitoring on the Metal Parts using Digital Image Processing*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Major General Prof. Somchai Singto, Asst. Prof. Dr. Suparerk Sirivedin.

To prevent failure in piping system and engineering applications, the development of crack monitoring system is essential. American Petroleum Institute (API) has set the regulation to determine the cracks in piping systems. This assessment is called “Fitness – for – Service”. In reality, engineers have to stay at the site to evaluate cracks in piping system, which leads to an impact in overhead cost. A handy digital camera can be exploited by sending the pictures via internet to engineers. This work has used digital image processing method to monitor crack propagation in mechanical parts. The stress intensity factor, K_I was calculated and compared with the fracture toughness of material, K_{IC} . Engineers can make the decision without coming to the site by using this technique.

The results obtained from this work have found that using digital image processing gives 96.03% accuracy with finite element analysis, and shows the behavior of crack propagation as same as the actual behavior of specimen 's crack propagation on the tension testing. Stress intensity factor: K_I that is calculated from crack length by digital image processing, will greater than fracture toughness: K_{IC} that is calculated from CVN by Charpy impact testing. This issue is according with the theory of fracture mechanics in which stress intensity factor in case of plane stress will greater than fracture toughness in case of plane strain.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การตรวจสอบสภาพรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

ของ
ชัชวาลย์ สอนศิริ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน

(พลตรี ศาสตราจารย์ สมชาย สิงห์โต)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ ดร. บรรพต หอบรรลือกิจ)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาจาก พลตรี ศาสตราจารย์ สมชาย สิงห์โต ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์และจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน กรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินการวิจัย ตลอดจนตรวจทานปริญญานิพนธ์นี้จนมีคุณค่าอย่างสมบูรณ์ ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ที่มีค่ายิ่งในการทำงานวิจัย และรู้ถึงคุณค่าของงานวิจัยที่จะช่วยให้เกิดการพัฒนาวิธีการตรวจสอบสภาพรอยแตกบนผิวชิ้นส่วนโลหะ ทานทั้งสองนั้นถือเป็นแม่แบบของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์ และงานด้านวิชาการอย่างแท้จริง

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. บรรพต หอบรรลือกิจ แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ที่มีกรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบปากเปล่าเกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะต่างๆเพื่อการแก้ไขปริญญานิพนธ์นี้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ทานทั้งสองนั้นถือเป็นผู้ทรงภูมิความรู้อย่างแท้จริง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อริสรา ชัยกิตติรัตนหา อาจารย์กลุ่มวิจัยวิศวกรรมโพลีเมอร์และยาง แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบภาระดึง และให้คำแนะนำในการทดสอบภาระดึง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สมนึก วัฒนศรีกุล และ คุณประสาธ อ่อนสนิท เจ้าหน้าที่แห่งห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากวีของชาร์ปี และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญญฤทธิ์ อูยานนวาระ แห่งภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต ที่กรุณาสอนวิธีการประมวลผลภาพโดยสังเขปจนผู้วิจัยมีความเข้าใจมากขึ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุญลือ บุญคง แห่งสถาบันไทย – เยอรมัน ที่กรุณาสาธิตการทำงานของอุปกรณ์สำหรับระบบการมองเห็นแบบอัตโนมัติ และให้ความอนุเคราะห์อย่างยิ่งในการทดลองเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการจับภาพและการประมวลผลภาพ จนทำให้ผู้วิจัยมองเห็นความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ สมหมาย สงฆ์เพชร เพื่อนนิสิตโครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ส่วนการศึกษา แห่งโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ 1 ที่ร่วมฝ่าฟันในการหาและช่วยติดต่อประสานงานเครื่องทดสอบภาระดึง และ มาตรฐานการทดสอบที่จำเป็นต่องานวิจัยนี้ ให้ ถ้าไม่ได้เพื่อนผู้นี้บุกเบิกหนทางในช่วงแรกๆ ผู้วิจัยคงไม่สามารถดำเนินการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ลงได้

ขอขอบคุณ น้องธนวิทย์ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยดำเนินการทดสอบกับผู้วิจัยหลายๆครั้ง ด้วยความอดทนอย่างยิ่ง และ น้องประมาณ เพื่อนนิสิตโครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ส่วนการศึกษา แห่งโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ 3 ที่ช่วยดำเนินการทดสอบภาระดึงในช่วงเริ่มแรกของการดำเนินการวิจัยอย่างเข้มข้น

ในท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณแม่ปาริชาติ และ นิตยา ภรรยาที่เป็นทั้งกำลังกายและกำลังใจที่ดีเยี่ยม อดทนนั่งรถยนต์มาเป็นเพื่อนที่มหาวิทยาลัยเกือบทุกครั้ง ด้วยเพราะกลัวผู้วิจัยขับรถยนต์แล้วหลับใน รวมทั้งความช่วยเหลืออีกหลายๆอย่างจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ชัชวาลย์ สอนศิริ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
การวัดอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตโดย	
รูปแบบของการควบคุมภาระ.....	8
ความไม่เสถียรภาพของรอยแตก.....	9
ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น.....	10
การเปลี่ยนรูปที่ปลายรอยแตกและขนาดของบริเวณพลาสติก.....	11
ข้อจำกัดของความเป็นพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการแตก	
หักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น.....	12
อิทธิพลของความหนาของชิ้นทดสอบ.....	13
ปฏิบัติการมาตรฐานทางกลศาสตร์สำหรับหาความต้าน	
ทานต่อการแตกหักของวัสดุ.....	14
ลักษณะของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบหาค่าความ	
ต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ	
K_{Ic} แนวทางของ ASTM E – 399 – 74.....	14
วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบ	
ความเครียดระนาบ K_{Ic} ตามแนวทางของ ASTM	
E – 399 – 74 โดยสังเขป.....	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ) การหาความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{Ic}	
ด้วยการทดสอบแบบกระแทกของชิ้นทดสอบ	
ที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	20
อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานต่อการแตก	
หักแบบความเครียดระนาบ K_{Ic}	21
การทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบ	
วีของชาร์ปี.....	22
การประมาณค่าความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{Ic}	
จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบกระแทกของชิ้น	
ทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	24
การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลในการ	
วิเคราะห์รอยแตก.....	24
กระบวนการแปลงภาพสัญญาณแบบต่อเนื่องไปเป็น	
ภาพสัญญาณแบบดิจิทัล.....	25
ผลกระทบจากความละเอียดเชิงจำนวนพิกเซลหรือ	
เชิงระยะ และความละเอียดของระดับสีเทา	
ต่อภาพสัญญาณแบบดิจิทัล.....	27
การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่กระทำต่อจุดพิกเซล	
ที่สนใจโดยตรง.....	28
การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่กระทำต่อพิกเซลข้าง	
เคียงที่ล้อมรอบจุดพิกเซลที่สนใจ.....	28
การทำงานของตัวดำเนินการกรอง.....	29
การตรวจจับและแกะรอยขอบ.....	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ) ขั้นตอนการทดสอบภาระดึงเพื่อหาค่า σ_{ys}, E	
และสัดส่วน σ_{ys} / E	36
ขั้นตอนการทดสอบหาความยาวรอยแตกวิกฤต	
ที่ระบุใน Recommended Method of	
Testing for Plane Strain Fracture	
Toughness of Metallic Materials;	
ASTM E – 399 – 74.....	37
ขั้นตอนการทดสอบแบบกระแทกบนแท่งขึ้นทดสอบ	
สอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	37
ขั้นตอนการจับภาพรอยแตกบนแผ่นขึ้นทดสอบ	
และการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล.....	38
ขั้นตอนจำลองพฤติกรรมการแตกหักของแผ่นขึ้น	
ทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์.....	39
4 ผลการวิจัย.....	40
การทดสอบภาระดึงบนขึ้นทดสอบ.....	40
การหาขนาดของแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อทดสอบหา	
ค่าความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ.....	41
การทดสอบหาความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ	
จากขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	42
การทดสอบตามขั้นตอนการจับภาพรอยแตกบนแผ่น	
ขึ้นทดสอบ และการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล.....	43
การทดสอบขั้นตอนจำลองพฤติกรรมการแตกหักของ	
แผ่นขึ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์.....	44
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	46
การทดสอบภาระดึงบนขึ้นทดสอบเพื่อหาค่า σ_{ys} , E, σ_{ys} / E	46
การทดสอบหาความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุจาก	
ขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

5 (ต่อ) เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดสอบหาค่า

ความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลและผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีตามที่ระบุใน Assessing Fracture Toughness from Charpy V – Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000.....	47
เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลและผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการจำลองพฤติกรรมแตกหักของแผ่นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์.....	47
ขั้นตอนมาตรฐานเพื่อตรวจจับและวัดขนาดความยาวรอยแตกด้วยการประมวลผลภาพแบบดิจิตอล.....	49
ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับตรวจประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะที่มีรอยแตกขณะรับภาระ.....	53
ข้อเสนอแนะ.....	54
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	77

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง.....	16
2	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการคูณ ζ และ a/W สำหรับ ชั้นทดสอบ CT	19
3	บันทึกผลการทดสอบภาระดึงชั้นทดสอบตามข้อกำหนด ใน Designation: E 8M – 93 (METRIC) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].....	62
4	บันทึกผลการทดสอบแบบกระแทกบนชั้นทดสอบที่มีร่อง บากแบบวีของชาร์ปีตาม Assessing Fracture Tough ness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000.....	69
5	บันทึกผลการทดสอบการจับภาพรอยแตกบนแผ่นชั้นทดสอบ และการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล.....	70
7	ข้อกำหนดทั่วไปของ Extensometer INSTRON 2630 - 100 SERIES, Clip – On.....	76

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แผ่นชั้นส่วนภายใต้การควบคุมภาวะ.....	9
2 Rising R curve.....	9
3 รูปแบบทั้งสามของการการแตกหัก.....	10
4 การกระจายความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบ พลาสติกกรอบปลายรอยแตก.....	11
5 การเปลี่ยนแปลงขนาดของบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยแตก.....	12
6 ข้อจำกัดของความเป็นพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการแตกหัก แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น.....	13
7 อิทธิพลความหนาของชั้นทดสอบต่อเงื่อนไขของปัญหาแบบ ความเครียดระนาบ.....	13
8 ชั้นทดสอบแบบ Compact Specimen: CT.....	15
9 รอยบากแบบปีกนก, แบบตรงตลอด และแบบรูปกุญแจ.....	16
10 Clip – On Extensometer และลักษณะการติดตั้งบนชั้นทดสอบ.....	17
11 ผิวของการแตกหักแบบเปราะ.....	18
12 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการเปิดอ้าของรอยแตก.....	18
13 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อ Cleavage และ Slip.....	21
14 ชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีทั้งแบบขนาดปกติและ ขนาดย่อส่วน.....	22
15 K_{IC} transition temperature.....	22
16 เครื่องทดสอบ Charpy V – Notch Impact Test.....	23
17 เส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะ.....	23
18 กระบวนการแปลงภาพสัญญาณแบบต่อเนื่องไปเป็นภาพสัญญาณ แบบดิจิทัล.....	25
19 ภาพสัญญาณแบบดิจิทัลผลลัพธ์ที่ได้จากการ Sampling และ Quantization.....	26
20 ระบบคู่อันดับที่นิยมใช้แทนภาพสัญญาณแบบดิจิทัล.....	26
21 กรอบตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 X 3 ที่ใช้ฟังก์ชันพิกเซลข้างเคียง.....	28
21 การดำเนินงานของตัวกรองแบบปรับเรียบต่อการเปลี่ยนแปลง อย่างฉับพลัน.....	29

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 การดำเนินงานของตัวกรองแบบที่เน้นให้เห็นการเปลี่ยนแปลง อย่างฉับพลัน.....	30
23 การแกะรอย.....	31
25 Tension specimens: Small – size.....	32
26 Fatigue crack และ Wire – EDM crack.....	33
27 แท่งขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี.....	34
28 ชิ้นทดสอบสำหรับหาความยาวรอยแตกที่ขยายตัวออกด้วย การประมวลผลภาพ.....	34
29 FAD ของแผ่นขึ้นทดสอบที่ใช้ในขั้นตอนการจับภาพรอย แตกและประมวลผลภาพ.....	35
30 Extensometer แบบ Clip – On และลักษณะของการติดตั้ง.....	35
31 Impact Test Machine แบบ Manual.....	36
32 ภาพรอยแตกต้นฉบับหมายเลข 49 ที่ผ่านการประมวลผลแล้ว.....	43
33 Mash ขนาด 2,776 element และ 8,451 Node	44
34 สภาวะของความเค้นที่ปลายรอยแตก.....	44
35 หน้าตัดผิวรอยแตกหักเปราะของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่อุณหภูมิ -65 C°.....	46
36 ความสอดคล้องกันของการเปิดอำเภอของรอยแตกที่ได้จาก การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลและที่ได้จากวิธีการ ไฟไนต์อีลีเมนต์ เทียบกับภาพถ่ายต้นฉบับ.....	48
37 เปรียบเทียบระยะเปิดอำเภอของรอยแตกที่วัดได้จากการ ประมวลผลภาพและที่คำนวณได้จากวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์.....	48
38 ผลของการเพิ่มความเปรียบต่างของภาพ.....	49
38 การขยายเข้าเพื่อให้วาดเส้นวัดขนาดได้ใกล้เคียงความเป็นจริง ให้มากที่สุด.....	49
39 ผลของการตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบ Despeckle.....	50
40 ผลของการเบลอฟิคเซลขอบแบบเกาส์.....	50
41 ผลของการลบพื้นหลัง.....	51
42 ผลของการลบความเข้มแสงในภาพด้วยค่าคงที่.....	51

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
43 ผลของการแกะรอยขอบรอยแตก.....	52
44 ผลของการวัดระยะเปิดอ้าออกของปากรอยแตก.....	52
45 ขั้นตอนสำหรับประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะ ที่มีรอยแตกขณะรับภาระ.....	53
46 การขาดของชิ้นทดสอบที่ระยะ Gauge length แบบไม่สมมาตร.....	54

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เพื่อป้องกันการแตกหักบนชิ้นภาชนะความดันผนังบาง และชิ้นส่วนต่างๆทางวิศวกรรมนั้น การพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพรอยแตกบนชิ้นส่วนดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น สถาบันปิโตรเลียมแห่งอเมริกา (API) ได้กำหนดมาตรฐานการตรวจ และประเมินสภาพรอยแตกบนระบบท่อส่งและภาชนะบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมไว้โดยเรียกว่า 'Fitness – For – Service' ซึ่งในการปฏิบัติงานจริง วิศวกรจะต้องประจำอยู่ที่ภาคสนามเพื่อประเมินสภาพรอยแตกบนระบบท่อส่ง และภาชนะบรรจุน้ำมัน ซึ่งจะมี ความไม่สะดวกหลายอย่าง จึงทำให้ต้นทุนการตรวจประเมินสูงมาก ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำ เทคนิคของการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอลมาช่วยในการจับภาพของรอยแตกบนผิวของชิ้นส่วน ซึ่ง จะมีความคล่องตัวและสามารถเก็บรายละเอียดได้มากกว่าการตรวจจברรอยแตกโดยตรงอย่างที่เคย เป็นมา หลังจากนั้นจึงนำภาพถ่ายดิจิตอลเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการประมวลผลภาพแบบดิจิตอล เพื่อหาขนาดที่แม่นยำและวิเคราะห์ในภายหลังได้อย่างสะดวก อีกทั้งสามารถทำได้ทุกสถานที่และ ทุกเวลาที่ต้องการ ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น K_I จะถูกคำนวณ และเปรียบเทียบกับ ความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} ดังนั้นด้วยวิธีการนี้วิศวกรจะสามารถประเมินรอยแตกได้ โดยไม่ต้องอยู่ที่ภาคสนาม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.กำหนดสร้างขั้นตอนมาตรฐานสำหรับตรวจสอบสภาพรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะจากขั้นตอน ต่างๆ ของการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลเพื่อบ่งชี้ขนาดความยาวรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะได้ อย่างแม่นยำ

2.ประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะที่มีรอยแตกขณะรับภาระโดยเปรียบเทียบตัวประกอบ ความหนาแน่นของความเค้นจากวิธีการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลและความต้านทานต่อการแตก หักของวัสดุจากขั้นตอนการทดสอบที่อ้างอิง Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74 ⁽¹⁾ หรือจากขั้นตอนการทดสอบ ที่อ้างอิง Assessing Fracture Toughness from Charpy V – Notch Data, Fitness – for - Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000 ⁽²⁾

ขอบเขตของการวิจัย

1. ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นชิ้นทดสอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเครื่องจักร (Carbon Steel for Machine Structural Use) S45C อ้างอิงจาก JIS G 4051 (1968) Standard for Ferrous Metallic Materials ⁽³⁾ โดยรูปร่างของชิ้นทดสอบจะถูกจัดเตรียมไว้ใน 4 ลักษณะคือ

1.1. แผ่นชิ้นทดสอบที่มีรอยบากอยู่ที่ตรงกลางขอบของแผ่นภายใต้ภาระดึงสถิตคงที่ (Compact specimen; CT) อ้างอิงจาก Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 - 74

1.2. แท่งชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Charpy specimen) ซึ่งอ้างอิงจาก Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000

3.3. แท่งชิ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ Gauge length เป็น 6.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็น Small – size specimen Proportional To Standard of Designation: 8M – 93 (METRIC) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric] ⁽⁴⁾ โดยด้ามจับยึดทั้งสองข้างของชิ้นทดสอบเป็นเกลียว Metric M20 ตามรูปแบบของการจับยึดแบบที่ 2 (Type 2)

2. ความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุที่ใช้เป็นเกณฑ์ประเมินสถานะใช้งานของชิ้นส่วนโลหะจะหาได้จากขั้นตอนการทดสอบที่อ้างอิงจาก

2.1. Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 - 74 หรือ

2.2. Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for - Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000

ทั้งนี้จะเลือกใช้วิธีการ 2.1. ก่อน ถ้าวิธีการที่ 2.1. ไม่เหมาะสมหรือไม่สามารถดำเนินการได้จริงในทางปฏิบัติจึงให้ใช้วิธีการที่ 2.2.

3. ภาพถ่ายรอยแตกบนชิ้นทดสอบโลหะที่นำมาประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะได้จากกล้องถ่ายภาพดิจิทัลความละเอียดตั้งแต่ 2 ล้านพิกเซลขึ้นไปและมีระบบปรับโฟกัสอัตโนมัติ

4. ภาพรอยแตกที่ได้จากกล้องถ่ายภาพดิจิทัลจะต้องถ่ายติด “ หมาย ” (Marker) ซึ่งทราบขนาดตลอดจนรูปร่างและทิศทางที่แน่นอนแล้วติดมาด้วย โดยนี่จะเป็นเส้นตารางที่ลากขึ้นด้วยเวอร์เนียร์ไฮเกจ ขนาด 2 มิลลิเมตร X 2 มิลลิเมตร ทั้งนี้ความยาวรอยแตกตลอดจนรูปร่างทิศทางของรอยแตกที่ได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะต้องก็ต่อเมื่อการประมวลผลภาพสามารถบ่งชี้ขนาดตลอดจนรูปร่างและทิศทางของหมายได้อย่างถูกต้องเท่านั้น

5. การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะดำเนินการผ่านซอฟต์แวร์ ImageJ Version 1.34s

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การประมวลผลภาพ (Image processing) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงธรรมชาติของภาพ
2. การประมวลผลภาพแบบดิจิทัล (Digital image processing) เป็นการประมวลผลภาพที่ดำเนินการผ่านคอมพิวเตอร์
3. การตรวจสอบภาพรอยแตก (Crack monitoring) บนชิ้นส่วนโลหะเป็นการตรวจวัดความยาวรอยแตกบนชิ้นส่วนให้ได้ขนาดที่แม่นยำแล้วนำไปประเมินสถานะใช้งาน (Service assessment) ของชิ้นส่วนโลหะนั้นดังกล่าวโดยเทียบความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุที่ได้จากขั้นตอนทดสอบทางกล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ได้ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับตรวจสอบภาพรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่สามารถบ่งชี้ขนาดความยาวรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะได้อย่างแม่นยำ
2. เพื่อให้ได้วิธีการใหม่สำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ที่สามารถตรวจจับรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะได้อย่างสะดวก มีถูกต้องแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ และมีราคาถูก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.M. Larsen, J.R. Jira, K.S. Ravichandran ⁽⁵⁾ ประยุกต์เอากล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 25 - 400 เท่า ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับกล้องถ่ายภาพแบบใช้ฟิล์มขนาด 35 มิลลิเมตร เพื่อจับภาพรอยแตกขนาดเล็กที่เติบโตขึ้นจากความล้าตัว (Small fatigue crack) โดยสามารถตรวจจับรอยแตกได้ทั้งในกรณีของรอยแตกเริ่มต้นจริงตามธรรมชาติ (Naturally initiated crack) และรอยแตกเริ่มต้นเสมือนตามธรรมชาติซึ่งเกิดจากกระบวนการ EDM (Electro - discharge machining) ให้เป็นร่องบากขนาดเล็กมากๆ หลังจากนั้นภาพรอยแตกที่ถูกจับได้จะถูกนำไปขยายผ่าน digitizing tablet ซึ่งจะได้กำลังขยายโดยรวมของกล้องจุลทรรศน์และ digitizing tablet เป็น 300 – 1000 เท่า จึงทำให้สามารถวัดขนาดของรอยแตกได้โดยตรงโดยมีความแม่นยำอยู่ในช่วง ± 2 ไมโครเมตร หลังจากที่ได้ขนาดรอยแตกที่สมบูรณ์แล้วจึงนำขนาดรอยแตกที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั้นมาคำนวณร่วมกับรอบของการให้ภาระ (Cycle-count) ที่บันทึกได้จากคอมพิวเตอร์ จะสามารถคำนวณหาอัตราการเติบโตของรอยแตก da/dN ได้

วิธีการนี้แม้จะได้รับการยอมรับเป็น Small – crack test methods ของ ASTM แต่วิธีการนี้ต้องพึ่งประสิทธิภาพของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง และต้องใช้ฟิล์มที่มีความละเอียดสูงมาก (200 lines / mm สำหรับ Target Object Contrast; TOC ขนาด 1000:1) ทำให้มีราคาของระบบโดยรวมค่อนข้างสูง อีกทั้งยังต้องการประสบการณ์และทักษะอย่างมากเพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพดี ด้วยเหตุนี้จึงมักพบว่าต้องถ่ายภาพรอยแตกรอยเดียวเป็นจำนวนหลายๆ ภาพซ้ำๆ กันเพื่อคัดเลือกภาพที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด มีคุณภาพดีที่สุดต่อการวิเคราะห์โดยไม่ใช้วิธีการประมวลผลภาพใดๆ

R. Luna ⁽⁶⁾ ทำวิจัยให้แก่หน่วยงาน Louisiana Transportation Research Center; LTRC และหน่วยงาน Louisiana Department of Transportation and Development; LADOTD โดยมีเป้าหมายเพื่อกำหนดเป็นขั้นตอนต่างๆ สำหรับบ่งชี้ลักษณะเฉพาะของส่วนผสมของไฟเบอร์ต่างๆ ในดิน (Admixture) ของ Louisiana ด้วยวิธีการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล โดยในการนี้เขาเลือกใช้กล้องที่มีเซนเซอร์แบบ Monochrome CCD โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงร่วมกับชุดกรองแสงแบบโพลาไรซ์

หลังจากนำภาพถ่ายขึ้นทดสอบของส่วนผสมดินมาผ่านวิธีการปรับปรุงคุณภาพบางอย่าง เช่น การปรับความสม่ำเสมอ (Smoothing) การปรับแต่งขอบให้ชัดขึ้น (Edge enhancement) และการเซตโฮลด์ (Threshold) เป็นต้น จากนั้นนำภาพที่ผ่านการเซตโฮลด์แล้วมาวัดขนาดของวัตถุที่สนใจในภาพซึ่งในที่นี้คือ เส้นไฟเบอร์ในดินโดยใช้ 3 ฟังก์ชันวัดของซอฟต์แวร์ Inspector คือ

1. Blob Set Analysis เป็นฟังก์ชันที่พบได้ทั่วไปในหลายๆซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลภาพเพื่อการวัดปริมาณเชิงมิติต่างๆ ปัญหาของการใช้ Blob Set Analysis คือมักจะระบุจำนวนของไฟเบอร์ได้น้อยกว่าความเป็นจริง อีกทั้งในจำนวนไฟเบอร์ที่ระบุได้นั้นอาจไม่ใช่ไฟเบอร์จริงทั้งหมด บางส่วนเป็นเพียงรอยแตกหรือความไม่เรียบในบางส่วนของดิน ฟังก์ชันนี้ค่อนข้างจะอ่อนไหวและได้รับผลกระทบจากการเรสโลลต์ด้วย ซึ่งหมายความว่าความละเอียดในระดับที่แตกต่างกันจะทำให้ Blob Set Analysis ระบุจำนวนของไฟเบอร์ได้ไม่เท่ากันด้วย

2. Object Orientation เป็นฟังก์ชันในการวัดองศาของวัตถุในภาพที่สนใจเทียบกับแกนอ้างอิง ซึ่งฟังก์ชันนี้เป็นการทำงานที่ผู้วัดจะต้องกำหนดรายละเอียดของการวัดเอง ปัญหาของการวัดองศา คือความคลาดเคลื่อนจากผู้วัดเองเป็นหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเส้นไฟเบอร์บิดตัว หรือเส้นไฟเบอร์ชิดติดกันมากเกินไปจนยากต่อการแยกแยะของผู้วัด

3. Intensity Line Profiles เป็นฟังก์ชันในการตรวจวัดความเข้มแสงจากบริเวณที่กำหนดโดยเส้น Intensity Line โดยที่เส้น Intensity Line นี้ผู้วัดต้องกำหนดความละเอียดของการแบ่งช่วงการวัดเอง Intensity Line Profiles อาจระบุจำนวนของไฟเบอร์ได้มากกว่าความเป็นจริงเนื่องจากการตรวจพบไฟเบอร์ซ้ำกันในกรณีที่ไฟเบอร์นั้นคาบเกี่ยวอยู่ใน 2 บริเวณที่ติดกัน แต่อย่างไรก็ตามปัญหานี้ก็สามารถแก้ไขได้ดีในระดับหนึ่ง โดยไม่นับไฟเบอร์ที่พบในบริเวณหนึ่งรวมกับไฟเบอร์ที่คาบเกี่ยวอยู่บน Intensity Line ก่อนหน้าที่อยู่ติดกัน

โดยสรุป Intensity Line Profiles ยังเป็นฟังก์ชันที่ดีที่สุดในการระบุจำนวนของไฟเบอร์ที่สนใจในภาพที่ผ่านการเรสโลลต์แล้ว อีกทั้งยังบ่งชี้ความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของไฟเบอร์ในชั้นทดสอบได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้แม้จะให้ค่าเชิงปริมาณได้หลายอย่าง แต่ก็ไม่ได้วัดขนาดรูปร่างของไฟเบอร์ และค่าเชิงปริมาณนี้ก็ไม่ได้ถูกนำไปพิจารณาในเชิงกลศาสตร์

M. Shinozuka, H.C. Chung, M. Ichitsubo, J. Liang ⁽⁷⁾ ประยุกต์การประมวลผลภาพวิธีโอแบบดิจิทัล (Video – digital image processing) ในการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นดินไหว โดยมีส่วนที่ศึกษาสถานะของรอยแตกบนพื้นผิวถนนเพื่อการซ่อมบำรุงด้วย ในการนี้ภาพยนตร์จากกล้อง Video – 8 Camcorder จะถูกจับ (Capture) ออกมาเป็นภาพดิจิทัลเดี่ยวๆในลักษณะที่ต่อเนื่องกันด้วยความถี่ทุกๆครึ่งเฟรม (Frame) หลังจากนั้นใช้ขั้นตอนต่างๆของการประมวลผลภาพมาตรวจจับรอยแตกบนภาพ ดังนี้

1. Mask Selection ขั้นตอนนี้จะทำการตัดขอบรอยต่อระหว่างเฟรมของภาพต้นฉบับ แล้วทำการเชื่อมวัตถุภายในภาพโดยอัลกอริทึมของโปรแกรมภาษา C++ ทั้งนี้พื้นที่ขอบรอยต่อระหว่างเฟรมจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วการสแกนของกล้อง

2. Image Registration ขั้นตอนนี้เพื่อกำหนดโคออร์ดิเนตในภาพ และจะทำให้สามารถบ่งชี้ตำแหน่งของวัตถุที่สนใจในภาพได้โดยอัลกอริทึมของโปรแกรมภาษา C++

3. Crack Identification โดยใช้ซอฟต์แวร์ Arcview – GIS with Image Analysis Extension

บ่งชี้ลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตและเชิงวัตถุ นอกจากนี้ก็ยังแยกเส้นและพื้นที่ของรอยแตกออกจากพื้นหลัง พร้อมทั้งวัดความยาวและพื้นที่ของรอยแตกนั้นๆด้วย

งานวิจัยนี้แม้จะไม่ให้รายละเอียดของการใช้วิธีการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลในการตรวจวัดความรอยแตก อีกทั้งความยาวรอยแตกที่ตรวจวัดได้นั้นก็ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาในเชิงกลศาสตร์ใดๆ แต่ก็ได้ให้แนวความคิดอย่างสำคัญต่อการตรวจจ็รอยแตกที่ดำเนินไปแบบพลวัต (Dynamics)

G.G. Gordon ⁽⁸⁾ เป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือ พัฒนาระบบการตรวจสอบคุณภาพกระจกรถยนต์ในเชิงภาพแบบอัตโนมัติ (Automated Visual Inspection) ซึ่งนำเสนอแก่ EC glass fragmentation standards โดยนำภาพที่เป็น Photographic contact print จากการทดสอบการแตกเป็นชิ้นของกระจก (Fragmentation Testing) ตามข้อกำหนดของ EC เดิม มาผ่านการสแกนทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง แล้วนำมาผ่านกระบวนการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลดังนี้

1. กำจัดสัญญาณรบกวนที่เป็นจุดสว่างในภาพเนื่องจากผงกระจก และจุดสีดำเนื่องจากฝุ่นและเงาจากกระจกด้วย Morphological operation บางอย่าง โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นของรอยแตกที่เป็นสีดำในภาพ

2. นำภาพที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนแล้ว มาแยกเส้นของรอยแตกออกจากพื้นหลัง (Segmentation) เขาใช้เทคนิคการแยกภาพอย่างหนึ่งที่ถูกเรียกว่า Valley Detection หรือ Inverse Top Hat Transform ซึ่งสามารถควบคุมความเข้มแสงในการแยกภาพได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งภาพ

3. แต่งเติมเส้นรอยแตกที่ผ่านกระบวนการแยกภาพมาแล้วให้เชื่อมต่อกันเป็นชิ้นที่สมบูรณ์ โดยวิธี Dilation followed by constrained skeletonization และด้วยหลักการ Convexity criterion และการกำหนด Tolerance of Concavity ด้วยการปรับเรียบ (Fattening) ที่เหมาะสมก็จะทำให้การเชื่อมต่อมีความถูกต้องมากขึ้น

4. Identification and Labeling of Particles ขั้นตอนนี้จะใช้ลำดับของตัวดำเนินการ AND และ OR บางอย่างเพื่อ Intersection กันแล้วได้ตัวกรองอันหนึ่ง หลังจากนั้นจึงนำตัวกรองดังกล่าวมา Intersection ย้อนกลับกับภาพที่ผ่านการ Dilation followed by constrained skeletonization จากนั้นระบุหมายเลขแก่ชิ้นรอยแตกแต่ละชิ้น ซึ่งก็จะทำให้สามารถตรวจนับชิ้นรอยแตกได้ (ในที่นี้ก็คือชิ้นกระจกนั่นเอง) สามารถคำนวณค่าสถิติของพื้นที่ และรูปร่างของชิ้นกระจกตลอดจนความยาวเส้นรอยแตกได้ งานวิจัยของเขาเน้นไปที่การพยายามหาวิธีการสังเคราะห์เส้นรอยแตกให้มีคุณภาพสูงเพื่อการตรวจนับ และการจดจำรูปร่าง (Shape Recognition) เป็นหลัก โดยไม่ได้พิจารณาขนาดที่แม่นยำในเชิงกลศาสตร์

B. Mobasher, S.D. Rajan ⁽⁹⁾ เสนอวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับการจับคู่ (Matching) และการเรธโซลด์ (Thresholding) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูประอบๆรอยแตกบนชิ้นวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) คือ

1. Cross correlation technique หรือ Template matching technique เทคนิคนี้จะดำเนินการแกะรอย (Tracking) ภาพสองภาพที่ถูกถ่ายแบบต่อเนื่องกัน เพื่อประมาณการเคลื่อนที่ของผิววัสดุในภาพภายใต้ภาระดึงสองค่า ซึ่งก็คือการประมาณสนามการขจัด (Displacement field) รอบๆ รอยแตกในรูปของฟังก์ชันของความเข้มแสงที่พิกเซลหนึ่งๆ จากภาพที่ต่อเนื่องกันนั่นเอง ทำให้สามารถหาการขจัดของปลายรอยแตกที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นภายใต้ภาระดึงสองค่าได้

2. Sequential Thresholding โดยก่อนนำภาพมาทำธรสโฮลด์ ต้องนำภาพมาผ่านฟังก์ชันทำให้คมชัด และฟังก์ชันกรองสัญญาณรบกวนแบบลาปลาซก่อน การธรสโฮลด์ของเขาไม่ได้ดำเนินการกับภาพเดี่ยวๆ หนึ่งภาพแบบทั่วไป แต่ใช้ภาพถ่ายเดี่ยวๆ ซึ่งถ่ายต่อเนื่องกันทุกๆ 15 วินาทีมาแกะรอยการกำเนิดและการเติบโตของรอยแตกภายใต้ภาระสลับ (Cyclic loading) โดยภาพแรกเป็นภาพก่อนเกิดรอยแตกและภาพช่วงหลังๆ เป็นภาพหลังจากเริ่มเกิดรอยแตกจนถึงภาพสุดท้ายจะเป็นภาพของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว จากนั้นจึงจะใช้ชุดลำดับของตัวดำเนินการ AND, OR มาดำเนินการบนอนุกรมของเส้นขนานที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นภาพขาวดำ (Binary image) โดยจะได้ผลลัพธ์เป็นอนุกรมของเส้นขนานที่ถูกแบ่งอยู่ระหว่างเส้นรอยแตกได้ ชุดของเส้นขนานนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ขอบ (Profile) ของรอยแตกได้ ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นขนานนี้เรียกว่าความกว้างรอยแตก (Crack spacing) ซึ่งเป็นความหนาแน่นของพิกเซลที่มีความละเอียดสูงกว่าการใช้ฟังก์ชันการปรับแต่งขอบให้เด่นชัดทั่วไป หลังจากนั้นจึงแปลงความหนาแน่นของพิกเซลมาเป็นขนาดในหน่วยมิลลิเมตรได้อย่างแม่นยำจากการเปรียบเทียบกับหมาย (Marker) ที่รู้ขนาดแล้ว แต่อย่างไรก็ดี งานวิจัยของเขาแม้จะมุ่งเน้นไปที่การพยายามหาขนาดและการดำเนินไปของเส้นรอยแตกเพื่อการตรวจวัดขนาดเป็นหลักโดยไม่ได้พิจารณาในเชิงกลศาสตร์การแตกหัก

J.M. Monteiro, M.A.P. Vaz, F.Q. Melo, J.F. Silva Gomes ⁽¹⁰⁾ เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับหาสนามการขจัดรอบ ๆ รอยแตกผิว (Surface crack) ของชิ้นทดสอบวัสดุโพลีเมอร์ ภายใต้ภาระดึงแบบสมมาตรระยะไกลจากรอยแตก (remote tensile stress) การทดลองนี้จะจับรอยแตกโดยใช้วิธีการสร้างภาพฮาโลแกรมจากหลักการแทรกสอด (Holographic interferometry) ด้วยแสงเลเซอร์ชนิดแก๊สอาร์กอน โดยจะเรียกเทคนิคของการสร้างภาพฮาโลแกรมในลักษณะนี้ว่า (Electronic Speckle Pattern Interferometry; ESPI) เทคนิคนี้จะแสดงภาพที่มีลักษณะเป็นเส้นขอบที่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงๆ ตามช่วงของความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ (Fringe pattern) ของสนามการขจัดรอบ ๆ รอยแตก

หลังจากนั้นก็นำภาพดังกล่าวมาผ่านกระบวนการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลบางอย่างเช่น High frequency filtered phase map เป็นต้น จากนั้นก็ทำการวัดขนาดของการขจัดที่ขยายตัวออกของแนวรอยแตกและการเบี่ยงเบนของแนวรอยแตกใส่ลงในสมการที่มีรากฐานมาจากทฤษฎี Line – Spring model ของ Rice และ Lavy และโดยอาศัยอัลกอริทึมของ Gross และ Srawley ที่พัฒนาขึ้นมาจากสมการของ Rice และ Lavy ก็จะสามารถหาตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นสูงสุด ณ

จุดที่ลึกที่สุดของรอยแตกแบบไม่ทะลุภายใต้ภาระดึงแบบสม่ำเสมอที่ระยะไกลจากรอยแตกได้

วิธีการนี้แม้ได้รับการยอมรับในการหาตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น แต่ก็เฉพาะ ณ ตำแหน่งที่ลึกที่สุดของรอยแตกแบบไม่ทะลุ (Part – through crack) เท่านั้น ส่วนในบริเวณอื่นๆก็ ยังมีความยากในการคำนวณอยู่ อีกทั้งยังมีความอ่อนไหวมากต่อความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างทาง กล (Mechanical imperfection inherent) ซึ่งอาจทำให้ได้ภาพที่ผิดไปจากความเป็นจริงจนอาจต้อง มีการทดสอบซ้ำหลายครั้งเพื่อความแน่ใจในความถูกต้องของภาพที่ได้ นอกจากนี้ยังมีค่าดำเนินการ ตลอดจนทักษะในการดำเนินงานที่ค่อนข้างสูงมาก

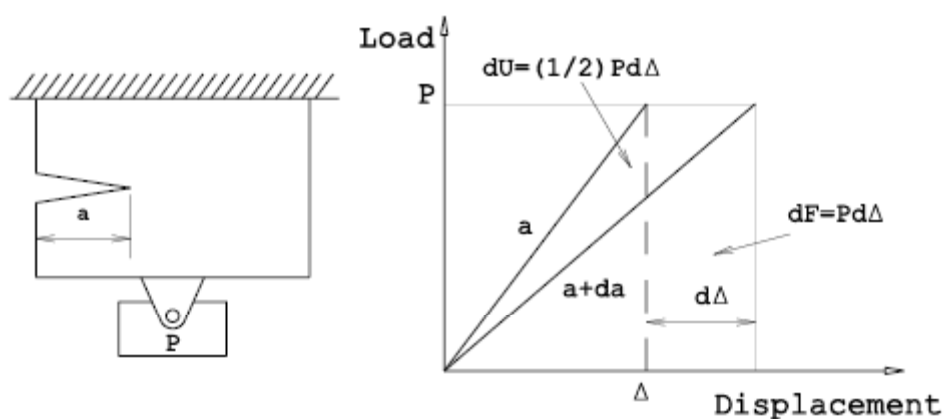
S. Lawson ⁽¹¹⁾ งานวิจัยที่ได้ทุนจาก BRITE – EURAM Project NDT Method for Flaw Detection During Welding โดยเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติเพื่อการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic testing) ชนิด Time – Of Flight Diffraction; TOFD จุด สำคัญในงานวิจัยนี้ คือไม่ใช้การแยกวัตถุในภาพออกจากพื้นหลัง (Segmentation) ของภาพดิจิทัล D – scan แบบทั่วไป ซึ่งไม่สามารถควบคุมความเข้มของระดับสีเทา (Grayscale intensity) ในภาพ ดิจิทัล D – scan ได้ดีพอ แต่เขาใช้การวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิว (Texture analysis) แทน และ ด้วยวิธีการนี้เขาสามารถควบคุมความเข้มของระดับสีเทาได้ดีกว่าเดิม นอกจากนี้เขายังใช้การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) ร่วมด้วยจนทำให้สามารถบ่งชี้รูปแบบ ขนาดและ นัยสำคัญต่างๆของรอยตำหนิจากการเชื่อมได้อย่างทันทั่วทั้งที่กับการเชื่อมจริง และยังพบอีกว่าวิธีนี้ สามารถบ่งชี้รูปแบบของรอยตำหนิได้ในทุกสถานะ (Stage) ของการเชื่อมและแม้แต่ในสถานะของการ เชื่อมที่อุณหภูมิสูง

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีราคาสูง การที่จะให้ได้ภาพดิจิทัล D – scan ที่ดีเพียงพอต่อ การวิเคราะห์นั้นทำได้ยาก เนื่องจากธรรมชาติของสัญญาณเลี้ยวเบนที่มีกำลังอ่อน และได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ตลอดจนไม่สามารถตรวจวัดตำแหน่งชนิดโพรงอากาศได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวัดอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตโดยรูปแบบของการควบคุมภาระ (Load controlled calibration)

วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้วัดอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตได้คือ การวัด อัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตโดยรูปแบบของการควบคุมภาระ P คงที่ ดังนั้นงานเนื่อง ภาระภายนอกจะเท่ากับพลังงานที่ถูกดูดกลืนวิกฤตโดยเนื้อวัสดุ และจะเท่ากับอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตเพื่อให้เกิดผิวยอยแตกบนเนื้อวัสดุนั้นๆ ดังนี้

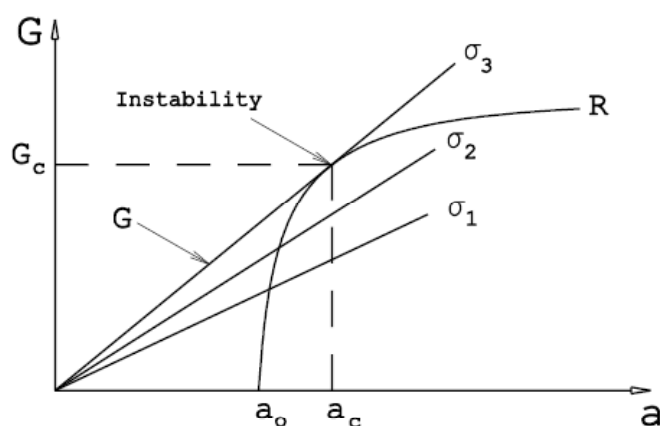


ภาพประกอบ 1 แผ่นชิ้นส่วนภายใต้การควบคุมภาระ

$$G_c = 2W_f = (P / 2B)(d\Delta / da)_p \quad (1)$$

ความไม่เสถียรภาพของรอยแตก (Instability of crack)

รอยแตกจะขยายตัวเมื่อ $G = 2W_f = R$ เมื่อ R คือความต้านทานของวัสดุต่อการขยายตัวของรอยแตก (Material resistance to crack extension) แต่รอยแตกนั้นอาจจะเติบโตแบบเสถียรหรือไม่เสถียรก็ได้ขึ้นอยู่กับว่า G และ W_f นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของรอยแตกอย่างไร ซึ่งถ้าเขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตกของวัสดุเทียบกับรอยแตกที่ขยายตัวออกจะได้เส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งความต้านทาน (Resistance curve) ส่วนเส้นโค้งที่เขียนจากความสัมพันธ์ของอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดเทียบกับรอยแตกที่ขยายตัวออกก็คือเส้นโค้งแรงขับเคลื่อน (Driving force curve)



ภาพประกอบ 2 Rising R curve

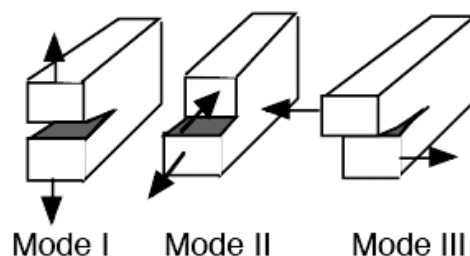
เส้นโค้งดังภาพประกอบ 2 แสดงวัสดุที่มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น σ_1 (รอยแตกจะไม่มีการเติบโตเพิ่มขึ้น) การเติบโตของรอยแตกที่เสถียรก็จะคงดำเนินต่อไปเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นเป็น σ_2 ในที่สุดเมื่อความเค้นมีค่าถึง σ_3 เส้นโค้งของแรงขับเคลื่อน G ก็จะสัมผัสเส้นโค้งความต้านทาน R ดังนั้น รอยแตกที่เติบโตต่อไปจะไม่เสถียรเนื่องจากความชันของอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงขับเคลื่อน G จะมากกว่าความต้านทาน R

สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมเหนียวเข้ามาเกี่ยวข้องแล้วเส้นโค้งความต้านทานก็จะเริ่มเป็นเส้นชันมากขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่มากขึ้นใกล้ๆบริเวณปลายรอยแตก แต่อย่างไรก็ดีถ้าวัสดุประเภทนี้มีขนาดของรอยแตกเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นส่วนแล้ว บริเวณพลาสติกที่ปลายรอยแตกจะมีขนาดเล็กมาก ๆ และความต้านทานจะเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady state) โดยเส้นโค้งความต้านทานจะเริ่มแบบราบเรียบเมื่อมีการขยายตัว สภาวะของการเติบโตของรอยแตกแบบไม่เสถียรจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$(dG / da) > (dR / da) \quad (2)$$

ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น (The stress intensity factor)

รูปแบบของการแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้



ภาพประกอบ 3 รูปแบบทั้งสามของการการแตกหัก

โดยที่ mode I คือ Opening mode, mode II คือ Shearing mode และ mode III คือ Tearing mode และจากการวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) พบว่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับความเค้นเนื่องจากภาระภายนอก และรากที่สองของความยาวรอยแตกที่สามารถถูกบ่งชี้ได้ (Characteristic crack length) สำหรับผู้ที่สนใจรายละเอียดในเชิงลึกสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานของ Rice ⁽¹²⁾ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับรูปแบบ I ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาใน mode I ของการเปลี่ยนรูป โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} และอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤต G_C สำหรับชิ้นทดสอบแบบ Compact specimen ดังนี้

$$\sigma_f = K_{IC} / [a_c] = \sqrt{(EG_{IC} / a_c)} \quad (3)$$

เมื่อเป็นปัญหาแบบความเค้นระนาบ

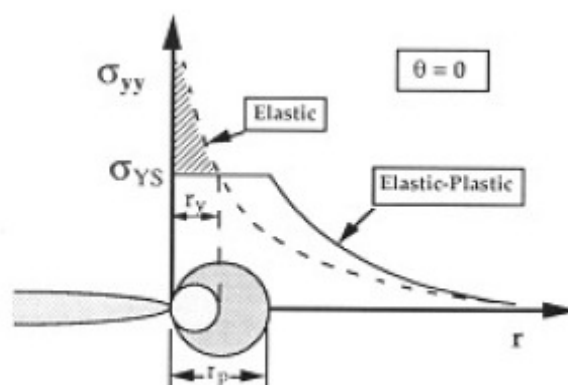
$$K_{IC}^2 = EG_{IC} \quad (4)$$

เมื่อเป็นปัญหาแบบความเครียดระนาบ

$$K_{IC}^2 = EG_{IC} [1 - \nu^2] \quad (5)$$

การเปลี่ยนรูปที่ปลายรอยแตกและขนาดของบริเวณพลาสติก

ภาพประกอบ 4 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกน y เนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกในบริเวณรอบปลายรอยแตก



ภาพประกอบ 4 การกระจายความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกกรอบปลายรอยแตก

ขนาดของบริเวณพลาสติก (Plastic- Zone Size) r_p นั้นประมาณได้จากสมการของสนามความเค้นโดยให้ความเค้นในแนวแกน y หรือ σ_y เท่ากับความแข็งแรงคราก σ_{ys}

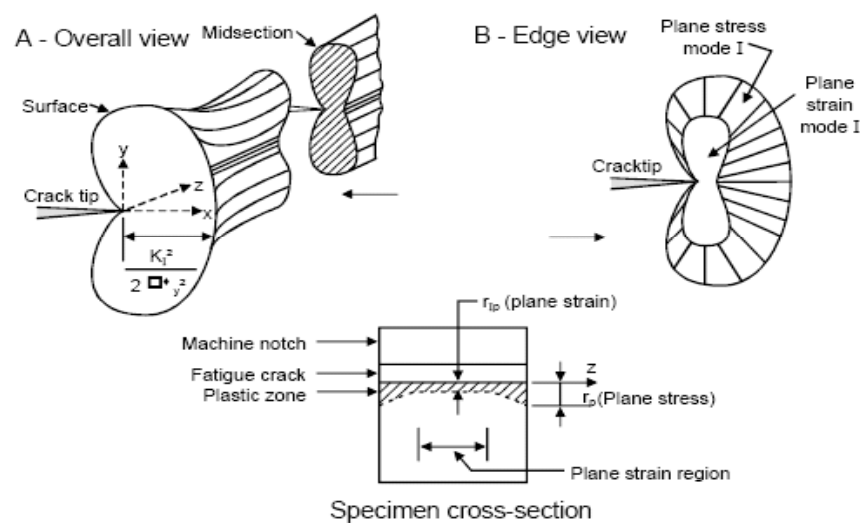
$$r_p = (1 / 2\pi) \cdot (K / \sigma_{ys})^2 \quad (6)$$

Irwin⁽¹²⁾ แนะนำว่าขนาดของบริเวณพลาสติกภายใต้เงื่อนไขความเครียดระนาบจะถูกประมาณได้โดยพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นตั้งเนื่องจากเงื่อนไขบังคับของความเครียด-

-นามแบบยืดหยุ่น และด้วยเงื่อนไขนี้ขนาดของความแข็งแรงคราก σ_{ys} จะเพิ่มขึ้นอีก $\sqrt{3}$ เท่า ดังนั้นขนาดของบริเวณพลาสติกสำหรับเงื่อนไขความเครียดระนาบ คือ

$$r_p = (1 / 6\pi) \cdot (K / \sigma_{ys})^2 \quad (7)$$

สมการทั้งสองนี้ชี้ให้เห็นว่าบริเวณพลาสติกตามแนวผิวของหน้ารอยแตกที่กึ่งกลางความหนาของชิ้นทดสอบจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณพลาสติกตามแนวหน้ารอยแตกที่ใกล้ๆ กับผิวของชิ้นทดสอบ และการเปลี่ยนแปลงขนาดของบริเวณพลาสติกจะแสดงให้เห็นได้ดังภาพประกอบ 5



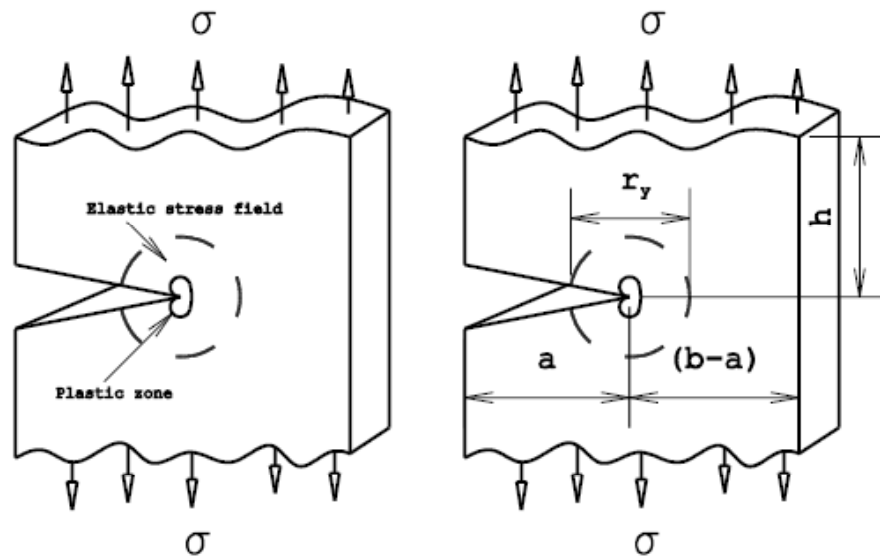
ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงขนาดของบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยแตก

ข้อจำกัดของความเป็นพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

(Plasticity limitations on Linear Elastic Fracture Mechanics)

จากภาพประกอบ 5 ถ้าบริเวณพลาสติกมีขนาดเล็กเพียงพอ (ตามแนวผิวของหน้ารอยแตกที่กึ่งกลางความหนาของชิ้นทดสอบ) ก็จะทำให้เกิดบริเวณที่ถ้าเกิดการแตกหักก็จะมีโอกาสเป็นการแตกหักแบบยืดหยุ่นรอบนอกบริเวณพลาสติกนั้นๆ ได้สูงมาก ในทางปฏิบัติบริเวณพลาสติกจะต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระยะจากปลายรอยแตกไปยังขอบชิ้นส่วน ดังภาพประกอบ 6 โดยจะมีข้อจำกัดของความเป็นพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น คือ

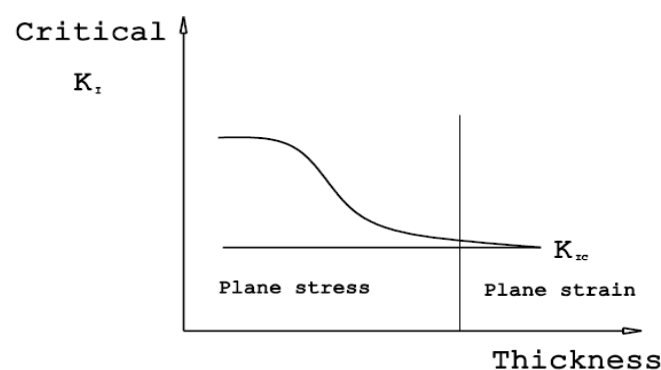
$$a, (b-a), h \geq (4 / \pi) \cdot (K / \sigma_{ys})^2 \quad (8)$$



ภาพประกอบ 6 ข้อจำกัดของความเป็นพลาสติกที่มีผลกระทบต่อการแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

อิทธิพลของความหนาของชิ้นทดสอบ (Effect of specimen dimension)

ถ้าความหนาของชิ้นทดสอบมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับบริเวณพลาสติก การหดตัวของอัตราส่วนปัวส์ซองในทิศทางตามความหนาของแผ่นทดสอบจะเกิดขึ้นอย่างอิสระรอบๆบริเวณปลายรอยแตกจนเกิดเป็นรอยบวมขึ้นมา แต่ถ้าความหนาของชิ้นทดสอบนั้นมีค่ามากพอเมื่อเทียบกับบริเวณพลาสติกแล้ว เนื้อวัสดุในส่วนของที่มีความเค้นเกิดขึ้นน้อยรอบๆปลายรอยแตกจะป้องกันการหดตัวตามแนวขวางของวัสดุภายในบริเวณพลาสติก ซึ่งทำให้ความเครียด ϵ_z มีค่าน้อยลงจนทำให้มีสถานะเป็นเงื่อนไขของความเครียดระนาบและจะเกิดความเค้นดึง σ_z ขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 7 อิทธิพลความหนาของชิ้นทดสอบต่อเงื่อนไขของปัญหาแบบความเครียดระนาบ

จากภาพประกอบ 7 จะเห็นได้ว่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น K_I ใน

กรณีความเค้นระนาบจะสูงกว่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นวิกฤต K_{IC} แต่เมื่อแผ่นขึ้นทดสอบหนาเรื่อยๆขึ้นแล้วตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น K_I ก็จะค่อยๆลดลงจนค่อนข้างหนึ่งเข้าสู่ความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC}

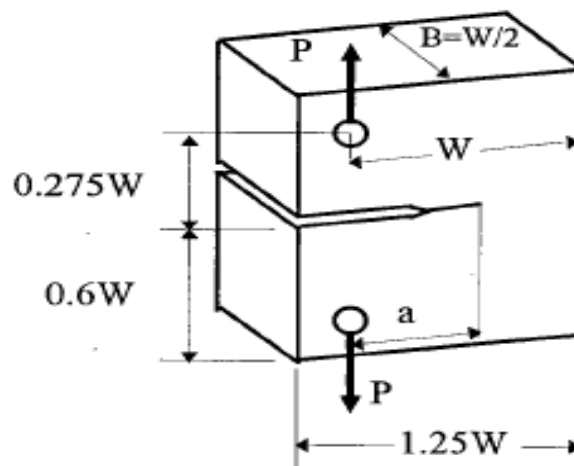
**การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} ด้วย
การทดสอบการดึงตามวิธีระบุใน Recommended Method of Test for Plane Strain Fracture
Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74**

สมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (ASTM) ได้กำหนดวิธีการทดสอบหา K_{IC} ของวัสดุ (Recommended Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74) โดยคณะกรรมการ ASTM ใช้วิธีการวิเคราะห์ของกลศาสตร์แตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นมาเป็นหลักในการกำหนดวิธีการทดสอบ แม้เป็นที่ทราบกันดีว่า การแตกหักในโครงสร้างจริงจะมีผลกระทบจากความเป็นพลาสติกกรรมอยู่ด้วย แต่เมื่อพิจารณาข้อเท็จจริงแล้วจะพบว่าขนาดของบริเวณพลาสติกนั้นๆจะไม่ใหญ่มากนักเมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมโดยทั่วไป

นอกจากนั้นคณะทำงานของคณะกรรมการ ASTM ยังตระหนักว่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นวิกฤต K_C ของวัสดุนั้นจะแปรผันตามความหนาของชิ้นส่วนอยู่ช่วงหนึ่งโดยที่ค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นวิกฤต K_C ของวัสดุจะลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น และจะค่อยๆลดลงสู่ค่าคงที่เมื่อชิ้นงานมีความหนามากพอที่จะเกิดสถานะของความเครียดระนาบและเรียกค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นวิกฤต K_C ของวัสดุว่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} ดังนั้นการที่ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นวิกฤต K_C ของวัสดุจะคงที่โดยไม่แปรผันตามความหนาอีกต่อไปนั้นจึงเพียงพอที่จะอนุมานใช้เป็นค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} และสามารถใช้เป็นสมบัติเชิงกลอีกค่าหนึ่งได้เช่นเดียวกับความเค้นคราก อีกทั้งยังสามารถใช้ค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} ของชิ้นส่วนขนาดเล็กเป็นสมบัติเชิงกลของโครงสร้างขนาดใหญ่ได้

ลักษณะของชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} แนวทางของ ASTM E – 399 – 74

ชิ้นทดสอบโลหะที่นิยมใช้อย่างหนึ่ง (ซึ่งจะใช้ในปริญญานิพนธ์นี้) คือชิ้นทดสอบโลหะที่มีรอยแตกตรงกลางขอบแบบทะลุตลอดความหนา (Edged crack through plate) ภายใต้ภาระดึงตามมาตรฐาน ASTM E – 399 - 74 คือ Compact Test specimen, CT ดังภาพประกอบ 8 จะเป็นเพียงมิติที่สัมพันธ์กันเท่านั้น ดังนั้นขนาดมิติจริงๆจึงต้องใหญ่เพียงพอต่อการเกิดเงื่อนไขของการแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น หรือมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากบริเวณ



ภาพประกอบ 8 ชิ้นทดสอบแบบ Compact Specimen: CT

พลาสติก และเพียงพอต่อการเกิดสถานะความเครียดระนาบ ทั้งนี้เงื่อนไขมิติของชิ้นทดสอบที่จะทำให้
ให้เกิดการแตกหักแบบความเครียดระนาบคือ

$$a \geq 2.5 (K_{IC} / \sigma_{ys})^2 \quad (9)$$

$$B \geq 2.5 (K_{IC} / \sigma_{ys})^2 \quad (10)$$

$$W \geq 5.0 (K_{IC} / \sigma_{ys})^2 \quad (11)$$

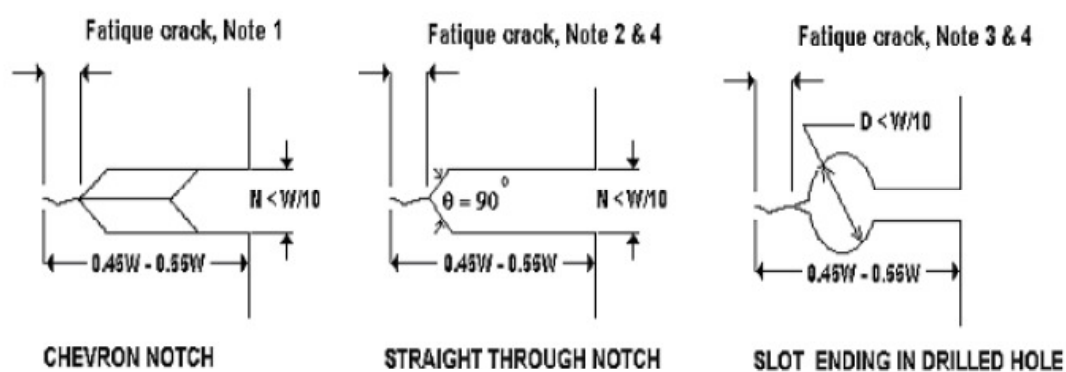
การที่มีมิติต่างๆล้วนเป็นฟังก์ชันของ K_{IC} ด้วยจึงทำให้การกำหนดมิติของชิ้น
ทดสอบเป็นไปในลักษณะของการลองผิดลองถูก (Trial – and – error) ในเบื้องต้น เป็นเหตุให้การ
ทดสอบต้องใช้ชิ้นงานขนาดใหญ่ไว้ก่อนเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเป็นการทดสอบเพื่อหาค่า K_{IC} มิใช่ค่า K_C
หรือมิฉะนั้นก็จะใช้ชิ้นทดสอบขนาดเท่าโครงสร้างจริงๆที่ใช้ในภาคสนาม

แต่อย่างไรก็ตามตาราง 1 ก็สามารถให้ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับ
เหล็กความแข็งแรงสูง (High – strength steel; $\sigma_{ys} \geq 1000$ MPa) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อ σ_{ys}
มีค่าน้อยจะต้องใช้ชิ้นทดสอบที่หนาขึ้น แต่สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างบางประเภท เช่น ผนังห้อง
เรือและภาชนะความดันซึ่งมักใช้เหล็กความแข็งแรงต่ำถึงปานกลางและมักจะมีขนาดบางกว่าค่าที่
ปรากฏในตาราง 1 ดังนั้นชิ้นส่วนของโครงสร้างประเภทนี้จึงเกิดการแตกหักแบบผสม (Mixed Mode
or Mode - III of fracture) และไม่อาจนำความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} มาใช้ในการออกแบบ
ชิ้นส่วนโครงสร้างประเภทนี้ได้

ตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง

σ_{ys} / E	ความหนาต่ำสุด (มม.)
0.0050 – 0.0057	75.0
0.0057 – 0.0062	63.0
0.0062 – 0.0065	50.0
0.0065 – 0.0068	44.0
0.0068 – 0.0071	38.0
0.0071 – 0.0075	32.0
0.0075 – 0.0080	25.0
0.0080 – 0.0085	20.0
0.0085 – 0.0100	12.5
>0.0100	6.5

ลักษณะรอยบากของชิ้นทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 9 ซึ่งจะพบว่ามีรอยบาก 3 ประเภท คือรอยบากแบบปีกนก (Chevron), รอยบากแบบรูกุญแจ (Keyhole) และรอยบากแบบตรงตลอด (Straight through)



ภาพประกอบ 9 แสดงรอยบากแบบปีกนก, แบบตรงตลอด และแบบรูกุญแจ

วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดราบ K_{Ic} ตามแนวทางของ ASTM E – 399 – 74

ภายหลังจากที่ผลิตชิ้นทดสอบตามขนาดที่คำนวณได้ แล้วขั้นตอนการทดสอบจะประกอบด้วย

1. การทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue crack) โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้รอยแตกที่คมที่สุด (รัศมีปลายรอยแตกเป็นศูนย์) และสามารถสร้างรอยแตกที่เหมือนกันได้เมื่อทดสอบต่างห้องปฏิบัติการกันและควรได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของ K_{IC} ไม่เกิน 15% รอยแตกนี้สามารถทำได้โดยให้ชิ้นทดสอบรับภาระแบบวัฏจักรจนเกิดรอยแตกที่ขยายตัวขนาดความยาวไม่น้อยกว่า $0.05W$ ดังภาพประกอบ 9 ในช่วงสุดท้ายของการเกิดรอยแตกแล้วจะต้องควบคุมภาระไม่ให้สูงมากเกินไปโดยเกณฑ์ที่กำหนดภาระคือ

$$K_{max} < 0.6 K_Q \quad (12)$$

เมื่อ K_{max} คือตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นสูงสุดขณะขึ้นทดสอบรับภาระแบบวัฏจักร และ K_Q คือ K_{IC} ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น (ยังไม่ได้พิสูจน์ยอมรับว่า K_Q คือ K_{IC} จริง)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์การวัด (Instrument) การติดตั้งขึ้นทดสอบบนอุปกรณ์จับยึดบนเครื่องทดสอบการดึงจะต้องให้เกิดการเยื้องศูนย์ของแนวการดึงและความผิดที่จุดรองรับน้อยที่สุด ค่าที่ต้องวัดในการทดลอง คือ ระยะเปิดออกของรอยแตกซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นแตกหักแบบไม่เสถียร โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะเปิดออกของรอยแตกคือ Extensometer แบบ Clip gauge ดังภาพประกอบ 10

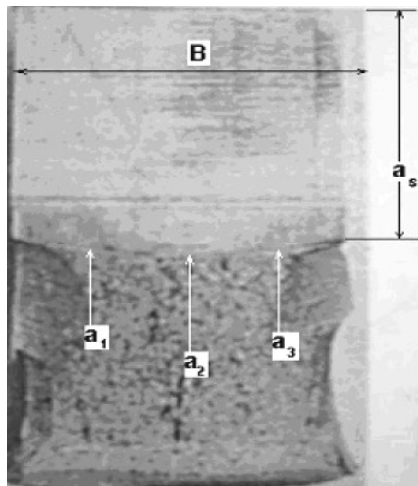


ภาพประกอบ 10 Clip – On Extensometer และลักษณะการติดตั้งบนชิ้นทดสอบ

3. การทดสอบ (Testing) สิ่งสำคัญของการทดสอบคือ ต้องระวังอย่าให้เกิดเยื้องศูนย์ และรักษาอัตราการให้ภาระให้อัตราการเพิ่ม K_I อยู่ในช่วง $0.55 - 2.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ เพื่อให้เป็นเงื่อนไขของภาระแบบสถิตโดยปริมาณที่บันทึกได้ในการทดสอบนี้คือความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการเปิดอ้าของรอยแตกแล้วพล็อตกราฟลงบนแกน y และ x ตามลำดับ และจะต้องปรับสเกลให้มีความชันระหว่าง $0.7 - 1.5$

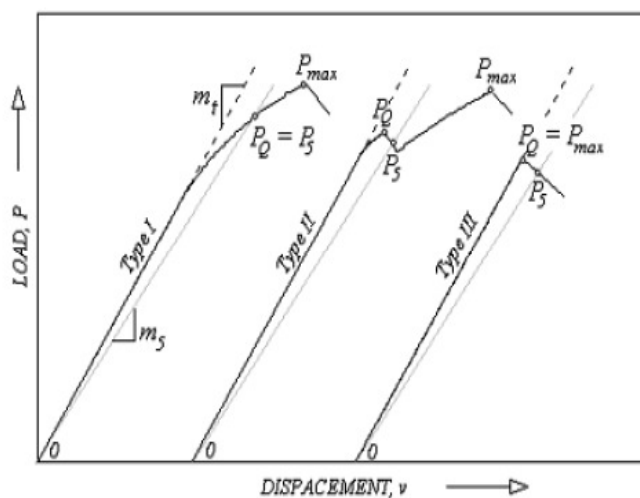
ภายหลังการแตกหักให้วัดค่า B , W , S , a_s และความยาวรอยแตกเนื่องจาก

ความล้าโดยเฉลี่ยจากค่า a_1 , a_2 , a_3 ในภาพประกอบ 11 การทดสอบที่ยอมรับได้นั้น a_s ต้องไม่ต่างจากความยาวรอยแตกเนื่องจากความล้าโดยเฉลี่ยจากค่า a_1 , a_2 , a_3 เกิน 10%



ภาพประกอบ 11 ผิวของการแตกหักแบบเปราะ

4. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล (Recording and analysis) โดยผลการทดสอบที่บันทึกได้คือ ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการเปิดอ้าของรอยแตกซึ่งวัสดุโดยทั่วไปจะไม่มีสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ จึงมักจะปรากฏเป็นเส้นโค้งในการเขียนกราฟเป็น 3 แบบ ดังภาพประกอบ 12 โดยค่า P_Q ในกราฟเป็นภาระที่ต้องใช้ในการคำนวณหา K_Q ซึ่งค่า P_Q นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลที่ได้และหาได้โดยการลากเส้นตรงให้มีความชันลดลง 5% จากความชันในช่วงยืดหยุ่นไปตัดกราฟ ภาระที่จุดตัดคือ P_5



ภาพประกอบ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระและการเปิดอ้าของรอยแตก

- ถ้าภาระทางซีกซ้ายของจุด P_5 น้อยกว่าที่จุด P_5 ตลอดเวลาแล้วค่า P_Q คือ P_5 (แบบที่ 1)

- ถ้าภาระทางซีกซ้ายของจุด P_5 มากกว่าที่จุด P_5 แล้วค่า P_Q คือ ภาระที่สูงที่สุดที่เกิดทางซีกซ้ายของจุด P_5 (แบบที่ 2 และแบบที่ 3)

แต่อย่างไรก็ตามเส้นโค้งทั้ง 3 แบบ จะเป็นที่ยอมรับเพื่อให้เกิดเงื่อนไขของความเครียดราบก็ต่อเมื่อ $P_{max} / P_Q < 1.10$ เท่านั้น

5. การคำนวณหาค่า K_Q (Determination for K_Q) โดยค่า K_Q คือ ค่าที่เป็นตัวแทนเริ่มต้นของ K_{IC} (K_Q จะกลายเป็น K_{IC} ภายใต้เงื่อนไขต่างๆซึ่งจะได้กล่าวต่อไป) สำหรับชั้นทดสอบแบบ CT;

$$K_Q = \zeta P_Q / \sqrt{BW} \quad (13)$$

เมื่อ ζ คือตัวประกอบการคูณที่สัมพันธ์กับสัดส่วน a / W ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการคูณ ζ และ a / W สำหรับชั้นทดสอบ CT

a / W	ζ
0.450	8.34
0.455	8.45
0.460	8.57
0.465	8.69
0.470	8.81
0.475	8.93
0.480	9.06
0.485	9.19
0.490	9.32
0.495	9.46
0.500	9.60
0.505	9.75
0.510	9.90
0.515	10.05
0.520	10.21
0.525	10.37
0.530	10.54

0.535	10.71
0.540	10.89
0.545	11.07
0.550	11.26

6. พิสูจน์เพื่อการยอมรับค่า K_Q (Proof the K_Q) เนื่องจาก การกำหนดมิติต่างๆของชิ้นทดสอบจะขึ้นอยู่กับค่า K_{IC} และ ในขณะเดียวกันค่า K_{IC} เองก็เป็นค่าที่ต้องการหาด้วย ดังนั้นการทดสอบจึงกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับไปมาแบบลองผิดลองถูก (Trial – and – error) ซึ่ง K_Q จะกลายเป็น K_{IC} ก็ต่อเมื่อ

$$B \geq 2.5 (K_{IC} / \sigma_{ys})^2 \quad (14)$$

ถ้าสมการ (14) ไม่เป็นจริงก็ต้องทำการทดสอบใหม่โดยใช้ชิ้นทดสอบที่หนาขึ้น

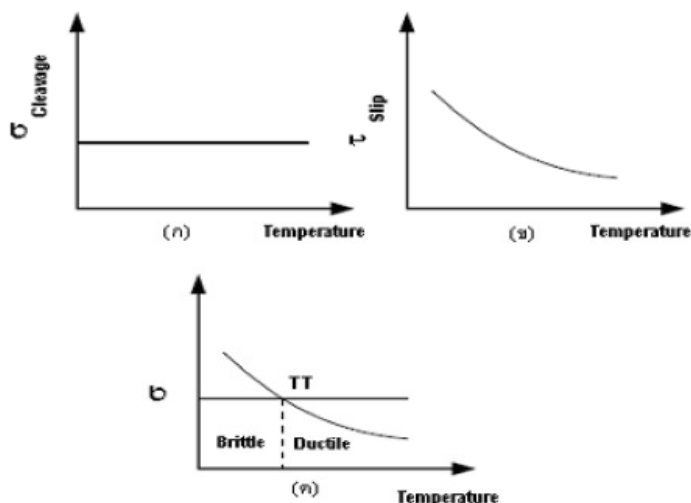
การหาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} ด้วยการทดสอบแบบกระแทกของชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Determining for K_{IC} by Charpy V – Notch Impact Test)

ถ้าในการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} ตาม Recommended Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74) ได้รับผลกระทบจากสภาวะหลายๆประการของการทดสอบจริงๆ จนทำให้ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เช่น เมื่อความแข็งแรงของอุปกรณ์จับยึดน้อยกว่าตัวแผ่นชิ้นทดสอบ หรือจากตาราง 1 ถ้าอัตราส่วน σ_{ys} / E จากการทดสอบการดึงสถิตคงที่บ่งชี้ว่าขนาดความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน S45C นั้น ใหญ่เกินไปจนทำให้ชิ้นทดสอบที่มีรอยบากที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ K_{IC} มีน้ำหนักมากเกินไปจนขีดจำกัดของเครื่องทดสอบการดึงแล้ว ค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} ยังสามารถหาได้จากการทดสอบแบบกระแทกของชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Charpy V – Notch Impact Test) ซึ่งระบุใน Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000 แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นเพียงวิธีการทางเลือกเท่านั้น

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียด

ระนาบ K_{Ic}

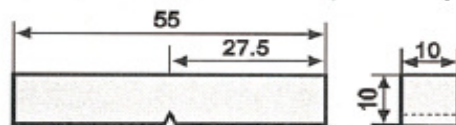
ความเค้นฉีกที่ทำให้อะตอมฉีกขาดแบบ Cleavage นั้นไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ในขณะที่ความเค้นเฉือนที่ทำให้ Slip นั้นแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิดังภาพประกอบ 13 (ก) และภาพประกอบ 13 (ข) ตามลำดับ และเมื่อรวมภาพประกอบทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้เป็นภาพประกอบ 13 (ค) ด้านล่าง ถ้าอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดตัดของเส้นโค้งทั้งสอง วัสดุนั้นจะเปราะโดยมีโอกาสดำเนิน Cleavage ก่อนเกิด Slip แต่ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดตัดของเส้นโค้งทั้งสอง วัสดุจะแตกหักโดย Slip อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะนี้จะเรียกว่า Transition temperature (TT)



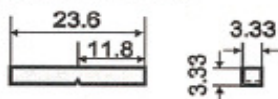
ภาพประกอบ 13 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อ Cleavage และ Slip

การทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากวีของชาร์ปี (Charpy V – Notch Impact Test; CVN – Impact Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติการแตกหักของวัสดุ โดยวัดพลังงานดูดกลืนในกระบวนการแตกหักเมื่อรับภาระกระแทก ทั้งนี้ชิ้นทดสอบจะถูกบากเป็นร่องแบบวี ดังภาพประกอบ 14 ตามที่ระบุใน JIS Z 2202 (1968) Standard for Ferrous Metallic Materials ซึ่งสอดคล้องกับ ASTM E 23 Standard Methods for Notched Bar Impact Testing for Metallic Materials และจากการทดสอบ CVN – Impact Test จะพบว่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนสำหรับการแตกหักนั้นแปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งหมายความว่าความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{Ic} นั้นจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังภาพประกอบ 15

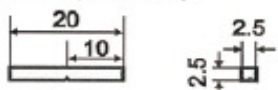
Full-size (Surveillance test specimen)



Subsize (1/3 size)



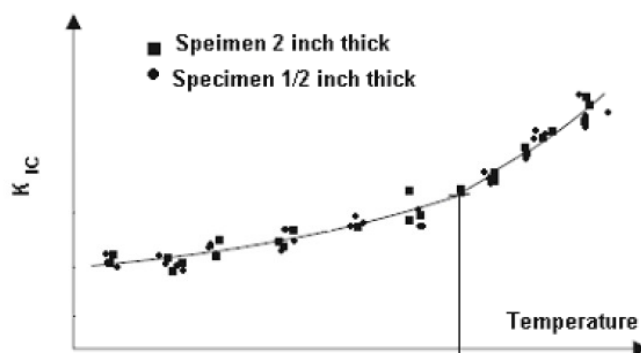
Subsize (1/4 size)



Unit : mm

ภาพประกอบ 14 ชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีทั้งแบบขนาดปกติและขนาดย่อส่วน

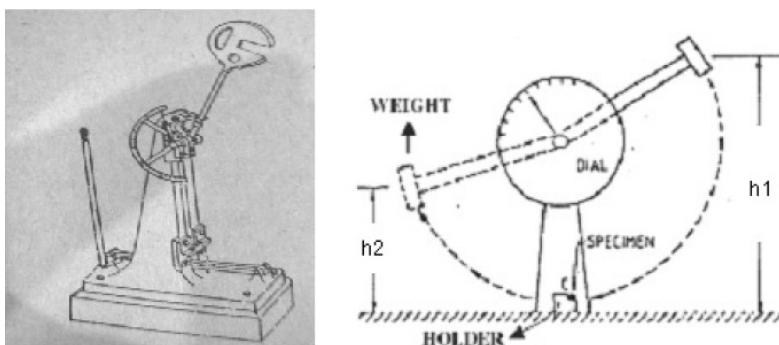
อุณหภูมิที่ทำให้ K_{IC} เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมนี้จะแตกต่างจากอุณหภูมิที่ทำให้ CVN เปลี่ยนแปลงโดยเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ K_{IC} เปลี่ยนแปลงนี้ว่า K_{IC} transition temperature ซึ่งปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับพฤติกรรมระดับจุลภาค คือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า TT นั้นพฤติกรรมการแตกหักระดับจุลภาคที่ปลายรอยแตกจะเป็น Cleavage และจะเปลี่ยนเป็น Slip เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ภาพประกอบ 15 K_{IC} transition temperature

การทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Charpy

V – Notch Impact Test)

ในการทดสอบนี้ชิ้นทดสอบซึ่งเป็นชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีจะถูกลงบนแท่นจับชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่ำสุดของทางวิ่งของตุ้มน้ำหนัก(Striker) w ซึ่งมีลักษณะเป็นใบมีดในตัว ทั้งนี้การวางชิ้นทดสอบจะวางให้ด้านที่มีรอยบากอยู่ด้านตรงกันข้ามกับด้านที่จะถูกตีให้หัก ดังภาพประกอบ 16 หลังจากนั้นยกตุ้มน้ำหนักขึ้นจนมีความสูง h_1 แล้วปล่อยลงมาตีชิ้นทดสอบให้หัก

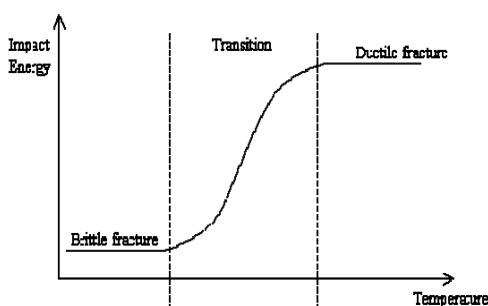


ภาพประกอบ 16 เครื่องทดสอบ Charpy V – Notch Impact Test

เป็น 2 ท่อนและสมมุติว่าหลังจากตีชิ้นทดสอบจนหักแล้วตุ้มน้ำหนักจะยังคงแกว่งขึ้นไปจนถึงระดับความสูง h_2 ดังนั้นจะหาพลังงานที่ใช้ในการตีชิ้นทดสอบจนหัก ซึ่งสมมุติให้เท่ากับพลังงานที่ถูกดูดกลืนในการแตกหักของชิ้นทดสอบดังกล่าวได้จาก $(h_1 - h_2) w$

การทดสอบแบบ Charpy V – Notch Impact Test นี้อาจให้รอยแตกเป็นแบบเปราะ ซึ่งเมื่อสังเกตดูที่ผิวรอยแตกด้านตัดขวางของชิ้นทดสอบจะเห็นเป็นผิวขรุขระคล้ายเม็ดทรายเล็กๆ สีเทาจืด รอยแตกหักและเมื่อสังเกตดูที่ผิวรอยแตกด้านข้างของชิ้นทดสอบก็จะไม่เห็นผิวที่เป็นริ้ว ๆ ของการหลุดตัว หรืออาจให้รอยแตกเป็นแบบเหนียวซึ่งเมื่อสังเกตดูที่ผิวรอยแตกในด้านตัดขวางของชิ้นทดสอบจะเห็นเป็นผิวขรุขระคล้ายเม็ดทรายเล็กๆ เฉพาะตรงกลางสลับกับริ้วของผิวเม็ดทรายละเอียดกว่าสีเทาเข้ม และที่ขอบของหน้าตัดจะเป็นครีปที่เกิดจากการฉีกเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และเมื่อสังเกตดูที่ผิวรอยแตกในด้านข้างของชิ้นทดสอบจะเห็นผิวที่เป็นริ้ว ๆ ที่เกิดจากการหลุดตัว (Shear slip) บางครั้งอาจพบรอยแตกทั้งสองแบบเกิดผสมกันก็ได้

เมื่อทดสอบตีชิ้นทดสอบหลายชิ้นที่ต่างอุณหภูมิกันแล้วก็จะได้เส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะดังภาพประกอบ 17 เส้นโค้งราบด้านล่างแสดงส่วนที่เป็นพฤติกรรมแตกหักเปราะหรือ Mode I ส่วนเส้นโค้งราบด้านบนแสดงเป็นส่วนของพฤติกรรมแตกหักเหนียวหรือ Mode II



ภาพประกอบ 17 เส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะ

การประมาณค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบกระแทกของชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Determination for K_{IC} by CVN data)

ค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} สามารถถูกประมาณได้จากข้อมูลการดูดกลืนพลังงานการแตกหักของชั้นทดสอบโลหะ CVN จากการทดสอบแบบกระแทกของชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีได้ดังนี้

1. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานที่ถูกดูดกลืน CVN จากการทดสอบแบบกระแทกบนชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวี (Charpy V- notch impact energy) และอุณหภูมิที่สัมพันธ์กัน

2. หาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} จากกราฟความสัมพันธ์ตามสมการ (15) ดังนี้

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp [0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad (15)$$

เมื่อ K_{IC} เป็นความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุแบบความเครียดระนาบ หน่วยเป็น $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ และ T_{ref} เป็นอุณหภูมิอ้างอิง (Reference temperature) ที่ให้ค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุจากการทดสอบกระแทกบนชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี CVN เป็น 20 J ซึ่งเป็นอุณหภูมิช่วงเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะสำหรับเหล็กคาร์บอนโดยความสัมพันธ์ตามสมการ (15) นี้ เป็นความสัมพันธ์ที่ได้ผ่านการปรับปรุงในเชิงความถูกต้องโดยถูกกำหนดเป็น Draft API 579 และถูกอ้างอิงอยู่ใน Section III และ IV ของ ASME Boiler and Pressure Vessel Code

การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลในการวิเคราะห์รอยแตก (Applications of digital image processing for crack analysis)

กระบวนการจับภาพแบบดิจิทัล (Digital image capturing - process)

กระบวนการดึงข้อมูลภาพแบบดิจิทัลจะเริ่มจากแหล่งพลังงาน ซึ่งในที่นี้คือแสงสว่าง (Illumination sources) ส่งมากระทบบนผิววัตถุ (Scene element) แล้วสะท้อนเข้าสู่หน้าเลนส์ของกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล (Imaging system) เมื่อแสงสะท้อนตกกระทบบนที่ระนาบรับภาพ (Image plane) ซึ่งเป็นแผงหน่วยรับแสงทางอิเล็กทรอนิกส์ที่โดยมากเป็นชนิดซีซีดี (Charge - couple device; CCD) ซึ่งเรียงตัวกันเป็นตาราง แล้วซีซีดีแต่ละหน่วยจะแปลงความเข้มแสง (Light intensity) ไปเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขหรือสัญญาณแบบดิจิทัลโดยระบุค่าความเข้มแสงลงในช่องตารางรับค่าตัวเลข (Digitizing - image plane) ที่ตรงกันกับแผงตารางของซีซีดี และ เมื่อกดชัตเตอร์

แล้วกล้องถ่ายภาพแบบดิจิตอลจะจับภาพ (Capture) จากแผงตารางของซีซีดี โดยหน่วยประมวลผล (CPU) ภายในกล้องถ่ายภาพแบบดิจิตอลจะบันทึกตารางรับค่าตัวเลขทั้งหมดลงหน่วยความจำในรูปแบบไฟล์ภาพนามสกุลต่างๆ ซึ่งกล้องถ่ายภาพแบบดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะบันทึกภาพเป็นนามสกุล JPEG

กระบวนการแปลงภาพสัญญาณต่อเนื่องไปเป็นภาพสัญญาณดิจิตอล

(Process for transform analog image - to - digital image)

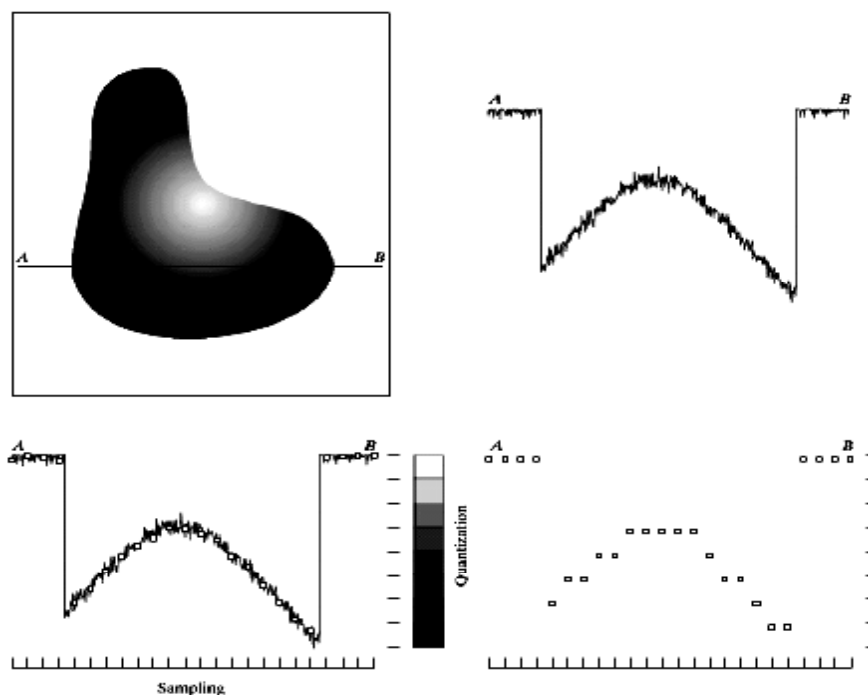
ในทางคณิตศาสตร์แล้วภาพสัญญาณแบบต่อเนื่องสามารถถูกแทนได้ด้วยฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง $f(x,y)$ ที่ขึ้นกับตำแหน่งของคู่อันดับ $x - y$ ซึ่งถูกสมมุติให้กรอบอ้างอิงบนตารางรับค่าตัวเลขและขนาดของความเข้มแสงที่คู่อันดับ $x - y$ นั้นๆ กระบวนการที่ใช้แปลงภาพสัญญาณแบบต่อเนื่องไปเป็นภาพสัญญาณแบบดิจิตอลนั้นจะประกอบด้วย 2 กระบวนการที่ร่วมกันคือ

1. การสุ่มตำแหน่งของคู่อันดับ $x - y$ บนตารางรับค่าตัวเลข (Sampling)

อาจเรียกว่าการดิจิไทซ์ตำแหน่งของคู่อันดับ $x - y$ บนตารางรับค่าตัวเลข (Digitizing the coordinates)

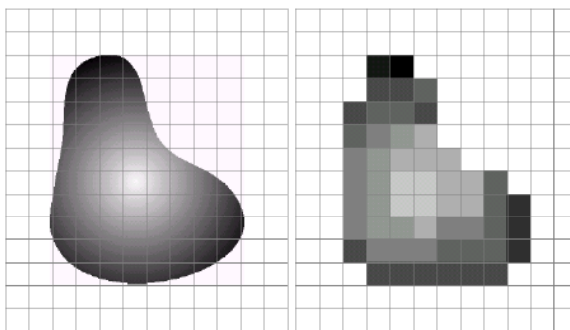
2. การควอนไทเซชัน (Quantization) ค่าของความเข้มแสงที่คู่อันดับ $x - y$

ที่ได้จากการสุ่มตำแหน่ง หรืออาจจะเรียกว่าการดิจิไทซ์แอมพลิจูดค่าของความเข้มแสง (Digitizing the amplitudes)



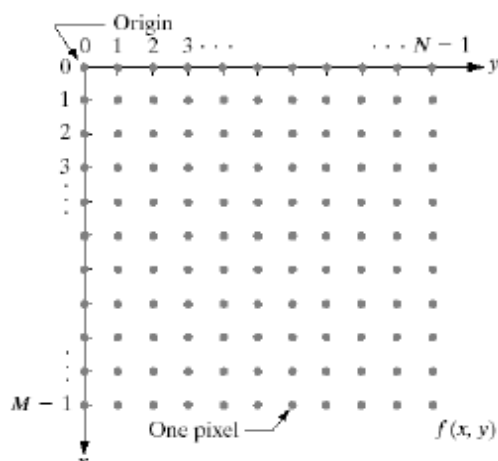
ภาพประกอบ 18 กระบวนการแปลงภาพสัญญาณแบบต่อเนื่องไปเป็นภาพสัญญาณแบบดิจิตอล

พิจารณาภาพประกอบ 18 เส้นสแกน (Scan line) A - B ที่ลากผ่านภาพวัตถุจะถูกใช้แสดงให้เห็นแนวความคิดของกระบวนการสุ่มตำแหน่งของคู่อันดับ $x - y$ บนตารางรับค่าตัวเลข และกระบวนการควอนไทเซชันของความเข้มแสงที่คู่อันดับ $x - y$ ที่ได้จากการสุ่มตำแหน่ง



ภาพประกอบ 19 ภาพสัญญาณแบบดิจิทัลผลลัพธ์ที่ได้จากการ Sampling และ Quantization

พิจารณาภาพประกอบ 19 จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเลื่อนเส้นสแกน A - B ในภาพประกอบ 18 จากบนลงล่าง ซึ่งจะเห็นว่าภาพสัญญาณแบบดิจิทัลผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ต่อเนื่องหรือไม่ราบเรียบ และจากลักษณะธรรมชาติของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องนี้จึงสามารถแทนฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง $f(x,y)$ ได้ด้วยแมทริกซ์ของจำนวนจริง (Matrix of real number)



ภาพประกอบ 20 ระบบคู่อันดับที่นิยมใช้แทนภาพสัญญาณแบบดิจิทัล

เมื่อ M คือจำนวนแถว (Row) และ N คือจำนวนสดมภ์ (Column) ของกรอบอ้างอิง

(Reference -frame) ของระบบคู่อันดับ โดยเราจะเรียกแต่ละคู่อันดับในภาพประกอบ 19 ว่าหน่วยภาพหรือพิกเซล (Picture element or Pixel) และภาพประกอบ 20 จะแสดงระบบคู่อันดับที่นิยมใช้แทนภาพสัญญาณแบบดิจิทัลซึ่งมีจุดกำเนิดที่มุมบนซ้าย โดยจะสแกนจากซ้ายไปขวาและจากบนลงล่างตามลักษณะของการสแกนโดยซีซีดี (ซึ่งลักษณะของระบบคู่อันดับนี้จะต่างจากระบบคู่อันดับที่ใช้กับภาพสัญญาณแบบแอนะล็อกคือมีจุดกำเนิดที่มุมล่างซ้าย) ทั้งนี้ความละเอียดเชิงพิกเซลหรือเชิงระยะ (Spatial resolution) จะขึ้นกับการสุ่มตำแหน่งของคู่อันดับ $x - y$ บนตารางรับค่าตัวเลข

พิกเซลแต่ละพิกเซลสามารถมีค่าระดับของความเข้มแสงได้หลายระดับขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของความเข้มแสง k โดยมีรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$L = 2^k \quad (16)$$

ระดับของความเข้มแสง k นั้นมักนิยมอ้างอิงจากการแบ่งระดับความอ่อน – แก่ของความเข้มแสงโดยมักกำหนดให้สีดำคือระดับของความเข้มแสงน้อยที่สุดและสีขาวคือระดับของความเข้มแสงมากที่สุด ดังนั้นระดับของความเข้มที่อยู่ระหว่างความเข้มแสงน้อยที่สุดและความเข้มแสงที่มากที่สุดจึงเป็นสีเทาที่มีหลายระดับ ด้วยเหตุนี้ทำให้เรานิยมเรียกความละเอียดของความเข้มแสง k ว่าความละเอียดของระดับสีเทา (Gray – level resolution) โดยมีหน่วยเป็นบิต (Bit) และเรียกระดับของความเข้มแสง L ว่าระดับสีเทา (Gray level) ศัพท์ทั้งสองคำนี้ก็เป็นที่นิยมใช้บ่งชี้ความลึกสีได้แม้จะเป็นภาพสีก็ตาม ทั้งนี้ความละเอียดของระดับสีเทาจะขึ้นอยู่กับการควอนไทเซชันค่าของความเข้มแสงที่คู่อันดับ $x - y$ นั้นๆ

ผลกระทบจากความละเอียดเชิงจำนวนพิกเซล และความละเอียดของระดับสีเทาคือภาพสัญญาณดิจิทัล

1. ผลกระทบจากการลดจำนวนพิกเซลบนภาพสัญญาณดิจิทัล (Subsampling)
โดยลบพิกเซลแบบแถวเว้นแถว และสลับแถวสลับจากภาพสัญญาณดิจิทัลต้นฉบับขนาดใหญ่ไปเป็นภาพสัญญาณดิจิทัลขนาดเล็ก จะทำให้ขนาดของภาพสัญญาณจะเล็กลงเนื่องจากพิกเซลที่น้อยลง
2. ผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนพิกเซลบนภาพสัญญาณดิจิทัล (Resampling)
โดยเพิ่มพิกเซลแบบแถวเว้นแถว และสลับแถวสลับจากภาพสัญญาณดิจิทัลต้นฉบับขนาดเล็กไปเป็นภาพสัญญาณดิจิทัลขนาดใหญ่ จะทำให้พิกเซลในภาพสัญญาณแตกตัว โดยจะเรียกปรากฏการณ์ที่พิกเซลต่างๆในภาพสัญญาณแตกตัวอย่างชัดเจนนี้ว่า Checkerboard pattern effect
3. ผลกระทบจากการลดระดับสีเทานภาพสัญญาณดิจิทัล จะทำให้ความลึกสีบนภาพสัญญาณหายไปจนมองเห็นเฉพาะส่วนที่เป็นขอบของวัตถุภาพที่ตัดกันอย่างชัดเจนเท่านั้น แต่จะมองไม่เห็นรายละเอียดในส่วนต่างๆของภาพที่มีระดับสีเทากลิ่นๆกัน โดยจะเรียกปรากฏการณ์ดัง

กล่าวนี้ว่า False contouring effect

ดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปเป็นหลักการคร่าว ๆ เพื่อให้ได้ภาพสัญญาณดิจิทัลที่เล็กที่สุดและมีคุณภาพสมเหตุสมผล คือ เลือกให้ภาพสัญญาณดิจิทัลมีขนาด 256 X 256 พิกเซล และมีระดับสีเทาเป็น 64

การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่กระทำต่อจุดพิกเซลที่สนใจโดยตรง (Digital image processing by point processing)

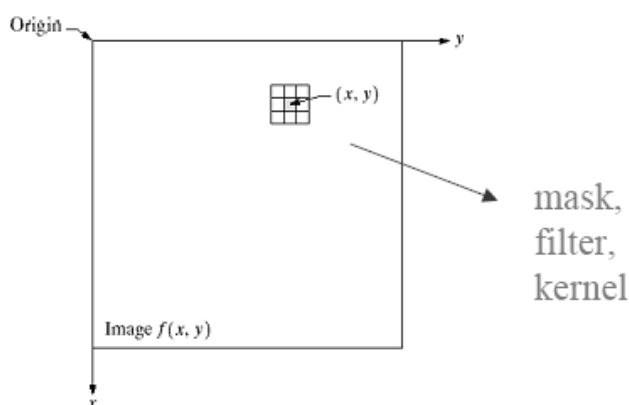
ภาพสัญญาณต่อเนื่อง (Analog signal) $f(x,y)$ สามารถถูกแทนได้ด้วยภาพสัญญาณดิจิทัล (Digital signal) ในรูปแบบ Matrix ของจำนวนจริง $f(x,y)$ โดย (x,y) เป็นคู่อันดับของจำนวนจริง และ f เป็นฟังก์ชันที่กำหนดค่าระดับสีเทา I ที่คู่อันดับนั้นๆ โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = f(x,y) \quad (17)$$

ภาพสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าระดับสีเทาใกล้เคียงกันทั่วทั้งภาพอย่างสม่ำเสมอจะเป็นภาพสัญญาณดิจิทัลที่มีความเปรียบต่าง (Contrast) และมีความหลากหลายของเฉด (Tone) มาก

การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่กระทำต่อพิกเซลข้างเคียงที่ล้อมรอบจุดพิกเซลที่สนใจ (Digital image processing by neighborhood processing)

ในการประมวลผลภาพดิจิทัลนั้นนิยมบ่งชี้พิกเซลข้างเคียงที่ล้อมรอบจุดพิกเซลที่สนใจ (x,y) โดยใช้กรอบตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 X 3 ซึ่งมีจุดพิกเซลที่สนใจ (x, y) เป็นจุดศูนย์กลางของกรอบตารางสี่เหลี่ยมดังรูปด้านล่างนี้



ภาพประกอบ 21 กรอบตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 X 3 ที่ใช้บ่งชี้พิกเซลข้างเคียง

การประมวลผลภาพดิจิทัลที่กระทำต่อพิกเซลข้างเคียงที่ล้อมรอบจุดพิกเซลที่สนใจนั้นสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (18)$$

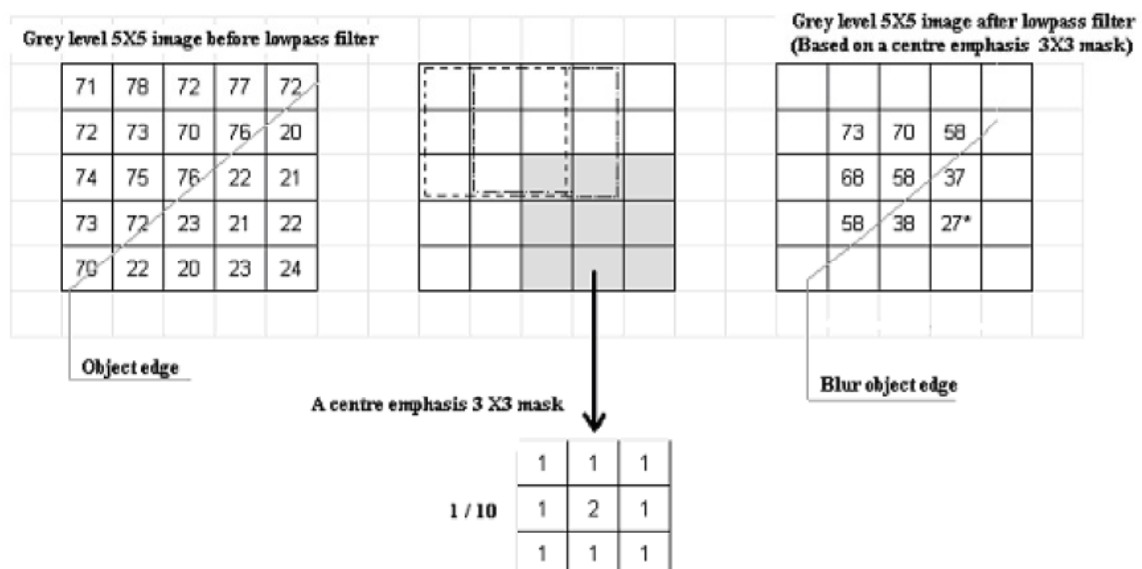
เมื่อ g เป็นภาพสัญญาณดิจิทัลที่ผ่านการประมวลผลภาพแล้ว,

f เป็นภาพสัญญาณดิจิทัลต้นฉบับ และ

T เป็นตัวดำเนินการ (Operator) ต่อฟังก์ชันที่นิยามให้ครอบคลุมทุกพิกเซลข้างเคียงที่ล้อมรอบจุดพิกเซลที่สนใจโดยส่วนใหญ่จะเป็นการกรองสัญญาณรบกวน เราจึงมักเรียกความสัมพันธ์ตามสมการ (18) ข้างบนนี้ว่าตัวดำเนินการกรอง (Filter)

การทำงานของตัวดำเนินการกรอง (Mechanism of filter)

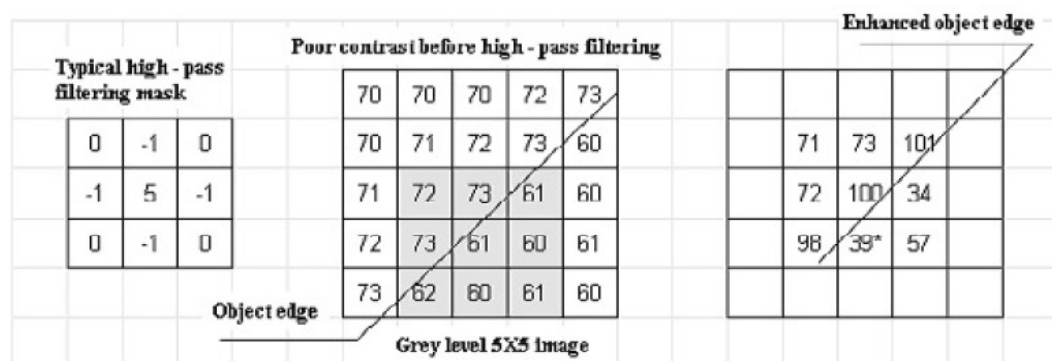
การทำงานของตัวดำเนินการกรองจะเริ่มจากนำแผ่นกรองวางบนภาพสัญญาณแบบดิจิทัลโดยให้ช่องตรงกลางแผ่นกรองวางอยู่ตรงพิกเซลที่ต้องการแล้วที่เลื่อนแผ่นกรองจากพิกเซลหนึ่งไปยังอีกพิกเซลหนึ่งและเลื่อนต่อไปยังพิกเซลอื่นเรื่อย ๆ ที่ละพิกเซลจนครอบคลุมทั้งภาพสัญญาณนั้นๆ ทั้งนี้การตอบสนองของค่าระดับสีเทาของพิกเซลที่อยู่ตรงกลางแผ่นกรองจะถูกคำนวณผ่านความสัมพันธ์ในแต่ละช่องของแผ่นกรองซึ่งได้นิยามไว้ก่อนแล้ว (Pre – defined) ดังภาพประกอบด้านล่าง



ภาพประกอบ 22 การดำเนินงานของตัวกรองแบบปรับเรียบต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

1. ตัวดำเนินการกรองแบบเชิงเส้น (Linear filter) เป็นตัวดำเนินการกรองที่ให้ผลตอบสนองของค่าระดับสีเทาของพิกเซลที่อยู่ตรงกลางแผ่นกรองในรูปผลรวมของผลคูณ (Sum of product) ระหว่างสัมประสิทธิ์ตัวดำเนินการกรอง (Filter coefficient) ในแต่ละช่องของแผ่นกรองที่ได้กำหนดไว้ก่อนแล้วและค่าระดับสีเทาของพิกเซลในตำแหน่งที่ตรงกัน ตัวดำเนินการกรองแบบเชิงเส้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตัวกรองแบบปรับเรียบต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มแสงของพิกเซลที่สนใจเมื่อเทียบกับพิกเซลข้างเคียง ตัวกรองแบบนี้มักถูกใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวน แต่ก็มีความโน้มที่จะทำให้ภาพสัญญาณเบลอ (Blur) มากขึ้นด้วย

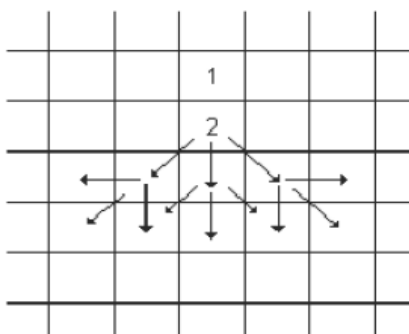
2. ตัวดำเนินการกรองแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non – linear filter) ซึ่งจะไม่ใช้ผลรวมของผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์ตัวดำเนินการกรองในแต่ละช่องของแผ่นกรองที่ได้กำหนดไว้ก่อนแล้ว และระดับสีเทาของพิกเซลในตำแหน่งที่ตรงกันอย่างเด่นชัด ดังเช่นการกรองแบบเชิงเส้น ตัวดำเนินการกรองแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สำคัญที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ตัวดำเนินการกรองแบบมัธยฐาน (Median filter) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพสัญญาณที่ถูกกำจัดสัญญาณรบกวน และลดผลกระทบจากการเบลอ (Blur) และ ตัวดำเนินการกรองแบบเน้นให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของค่าความเข้มแสงของพิกเซลที่สนใจเมื่อเทียบกับพิกเซลข้างเคียง ตัวกรองแบบนี้จะคล้ายตัวกรองแบบปรับเรียบต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มแสงของพิกเซลที่สนใจเมื่อเทียบกับพิกเซลข้างเคียง เพียงแต่แผ่นกรองแบบนี้จะมีสัมประสิทธิ์ของการกรองเป็นค่าติดลบแทน ตัวกรองแบบนี้จะทำให้การเปรียบเทียบต่างคมชัดมากขึ้น (Sharpening) แต่ในขณะเดียวกันก็อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแบบผงเกลือและพริกไทย (Salt – and – pepper noise) ได้



ภาพประกอบ 23 การดำเนินงานของตัวกรองแบบที่เน้นให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

การตรวจจับและแกระรอยขอบ (Edge detection)

การแกระรอยขอบวางอยู่บนพื้นฐานของการบ่งชี้พิกเซลขอบวัตถุภาพที่สนใจในภาพสัญญาณแล้วเดินแกระรอยไปเรื่อยๆตามแนวเส้นขอบวัตถุภาพนั้นๆจนกระทั่งย้อนกลับมาเจอพิกเซลต้นทางอีกครั้งหนึ่งกลายเป็นเส้นทางเดินปิดของวัตถุที่สนใจนั้นๆ



ภาพประกอบ 24 การแกะรอยโดย จุด 1 คือพิกเซลต้นทางและจุด 2 คือพิกเซลถัดไปที่พบ

การแกะรอยจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. เลือกพิกเซลต้นทางบนขอบวัตถุภาพที่สนใจในภาพสัญญาณ โดยจะพิจารณาจากพิกเซลบนขอบที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสีเทาสูงสุด
2. วางแผ่นกรองเพื่อการแกะรอยชนิด 3 X 3 ลงในภาพสัญญาณ โดยให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหน้ากากอยู่ที่พิกเซลที่เลือกไว้ในข้อ 1.
3. หาพิกเซลถัดไปบนขอบวัตถุภาพโดยเทียบพิกเซลที่ดำเนินการอยู่ กับพิกเซลข้างเคียงแบบตรงกันข้ามเชิงเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diametrically opposite)
4. เลื่อนแผ่นกรองของการแกะรอยไปยังพิกเซลที่หาได้ในข้อ 3. แล้วจึงให้ดำเนินการต่อตามขั้นตอนข้อ 2. และข้อ 3. จนกระทั่งย้อนกลับไปเจอพิกเซลต้นทางในข้อ 1. ก็จะได้เส้นทางเดินปิดของวัตถุนั้นๆ

ถ้าภาพสัญญาณมีขอบวัตถุภาพที่ชัดเจนแล้ว การแกะรอยจะให้ผลลัพธ์เป็นเส้นขอบที่ชัดเจน แต่ถ้าภาพสัญญาณให้ขอบวัตถุภาพที่ไม่ชัดเจนแล้ว (อาจเกิดจากการจับภาพไม่นิ่งพอ) ผลลัพธ์จากการแกะรอยก็จะด้อยประสิทธิภาพด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

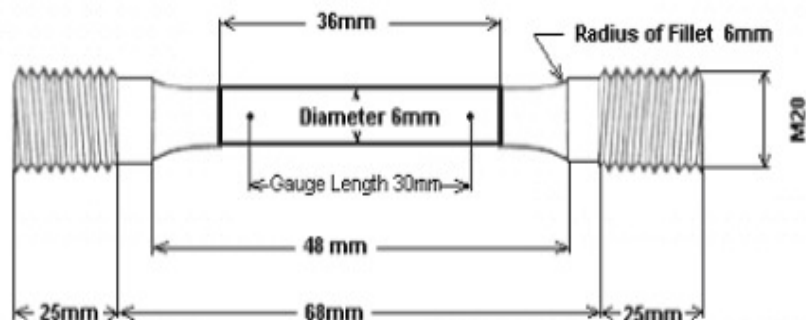
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. กล้องถ่ายภาพดิจิทัลมีเซนเซอร์แบบ CCD สี ขนาด 1/3.2 นิ้ว ความละเอียด 3.2 ล้านพิกเซล มีดิจิทัลซูม 3.2 เท่า (สูงสุด 10 เท่า เมื่อใช้ร่วมกับออปติคอลซูม) เลนส์ 5.4 (W) -17.3 (T), $f / 2.8$ (W) – $f / 5.1$ (T) ระบบโฟกัสอัตโนมัติผ่านเลนส์ TTL มีระยะโฟกัสปกติ 47 cm – อนันต์ มีมาโคร 5 - 47 เซนติเมตร (W) และ 25 – 47 เซนติเมตร (T) กล้องพิเศษ 1.5 – 5 เซนติเมตร (W) มีระบบวัดแสงแบบประมวลผลและความไวแสงแบบอัตโนมัติ

2. ซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลภาพ ImageJ Version 1.34s เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพจาก National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีจาก <http://rsb.info.nih.gov/ij/> ซอฟต์แวร์ ImageJ เขียนขึ้นมาจากโปรแกรมภาษาจาวา (Java programming language) โดยถูกออกแบบมาเป็นสถาปัตยกรรมแบบเปิดซึ่งจะมี plug - in เพื่อเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานประมวลผลภาพในลักษณะต่างๆเป็นการเฉพาะมากมายที่สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีผ่านเว็บไซต์ของ NIH นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ ImageJ ยังให้ผู้ใช้สามารถกำหนดสร้างฟังก์ชันเป็นการเฉพาะของตนเองได้ (Built-in) ผ่าน ImageJ built in editor และ Java compiler

3. ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเครื่องจักร (Carbon Steel for Machine Structural Use) S45C อ้างอิงจาก JIS G 4051 (1968) Standard for Ferrous Metallic Materials ⁽³⁾ โดยรูปร่างของชิ้นทดสอบจะแตกต่างกันไปตามขั้นตอนของการทดสอบ ดังนี้

3.1. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบการดึง



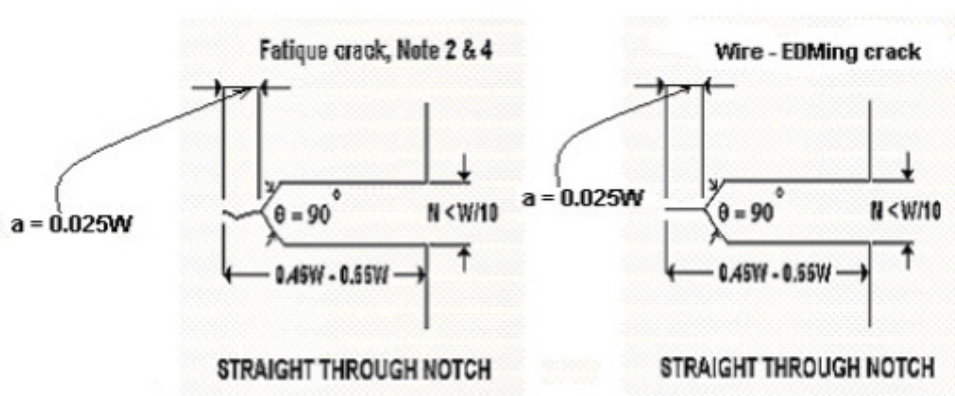
ภาพประกอบ 25 Tension specimens: Small – size

เพื่อให้ได้ค่า σ_{ys} , E และสัดส่วน σ_{ys} / E สำหรับนำไปประมาณค่าขนาดของแผ่นชิ้นทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบในขั้นตอน 3.2. ซึ่งจะได้อ้างในหัวข้อถัดไป ชิ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ Gauge length เป็น 6.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็น Small – size specimen Proportional To Standard ของ Designation: E 8M – 93 (METRIC) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric] ⁽⁴⁾ และที่ด้ามจับยึดทั้งสองข้างของชิ้นทดสอบเป็นเกลียว Metric M20 ตามรูปแบบของจับยึด 2 (Type 2)

3.2. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ

ค่าสัดส่วน σ_{ys} / E จากขั้นตอน 3.1. สามารถใช้ประมาณความหนาต่ำสุดของแผ่นชิ้นทดสอบโลหะที่ต้องจัดเตรียมไว้สำหรับขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบตามตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูงโดยแผ่นชิ้นทดสอบโลหะนี้จะมีรอยแตกที่ตรงกลางขอบของแผ่น (Edge crack) ที่เรียกว่าแบบ CT (Compact test - specimen) และมีมิติ (Dimension) ต่างๆ ดังภาพประกอบ 8 และเพื่อความสะดวกในการเตรียมแผ่นชิ้นทดสอบความยาวรอยแตก a ในงานวิจัยนี้จะไม่ใช้รอยแตกกล้า (Fatigue crack) ที่เกิดจากการให้ภาระแบบวัฏจักร แต่เป็นรอยแตกที่ได้จากการ EDM – Wire cutting ที่ความยาว $a = 0.025 W$ เดียวกันแทน โดยอ้างอิงจาก Measurement of small cracks by photo - microscopy: experiments and analysis ของ J.M.Larsen, J.R. Jira, K.S. Ravichandran ⁽⁵⁾

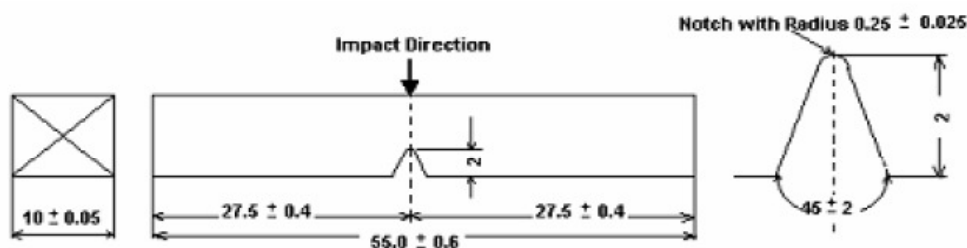
รอยแตกเสมือนเริ่มต้นตามธรรมชาติที่ได้จากการ EDM – Wire cutting นี้จะมีคลาดเคลื่อนของความยาวรอยแตก a เป็น ± 0.02 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด Wire cutting คือ 0.25 มิลลิเมตร) และรอยแตกกว้าง 0.3 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 26 Fatigue crack และ Wire – EDM crack

3.3. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาพลังงานที่ถูกดูดกลืนในการแตกหักของร็องบากวีของชาร์ปี (Charpy V – Notch Impact Test) ซึ่งเป็น Classification No.4 Test Piece

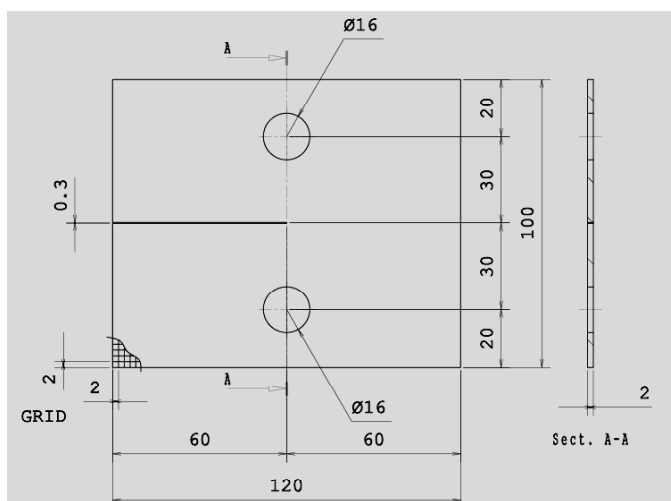
ตามที่ระบุไว้ใน JIS Z 2202 (1968) Standard for Ferrous Metallic Materials ⁽¹³⁾ ดังภาพประกอบ 27 สำหรับร่องบากวีนี้จะต้องใช้มีดกัด (Cutter) เป็นการเฉพาะเท่านั้น



ภาพประกอบ 27 แท่งชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี

3.4. ชั้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาความยาวรอยแตกที่ขยายตัวออกด้วยการประมวลผลภาพ

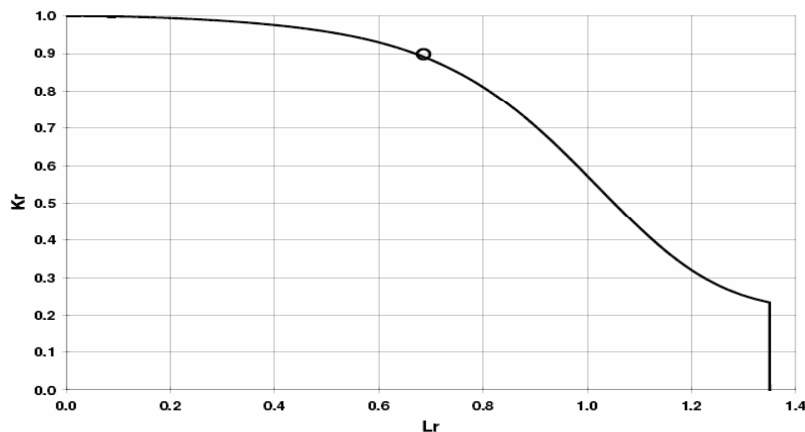
ชั้นทดสอบจะมีลักษณะคล้ายแบบ CT แต่มีความหนาเป็น 2 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 28 ทั้งนี้แผ่นชั้นทดสอบนี้จะต้องถูกตีเส้นตารางขนาด 2 X 2 มิลลิเมตร ด้วย Vernier high - gauge เพื่อใช้เป็นหมาย (marker) ที่ต้องถูกจับภาพ (Capture) ติดไปพร้อมๆกันกับรอยแตกด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล



ภาพประกอบ 28 ชั้นทดสอบสำหรับหาความยาวรอยแตกที่ขยายตัวออกด้วยการประมวลผลภาพ

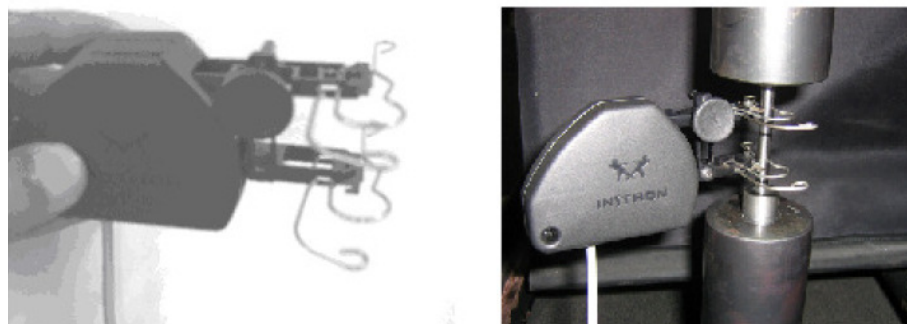
ทั้งนี้มิติของชั้นทดสอบนี้จะผ่านการประเมินความเป็นไปได้ของการแตกหักจากหลักการของ API 579 Recommended Practice For Fitness – For – Service โดยใช้เกณฑ์ Lower – Bound K_{IC} และ Failure Assessment Diagram ⁽¹⁴⁾ การประเมินนี้จะกระทำผ่านซอฟต์แวร์

Fracture Graphics การประเมินปั้งชี้ว่าแผ่นชั้นทดสอบแตกหักแน่นอนโดยจะมีผลกระทบจากการเสียรูปแบบพลาสติกเล็กน้อย



ภาพประกอบ 29 FAD ของแผ่นชั้นทดสอบที่ใช้ในขั้นตอนการจับภาพรอยแตกและประมวลผลภาพ

4. เครื่องทดสอบภาระดึง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องทดสอบภาระดึง INSTRON พร้อมด้วย Extensometer 2630 – 100 SERIES แบบ Clip – On ดังภาพประกอบ 30

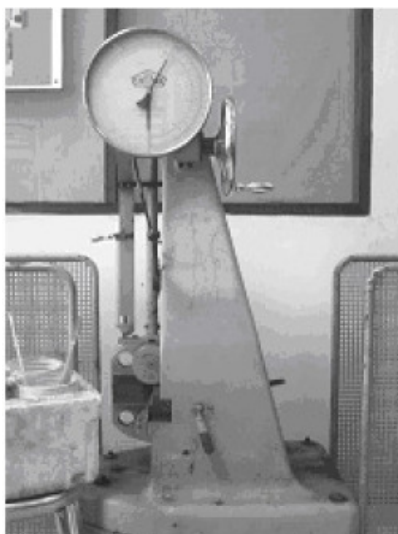


ภาพประกอบ 30 Extensometer แบบ Clip – On และลักษณะของการติดตั้ง

5. ชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบที่สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง (High - speed tool steel) เกรด SKH9 ตามมาตรฐาน JIS ความแข็ง 55 – 60 HRC โดยอ้างอิงขนาดมิติต่างๆตามแนวทางของ Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74

6. เครื่องทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี

7. ซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ ANSYS 8.1 ซึ่งมีชุดคำสั่งเพื่อการคำนวณหาตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น กำหนดสร้างข่าย (Mesh) และการขจัดของจุด (Node displacement) ที่บริเวณปลายรอยแตกเป็นการเฉพาะได้



ภาพประกอบ 31 Impact Test Machine แบบ Manual

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนการทดสอบหาระดับเพื่หาค่า σ_{ys} , E และสัดส่วน σ_{ys} / E

นำชิ้นทดสอบหาระดับของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ระบุในหัวข้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยข้อ 3.1. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาระดับ มาทดสอบด้วยหาระดับแบบสถิตคงที่ (สอดคล้องกับอัตราความเครียด $10^{-4} - 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) ตามขั้นตอนที่กำหนดใน Designation: E 8M – 93 (METRIC) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric] เพื่อบันทึกค่าความเค้นคราก σ_{ys} และโมดูลัสของความยืดหยุ่น E แล้วจึงคำนวณหาสัดส่วน σ_{ys} / E

2. ขั้นตอนการประมาณค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณของแผ่นชิ้นทดสอบโลหะที่ต้องเตรียมไว้สำหรับขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบจากสัดส่วน σ_{ys} / E

นำสัดส่วนของ σ_{ys} / E ที่ได้จากขั้นตอนการทดสอบหาระดับข้อ 2. มาหาความหนาต่ำสุดโดยประมาณ B ของชิ้นทดสอบที่ต้องเตรียมไว้สำหรับขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ จากตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง ทั้งนี้จำนวนของชิ้นทดสอบหาระดับจะใช้จำนวนขั้นต่ำ 3 ชิ้น ซึ่งถ้าพบว่าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น E และความเค้นคราก σ_{ys} เบี่ยงเบนไม่เกิน 15% ซึ่งแสดงว่าชิ้นทดสอบดังกล่าวมีความแข็งแรงเท่าเทียมกัน และสามารถใช้เป็นค่าเฉลี่ยตัวแทนในการทดสอบได้ (ชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นนี้จะเป็นจำนวนที่สมเหตุสมผล) แต่ถ้าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น E และความเค้นคราก σ_{ys} เบี่ยง-

เบนเกิน 15% แล้วก็แสดงว่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบดังกล่าวมีความเปราะบางเกินไปจึงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของชิ้นทดสอบให้มากขึ้น

ทั้งนี้ขนาดส้มของความหนาเริ่มต้น B จะต้องน้อยกว่า 15 มิลลิเมตร ตามข้อกำหนดทั่วไปของ Extensometer INSTRON 2630 – 100 SERIES แบบ Clip – On ซึ่งระบุในภาคผนวก ถ้าขนาดความหนาเริ่มต้น B ของแผ่นชิ้นทดสอบน้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แล้วให้ใช้วิธีดำเนินการวิจัยข้อ 3 เพื่อหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบตามขั้นตอนที่ระบุใน Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 - 74 แต่ถ้าขนาดส้มความหนาเริ่มต้น B ของแผ่นชิ้นทดสอบมากกว่า 15 มิลลิเมตร แล้วให้ใช้วิธีดำเนินการวิจัยข้อ 4 เพื่อหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบตามที่ระบุไว้ใน Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000 แทน ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของเครื่องทดสอบภาระดึงด้วยว่าจะสามารถดึงแผ่นชิ้นทดสอบให้ขาดได้หรือไม่ หรืออุปกรณ์จับยึดจะสามารถทนทานต่อภาระดึงได้มากกว่าแผ่นชิ้นทดสอบหรือไม่ เป็นต้น

3. ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุแบบความเครียดระนาบตามที่ระบุใน Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74

ให้นำชิ้นทดสอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ระบุในหัวข้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยข้อ 3.2. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ มาทดสอบตามขั้นตอนต่างๆที่ระบุใน Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74 ซึ่งปริมาณที่บันทึกได้ในการทดสอบคือความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะเปิดอ้าของรอยแตก แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟดังภาพประกอบ 12

4. ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี (Charpy V – Notch Impact Test)

4.1. นำชิ้นทดสอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ระบุในหัวข้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยข้อ 3.3. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนในการแตกหักของชิ้นทดสอบที่มีร่องบากวีของชาร์ปี มาทดสอบตามขั้นตอนของ Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000⁽⁵⁾ โดยกำหนดจำนวนของแท่งชิ้นทดสอบแบบชาร์ปีเป็น 50 ชิ้น โดยแบ่งแท่งชิ้นทดสอบออกเป็นชุดๆตามอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบคือ

- ชิ้นทดสอบชุดที่ 1 แช่ในสารละลายของน้ำแข็งแห้งในเมทิลแอลกอฮอล์

เพื่อให้ได้อุณหภูมิ -65°C , -50°C , -40°C , -20°C , -10°C , 0°C , 10°C ทั้งนี้สารละลายควรท่วมชิ้นทดสอบประมาณ 10 มิลลิเมตร และปล่อยให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง ๆ ประมาณ $2 - 3^{\circ}\text{C}$ โดยทิ้งช่วงเวลาให้อุณหภูมินี้หนึ่งๆอยู่ประมาณ 15 นาที เพื่อไว้สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะวางชิ้นทดสอบบนแท่นดี

- ชิ้นทดสอบชุดที่ 2 ปล่อยให้ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง 26°C

- ชิ้นทดสอบชุดที่ 3 ต้มในน้ำร้อนให้อุณหภูมิ 75°C , 80°C , 95°C ทั้งนี้ควรให้น้ำร้อนท่วมชิ้นทดสอบประมาณ 10 มิลลิเมตรและควรให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง ประมาณ $2 - 3^{\circ}\text{C}$ โดยทิ้งช่วงเวลาให้อุณหภูมินี้หนึ่งๆประมาณ 15 นาทีเพื่อไว้สำหรับการลดลงของอุณหภูมิขณะวางชิ้นทดสอบบนแท่นดี

4.2. หลังจากปล่อยตุ้มน้ำหนักแกว่งตกลงมาดีชิ้นทดสอบแล้วบันทึกค่าของพลังงาน CVN จากหน้าปัดที่สเกล 300 J (เพราะใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 300 J) คำนวณค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ของพลังงาน CVN และอุณหภูมิจากสมการ (15)

5. ขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อการจับภาพรอยแตกและการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลสามารถใช้ขั้นตอนทดสอบแบบความเครียดระนาบ (Plane strain) หรือ ขั้นตอนทดสอบแบบความเค้นระนาบ (Plane stress) ก็ได้ อย่างไรก็ตามการใช้ขั้นตอนทดสอบแบบความเครียดระนาบอาจจะมีข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์จับยึดและเครื่องทดสอบภาระดึง ดังนั้นขั้นตอนทดสอบแบบความเค้นระนาบหรือขั้นตอนทดสอบแบบบางจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

5.1. นำชิ้นทดสอบของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ระบุในหัวข้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยข้อ 3.4. ชิ้นทดสอบสำหรับขั้นตอนการทดสอบหาค่าความยาวรอยแตกที่ขยายตัวออกด้วยการประมวลผลภาพ มาทดสอบตามขั้นตอนต่างๆที่ระบุใน Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74 โดยให้เพิ่มภาระครั้งละ 500 N หรือ 1000 N แล้วแต่ความเหมาะสม โดยในแต่ละครั้งของการเพิ่มภาระให้ถ่ายภาพรอยแตกบนแผ่นชิ้นทดสอบนั้นๆ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนข้อมูลของกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล ทั้งนี้จะต้องถ่ายภาพให้ติดหมายมาด้วยทุกครั้ง การทดสอบจะสิ้นสุดลงเมื่อภาระที่ให้กับชิ้นทดสอบมีค่าลดลงโดยจะสังเกตได้จากกราฟความเค้น – ความเครียดบนจอแสดงผลของเครื่องทดสอบภาระดึง

5.2. นำภาพถ่ายดิจิทัลของรอยแตกเข้าสู่ซอฟต์แวร์ ImageJ 1.34s แล้วใช้เครื่องมือต่างๆของการประมวลผลภาพมาตรวจจับรอยแตกและวัดขนาดรอยแตกบนแผ่นชิ้นทดสอบที่ได้ตามขั้นตอนและรายละเอียด ดังนี้

5.2.1. ดึงแฟ้มภาพถ่ายรอยแตกเข้าสู่ซอฟต์แวร์ ImageJ 1.34s ในงานวิจัยนี้ไฟล์ภาพถ่ายจะมีรูปแบบเป็น JPEG ซึ่งถูกกำหนดจากผู้ผลิตกล้องถ่ายภาพดิจิทัลเอาไว้แล้ว

5.2.2. ใช้ตัวดำเนินการประมวลผลภาพที่กระทำต่อจุดพิกเซลโดยตรงเพื่อเพิ่มความเปรียบต่างของขอบ (Enhance contrast) ในภาพถ่าย

5.2.3. กำหนดความกว้างของเส้นที่ใช้วัดขนาดภายในภาพถ่าย

5.2.4. กำหนดบรรทัดมาตรฐานเพื่อการวัดขนาดภายในภาพ โดยใช้คำสั่งวาดเส้นตรงและเว้นขยายใน Selected Tool Bar เพื่อขยายและลากเส้นตรงให้ได้ใกล้เคียงกับหมยจากเส้นตารางขนาด 2 มิลลิเมตร X 2 มิลลิเมตร ใช้คำสั่ง Analyze / Set Scale ใส่ตัวเลขระยะที่รู้ค่าแน่นอนแล้วคือ 2 ลงในกล่องโต้ตอบพร้อมระบุหน่วยเป็น “มิลลิเมตร” กำหนดอัตราส่วนเชิงพิกเซล (Pixel Aspect Ratio) เป็น 1 และให้ขีดเครื่องหมายถูกที่ช่อง Global

5.2.5. ใช้ตัวดำเนินการประมวลผลภาพที่กระทำต่อจุดพิกเซลข้างเคียงจุดพิกเซลที่สนใจเพื่อกรองสัญญาณรบกวน และเบลอการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มแสงที่พิกเซลขอบ ลบพื้นหลัง (Background) ที่ต่อเนื่องและมีความราบเรียบออกจากภาพให้เหลือเฉพาะขอบที่เด่นชัดของชิ้นทดสอบ

5.2.6. ใช้ตัวดำเนินการประมวลผลภาพที่ตรวจจับและแกะรอยขอบของชิ้นทดสอบในภาพ

5.2.7. ใช้คำสั่งลากเส้นในกล่องเครื่องมือ (Selection Tool Box) เมื่อลากเส้นหาบรอยแตกที่ขยายตัวออก หรือปากรอยแตกที่เปิด้าออกแล้วใช้คำสั่ง Analyze / Measure เพื่อวัดขนาด

6. ขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการจำลองพฤติกรรมแตกหักของแผ่นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์

6.1. ใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS 8.1 จำลองพฤติกรรมการแตกหักของแผ่นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่มีรอยแตกที่กลางขอบของแผ่นแบบ CT แบบ 2 มิติ ด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบภาระดึงในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยข้อ 5.1.

6.2. กำหนดเลือกรูปแบบอีลีเมนต์ที่ปลายรอยแตกเป็น Plane82 ซึ่งจะได้อีลีเมนต์แบบ Quarter – point (Singular) 8 – node quadrilateral element

6.3. รัศมีที่ปลายรอยแตกเป็น 0.1 มิลลิเมตร โดยแบ่งออกเป็น 12 อีลีเมนต์

6.4. กำหนดจำนวนอีลีเมนต์และจำนวนจุดข่าย (Node)

6.5. เลือกพฤติกรรมของอีลีเมนต์เป็น Plane stress

6.6. เลือกรูปแบบพฤติกรรมของวัสดุเป็น Elastic/Isotropic

6.7. กำหนดค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวส์ซอง

6.8. กำหนดค่าภาระเป็นแบบ Structural / Pressure / On Lines

6.9. หาค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นจาก KCALC โดยกำหนดเป็น ‘Plane stress’ สำหรับ ‘Disp extropolat based on’ และ Half – symm b.c. สำหรับ Model Type

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การทดสอบภาระดึงชั้นทดสอบเพื่อหาค่า σ_{ys} , E , σ_{ys} / E

ผลจากการทดสอบภาระดึงบนชั้นทดสอบจำนวน 3 ชั้นเป็นดังนี้ (บันทึกผลการทดสอบภาระดึงโดยละเอียดตามภาคผนวก ข.)

ชั้นทดสอบที่1;

ความเค้นคราก	373.5140	MPa
ความเครียด	0.0019	mm/mm
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	200.6015	GPa

ชั้นทดสอบที่2;

ความเค้นคราก	302.2917	MPa
ความเครียด	0.0019	mm/mm
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	156.5389	GPa

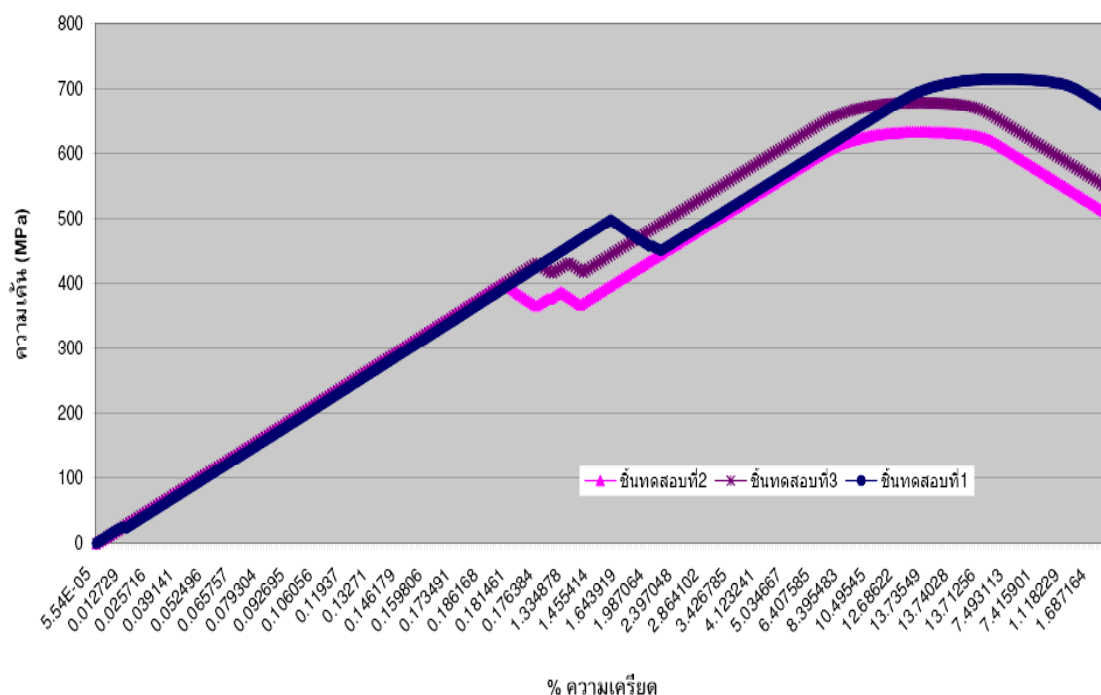
ชั้นทดสอบที่3;

ความเค้นคราก	323.2151	MPa
ความเครียด	0.0016	mm/mm
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	198.6370	GPa

ค่าเฉลี่ยของความเค้นคราก σ_{ys} , ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสความยืดหยุ่น E และอัตราส่วน σ_{ys} / E ของชั้นทดสอบเป็นดังนี้

ค่าเฉลี่ยของความเค้นคราก; σ_{ys}	333.0069 MPa
ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสของความยืดหยุ่น; E	185.2591 GPa
อัตราส่วน σ_{ys} / E	0.0018

เมื่อนำบันทึกผลของการทดสอบภาระดึงโดยละเอียดมาเป็นเขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์จะได้
แผนภูมิความเค้น – ความเครียดของชั้นทดสอบตามแผนภูมิ 1



แผนภูมิ 1 ความเค้น – ความเครียดจากการทดสอบภาระดึงชั้นทดสอบจำนวน 3 ชั้น

การหาขนาดของแผ่นชั้นทดสอบเพื่อเตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุตามที่ระบุใน **Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74**

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน σ_{ys} / E ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุในตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง จะสามารถประมาณค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นชั้นทดสอบเหล็กที่ต้องเตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบ (รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ค.) ได้เป็น

$$B = 129.8571 \text{ มิลลิเมตร}$$

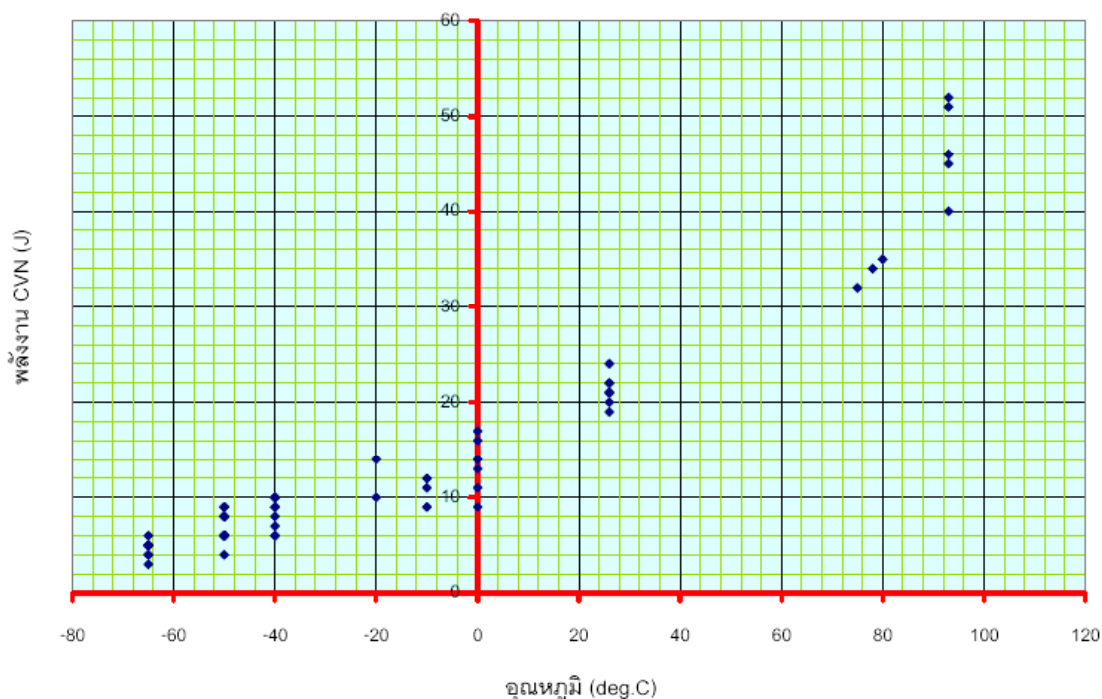
การทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุแบบความเครียดระนาบตามที่ระบุใน **Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74**

เนื่องจากค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นชั้นทดสอบเหล็กที่ได้มากกว่า 15 มิลลิเมตร ตามข้อกำหนดทั่วไปของ Extensometer INSTRON 2630 – 100 SERIES แบบ Clip – On จึงไม่สามารถดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบที่ระบุใน **Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic**

Materials; ASTM E – 399 – 74 ได้ ดังนั้นต้องดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุตาม Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000 แทน

การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากขั้นตอนทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี่ตามทีระบุใน **Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000**

เมื่อนำผลการทดสอบที่บันทึกได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานที่ถูกดูดกลืน CVN และอุณหภูมิที่สัมพันธ์กัน จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเปราะดังนี้



แผนภูมิ 2 การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเปราะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานที่ถูกดูดกลืนจากการทดสอบแบบกระแทกของแท่งขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี่หรือ CVN และอุณหภูมิที่สัมพันธ์กัน พบว่ากราฟจะลู่ลงด้านล่าง (Lower bound) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมแตกหักเปราะหรือรูปแบบ I ของการแตกหัก (Mode I or Opening Mode) ดังนั้นค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืน CVN ที่กราฟลู่ลงด้านล่าง (Lower bound) และค่าอุณหภูมิอ้างอิง T_{ref} ที่ให้ค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืน CVN = 20 J ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวไปเปราะสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะเป็นดังนี้

$$CVN = 4.5 \text{ J} \quad \text{และ} \quad T_{ref} = 26 \text{ C}^{\circ}$$

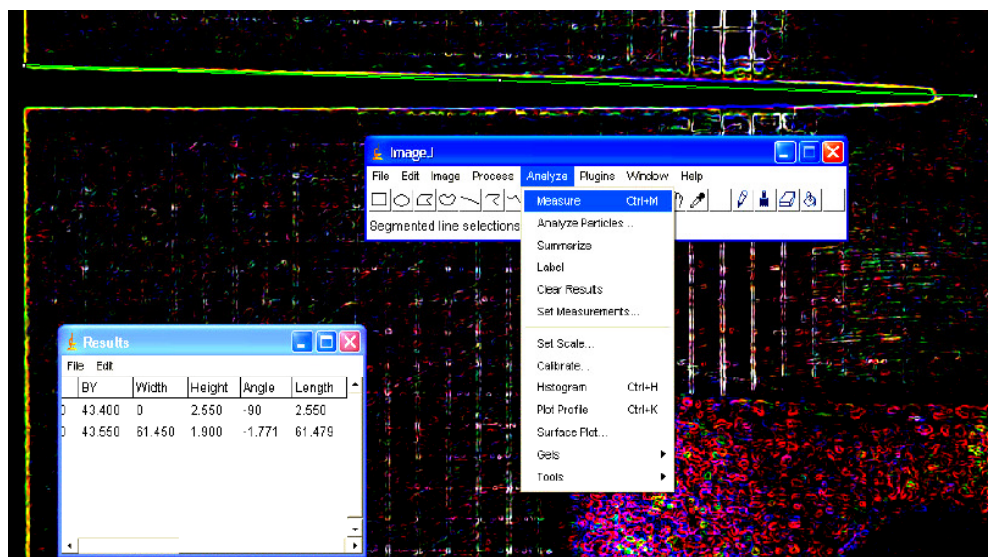
เมื่อคำนวณค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} บนพื้นฐานสหสัมพันธ์แบบเส้นโค้งราบด้านล่างตามสมการ (15) จะได้

$$K_{IC} = 59.6554 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$$

(รายละเอียดของผลการทดสอบแบบกระแทกบนแท่งขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีตามภาคผนวก ง.)

การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

หลังจากการทดสอบภาระดึงเสร็จแล้วนำภาพถ่ายดิจิทัลของรอยแตกบนแผ่นขึ้นทดสอบมาผ่านกระบวนการประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ 1.34s จนได้ภาพของรอยแตกที่มีคุณภาพดีพอต่อการวัดขนาดแล้ว จึงวัดระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกและระยะขยายตัวออกของรอยแตกจากรอยแตกเริ่มต้น ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ตัวอย่างภาพรอยแตกต้นฉบับหมายเลข 49 ที่ผ่านการประมวลผลแล้ว

จากบันทึกการวัดระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกและระยะขยายตัวออกของรอยแตกจากภาพถ่ายรอยแตก (ตามภาคผนวก ง.) สามารถนำมาเขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปลดปล่อยพลังงานที่เพิ่มขึ้นต่อระยะที่ขยายตัวออกของรอยแตกได้เป็นแผนภูมิ 3 โดยสามารถประมาณอัตราปลด

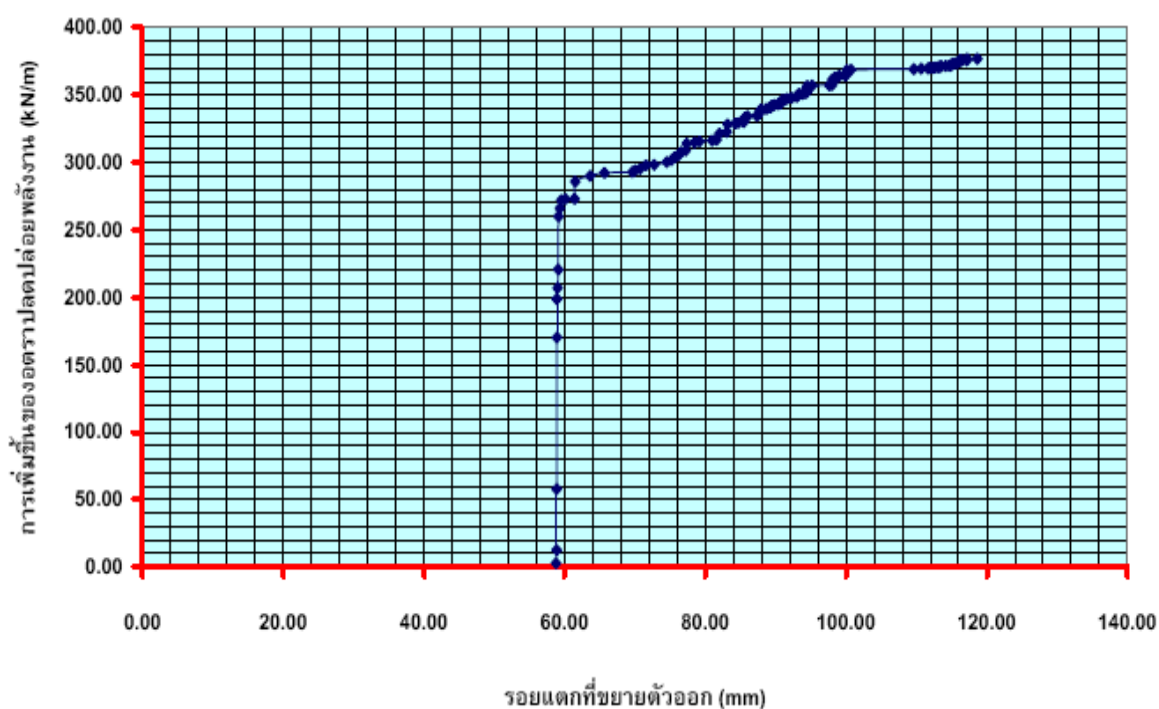
ปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤต G_C ได้จากสมการ (1) ดังนี้

สำหรับแผ่นชั้นทดสอบที่ 1; $G_C = 4,190.1796$ kN/m

สำหรับแผ่นชั้นทดสอบที่ 2; $G_C = 4,003.0017$ kN/m

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตของแผ่นชั้นทดสอบ 2 ชั้น คือ

$$G_C = 4,096.5906 \text{ kN/m}$$



แผนภูมิ 3 Rising curve ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C

จากค่าเฉลี่ยของอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤตจะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} จากสมการ (4) สำหรับความเค้นระนาบ ได้ดังนี้

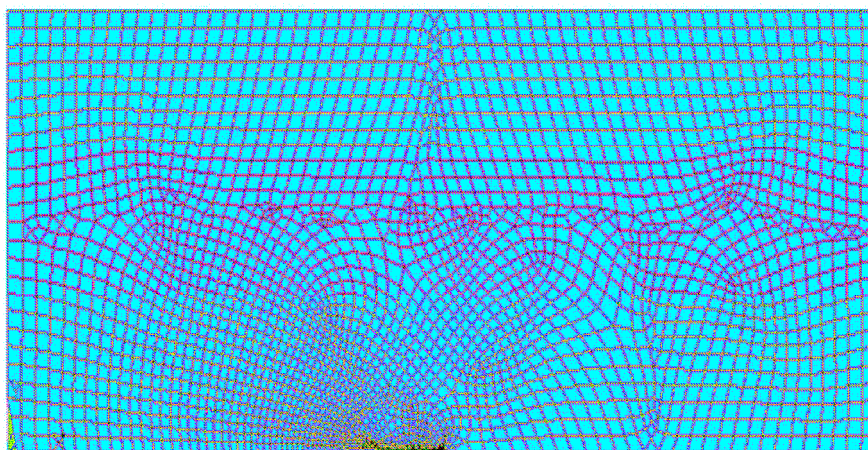
$$K_{IC} = 871.1663 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

การทดสอบหาค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นจากการจำลองพฤติกรรมแตกหักของแผ่นชั้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์

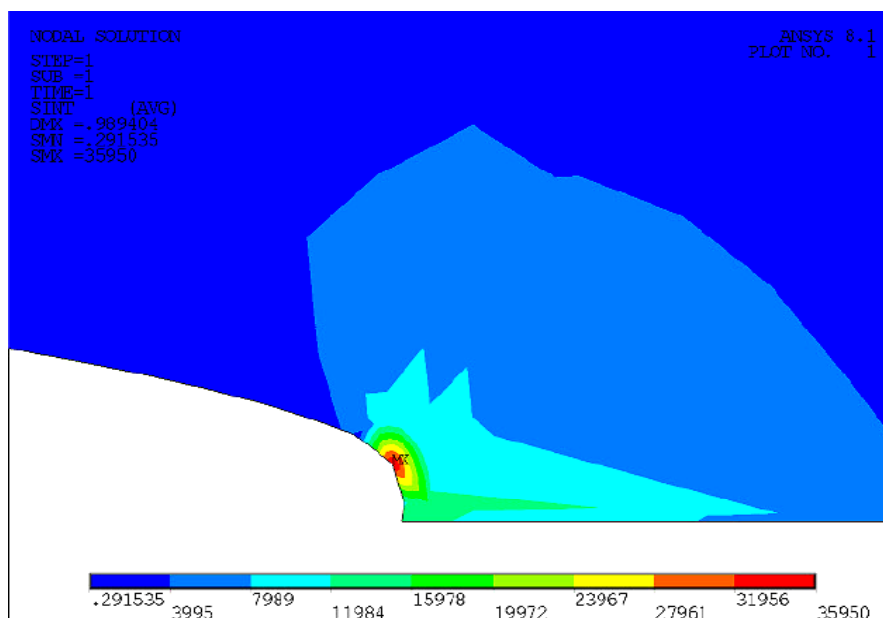
หลังจากการทดสอบตามขั้นตอนการดำเนินการวิจัยข้อ 6 ด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ ซึ่งได้กำหนดจำนวนอีลีเมนต์เป็น 2,776 และจำนวนจุดข่าย (Node) เป็น 8,451 ด้วยค่าโมดูลัสของความ

ยืดหยุ่นเป็น $E = 185.2591 \text{ GPa}$ จากผลการทดสอบภาระดึงขึ้นทดสอบ (ให้อัตราส่วนปัวส์ซองเป็น $\nu = 0.3$) และค่าภาระดึง ณ จุดที่เกิดค่าอัตราปลดปล่อยพลังงานความเครียดวิกฤต G_c เดียวกันกับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลเป็น $P = 23,800 \text{ N}$ แล้ว ได้ค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นเป็น

$$K_I = 836.56 \quad \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$



ภาพประกอบ 33 Mash ขนาด 2,776 element และ 8,451 Node



ภาพประกอบ 34 แสดงสภาวะของความเค้นที่ปลายรอยแตก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

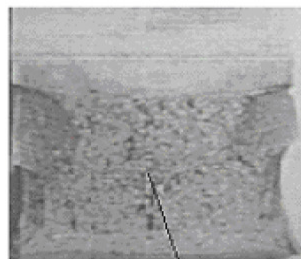
สรุปผลการวิจัย

การทดสอบการดึงบนชิ้นทดสอบเพื่อหาค่า σ_{ys} , E , σ_{ys} / E

ค่าเฉลี่ยของความเค้นครากที่คำนวณได้จากการทดสอบคือ $\sigma_{ys} = 333.0069 \text{ MPa}$ นั้นต่ำกว่าค่า Yield strength $\sigma_s \geq 355 \text{ MPa}$ ที่ระบุอยู่ในใบรับรองคุณภาพของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จากผู้ผลิต (ตามภาคผนวก ก.) อยู่ 3.074% ซึ่งมีความแตกต่างที่ไม่มากนัก

การทดสอบหาความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการตีขึ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีตามที่ระบุใน **Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000**

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C พบว่าที่อุณหภูมิ $-65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ นั้นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C แสดงพฤติกรรมแตกหักเปราะอย่างชัดเจนจนเห็นผิวรอยแตกด้านตัดขวางของชิ้นทดสอบเป็นผิวเม็ดทรายเล็กๆ สีเทาจรรอยแตกหัก และที่ผิวด้านข้างของรอยแตกของชิ้นทดสอบจะไม่เห็นเป็นริ้วของการหดตัวแบบพลาสติก



Brittle occur for the whole faces

ภาพประกอบ 35 หน้าตัดผิวรอยแตกหักเปราะของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่อุณหภูมิ $-65 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ $K_{IC} = 59.6554 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ที่คำนวณได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C นี้ จึงเป็นค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ K_{IC} อย่างแท้จริง

เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล และผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีที่ระบุไว้ใน **Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000**

ค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ $K_{IC} = 871.1663 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ที่คำนวณได้จากการวัดการเติบโตของรอยแตกโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล จะมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบกระแทกบนชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี $K_{IC} = 59.6554 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

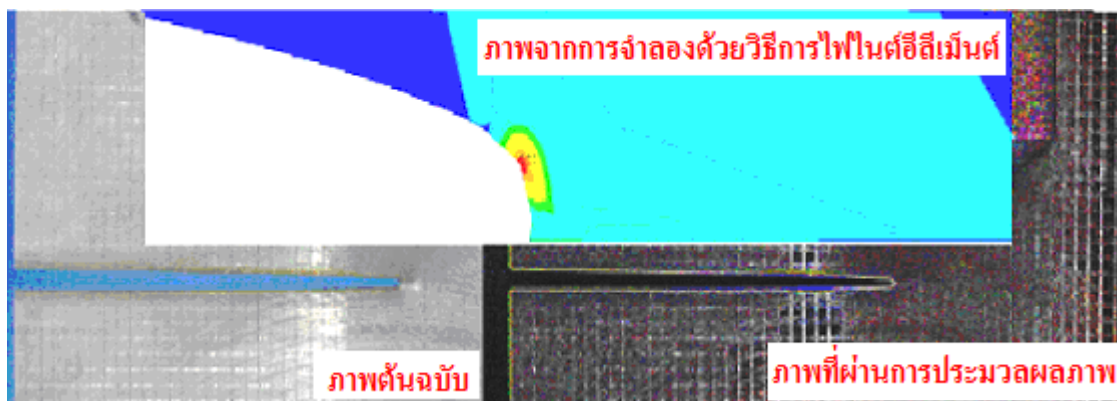
ความแตกต่างดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นในกรณีของความเค้นระนาบ K_I (เมื่อแผ่นชิ้นทดสอบบางกว่าค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นชิ้นทดสอบเหล็กที่ต้องเตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเค้นระนาบ) สูงกว่าค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุแบบความเค้นระนาบ K_{IC} (เมื่อแผ่นชิ้นทดสอบหนาเท่ากับหรือมากกว่าค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นชิ้นทดสอบเหล็กที่ต้องเตรียมสำหรับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักแบบความเค้นระนาบ)

เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล และผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุจากการจำลองพฤติกรรมแตกหักของแผ่นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์

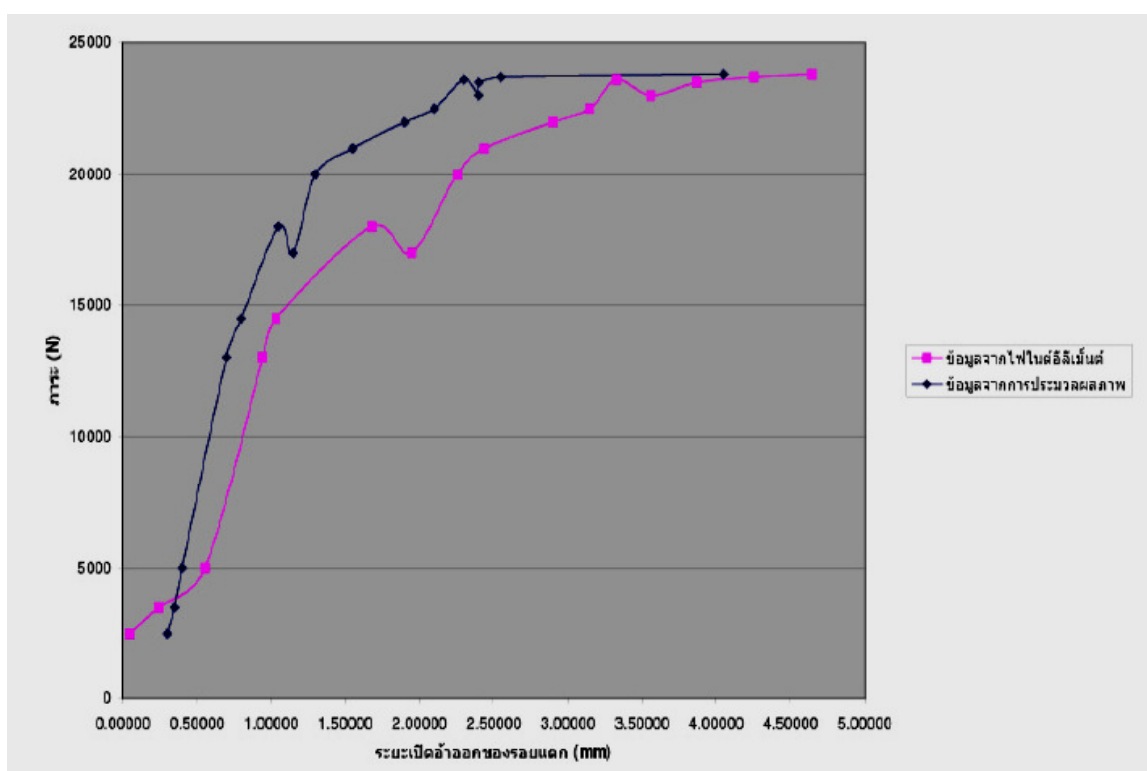
ค่าความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ $K_{IC} = 871.17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ที่คำนวณได้จากการเติบโตของรอยแตกโดยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะมีค่าสูงกว่าค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น $K_I = 836.56 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ที่คำนวณได้จากการจำลองพฤติกรรมแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ระดับของภาระเท่ากันที่ $P = 23.800 \text{ kN}$ อยู่ 3.97% ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อนำภาพพฤติกรรมเปิดอ้าออกของแผ่นชิ้นทดสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล มาเปรียบเทียบกับภาพจำลองพฤติกรรมเปิดอ้าออกของแผ่นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ระดับของภาระเท่ากันที่ $P = 23.800 \text{ kN}$ ก็พบว่ามีความคล้ายกันด้วย ดังภาพประกอบ 36

เมื่อนำระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกที่ได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล และระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกที่ได้จากวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์มาเขียนเป็นเส้นโค้งความสัมพันธ์เพื่อการเปรียบเทียบแล้วพบว่า ระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกที่ได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับ ระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ (แม้การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะบ่งชี้ถึงการรับภาระที่สูงกว่าก็ตาม) ดังแผนภูมิ 4

ดังนั้นวิธีการตรวจสอบรอยแตกบนชิ้นส่วนโลหะโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล จึงเป็นวิธีการตรวจสอบชิ้นส่วนโลหะที่ให้ผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 36 แสดงความสอดคล้องกันของการเปิด้าออกของรอยแตกที่ได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลและที่ได้จากวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ เทียบกับภาพถ่ายต้นฉบับ

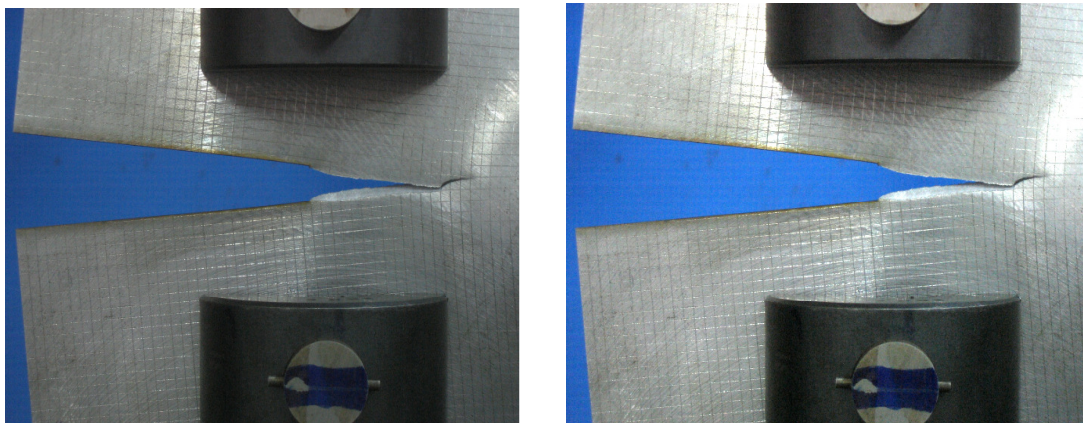


แผนภูมิ 4 เปรียบเทียบระยะเปิด้าออกของรอยแตกที่วัดได้จากการประมวลผลภาพและที่คำนวณได้จากวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์

ขั้นตอนมาตรฐานเพื่อตรวจจับและวัดขนาดความยาวรอยแตกด้วยการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล

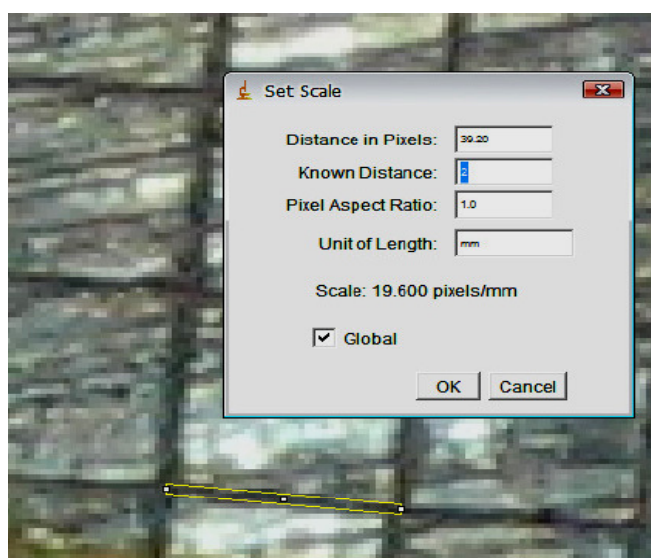
ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับการประมวลผลภาพเพื่อตรวจจับรอยแตก และวัดขนาดความยาวรอยแตกที่ผู้วิจัยทดลอง และแนะนำให้ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ

1.การเพิ่มความเปรียบต่างของภาพ (Enhance Contrast)



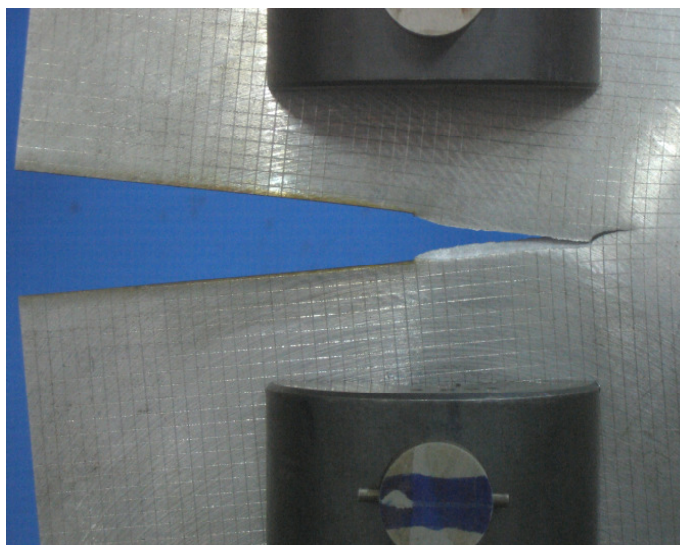
ภาพประกอบ 37 แสดงผลของการเพิ่มความเปรียบต่างของภาพ

2.กำหนดบรรทัดมาตรฐานเพื่อใช้วัดระยะต่างๆในภาพจากของหมายที่รู้ค่าแล้ว ด้วยคำสั่ง Analyze / Set Scale



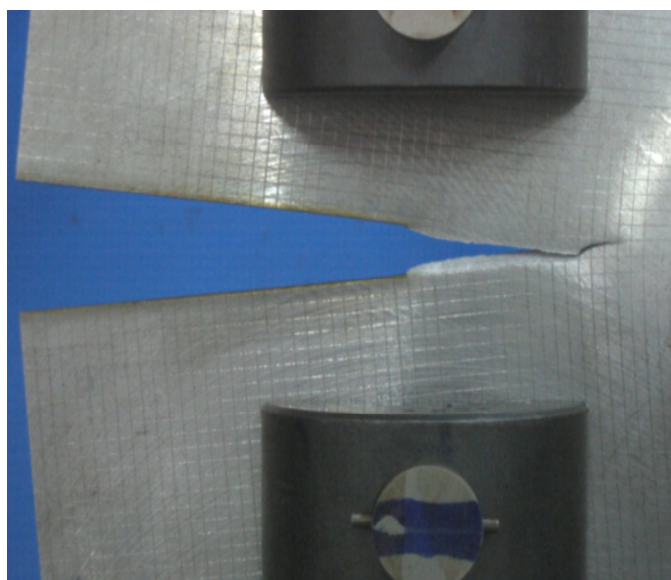
ภาพประกอบ 38 แสดงการขยายเข้าเพื่อให้วัดเส้นวัดขนาดได้ใกล้เคียงความเป็นจริงให้มากที่สุด

3. การกรองสัญญาณรบกวนชนิดผงเกลือและพริกไทยด้วยตัวกรองแบบ Despeckle



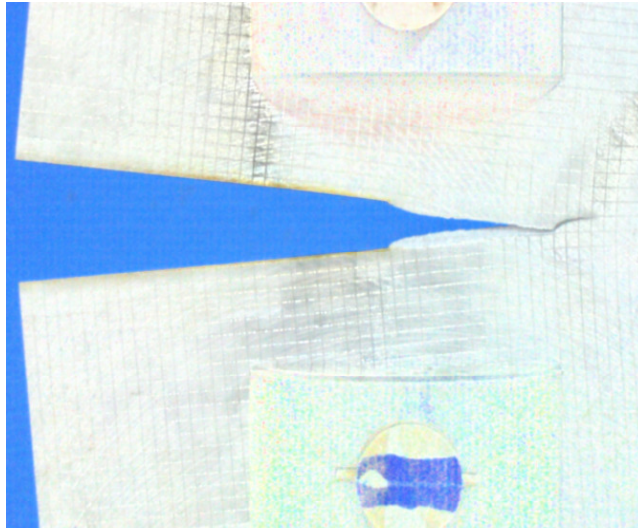
ภาพประกอบ 39 แสดงผลของการตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบ Despeckle

4. การเบลอแบบเกาส์ (Gaussian Blur) เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงฉับพลันของความเข้มแสงที่พิกเซลขอบ



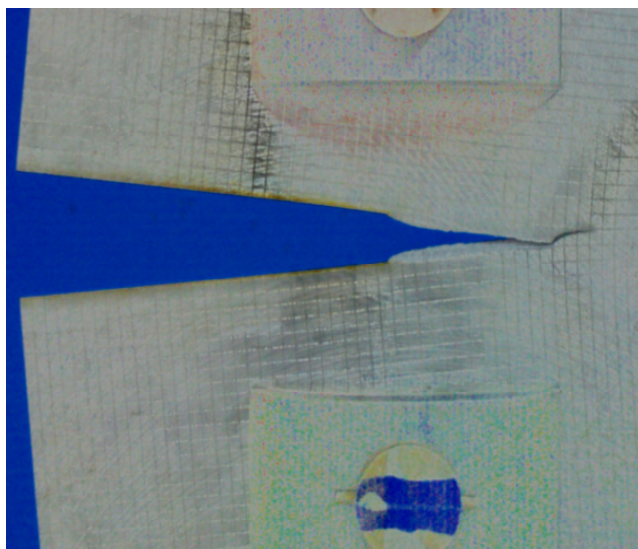
ภาพประกอบ 40 แสดงผลของการเบลอพิกเซลขอบแบบเกาส์

5. การลบพื้นหลัง (Subtract Background) ที่ต่อเนื่องออกให้เหลือเฉพาะขอบที่สนใจเท่านั้น



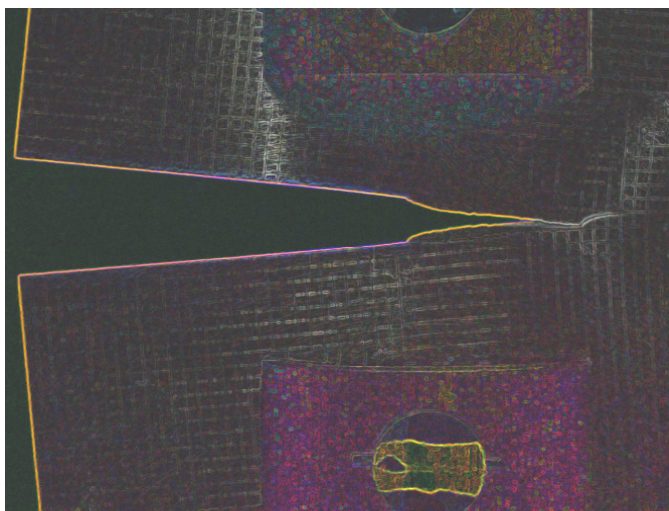
ภาพประกอบ 41 แสดงผลของการลบพื้นหลัง

6. การลบความเข้มแสงในภาพด้วยค่าคงที่ (Subtract) เพื่อเน้นขอบให้ชัดเจนขึ้น



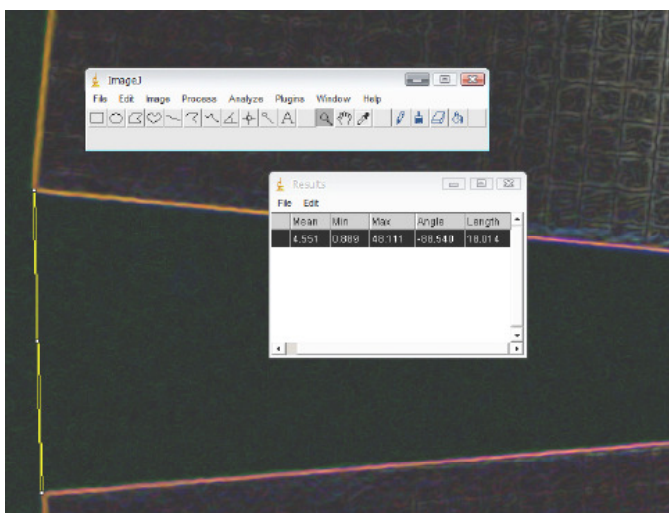
ภาพประกอบ 42 แสดงผลของการลบความเข้มแสงในภาพด้วยค่าคงที่

7. การแกะรอยแตกด้วยการแกะรอยขอบ (Find Edge) ซึ่งเป็นการแกะรอยขอบแบบโซเบล (Sobel Edge Detection) เพื่อแสดงให้เห็นขอบแนวที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอย่างฉับพลันของวัตถุภาพ



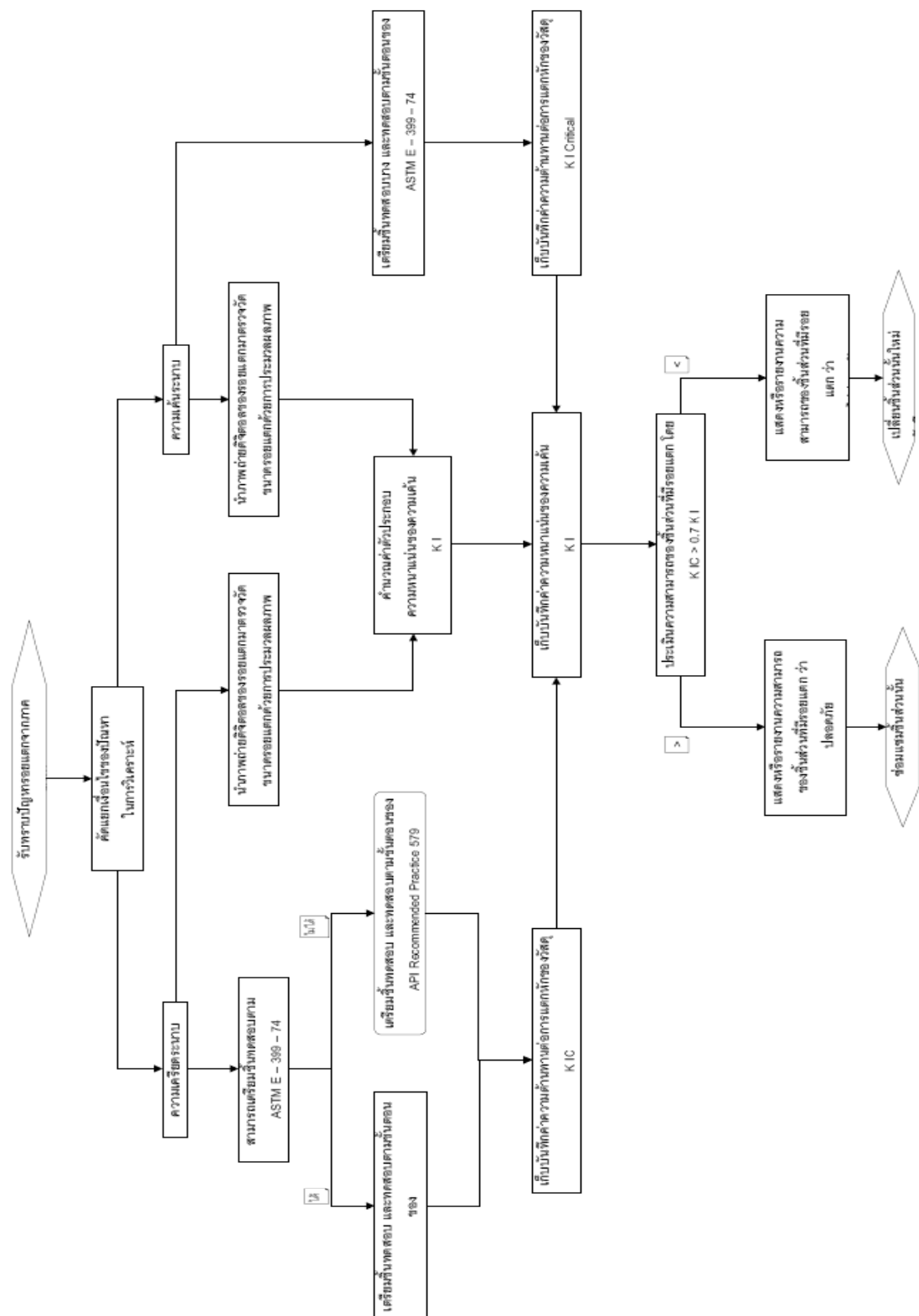
ภาพประกอบ 43 แสดงผลของการแกะรอยขอบรอยแตก

8. การวัดระยะเปิด้าออกของปากรอยแตกและการขยายตัวของรอยแตกด้วยคำสั่ง Analyze / Measure



ภาพประกอบ 44 แสดงผลของการวัดระยะเปิด้าออกของปากรอยแตก

ขั้นตอนมาตรฐานสำหรับตรวจประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะที่มีรอยแตกขณะรับภาระ
ผู้วิจัยเสนอขั้นตอนสำหรับประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะที่มีรอยแตกขณะรับภาระดังนี้

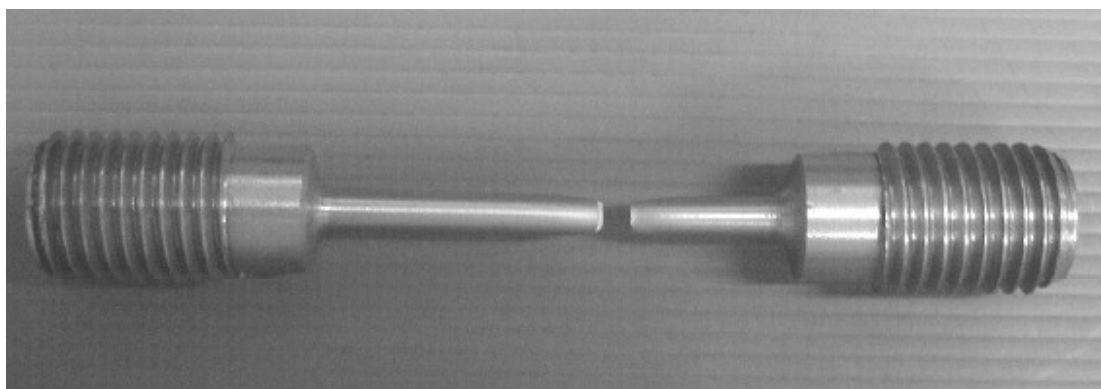


ภาพประกอบ 45 ขั้นตอนสำหรับประเมินสถานะใช้งานชิ้นส่วนโลหะที่มีรอยแตกขณะรับภาระ

ข้อเสนอแนะ

1. การที่ผลการทดสอบภาระดึงขึ้นทดสอบจำนวน 3 ชั้น ได้ค่าเฉลี่ยของความเค้นครากเป็น $\sigma_{ys} = 333.0069 \text{ MPa}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) $\sigma_s = 355 \text{ MPa}$ ที่ระบุในใบรับรองคุณภาพเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จากผู้ผลิต (Mill sheet ตามภาคผนวก ก.) อยู่ 3.074% นั้น อาจเป็นปัญหาในเชิงคุณภาพของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C จากผู้ผลิตเอง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องทดสอบเหล็กทุกครั้งก่อนนำไปใช้งานจริงเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ซึ่งควบคุมปริมาณคาร์บอนได้ไม่แน่นอน (จากข้อเท็จจริงของการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C นั้นก็เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า ค่าความแข็งแรงหลังการชุบแข็งจะไม่เท่ากันทั่วทั้งชิ้นเหล็ก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนที่ไม่แน่นอนนั่นเอง)

อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งแรงครากเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบภาระดึงน้อยกว่าค่าความแข็งแรงครากที่ระบุในใบรับรองคุณภาพเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จากผู้ผลิตได้ คือการที่ขาหนีบ (Clips) ของ Extensometer รูดลงเล็กน้อยในขณะที่ขึ้นทดสอบเกิดคอคอดก่อนขาดออกจากกัน แม้ขึ้นทดสอบจะขาดภายในระยะของ Gauge length แต่ก็ค่อนข้างไปด้านบนพอสมควร



ภาพประกอบ 46 การขาดของชิ้นทดสอบที่ระยะ Gauge length แบบไม่สมมาตรเนื่องจากการรูดของขาหนีบของ Extensometer

2. การทดสอบหาค่าความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุที่ระบุใน Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74 นั้น แม้ผู้วิจัยจะเตรียมชิ้นทดสอบด้วยค่าความหนาต่ำสุด $B = 129.8571$ มิลลิเมตร (รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ค.) และมี Extensometer แบบ Clip-On ที่สามารถทำงานได้หลายช่วงของการวัดแล้วก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาในแง่กำลังของเครื่องทดสอบภาระดึงแล้ว พบว่าต้องใช้กำลังมากกว่า 30 ตัน ซึ่งมากกว่ากำลังดึงสูงสุดของเครื่องทดสอบภาระดึงที่ผู้วิจัยใช้อยู่ จึงจะต้องแผ่นขึ้นทดสอบนี้ให้ขาดได้

และแม้ว่าผู้วิจัยจะมีเครื่องทดสอบภาระดึงที่มีกำลังดึงเพียงพอ คือ 100 ตัน แล้วก็ตาม แต่เมื่อคำนวณความแข็งแรงของเข็ม (Pin) ที่ทำขึ้นมาจากเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง (High – speed tool steel) ความแข็งที่ 58 – 60 HRC เพื่อใช้ร้อยยึดแผ่นขึ้นทดสอบตามหลักการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล (Machine design) แล้ว พบว่าเข็มนี้มีแนวโน้มสูงมากที่จะขาดก่อนเกิดการขยายตัวของรอยแตกเริ่มต้นเสมือนตามธรรมชาติ

3. พฤติกรรมของชิ้นทดสอบดังแผนภูมิ 1 นั้นแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C นี้เป็นเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงต่ำโดยเมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อเสนอนะข้อที่ 2 นั้น มีความเป็นไปได้ที่จะดึงชิ้นทดสอบให้ขาดได้โดยอาจจะต้องนำโลหะเหนียวนั้นๆไปทำให้เปราะลงเสียก่อนด้วยการลดอุณหภูมิ เช่น การแช่ลงในส่วนของผสมของน้ำแข็งแห้งและเมทิลแอลกอฮอล์ตามขั้นตอนการทดสอบแบบกระแทกบนแท่งชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปี หรือการชุบด้วยไนโตรเจนเหลวก่อนนำไปตี เป็นต้น

4. ค่า CVN = 4.5 J ที่ได้จากการทดสอบแบบกระแทกบนแท่งชิ้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีนั้นต่ำกว่าค่า Maximum CVN = 8 J ที่ระบุไว้ในใบรับรองคุณภาพเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จากผู้ผลิต (Mill sheet ตามภาคผนวก ก.) อยู่ถึง 43.75% ซึ่งมีความเบี่ยงเบนกันมาก เมื่อพิจารณาจากข้อเท็จจริงของผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ค่า CVN = 8 J นั้น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C นี้ยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงจากเหนียวเป็นเปราะอยู่ ดังจะเห็นได้จากลักษณะผิวขรุขระเป็นเม็ดทรายเล็กๆเฉพาะตรงกลางสลักกับริ้วของผิวเม็ดทรายที่ละเอียดกว่าสีเทาเข้มและที่ขอบของหน้าตัดจะเป็นครีปที่เกิดจากการฉีกขาดเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และเห็นริ้วของการหลุดตัว (Shear slip) ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่เหล็กกล้าคาร์บอน S45C นี้จะมีค่า CVN = 8 J

จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้งานจริงๆ เสมอโดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ควบคุมปริมาณคาร์บอนได้ไม่แน่นอน

5. ระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกและค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นที่คำนวณได้จากการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับระยะเปิดอ้าออกของรอยแตกและค่าตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ โดยมีความแตกต่างเพียง 3.97% เท่านั้น ความแตกต่างเล็กน้อยดังกล่าวนี้ เนื่องจากเงื่อนไขต่างๆที่กำหนดลงไปในการทดสอบภาระดึงจริงได้อย่างสมบูรณ์ เช่น ในความเป็นจริงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C จะมีสมบัติเป็น Anisotropy และ Inelastic ที่แตกต่างไปจากความเป็น Isotropy และ Elastic ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C ที่ระบุ ลงไปในซอฟต์แวร์ เป็นต้น

6. เนื่องจากในการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลนั้น สิ่งที่สำคัญคือความละเอียดเชิงพิกเซลของภาพที่กล้องถ่ายภาพดิจิตอลสร้างออกมาได้ ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มความละเอียดของพิกเซลได้

มากก็จะสามารถตรวจจับรอยแตกและวัดความยาวรอยแตกได้ดีมากขึ้น เพราะจะลดการแตกตัวของพิกเซลในภาพได้มากเมื่อทำการขยายภาพเพื่อวัดขนาดความยาวรอยแตก แต่ทั้งนี้ก็ต้องยอมรับในเรื่องของเวลาประมวลที่มากขึ้นด้วย

7. ในงานวิจัยนี้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลจะสร้างภาพขนาด 2048 พิกเซล X 1536 พิกเซลจากกำลังขยายสูงสุดจากชุดเลนส์จริง (Optical zoom) ด้วยฟังก์ชันถ่ายใกล้ และด้วยกำลังขยายนี้ ผู้วิจัยได้ทดสอบแล้วพบว่าควรปรับ Line Width ของเส้นวัดขนาดใน Set Scale ของซอฟต์แวร์ ImageJ 3.14s ให้เป็น 3 พิกเซล เพื่อให้เหมาะสมกับการแตกตัวของพิกเซลเมื่อทำการขยายภาพ และจะทำให้การวัดขนาดของรอยแตกในแต่ละครั้งไม่คลาดเคลื่อนมากเกินไป

8. สิ่งสำคัญที่ต้องระลึกถึงในการเลือกกล้องถ่ายภาพดิจิทัล คือความละเอียดเป็นพิกเซลที่กล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัลจับและสร้างออกมาได้นั้น ควรจะเป็นผลมาจากกำลังขยายของชุดเลนส์จริง (Optical zoom)

ส่วนกำลังขยายจากซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งในกล้องถ่ายภาพ (Software zoom) นั้นไม่ใช่กำลังขยายทางกายภาพจริง ๆ แม้จะให้ภาพที่ดูรวม ๆ แล้วละเอียดมากแต่เมื่อทดลองนำภาพที่ได้จากกำลังขยายทางซอฟต์แวร์นั้น ๆ มาขยาย จะพบว่าพิกเซลจะแตกตัวมากกว่าภาพที่ได้จากกำลังขยายของชุดเลนส์ที่เป็นกายภาพจริงที่กำลังขยายเดียวกัน

ดังนั้นเวลาเลือกกล้องถ่ายภาพดิจิทัลนั้นควรเลือกชนิดที่มีกำลังขยายจากชุดเลนส์จริงมาก ๆ โดยกำลังขยายจากซอฟต์แวร์นั้นจะเป็นแต่เพียงองค์ประกอบเสริมที่จะใช้งานเมื่อเลยขีดจำกัดกำลังขยายจากชุดเลนส์จริงเท่านั้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- (1) Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; ASTM E – 399 - 74
- (2) Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000
- (3) JIS G 4051 (1968) Standard for Ferrous Metallic Materials
- (4) Designation: E8M–93 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- (5) Larsen JM. Jira JR. Ravichandran KS. Measurement of Small Cracks by Photomicroscopy: Experiments and Analysis. In: Small – Crack Test Methods, ASTM STP 1149. Larsen JM, Allison JE, editors. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials; 1992. p.57–80
- (6) Luna R. Digital image analysis techniques for fiber and soil mixtures. Report; 1999 May. LTRC Project No. 98 – 2 TIRE. State Project No. 736 – 99 – 0572. Sponsored by The Louisiana Transportation Research Center, the Louisiana Department of Transportation and Development.
- (7) Shinozuka M. Chung HC. Ichitsubo M. Liang J. System Identification by Video Image Processing. Report; 2001. Sponsored by The National Science Foundation under Grant INT – 9604614 and the Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- (8) Gordon GG. Automated Glass Fragmentation Analysis. In: Proceedings of the SPIE on 4th Machine Vision Applications in Industrial Inspection. 1996 Feb; San Jose, California; 1996.
- (9) Mobasher B. Rajan SD. Image Processing Applications for the Study of Displacements and Cracking in Composite Materials. ASCE, Journal of Engineering Mechanics. Available from: barzin@asu.edu. and S.rajan@asu.edu
- (10) Monteiro JM. Vaz M AP. Melo FQ. Silva Gomes JF. Use of interferometric techniques for measuring the displacement field in the plane of a part – through crack existing in plate. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Revised 2001 Jan 2. Accepted 2001 Jan 6. Elsevier Science. 2001 Jan; (78): 253 – 259.
- (11) Lawson S. Ultrasonic testing and image processing for in – progress weld inspection. Funded by the European Commission under the BRITE – URAM II programme Project No.5907.

<http://www.surrey.ac.th.uk/eng/research/mechatronics/robots/People/mes3sl/mes3sl.html>

- (12) Anderson TL. Fracture Mechanics; Fundamentals and Applications. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 1995
- (13) JIS Z 2202 (1968) Standard for Ferrous Materials
- (14) Lower Bound KIC and Failure Assessment Diagram; Fitness – for – Service of API Recommended Practice 579; First edition, January 2000
- (15) The Collaboration for NDT Education: www.ndt-ed.org and The American Society for Nondestructive Testing: www.asnt.org
- (16) Mathews C. Power boilers – remnant life assessment. In: Case studies in engineering design. London: Arnold; 1998. p.142 – 156.
- (17) Lacay J. The Complete guide to digital imaging. London: Thames & Hudson; 2002.
- (18) ImageJ Documentation. National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA; <http://rsb.info.nih.gov/nih-image/>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลใบรับรองคุณภาพเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C จากผู้ผลิต



SHIJIAZHUANG IRON AND STEEL HOLDINGS LTD.



COMMODITY: HOT ROLLED STEEL ROUND BAR

No. 184387

STEEL GRADE: S45C

SURFACE QUALITY: QUALIFIED

SIZE: $\phi 22$ mm

DELIVERY CONDITION: HOT ROLLED

WEIGHT: 57.488 MT

STANDARD: JIS G4051

NO. OF BUNDLE: 20

HEAT NO.	CHEMICAL COMPOSITION (%)								
	MECHANICS					HARDNESS		MACROSTRUCTURE	
5103187	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
	0.46	0.26	0.72	0.008	0.011	0.03	0.01	0.02	
	σ_s MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %		HARDNESS(HBS)		G.P.	C.P.
	≥ 355	≥ 600	≥ 18.0	≥ 40.0		≤ 229		(0.0/0.0)	(0.0/0.5)
5203135	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
	0.46	0.23	0.71	0.008	0.012	0.14	0.01	0.02	
	σ_s MPa	σ_b MPa	δ_5 %	ψ %		HARDNESS(HBS)		G.P.	C.P.
	≥ 355	≥ 600	≥ 18.0	≥ 40.0		≤ 229		(0.0/0.0)	(0.0/0.5)

NOTE: σ_b = TENSILE STRENGTH σ_s = YIELD STRENGTH

PAGE 1

G.P. = GENERAL POROSITY, C.P. = CENTRAL POROSITY, I.P. = INGOT PATTERN

ภาคผนวก ข.

ตารางบันทึกผลการทดสอบภาระดึงชั้นทดสอบตามข้อกำหนดใน Designation: E 8M – 93
(METRIC) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]

ชั้นทดสอบที่ 1			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
0.0001	0.0003	0.6799	0.0240
0.0004	0.0012	76.5606	2.7067
0.0006	0.0022	152.8917	5.4053
0.0008	0.0026	228.7046	8.0855
0.0008	0.0025	306.4052	10.8325
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0428	0.1426	10541.5800	372.6821
0.0431	0.1437	10616.8300	375.3425
0.0435	0.1449	10692.8100	378.0286
0.0438	0.1461	10770.1600	380.7632
0.0442	0.1472	10846.0200	383.4452
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0548	0.1826	13832.6000	489.0313
0.0545	0.1817	13755.1300	486.2925
0.0541	0.1804	13672.1100	483.3574
0.0538	0.1792	13586.6600	480.3365
0.0535	0.1783	13502.5600	477.3632
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.9729	3.2429	17095.6500	604.3917
0.9904	3.3014	17170.9500	607.0538
1.0091	3.3635	17246.2300	609.7152
1.0265	3.4217	17321.2800	612.3685
1.0468	3.4894	17396.4500	615.0260

ชั้นทดสอบที่ 1 (ต่อ)			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
1.6190	5.3967	18976.6400	670.8913
1.6592	5.5305	19051.8200	673.5492
1.7035	5.6784	19126.8700	676.2025
1.7485	5.8285	19202.1400	678.8635
1.8009	6.0030	19276.2500	681.4836
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2.9047	9.6823	20107.7300	710.8793
2.9631	9.8769	20130.7200	711.6921
3.0217	10.0722	20146.8700	712.2631
3.0806	10.2688	20161.1200	712.7669
3.1400	10.4665	20173.2100	713.1943
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
5.8449	19.4829	19910.4300	703.9041
5.9420	19.8068	19862.3400	702.2039
6.0405	20.1351	19810.1300	700.3581
6.1398	20.4661	19749.3400	698.2090
6.2397	20.7991	19680.4400	695.7731
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
7.9484	26.4946	17122.2100	605.3307
7.9770	26.5900	17046.4800	602.6533
8.0052	26.6841	16970.8200	599.9785
8.0312	26.7707	16895.6400	597.3206
8.0611	26.8702	16820.6300	594.6687
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ผลลัพธ์ของชั้นที่ 1	ความเค้นคราก	373.5140	MPa
	ความเครียด	0.0019	mm / mm
	โมดูลัสของความยืดหยุ่น	200.6015	GPa

ชั้นทดสอบที่ 2			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
0.0000	0.0001	0.0764	0.0027
0.0004	0.0012	75.8663	2.6821
0.0008	0.0025	151.0031	5.3385
0.0011	0.0038	227.8107	8.0539
0.0015	0.0051	307.5643	10.8735
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0173	0.0578	3385.8340	119.7012
0.0177	0.0591	3463.0780	122.4321
0.0181	0.0604	3541.1670	125.1928
0.0185	0.0618	3616.7130	127.8636
0.0190	0.0632	3691.8820	130.5211
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0418	0.1394	8072.1290	285.3783
0.0422	0.1408	8151.0630	288.1689
0.0426	0.1420	8229.8240	290.9534
0.0430	0.1433	8308.5840	293.7378
0.0434	0.1448	8387.2000	296.5172
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0516	0.1721	9943.9460	351.5536
0.0520	0.1735	10023.1600	354.3541
0.0525	0.1749	10101.9200	357.1386
0.0528	0.1762	10178.4600	359.8445
0.0532	0.1774	10254.0500	362.5169
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.4536	1.5121	11169.4200	394.8785
0.4596	1.5320	11245.3200	397.5618
0.4674	1.5579	11320.9000	400.2338

ชั้นทดสอบที่ 2 (ต่อ)			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
0.8592	2.8641	13808.6500	488.1846
0.8752	2.9174	13883.7500	490.8396
0.8904	2.9682	13958.9500	493.4982
0.9075	3.0250	14034.0300	496.1526
0.9229	3.0763	14109.2700	498.8126
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
1.3628	4.5427	15690.4300	554.7122
1.3899	4.6331	15765.5700	557.3686
1.4182	4.7274	15840.7500	560.0265
1.4475	4.8249	15915.8800	562.6826
1.4800	4.9334	15990.9400	565.3363
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
3.8734	12.9113	17900.0600	632.8304
3.9412	13.1374	17909.5800	633.1670
4.0094	13.3647	17913.8700	633.3186
4.0781	13.5936	17915.9500	633.3922
4.1236	13.7452	17918.9900	633.4996
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
4.0937	13.6458	17141.9100	606.0271
2.2479	7.4931	17066.8200	603.3724
1.8655	6.2184	16991.5000	600.7096
1.9190	6.3968	16916.4400	598.0560
1.9673	6.5576	16841.1500	595.3942
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ผลลัพธ์ของชั้นที่ 2	ความเค้นคราก	302.2917	MPa
	ความเครียด	0.0019	mm / mm

ชั้นทดสอบที่ 3			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
0.0000	0.0001	0.3797	0.0134
0.0002	0.0008	1193.5890	42.1976
0.0006	0.0019	1268.6800	44.8523
0.0009	0.0030	1345.2140	47.5581
0.0012	0.0041	1420.7260	50.2277
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0137	0.0457	3795.6880	134.1910
0.0141	0.0470	3871.3300	136.8652
0.0145	0.0483	3947.4820	139.5574
0.0149	0.0497	4025.7520	142.3246
0.0153	0.0510	4101.6140	145.0066
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0232	0.0774	5637.2810	199.2978
0.0236	0.0788	5716.3230	202.0922
0.0240	0.0801	5794.7780	204.8659
0.0244	0.0815	5872.0730	207.5985
0.0248	0.0828	5947.7590	210.2743
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0407	0.1357	8954.6160	316.5773
0.0411	0.1370	9030.7080	319.2675
0.0415	0.1384	9108.1920	322.0068
0.0419	0.1397	9185.8190	324.7512
0.0423	0.1410	9261.2310	327.4173
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.0571	0.1905	11812.2100	417.6034
0.0958	0.3194	11788.5100	416.7655
0.1530	0.5099	11863.5600	419.4188

ชั้นทดสอบที่ 3 (ต่อ)			
ระยะยืด (mm)	%ความเครียด (mm/mm)	ภาระ (N)	ความเค้น (MPa)
0.4800	1.6001	12798.6900	452.4789
0.4882	1.6273	12873.9400	455.1393
0.4981	1.6602	12949.7500	457.8194
0.5070	1.6901	13025.2400	460.4883
0.5175	1.7251	13100.9000	463.1631
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
1.1786	3.9286	16415.8600	580.3587
1.2000	4.0000	16490.9900	583.0148
1.2252	4.0839	16566.0900	585.6698
1.2478	4.1593	16641.4500	588.3341
1.2716	4.2388	16716.7300	590.9955
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
3.4119	11.3729	17873.9900	631.9087
3.4633	11.5442	17798.4000	629.2364
3.5138	11.7125	17723.0300	626.5718
3.5642	11.8806	17648.0300	623.9203
3.6131	12.0436	17572.8800	621.2634
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.9690	3.2299	16594.2700	586.6661
1.2508	4.1692	15683.3800	554.4629
1.2564	4.1881	15603.8100	551.6498
1.2602	4.2005	15482.3000	547.3540
1.2621	4.2070	15299.3600	540.8865
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ผลลัพธ์ของชั้นที่ 3	ความเค้นคราก	323.2151	MPa
	ความเครียด	0.0016	mm / mm

หมายเหตุ : บันทึกผลการทดสอบโดยละเอียดสามารถดูได้จากแผ่น CD – ROM แนบท้ายปริญญานิพนธ์

ภาคผนวก ค.

การคำนวณหาขนาดของแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อการทดสอบหาค่าความทนทานต่อการแตกหัก
ของวัสดุตาม **Recommended Method of Testing for Plane Strain Fracture Toughness of
Metallic Materials; ASTM E – 399 – 74**

ตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง

σ_{ys} / E	ความหนาต่ำสุด (มม.)
0.0050 – 0.0057	75.0
0.0057 – 0.0062	63.0
0.0062 – 0.0065	50.0
0.0065 – 0.0068	44.0
0.0068 – 0.0071	38.0
0.0071 – 0.0075	32.0
0.0075 – 0.0080	25.0
0.0080 – 0.0085	20.0
0.0085 – 0.0100	12.5
> 0.0100	6.5

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน σ_{ys} / E ที่ได้จากการทดสอบภาระดึงไปเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุในตาราง 1 ค่าความหนาต่ำสุดโดยประมาณสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง จะสามารถประมาณค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นขึ้นทดสอบเหล็กกล้าที่เหมาะสมต่อการทดสอบหาค่าความทนทานต่อการแตกหักแบบความเครียดระนาบได้ งานวิจัยนี้ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน $\sigma_{ys} / E = 0.0018$ ซึ่งพบว่าอยู่นอกค่าที่ระบุในตาราง 1 จึงต้องใช้การประมาณค่านอกช่วงแบบเชิงเส้น (Linear extrapolation) เพื่อหาค่าความหนาต่ำสุด B ของแผ่นขึ้นทดสอบเหล็กกล้าดังนี้

$$(63 - B) / (0.0057 - 0.0018) = (63 - 75) / (0.0057 - 0.0050)$$

$$B = 129.8571 \text{ มิลลิเมตร}$$

ขนาดความหนาต่ำสุด B = 129.8571 มิลลิเมตร จะถูกนำไปเตรียมขนาดแผ่นขึ้นทดสอบแบบ CT ด้วยมิติต่างๆที่สัมพันธ์กับขนาดความหนาต่ำสุด B ตามภาพประกอบ 67

ภาคผนวก ง.

ตารางบันทึกผลการทดสอบแบบกระแทกบนชั้นทดสอบที่มีร่องบากแบบวีของชาร์ปีตาม
Assessing Fracture Toughness from Charpy V - Notch Data, Fitness – for – Service of
API Recommended Practice 579; First edition, January 2000

ข้อมูลของพลังงาน CVN ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S45C			
อุณหภูมิ (Deg. C)	CVN (Joule)	อุณหภูมิ (Deg. C)	CVN (Joule)
-65	6	-20	10
-65	5	-20	14
-65	5	-10	9
-65	4	-10	12
-65	5	-10	11
-65	5	0	14
-65	4	0	17
-65	5	0	13
-65	3	0	16
-50	8	0	9
-50	8	0	11
-50	6	26	21
-50	6	26	20
-50	9	26	21
-50	9	26	19
-50	8	26	22
-50	6	26	22
-50	6	26	24
-50	6	75	32
-50	6	78	34
-50	4	80	35
-50	8	93	40
-40	10	93	46
-40	9	93	45
-40	9	93	51
-40	6	93	52
-40	10	93	46
-40	7		
-40	10		
-40	6		
-40	8		

ภาคผนวก จ.

ตารางบันทึกผลการทดสอบการจับภาพรอยแตกบนแผ่นขึ้นทดสอบและการประมวลผล
ภาพแบบดิจิทัล

Image No.	Load (N)	Extension (mm)	Stress (MPa)	Δ (mm)	a (mm)	da (mm)	d Δ / da	G (kN/m)	ΔG (N/m)
5	2500.444	0.2781962	10.4185	0.300	58.700				
7	3500.169	0.3445176	14.5840	0.350	58.750	58.750	1.0000	875.0423	
10	5000.526	0.435214	20.8355	0.400	58.782	58.782	1.5625	1953.3305	2828.3727
23	13000.57	0.9554459	54.1690	0.700	58.882	58.882	3.0000	9750.4275	12578.8002
29	14500.53	1.111981	60.4189	0.800	58.890	58.890	12.5000	45314.1562	57892.9565
34	18000.08	1.659588	75.0003	1.050	58.900	58.900	25.0000	112500.5000	170393.4565
36	17000.2	1.475945	70.8342	1.150	58.915	58.915	6.6667	28333.6667	198727.1231
40	20000.27	2.152927	83.3345	1.300	59.005	59.005	1.6667	8333.4458	207060.5690
42	21000.51	2.496052	87.5021	1.550	59.101	59.101	2.6042	13672.2070	220732.7760
44	22000.5	2.924677	91.6688	1.900	59.150	59.150	7.1429	39286.6071	260019.3831
45	22500.28	3.18948	93.7512	2.100	59.331	59.331	1.1050	6215.5470	266234.9301
46	23600.45	3.955444	98.3352	2.299	59.531	59.531	0.9950	5870.6119	272105.5420
47	23000.32	3.495855	95.8347	2.399	60.131	60.131	0.1667	958.3467	273063.8887
48	23500.41	3.894319	97.9184	2.400	61.431	61.431	0.0008	4.5193	273068.4080
49	23700.73	4.047265	98.7530	2.549	61.500	61.500	2.1594	12794.9593	285863.3673
50	23800.22	4.129015	99.1676	4.049	63.630	63.630	0.7042	4190.1796	290053.5469
51	17933.84	4.978711	74.7243	5.148	65.679	65.679	0.5364	2404.7450	292458.2919
52	16761.08	5.10005	69.8378	5.548	69.628	69.628	0.1013	424.4386	292882.7305
53	16193.25	5.200015	67.4719	5.698	70.060	70.060	0.3472	1405.6641	294288.3946
54	15146.79	5.300032	63.1116	5.890	70.728	70.728	0.2874	1088.3921	295376.7867
55	14198.8	5.40005	59.1617	6.511	71.566	71.566	0.7411	2630.5056	298007.2923
56	13415.45	5.500015	55.8977	6.650	72.750	72.750	0.1174	393.7389	298401.0312
58	12048.41	5.70005	50.2017	7.848	74.515	74.515	0.6788	2044.4752	300445.5064
59	11344.48	5.800014	47.2687	8.147	75.177	75.177	0.4517	1280.9666	301726.4730
60	10782.44	5.900032	44.9268	8.547	75.676	75.676	0.8016	2160.8096	303887.2827
61	10249.19	6.00005	42.7050	8.797	76.126	76.126	0.5556	1423.4986	305310.7813
62	9823.138	6.100014	40.9297	9.197	76.526	76.526	1.0000	2455.7845	307766.5658
63	9251.836	6.200031	38.5493	9.547	77.226	77.226	0.5000	1156.4795	308923.0453
64	8918.401	6.30005	37.1600	9.897	77.376	77.376	2.3333	5202.4006	314125.4458
65	8618.359	6.400014	35.9098	10.271	78.480	78.480	0.3388	729.9063	314855.3522
66	8355.127	6.500031	34.8130	10.597	79.175	79.175	0.4691	979.7739	315835.1260
67	8080.658	6.600103	33.6694	11.114	80.971	80.971	0.2879	581.5284	316416.6545
68	7831.61	6.700014	32.6317	11.246	81.600	81.600	0.2099	410.8794	316827.5338

70	7174.221	7.000014	29.8926	12.315	82.020	82.020	2.5452	4565.0251	321392.5590
73	6691.218	7.200049	27.8801	13.113	83.067	83.067	0.7622	1274.9742	322667.5332
74	6509.087	7.300014	27.1212	13.462	83.166	83.166	3.5253	5736.5438	328404.0770
75	6351.987	7.400031	26.4666	13.861	84.248	84.248	0.3688	585.5921	328989.6692
76	5983.822	7.600013	24.9326	14.011	84.712	84.712	0.3233	483.6063	329473.2755
77	6090.484	7.500049	25.3770	14.310	85.510	85.510	0.3747	570.5059	330043.7814
78	5632.235	7.800049	23.4676	14.659	85.659	85.659	2.3423	3298.0705	333341.8519
79	5883.025	7.700084	24.5126	14.908	86.008	86.008	0.7135	1049.3361	334391.1880
80	5198.727	8.00003	21.6614	15.257	87.305	87.305	0.2691	349.7216	334740.9096
81	5390.725	7.900013	22.4614	15.506	87.604	87.604	0.8328	1122.3165	335863.2261
82	4899.905	8.200012	20.4163	15.806	87.754	87.754	2.0000	2449.9525	338313.1786
83	5045.807	8.100048	21.0242	16.005	87.953	87.953	1.0000	1261.4518	339574.6303
84	4743.652	8.30003	19.7652	16.254	88.701	88.701	0.3329	394.7759	339969.4062
85	4522.835	8.400048	18.8451	16.653	89.249	89.249	0.7281	823.2715	340792.6777
86	4396.54	8.500013	18.3189	16.903	89.449	89.449	1.2500	1373.9187	342166.5964
87	4338.814	8.60003	18.0784	17.102	89.798	89.798	0.5702	618.4986	342785.0950
88	4281.665	8.700048	17.8403	17.401	90.396	90.396	0.5000	535.2081	343320.3031
89	4161.618	8.800012	17.3401	17.650	90.745	90.745	0.7135	742.2943	344062.5975
90	4005.789	9.000048	16.6908	17.950	90.895	90.895	2.0000	2002.8945	346065.4920
91	4058.8	8.90003	16.9117	18.149	91.294	91.294	0.4987	506.0784	346571.5704
92	3823.952	9.200083	15.9331	18.448	91.643	91.643	0.8567	819.0270	347390.5974
93	3906.32	9.100012	16.2763	18.797	92.241	92.241	0.5836	569.9438	347960.5412
94	3639.368	9.800029	15.1640	19.376	92.984	92.984	0.7793	709.0155	348669.5567
99	3606.787	10.20005	15.0283	19.526	93.134	93.134	1.0000	901.6967	349571.2535
100	3623.555	10.30001	15.0981	19.825	93.333	93.333	1.5025	1361.1092	350932.3627
103	3657.014	10.40003	15.2376	19.875	93.833	93.833	0.1000	91.4254	351023.7880
104	3643.096	10.60001	15.1796	20.125	94.232	94.232	0.6266	570.6604	351594.4484
105	3651.884	10.70003	15.2162	20.275	94.432	94.432	0.7500	684.7282	352279.1767
106	3630.966	10.80005	15.1290	20.524	94.482	94.482	4.9800	4520.5527	356799.7294
107	3620.73	10.90001	15.0864	20.774	95.181	95.181	0.3577	323.7420	357123.4713
108	3623.257	11.00003	15.0969	21.475	97.660	97.660	0.2828	256.1419	357379.6132
109	3609.491	11.10005	15.0395	21.628	98.018	98.018	0.4274	385.6509	357765.2642
110	3590.474	11.40005	14.9603	21.833	98.069	98.069	4.0196	3608.0744	361373.3385
111	3594.402	11.20006	14.9767	22.037	98.274	98.274	0.9951	894.2171	362267.5556

112	3592.906	11.30003	14.9704	22.191	98.427	98.427	1.0065	904.0973	363171.6529
113	3571.762	11.50001	14.8823	22.447	98.887	98.887	0.5565	496.9408	363668.5937
114	3552.2	11.60003	14.8008	22.549	99.041	99.041	0.6623	588.1890	364256.7826
115	3443.205	12.00004	14.3467	22.753	99.859	99.859	0.2494	214.6742	364471.4568
116	3458.385	11.80001	14.4099	22.958	100.063	100.063	1.0049	868.8345	365340.2912
117	3469.407	11.90003	14.4559	23.162	100.114	100.114	4.0000	3469.4070	368809.6982
118	3447.391	12.10001	14.3641	23.265	100.728	100.728	0.1678	144.5771	368954.2753
124	3101.156	14.10004	12.9215	27.102	109.647	109.647	0.4302	333.5333	369287.8086
125	2968.786	14.20001	12.3699	27.784	110.701	110.701	0.6471	480.2448	369768.0534
126	2867.047	14.30003	11.9460	27.846	111.631	111.631	0.0667	47.7841	369815.8376
127	2816.201	14.40004	11.7342	27.908	111.879	111.879	0.2500	176.0126	369991.8501
128	2766.114	14.50001	11.5255	28.032	112.313	112.313	0.2857	197.5796	370189.4297
141	2586.728	15.00004	10.7780	28.156	112.562	112.562	0.4980	322.0424	370511.4721
142	2509.509	16.50004	10.4563	28.218	112.996	112.996	0.1429	89.6253	370601.0975
143	2428.076	16.10002	10.1170	28.404	113.244	113.244	0.7500	455.2642	371056.3617
144	2495.841	16.40002	10.3993	28.466	113.430	113.430	0.3333	207.9867	371264.3485
145	2443.589	16.20004	10.1816	28.528	113.554	113.554	0.5000	305.4486	371569.7971
147	2553.898	16.70002	10.6412	28.652	114.174	114.174	0.2000	127.6949	371697.4920
149	9.044177	16.90001	0.0377	28.838	114.732	114.732	0.3333	0.7537	371698.2457
151	3643.603	9.600047	15.1817	28.900	114.856	114.856	0.5000	455.4504	372153.6960
152	3638.693	9.700012	15.1612	29.024	115.042	115.042	0.6667	606.4488	372760.1449
157	3351.795	13.10003	13.9658	29.210	115.228	115.228	1.0000	837.9488	373598.0936
158	3349.701	13.20004	13.9571	29.272	115.724	115.724	0.1250	104.6782	373702.7718
161	3242.265	13.50004	13.5094	29.520	115.910	115.910	1.3333	1080.7550	374783.5268
162	3264.461	13.60001	13.6019	29.582	116.034	116.034	0.5000	408.0576	375191.5844
163	3259.166	13.70003	13.5799	29.768	116.345	116.345	0.5981	487.3030	375678.8874
164	3221.717	13.80004	13.4238	29.892	116.097	116.097	-0.5000	-402.7146	375276.1727
165	3217.39	13.90001	13.4058	29.892	116.159	116.159	0.0000	0.0000	375276.1727
166	2525.156	15.10001	10.5215	30.078	116.469	116.469	0.6000	378.7734	375654.9461
167	2455.008	15.20003	10.2292	30.202	117.151	117.151	0.1818	111.5913	375766.5374
168	2383.982	15.30004	9.9333	30.326	117.213	117.213	2.0000	1191.9910	376958.5284
170	2240.368	15.50003	9.3349	30.451	118.639	118.639	0.0877	49.0964	377007.6248

หมายเหตุ : ค่าต่างๆของภาพหมายเลข 50 ที่แสดงด้วยแถบสีเหลือง คือ ค่าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเติบโตของรอยแตกที่ไม่เสถียร ทั้งนี้พิจารณาจากแผนภูมิ 3

ภาคผนวก จ.

แฟ้มตัวอย่างภาพถ่ายรอยแตกที่ผ่านการประมวลผลภาพแล้ว

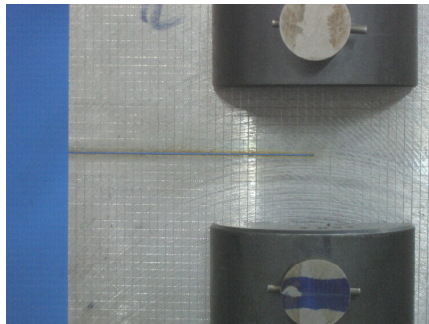


Image 0 (Before DIP)

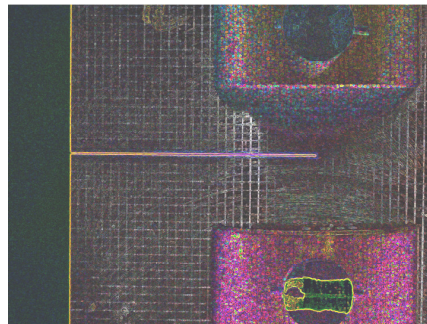


Image 0 (After DIP)

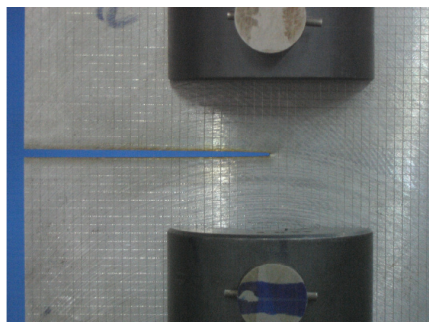


Image 45 (Before DIP)

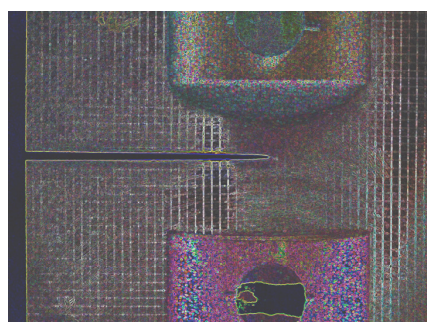


Image 45 (After DIP)

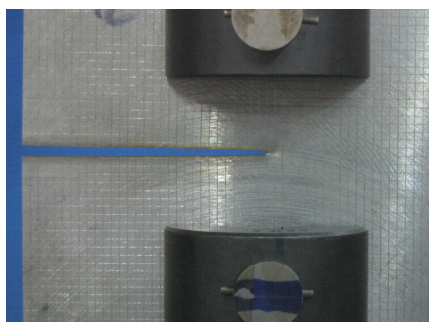


Image 49 (Before DIP)

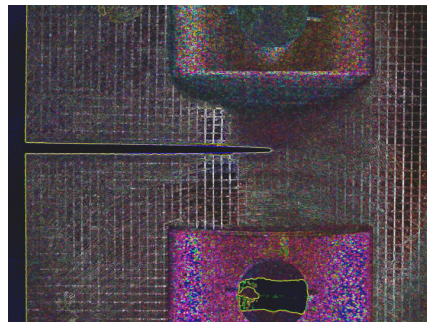


Image 49 (After DIP)

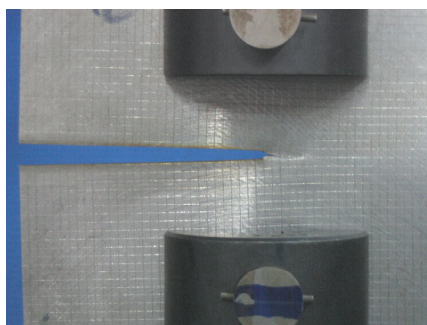


Image 51 (Before DIP)

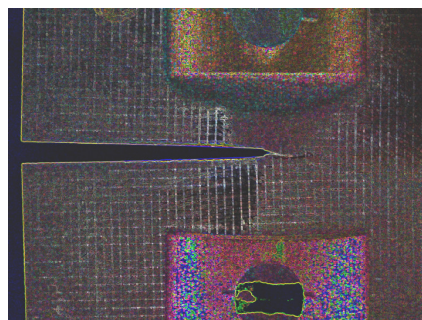


Image 51 (After DIP)

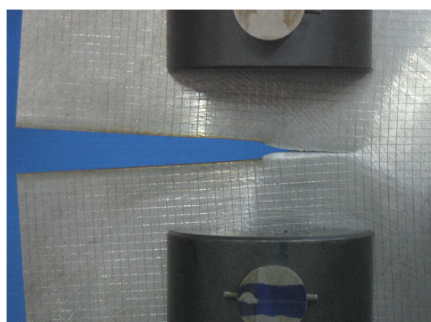


Image 68 (Before DIP)

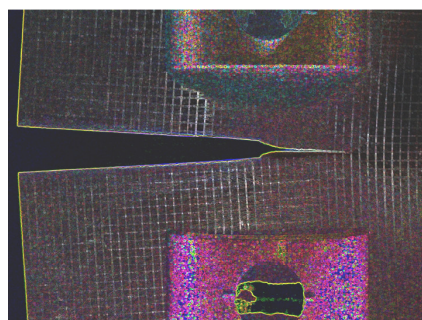


Image 68 (After DIP)

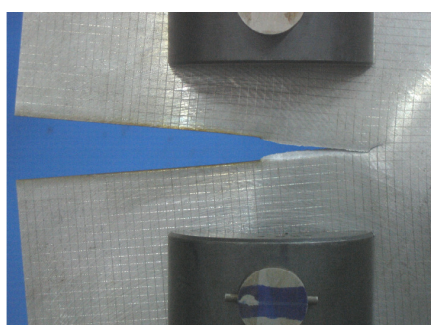


Image 81 (Before DIP)

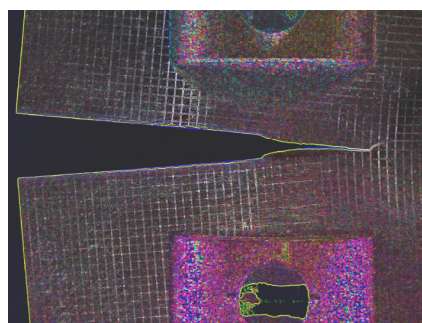


Image 81 (After DIP)

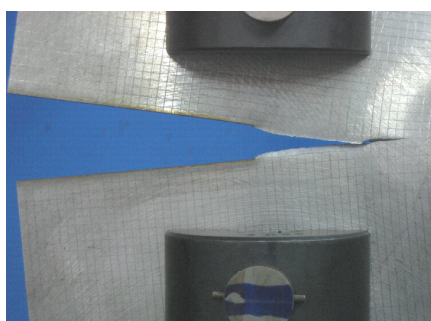


Image 108 (Before DIP)

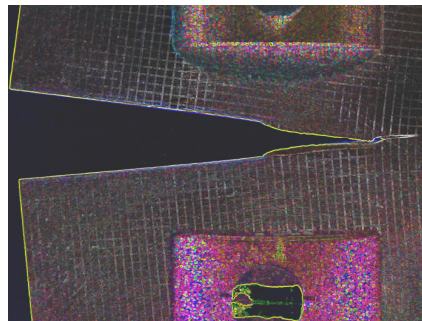


Image 108 (After DIP)



Image127 (Before DIP)

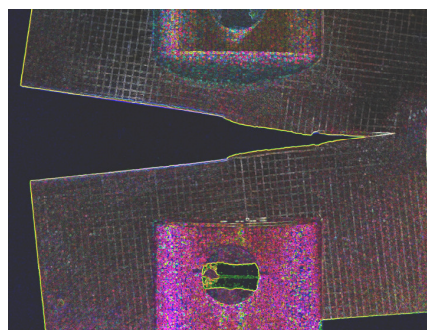


Image127 (After DIP)



Image143 (Before DIP)

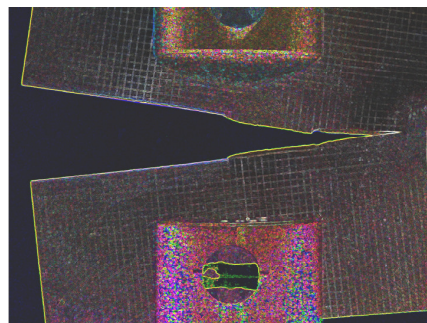


Image143 (After DIP)



Image166 (Before DIP)

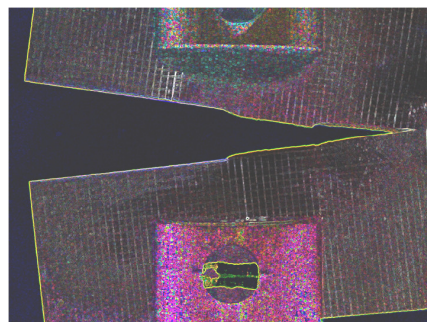


Image166 (After DIP)



Image170 before rupture (Before DIP)

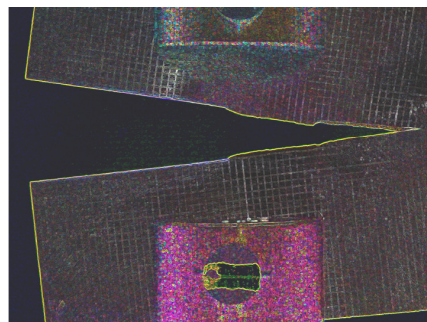


Image170 before rupture (After DIP)

ภาคผนวก ช.

ข้อกำหนดทั่วไปของ Extensometer INSTRON 2630 - 100 SERIES แบบ Clip – On

Effect of temperature on sensitivity	start - 0.008, 100 to 150 °C (typical)	% / ° C
	start - 0.01, 150 to 200 °C (typical)	
	11 types of wire clips.	
Method of attachment to specimen	Elastic bands (not supplied).	
	Optional specimen clamps	
Immiscibility	Non - conductive / non - corrosive fluids, i.e.	
	acetone, mineral and silicone oils, alcohol	
Gauge length setting	Cone latch with automatic release	
Round specimen sizes	< 15, (0.6in.) and 20 (0.8in.)	mm
Rectangular specimen sizes	Width < 40 (1.6in.)	mm
	Thickness < 15, (0.6in.)	
Knife edge gripping force	start 300 to 600 (start 0.66 to 1.32 lbs),	grams
	subject to the correct selection of clips	
Maximum width of specimen with Specimen stops fitted	18 mm (0.71 in.)	

หมายเหตุ ทุกๆค่าจะวัดที่อุณหภูมิ 22 °C นอกจากจะกำหนดเป็นอย่างอื่น

ข้อกำหนดนี้เป็นเพียงบางส่วนที่จำเป็นต่อการใช้งานวิจัยนี้เท่านั้น สำหรับรายละเอียดในเชิงลึกสามารถศึกษาได้จากคู่มือ Extensometer INSTRON 2630 - 100 SERIES แบบ Clip – On

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล

นายชัชวาลย์ สอนศิริ

วันเดือนปีเกิด

18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517

สถานที่เกิด

อ.พนัสนิคม จ.ชลบุรี

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

27/90 ม.3 ต.สัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี 20180

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน

วิศวกรกระบวนการ

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

บริษัท สวารอฟสกี เจมสโตน (ประเทศไทย) จำกัด

แผนก Technical Support ฝ่าย Production

333 ม.17 นิคมอุตสาหกรรมบางพลี ถ.บางนา – ตราด

ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ 10540

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2536

มัธยมศึกษาตอนปลาย แผนกวิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์

โรงเรียนพนัสพิทยาคาร

พ.ศ. 2542

วิศวกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

พ.ศ. 2551

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ