

# การวิเคราะห์รอยร้าวรูปครึ่งวงรีบนผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ที่ติดบนคานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## Analysis of a Semi-Elliptical Crack on a Surface of a Piezoelectric Patch Attached on a Beam by Finite Element Method

ประเสริฐ อังกาบ<sup>\*1</sup> เอกุ ธรรมกรบัญญัติ<sup>#2</sup>

<sup>\*</sup>หลักสูตรปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น  
1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
an.prasert\_st@tni.ac.th

<sup>#</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
2eku@tni.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์บางตัวต่อตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวครึ่งวงรีที่ผิวภายใต้เงื่อนไขโหมดแบบเปิด แบบจำลองในงานวิจัยนี้มีที่มาจากพบความเสียหายในลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บนแขนแอคชูเอเตอร์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงจำลองปัญหาเป็นคานยื่นมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดอยู่และรับโมเมนต์ดัดที่ปลายอิสระของคาน จากนั้นทำการคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์แอนซิส จากผลการคำนวณ อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยร้าว มีผลกระทบต่อตัวประกอบความเข้มของความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้น (เพิ่มความลึกของรอยร้าวไปจนมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว) ค่า  $K_I$  สูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับตำแหน่งของรอยร้าว ถ้ารอยร้าวยังใกล้ขอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ค่า  $K_I$  ยังมีค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน ตำแหน่งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไม่มีผลต่อค่า  $K_I$

**คำสำคัญ:** ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, เพียโซอิเล็กทริก, รอยร้าวที่ผิว, ตัวประกอบความเข้มของความเค้น, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### ABSTRACT

This research intends to investigate the effects of some parameters to the stress intensity factor of a semi-elliptical surface crack under the open mode condition. The model has been simplified from cracking failures which occurred at piezoelectric patches embedded on an actuator arm in hard disk drive. Thus a cantilever beam with a piezoelectric patch subject to bending moment at its free end is chosen. Stress intensity factors at crack fronts are then calculated by a commercial finite element software, ANSYS. From the numerical results, crack size ratio and crack position have significant effects to the stress intensity factor. When the crack size ratio is increased (the crack depth is increased until equal to the half crack length) the maximum  $K_I$  will also

be increased. For crack position, more closer to the edge of a piezoelectric patch the  $K_I$  will be higher. In the other hand, the piezoelectric patch position is not affect to  $K_I$ .

**Keywords:** Hard Disk Drives, Piezoelectric, Surface Crack, Stress Intensity Factor, Finite Element Method.

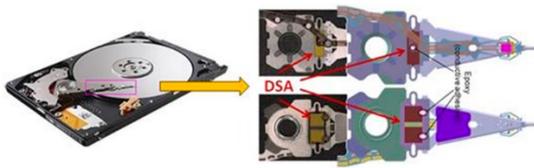
### 1) บทนำ

ในปี ค.ศ. 1956 บริษัทไอบีเอ็มได้ผลิตอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิสก์ดิสก์แรกของโลก เรียกว่า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) มีชื่อรุ่นคือ IBM 350RAMAC และมีความจุในการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล 5 ล้านตัวอักษร หลังจากนั้นอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนทำให้ในปี ค.ศ.2013 ความจุสูงสุดของฮาร์ดดิสก์อยู่ที่ 4TB ในการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนและบริษัทผู้ประกอบชิ้นส่วนจะให้ความสำคัญกับความจุของฮาร์ดดิสก์ที่ต้องเพิ่มมากขึ้น โดยมีความรวดเร็วและความถูกต้องของการอ่านและเขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็กสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ความรวดเร็วและความถูกต้องของการอ่านและเขียนข้อมูลนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมการเคลื่อนที่และตำแหน่งของแขนแอคชูเอเตอร์ (Actuator arm) นอกจากนี้แล้วบนแขนแอคชูเอเตอร์ยังมีส่วนที่สำคัญในการควบคุมดังกล่าว เรียกว่า แอคชูเอเตอร์ลำดับที่สอง (Dual-Stage Actuator: DSA) ซึ่งจะมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric patches) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นและช่วยในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียน หนึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ ตะกั่วเซอร์โคเนียม และไททาเนียมออกไซด์ (Lead-Zirconium-Titanium Oxide) หรือนิยมเรียกย่อ ๆ ว่า PZT

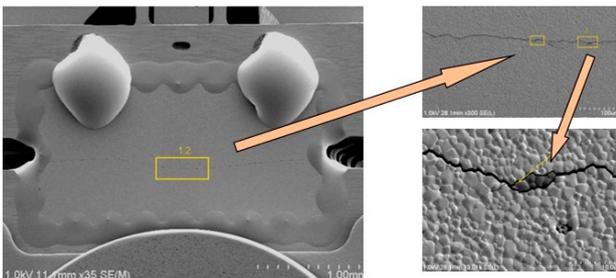
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเกิดจากความไม่สมมาตรในหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของระบบผลึก (Lattice) ในวัสดุทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้นสองขั้ว เมื่อใส่ภาระทางกล (Mechanical load) เข้าไปในวัสดุดังกล่าว

จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นได้ โดยแรงกดหรือแรงดึงจะได้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าตรงข้ามกัน ในทางกลับกัน ถ้าใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในผลึกหรือวัสดุนั้นจะเกิดการยึดหรือหดตัวตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า อาจกล่าวโดยย่อว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกลในรูปของความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงขนาด ด้วยพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าว นักวิจัยและนักประดิษฐ์จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหรือควบคุมการเสีรูปของโครงสร้างต่าง ๆ กล่าวคือ ถ้าใช้เป็นตัวตรวจวัด จะสามารถรู้ระยะที่โครงสร้างเคลื่อนที่หรือเสีรูปไปได้จากทิศทางและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในขณะเดียวกันถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าด้วยทิศทางและขนาดที่ออกแบบไว้ การยึดหรือหดตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้โครงสร้างที่มันติดตั้งอยู่เสีรูปหรือเคลื่อนตัวไปในทิศทางและขนาดที่ต้องการได้ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ก็ใช้ประโยชน์จากพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนแอคชูเอเตอร์และตำแหน่งของหัวอ่านและเขียนในทำนองเดียวกัน รูปที่ 1 เป็นตัวอย่างของตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น PZT บริเวณแขนแอคชูเอเตอร์ฮาร์ดดิสก์ต่างยี่ห้อหรือต่างรุ่นอาจมีลักษณะและขนาดของแผ่น PZT ที่แตกต่างกันไปจากนี้ได้

ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์มีการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งที่ผ่านมาพบว่าการแตกร้าวของแผ่น PZT ในกระบวนการผลิต ทำให้เกิดชิ้นงานเสียเป็นจำนวนมาก ความเสียหายที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะตรวจสอบพบได้ในขั้นตอนท้าย ๆ ของกระบวนการผลิต โดยจะพบรอยร้าวบนแผ่น PZT ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเห็นรอยร้าวเป็นเส้นผ่าแผ่น PZT ตามขวาง ซึ่งอาจจะเฉียงน้อยหรือค่อนข้างมากก็ได้ หรือโดยการใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope, SEM) จะสามารถขยายภาพรอยร้าวขึ้นมาได้ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งก็ยังไม่สามารถคาดเดาสาเหตุของความเสียหายจากการมืองรอยร้าวได้



รูปที่ 1 ตัวอย่างตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น PZT



รูปที่ 2 รอยร้าวที่ขยายขึ้น 300 เท่า และ 3000 เท่า ตามลำดับ

จากข้อมูลภาพถ่ายแสดงความเสียหาย ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ตามหลักของกลศาสตร์การแตกหักโดยมีสมมุติฐานว่า ระบบ

ฟิล์ม/ฐาน (Film/substrate system) ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ชั้นกาว และฐาน มีความบกพร่องหรือตำหนิ (Defect) อยู่ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ถือเป็นความพยายามในขั้นแรกที่จะหาสาเหตุของความเสียหาย ตำหนิดังกล่าวจะพิจารณาเฉพาะรอยร้าว และจะพิจารณาในระดับแมคโครเท่านั้น ตำหนิอื่น ๆ เช่น ดิสโลเคชัน (Dislocation) รวมไปถึงการวิเคราะห์ในระดับคริสตัล หรือแบบจำลองอะตอม (Atomistic model) จะไม่นำมาพิจารณา นอกจากนี้การสร้งแบบจำลองของปัญหานี้จะให้อยู่ในระดับที่ไม่ยุ่งยากต่อการวิเคราะห์

## 2) ทฤษฎี

### 2.1) กลศาสตร์การแตกหัก

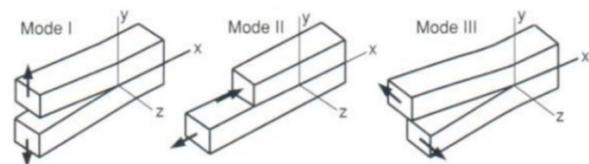
ทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักวางอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ในชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ จะมีตำหนิ (Defects) อยู่ ตำหนินี้้อาจเป็นลักษณะรอยข่วน หรือหลุมที่บริเวณผิว หรือช่องว่างในเนื้อวัสดุที่เกิดจากความพรุน เมื่อชิ้นส่วนที่มีตำหนิเหล่านี้รับแรงภายนอกที่มีค่าสูงเพียงพอ ตำหนิเหล่านี้จะพัฒนาไปเป็นรอยร้าว ซึ่งบริเวณปลายรอยร้าวจะมีการเสีรูปมากกว่าบริเวณอื่นที่ห่างออกไป จึงเป็นบริเวณที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (Crack Tip Parameter) ว่ามีค่าเป็นเท่าใด เพื่อใช้ระบุถึงระดับของความเสียหาย และยังใช้ค่าวิกฤติของพารามิเตอร์นี้เป็นตัวบอกความต้านทานของวัสดุต่อการเติบโตของรอยร้าวเริ่มต้นได้ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงขนาดของรอยร้าวว่าชิ้นส่วนจะแตกหักเมื่อรอยร้าวมีขนาดเท่าใด หรือเมื่อรับภาระเท่าใดได้อีกด้วย

กลศาสตร์การแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แขนง ตามพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุ คือ กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic Fracture Mechanics, EPFM) และกลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Fracture Mechanics, TDFM) [1] ในงานวิจัยนี้เนื่องจากแผ่น PZT เป็นเซรามิกส์ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะดังนั้นจะใช้ทฤษฎี LEFM ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่ปลายรอยร้าว คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะโหมดที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3

องค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวสามารถเขียนง่าย ๆ ในรูปของตัวประกอบความเข้มของความเค้นได้ดังสมการ

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะจากปลายรอยร้าวถึงตำแหน่งที่จะหาความเค้น และ  $f_{ij}$  คือ ฟังก์ชันของมุม  $\theta$

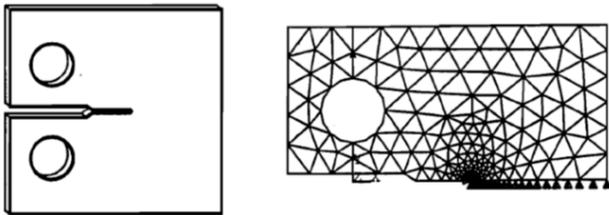


รูปที่ 3 โหมดพื้นฐานของการเสีรูปของรอยร้าว [2]

จะเห็นได้ว่า หากสามารถทราบค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นได้ ก็จะสามารถคำนวณหาความเค้นที่บริเวณปลายรอยร้าวได้นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเป็นตัวบอกความรุนแรงของรอยร้าวได้จากขนาดของรอยร้าว ความเค้นที่ปลายรอยร้าว และรูปร่างของรอยร้าว [2] อนึ่งจะถือว่าวัสดุสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ทราบเท่าที่ค่า  $K$  ยังมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต  $K_c$  ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติวัสดุ เรียกว่า ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness)

### 2.2) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จะต้องแก้ระบบสมการหรือความสัมพันธ์ 3 ชุดที่เกี่ยวข้องกัน ประกอบด้วย สมการสมดุล 3 สมการ ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด 6 สมการ และความสัมพันธ์ความเครียดกับระยะเคลื่อนตัวอีก 6 สมการ การแก้ระบบสมการเหล่านี้ในปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีความไม่เชิงเส้นจะทำให้ยากลำบากหรืออาจทำไม่ได้เลย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขซึ่งช่วยแก้ปัญหา วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็จัดอยู่ในกลุ่มของวิธีเชิงตัวเลขซึ่งโดยหลักการแล้ว เป็นการเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ควบคุมปัญหาที่จะวิเคราะห์ให้กลายเป็นระบบสมการพีชคณิต ซึ่งจะสามารถแก้สมการและหาค่าตอบโดยประมาณได้ในรูปของเมทริกซ์ นอกจากนี้แล้วยังต้องแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ขึ้นมาตามหลักการข้างต้น จากนั้นจึงทำการประกอบสมการย่อยของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการ เมื่อทำการแทนค่าที่ขอบและแรงภายนอกที่กระทำ ก็จะสามารถแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวแปรไม่รู้ค่าที่ต้องการได้ และใช้ตัวแปรที่หาได้ในเบื้องต้นไปหาตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป กระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้กระทำโดยอาศัยการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แอนซิส (ANSYS) ในการดำเนินการ



รูปที่ 4 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์บนชั้นหัดสอบที่มีรอยร้าวโดยพิจารณาเพียงครึ่งเดียว [3]

### 2.3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1973 Newman, Jr. [4] นำเสนอสมการสำหรับคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวที่ผิว และรอยร้าวที่ทะลุความหนาของแผ่น โดยพัฒนาขึ้นจากสมการความเข้มของความเค้นที่รอยบาก (Notch) ของ Neuber งานวิจัยนั้นนอกจากจะแสดงแนวคิดในการพัฒนาสมการขึ้นมาแล้ว ยังเปรียบเทียบผลการคำนวณตามสมการดังกล่าวกับผลการทดลองของวัสดุหลายชนิด ซึ่งค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -10 ถึง +10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

ในปี 1976 Smith and Sorensen [5] ทำการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นภายใต้ภาระดึงแบบกระจายคงที่ งานวิจัยนี้พัฒนาต่อจากงานของ Shah and

Kobayashi [6] โดยใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับสามเพื่อหาค่าสนามความเค้นและค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยประมาณ

ในปี 1977 Raju and Newman, Jr. [7] ได้นำเสนอการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีการตรวจสอบผลการคำนวณบางกรณีที่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ได้ และพบว่า การเพิ่มระดับขั้นความละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้สามารถให้ผลการคำนวณที่ดีขึ้นกว่าเดิม

ในปี 1979 Raju and Newman, Jr. [8] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงกลมและครึ่งวงรีในแผ่นที่รับแรงดึง งานวิจัยนี้สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปี 1981 Newman, Jr. and Raju [9] ได้นำเสนอสมการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดของรอยร้าว ความหนาและความกว้างของแผ่น ภาระเป็นแรงดึงและโมเมนต์ดัด เป็นต้น สมการดังกล่าวนี้ได้จากผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องมาแล้ว [8] นอกจากนี้ยังนำสมการนี้ไปวิเคราะห์การเติบโตของรอยร้าวภายใต้ภาระแรงดึงและโมเมนต์ดัดด้วย

ในปี 1983 Nishioka and Atluri [10] ใช้วิธีอัลเทอร์เนต (Alternating Method) ร่วมกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รอยร้าวรูปวงรีที่อยู่ข้างในและที่ผิวของของแข็งรูปร่างต่าง ๆ กันโดยมีภาระเป็นแรงดึงกับโมเมนต์ดัด มีการนำสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ามาใช้ประมาณสนามความเค้นที่ผิวรอยร้าว ทำให้ความถูกต้องของผลการคำนวณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยเก่า ๆ

ในปี 2001 Zhu และคณะ [11] พิจารณาสถาปัตยกรรมความเค้น และการเสถียรสำหรับรอยร้าวรูปวงรีที่อยู่ในวัตถุยึดหยุ่นรับภาระดึงจาก ภาระเฉือน และภาระผสม มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมการความเค้นและการเสถียรที่ทำได้กับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวจากการพิจารณาสถาปัตยกรรมความเค้นย่อยที่ขอบรอยร้าวบนพื้นฐานของเงื่อนไขตัวประกอบความหนาแน่นของพลังงานความเครียด และเงื่อนไขพลังงานความเครียดทั้งหมด พบว่า รอยร้าวจะขยายตัวในทิศทางตั้งฉากกับขอบของรอยร้าว

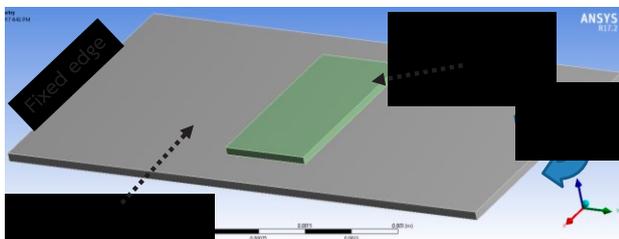
ในปี 2012 Ploypech และคณะ [12] ทำการศึกษาการเกิดรอยร้าวและการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุเคลือบผิวกัลวาไนซ์ (Galvanized Coatings) จุ่มร้อนที่ 450°C รับภาระดัดโดยการทดลอง และเทียบผลกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ชั้นทดสอบเป็นวัสดุผสมสามเฟสเรียงทับกันเป็นสามชั้น ทำการทดลองโดยกดชั้นทดสอบแบบดัดสี่จุด (Four-point Bending) พบว่า รอยร้าวจะเกิดในผิวนอกสุดของด้านบนแล้วค่อย ๆ เติบโตเข้าไปในอีกสองเฟสในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันของมุมดัด การเพิ่มความหนาของชั้นเฟสตรงกลางช่วยลดค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤตได้ ชั้นทดสอบมีความต้านทานการแตกร้าวดีขึ้น ผลของไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดลอง ทำให้มั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยิ่งขึ้น ข้อสังเกตหนึ่งก็คือ รอยร้าวจะเริ่มปรากฏในชั้นทดสอบทางฝั่งผิวที่เกิดความเค้นดัดเป็นบวก

ในปี 2014 Li และคณะ [13] ทำการศึกษาลักษณะการแตกร้าวที่ขึ้นต่อความหนาของผิวเซรามิกที่เคลือบบนวัสดุฐานอัลลอย ในการทดลอง จะเตรียมชิ้นทดสอบโดยการเคลือบผิวอัลลอยด้วยเซรามิกที่มีความหนาไม่เท่ากัน สังเกตการเกิดขึ้นของรอยร้าว และลักษณะการแตกร้าวโดยการทดสอบแบบดัดสามจุด (Three-point Bending) จากผลการทดลอง พบว่า โหมดการแตกร้าวจะแตกต่างกันสำหรับชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวหนาน้อยหรือมากไม่เท่ากัน ถ้าเคลือบผิวบางกว่าไมโครเมตร รอยร้าวจะเกิดขึ้นในส่วนของผิวเคลือบ มีลักษณะตั้ง 200 จากระดับรอยต่อของเซรามิกกับอัลลอย ในขณะที่เมื่อผิวเคลือบหนาไมโครเมตร จะเกิดรอยร้าวที่รอยต่อของวัสดุทั้งสอง 300 มากกว่า ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีบนพื้นฐานของแบบจำลองการแยกชั้น (Delamination Model) พบว่าความหนาวิกฤตมีค่าเป็น 255 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับผิวเคลือบที่มีความหนาต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองโซนโคฮีซีฟ (Cohesive Zone Model) ที่รอยต่อ พบว่าผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี จากการศึกษาสรุปได้ว่า โหมดของการแตกร้าวขึ้นกับความหนาของผิวที่เคลือบ และความหนาวิกฤตจะขึ้นกับคุณสมบัติของผิวเคลือบ และคุณสมบัติที่บริเวณรอยต่อ เช่น โมดูลัสของความยืดหยุ่น ความแข็งแรงของรอยต่อ และพลังงานการแตกร้าว

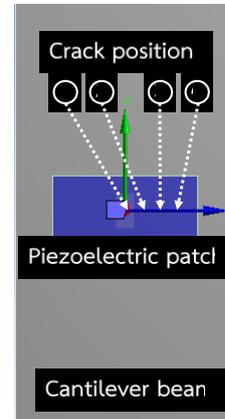
### 3) การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคาน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.1) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

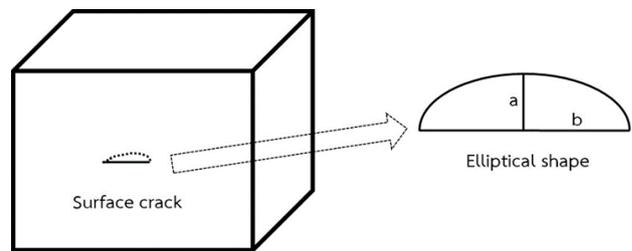
ในการวิเคราะห์ปัญหา จะสมมติให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดอยู่บนคานยื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีโมเมนต์กระทำดังแสดงในรูปที่ 5 สมมุติรอยร้าวเริ่มต้นอยู่ที่ผิวของแผ่น PZT โดยจะศึกษาผลของตำแหน่งของรอยร้าวที่เริ่มจากติดอยู่ตรงกลางแผ่น PZT ในลักษณะขวางกับแนวยาวของคาน แล้วเลื่อนรอยร้าวดังกล่าวไปทางขอบของแผ่น PZT ให้ได้ตำแหน่งทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้นให้ทำเช่นเดิม โดยเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่น PZT ไป 3 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีจะปรับตัวแปรคือ อัตราส่วนขนาดของรอยร้าวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 7 อนึ่งการวิเคราะห์จะทำโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในส่วนของโปรแกรม ANSYS นั้น ช่วงแรกจะต้องลองสร้างเมช (Mesh) แล้วปรับเปลี่ยนจำนวนเมช หรือขนาดของเอลิเมนต์ในชิ้นงาน หรือขนาดของโซนรอยร้าว ว่ามีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณอย่างไรบ้าง หลังจากนั้นจึงคำนวณผลจากโปรแกรม แล้วทำการวิเคราะห์ และสรุปผล



รูปที่ 5 แบบจำลองของคานและแผ่น PZT พร้อมเงื่อนไขขอบและภาระ



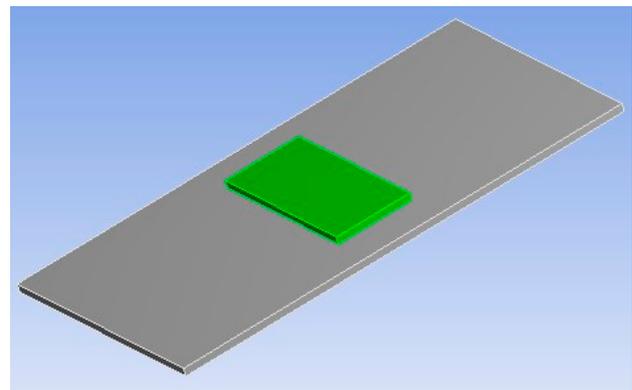
รูปที่ 6 ตำแหน่งของรอยร้าว



รูปที่ 7 ลักษณะของรอยร้าวที่ผิว และการกำหนดขนาด

#### 3.2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS

##### 3.2.1) วาดรูปปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 คานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแผ่น PZT

##### 3.2.2) กำหนดชนิดของวัสดุให้กับคานและแผ่น PZT ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

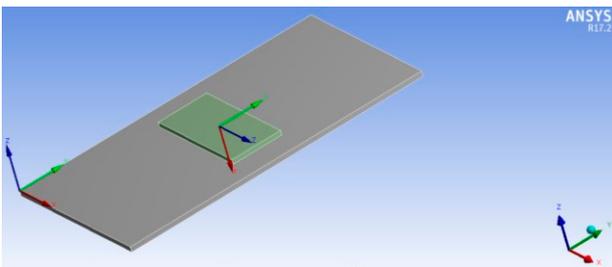
Details of "SUS304"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	Stainless Steel NL
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

รูปที่ 9 การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับคาน

Details of "PZT A5"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	LEAD Zirconate Titanate 5A
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

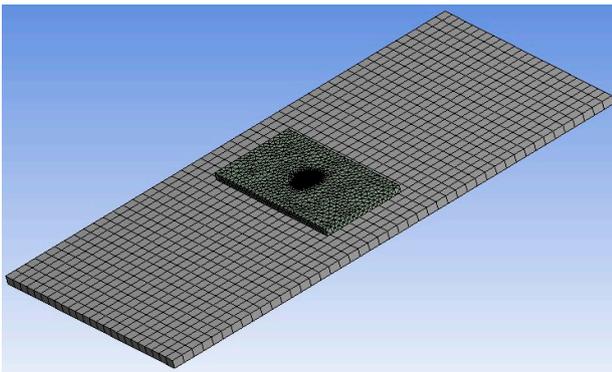
รูปที่ 10 การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับแผ่น PZT

3.2.3) กำหนดพิกัดใหญ่ และพิกัดรอง โดยพิกัดใหญ่จะเป็นพิกัดอ้างอิงสำหรับระบุตำแหน่งและขนาดของคานและแผ่น PZT ในขณะที่พิกัดรองจะใช้ระบุตำแหน่งของรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 11



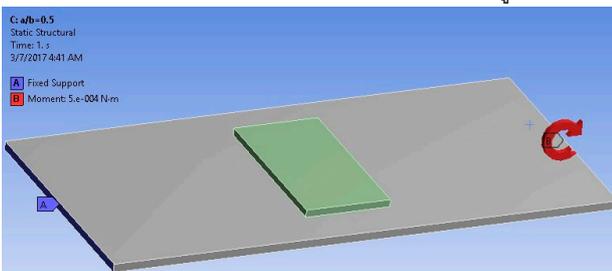
รูปที่ 11 พิกัดใหญ่และพิกัดรอง

3.2.4) สร้างเมช และกำหนดตำแหน่งและขนาดของรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 12



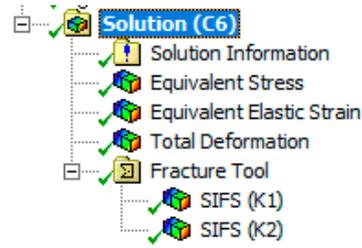
รูปที่ 12 การสร้างเมช และกำหนดตำแหน่งของรอยร้าว

3.2.5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระที่กระทำ

3.2.6) เลือกผลที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 14



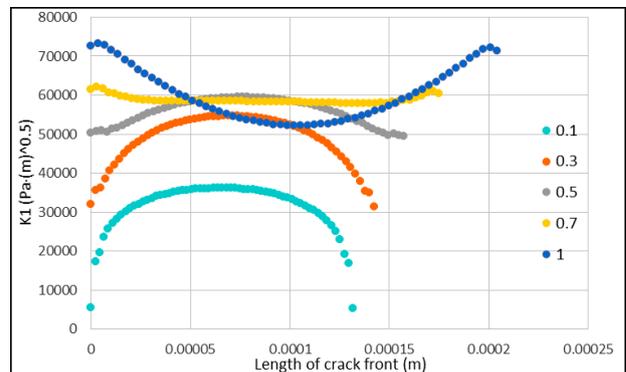
รูปที่ 14 ผลการคำนวณที่ต้องเลือกให้โปรแกรมคำนวณและแสดงออกมา

3.2.7) ทำการคำนวณ แล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

#### 4) ผลและการวิเคราะห์ผล

##### 4.1) ผลของอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว (a/b)

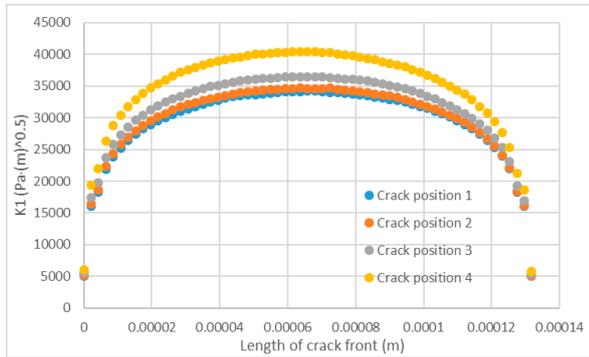
จากการพล็อตกราฟของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว 5 ค่า คือ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 1 โดยรูปที่ 15 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะอยู่ในตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า  $K_I$  ที่ปลายรอยร้าวจะมีค่ามากขึ้นตามค่า a/b ที่ไม่เกิน 0.5 หากค่า a/b มีค่าเกิน 0.5 แล้วจะไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่า a/b กับค่า  $K_I$  ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปลายรอยร้าวได้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะค่า  $K_I$  สูงสุด จะพบว่า เมื่อ a/b มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า  $K_I$  สูงสุดจะเพิ่มขึ้นตาม



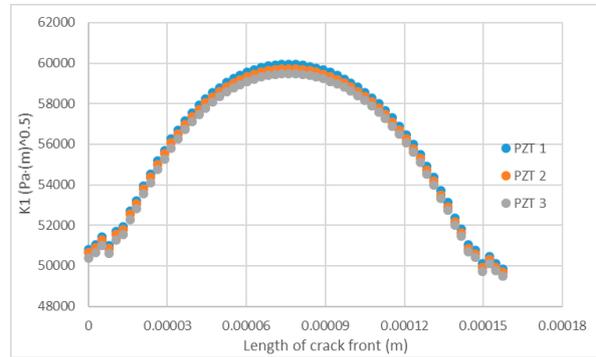
รูปที่ 15 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และรอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 3

##### 4.2) ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของรอยร้าว

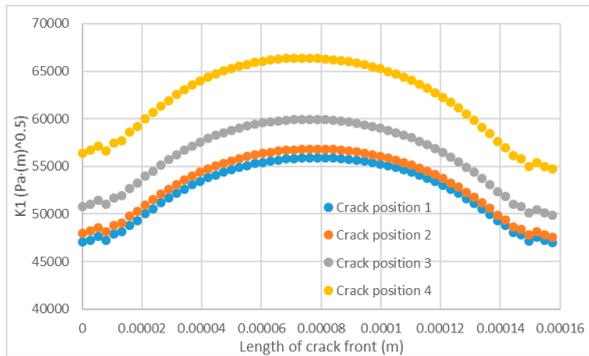
พิจารณาค่า  $K_I$  เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของรอยร้าว โดยขนาดของรอยร้าวที่เลือกมาแสดงมีสองค่าคือ a/b = 0.1 และ 0.5 ที่ตำแหน่ง PZT ทั้งสามตำแหน่ง จะเห็นได้ว่า ค่า  $K_I$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งของรอยร้าวเข้าใกล้ขอบของแผ่น PZT เป็นเช่นนี้ทุกผลการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17



รูปที่ 16 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ  $a/b = 0.1$



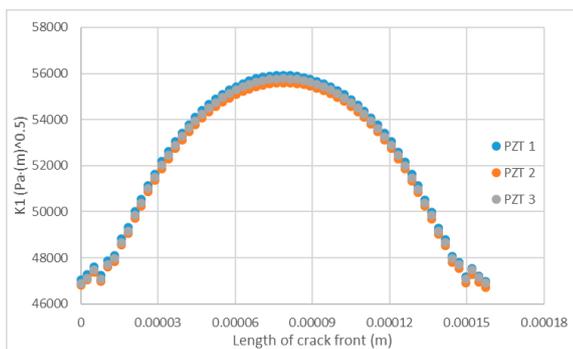
รูปที่ 19 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี  $a/b = 0.5$  และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 17 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ  $a/b = 0.5$

#### 4.3) ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่น PZT

เมื่อให้ค่า  $a/b$  คงที่ แล้วเปลี่ยนตำแหน่ง PZT บนคาน ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19 จะเห็นได้ว่า ค่า  $K_I$  จะมีค่าใกล้เคียงกันจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง แสดงว่า การเปลี่ยนตำแหน่งแผ่น PZT ในกรณีคานยื่นขนาดหน้าตัดคงที่ และมีภาวะเป็นโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว ไม่ส่งผลต่อความเสียหาย



รูปที่ 18 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี  $a/b = 0.5$  และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 1

#### 5) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวรูปครึ่งวงรี โดยรอยร้าวนี้อยู่บนผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บนคานยื่นซึ่งรับโมเมนต์ดัดที่ปลายคาน พิจารณาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว ตำแหน่งของรอยร้าว และตำแหน่งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยร้าวมีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่ออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้นความลึกของรอยร้าวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว ค่า  $K_I$  สูงสุดจะเพิ่มขึ้นตาม และหากตำแหน่งของรอยร้าวยิ่งใกล้ขอบค่า  $K_I$  ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งของแผ่นเพียโซไม่ส่งผลต่อค่า  $K_I$  ทั้งนี้ข้อสรุปนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่คานยื่นมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าคงที่ตลอดความยาว และภาวะที่กระทำมีเพียงโมเมนต์ดัดที่กระทำในลักษณะเปิดรอยร้าวให้แยกออกในโหมดที่ 1 เท่านั้น

ผลจากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ศึกษาในโหมดอื่น ๆ และจะเป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับหาสาเหตุของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในกระบวนการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เอชจีเอสที (HGST) จำกัด สำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสุธี โอปารุทชินันท์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (ศว.) สำหรับคำแนะนำด้านทฤษฎีการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, กลศาสตร์การแตกหัก, กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [2] Dowling, N. E., *Mechanical behavior of materials Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*, 2 Edition, Prentice-Hall: New Jersey, 1999.

- [3] C. D. Wilson, "Fracture problems with ANSYS: A (Very) Brief Introduction," [Online]. Available: [http://www.cae.tntech.edu/~chriswilson/FEA/ANSYS/ANSYS\\_Lab\\_Notes.pdf](http://www.cae.tntech.edu/~chriswilson/FEA/ANSYS/ANSYS_Lab_Notes.pdf). [Accessed: September 11, 2014].
- [4] J. C. Newman, Jr., "Fracture analysis of surface- and through-cracked sheets and plates," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 667-689, September 1973.
- [5] F. W. Smith and D. R. Sorensen, "The semi-elliptical surface crack—A solution by the alternating method," *International Journal of Fracture*, vol. 12, no. 1, pp. 47-57, February 1976.
- [6] R. C. Shah and A. S. Kobayashi, "Stress intensity factor for an elliptical crack under arbitrary normal loading," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 3, no. 1, pp. 71-96, July 1971.
- [7] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Improved stress-intensity factors for semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates," NASA Technical Memorandum, NASA TM X – 72825, June 1977.
- [8] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 817-829, 1979
- [9] J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju, "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 15, no. 1-2, pp. 185-192, 1981.
- [10] T. Nishioka and S. N. Atluri, "Analytical solution for embedded elliptical cracks, and finite element alternating method for elliptical surface cracks, subjected to arbitrary loadings," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 247-268, 1983.
- [11] X. K. Zhu et al., "Three-dimensional stress and displacement fields near an elliptical crack front," *International Journal of Fracture*, vol. 109, no. 4, pp. 383-401, June 2001.
- [12] S. Ploypech et al., "Crack initiation and propagation of galvanized coatings hot-dipped at 450°C under bending loads," *Surface & Coatings Technology*, vol. 206, no. 18, pp. 3758-3763, May 2012.
- [13] X. N. Li et al., "Thickness-dependent fracture characteristics of ceramic coatings bonded on the alloy substrates," *Surface & Coatings Technology*, vol. 258, pp. 1,039 – 1,047, November 2014.