



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การจำลอง และการออกแบบวัสดุรองรับเซลล์ผลิตไฟฟ้า
สำหรับการพัฒนาเซลล์พลังงานไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

Simulation and modeling electrical cell substrate for the
development of electrical energy from the motion of vehicles.

ผศ.ดร. วรวุฒิ
นาย วรทัศน์

มรรคเจริญ
พูลสวัสดิ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การจำลอง และการออกแบบวัสดุรองรับเซลล์ผลิตไฟฟ้า สำหรับการพัฒนาเซลล์
พลังงานไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 70,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2558 ถึง กันยายน 2559

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
 ผศ.ดร. วรวุฒิ มรรคเจริญ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
 นาย วรทัศน์ พูลสวัสดิ์ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองของการจำลอง (Simulation) การออกแบบ และการทดสอบความล้า (Fatigue) ของชิ้นส่วนประกอบป้องกัน PZT (Protected PZT assembly) สำหรับการใช้ทางด้านการเก็บเกี่ยวพลังงาน การป้องกันที่เกิดขึ้นเป็นการออกแบบใหม่ในลักษณะของส่วนห่อหุ้ม (Encapsulation) โดยอ้างอิงจากการวิจัยก่อนหน้านี้ ด้วยการทำงานของโปรแกรม ANSYS เพื่อจำลองผลกระทบของความเค้น (Stress) ต่อชิ้นส่วนป้องกันโพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วน PE ที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมสามารถกระจายแรงกดจากภายนอก (external pressure) ได้ในปริมาณที่เหมาะสมกับแผ่น PZT และสามารถทนต่อแรงกดซ้ำๆ จากแรงกดภายนอกที่อยู่ในช่วง 5-20 MPa ซึ่งจากผลการทดลองเหล่านี้ช่วยให้เราสามารถเลือกรูปทรงที่ดีที่สุดในการปกป้องแผ่น PZT และชิ้นส่วนประกอบ PE สำหรับห่อหุ้ม ค่าความล้า (Fatigue) ของชิ้นส่วนประกอบจะถูกทดสอบด้วยการรับแรงกดจากภายนอกหลายๆ ครั้ง และค่าความต่างศักย์ (Voltage cycle) ที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ผลการทดสอบค่าความต่างศักย์มีรูปแบบของกราฟที่คล้ายคลึงกันโดยมีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.76 V ทั้งก่อน และหลังการประกอบด้วยการรับแรงกดซ้ำๆ จากแรงกดภายนอก ค่าความล้าของชิ้นส่วนป้องกันได้ถูกกำหนดให้สามารถส่งถ่ายแรงกดบางส่วน เพื่อให้เกิดค่าความต่างศักย์ต่ำที่สุดหลังจากได้รับแรงกดจากภายนอกในช่วง 5-20 MPa โดยค่าความต่างศักย์ต้องไม่น้อยกว่า 3.5 V หลังจากการกดทดสอบ 4500 ครั้ง ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างส่วนประกอบที่ได้รับการออกแบบสามารถทนรับแรงกดจากภายนอกได้เป็นที่น่าพึงพอใจ

คำสำคัญ : การห่อหุ้ม, เลดเซอร์โคเนทไททาเนต, โปรแกรมจำลอง แอนซิท, ความต่างศักย์, ความล้า

Research Title: Simulation and modeling electrical cell substrate for the development of electrical energy from the motion of vehicles.

Researcher: Asst.Dr. Worawut Makcharoen
Mr. Woratat Punsawat

Faculty: Manufacturing System Engineering

Department: College of Advanced Manufacturing Innovation

ABSTRACT

The simulation of design and a real fatigue test of a protected PZT assembly for energy harvesting application. The protection was from a new encapsulation design. Based on a previous unpublished research, simulation runs with ANSYS program to simulate the effect of stress on Polyethylene (PE) protective layers of various shapes were performed and the results demonstrated that PE layers of rectangular shape were able to distribute an external pressure at a suitable amount to the PZT sheet and withstand repeated pressings from an external pressure in the range of 5-20 MPa. These results enabled us to choose the best shape of PZT sheet and PE housing assembly. The fatigue parameter of the assembly was determined by subjecting the assembly to a repeated external force. And the voltage cycle of the encapsulated PZT assembly was measured with an oscilloscope. The voltage cycle test results show similarly-shaped cycles with a mean voltage of 3.76 V both before and after the assembly was subjected repeatedly to an external force. The fatigue parameter was defined as a minimum voltage that the assembly could deliver after a large number of repeated pressings by an external pressure in the range of 5-20 MPa. Our criterion of successful protection was a minimum of 3.5 V after 4,500 pressings. Therefore, we concluded that the constructed assembly was able to withstand an external operating pressure satisfactorily.

Keywords : Encapsulation, PZT, ANSYS Simulation, Voltage, Fatigue

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องขอแสดงความขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือทั้งทางการทดลองและอุปกรณ์การวิเคราะห์ข้อมูลทั้ง วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูงที่ให้ความช่วยเหลือทั้งโอกาสในการวิจัยแหล่งทุน และห้องทดลอง และเตรียมการทดลอง และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในการวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง และในงานวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือจากการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน เงินวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ที่สนับสนุนงบประมาณ และให้โอกาสคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาความสามารถของผู้วิจัย และสามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาความรู้แก่สังคมต่อไป

ผศ.ดร. วรวุฒิ มรรคเจริญ

นาย วรทัศน์ พูลสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric).....	4
- สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient).....	6
2.2 พอลิเมอร์ (Polymers).....	7
2.3 แรงกดเนื่องจากการเดิน.....	9
2.4 ANSYS Programs.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 ขั้นตอนการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Solid works.....	17
3.1.1 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 1.....	17
3.1.2 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 2.....	18
3.1.3 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 3.....	19
3.1.4 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 4.....	20
3.1.5 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 5.....	21

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
3.2 ขั้นตอนการจำลองผลด้วยโปรแกรม ANSYS.....	22
3.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยตัวต้นแบบจริง.....	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	23
4.1 ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS.....	23
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	25
บทที่ 5 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	26
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	28
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	34
ประวัตินักวิจัย	35

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 (a) ปราบกฎการณ้เพียโซอิเล็ทริกโดยตรง (b) ปราบกฎการณ้เพียโซอิเล็ทริกโดยอ้อม.....	4
2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็ทริก.....	6
2.3 แสดงแรงดึงที่กระทำต่อวัตถุ.....	10
2.4 แสดงแรงอัดที่กระทำต่อวัตถุ.....	11
2.5 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุแบบ Single shear.....	11
2.6 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุแบบ Double shear.....	11
2.7 SEM of PZT powders calcined at (A) 600 °C, (B) 700 °C and (C) 800 °C.....	13
2.8 Variation of longitudinal strain coefficient d33 with sintering temperature.....	14
2.9 Schematic structure and operation principle of piezoelectric laminated cantilever for harvesting vibration energy coupled in through the vibration of the frame.....	14
2.10 Power output as a function of frequency for various load resistances (a), and voltage and power output as a function of acceleration measured at the anti-resonance.....	15
2.11 SEM microphotographs of samples (a) right after sintering, (b) sol-gel coated with PZN-PZT film and (c) followed by mechanical polishing.....	15
2.12 Piezoelectric coefficients of samples with (a) single step press, (b) two-step press including CIP, (c) sol-gel surface coating, and (d) mechanical polishing.....	16
3.1 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 1.....	17
3.2 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 2.....	18
3.3 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 3.....	19
3.4 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 4.....	20
3.5 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 5.....	21
4.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นของส่วนห่อหุ้ม PE จากการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS.....	23
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปของส่วนประกอบห่อหุ้ม PZT ที่ถูกกดด้วยกระบอสูบ.....	24
4.3 ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนครั้งเมื่อส่วนประกอบห่อหุ้ม PZT ถูกแรงกดจากภายนอกกระทำซ้ำๆ ด้วยกระบอสูบ.....	25

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสังคมปัจจุบันที่มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่ทันสมัยมากมาย ซึ่งสิ่งที่ตามมาคือความต้องการพลังงานที่มีมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ซึ่งส่วนมากพลังงานไฟฟ้าผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติเช่น น้ำมัน หรือแก๊สธรรมชาติเป็นหลัก แต่เชื้อเพลิงธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่มีจำกัดและมีปริมาณลดลงทำให้ต้นทุนราคาพลังงานมีการปรับตัวสูงขึ้นส่งผลให้ราคาพลังงานไฟฟ้ามีการปรับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงมีการคิดค้นหาพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นๆ เช่น พลังงานนิวเคลียส พลังงานจากเขื่อนน้ำ ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้แต่ต้นทุนความเสี่ยงก็มีสูง แม้แต่พลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนต้องทำให้เสียพื้นที่เพาะปลูก และพื้นที่ป่าไปจำนวนมากเพื่อใช้พื้นที่สำหรับกักเก็บน้ำ จึงมีการคิดค้นหาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมมากขึ้นซึ่งจะเห็นว่ามีมีการคิดค้นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ทั้งในรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ และความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม พลังงานไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคลื่นในทะเล เป็นต้น

ในการศึกษาได้ให้ความสนใจในสมบัติของวัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ซึ่งเป็นสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นการเคลื่อนที่ทางกล หรือการเคลื่อนที่ทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งหมายความว่าวัสดุนี้เมื่อได้รับแรงทางกลเช่นแรงกดหรือแรงดึงจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ได้ ในการศึกษาจึงให้ความสนใจที่จะนำวัสดุเซรามิกส์นี้มาเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าโดยใช้แรงกดจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะเช่นรถยนต์ หรือการเดินของมนุษย์ ที่ในปัจจุบันมีจำนวนยานพาหนะที่สัญจรบนถนนจำนวนมากซึ่งถ้าเราสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะได้ก็สามารถนำกระแสไฟฟ้าที่ได้มาใช้ในการให้แสงสว่างของถนนได้อีกด้วย แต่ข้อจำกัดของเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนตคือจ่ายกระแสไฟสูงเมื่อมีความบางมากๆ ซึ่งเมื่อรับแรงกดจากยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่หรือน้ำหนักมากก็จะทำให้เกิดการแตกเสียหายของเซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เพราะฉะนั้นในการศึกษานี้จึงได้ต้องการออกแบบรูปแบบของวัสดุรองรับ รวมทั้งความหนาชนิด และสมบัติการกระจายแรงที่เหมาะสมเพื่อใช้ป้องกันแรงกดสูงๆ และยังสามารถทำงานได้ที่แรงกดต่ำๆซึ่งจะทำให้เซลล์ไฟฟ้าทำงานได้นานโดยไม่เกิดความเสียหาย และการทำขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ดี รวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการยึดประสานชิ้นส่วนเข้าด้วยกันที่เหมาะสมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อใช้ความรู้ที่ได้ในการศึกษานี้ไปพัฒนาการเรียนการสอนนักศึกษาในรายวิชาวัสดุวิศวกรรม เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานของการเลือกและการทดสอบสมบัติของวัสดุ
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเพื่อทดสอบสมบัติความแข็งแรงที่ออกแบบ

3. เพื่อสร้างวัสดุรองรับ และวัสดุปิดหน้าเซลล์ไฟฟ้ารวมทั้งวิธีการยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันที่สามารถรับแรงกดได้สูง
4. เพื่อสร้างเซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแรงกดของยานพาหนะหรือผู้คนที่เดินผ่านบนถนนได้
5. เพื่อพัฒนาความรู้ ความสามารถทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี เพื่อเพิ่มพูนทักษะในการทำวิจัยรวมทั้งศักยภาพ และความเป็นสากลด้านความรู้ทางวิทยาศาสตร์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. นำความรู้ที่ได้ในการศึกษานั้นไปพัฒนาการเรียนการสอนนักศึกษาในรายวิชาวัสดุวิศวกรรมเพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานของการเลือกและการทดสอบสมบัติของวัสดุ
2. ทำการศึกษากระบวนการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเพื่อทดสอบสมบัติความแข็งแรงที่ออกแบบ
3. ทำการสร้างวัสดุรองรับ และวัสดุปิดหน้าเซลล์ไฟฟ้าตามแบบที่ออกแบบและจำลองรวมทั้งวิธีการยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันที่สามารถรับแรงกดได้สูง
4. ทำการสร้างเซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแรงกดของยานพาหนะหรือผู้คนที่เดินผ่านบนถนนได้
5. ทำการเผยแพร่ผลงานความรู้ที่ได้จากการศึกษาในการประชุมสัมมนาในระดับชาติหรือนานาชาติ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาวรรณกรรม ข้อมูล เอกสาร และบทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษา และออกแบบการทดลอง พร้อมทั้งติดต่อจัดซื้อวัสดุที่ใช้ เครื่องมือที่ใช้ เครื่องมือวิธีการ และสถานที่หรือหน่วยงานที่สามารถทดสอบสมบัติของตัวอย่างได้
3. ทำการสร้างแบบจำลองของวัสดุฐานรอง และวัสดุปิดหน้าตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าทั้งความหนา และสมบัติความแข็งแรงความยืดหยุ่นของวัสดุที่จะนำมาทำการทดลองเพื่อจำลองค่าการรับแรงกดของวัสดุที่จะทดลองเพื่อหาชนิดและความหนาที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน
4. ทำการเตรียมวัสดุที่ต้องการทดสอบจริงและออกแบบวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวประสานเพื่อยึดเซลล์ไฟฟ้ากับวัสดุฐานรองที่จะทำให้สามารถยึดได้และไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ไฟฟ้าและยังสามารถส่งแรงกดให้กับเซรามิกส์ได้ดี
5. ทำการศึกษาและปรับปรุงทั้งการประกอบการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ได้เซลล์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้และสามารถทนแรงกดจากรถยนต์ที่มีน้ำหนักมากได้
6. เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลอง
7. สรุปผลการดำเนินงาน

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

แผ่นเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีข้อเสียคือมีความเปราะแตกหักได้ง่ายจึงต้องมีการออกแบบรูปแบบฐานรองป้องกันความเสียหายจากแรงกดที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรมทดสอบจำลองการใช้งานจริงเพื่อทดสอบผลก่อนทำการผลิตจริงเพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบออกแบบลง และลดผลตัวอย่างที่ไม่ผ่านเงื่อนไขการใช้งาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

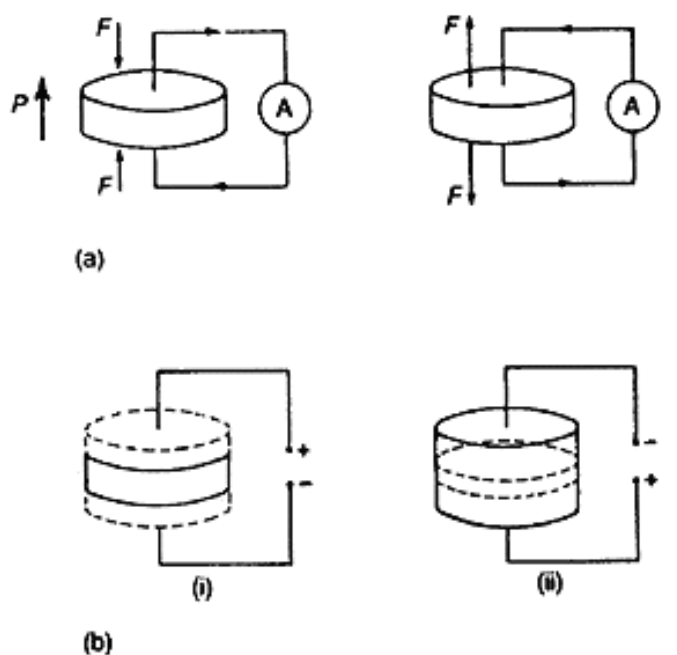
1. เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง และปกป้องเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนต และหารูปแบบที่เหมาะสมได้
2. เพื่อพัฒนาการใช้เครื่องมือในการเตรียมชิ้นตอนต่างๆ และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้า
3. เพื่อพัฒนาความรู้ในการใช้โปรแกรม ANSYS simulation
4. เพื่อพัฒนาความรู้ในการใช้เครื่องมือในการเตรียมชิ้นงานจริงที่ผ่านผลการทดสอบจำลอง
5. เพื่อพัฒนาความรู้ในการวัด และทดสอบสมบัติทางกายภาพ และการวัดค่าทางไฟฟ้า

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุถูกค้นพบในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie โดยการศึกษาค่าอิทธิพลของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึก เช่น ควอตซ์ (Quartz) ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) และ ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) เป็นต้น โดยชื่อ “piezo” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง “การกด” ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (Electrical polarization) ขึ้นเนื่องจากความเครียด (Strain) ในวัสดุ เมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct piezoelectric effect)” หรือปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator action) ดังแสดงในภาพที่(b) และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้นั้น จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)” หรือปรากฏการณ์ มอเตอร์ (Motor effect) ดังแสดงในภาพที่ (b) จากปรากฏการณ์ข้างต้นนี้พบว่า ปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำ เช่น เป็นแรงกด หรือแรงดึง เป็นต้น



ภาพที่ 2.1(a) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (b) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่น (Elastic property) ของวัสดุ คือ

$$\mathbf{D} = \mathbf{dE} + \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E} \quad (\text{Generator action}) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{dE} \quad (\text{Motor effect}) \quad (2.2)$$

เมื่อ	D	คือ ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (Dielectric displacement)
	T	คือ ความเค้น (Stress)
	E	คือ สนามไฟฟ้า (Electric field)
	S	คือ ความเครียด (Strain)
	d	คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient)
	s	คือ ความหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น)
	ϵ	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

โดยตัวกในสมการทั้งสองนี้แสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ซึ่ง ϵ^T ในสมการที่ 2.1 บ่งบอกว่าความเค้นเป็นค่าคงที่นั่นคือ เมื่อไม่มี แรงเค้นมากระทำ ต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั่นเอง ส่วน s^E ในสมการที่ 2.2 นั้นมีสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ จากรูปแบบของสมการทั้งสองนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง จึงต้องมีการระบุเป็นตัวห้อยไว้เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนด เช่น d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์โดยตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งของวัสดุ เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุ (ดังภาพที่ 2.1) และค่า d_{33} ที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 เป็นต้น โดยตัวอย่างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกนี้ คือ

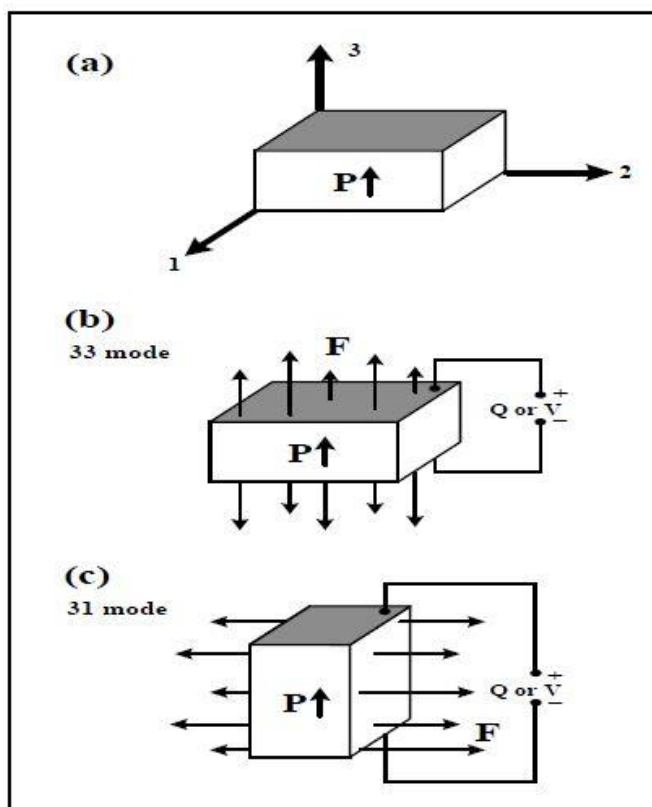
$$D = d_{33}T_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยตรง}) \quad (2.3)$$

$$S = d_{33}E_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยอ้อม}) \quad (2.4)$$

โดยค่า d มีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ C/N สำหรับปรากฏการณ์โดยตรง และมีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ m/V สำหรับปรากฏการณ์โดยอ้อม ซึ่งวัสดุที่มีค่า d สูง มักนิยมนำไปประยุกต์ใช้ ในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่น หรือ เคลื่อนที่ เช่น โซนาร์ และเครื่องบันทึกเสียง เป็นต้น

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient)

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) เป็นการวัดค่าของการเกิด โพลาริเซชันเมื่อให้แรงเชิงกลแก่วัสดุเซรามิกส์หนึ่งหน่วย หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อ ให้แรงทางไฟฟ้าหนึ่งหน่วยแก่วัสดุเซรามิกส์ โดยตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้าไปในวัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขห้อยตัว หลังแสดงทิศทางที่วัสดุเกิดการยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำ



ภาพที่ 2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทางเกิดการเกิดโพลาริเซชัน จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ x และแกน y แทนด้วยทิศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังภาพที่ 2.2 (a) ดังนั้นกล่าวได้ว่า

- d_{33} คือสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโพลาริเซชันในทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิกส์ เมื่อมีการให้ความเค้นแก่วัสดุเซรามิกส์ในทิศเดียวกับทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิกส์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2(b)
- d_{31} คือสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโพลาริเซชันในทิศ ของการทำขั้วของวัสดุเซรามิกส์ เมื่อมีการให้ความเค้นแก่วัสดุเซรามิกส์ในทิศตั้งฉากกับทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิกส์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 (c)

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกวัสดุเซรามิกส์บางชนิด

ชนิดของวัสดุเซรามิก	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/N)
BaTiO ₃	190	-78
PbTiO ₃	45 - 56	(-4.2) - (-6.8)
Pb(Zr _{0.53} Ti _{0.47})O ₃	220	-71
Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃	175	-148
PbTiO ₃ - PbZrO ₃	71 - 590	(-27) - (-274)
Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ - PbTiO ₃ - PbZrO ₃	280 - 460	(-79) - (-250)

2.2 พอลิเมอร์ (Polymers)

คือ สารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีมวลโมเลกุลมาก ประกอบด้วย หน่วยเล็ก ๆ ของสาร เรียกว่า มอนอเมอร์ (monomer) จะต้องมียูนิทซ้ำกัน (repeating unit) มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยคำว่า พอลิเมอร์ (Polymer) มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ polys แปลว่า หลายหรือมาก และ meros แปลว่า ส่วนหรือหน่วย

โครงสร้างของพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. พอลิเมอร์แบบเส้น (Chain length polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว โซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็งขุ่นเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือ PVC มีไวนิลคลอไรด์เป็นมอนอเมอร์ พอลิสไตรีน หรือ PS มีสไตรีนเป็นมอนอเมอร์
2. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้น และโซ่ยาว กิ่งที่แตกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ ยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
3. พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross-linking polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแหพอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรง และเปราะหักง่าย ตัวอย่างเช่น เบกาไลต์ และเมลามีน ใช้ทำถ้วยชาม

การจำแนกพอลิเมอร์มีเกณฑ์การแบ่งได้หลายแบบ

การจำแนกพอลิเมอร์ตามการเกิด ได้ 2 แบบ ดังนี้

1. พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้งเซลลูโลส ยางธรรมชาติ

2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเคมี ส่วนใหญ่มีมวลโมเลกุล 10,000-1,000,000 สำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์รวมทั้ง อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) ที่มีสมบัติคล้ายยาง ไฟเบอร์ (Fibers) ที่มีสมบัติเป็นเส้นใย และ พลาสติก (Plastics)

การจำแนกพอลิเมอร์ตามการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนสามารถจำแนก ได้ 2 แบบ ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมตัวได้ด้วยความร้อนแล้วแข็งตัว เมื่อทำให้เย็นตัวลง การหลอมและการเย็นตัวทำได้หลายๆ ครั้ง โดยไม่มีผลเสียกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ [ที่ไม่ใช่โครงสร้างแบบร่างแห (Network)] และโพลีเอทิลีน (เช่น พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ไตรล เป็นต้น)
2. เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมตัวได้เฉพาะครั้งแรกเท่านั้นตามด้วยการเชื่อมต่อกัน ดังนั้นพอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อโดนความร้อน แต่ถึงจุดๆ หนึ่งจะสลายตัวเนื่องจากความร้อนจะทำลายพันธะยึดเหนี่ยวของตัวเชื่อมต่อกัน ตัวอย่าง เช่น เมลามีนฟอรัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde resin) และ เบกาไลต์ (Bekelite) เป็นต้น

การจำแนกพอลิเมอร์ตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ได้ 2 แบบ ดังนี้

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymers) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ของมอนอเมอร์ ชนิดเดียวกัน เช่น แป้ง เป็นพอลิเมอร์ที่มีกลูโคสประกอบด้วยเป็นมอนอเมอร์ พอลิสไตรีน เป็นพอลิเมอร์ที่มีสไตรีนเป็นมอนอเมอร์
2. โคพอลิเมอร์ (Copolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ของมอนอเมอร์ต่างชนิดกันอย่างน้อย 2 ชนิด เช่น พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต และ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต สำหรับโคพอลิเมอร์จะจำแนกได้อีก 4 แบบ

2.1 โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบสุ่ม (Random Copolymer)

A-A-B-B-A-A-A-B-A-A-B-B-A-B-A-A-A-B-A-A-A-B-B-

2.2 โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบสลับกัน (Alternating Copolymer)

-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B- หรือ $-(A-B)_n-$

2.3 โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบบล็อก (Block Copolymer)

-A-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B-A-A-A-A-A-A-A-B-B-

2.4 โคพอลิเมอร์ที่จัดแบบโซ่ (Graft Copolymer)

-A-A-A-A-A-A-A-
|
B-B-B-B-B-B-B

วัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) นั้นมีด้วยกันหลากหลายชนิด และใน ส่วนนี้เองทางผู้จัดทำได้เลือกใช้ Polyethylene (PE)

ลักษณะโดยทั่วไปแล้ว พอลิเอทิลีน (Polyethylene) มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น ยืดหยุ่นได้ดี และที่สำคัญ ไม่มีกลิ่น และรส เหนียวยังไม่ติดแม่พิมพ์อีกด้วย มีความเหนียว แต่ทนความร้อนได้ไม่มากนัก (<100 °C) แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (Chemical) เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีมาก ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ดี

ประเภทของ พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมี LDPE ถูกขึ้นรูปเป็นขวด, หีบห่ออาหาร และของเล่น
- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene, MDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.93–0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร MDPE ตามปกติจะถูกใช้ในการทำ ท่อแก๊ส และอุปกรณ์ sacks ฟิล์มบรรจุภัณฑ์
- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมเลกุลของ HDPE เหล่านี้เชื่อมกันอย่างแน่นหนาจึงทำให้ แข็งแรงกว่า แข็งกว่า และโปร่งแสงน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) HDPE ใช้ทำถุก, ถังน้ำมันรถ, หีบห่อและท่อน้ำ

ข้อดีของการเลือกใช้ Polyethylene (PE) ในการนำมาทำชิ้นส่วนป้องกัน หรือแผ่น Cover นั้นก็คือ

- ราคาถูก เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ในท้องตลาด
- หาซื้อได้ง่าย และยังสามารถหารูปทรง พร้อมขนาดได้ตามต้องการ
- คุณสมบัติเพียงพอในระดับหนึ่งต่อการรองรับแรงกดจากการเดิน

2.3 แรงกดเนื่องจากการเดิน

ชนิดของแรง (Types of loads) แรงที่มากระทำต่อวัสดุชิ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. แรงที่อยู่นิ่ง (static load)

เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของวัสดุอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีค่าถึงค่าหนึ่ง แล้วจะมีค่าคงที่ อยู่ ตลอดไปหรือเกือบเท่ากับค่านั้นตลอดไป

2. แรงที่กระทำซ้ำ ๆ (repeated load)

หมายถึง แรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุหลายๆครั้งซ้ำๆกัน และสลับกันไปมาในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น แรงกระทำต่อข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เพลาารถไฟ ฯลฯ

3. แรงกระแทก (impact load)

เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนในระยะเวลาอันสั้นโดยปกติแล้วไม่สามารถที่จะหาระยะเวลาที่แรงกระทำนี้กระทำได้ล่วงหน้า เช่น แรงกระทำที่เกิดจากรถยนต์วิ่งข้ามสะพาน เป็นต้น สำหรับการพิจารณาถึงแรงกดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนป้องกัน หรือแผ่น Cover นั้นสามารถพิจารณาได้จากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่มากกระทำต่อแผ่น Cover ในระยะเวลาสั้นๆ (แรงกระทำ) อาจกล่าวได้ว่าแรงกดเนื่องจากการเดินของคนบนทางเท้า นั่นก็คือ ความเค้น (Stress) นั่นเอง

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงภายนอกที่มากกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ซึ่งกระทำในลักษณะขนานหรือตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ใช้สัญลักษณ์ σ (sigma)

กำหนดให้ $\sigma = \frac{F}{A}$ เป็นแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อ

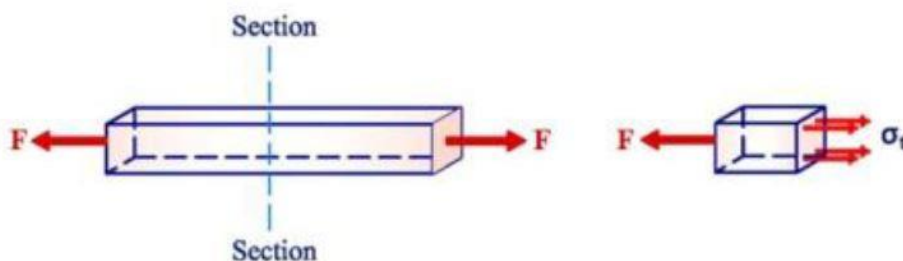
σ คือ ความเค้น (N/m^2 หรือ Pa)

F คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (N)

A คือ แรงภายนอกที่มากกระทำต่อวัตถุ (m^2)

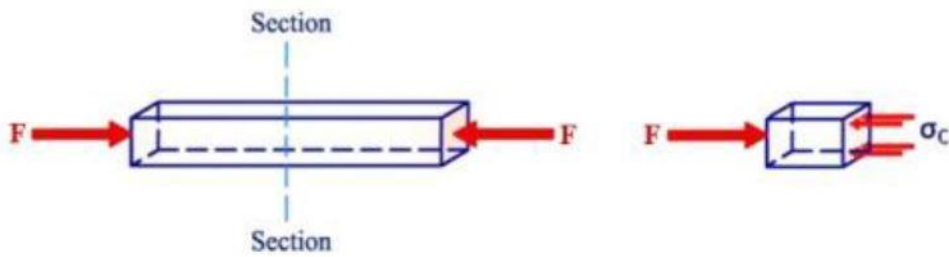
สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามแรงที่มากกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ คือ

1. ความเค้นดึง (Tensile stress) หมายถึง ความเค้นที่เกิดจากแรงดึงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โดยแนวแรงที่มากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดเสมอ



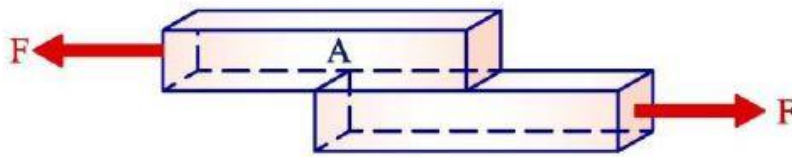
ภาพที่ 2.3 แสดงแรงดึงที่กระทำต่อวัตถุ

2. ความเค้นอัด (Compressive stress) ความเค้นที่เกิดจากแรงอัดกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โดยแรงกระทำแนวแรงต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดเสมอ



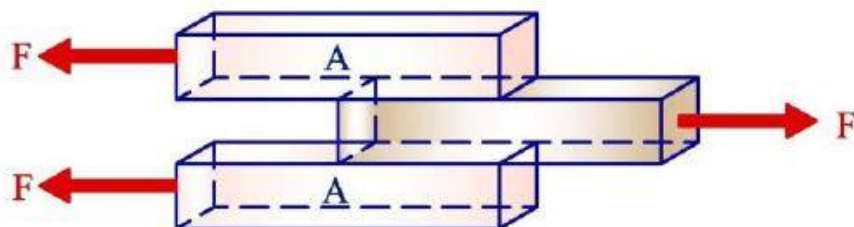
ภาพที่ 2.4 แสดงแรงอัดที่กระทำต่อวัตถุ

3. ความเค้นเฉือน (Shear stress) หมายถึง ความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงเฉือน เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุโดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรง หรือขนานกับพื้นที่หน้าตัดเสมอ โดยความเค้นเฉือน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ
- ความเค้นเฉือนเดี่ยว (Single shear) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงเฉือน โดยมีพื้นที่ (A) โคนเฉือนขาดเพียงหนึ่งพื้นที่



ภาพที่ 2.5 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุแบบ Single shear

- ความเค้นเฉือนคู่ (Double shear) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงเฉือน โดยมีพื้นที่ (A) โคนเฉือนขาดออกเป็นสองพื้นที่



ภาพที่ 2.6 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุแบบ Double shear

2.4 ANSYS Programs

โปรแกรม ANSYS คือการนำหลักการของ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มาใช้วิเคราะห์ปัญหาทุกศาสตร์ทางด้านวิศวกรรม ทั้งด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) กลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ตลอดจน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics)

ANSYS Structural Mechanics ใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาเชิงวิศวกรรม ทั้งในด้านกลศาสตร์ภาคสถิตย์ (Static) และภาคพลวัต (Dynamic) ทั้งการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear) การวิเคราะห์ปัญหาแบบผสมผสาน ร่วมกับความร้อน ของไหล และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์สามารถทำได้ตั้งแต่ชิ้นส่วนย่อยไปจนถึงระบบชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง ภายใต้สภาวะของภาระที่มากกระทำ ทำให้ทราบถึงผลการตอบสนอง ทั้งการเสียรูป (Deformation) แรงปฏิกิริยา (Reaction force) ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain) ตัวอย่างเช่นการสั่นสะเทือนของระบบช่วงล่างรถยนต์ตลอดจนโครงสร้างหรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ, ความเสียหายในท่อหรือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทย์ เช่นการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่เชื่อมกับร่างกายมนุษย์

ANSYS Thermal and Thermal Stress Analysis คือศาสตร์การวิเคราะห์ผลเนื่องจากอุณหภูมิ ทั้งปัญหาที่เป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady State) และสภาวะไม่คงตัว (Transient) อาทิเช่น การแตกหักของท่อผสมน้ำอุ่นอันเนื่องมาจากความเค้นที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ (Thermal Stress), ความเสียหายของหัวฉีดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ ความเสียหายที่เกิดจากความร้อนในอุปกรณ์และเครื่องมือในอุตสาหกรรมต่างๆ หรือการระบายความร้อนของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

ANSYS Fluid Dynamics คือการคำนวณและวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) รวมถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนของของไหล โดยโปรแกรม ANSYS สามารถทำการวิเคราะห์หาคำตอบได้อย่างแม่นยำและครอบคลุม ทั้งปัญหาพลศาสตร์ของไหลแบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วน สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลทั้งภายในและภายนอก (Internal and External flow) ทั้งแบบสถานะเดียว (Single-phase Flow) หรือหลายสถานะ (Multiphase Flow) นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์การไหลร่วมกับการถ่ายเทความร้อนทั้งแบบการนำ การพา และการแผ่รังสี ตลอดจนสามารถวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาเคมี และการเผาไหม้ได้อีกด้วย

ANSYS Explicit Dynamic เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของชิ้นงานที่มีภาระมากกระทำในช่วงเวลาที่สั้นและรุนแรง โดยวัสดุจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไปภายใต้สภาวะการณดังกล่าว เช่นการวิเคราะห์การระเบิดซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเสี้ยววินาที การยิงกระสุนเพื่อทดสอบเกราะกันกระสุน การตกกระแทกของผลิตภัณฑ์ต่างๆ หรือการวิเคราะห์ความปลอดภัยของห้องโดยสารรถยนต์จากการชนด้วยความเร็วสูง

ANSYS POLYFLOW คือโปรแกรมการทำนายพฤติกรรมการณ์ขึ้นรูปของวัสดุแบบพิเศษ เช่น พอลิเมอร์, พลาสติก, ยาง หรือแก้ว เป็นต้น ด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบต่างๆ ทั้งการเป่า การรีด การกดอัด รวม

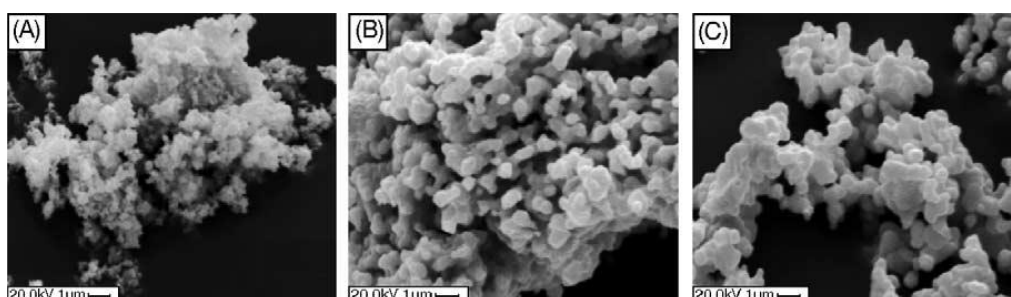
ไปถึงการไหลของวัสดุที่มีความหนืดสูงมากเช่นการไหลของพอลิเมอร์ภายใต้ความร้อนและแรงอัดของสกรู, การเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก หรือการขึ้นรูปร่างชนิดต่างๆ

ANSYS Electromagnetic คือโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ครอบคลุมทุกปัญหา ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor), หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer), ชุดวงจร IC (IC package), แผงวงจร PCB (PCB Interconnect), วิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์คลื่นย่านความถี่วิทยุ/สัญญาณไมโครเวฟ (RF/microwave component) รวมถึงอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ (Antenna), ตลอดจนการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณและการรบกวนคลื่นสัญญาณ (EMI/EMC)

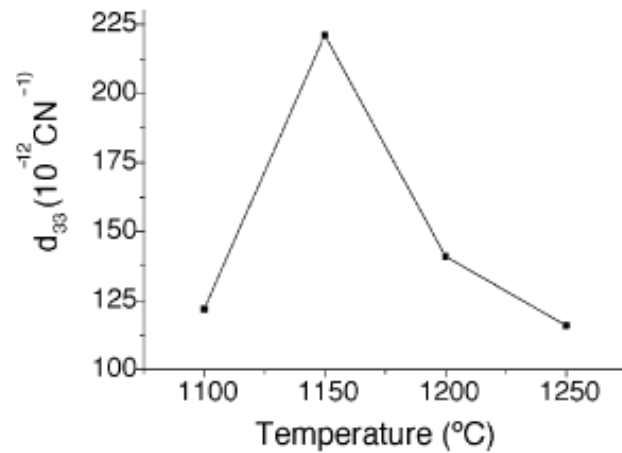
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเซรามิกส์ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) นั้นได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้อย่างมากมายโดยงานวิจัยส่วนมากมุ่งเน้นพัฒนากระบวนการสร้างหรือปรับปรุงลักษณะโครงสร้างของเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับงานที่ถูกนำไปใช้ซึ่งในสมบัติที่สนใจในงานวิจัยนี้คือสมบัติของการผลิตกระแสไฟฟ้าของวัสดุเมื่อมีแรงทางกลทั้งแรงกด และแรงดึงมากระทำกับตัวเซรามิกส์ซึ่งถ้าเราสามารถนำวัสดุนี้ไปไว้ที่พื้นถนนหรือทางเดินเมื่อมีรถหรือคนเดินเหยียบตัวเซรามิกส์ก็จะเกิดแรงกดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในวงจรเกิดขึ้นได้ แต่เงื่อนไขคือเซรามิกส์นั้นมีความเปราะสูง ถ้ารถยนต์ที่มีน้ำหนักมากกดทับก็จะเกิดความเสียหายได้ในงานวิจัยถึงคิดออกแบบโครงสร้างและรูปแบบรวมทั้งวัสดุที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถรับแรงกดและสามารถกระจายแรงกดให้สม่ำเสมอได้ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาเน้นทางด้านเตรียมเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับงานที่สุด

ในปี 2005 z. j. Xu และคณะ ได้ทำการศึกษากระบวนการเตรียมเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ด้วยวิธีการโซลเจล และใช้อัลตราโซนิกช่วยโดยหวังให้ขนาดอนุภาคที่เตรียมได้นั้นมีขนาดเล็กซึ่งจะสามารถใช้อุณหภูมิที่ต่ำลงในการผลิตได้ซึ่งขนาดอนุภาคที่เตรียมได้นั้นแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงอุณหภูมิเผาอบพนักที่ลดลงซึ่งทำให้อัตราระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเตรียมนั้นลดลงได้โดยที่ยังสามารถผลิต เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ที่มีสมบัติที่เหมาะสมได้

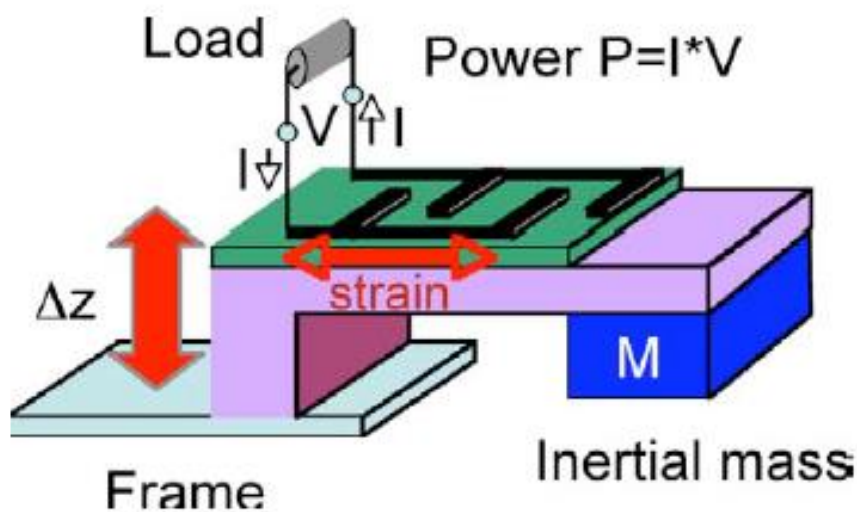


รูปที่ 2.7 SEM of PZT powders calcined at (A) 600 °C, (B) 700 °C and (C) 800 °C.

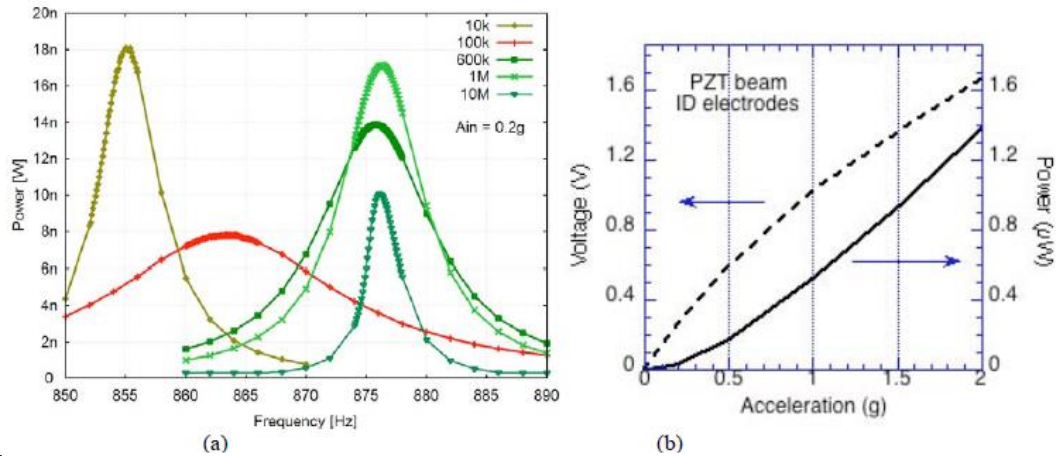


ภาพที่ 2.8 Variation of longitudinal strain coefficient d_{33} with sintering temperature.

ในปี 2009 P. Muralt และคณะ ได้ทำการศึกษาการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการสั่นโดยทำการสร้างฟิล์มบางของเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) ลดบนโครงสร้างที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างและการเตรียมแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ซึ่งผลการทดลองพบว่าในช่วงความถี่ค่าหนึ่งจะมีการตอบสนองที่ให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ได้กับช่วงความถี่ต่าง ๆ นั้นแสดงในรูปที่ 2.10 ที่แสดงให้เห็นช่วงความถี่ที่สั่นพ้องที่เหมาะสม

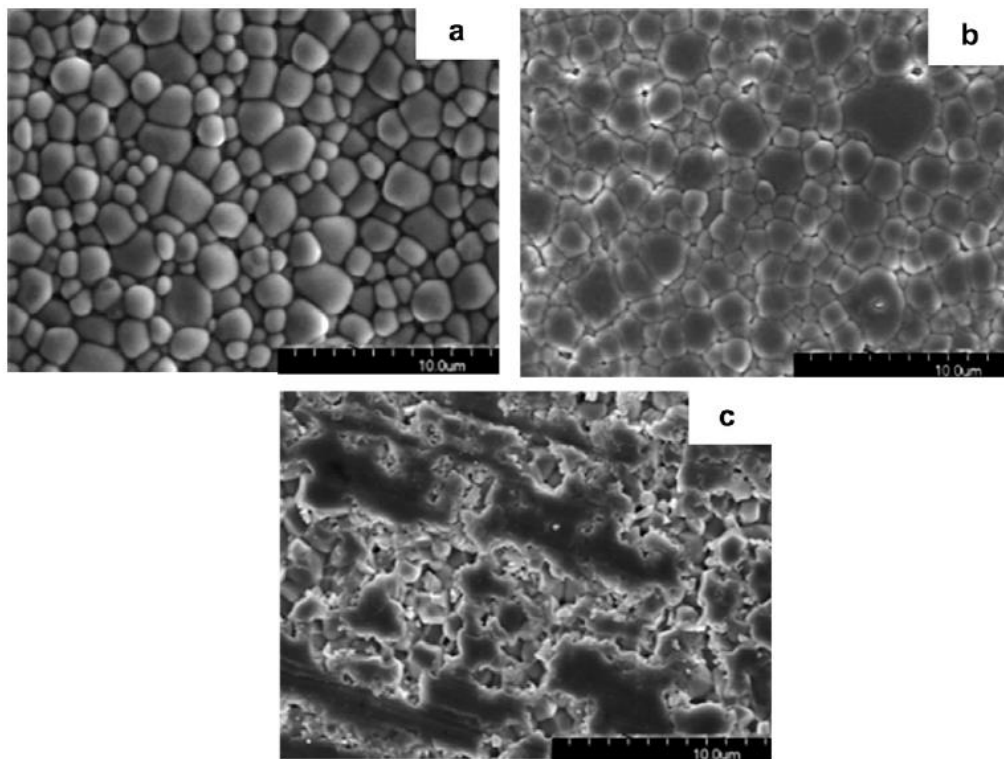


ภาพที่ 2.9 Schematic structure and operation principle of piezoelectric laminated cantilever for harvesting vibration energy coupled in through the vibration of the frame.

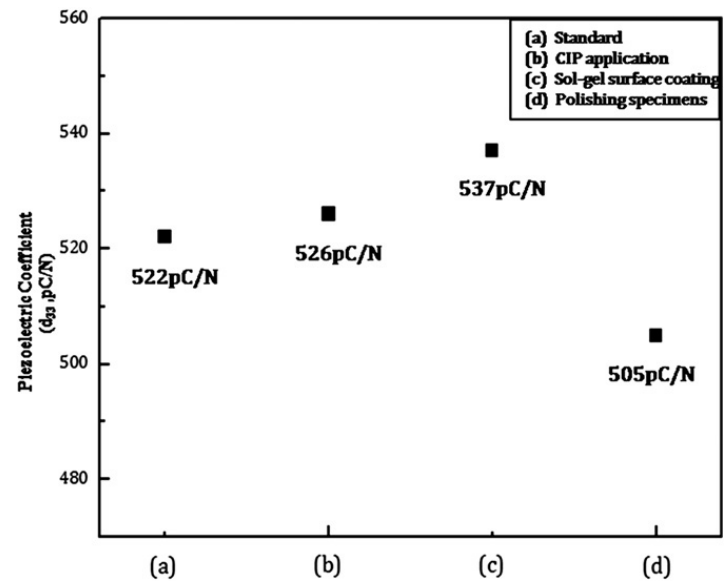


ภาพที่ 2.10 Power output as a function of frequency for various load resistances (a), and voltage and power output as a function of acceleration measured at the anti-resonance.

ในปี 2011 So Hee Lee และคณะ ได้ทำการศึกษาเซลล์ไฟฟ้า PZT โดยการเพิ่ม PZN เพื่อปรับปรุงสมบัติของเซรามิกส์และทำการเปรียบเทียบวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันซึ่งผลการทดลองที่ศึกษาลักษณะเกรนที่ได้จากกระบวนการเตรียมนั้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างจากกระบวนการเตรียมแสดงในรูปที่ 2.11 และการวัดสมบัติทางไฟฟ้าหรือสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนั้นแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าวิธีการ โซล-เจล นั้นให้เซรามิกส์ที่มีค่าเพียโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าวิธีการอื่นๆ



ภาพที่ 2.11 SEM microphotographs of samples (a) right after sintering, (b) sol-gel coated with PZN-PZT film and (c) followed by mechanical polishing.



ภาพที่ 2.12 Piezoelectric coefficients of samples with (a) single step press, (b) two-step press including CIP, (c) sol-gel surface coating, and (d) mechanical polishing.

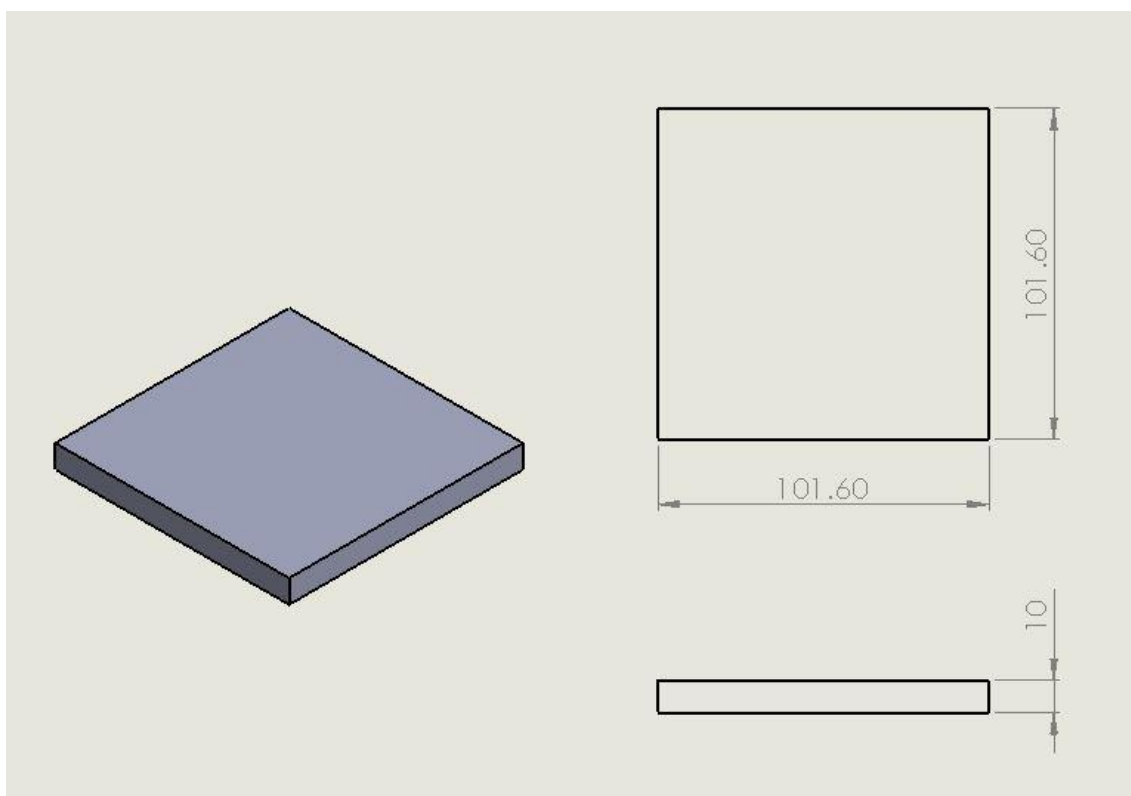
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Solid works

ทำการออกแบบชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) โดยการใช้โปรแกรม Solid works โดยได้ทำการออกไว้ทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยการออกแบบจะมีทั้งชิ้นบนและชิ้นล่าง

3.1.1 ชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 1

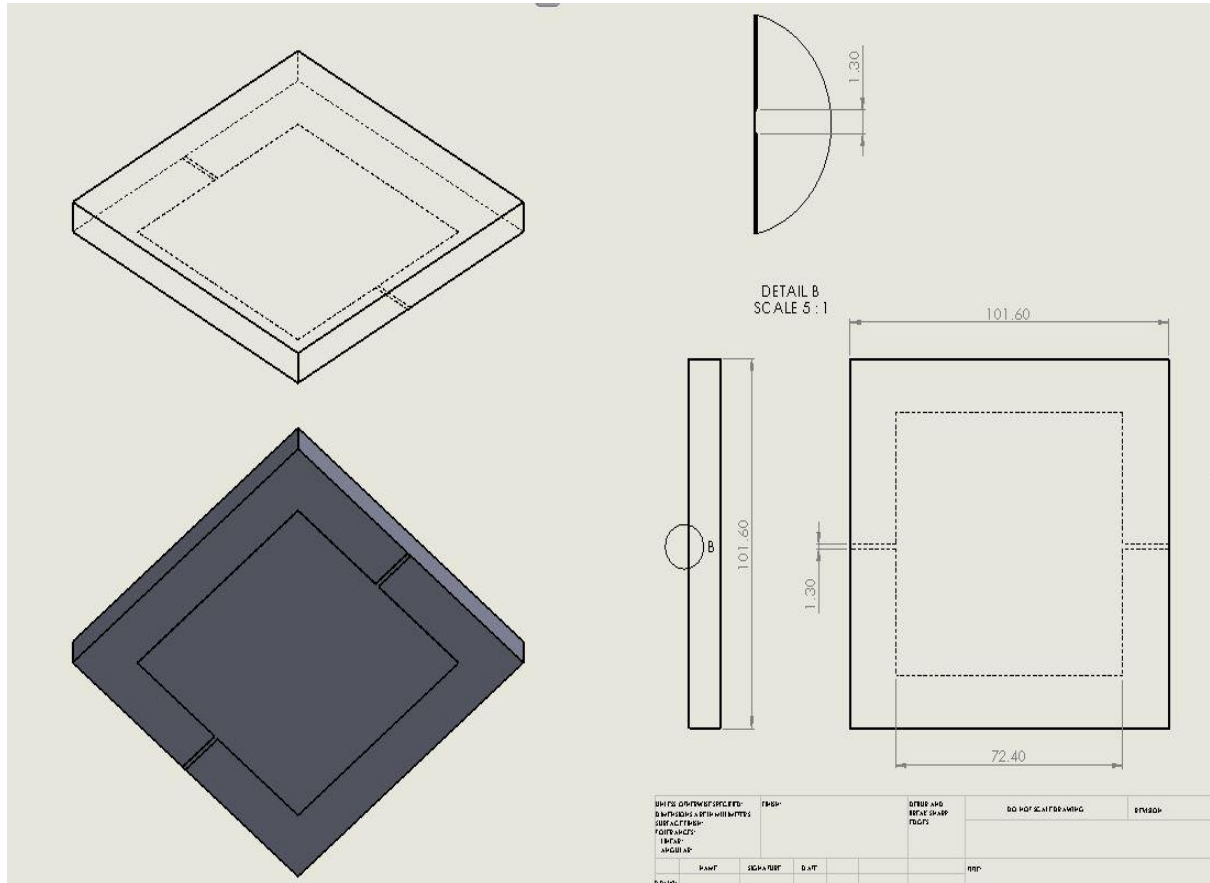
โดยชิ้นส่วนป้องกัน หรือ แผ่น Cover แบบที่ 1 ได้มีการออกแบบไว้ทั้งหมด 3 ส่วน โดยแต่ละส่วนนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความหนาของแผ่น Cover เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 3.1 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 1

3.1.2 ชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 2

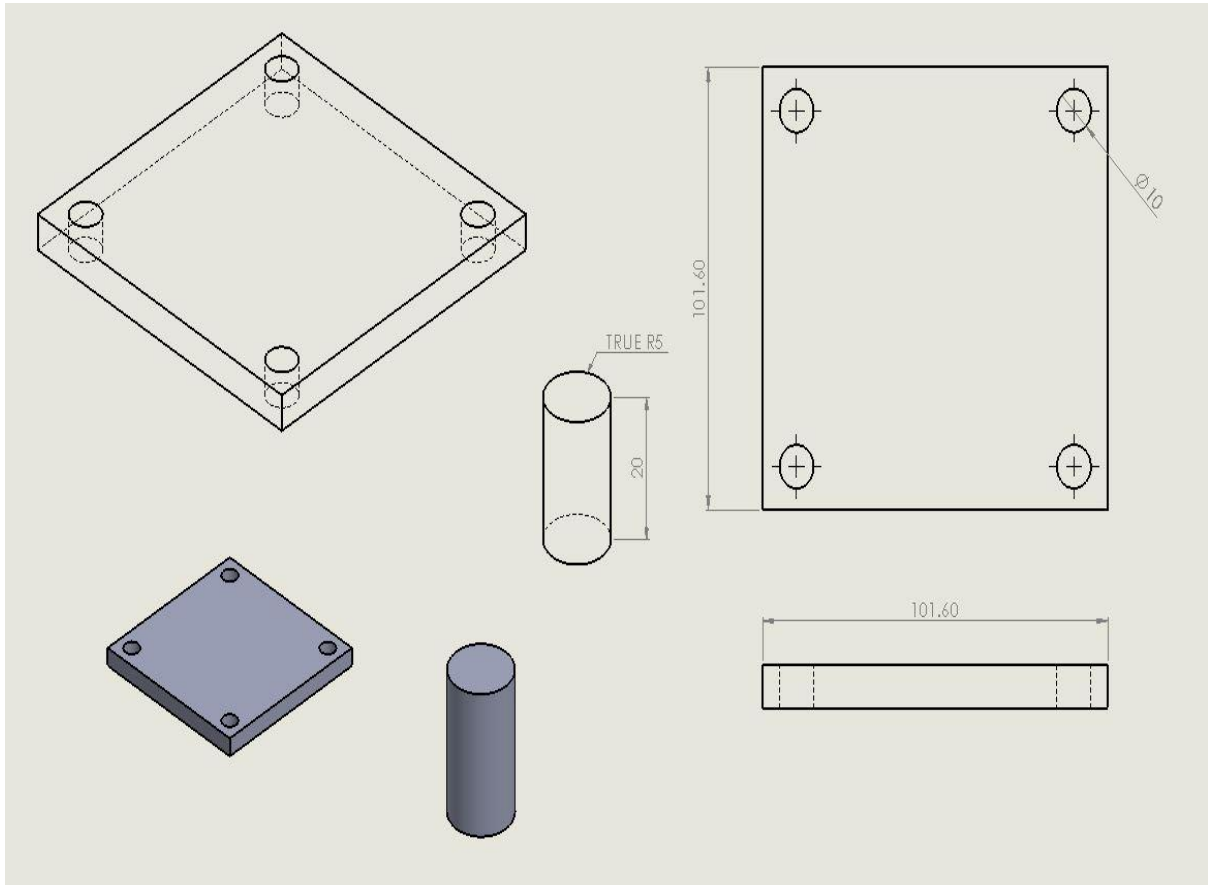
มีการเจาะแผ่น Cover ให้มีขนาดความลึกเท่ากับความหนาของแผ่น Piezoceramic sheet (ชั้นล่าง) และมีการเพิ่มเติมส่วนของความหนาที่หายไปที่ส่วนของแผ่น Cover ขึ้นบน ทั้งยังมีการเจาะร่องไว้สำหรับวางสายไฟอีกด้วย



ภาพที่ 3.2 แสดงขนาดของชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 2

3.1.3 ชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 3

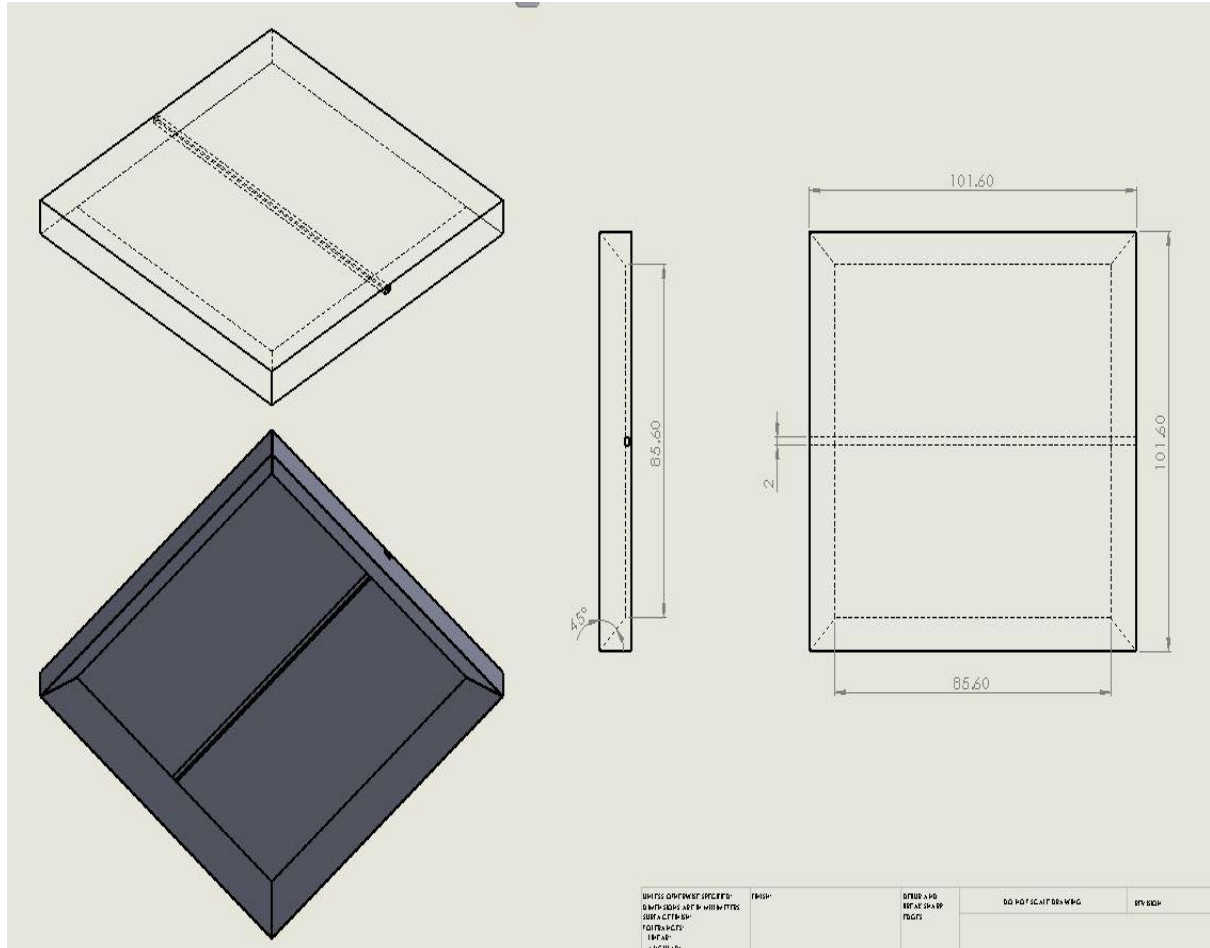
ชั้นส่วนป้องกัน หรือแผ่น Cover มีการเจาะรูที่มุมทั้ง 4 ด้าน สำหรับการใส่เสาในการช่วยรับแรงกด



ภาพที่ 3.3 แสดงขนาดของชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 3

3.2.4 ชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 4

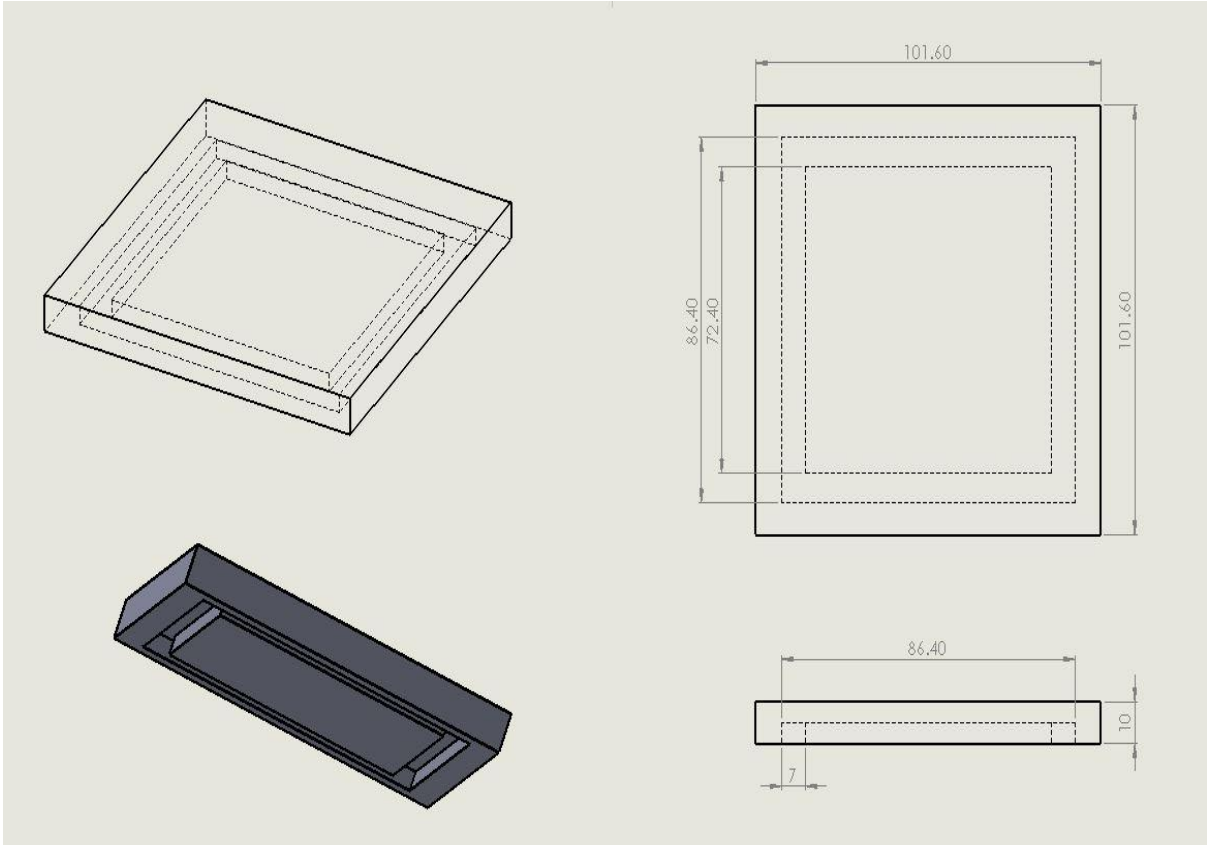
ที่ภายในของชั้นส่วนป้องกัน (Cover) มีการตัดมุมของทั้ง 4 ด้านออกด้วยมุม 45° ทั้งชั้นบนและชั้นล่าง อีกทั้งยังมีการเจาะร่องไว้สำหรับวางสายไฟอีกด้วย



ภาพที่ 3.4 แสดงขนาดของชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 4

3.2.4 ชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 5

ที่ชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แผ่นล่างมีการตัดเนื้อของวัสดุออกเพื่อสร้างกล่องสำหรับใส่แผ่น Piezoceramic sheet มีการเจาะรูสำหรับเดินสายไฟฟ้า และส่วนของแผ่น Cover ด้านบนมีการเจาะร่อง เพื่อให้สามารถประกบกันได้พอดี



ภาพที่ 3.5 แสดงขนาดของชั้นส่วนป้องกัน (Cover) แบบที่ 5

3.2 ขั้นตอนการจำลองผลด้วยโปรแกรม ANSYS

ในการจำลองผล (Simulation) ด้วยโปรแกรม ANSYS จะต้องใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆดังนี้

3.2.1 ค่าของแรงกดที่ใช้ในการจำลองผลมาจากน้ำหนักในการเดิน โดยทิศทางของแรงกดจะกดลงบนแผ่น Cover โดยทั่วพื้นผิว

น้ำหนัก (kg)	แรงกด (N)
50	500
1,000	10,000
2,000	20,000

3.2.2 วัสดุที่นำมาใช้ทำชิ้นส่วนป้องกัน หรือแผ่น Cover คือ Polyethylene (PE) คุณสมบัติที่ใช้ในการทดสอบจำลองผลได้แก่

Property	Value	Unit
Density	950	kg/m ³
Young's modulus	1.1 x 10 ⁹	Pa
Poisson's ratio	0.42	
Shear modulus	3.8732 x 10 ⁸	Pa

3.3 ขั้นตอนการทดลองด้วยตัวต้นแบบจริง

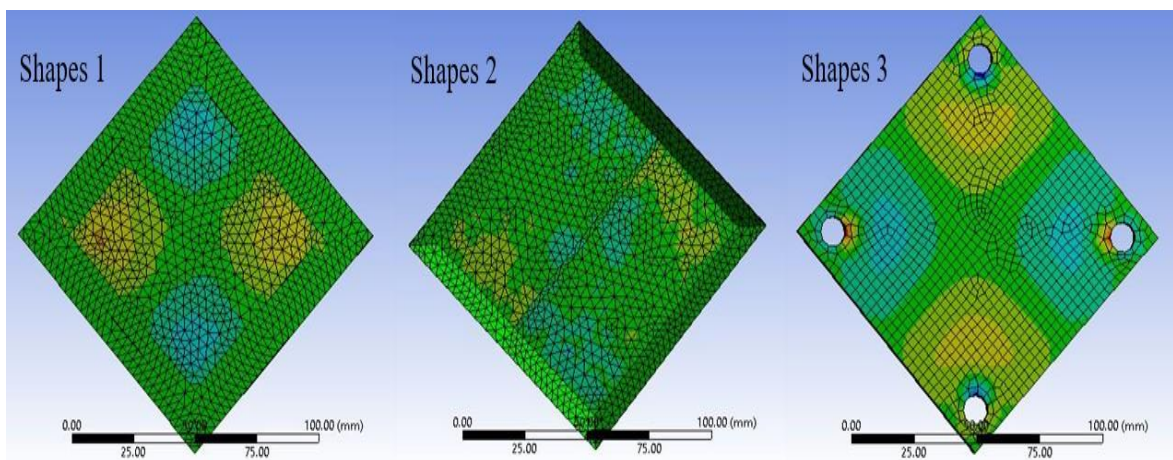
หลังจากการออกแบบชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) ด้วยโปรแกรม Solid works และทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อดูความเสียหายที่เกิดขึ้นแล้ว ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการสร้างตัวต้นแบบของชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) ออกมา จากนั้นทำการประกอบชิ้นส่วนป้องกันเข้ากับแผ่น Piezoceramic sheet โดยการต่อสายไฟฟ้าเข้ากับขั้วของแผ่น Piezoceramic sheet แล้วนำชิ้นส่วนป้องกัน (Cover) มาประกบกันโดยให้ชิ้นส่วนป้องกันหุ้มแผ่น Piezoceramic sheet ทั้งหมด หลังจากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากการรับแรงกดที่เกิดจากการเดินของคน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS

ผลการทดลองการกระจายตัวของแรงกดจากภายนอกจากการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS (5 10 และ 20 MPa) ในส่วนของชิ้นด้านบนของส่วนประกอบท่อหุ้มแผ่น PZT ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 รูปแบบแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.1 แผ่น PZT สามารถรับแรงกดได้สูงสุดเท่ากับ 8.8 MPa และชิ้นส่วน PE ด้านบนสามารถที่จะกระจายแรงกดจากภายนอกไปยังแผ่น PZT ได้อย่างน่าพึงพอใจซึ่งแสดงค่าตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นของส่วนท่อหุ้ม PE จากการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS

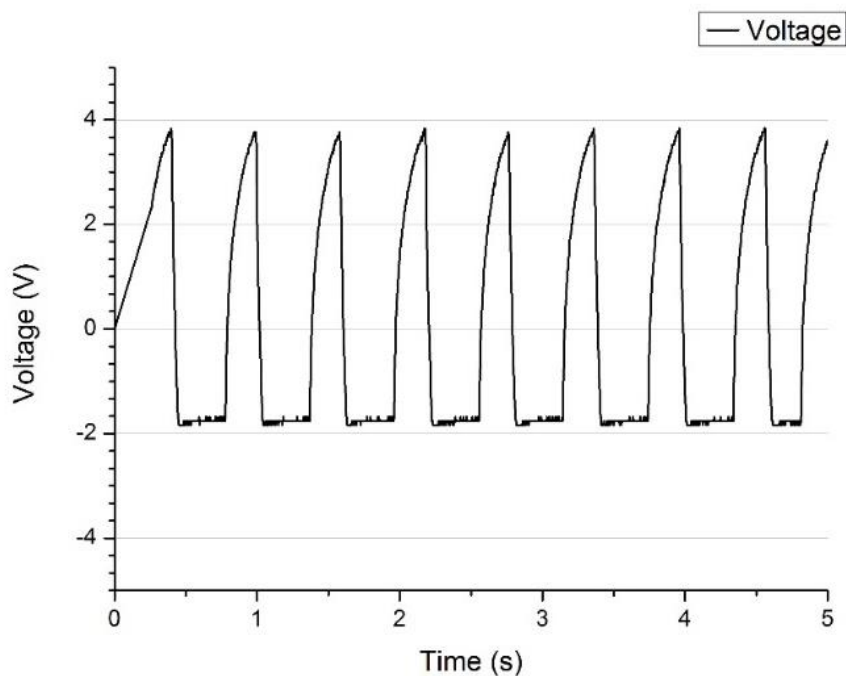
ตารางที่ 4.1 แรงกดภายนอก และผลกระทบของแรงกดที่เกิดขึ้นกับแผ่น PZT ที่ถูกป้องกันด้วยชิ้นส่วนด้านบนของส่วนประกอบ PE ทั้ง 3 รูปทรง

แรงกดจากภายนอก (MPa)	แรงกดที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่น PZT (MPa)		
	รูปทรงที่ 1	รูปทรงที่ 2	รูปทรงที่ 3
5	0.5989	4.7327	4.6588
10	3.5210	8.0546	9.364
20	6.8301	29.235	18.856

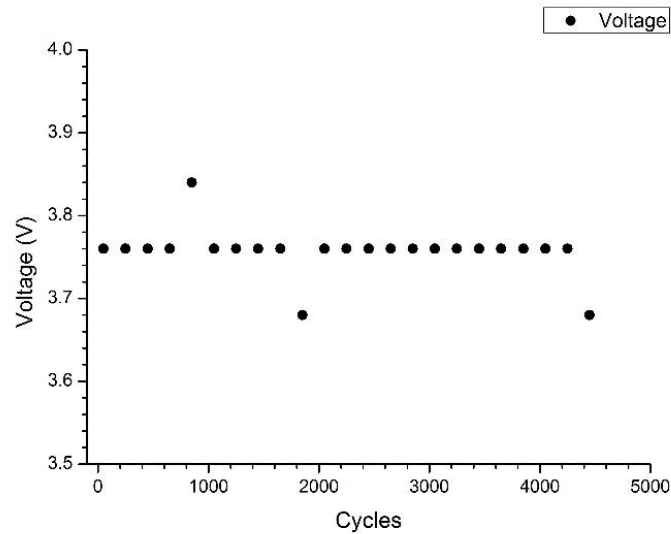
ในการใช้งานจริงโดยทั่วไป ลักษณะของแรงกดจากภายนอกที่กระทำต่อชิ้นส่วนประกอบจะไม่เกิน 1 MPa ดังนั้นเราจึงคาดหวังว่าชิ้นส่วนด้านบนของส่วนประกอบจะสามารถทนต่อแรงกดจากภายนอกในช่วงที่ทำการทดสอบจริงได้

การทดสอบแรงดันไฟฟ้า หรือค่าความต่างศักย์ (Voltage cycle) และผลการทดสอบความล้า (Fatigue) จะดำเนินการทดสอบตามวิธีการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ Experimental procedure กราฟของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4.2

พบว่าชิ้นส่วนป้องกันสามารถป้องกันการแตกหักของแผ่น PZT ได้ หลังจากได้รับแรงกดจากภายนอกทั้งหมด 4500 ครั้ง ที่ขนาดของแรงกดเท่ากับ 5-20 MPa แผ่น PZT ยังสามารถคงอยู่ และไม่เกิดความเสียหาย อีกทั้งชิ้นส่วนป้องกันยังสามารถกระจายแรงกดบางส่วนไปยังแผ่น PZT ได้อย่างน่าพอใจ เป็นผลให้แผ่น PZT สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 3.76 V โดยเฉลี่ย และสามารถสร้างความต่างศักย์ได้สูงที่สุดเท่ากับ 3.84 V ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่าความล้าของวัสดุหลังจากรับแรงกด 4500 ครั้ง โดยค่าความต่างศักย์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 3.76 V ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ที่ 3.5 V



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปของส่วนประกอบท่อหุ้ม PZT ที่ถูกกดด้วยกระบอกสูบ



รูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนครั้งเมื่อส่วนประกอบท่อหุ้ม PZT ถูกแรงกดจากภายนอกกระทำซ้ำๆ ด้วยกระบอกสูบ

ในการทดสอบความล้าของชิ้นส่วนป้องกันได้รับการทดสอบโดยการใช้แรงกดที่เกิดจากกระบอกสูบนิวเมติกส์ (The pneumatic cylinder) กระทำต่อชิ้นส่วนป้องกันแสดงในรูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.76 V ดังนั้นเราจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าชิ้นส่วนป้องกันยังคงสามารถป้องกันได้เป็นอย่างดีเมื่อทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบที่ทำการออกแบบและ ทดสอบนั้นโดยใช้โปรแกรม ANSYS ทำการจำลองก่อนนั้นทำให้ได้ผลที่รวดเร็ว และมีราคาทดสอบที่ต่ำกว่าทำการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างและทดลองจริง ซึ่งพบว่าสามารถป้องกันได้การเสียหายของแผ่นได้จริง และต่อไปถ้าสามารถผลิตในรูปแบบวัสดุผสมที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองจะทำให้สารนี้ใช้งานได้ง่าย และหลากหลายมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

- นำเสนอผลงานการวิจัยในงานสัมมนาระดับนานาชาติ
The First Materials Research Society of Thailand International Conference (1st MRS Thailand International Conference), Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand, October 31st - November 3rd, 2017
- ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ *Materials Today: Proceedings (MRS_2017)*
เรื่อง *Development and fatigue testing of a PZT assembly with PE housing for harvesting mechanical energy*

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

1. X. Xu, D. Cao, H. Yang, M. He, Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement, International Journal of Pavement Research and Technology (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.011>
2. Zhao Hongduo, Liang Yinghui, Ling JianMing . Based on piezoelectric energy harvesting technology of asphalt pavement [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University , 2011,S1:62-66.
3. Zhengbao Yang, Yan Qing Wang, Lei Zuo, Jean Zu, Introducing arc-shaped piezoelectric elements into energy harvesters, Energy Conversion and Management. 148(2017), 260-266
4. Guan M, Liao W-H. Design and analysis of a piezoelectric energy harvester for rotational motion system. Energy Convers Manage 2016;111:239–244.
5. Xu J, Tang J. Multi-directional energy harvesting by piezoelectric cantileverpendulum with internal resonance. Appl Phys Lett 2015;107(21):213902.
6. Lin H et al. Analysis of an array of piezoelectric energy harvesters connected in series. Smart Mater Struct 2013;22(9):094026.
7. R.M. Toyabur, M. Salauddin, Jae Y. Park, Design and experiment of piezoelectric multimodal energy harvester for low frequency vibration, Ceramics International 43 (2017) S675–S681
8. PIEZO SYSTEMS, INC. PSI-5H4E piezoceramic sheets and their properties [Online]. Available: <http://www.piezo.com/prodsheet2sq5H.html>
9. Sun , Du Jianhong , Wang Hong Bing , Shang Guangqing . Analysis on pavement performance of piezoelectric vibration Harvester [J]. piezoelectric sound and light , 2013,04:556-560.

ภาคผนวก

- ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ *Materials Today: Proceedings (MRS_2017)*
เรื่อง *Development and fatigue testing of a PZT assembly with PE housing for harvesting mechanical energy*



MRS_2017

Development and fatigue testing of a PZT assembly with PE housing for harvesting mechanical energy

Woratat Punsawat, Krittanat Khaosa-ard, Worawut Makcharoen*

*College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand*

Abstract

This paper presents the results of simulation of design and a real fatigue test of a protected PZT assembly for energy harvesting application. The protection was from a new encapsulation design. Based on a previous unpublished research, simulation runs with ANSYS program to simulate the effect of stress on Polyethylene (PE) protective layers of various shapes were performed and the results demonstrated that PE layers of rectangular shape were able to distribute an external pressure at a suitable amount to the PZT sheet and withstand repeated pressings from an external pressure in the range of 5-20 MPa. These results enabled us to choose the best shape of PZT sheet and PE housing assembly. The fatigue parameter of the assembly was determined by subjecting the assembly to a repeated external force. And the voltage cycle of the encapsulated PZT assembly was measured with an oscilloscope. The voltage cycle test results show similarly-shaped cycles with a mean voltage of 3.76 V both before and after the assembly was subjected repeatedly to an external force. The fatigue parameter was defined as a minimum voltage that the assembly could deliver after a large number of repeated pressings by an external pressure in the range of 5-20 MPa. Our criterion of successful protection was a minimum of 3.5 V after 4,500 pressings. Therefore, we concluded that the constructed assembly was able to withstand an external operating pressure satisfactorily.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and/or Peer-review under responsibility of The First Materials Research Society of Thailand International Conference.

Keywords: Encapsulation, PZT, ANSYS Simulation, Voltage, Fatigue

* Corresponding author. Tel.: +666-901-7322; fax: +662-329-8263.

E-mail address: kmworawu@gmail.com, warmak77@gmail.com

Introduction

Nowadays, energy is one of the most important issues to consider. Due to increasing energy consumption and limited resources, it is inevitable that alternative energy sources need to be developed. An alternative energy source is an important means of sustainable energy provision for the demands of people and the industries. In this regard, piezoelectric sheet (PZT, Lead Zirconate Titanate) has gained increasing attention as a converter of mechanical energy into electrical energy. One of the unique characteristics of PZT is that its conversion action is reversible, meaning that a material that exhibits a direct piezoelectric effect (generation of electricity when stress is applied) also exhibits the converse piezoelectric effect (generation of stress when an electric field is applied) [1-6]. Piezoelectric effect is very useful in many applications that involve production and detection of sound, generation of high voltage, and harvest of energy from vibration devices [7]. This effect makes it useful to develop a piezoelectric sheet that is able to withstand external pressure and produce electrical energy reliably.

One of the most significant challenges for the design of PZT sheet for energy conversion is to obtain an assembly that is able to withstand repeated strong external mechanical force in its conversion operation without getting damaged. Based on a previous published research, we have obtained the best shape of PE layers for protecting a PZT sheet from ANSYS simulation runs. The criterion for a satisfactory shape was that the layers with this shape would have to distribute an external pressure evenly to the PZT sheet at an appropriate amount (no more than 8.8 MPa) so as not to cause any damages to the sheet. In this paper, we present the simulation results of the distributed external force to the PZT sheet by various shapes of protective PE layers

Because a piezoelectric sheet is very fragile with a thickness of only 0.127 mm [8], protection from mechanical damage is an extremely important issue. This issue has led to this study of developing protective parts to prevent fracture of a piezoelectric sheet and performing fatigue test to check the reliability of the developed assembly.

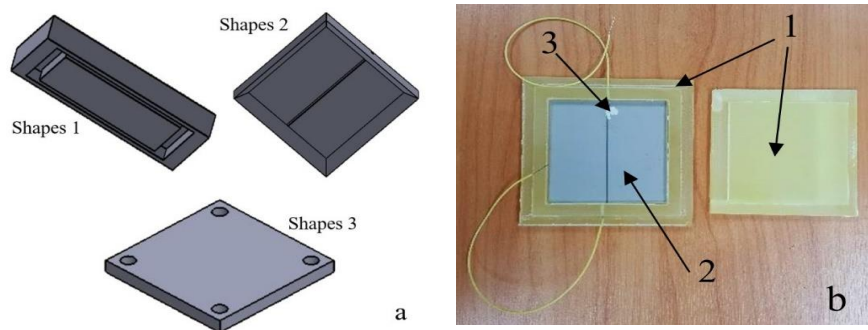


Fig 1. (a) Designed PZT assembly (upper part); (b) Protective part (1), piezoelectric sheet (2) and wires connected to silver paste (3)

Experimental Procedure

1. Piezoelectric sheet (PZT Sheet)

PZT sheet was purchased from PIEZO SYSTEMS, It was Type PSI-5H4E. It was a 4.72 x 72.4 mm² square with a thickness of 127.0 mm. The electrodes were at the upper and lower parts of the sheet [8].

2. Preparation of the protective part

Both layers of the protective part were made from Polyethylene (PE) [9]. They were the upper part (for absorbing external pressure) and the base part for holding the PZT sheet. Both parts were $10.16 \times 10.16 \times 1 \text{ cm}^3$ in size. A polyethylene sheet was machined and milled by a CNC machine to obtain the desired shape and size of the upper part,

While another polyethylene sheet was machined into a shape of a box, the base part for holding a piezoelectric sheet of $72.4 \times 72.4 \text{ mm}^2$ in size. The upper part was designed to cover the PZT sheet and fit into the base part perfectly. The whole assembly was like a closed rectangular box 64.1cm thick. It can be seen in Fig. 1 that the base part was drilled on the top and bottom sides of to enable wire insertion for measuring voltage. Silver paste acted as glue to connect the wires to the piezoelectric sheet. The assembly was held together with multipurpose Silicone.

From a previous study, an investigation into a suitable kind of protection material pointed out to Polyethylene sheet as a good material. In this design, the polymeric material (Polyethylene: PE) of the above-mentioned size was shown to be able to withstand a force of 20 MPa pressing on the piezoelectric sheet plane by ANSYS simulation.

In the external pressing test, we used a Pneumatic cylinder to do the pressing that was able to generate a pressure of up to 20 MPa. The protected area that was pressed by the cylinder was $7.30 \times 7.30 \text{ cm}^2$ in size. The test was performed by applying the pneumatic cylinder to the assembly repeatedly and measuring the voltage from the PZT sheet with an oscilloscope. The fatigue parameter, the minimum voltage that the assembly was able to produce after 4,500 pressings, was found to be 3.68 V, well above our criterion of 3.5 V.

Results and Discussion

The ANSYS simulation results of distributed external pressures (5, 10, and 20 MPa) at the assembly with 3 different shapes of the upper PE housing to the PZT sheet an show in Fig. 2. The PZT sheet could withstand pressure up to 8.8 MPa [8], and the rectangular shape PE upper layer was able to distribute those external pressures to the PZT sheet at a satisfactory amount (Table 1).

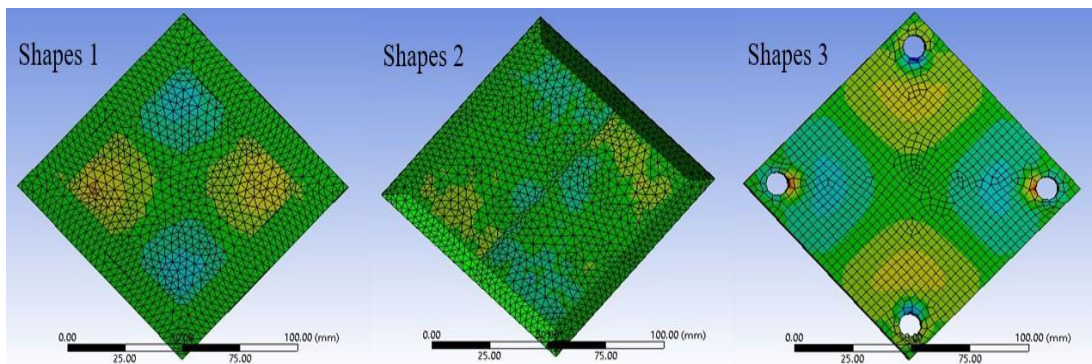


Fig 2. Impact of PE housing on simulation results with the ANSYS simulation of all shapes

Table 1 External pressures and the resulted pressure at the PZT sheet protected by a PE protective upper layer of 3 shapes

External pressure (MPa)	Pressure at the PZT sheet (MPa)		
	Shapes 1	Shapes 2	Shapes 3
5	0.5989	4.7327	4.6588
10	3.5210	8.0546	9.364
20	6.8301	29.235	18.856

In a real-world application, a typical external force acting on the assembly would be no more than 1 MPa; therefore, we expected that the rectangular protective PE upper part should be able to withstand an external force in this range well and so we did a real physical test.

Voltage cycle test and fatigue results were performed according to the method described in the Materials and Methods section above. The graph of voltage cycles is shown in Fig. 3.

It was found that the protective parts were able to protect fracturing of piezoelectric sheet after 4,500 pressings of an external pressure of 5-20 MPa. The PZT sheet remained in place and was not damaged. The protective parts also satisfactorily distributed some of the external pressure to the PZT sheet; as a result, the sheet was able to generate a mean voltage of 3.76 V and a maximum voltage of 3.84 V, as shown in Fig. 4. The fatigue parameter, the standard of voltages from 4,500 pressings was 3.76 V, well within our specified criterion of 3.5 V.

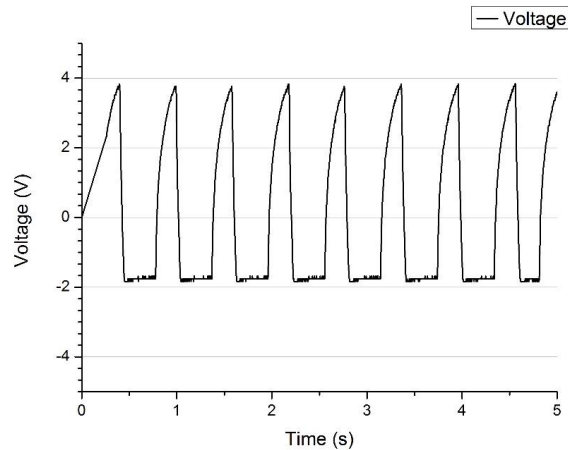


Fig 3. The relationship between the voltages that occurred over time as the PZT assembly was repeatedly pressed by a cylinder

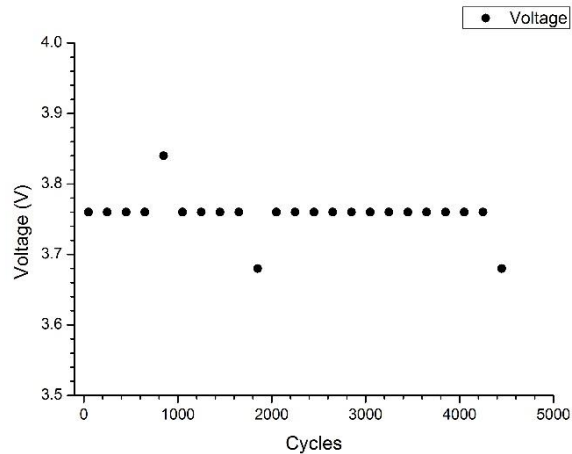


Fig 4. Voltage versus number of cycles when the PZT assembly was repeatedly pressed by a cylinder.

In fatigue test of protective parts were tested by applying pressure from the pneumatic cylinder to the protective part regularly. According to Fig. 4, the voltage that regularly occurs, which average voltages are 3.76 V. So, can be clearly predicted that the protective parts are still as well protected when continuously tested.

Conclusion

Polyethylene housing were developed to protect a PZT assembly, and the assembly was fatigue tested by repeatedly applying an external pressure from a pneumatic cylinder. It was found that the protective layers were able to prevent fracturing of the PZT sheet satisfactorily and distribute a useable amount of external pressure to it which resulted in a mean voltage produced of 3.76 V.

Acknowledgement

This work was supported by college of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

References

- [1] X. Xu, D. Cao, H. Yang, M. He, Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement, International Journal of Pavement Research and Technology (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.011>
- [2] Zhao Hongduo, Liang Yinghui, Ling JianMing . Based on piezoelectric energy harvesting technology of asphalt pavement [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University , 2011,S1:62-66.
- [3] Zhengbao Yang, Yan Qing Wang, Lei Zuo, Jean Zu, Introducing arc-shaped piezoelectric elements into energy harvesters, Energy Conversion and Management. 148(2017), 260-266
- [4] Guan M, Liao W-H. Design and analysis of a piezoelectric energy harvester for rotational motion system. Energy Convers Manage 2016;111:239–244.
- [5] Xu J, Tang J. Multi-directional energy harvesting by piezoelectric cantileverpendulum with internal resonance. Appl Phys Lett 2015;107(21):213902.
- [6] Lin H et al. Analysis of an array of piezoelectric energy harvesters connected in series. Smart Mater Struct 2013;22(9):094026.
- [7] R.M. Toyabur, M. Salauddin, Jae Y. Park, Design and experiment of piezoelectric multimodal energy harvester for low frequency vibration, Ceramics International 43 (2017) S675–S681
- [8] PIEZO SYSTEMS, INC. PSI-5H4E piezoceramic sheets and their properties [Online]. Available: <http://www.piezo.com/prodsheet2sq5H.html>
- [9] Basic Organic Chemistry 2. 2015. (Polymers). [Online]. Available: <http://chemsci.kku.ac.th/arayan/polymer/C51.pdf>
- [10] Sun , Du Jianhong , Wang Hong Bing , Shang Guangqing . Analysis on pavement performance of piezoelectric vibration Harvester [J]. piezoelectric sound and light , 2013,04:556-560.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย วรวิทย์ มรรคเจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ. (ฟิสิกส์)	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2545
วท.ม. (วัสดุศาสตร์)	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2548
Ph.D. (Materials Science)	Materials Science	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2554

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

เทคโนโลยีฟิล์มบาง

การกัดกร่อนของวัสดุ

วัสดุหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2542 - 2554	ทุนพัฒนาผู้มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์	พสวท.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

1. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavorniyutikarn, David P. Cann and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties and microstructure of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", *Applications of Ferroelectrics, 2008. ISAF 2008. 17th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, **1 No.4693905**.
2. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavorniyutikarn and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", **AIP Conference Proceedings, 25, (2009) 1151 p. 9-12**.
3. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujjanagul and Tawee Tunkasiri, "The effect of GeO_2 and In_2O_3 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics prepared via vibro-milling method", *Ferroelectric, Volume 415, Issue 1, 2011, Page 113-121*.
4. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujjanagul and Tawee Tunkasiri, "Effect of Zirconium Substitution on the Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics Prepared via Vibro-Milling Method", *Proceeding of the 28th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, January 2011*.
5. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujjanagul and Tawee Tunkasiri, "Effect of Cesium and Cerium Substitution on the Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics", *Ceramics International, Volume 38, Supplement 1, January 2012, Pages S65-S68*.

การเสนอผลงานวิชาการ

International Conference:

1. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavorniyutikarn, David P. Cann and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties and Microstructure of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", *IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics (ISAF 2008 Conference), Santa Fe, New Mexico, USA, 24-27 February 2008*.

2. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornyutikarn and Tawee Tunkasiri, "Effects of the microstructure and dielectric properties on Mn doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics", ***International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-'08 & IWOFM-2)***, The Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, 22-25 April 2008.
3. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornyutikarn and Tawee Tunkasiri, Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ Ceramics, ***The Advance Materials and Nanotechnology (AMN4 Conference)***, University of Otago, New Zealand, 8-12 February 2009.
4. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, The Effect of In_2O_3 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, ***The 10th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-10)***, Yokohama, Japan, 20-24 June, 2010.
5. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, The Effect of GeO_2 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, ***The 10th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-10)***, Yokohama, Japan, 20-24 June, 2010.
6. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, Dielectric properties of Cs_2CO_3 dope CCTO ceramics, ***The 7th Asian Meeting on Ferroelectricity and The 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMF-AMEC-2010)***, Jeju Island, Korea, 28 June – 1 July, 2010.
7. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, Effect of indium and cerium substitution on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, ***The 7th Asian Meeting on Ferroelectricity and The 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMF-AMEC-2010)***, Jeju Island, Korea, 28 June – 1 July, 2010.