การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคาน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ประเสริฐ อังกาบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ปีการศึกษา 2560

ANALYSIS OF STRESS INTENSITY FACTORS AT SURFACE OF A PIEZOELECTRIC PATCH ATTACHED ON A BEAM BY FINITE ELEMENT METHOD

Prasert Angkab

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology Graduate School Thai-Nichi Institute of Technology Academic Year 2017

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ผิวของ
	แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย	ประเสริฐ อังกาบ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

>คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์) วันที่เดือน.....พ.ศ.....พ.ศ......

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. สุธี โอหารฤทธินันท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร คงทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. เอกอุธรรมกรบัญญัติ)

ประเสริฐ อังกาบ : การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ผิวของแผ่นเพียโซอิ เล็กทริกที่ติดบนคานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. เอกอุ ธรรมกร บัญญัติ, 38 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์บางตัวต่อตัวประกอบความเข้มของ ความเค้นของรอยร้าวครึ่งวงรีที่ผิวภายใต้เงื่อนไขโหมดแบบเปิด แบบจำลองในงานวิจัยนี้มีที่มาจาก การพบความเสียหายในลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บนแขนแอคซูเอ เตอร์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงจำลองปัญหาเป็นคานยื่นมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดอยู่และรับโมเมนต์ดัด ที่ปลายอิสระของคาน จากนั้นทำการคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวด้วย ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์แอนซีส พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว หรือเรียกสั้น ๆ ว่า อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว ตำแหน่งของรอยร้าว ตามแนวเส้นขวางกึ่งกลางคาน และตำแหน่งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนคาน

จากผลเชิงตัวเลข อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยร้าวมีผลกระทบต่อตัว ประกอบความเข้มของความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้น (เพิ่มความ ลึกของรอยร้าวไปจนมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว) ค่า K_i สูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับตำแหน่งของรอยร้าว ถ้ารอยร้าวยิ่งใกล้ขอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ค่า K_i ยิ่งมีค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน ตำแหน่งของแผ่นเพียโซไม่มีผลต่อค่า K_i

ผลจากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ศึกษาในโหมดอื่น ๆ และจะเป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับหา สาเหตุของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในกระบวนการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ต่อไป

บัณฑิตวิทยาลัย	ลายมือชื่อนักศึกษา.
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่
ปีการศึกษา 2560	

ลายมือชื่อนักศึกษา	
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	

PRASERT ANGKAB : ANALYSIS OF STRESS INTENSITY FACTORS AT SURFACE OF A PIEZOELECTRIC PATCH ATTACHED ON A BEAM BY FINITE ELEMENT METHOD. ADVISOR : DR. EK-U THAMMAKORNBUNJUT, 38 PP.

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. Three parameters consist of a ratio of crack depth to half crack length (or crack size ratio), crack position along the middle line of a beam, and positions of a piezoelectric patch on a beam are analyzed.

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_1 will also be increased. For crack position, more closer to the edge of a piezoelectric patch the K_1 will be higher. In the other hand, the piezoelectric patch position is not affect to K_1 .

Graduate School Student's Signature..... Field of Engineering of Technology Advisor's Signature Academic Year 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ดร. เอกอุ ธรรม กรบัญญัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทาง และการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ ดร. สุธี โอหารฤทธินันท์ (MTEC) ที่คอยให้ความช่วยเหลือในส่วนของการ ใช้งานโปรแกรม ANSYS และกรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร คงทอง (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและ ขอบคุณอาจารย์ เพื่อน ๆ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประเสริฐ อังกาบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	१
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ຈ
กิตติกรรมประกาศ	ຊ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	សូ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	5
1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	
1.5 แผนการดำเนินงาน	6
2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
3 ระเบียบวิธีวิจัย	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS	
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	21
4.1 ผลของอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว (a/b)	21
4.2 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของรอยร้าว	
4.3 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่น PZT	

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	สรุปผลการวิจัย	34
	5.1 สรุปผล	34
	5.2 ข้อเสนอแนะ	34
บรรณ	เานุกรม	35
ประวั	ติย่อผู้วิจัย	38

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	6

สารบัญรูป

ູ່ສູປ		หน้า
1.1	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์	1
1.2	ตัวอย่างตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น PZT	2
1.3	ตำแหน่งของแผ่น PZT ในปัจจุบันและในอนาคต	3
1.4	ตัวอย่างรอยร้าวบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก	3
1.5	รอยร้าวบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ขยายขึ้น 300 เท่า และ 3000 เท่าตามลำดับ	4
1.6	รอยร้าวด้านข้างของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ขยายขึ้น 1000 เท่า	4
2.1	โหมดพื้นฐานของการเสียรูปของรอยร้าว	8
2.2	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวบนแผ่นที่รัยแรงดึง 3 กรณี	9
2.3	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปวงกลมที่อยู่ภายในหรือ	
	ที่ผิวของชิ้นส่วน	10
2.4	ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์บนชิ้นทดสอบที่มีรอยร้าวโดยพิจารณาเพียงครึ่งเดียว	11
2.5	เอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวใน (ก) สองมิติ และ (ข) สามมิติ	12
2.6	ชิ้นทดสอบและการแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองครึ่งซีก	12
3.1	แบบจำลองของคานและแผ่น PZT พร้อมเงื่อนไขขอบและภาระ	15
3.2	ตำแหน่งของรอยร้าว	16
3.3	ลักษณะของรอยร้าวที่ผิว และการกำหนดขนาด	16
3.4	คานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแผ่น PZT	17
3.5	การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับคาน	17
3.6	การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับแผ่น PZT	18
3.7	พิกัดใหญ่และพิกัดรอง	18
3.8	การสร้างเมช และกำหนดตำแหน่งของรอยร้าว	19
3.9	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระที่กระทำ	19
3.10	ผลการคำนวณที่ต้องเลือกให้โปรแกรมคำนวณและแสดงออกมา	20
4.1	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 1	21

สารบัญรูป (ต่อ)

ູສູປ		หน้า
4.2	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 2	22
4.3	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 3	22
4.4	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 4	23
4.5	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 1	23
4.6	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 2	24
4.7	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 3	24
4.8	้ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 4	25
4.9	้ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 1	25
4.10	้ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 2	26
4.11	้ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 3	26
4.12	้ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ	
	รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 4	27
4.13	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	a/b = 0.1	28
4.14	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ	
	a/b = 0.5	28

สารบัญรูป (ต่อ)

29 29 30
29 29 30
29 30
29 30
30
30
30
31
31
32
32
33
33

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี ค.ศ. 1956 บริษัทไอบีเอ็มได้ผลิตอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิตอลตัวแรกของ โลก เรียกว่า ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive: HDD) มีชื่อรุ่นคือ IBM 350RAMAC และมีความจุใน การจัดเก็บข้อมูลดิจิตอล 5 ล้านตัวอักษร หลังจากนั้นอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ได้รับการพัฒนามาอย่าง ต่อเนื่องจนทำให้ในปี ค.ศ. 2013 ความจุสูงสุดของฮาร์ดดิสก์อยู่ที่ 4 TB

ในการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ นักวิจัยในสถาบันการศึกษารวมไปถึงนักพัฒนาในบริษัทผู้ผลิต ชิ้นส่วนและบริษัทผู้ประกอบชิ้นส่วนจะให้ความสำคัญกับความจุของฮาร์ดดิสก์ที่ต้องเพิ่มมากขึ้น โดย มีความรวดเร็วและความถูกต้องของการอ่านและเขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็กสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่ดี ชิ้นด้วย ทั้งนี้ความรวดเร็วและความถูกต้องของการอ่านและเขียนข้อมูลนั้นจะขึ้นอยู่กับการควบคุม การเคลื่อนที่และตำแหน่งของแขนแอคชูเอเตอร์ (Actuator arm) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [1] นอกจากนี้ แล้วบนแขนแอคชูเอเตอร์ยังมีส่วนที่สำคัญในการควบคุมดังกล่าว เรียกว่า แอคชูเอเตอร์สองขั้น (Dual-Stage Actuator: DSA) ซึ่งจะมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric patches) ทำหน้าที่เป็น ตัวกระตุ้นและช่วยในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่านและเขียน อนึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ ตะกั่ว เซอร์โคเนียม และไททาเนียมออกไซด์ (Lead-Zirconium-Titanium Oxide) หรือนิยมเรียกย่อ ๆ ว่า PZT [2] มีการวางจำหน่ายฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ PZT เป็น ส่วนประกอบครั้งแรกสำหรับรุ่น 3.5 นิ้ว และ 2.5 นิ้วในปี ค.ศ. 2011 และ 2013 ตามลำดับ



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [1]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีลักษณะพิเศษที่เกิดจากความไม่สมมาตรในหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของระบบผลึก (Lattice) ในวัสดุทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้นสองขั้ว เมื่อใส่ภาระทางกล (Mechanical load) เข้าไปในวัสดุดังกล่าวจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นได้ โดยแรงกดหรือแรงดึงจะได้ทิศทางของ กระแสไฟฟ้าตรงข้ามกัน ในทางกลับกันถ้าใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้วัสดุเกิดการยืดหรือหดตัว ตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า อาจกล่าวโดยย่อว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกลในรูป ของความเครียดหรือการเปลี่ยนขนาด ด้วยพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าว นักวิจัยและ นักประดิษฐ์จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจรู้หรือควบคุมการเสียรูปของโครงสร้างต่าง ๆ กล่าวคือ ถ้า ใช้เป็นตัวตรวจรู้ จะสามารถรู้ระยะที่โครงสร้างเคลื่อนที่หรือเสียรูปไปได้จากทิศทางและปริมาณของ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ในขณะเดียวกันถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าด้วยทิศทางและขนาดที่ออกแบบไว้ การยืด หรือหดตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้โครงสร้างที่มันติดตั้งอยู่เสียรูปหรือเคลื่อนตัวไปในทิศทาง และขนาดที่ต้องการได้ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ก็ใช้ประโยชน์จากพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนแอคซูเอเตอร์และตำแหน่งของหัวอ่านและเขียนในทำนองเดียวกัน รูปที่ 1.2 เป็นตัวอย่างของตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น PZT บริเวณแขนแอคซูเอเตอร์ หมายเหตุว่าฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่น PZT

ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์มีการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งที่ผ่านมาพบว่า เกิดการแตกร้าวของแผ่น PZT ในกระบวนการผลิต ทำให้เกิดชิ้นงานเสียเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ในอนาคตอันใกล้จะมีการย้ายตำแหน่งของแผ่น PZT นี้ไปใกล้หัวอ่านและเขียนมากขึ้นดังแสดงในรูป ที่ 1.3 ซึ่งไม่ว่าจะอย่างไร ก็มีความจำเป็นที่จะต้องหาสาเหตุของความเสียหายดังกล่าวว่าเกิดขึ้นใน กระบวนการใด จะได้ทำการป้องกันเพื่อช่วยให้ของเสียในกระบวนการผลิตลดลง



รูปที่ 1.3 ตำแหน่งของแผ่น PZT ในปัจจุบันและในอนาคต

ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะตรวจพบได้ในขั้นตอนท้าย ๆ ของ กระบวนการผลิต โดยจะพบรอยร้าวบนแผ่น PZT ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังแสดงในรูปที่ 1.4 จะสังเกตเห็นรอยร้าวเป็นเส้นผ่าแผ่น PZT ตามขวาง ซึ่งอาจจะเฉียงน้อยหรือค่อนข้างมากก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ก) และ 1.4 (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างรอยร้าวบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

โดยการใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope: SEM) จะสามารถขยายภาพรอยร้าวขึ้นมาได้ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งก็ยังไม่สามารถคาดเดาสาเหตุของ ความเสียหายจากการมองรอยร้าวทางด้านบนได้



รูปที่ 1.5 รอยร้าวบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ขยายขึ้น 300 เท่า และ 3000 เท่าตามลำดับ

เพื่อให้มีแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหามากขึ้นจึงทำการถ่ายรูปขยายขนาดของรอยร้าวทาง ด้านข้างด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะขาดตลอดความหนาของ แผ่น และรอยร้าวที่ผิวบนจะมีลักษณะอ้าออกมากกว่า



รูปที่ 1.6 รอยร้าวด้านข้างของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ขยายขึ้น 1000 เท่า

จากข้อมูลภาพถ่ายแสดงความเสียหาย ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ตามหลักของ กลศาสตร์การแตกหักโดยมีสมมุติฐานว่า ระบบฟิล์ม/ฐาน (Film/substrate system) ซึ่งประกอบไป ด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ชั้นกาว และฐาน มีความบกพร่องหรือตำหนิ (Defect) อยู่ แต่เนื่องจาก งานวิจัยนี้ถือเป็นความพยายามในขั้นแรกที่จะหาสาเหตุของความเสียหาย ตำหนิดังกล่าวจะพิจารณา เฉพาะรอยร้าว และจะพิจารณาในระดับแมคโครเท่านั้น ตำหนิอื่น ๆ เช่น ดิสโลเคชัน (Dislocation) รวมไปถึงการวิเคราะห์ในระดับคริสตัล หรือแบบจำลองอะตอม (Atomistic model) จะไม่นำมา พิจารณา นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองของปัญหานี้จะให้อยู่ในระดับที่ไม่ยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ เกินไป แต่ยังเพียงพอที่จะทำให้เห็นแนวโน้มว่าความเสียหายดังกล่าวเกิดจากสาเหตุใดได้บ้าง เพื่อ นำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมต่อไป และอาจเป็นแนวทางในการพิจารณาในระดับสเกลที่เล็กลงไปในอนาคต หากจำเป็น

เราจะทำการจำลองแขนแอคซูเอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ถึง 1.3 เป็นคานที่มีแผ่น PZT ติดอยู่โดยมีภาระภายนอกเป็นโมเมนต์ดัดมากระทำ โดยสมมุติรอยร้าวเริ่มต้นหลาย ๆ ขนาด ที่ ตำแหน่งต่าง ๆ กันบนแผ่น PZT ขนาดหน้าตัดของคานจะเป็นแบบคงที่ แบบจำลองทั้งหมดนี้จะ วิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor) ในโหมดที่ 1 โดยใช้ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS แล้วนำมาเปรียบเทียบในทุก ๆ กรณี เพื่อพิจารณาว่า ตำแหน่งของรอยร้าว อัตราส่วนขนาดรอยร้าว (a/b) และตำแหน่งของแผ่น PZT จะมีผลต่อการ แตกร้าวของแผ่น PZT อย่างไรบ้าง จากนั้นค่อยค่อยนำไปพิจารณาเทียบเคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นใน กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ว่า กระบวนการใดมีลักษณะของภาระที่กระทำเหมือนหรือใกล้เคียงกับ กรณีของแบบจำลอง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนั้นมีความเป็นได้สูงที่จะเป็นสาเหตุของการแตกร้าวของ แผ่น PZT

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อวิเคราะห์ผลของขนาดและตำแหน่งของรอยร้าวที่ผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก รวมทั้ง ตำแหน่งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บนคานและมีภาระทางกลมากระทำโดยพิจารณาจากค่าตัว ประกอบความเข้มของความเค้นในโหมดที่ 1

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1.4.1 จำลองปัญหาเป็นคานยื่นที่มีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดอยู่ด้านบนบริเวณกึ่งกลางคาน โดยคานมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดคงที่ตลอดความยาว

1.4.2 สมมุติรอยร้าวเริ่มต้นที่ผิวบนกึ่งกลางของแผ่น PZT เป็นรูปครึ่งวงรีวางขวางกับ แนวแกนของคาน แล้วเปลี่ยนตำแหน่งไปในแนวขวางจนเกือบถึงขอบของแผ่น PZT รวมทั้งหมด 4 ตำแหน่ง

1.4.3 ภาระที่กระทำกับคานเป็นโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว

1.4.4 ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของ
 ความเค้นในโหมดที่ 1 แล้วทำการเปรียบเทียบค่านี้ของทุกกรณี เพื่อพิจารณาผลกระทบของตำแหน่ง
 ของรอยร้าว อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว และตำแหน่งของแผ่น PZT

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบผลกระทบของตัวแปรบางตัวต่อการขยายตัวของรอยร้าว ซึ่งมีแนวโน้มว่าเป็น สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างเพื่อนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมต่อไป

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

1101010001		เดือนที่										
PPM 13/1 113	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ปริทัศน์วรรณกรรม												
2. ศึกษากลศาสตร์การแตกร้าว												
3. ศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการใช้												
งานโปรแกรม ANSYS												
4. หาผลลัพธ์ในกรณีต่าง ๆ ด้วย												
โปรแกรม ANSYS												
5. วิเคราะห์และสรุปผล												
6. จัดทำบทความและวิทยานิพนธ์												

บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

<u>2.1.1 กลศาสตร์การแตกหักเบื้องต้น</u>

ทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักวางอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ในชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ จะมี ตำหนิ (Defects) อยู่ ตำหนินี้อาจมีลักษณะเป็นรอยช่วนหรือหลุมที่บริเวณผิว หรืออาจเป็นช่องว่างใน เนื้อวัสดุที่เป็นรอยเชื่อมหรือการขึ้นรูปที่ไม่ดีก็ได้ เมื่อชิ้นส่วนที่มีตำหนิเหล่านี้รับแรงภายนอกที่มีค่าสูง เพียงพอ ตำหนิเหล่านี้จะพัฒนาไปเป็นรอยร้าว ซึ่งบริเวณปลายรอยร้าวจะมีการเสียรูปมากกว่า บริเวณอื่นที่ห่างออกไป จึงเป็นบริเวณที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ปลาย รอยร้าว (Crack tip parameter) ว่ามีค่าเป็นเท่าใดเพื่อใช้ระบุถึงระดับของความเสียหาย และยังใช้ ค่าวิกฤติของพารามิเตอร์นี้เป็นตัวบอกความต้านทานของวัสดุต่อการเติบโตของรอยร้าวเริ่มต้นได้ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงขนาดของรอยร้าวว่าชิ้นส่วนจะแตกหักเมื่อรอยร้าวมีขนาดเท่าใด หรือเมื่อ รับภาระเท่าใดได้อีกด้วย

กลศาสตร์การแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แขนง ตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ คือ [2]

 กลศาสตร์การแตกร้าวยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics: LEFM) จะใช้กับกรณีการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น วัสดุที่มี พฤติกรรมแบบนี้จะเป็นวัสดุเปราะ เช่น แก้ว เซรามิกส์ เป็นต้น เพราะไม่มีการเสียรูปถาวร

2) กลศาสตร์การแตกร้าวอีลาสติกพลาสติก (Elastic-Plastic Fracture Mechanics: EPFM) จะใช้กับกรณีการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวเป็นแบบอีลาสติกพลาสติก เหมาะกับ เหล็กกล้าความแข็งแรงปานกลาง

3) กลศาสตร์การแตกร้าวที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Fracture Mechanics: TDFM) จะใช้กับกรณีที่การเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าวขึ้นกับอัตราเร็วของการเสียรูป (Rate of deformation) เช่น การคืบ (Creep) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เนื่องจากแผ่น PZT เป็นเซรามิกส์ดังนั้นจะใช้ทฤษฎี LEFM ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่ปลายรอยร้าวซึ่งในกรณีนี้ เรียกว่า ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor: SIF หรือ K) ผู้อ่านที่สนใจสามารถอ่านประวัติย่อ ๆ ในการพัฒนาองค์ ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบความเข้มของความเค้นได้จากเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ของ Atroshchenko [3] ที่น่าสนใจคือการพัฒนาสมการยืดหยุ่นเชิงเส้นสำหรับสนามความเค้นรอบ ๆ ปลายรอยร้าวโดยใช้ฟังก์ชันความเค้นที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนของ Westergaard [4] ซึ่งต่อมา Irwin [5] ได้ใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์และนำเสนอตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่สามารถใช้อธิบาย พฤติกรรมการแตกหักหรือการขยายตัวของรอยร้าวได้ ค่า K สามารถบอกความรุนแรงของรอยร้าวได้ จากขนาดของรอยร้าว ความเค้นที่ปลายรอยร้าว และรูปร่างของรอยร้าว นอกจากนี้วัสดุสามารถ ต้านทานการแตกหักได้ตราบเท่าที่ค่า K ยังมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต K_c ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติวัสดุ เรียกว่า ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness)

ทิศทางของภาระที่กระทำกับชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวจะเกิดขึ้นในโหมดใดโหมดหนึ่งหรือผสมกัน ใน 3 โหมด ดังนี้

> โหมดที่ 1 เป็น โหมดเปิด (Opening mode, Mode I) โหมดที่ 2 เป็น โหมดเฉือนบนระนาบ (Sliding mode, Mode II)

โหมดที่ 3 เป็น โหมดเฉือนนอกระนาบ (Tearing mode, Mode III)

โดยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของแต่ละโหมดจะแทนด้วย K_I K_{II} และ K_{III} ตามลำดับ ลักษณะการเสียรูปของรอยร้าวเนื่องจากแรงภายนอกทั้งสามโหมดแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โหมดพื้นฐานของการเสียรูปของรอยร้าว [6]

โดยทั่วไปตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะสัมพันธ์กับความเค้นที่มากระทำและความ ยาวของรอยร้าวตามสมการที่อยู่ในรูป

$$K = FS\sqrt{\pi a} \tag{2.1}$$

เมื่อ F เป็นฟังก์ชันไร้หน่วยขึ้นกับรูปร่างและลักษณะของภาระที่กระทำ และยังขึ้นกับ
 อัตราส่วนความยาวรอยร้าวต่อขนาดของชิ้นส่วน เช่น อาจเป็นความกว้างของ
 ชิ้นส่วน หรือครึ่งหนึ่งของความกว้าง b ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 [3]
 ร เป็นความเค้นเฉลี่ยบนหน้าตัด โดยคิดเสมือนว่าไม่มีรอยร้าวอยู่

เป็นความยาวรอยร้าว



Values for small a/b and limits for 10% accuracy:

(a)	$K = S_g \sqrt{\pi a}$	(b) $K = 1.12 S_g \sqrt{\pi g}$	\overline{a} (c) $K = 1.12S_g\sqrt{\pi a}$
	$(a/b \le 0.4)$	$(a/b \le 0.6)$	$(a/b \le 0.13)$

Expressions for any $\alpha = a/b$:

(a)
$$F = \frac{1 - 0.5\alpha + 0.326\alpha^2}{\sqrt{1 - \alpha}}$$
 $(h/b \ge 1.5)$
(b) $F = \left(1 + 0.122\cos^4\frac{\pi\alpha}{2}\right)\sqrt{\frac{2}{\pi\alpha}\tan\frac{\pi\alpha}{2}}$ $(h/b \ge 2)$
(c) $F = 0.265(1 - \alpha)^4 + \frac{0.857 + 0.265\alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}}$ $(h/b \ge 1)$

รูปที่ 2.2 ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวบนแผ่นที่รับแรงดึง 3 กรณี [6]

กรณีที่น่าสนใจอีกกรณีหนึ่งคือ รอยร้าวจะมีรูปร่างโดยประมาณเป็นวงกลม ครึ่งวงกลม หรือหนึ่งในสี่ส่วนของวงกลมอยู่ภายในหรือที่ผิวของชิ้นส่วนที่รับแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยกรณี (a) รอยร้าววงกลมอยู่ภายในเนื้อวัสดุรับความเค้นดึงคงที่ตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าว กรณี (b) รอย ร้าวครึ่งวงกลมอยู่ที่ผิวของชิ้นส่วนที่รับแรงดึงและโมเมนต์ กรณี (c) รอยร้าวหนึ่งในสี่ส่วนของวงกลม อยู่ที่มุมของชิ้นส่วนที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม และกรณี (d) รอยร้าวครึ่งวงกลมที่ผิวของเพลา ทั้งนี้ตัว ประกอบความเข้มของความเค้นยังหาได้ตามสมการที่ (2.1)



Note: ¹Different limits for tension or bending, respectively.

รูปที่ 2.3 ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปวงกลมที่อย่ภายในหรือที่ผิวของ ชิ้นส่วน [6]

ผู้อ่านที่สนใจสามารถอ่านเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหัก ตัวประกอบความเข้มของความเค้น และการประยุกต์ใช้ได้ในหนังสือและบทความต่าง ๆ [2-9]

<u>2.1.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์</u>

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จะต้องแก้ระบบสมการหรือ ความสัมพันธ์ 3 ชุดที่เกี่ยวข้องกัน ประกอบด้วย สมการสมดุล 3 สมการ ความสัมพันธ์ความเค้นและ ความเครียด 6 สมการ และความสัมพันธ์ความเครียดและระยะเคลื่อนตัวอีก 6 สมการ การแก้ระบบ สมการเหล่านี้ในปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีความไม่เชิงเส้นจะทำได้ยากลำบากหรืออาจทำไม่ได้ เลย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขมาช่วยแก้ปัญหา วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็จัดอยู่ในกลุ่มของวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งโดยหลักการแล้ว เป็นการเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ควบคุมปัญหาที่จะวิเคราะห์ให้ กลายเป็นระบบสมการพีชคณิต ซึ่งจะสามารถแก้สมการและหาคำตอบโดยประมาณได้ในรูปของเมท-ริกซ์ นอกจากนี้แล้วยังต้องแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แล้ว สร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ขึ้นมาตามหลักการข้างต้น จากนั้นจึงทำการประกอบสมการย่อยของ แต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการ เมื่อทำการแทนค่าที่ขอบและแรงภายนอกที่มากระทำ ก็ จะสามารถแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวแปรไม่รู้ค่าที่ต้องการได้ และใช้ตัวแปรที่หาได้ในเบื้องต้นไปหาตัว แปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป กระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้กระทำได้โดยอาศัยการประมวลผลของ เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการดำเนินการ





รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์บนชิ้นทดสอบที่มีรอยร้าวโดยพิจารณาเพียงครึ่งเดียว [10]

ในการวิเคราะห์ปัญหารอยร้าวโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนสำคัญที่แตกต่างไปจากการ ใช้วิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งโดยทั่วไปคือ เอลิเมนต์ สืบเนื่องมาจากทฤษฎีกลศาสตร์การ แตกร้าวที่สร้างสมการสนามความเค้นที่บริเวณรอยร้าวให้แปรผกผันกับระยะทางจากปลายรอยร้าวไป ยังตำแหน่งอื่น ๆ ระยะทางจากปลายรอยร้าวดังกล่าวหากลู่เข้าสู่ศูนย์ความเค้นจะมีค่าลู่เข้าสู่อนันต์ หรือกล่าวได้ว่า ตำแหน่งที่ใกล้รอยร้าวมากจะยิ่งมีความเค้นสูงกว่าตำแหน่งอื่นมาก ลักษณะสมการ เช่นนี้ เรียกว่า เอกฐาน (Singularity) ดังนั้นเอลิเมนต์ที่ต้องสร้างขึ้นบริเวณรอบ ๆ ปลายรอยร้าว จะต้องมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ด้วย ตัวอย่างของเอลิเมนต์ลักษณะนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 [10] รายละเอียดที่มาของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะขอละไว้





รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวใน (a) สองมิติ และ (b) สามมิติ [10]

ตัวอย่างของชิ้นทดสอบที่มีการให้ภาระผสมกับรอยร้าว และรูปการแบ่งเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ใน โปรแกรม ANSYS แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 [10]



รูปที่ 2.6 ชิ้นทดสอบและการแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลองครึ่งซีก [10]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1973 Newman, Jr. [11] นำเสนอสมการสำหรับคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของ ความเค้นสำหรับรอยร้าวที่ผิว และรอยร้าวที่ทะลุความหนาของแผ่น โดยพัฒนาขึ้นจากสมการความ เข้มของความเค้นที่รอยบาก (Notch) ของ Neuber งานวิจัยนี้นอกจากจะแสดงแนวคิดในการพัฒนา สมการขึ้นมาแล้ว ยังเปรียบเทียบผลการคำนวณตามสมการดังกล่าวกับผลการทดลองของวัสดุหลาย ชนิด ซึ่งค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง -10 ถึง +10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

ในปี 1976 Smith and Sorensen [12] ทำการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความ เค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นภายใต้ภาระดึงแบบกระจายคงที่ งานวิจัยนี้พัฒนาต่อจาก งานของ Shah and Kobayashi [13] โดยใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับสามเพื่อหาค่าสนามความเค้น และค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยประมาณ

ในปี 1977 Raju and Newman, Jr. [14] ได้นำเสนอการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้ม ของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีการ ตรวจสอบผลการคำนวณบางกรณีที่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรง (Exact Solution) ได้ และพบว่าการ เพิ่มระดับขั้นความเสรีของเอลิเมนต์ที่ใช้สามารถให้ผลการคำนวณที่ดีขึ้นกว่าเดิม

ในปี 1979 Raju and Newman, Jr. [15] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณค่าตัวประกอบ ความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงกลมและครึ่งวงรึในแผ่นที่รับแรงดึง งานวิจัยนี้นำกรณี ที่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปี 1981 Newman, Jr. and Raju [16] ได้นำเสนอสมการคำนวณค่าตัวประกอบความ เข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผิวของแผ่นจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดของรอย ร้าว ความหนาและความกว้างของแผ่น ภาระเป็นแรงดึงและโมเมนต์ดัด เป็นต้น สมการดังกล่าวนี้ได้ จากผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องมาแล้ว [15] นอกจากนี้ยัง นำสมการนี้ไปวิเคราะห์การเติบโตของรอยร้าวล้าภายใต้ภาระแรงดึงและโมเมนต์ดัดด้วย

ในปี 1983 Nishioka and Atluri [17] ใช้วิธีอัลเทอร์เนท (Alternating Method) ร่วมกับ ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รอยร้าวรูปวงรีที่อยู่ข้างในและที่ผิวของ ของแข็งรูปร่างต่าง ๆ กันโดยมีภาระเป็นแรงดึงกับโมเมนต์ดัด มีการนำสมการโพลิโนเมียลอันดับที่ห้า มาใช้ประมาณสนามความเค้นที่ผิวรอยร้าว ทำให้ความถูกต้องของผลการคำนวณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ งานวิจัยเก่า ๆ

ในปี 2001 Zhu และคณะ [18] พิจารณาสนามความเค้น และการเสียรูปสำหรับรอยร้าว รูปวงรีที่อยู่ในวัตถุยืดหยุ่นรับภาระตั้งฉาก ภาระเฉือน และภาระผสม มีการเปรียบเทียบผลการ วิเคราะห์สมการความเค้นและการเสียรูปที่ทำได้กับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวจากการพิจารณาสนามความเค้นย่อยที่ขอบ รอยร้าวบนพื้นฐานของเงื่อนไขตัวประกอบความหนาแน่นของพลังงานความเครียด และเงื่อนไข พลังงานความเครียดทั้งหมด พบว่า รอยร้าวจะขยายตัวในทิศทางตั้งฉากกับขอบของรอยร้าว

ในปี 2012 Ploypech และคณะ [19] ทำการศึกษาการเกิดรอยร้าวและการเติบโตของรอย ร้าวของวัสดุเคลือบผิวกัลวาไนซ์ (Galvanized Coatings) จุ่มร้อนที่ 450°C รับภาระดัดโดยการ ทดลอง และเทียบผลกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ชิ้นทดสอบเป็นวัสดุผสมสามเฟสเรียงทับกัน เป็นสามชั้น ทำการทดลองโดยกดชิ้นทดสอบแบบดัดสี่จุด (Four-point Bending) พบว่า รอยร้าวจะ เกิดในผิวนอกสุดของด้านนูน แล้วค่อย ๆ เติบโตเข้าไปในอีกสองเฟสในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันของมุม ดัด การเพิ่มความหนาของชั้นเฟสตรงกลางช่วยลดค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤตได้ ชิ้น ทดสอบมีความต้านทานการแตกร้าวดีขึ้น ผลของไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดลอง ทำให้ มั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยิ่งขึ้น ข้อสังเกตหนึ่งก็คือ รอยร้าวจะเริ่มปรากฏในชิ้นทดสอบทาง ฝั่งผิวที่เกิดความเค้นดัดเป็นบวก

ในปี 2014 Li และคณะ [20] ทำการศึกษาลักษณะการแตกร้าวที่ขึ้นต่อความหนาของผิว เซรามิกส์ที่เคลือบบนวัสดุฐานอัลลอย ในการทดลอง จะเตรียมชิ้นทดสอบโดยการเคลือบผิวอัลลอย ด้วยเซรามิกส์ที่มีความหนาไม่เท่ากัน สังเกตการเกิดขึ้นของรอยร้าว และลักษณะการแตกร้าวโดยการ ทดสอบแบบดัดสามจุด (Three-point Bending) จากผลการทดลอง พบว่า โหมดการแตกร้าวจะ แตกต่างกันสำหรับชิ้นตัวอย่างที่เคลือบผิวหนาน้อยหรือมากไม่เท่ากัน ถ้าเคลือบผิวบางกว่า 200 ไมโครเมตร รอยร้าวจะเกิดขึ้นในส่วนของผิวเคลือบ มีลักษณะตั้งฉากกับรอยต่อของเซรามิกส์กับอัล ลอย ในขณะที่เมื่อผิวเคลือบหนามากกว่า 300 ไมโครเมตร จะเกิดรอยร้าวที่รอยต่อของเซรามิกส์กับอัล ลอย ในขณะที่เมื่อผิวเคลือบหนามากกว่า 300 ไมโครเมตร จะเกิดรอยร้าวที่รอยต่อของโซรามิกส์กับอัล ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีบนพื้นฐานของแบบจำลองกรแยกขั้น (Delamination Model) พบว่าความหนาวิกฤตมีค่าเป็น 255 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการ จำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับผิวเคลือบที่มีความหนาต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลองโชนโคฮีซิฟ (Cohesive Zone Model) ที่รอยต่อ พบว่าผลจากวิธีไฟในต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดลอง เป็นอย่างดี จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า โหมดของการแตกร้าวขึ้นกับความหนาของผิวที่เคลือบ และ ความยืดหยุ่น ความแข็งแรงของรอยต่อ และพลังงานการแตกร้าว

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิเคราะห์ปัญหา จะสมมุติให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดอยู่บนคานยื่นหน้าตัด สี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีโมเมนต์กระทำดังแสดงในรูปที่ 3.1 สมมุติรอยร้าวเริ่มต้นอยู่ที่ผิวของแผ่น PZT โดยจะศึกษาผลของตำแหน่งของรอยร้าวที่เริ่มจากติดอยู่ตรงกลางแผ่น PZT ในลักษณะขวางกับแนว ยาวของคาน แล้วเลื่อนรอยร้าวดังกล่าวไปทางขอบของแผ่น PZT ให้ได้ตำแหน่งทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นให้ทำเช่นเดิม โดยเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่น PZT ไป 3 ตำแหน่ง ในการ วิเคราะห์ในแต่ละกรณีจะปรับตัวแปรคือ อัตราส่วนขนาดของรอยร้าวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อนึ่ง การวิเคราะห์จะทำโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของคานและแผ่น PZT พร้อมเงื่อนไขขอบและภาระ







รูปที่ 3.3 ลักษณะของรอยร้าวที่ผิว และการกำหนดขนาด

ในส่วนของโปรแกรม ANSYS นั้น ช่วงแรกจะต้องลองสร้างเมช (Mesh) แล้วปรับเปลี่ยน จำนวนเมช หรือขนาดของเอลิเมนต์ในชิ้นงาน หรือขนาดของโซนรอยร้าว ว่ามีผลต่อความถูกต้องใน การคำนวณอย่างไรบ้าง หลังจากนั้นจึงคำนวณผลจากโปรแกรม แล้วทำการวิเคราะห์ และสรุปผล เพื่อจัดทำรายงาน และบทความวิชาการต่อไป

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS

<u>3.2.1 วาดรูปปัญหา</u>

วาดแบบจำลองในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 คานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแผ่น PZT

<u>3.2.2 กำหนดชนิดของวัสดุให้กับคานและแผ่น PZT</u>

เลือกชนิดของวัสดุสำหรับคานและแผ่น PZT ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6

ตามลำดับ

De	Details of "SUS304" 4					
+	Graphics Properties					
Ξ	Definition					
	Suppressed	No				
	Stiffness Behavior	Flexible				
	Coordinate System	Default Coordinate System				
	Reference Temperature	By Environment				
	Behavior	None				
Ξ	Material					
	Assignment	Stainless Steel NL				
	Nonlinear Effects	Yes				
	Thermal Strain Effects	Yes				
Ŧ	Bounding Box					
Ŧ	Properties					
Ŧ	Statistics					

รูปที่ 3.5 การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับคาน

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

รูปที่ 3.6 การกำหนดชนิดของวัสดุให้กับแผ่น PZT

<u>3.2.3 กำหนดพิกัดใหญ่และพิกัดรอง (Global and local coordinates)</u>

โดยพิกัดใหญ่จะเป็นพิกัดอ้างอิงสำหรับระบุตำแหน่งและขนาดของคานและแผ่น PZT ในขณะที่พิกัดรองจะใช้ระบุตำแหน่งของรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พิกัดใหญ่และพิกัดรอง

3.2.4 สร้างเมช และกำหนดตำแหน่งและขนาดของรอยร้าว

ส่วนของคานเลือกชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบลูกบาศก์ หรือ Hexahedral element ในขณะที่แผ่น PZT โดยเฉพาะบริเวณรอยร้าว เป็นจุดที่ต้องให้ความสำคัญ จึงแบ่งเอลิเมนต์ละเอียด กว่า และเลือกชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การสร้างเมช และกำหนดตำแหน่งของรอยร้าว

<u>3.2.5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระ</u>

กำหนดให้ปลายคานด้านหนึ่งเป็นแบบยึดแน่น ในขณะที่ปลายอีกด้านเป็นอิสระ และ มีโมเมนต์กระทำ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระที่กระทำ

3.2.6 เลือกผลลัพธ์ที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ

กำหนดให้โปรแกรมคำนวณความเค้น ความเครียด ระยะเสียรูป และค่าตัวประกอบ ความเข้มของความเค้นในโหมดที่ I และ II ดังแสดงในรูปที่ 3.10 อนึ่งในการวิเคราะห์จะพิจารณาแค่ *K*_I เท่านั้น



รูปที่ 3.10 ผลการคำนวณที่ต้องเลือกให้โปรแกรมคำนวณและแสดงออกมา

<u>3.2.7 ทำการคำนวณ</u>

ทำการคำนวณผลลัพธ์ แล้วนำมาพิจารณาเพื่อปรับปรุงการตั้งค่าต่าง ๆ ให้ได้ผลที่ลู่ เข้าและน่าเชื่อถือก่อน จึงนำผลไปวิเคราะห์ และปรับเปลี่ยนสำหรับกรณีอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว (a/b)

ในส่วนนี้จะพิจารณาจากการพล็อตกราฟของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดย ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว 5 ค่า คือ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 1 โดยรูปที่ 4.1 – 4.4 รูป ที่ 4.5 – 4.8 และรูปที่ 4.9 – 4.12 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะอยู่ในตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า K1 ที่ปลายรอยร้าวจะมีค่ามากขึ้นตามค่า a/b ที่ไม่เกิน 0.5 หากค่า a/b มีค่าเกิน 0.5 แล้วจะไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่า a/b กับค่า K1 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปลายรอย ร้าวได้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะค่า K1 สูงสุด จะพบว่า เมื่อ a/b มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า K1 สูงสุด จะเพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 4.1 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และรอยร้าวอยู่ใน ตำแหน่งที่ 1







รูปที่ 4.3 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และรอยร้าวอยู่ใน ตำแหน่งที่ 3















รูปที่ 4.7 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และรอยร้าวอยู่ใน ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 4.8 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และรอยร้าวอยู่ใน ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.9 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และรอยร้าวอยู่ใน ตำแหน่งที่ 1







รูปที่ 4.11 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และรอยร้าวอยู่ ในตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 4.12 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และรอยร้าวอยู่ ในตำแหน่งที่ 4

4.2 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของรอยร้าว

จากรูปที่ 4.13 – 4.18 ซึ่งเป็นการพิจารณาค่า K1 เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของรอยร้าว โดย ขนาดของรอยร้าวที่เลือกมาแสดงมีสองค่าคือ a/b = 0.1 และ 0.5 ที่ตำแหน่ง PZT ทั้งสามตำแหน่ง จะเห็นได้ว่า ค่า K1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งของรอยร้าวเข้าใกล้ขอบของแผ่น PZT เป็นเช่นนี้ ทุกผลการคำนวณ



รูปที่ 4.13 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ a/b = 0.1



รูปที่ 4.14 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ a/b = 0.5



รูปที่ 4.15 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ a/b = 0.1



รูปที่ 4.16 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 2 และ a/b = 0.5



รูปที่ 4.17 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ a/b = 0.1



รูปที่ 4.18 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น กรณีแผ่น PZT อยู่ในตำแหน่งที่ 3 และ a/b = 0.5

4.3 ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่น PZT

จากรูปที่ 4.19 – 4.24 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ค่า a/b คงที่ แล้วเปลี่ยนตำแหน่ง PZT บนคาน ค่า K1 จะมีค่าใกล้เคียงกันจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง แสดงว่า การเปลี่ยนตำแหน่งแผ่น PZT ใน กรณีคานยื่นขนาดหน้าตัดคงที่ และมีภาระเป็นโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว ไม่ส่งผลต่อความเสียหาย



รูปที่ 4.19 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี a/b = 0.1 และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.20 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี a/b = 0.1 และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 4.21 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี a/b = 0.5 และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.22 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี a/b = 0.5 และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 4.23 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณี a/b = 1 และรอยร้าวอยู่ตำแหน่งที่ 1





บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ ปลายรอยร้าวรูปครึ่งวงรี โดยรอยร้าวนี้อยู่บนผิวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บนคานยื่นซึ่งรับ โมเมนต์ดัดที่ปลายคาน พิจารณาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดย การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว ตำแหน่งของรอยร้าว และตำแหน่งของแผ่นเพียโซอิ เล็กทริก

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนขนาดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยร้าวมีผล ต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่ออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้น (ความลึกของรอยร้าวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว) ค่า K_i สูงสุดจะ เพิ่มขึ้นตาม และหากตำแหน่งของรอยร้าวยิ่งใกล้ขอบ ค่า K_i ยิ่งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งของ แผ่นเพียโซไม่ส่งผลต่อค่า K_i ทั้งนี้ข้อสรุปนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่คานยื่นมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าคงที่ ตลอดความยาว และภาระที่กระทำมีเพียงโมเมนต์ดัดที่กระทำในลักษณะเปิดรอยร้าวให้แยกออกใน โหมดที่ 1 เท่านั้น

ผลจากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ศึกษาในโหมดอื่น ๆ และจะเป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับหา สาเหตุของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในกระบวนการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากขึ้น ควรทำการคำนวณในกรณี ที่คานมีหน้าตัดไม่คงที่ กล่าวคือ ความกว้างของคานจะลดลงจากปลายที่ยึดแน่นไปยังปลายอิสระ

5.2.2 ควรปรับเปลี่ยนภาระเป็นแรงเดี่ยวกระทำในแนวขวาง โดยปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่แรง กระทำบนผิวบนของคาน ซึ่งในกรณีนี้จะต้องสั่งให้โปรแกรมแสดงผลการคำนวณ K2 และ K3 ออกมา ด้วยเพราะอาจจะเป็นแบบโหมดผสม (Mixed mode)

5.2.3 ควรวิเคราะห์กรณีที่รอยร้าวเอียงทำมุมต่าง ๆ

5.2.4 ควรวิเคราะห์เพิ่มเติมในระดับคริสตัล

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] "Hard Disk Drive," Wikipedia [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/
 Hard disk drive. [Accessed: 11 กันยายน 2557].
- [2] จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, *กลศาสตร์การแตกหัก*, กรุงเทพฯ: มิสเตอร์ก็อปปี้, 2553.
- [3] E. Atroshchenko, "Stress-intensity factors for elliptical and semi-elliptical cracks subjected to an arbitrary mode I loading," Ph.D. dissertation (Civil Engineering), University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [4] H. M. Westergaard, "Bearing pressures and cracks," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 6, no. 6, pp. A49 – A53, June, 1939.
- [5] G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, no. 3, pp. 361 364, June, 1957.
- [6] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- [7] 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. [Accessed: September 11, 2014].
- [8] T. L. Anderson, Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications, Florida: CRC Press, 2005.
- [9] E. E. Gdoutos, *Fracture Mechanics : An Introduction*, Dordrecht: Springer, 2005.
- [10] F. Erdogan, "Stress intensity factors," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 50, no.
 4b, pp. 992 1002, December, 1983.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Improved stress-intensity factors for semielliptical surface cracks in finite-thickness plates," NASA Technical Memorandum, NASA TM X – 72825, June 1977.
- [15] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Stress-intensity factors for a wide range of semielliptical surface cracks in finite-thickness plates," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 817-829, 1979
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] S. Ploypech et al., "Crack initiation and propagation of galvanized coatings hotdipped at 450°C under bending loads," *Surface & Coatings Technology*, vol. 206, no. 18, pp. 3758-3763, May 2012.
- [20] 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.